





Lehrstuhl für  
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik  
der Technischen Universität München

## **Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen**

Dipl.-Ing. (Univ.)

**Florian Hagemann**

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:                   Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Schiller

Prüfer der Dissertation:

1.       Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. F. Zäh
2.       Univ.-Prof. Dr. med., Dr.-Ing. habil. E. Wintermantel

Die Dissertation wurde am 03.07.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 13.10.2008 angenommen.



Florian Hagemann

**Ein formflexibles Werkzeug  
für das Rapid Tooling beim Spritzgießen**



Herbert Utz Verlag · München

**Forschungsberichte IWB**

Band 226

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2009

ISBN 978-3-8316-0861-4

Printed in Germany  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

## 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 Potenziale 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 *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren und 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 *iwb*. Diese reichen von der Produktentwicklung über die Planung von Produktionssystemen hin zu den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb*-Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Michael Friedrich Zäh

Gunther Reinhart



# Vorwort

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

Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Friedrich Zäh und Herrn Professor Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Professor Dr. med. Dr.-Ing. habil Erich Wintermantel, dem Leiter des Lehrstuhls für Medizintechnik der Technischen Universität München, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Ebenso bedanke ich mich aufrichtig bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben.

Ein wesentlicher Dank gilt auch meiner Familie, der ich diese Arbeit widme. Dabei möchte ich besonders meinem Vater Herrn Detlef Hagemann und meiner Mutter Frau Renate Hagemann für die großzügige und verständnisvolle Unterstützung während meines gesamten akademischen Werdegangs danken.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Alexandra. Ohne ihre Unterstützung, ihr unerschütterliches Vertrauen und ihre Geduld während der unzähligen Abende, Wochenenden, Urlaubs- und Feiertage, die die Fertigstellung meiner Dissertation in Anspruch genommen hat, wäre diese schlichtweg unmöglich gewesen.

Augsburg, im Oktober 2008

*Florian Hagemann*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XI</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen.....</b>	<b>XIX</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Situationsanalyse des Wirtschaftsstandorts Deutschland .....	1
1.2 Begriffsdefinition.....	4
1.3 Ausgangssituation.....	5
1.3.1 Technische Aspekte des konventionellen Werkzeug- und Formenbaus am Beispiel des Spritzgießens .....	5
1.3.2 Wirtschaftliche Aspekte des konventionellen Werkzeug- und Formenbaus am Beispiel des Spritzgießens .....	9
1.3.3 Fertigungstechnologien für das Rapid Tooling .....	10
1.3.4 Ansätze der Formflexibilität im Werkzeug- und Formenbau.....	11
1.4 Motivation und Zielsetzung .....	12
1.5 Gliederung der vorliegenden Arbeit .....	15
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>17</b>
2.1 Rapid-Technologien im Bereich des Spritzgießens.....	17
2.1.1 Rapid Tooling mittels Metall verarbeitender generativer Fertigungsverfahren.....	21

2.1.1.1	Direkte Metall verarbeitende Verfahren .....	21
2.1.1.2	Indirekte Metall verarbeitende Verfahren.....	22
2.1.2	Rapid Tooling mittels konventioneller Fertigungsverfahren .....	24
2.1.2.1	High Speed Cutting (HSC).....	24
2.1.2.2	Hochvorschubfräsen .....	25
2.1.3	Rapid Tooling mittels Verfahrenskombinationen.....	26
2.1.3.1	Controlled Metal Build Up .....	26
2.1.3.2	Innovaris Alchemy-Technologie .....	27
2.1.3.3	Metall-Spray-Technologie .....	27
2.1.3.4	Präzisions-Laserstrahlsintern .....	28
2.1.4	Rapid Tooling durch Modularisierung.....	29
2.1.4.1	Space Puzzle Molding .....	29
2.1.4.2	ecoMold .....	30
2.1.4.3	Lamellenwerkzeuge für die Prototypenherstellung .....	31
2.2	Ansätze zur Realisierung von Wiederverwendbarkeit durch Formflexibilität.....	32
2.2.1	Reconfigurable Tooling Systems (RTS).....	32
2.2.2	Automatisiertes Modellieren großflächiger Sandgussformen.....	33
2.2.3	Sonstige modulbasierte, wiederverwendbare Werkzeugsysteme ....	35
<b>3</b>	<b>Handlungsbedarf vor dem Hintergrund der bestehenden Defizite im Rapid Tooling .....</b>	<b>41</b>
3.1	Zusammenfassung von Vor- und Nachteilen .....	41
3.1.1	Metall verarbeitende generative Fertigungsverfahren im Bereich des Rapid Tooling.....	41

3.1.2	Konventionelle Fertigungsverfahren im Bereich des Rapid Tooling .....	42
3.1.3	Rapid Tooling mittels Verfahrenskombinationen .....	43
3.1.4	Rapid Tooling durch Modularisierungsansätze .....	44
3.1.5	Wiederverwendbare Werkzeugsysteme .....	45
3.2	Identifizierter Handlungsbedarf.....	46
<b>4</b>	<b>Methode zur Realisierung von Formflexibilität in der Werkzeugentwicklung.....</b>	<b>49</b>
4.1	Motivation für die Erarbeitung einer allgemeingültigen Methode .....	49
4.2	Entwickelte und adaptierte Methodenbausteine .....	50
4.3	Methodenablauf und -anwendung der Phase 1 am Beispiel des Spritzgießens.....	53
4.3.1	Anforderungsmatrix.....	53
4.3.2	Korrelationsmatrix.....	55
4.3.3	Lösungstabelle .....	57
4.4	Methodenablauf und -anwendung der Phase 2 am Beispiel des Spritzgießens.....	58
4.4.1	Anforderungsermittlung .....	58
4.4.2	Problemanalyse und -strukturierung.....	60
4.4.3	Lösungssuche und -strukturierung.....	62
4.4.4	Lösungsauswahl und Konsistenzprüfung .....	63
<b>5</b>	<b>Konzeption und Realisierung eines formflexiblen Spritzgießwerkzeugs.....</b>	<b>67</b>
5.1	Konzept des formflexiblen Werkzeugs für das Spritzgießen .....	67
5.2	Realisierung des formflexiblen Spritzgießwerkzeugs .....	72

5.2.1	Werkzeugrahmen .....	72
5.2.2	Spannprinzip und -mechanismus .....	75
5.2.3	Integration von spritzgießrelevanten Funktionen .....	83
5.2.4	Reduktion der Nadelrasterung zur Optimierung des Spritzgießergebnisses.....	88
5.3	Rechnergestützte Positioniereinheit zur automatischen Nadeljustage .....	92
5.3.1	Software-Standardoptionen.....	94
5.3.2	Software-Zusatzaoptionen .....	99
5.3.3	Hardware-Positioniereinheit .....	104
5.3.4	Hardware-Steuereinheit .....	106
<b>6</b>	<b>Anwendungsszenarien und Erprobung des formflexiblen Spritzgießwerkzeugs.....</b>	<b>109</b>
6.1	Notwendigkeit der experimentellen Verifikation.....	109
6.2	Definition von Anwendungsszenarien .....	110
6.2.1	Abfräsen von Nadelköpfen zur Reduktion der Nadelrasterung am Spritzling .....	110
6.2.2	Verwendung von formgebenden Zwischenschalen .....	111
6.2.3	Direkte Verwendung der Nadelköpfe zur Formgebung.....	112
6.3	Definition der Referenzgeometrie .....	113
6.3.1	Anforderungen an das Referenzbauteil aus Sicht des Spritzgießens .....	113
6.3.2	Konstruktive Ausgestaltung des Referenzbauteils.....	114
6.4	Experimentelle Verifikation .....	116
6.4.1	Versuchsplanung .....	116
6.4.2	Versuchsdurchführung und -auswertung .....	118

<b>7 Wirtschaftliche Bewertung des formflexiblen Werkzeugs für das Spritzgießen.....</b>	<b>125</b>
7.1 Vorgehensweise.....	125
7.2 Definition von Bewertungsszenarien.....	126
7.3 Systematische Ein- und Durchführung der Bewertungsmethode .....	128
7.3.1 Bewertungsklasse „Kosten“ .....	130
7.3.2 Bewertungsklasse „Zeit“ .....	133
7.3.3 Bewertungsklasse „Qualität“ .....	135
7.3.4 Bewertungsklasse „Technologie“.....	136
7.4 Handlungsempfehlung auf Basis der wirtschaftlichen Bewertung.....	138
<b>8 Schlussbetrachtung .....</b>	<b>147</b>
8.1 Zusammenfassung .....	147
8.2 Ausblick .....	150
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>153</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>165</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Phasen eines Spritzgießzyklus am Beispiel einer Schneckenkolbenmaschine .....	6
Abbildung 2: Einfach-Spritzgießwerkzeug für einen Verschlussdeckel (GASTROW 1998) .....	8
Abbildung 3: Motivation und Zielsetzung.....	13
Abbildung 4: Struktur der vorliegenden Arbeit.....	16
Abbildung 5: Prozessablauf bei generativ arbeitenden Verfahren (in Anlehnung an MEINDL 2004).....	18
Abbildung 6: Physikalische und chemische Vorgänge beim „Indirekten Metall-Laser-Sintern“ (BREITINGER 2003).....	23
Abbildung 7: Wärmeausbreitung bei der konventionellen Zerspanung und beim Hochgeschwindigkeitsfräsen (PIEVERLING 2003) .....	24
Abbildung 8: Ergebnis und Teilschritte des ecoMold-Verfahrens (HENNIGS et al. 2004) .....	30
Abbildung 9: Prozessablauf bei der automatisierten Herstellung von Sandgussformen (SCHAAF 2005) .....	34
Abbildung 10: Flexibles Umformwerkzeug .....	35
Abbildung 11: Verfahrensablauf bei einem NPT-Werkzeug .....	37
Abbildung 12: Entwicklungsunterstützende Methode zur Realisierung von Formflexibilität.....	50
Abbildung 13: Auswahl und Gewichtung von Phase-1-Anforderungen beim Spritzgießen (Ausschnitt) .....	54
Abbildung 14: Ausschnitt der Bewertung von indirekt und direkt bewertbaren Anforderungen .....	56
Abbildung 15: Exemplarische Lösung der Korrelationsmatrix (Ausschnitt) .....	57
Abbildung 16: Problemstrukturierung zur Lösungsfindung (Ausschnitt) .....	61
Abbildung 17: Formgebungsprinzip des Werkzeugsystems .....	67

Abbildung 18: Prinzipieller Ablauf beim Einsatz des Werkzeugsystems.....	68
Abbildung 19: Struktur des Werkzeugrahmens .....	74
Abbildung 20: Nadelspannkonzept mit zwei Blenden zur Ansteuerung einer Nadelposition in der xy-Ebene.....	76
Abbildung 21: Mechanisches Verspannen des Nadelpakets durch Druckstücke .....	78
Abbildung 22: Spannprinzip des pneumatischen Muskels im Werkzeugsystem.....	80
Abbildung 23: Prinzipaufbau des pneumatischen Muskels (FESTO 2006).....	80
Abbildung 24: Realisierung des pneumatischen Spannsystems (für den Einstellvorgang) .....	82
Abbildung 25: Aufbau des Blendenadapters zur Integration von Auswerferhülsen.....	85
Abbildung 26: Auswerfersystem im formflexiblen Werkzeug .....	86
Abbildung 27: Mikroskop-Aufnahmen eines Bauteils, hergestellt durch einen Abgießversuch.....	89
Abbildung 28: Prozesskette und Schnittstellen beim Einstellvorgang der Nadeln.....	92
Abbildung 29: Graphische Benutzeroberfläche (GUI) der entwickelten Software .....	95
Abbildung 30: VRML-Darstellung des Berechnungsschritts „Laden“.....	96
Abbildung 31: Vorberechnung relevanter Koordinaten.....	97
Abbildung 32: Zusammenfassung des Ablaufs zur Generierung der virtuellen Werkzeugkavität .....	98
Abbildung 33: Ablauf zur automatischen Generierung von Zwischenschalen.....	102
Abbildung 34: Entwickelte Positioniereinheit .....	105
Abbildung 35: Integration eines Kühlkanals in eine Zwischenschale .....	111
Abbildung 36: Verwendetes Benchmarkbauteil mit stark vereinfachter Geometrie für die Qualifizierung des formflexiblen Werkzeugsystems .....	115
Abbildung 37: Haupteffektediagramm der Mittelwerte .....	121
Abbildung 38: Auf Zielgrößen bezogene Wirkungsflächendiagramme .....	122

Abbildung 39: Anwendung des formflexiblen Werkzeugs .....	124
Abbildung 40: Ablauf der wirtschaftlichen Bewertung.....	129
Abbildung 41: Vergleich der Gesamtkosten zwischen Szenario 2 und Szenario 7 .....	143
Abbildung 42: Vergleich der Gesamtzeit zwischen Szenario 2 und Szenario 7 .....	143
Abbildung 43: Ansatz zur Weiterentwicklung des formflexiblen Werkzeugkonzepts als 6-seitiges Werkzeug .....	151
Abbildung 44: Übersicht des Programms FlexEdit (Unified-Modelling-Language-Diagramm).....	166
Abbildung 45: Skalarprodukt zur Ermittlung des Winkels zwischen zwei Vektoren.....	171
Abbildung 46: Anpassung der Koordinaten an die Nadelrasterung .....	173



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung in Motivationssichten und Ableitung von Zielen.....	14
Tabelle 2: Morphologischer Kasten aus Phase 1 .....	58
Tabelle 3: Ausschnitt eines morphologischen Kastens für die spätere Lösungsauswahl.....	62
Tabelle 4: Bewertung und Auswahl der Lösungsvorschläge.....	64
Tabelle 5: Auslegungsparameter des Spannsystems beim Spritzgießen .....	77
Tabelle 6: Versuchsplan nach Taguchi für die Untersuchung der Anwendungsszenarien: Faktorstufen (links) und (Zahlenwerte) rechts ....	117
Tabelle 7: Verwendeter Versuchsplan für die Qualifizierung des formflexiblen Werkzeugs .....	118
Tabelle 8: Versuchsplan mit Bewertung der Ergebnisse des Anwendungs- szenarios „Abfräsen von Nadelköpfen zur Reduktion der Nadelrasterung am Spritzling“ .....	119
Tabelle 9: Antworttabelle der errechneten Mittelwerte .....	120
Tabelle 10: Szenarienbasierte Ergebnisse der Versuchsreihen.....	123
Tabelle 11: In der Bewertung verwendete Szenarien .....	127
Tabelle 12: Präferenzmatrix der Bewertungsklasse „Kosten“ .....	131
Tabelle 13: Formblatt der Bewertungsklasse „Kosten“ am Beispiel von Szenarium 2 .....	132
Tabelle 14: Präferenzmatrix der Bewertungsklasse „Zeit“ .....	134
Tabelle 15: Formblatt der Bewertungsklasse „Zeit“ am Beispiel von Szenarium 2 ....	135
Tabelle 16: Präferenzmatrix der Bewertungsklasse „Qualität“ .....	136
Tabelle 17: Formblatt der Bewertungsklasse „Qualität“ am Beispiel von Szenarium 2 .....	136
Tabelle 18: Formblatt der Bewertungsklasse „Technologie“ am Beispiel von Szenarium 2 .....	137

Tabelle 19: Auf Stückzahlen beruhende Analysegruppen .....	138
Tabelle 20: Auswertung der ersten Analysegruppe .....	139
Tabelle 21: Auswertung der zweiten Analysegruppe .....	140
Tabelle 22: Auswertung der dritten Analysegruppe .....	141
Tabelle 23: Auswertung der vierten Analysegruppe.....	142
Tabelle 24: Anwendungsmatrix des formflexiblen Spritzgießwerkzeugs .....	144

## Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

3D	dreidimensional
A	Anwendungsvariante
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
Abk.	Abkürzung
A/D	analog/digital
AG	Aktiengesellschaft
al.	alii (andere)
AS	Auswerferseite
ASCII	American Standard Code for Information Interchange (amerikanischer Standardcode für Informationsaustausch)
Av.	Average (Durchschnitt)
bar	báros (Druck)
blz	Bayerisches Laserzentrum gGmbH
bzw.	beziehungsweise
C	Programmiersprache C
C++	Programmiersprache C++
°C	Grad Celsius
CAD	Computer Aided Design (computer-gestützte Konstruktion)
CAM	Computer Aided Manufacturing (computergestützte Fertigung)
CAx	Computer Aided Technologies (computergestützte Techniken)
Co.	Corporation (Körperschaft)
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
cm	Zentimeter

CMB	Controlled Metal Build Up (kontrollierter Aufbau von Metall)
CNC	Computerized Numerical Control (computerisierte numerische Steuerung)
CR	Carriage Return (Zeilen- umschaltung)
d. h.	das heißt
DLL	Dynamic Link Library (dynamische Bibliothek)
DMF	Direct Metal Fabrication (generative Fertigung von Metallbauteilen)
DMLS	Direktes Metall-Laser-Sintern
DoE	Design of Experiments (systematische Versuchsplanung)
DS	Düsenseite
EPP	expandiertes Polypropylen
EPS	expandiertes Polystyrol
et	und
€	Euro
F	Force (Kraft)
ffW	formflexibles Werkzeugsystem
G	Gesamtleistung
g	Gramm
ges.	gesucht
gew.	gewichtet
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GUI	Graphical User Interface (graphische Benutzerschnittstelle)
HK	Herstellkosten
XIV	

HPC	High Performance Cutting (Hochleistungszerspanung)
HRC	Härte nach Rockwell
HSC	High Speed Cutting (Hochgeschwindigkeitsbearbeitung)
IFAM	Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung
IMLS	Indirektes Metall-Laser-Sintern
IPT	Institut für Produktionstechnologie
IWS	Institut Werkstoff- und Strahltechnik
K	Kosten
k	Kilo (Tausend)
L	Lösung
LC	LaserCusing (Markenbezeichnung)
LFU	Lehrstuhl für Umformtechnik
LOM	Laminated Object Manufacturing (Markenbezeichnung)
LPT	Line Printer (parallele Schnittstelle)
Ltd.	Limited (GmbH)
m	Meter
max.	maximal
min.	minimal
MK	Mehrkosten
mm	Millimeter
Mrd.	Milliarden
N	Newton
NC	Numerical Control (numerische Steuerung)
Nd	Neodymium

n. n.	Nomen nominandum (noch zu benennen)
NPT	Near-Net-Shape Pin Tooling (Markenbezeichnung)
NT	New Technology (Markenbezeichnung)
P	Problem
PC	Personal Computer (Einzelplatzrechner)
PE	Polyethylen
PLS	Präzisions-Laserstrahlsintern
PPS	Polyphenylensulfid
%	Prozent
py	Python (Markenbezeichnung)
Q	Qualität
Rek.	Rekursion
RTS	Reconfigurable Tooling Systems (Markenbezeichnung)
Rk.	Ranking (Rangfolge)
S	Szenarium
SLS	Selective Laser Sintering (Markenbezeichnung)
SLM	Selective Laser Melting (Markenbezeichnung)
SPM	Space Puzzle Molding (Markenbezeichnung)
SPT	Subtractive Pin Tooling (Markenbezeichnung)
STL	Standard Triangulation Language (Industriestandard zur Geometriedarstellung)

T	Teil-
Tech.	Technologie
USB	Universal Serial Bus (serielles Bus- system)
UTF-8	Unicode Transformation Format-8 (Kodierung für Schriftzeichen)
V	Verschiebung
Var.	Variante
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VRML	Virtual Reality Modelling Language (Beschreibungssprache für 3D- Szenen)
W	Watt
WK	Werkzeugkostenanteil
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
Yb	Ytterbium
z. B.	zum Beispiel
Z	Zeit



## Verzeichnis der Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$A_{\text{einspr}}$	mm <sup>2</sup>	Einspritzdurchmesser Düse
$A_{\text{Nadel}}$	mm <sup>2</sup>	Nadelquerschnitt
$a_p$	mm	Zustellung
$\alpha$	°	Gewebewinkel
$D$	mm	Düsendurchmesser
$d$	mm	Durchmesser des Muskels
$\Delta$	–	Rang
$F_{\text{einspr}}$	N	Einspritzkraft
$F_s$	N	Spannkraft pro Blende (pneumatischer Muskel)
$F_{\text{spann}}$	N	Spannkraft pro Nadel
$F_{\text{spann, Blende}}$	N	Spannkraft pro Blende
$F_z$	N	Kraft in z-Richtung
$\Delta F_L$	N	Kraftanteil in Längsrichtung
$\Delta F_U$	N	Kraftanteil in Umfangsrichtung
$g$	–	Gewichtungsschlüssel
$i, m, n$	–	Zählindizes
$K$	°	Werkzeuganstellwinkel
$\Delta L$	mm	Abstand zweier Knoten in Längsrichtung
$l_n$	mm	Kantenlänge der Nadeln
$p$	bar	Betriebsdruck
$p_{\text{einspr}}$	bar	Einspritzdruck
$t_{\bar{A}}$	h	Zeitaufwand bei Produktänderungen

$t_H$	h	Werkzeugherstellzeit
$t_N$	h	Nachbearbeitungszeit
$t_P$	h	Prozesszykluszeit
$t_R$	min	Rüstzeit
$\Delta U$	mm	Abstand zweier Knoten in Umfangsrichtung
$\mu$	—	Reibkoeffizient

# 1 Einleitung

## 1.1 Situationsanalyse des Wirtschaftsstandorts Deutschland

Der Standort Deutschland befindet sich derzeit in einer immer stärker werdenden globalen Konkurrenzsituation. Gerade die vergleichsweise hohen Lohnkosten machen es deutschen Unternehmen schwer, sich gegenüber Schwellenländern, wie beispielsweise China, Russland, Indien oder auch Brasilien, zu behaupten. Globalisierung spiegelt in diesem Zusammenhang zunehmenden Wettbewerbsdruck wider, dem nahezu ausschließlich durch Innovation, Differenzierung, Rationalisierung und Konzentration auf Schwerpunkte begegnet werden kann (ZÄH et al. 2007a). Die Folge ist, dass das produzierende Gewerbe in Deutschland, also der sekundäre Sektor, als Arbeitsplatzgarant an Gewicht verliert, da meist nur durch Automatisierung lohnkostenarme, konkurrenzfähige Produkte „Made in Germany“ hergestellt werden können. Bisher konnte der damit verbundene Arbeitsplatzabbau durch den tertiären Sektor kompensiert werden. Deutschland kann jedoch nicht ausschließlich von Dienstleistungen leben. Der prozentualen Anteil des sekundären Bereichs an der Bruttonwertschöpfung der Bundesrepublik Deutschland liegt bei ca. 24 % (BUNDESAGENTUR FÜR ARBEIT 2006). Anhand dieser Zahl wird deutlich, dass es massiven Handlungsbedarf gibt, den sekundären Bereich am Standort Deutschland in angemessener Höhe zu bewahren. Nur durch stetig vorangetriebene, marktgerechte Innovationen kann die Bundesrepublik Deutschland auch als Hochlohnland das produzierende Gewerbe erhalten und somit den Standort langfristig sichern.

Die Entwicklung technischer Neuerungen reicht zukünftig nicht mehr aus. Daher gilt es, globale Innovationen zu schaffen (nach SCHUMPETER 1952). Global bedeutet in diesem Kontext, Neuerungen in den Bereichen Technologie, Prozess, Organisation und Produkt umzusetzen und zu etablieren. Daher muss auch die darauf folgende Platzierung der Produkte am Markt gezielt gefördert und unterstützt werden. Es ist notwendig zu verhindern, dass Deutschland ein Innovationsgenerator ist, dessen Energie jedoch von anderen Ländern genutzt wird. Gleichzeitig sollte Deutschland lernen, dass eine Offenheit gegenüber Technikentwicklung und Technikwertigkeit essenziell ist, um unter globaler Konkurrenz eine Zukunft zu haben (REINHART & HAGEMANN 2007).

Bei Betrachtung der Sparte des Werkzeug- und Formenbaus, ein Beispiel für einen Vertreter des sekundären Sektors, stellt sich die Situation wie folgt dar: Insbesondere der

Verlust der Wettbewerbsfähigkeit in den letzten Jahren gegenüber Ländern aus der asiatisch-pazifischen Region und dem osteuropäischen Raum ist in erster Linie auf die hohen Kosten des Faktors Arbeit am Standort Deutschland zurückzuführen (BREUN 2006). Besonders im Werkzeug- und Formenbau müssen einerseits durchgängige Prozesse entwickelt werden, die eine lohnkostenarme Herstellung der Werkzeuge oder Formen ermöglichen. Andererseits führt die Internationalisierung des Wettbewerbs zu offenen Märkten und damit zu der Möglichkeit, den größer werdenden Exportmarkt zu nutzen. Der Umsatz des deutschen Werkzeug- und Formenbaus lag im Jahr 2006 bei 5,5 Mrd. €, was nicht zuletzt im steigenden Exportvolumen begründet ist (GRIMM 2006). China konnte dagegen schon im Jahr 2005 rund 6 Mrd. € im Werkzeug- und Formenbau erwirtschaften und ist mit einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 15 % ein ernst zu nehmender Konkurrent. Hinzu kommt, dass China im Bereich wenig komplexer, standardisierter Werkzeuge aktuell Kostenvorteile von bis zu 70 % gegenüber europäischen Konkurrenten hat (YANAN 2006). Auf Grund eines derzeitigen Mangels an qualifiziertem Personal schrumpft dieser Kostenvorteil bei Werkzeugen mit geforderten, hohen Standzeiten sowie hoher Präzision auf ein Minimum. Allerdings wird gerade China dieses Defizit in Zukunft schnell kompensieren können. Zum einen lässt China die eigenen Menschen verstärkt im Ausland ausbilden, zum anderen führen die hohen Importraten automatisch zu einem Know-how-Aufbau der chinesischen Unternehmen und damit zu einem Verlust des Wissensvorsprungs des exportierenden Landes.

Vor diesem Hintergrund wird das Dilemma des deutschen Werkzeug- und Formenbaus deutlich. Auf der einen Seite zeigen die Wachstumsraten auf Grund guter Exportzahlen, dass die Globalisierung den Standort Deutschland sichert, auf der anderen Seite verliert Deutschland infolge des Know-how-Verlusts jedoch einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil. Die weltweite Verfügbarkeit von Informationen und Technologien sowie globale Wertschöpfungsnetzwerke verstärken diesen Trend zusätzlich (WILDEMANN et al. 2007). Um den Werkzeug- und Formenbau am Standort Deutschland zu sichern bzw. auszubauen, ist es notwendig, durch globale Innovationen schneller Wissen zu generieren, als es wieder abfließen kann. Für den Werkzeug- und Formenbau heißt dies, Werkzeuge hoch automatisiert, flexibel und vor allem wiederverwendbar zu gestalten, um einen maximalen Kostenvorsprung gegenüber konventionell hergestellten Werkzeugen zu erzielen. Dabei ist eine Betrachtung der gesamten Prozesskette der Werkzeugherstellung unabdingbar. Die Kette beginnt bei der Konstruktion des Werkzeugs, der Ableitung der Werkzeugkavität, setzt sich bei der Generierung von Steuerbefehlen für die eigentliche Fertigung fort und endet mit der möglichst vollständig automatisierten Herstellung des Werkzeugs.

Die Entwicklung der Märkte zeigt, dass Produkte zunehmend kundenorientiert gestaltet und produziert werden (UHLMANN 2003), also ein Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt stattgefunden hat (HOFFMANN 2003). Diese Individualisierung bedingt die Entwicklung von flexiblen Fertigungsverfahren und Fertigungstechnologien, die eine wirtschaftliche Realisierung von Individualprodukten bis hin zu einer „Losgröße 1“ oder auch von Kleinserien erlauben. Flexibilität bezeichnet in diesem Zusammenhang die Fähigkeit, mit einer Fertigungstechnologie schnellst möglich auf sich ändernde Randbedingungen reagieren zu können (HAGEMANN 2007). Für den Werkzeug- und Formenbau heißt das in erster Linie, geänderte Produktgeometrien auf Basis gewandelter Kundenwünsche zeitnah und aufwandsarm in der Werkzeuggeometrie zu realisieren, um eine Vielzahl an Varianten herstellbar zu machen und gegebenenfalls Änderungen ohne hohen Kosten- und Zeitaufwand zu realisieren.

Beim konventionellen Werkzeug- und Formenbau für das Spritzgießen kommt die lohnkostenintensive, von manueller Tätigkeit geprägte Fertigung der Werkzeuge hinzu. Im Fall ausreichend großer Stückzahlen und einer entsprechend langen Laufzeit des Produkts sind die hohen Werkzeugherstellkosten wirtschaftlich auf die Produkte umzulegen. Sobald aber einer oder gar beide der genannten Faktoren (Stückzahl oder Laufzeit) reduziert werden, besteht die Gefahr einer wirtschaftlich erschweren bzw. unmöglichen Produktion. Gerade im Bereich der Kleinserienfertigung oder der Fertigung von Prototypen sind die Werkzeugkosten von hoher Relevanz für die späteren Produktkosten. Es bleibt festzuhalten, dass besonders die Herstellung von kleinen Stückzahlen oder Prototypen im Bereich des Spritzgießens sich auf Grund der hohen Werkzeugkosten an der Grenze der Rentabilität befinden. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, sind die so genannten Rapid-Technologien eine technische Möglichkeit, um die Flexibilität und den Automatisierungsgrad im Prototypenwerkzeugbau zu erhöhen. In der Anwendung im Werkzeug- und Formenbau werden diese auch als Rapid-Tooling-Technologien bezeichnet. Allerdings gilt es in diesem Bereich, einen Innovationssprung durch eine automatisierte, an jegliche Geometrie anpassbare und damit wiederverwendbare Werkzeugkavität zu entwickeln. Ein solches formflexibles Werkzeug ist eine viel versprechende Möglichkeit, das Serienherstellungsverfahren Spritzgießen für kleine Losgrößen wirtschaftlich zu gestalten und die Vorteile des Spritzgießens (z. B. Materialvielfalt, Bauteilfestigkeit, geringe Herstellzeit, etc.) auch im Prototypenbereich nutzbar und sichtbar zu machen. Zusätzlich kann durch eine automatisierte und damit rationalisierte Herstellung der formgebenden Kavität dem Wettbewerbsvorteil geringer Lohnkosten seitens der Schwellenländer, wie beispielsweise China, entgegen getreten werden.

Die hier angesprochenen Themenschwerpunkte werden im Folgenden detailliert behandelt. Zum einen wird gezeigt, wie durch methodisches Vorgehen innovative Ideen generier- und ausbaubar sind, zum anderen werden die Potenziale dieser Ideen durch die konkrete Realisierung und Anwendung am Beispiel eines formflexiblen Werkzeugs für das Spritzgießen demonstriert. Zunächst erfolgt jedoch eine allgemeine Begriffsdefinition der in dieser Arbeit verwendeten Bezeichnungen.

### 1.2 Begriffsdefinition

Bei der Betrachtung einschlägiger Fachliteratur im Bereich der Rapid-Technologien fällt auf, dass eine einheitliche Verwendung von Begriffen noch nicht etabliert ist. Vielmehr verwendet jeder Autor seine eigene Nomenklatur. Diese Situation entstand vor allem auf Grund eines sich sehr schnell entwickelnden Marktes und einer Vielzahl von sehr ähnlichen Verfahren. Anlagenhersteller sind in diesem Umfeld bemüht, die eigenen Technologien ständig unter neuen Begriffen zu vermarkten, um sich so von der Konkurrenz zu unterscheiden.

Um für diese Arbeit ein einheitliches Verständnis der wesentlichen Begriffe zu schaffen, erfolgt nachstehend eine zusammenfassende Begriffsdefinition. Unter Rapid-Technologien werden in dieser Arbeit alle Fertigungsverfahren verstanden, die einer schnellen Herstellung von Objekten im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren gerecht werden. Hierbei wird der Begriff Objekt verwendet, da sowohl fertige Produkte, Normalien und Prototypen als auch Werkzeuge relevant bzw. adressiert sein können. Hinter dem Begriff der Rapid-Technologien verbergen sich demnach nicht nur die klassischen, schichtweise, also generativ, arbeitenden Verfahren, sondern auch Fertigungsverfahren und -ketten, die beispielsweise durch entsprechende Organisationsstrukturen oder innovative Technologieansätze, in Bezug auf kurze Durchlauf- und Produktionszeiten, optimiert sind (BREITINGER 2005).

Weitere Begrifflichkeiten, die auf der Unterscheidung des herzustellenden Gegenstands beruhen, entstehen durch die Einteilung der Rapid-Technologien in die Bereiche Rapid Prototyping, Rapid Tooling und Rapid Manufacturing. Beim Rapid Prototyping sind Prototypen der Fokus, beim Rapid Tooling Werkzeuge und beim Rapid Manufacturing gilt es, fertige Produkte oder Produktkomponenten herzustellen (ZÄH et al. 2006c)

Das im Folgenden vorgestellte Konzept eines formflexiblen Spritzgießwerkzeugs kann demnach zu den Rapid-Technologien gezählt werden und ist ein Vertreter des Rapid Tooling. Neben dieser Einordnung ist es für das weitere Verständnis notwendig, den

Begriff der Formflexibilität einzugrenzen bzw. dem Leser eine eindeutige Definition des damit auszudrückenden Inhalts anzubieten.

Formflexibilität ist ein Kunstwort und setzt sich aus den Begriffen „Form“ und „Flexibilität“ zusammen. Unter „Flexibilität“ wird im allgemeinen Sprachgebrauch eine biegsame bzw. verformbare Eigenschaft verstanden (DUDENREDAKTION 2004). In der Technik ist dieser Begriff allerdings nicht exakt definiert, da eine bestimmte Eigenschaft nicht eindeutig mit diesem beschrieben werden kann. Vielmehr ist eine Kombination aus mehreren Eigenschaften, wie z. B. Elastizitätsmodul, Festigkeit oder die Geometrie des Körpers gemeint, wenn von „Flexibilität“ aus technologischer Sicht gesprochen wird. Genau diese, fehlende Eindeutigkeit des Begriffs bzw. die Tatsache, dass eine Vielzahl von Eigenschaften im Begriff der „Flexibilität“ vereint sind, trifft den Kern des im Folgenden vorgestellten Ansatzes und rechtfertigt die Verwendung dieses Begriffes. In Verbindung mit dem Wort „Form“, was die äußere Gestalt eines Körpers definiert (DUDENREDAKTION 2004), entsteht so ein Begriff, der ein Objekt beschreibt, das eine verformbare, an die jeweilige Situation anpassbare und auch wieder änderbare äußere oder innere Gestalt aufweist.

## 1.3 Ausgangssituation

### 1.3.1 Technische Aspekte des konventionellen Werkzeug- und Formenbaus am Beispiel des Spritzgießens

Die Spritzgießtechnik ist eine Herstellungsvariante für Kunststoffbauteile, die nach DIN 8580 zu den urformenden Fertigungsverfahren gezählt werden kann. Darunter wird das Fertigen eines festen Körpers aus einem so genannten formlosen Stoff mit anschließendem Schaffen des Zusammenhaltes zur Geometriegestaltung verstanden. Der formlose Stoff ist im Fall des hier betrachteten Kunststoffspritzgießens eine Kunststoffschmelze, die erhitzt und unter hohem Druck von einer Spritzgießmaschine in ein Werkzeug gepresst wird. Die Kombination von Werkzeug und Spritzgießmaschine kann als Formgebungseinheit bezeichnet werden, über die direkt gebrauchsfertige Formteile (Spritzlinge) ohne zusätzliche Nacharbeit hergestellt werden können (WINTERMANTEL et al. 2008a). Rein funktionell ist das Aufschmelzen von Kunststoffen unter Einwirkung von Wärme in einem Zylinder-Kolbensystem und die Überführung der Schmelze unter teilweise sehr hohen Drücken in eine formgebende, gekühlte Werkzeughöhlung schon seit 1872 für dieses Verfahren bekannt (JOHANNABER & MICHAELI 2004). Dieser periodisch wiederkehrende Vorgang ist als Zyklus zu bezeichnen (BÜRKLE et al. 2008).

Ein Spritzgießzyklus wird in 3 Hauptphasen gegliedert: das Einspritzen, das Plastifizieren (Nachdrücken und Kühlen) sowie das prozessfinalisierende Auswerfen. Der Ablauf eines kompletten Zyklus des Spritzgießens ist in Abbildung 1 dargestellt.

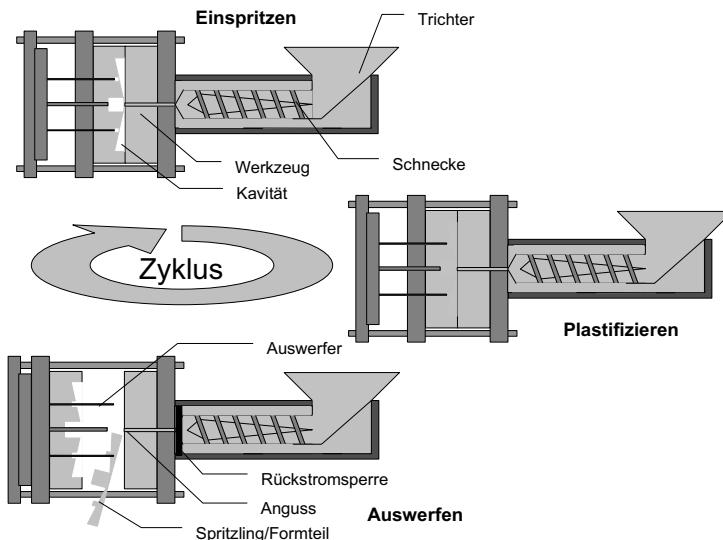


Abbildung 1: Phasen eines Spritzgießzyklus am Beispiel einer Schneckenkolbenmaschine

Folgende Prozesse lassen sich bei einem Spritzgießzyklus identifizieren (MENGES & MOHREN 1991):

- Die Schließeinheit der Spritzgießanlage schließt das Werkzeug und bringt die Schließkraft oder auch Zuhaltkraft auf, damit keine Schmelze aus dem Werkzeug entweichen kann.
- Eine Plastifiziereinheit (Düse) führt an die Angussbuchse des Werkzeugs.
- Die plastifizierte Formmasse wird in die Kavität gespritzt. Dabei kommt meist ein Schneckenextruder mit einer koaxial verschiebbaren Schnecke zum Einsatz, die als Kolben fungiert.
- Die Plastifiziereinheit hält den Nachdruck aufrecht, um die Schwindung des Kunststoffs in der Kavität auszugleichen, die durch die Volumenkontraktion beim Abkühlen der Schmelze entsteht.

- Die Rückstromsperre wird aktiviert bzw. es verhindert bereits verfestigtes Material im Anguss den Rückfluss der Schmelze aus dem Werkzeug. Die Schnecke rotiert rückwärts, fördert und plastifiziert die Formmasse (Granulat) erneut, bis das Dosierwegen erreicht ist.
- Nach dem Erstarren des Spritzlings fährt die Plastifiziereinheit in die Ausgangsstellung zurück.
- Mit Ablauf der Restkühlzeit öffnet die Schließeinheit das Werkzeug.
- Das Auswerferpaket entformt parallel zum Öffnen des Werkzeugs das Formteil automatisch.

Mit dem Schließen des Werkzeugs beginnt der Vorgang des Spritzgießens erneut.

Die grundlegende Aufgabe eines Werkzeugs beim Spritzgießen besteht darin, die Schmelze aufzunehmen, zu verteilen, auszuformen, zu temperieren und nach dem Verfestigen auszuwerfen. Daraus leiten sich die konstruktiv zu realisierenden Funktionalitäten eines Spritzgießwerkzeugs ab. Mit den im Folgenden aufgeführten Komponenten lassen sich die genannten Aufgaben in einem konventionell gefertigten Werkzeug realisieren:

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| ▪ Maschinenaufnahme       | ▪ Auswerferpaket                         |
| ▪ Bewegungsübertragung    | ▪ Formnest mit entsprechender Entlüftung |
| ▪ Kraftaufnahme           | ▪ Temperierung                           |
| ▪ Führung und Zentrierung | ▪ Angussystem                            |

Im einfachsten Fall besteht das formgebende Werkzeug aus zwei Hälften, die über entsprechende Zentrierungen, eine Kombination aus Führungssäulen und Führungsbuchsen oder aus kegelförmigen Zentriereinheiten zueinander ausgerichtet sind und direkt in die Spritzgießmaschine integriert werden. Dazu sind Aufspannbereiche am Werkzeug vorgesehen, in die beispielsweise die Spannpratzen der Spritzgießmaschine greifen. Im Allgemeinen können die beiden Werkzeughälften als Auswerferseite (schließseitige Werkzeughälften) und als Angussseite (düsenseitige Werkzeughälften) bezeichnet werden. Das eigentliche Auswerferpaket der Auswerferseite ist fest mit dem Bett der Spritzgießanlage gekoppelt. Der formgebende Bereich der schließseitigen Werkzeughälften kann hingegen mit der beweglichen Aufspannfläche der Spritzgießanlage verbunden werden. Durch diese Konstruktion (siehe Abbildung 2) entsteht beim Öffnen des Werkzeugs bzw. der Spritzgießanlage eine Relativbewegung zwischen der schließseitigen Werkzeughälften und den Auswerferstiften, wodurch der Spritzling aus der Kavität geschoben wird. In die Angussseite ist eine Angießbuchse integriert, die die Schnittstelle zwischen

der Düse in der Plastifiziereinheit und der Kavität des Werkzeugs darstellt. Zum einen wird so das Einspritzen des Kunststoffs in das Werkzeug realisiert, zum anderen zentriert die Angießbuchse die Einspritzdüse, wodurch ein ungewolltes Austreten von flüssigem Kunststoff durch die damit einhergehende Abdichtung verhindert wird.

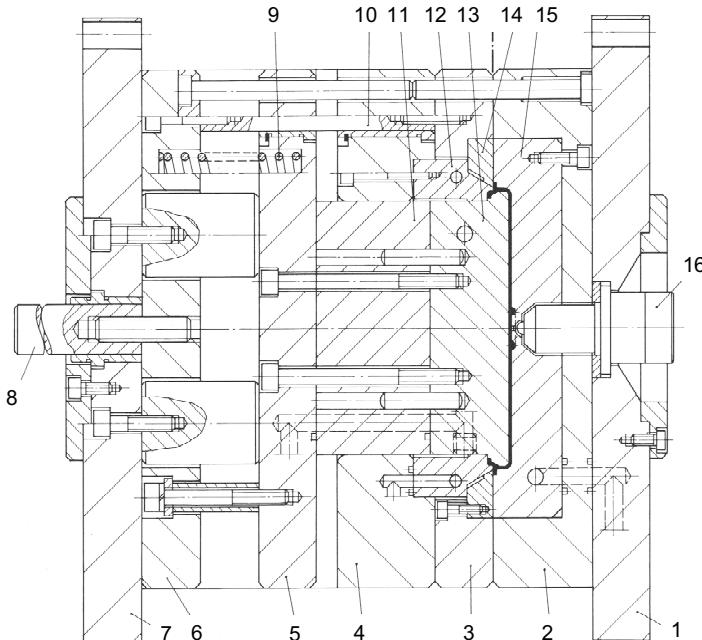


Abbildung 2: Einfach-Spritzgießwerkzeug für einen Verschlussdeckel<sup>1</sup> (GASTROW 1998)

Der eigentliche formgebende Bereich eines Werkzeugs wird konventionell über spanende oder abtragende Fertigungsverfahren realisiert. Das gebräuchlichste Fertigungsverfahren hierfür ist das Fräsen. Stößt dieses Verfahren allerdings an seine Grenzen, beispielsweise bei sehr großen Aspektverhältnissen, so kommen kostenintensive, elektrochemische Verfahren zum Einsatz, bei denen der Abtrag des Werkstoffs durch Funkenentladung erfolgt (z. B. Senkerodieren). Zusätzlich müssen die beiden Werkzeughälften in einem finalisierenden Touchierprozess aneinander angepasst werden, um die entsprechende Dichtigkeit zwischen den Werkzeughälften zu erzielen.

---

<sup>1</sup> 1, 7 Aufspannplatte; 2, 3, 4 Formplatte; 5, 6 Auswerferplatte; 8 Auswerferstange; 9 Druckfeder; 10 Ausstoßbolzen; 11 Kernsöckel; 12 Formring; 13 Kernaufsets; 14 Abschiebering; 15 formgebender Bereich; 16 Angießdüse

### 1.3.2 Wirtschaftliche Aspekte des konventionellen Werkzeug- und Formenbaus am Beispiel des Spritzgießens

Die einleitende Darstellung der Aufgaben und Funktionalitäten eines Spritzgießwerkzeugs und die damit beschriebenen Anforderungen an den Werkzeug- und Formenbau zeigen den Komplexitätsgrad der Werkzeugherstellung. Der konventionelle Werkzeug- und Formenbau ist zusätzlich geprägt von einer stark sequentiellen, zeit- und lohnkostenintensiven Vorgehensweise (LANGEN 1998). Bei kleinen Serien beeinflussen die Werkzeugkosten sehr häufig die Entscheidung für ein Produkt bzw. für die Fertigung des Produkts durch die Spritzgießtechnologie (HORVÁTH et al. 1994). Dies ist darin begründet, dass unterschiedliche Geometrien jeweils speziell angepasste Werkzeuge benötigen. Zusätzlich werden bei veränderten Randbedingungen innerhalb einer Anwendung veränderte Werkzeugausprägungen relevant. Daher kann konstatiert werden, dass Werkzeuge im Allgemeinen für ein singuläres Einsatzszenarium entwickelt bzw. hergestellt werden und bei sich ändernden Randbedingungen ersetzt, aufwändig umgestaltet oder ergänzt werden müssen. Bei der Fertigung von Produkten unter Verwendung von Werkzeugen sind daher die Werkzeugkosten direkt auf die Herstellkosten des Produkts aufzuschlagen und beeinflussen somit indirekt (da abhängig von den Produktstückzahlen, die mit einem Werkzeug fertigbar sind) den Preis für das einzelne Produkt. Zusätzlich sind Spritzgießwerkzeuge hoch präzise gefertigt und werden daher in der Regel nur einmal hergestellt (MENGES & MOHREN 1991). Änderungen während des Produktentwicklungsprozesses können daher oft nur mit erheblichem Aufwand und damit kostenintensiv umgesetzt werden. Eine weitere Problematik ist in der geringen Flexibilität und Wiederverwendbarkeit von konventionellen Werkzeugen zu sehen. Ein Umlegen von Werkzeugkosten auf mehrere Produktgenerationen ist nur selten möglich. Hinzu kommt, dass sich die Randbedingungen im Werkzeug- und Formenbau in den letzten Jahren stark verändert haben (siehe Abschnitt 1.1).

Der derzeitige Trend zu individualisierten Produkten führt gleichzeitig zu reduzierten Stückzahlen pro Variante. Die Wirtschaftlichkeit des Spritzgießens wird durch hohe Werkzeugkosten eingeschränkt, die bei großer Variantenvielfalt nur auf eine geringe Anzahl von Bauteilen umgelegt werden können. Dabei erhöhen die Ansätze der Modularisierung bzw. Standardisierung von Werkzeugsegmenten die Flexibilität der Werkzeuge nur geringfügig (ZÄH et al. 2006b). Trotz der Möglichkeit, bestimmte Bereiche des Werkzeugs im Fall von Änderungen in der Produktgeometrie zu ersetzen, können die Module immer nur für eine spezielle Bauteilgeometrie genutzt werden. Von Wiederverwendbarkeit des Werkzeugs kann daher nur begrenzt gesprochen werden, da

lediglich der Formrahmen bzw. im günstigsten Fall die Angussysteme oder Auswerferpakte mehrfach genutzt werden können.

Die formgebenden Kavitäten sind hingegen nicht für neue Produktgeometrien verwendbar. Neben der geringen Wiederverwendbarkeit von Werkzeugelementen ist ein weiterer kostenintensiver Bereich der Werkzeugherstellung in der Fertigung der eigentlichen Kavitäten zu sehen. Oft handelt es sich dabei um komplexe Freiformflächen, die durch mehrere Prozessschritte und Herstellungsverfahren, wie beispielsweise Fräsen und Erodieren, gefertigt werden müssen. Gerade wenn der Einsatz von Erodierverfahren notwendig ist, steigen die Herstellkosten, da neben dem hohen Zeitbedarf beim Erodieren auch die Konstruktion und Fertigung der Erodierelektroden anfallen und auf die Werkzeugkosten aufgeschlagen werden müssen (ZÄH et al. 2006a). Ein erster Schritt zur Kostensenkung im Werkzeug- und Formenbau ist daher in der Modularisierung der formgebenden Werkzeugbereiche zu sehen. Der Fertigungsaufwand pro Modul lässt sich erheblich senken, da kleinere Segmente der Freiformflächen beispielsweise durch die bessere Zugänglichkeit schneller und mit weniger Aufwand auch auf Standard-Maschinen gefertigt werden können.

Neben der Modularisierung des Werkzeugs sind allerdings zusätzliche Innovationen im Bereich der Fertigungsverfahren und der Fertigungsorganisation nötig, um die Wirtschaftlichkeit im Werkzeug- und Formenbau bei Kleinserien zu garantieren (SPATH 2004). Eine mögliche Innovation stellen die so genannten Rapid-Technologien mit dem Rapid Tooling dar, auf die im folgenden Abschnitt einführend eingegangen wird.

#### 1.3.3 Fertigungstechnologien für das Rapid Tooling

Das Rapid Tooling unterscheidet sich grundsätzlich vom Serienwerkzeugbau. In diesem werden höchste Anforderungen an die Präzision (WINTERMANTEL et al. 2008b) und Standzeit der Werkzeuge gestellt. Mit hohem Kostenaufwand müssen die entsprechenden Werkzeuge für möglichst geringe Zykluszeiten in der späteren Produktion der Bauteile optimiert bzw. die notwendigen Werkzeugoberflächen durch aufwändige Prozessketten (z. B. Fräsen, Erodieren, Schleifen) hergestellt werden. Diese Anforderungen sind dagegen im Rapid Tooling abgeschwächt. Meist genügen hier beispielsweise der Einsatz von Aluminiumwerkzeugen sowie die einfache Gestaltung der Werkzeuge durch Einlegeteile anstelle von aufwändigen Schiebern, um einen Prototypen oder eine Kleinserie zu fertigen. Beim Rapid Tooling sinkt daher der Aufwand bei der Entwicklung und Fertigung des Werkzeugs für die Prototypenherstellung. Allerdings verursachen solche Rapid-Tooling-Werkzeuge meist längere Zykluszeiten bei der eigentlichen Bauteilproduktion, was auf Grund der geringen herzustellenden

Stückzahlen im Bereich der Prototypen oder einer Kleinserie nicht ins Gewicht fällt. Wie bereits erwähnt, ist ein weiterer Aspekt des Rapid Tooling in der konsequenten Ausrichtung auf kurze Durchlaufzeiten bei der Werkzeugherstellung zu sehen. Sind die dafür notwendigen organisatorischen Voraussetzungen erfüllt, so können Rapid-Technologien bereits heute im Bereich der Fertigung von Spritzgießwerkzeugen effizient zum Einsatz kommen. Erschwerend kommt jedoch hinzu, dass Prototypenwerkzeuge häufig einem sehr hohen Änderungsbedarf und damit -aufwand unterliegen (BREITINGER 2005). Diese Änderungen erfordern meist einen weiteren Materialabtrag für das Einbringen zusätzlicher Konturelemente oder den gesamten Neubau des Formeinsatzes. Das Rapid Tooling bietet im Hinblick auf Wiederverwendbarkeit bzw. Anpassbarkeit von kompletten Spritzgießwerkzeugen bei Geometrieänderungen noch keine technische Lösung. Derzeit beinhaltet dieses Konzept, dass ein standardisierter Rahmen mit Formeinsätzen kombiniert wird, die mittels Rapid-Technologien – meist durch Metall verarbeitende generative Verfahren – oder mit Hilfe der HSC-Technik hergestellt werden (BREITINGER 2003). Eine detaillierte Darstellung von Rapid-Technologien im Bereich des Rapid Tooling ist Kapitel 2 zu entnehmen.

### **1.3.4 Ansätze der Formflexibilität im Werkzeug- und Formenbau**

Im folgenden Unterabschnitt wird aufgezeigt, welche Ideen es bereits zur Realisierung von Formflexibilität im Werkzeug- und Formenbau gibt. Diese fokussieren sich in erster Linie auf den Einsatz im Bereich der Umformtechnik. Weltweit existieren verschiedene Institute, die sich mit der Verwendung von Stempelkissen beim Tiefziehen oder der Blechumformung, beispielsweise für Flugzeuggrumpfsegmente, beschäftigen. Eine genaue Beschreibung dieser Projekte ist Abschnitt 2.2 zu entnehmen. Im Rahmen dieses Unterabschnitts soll das Umfeld, in dem die Entwicklung des formflexiblen Spritzgießwerkzeug-Konzepts stattfindet, aufgezeigt werden.

Im Bereich des Spritzgießens gibt es mit Ausnahme der hier beschriebenen Forschungstätigkeit keinerlei Aktivitäten bezüglich der Entwicklung und Realisierung eines wiederverwendbaren, flexiblen Werkzeugs. Lediglich ein Patent der Firma *Nissan Motor Co., Ltd.*, aus dem Jahr 1994 befasst sich mit dieser Thematik (PATENTSCHRIFT DE 41 12 736 C 2 1994). Allerdings wird in dieser Patentschrift das Prinzip eines Stempelkissens zur Formgebung aus dem Bereich der Umformung herangezogen und lediglich für das Druck- und Spritzgießen als Anwendungsbeispiel patentiert. Eine direkte Anpassung an die Randbedingungen und Anforderungen des Spritz- oder Druckgießens wird nicht vorgenommen.

Neben dem bereits genannten Patent sind weitere Arbeiten bezüglich des Einsatzes von verstellbaren Stempeln in flexiblen Umformwerkzeugen bekannt. Beispielsweise konnte ein solches Konzept für das Tiefziehen vom Lehrstuhl für umformende Fertigungsverfahren der Universität Dortmund entwickelt werden (KLEINER & SMATLOCH 1991). Aber auch die Verwendung von Stempelkissen bei der automatisierten Modellierung großflächiger Sandgussformen wurde vom Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart angedacht (SCHAAF 2005). Neben der rein wissenschaftlich getriebenen Betrachtung von flexibel nutzbaren Stempelkissen bietet beispielsweise die Firma *OptiMal Forming Solutions* kommerziell ein System an, das ein flexibles Werkzeug für die Umformung darstellt. Dabei werden Bleche mittels flexibler Werkzeuge auf Basis von Stempeln in Kombination mit Gummikissen umgeformt (BOERS et al. 2007). Des Weiteren existiert ein Ansatz im Bereich der Blechumformung von dreidimensionalen Außenhautteilen bei Flugzeugen auf Basis einstellbarer Stempelkissen. Dieses Projekt wird am Manufacturing Engineering Centre der Universität Cardiff (UK) in Zusammenarbeit mit dem Dieless Forming Technology Development Centre der Jilin Universität Changchun (China) bearbeitet (PHAM et al. 2007).

Eine über den Bereich der Fertigungstechnik hinausgehende Recherche hat gezeigt, dass das Grundkonzept der Formflexibilität auch im Bereich der Montagetechnik Anwendung findet. Es bestehen Ansätze, das Stempelkonzept in Betriebsmitteln zu nutzen, um dadurch besonders komplexe Bauteile mit ausgeprägten Freiformflächen zu spannen. Als Beispiel hierfür sind die Formspannsysteme der Firma *MATRIX GmbH* zu nennen. Die Grundelemente dieses Systems sind Stößelmodule, die sich dem jeweiligen Werkstück spezifisch anpassen (MATRIX 2007).

Ein weiteres Beispiel, bei dem Stempel zur formflexiblen Gestaltung von Betriebsmitteln Verwendung finden, ist der von der Firma *Schunk* patentierte Stiftgreifer (OFFENLEGUNGSSCHRIFT DE 43 39 102 A1 1994). Dabei wird ein Werkstück in einem so genannten Stiftfeld über einen doppeltwirkenden Zylinder verspannt. Der Greifer ist so ausgelegt, dass er als Handhabungsvorrichtung zum mechanischen Greifen, Halten oder Bewegen von Gegenständen, beispielsweise durch einen Industrieroboter, verwendet werden kann.

## 1.4 Motivation und Zielsetzung

Auf Grund der zuvor beschriebenen Sachverhalte lässt sich feststellen, dass die Argumente zur Entwicklung einer neuen Technik bzw. eines formflexiblen Werkzeug-

konzepts im Bereich des Rapid Tooling am Beispiel des Spritzgießens in drei Motivationssichten eingeteilt werden können. Zum einen fordert eine geänderte Marktsituation innovative, flexible Fertigungstechnologien, zum anderen müssen bestehende Herausforderungen im konventionellen Werkzeug- und Formenbau durch neue Ansätze ausgeglichen werden (siehe Abbildung 3). Hinzu kommt, dass derzeitige Verfahren des Rapid Tooling spezifische Defizite aufweisen (siehe Abschnitt 2.1 und Kapitel 3) und nicht oder nur teilweise an die sich wandelnde Marktsituation anpassbar sind.

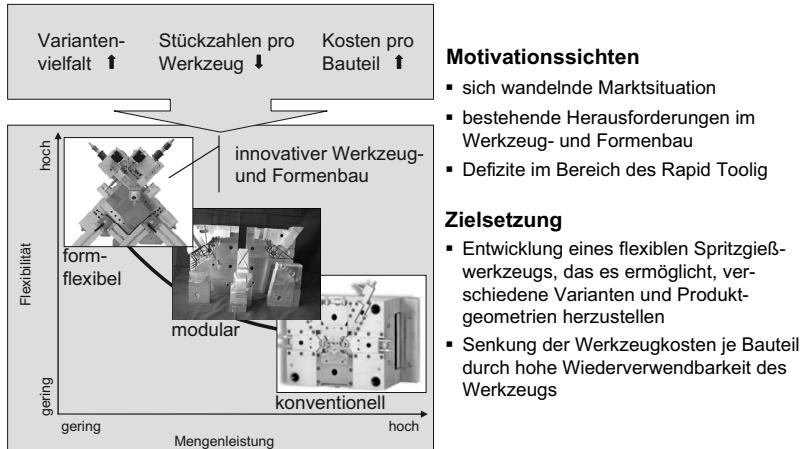


Abbildung 3: Motivation und Zielsetzung

Der Fokus bei der Entwicklung eines neuen, innovativen Werkzeugkonzepts für das Spritzgießen ist in der Realisierung von wiederverwendbaren, flexibel einsetzbaren Arbeitsmitteln zu sehen, die es ermöglichen, jegliche Geometrie mit einem einzigen Werkzeug abzubilden. Damit wird gewährleistet, dass die Werkzeugkosten sinken und das Serienfertigungsverfahren Spritzgießen auch im Prototypenbereich wirtschaftlich einsetzbar ist.

Für die eigentliche Entwicklung des Werkzeugkonzepts gilt es, diesen Fokus durch detaillierte Ziele zu präzisieren. Aufbauend auf den identifizierten Motivationssichten zeigt Tabelle 1 die bestehenden Herausforderungen sowie die daraus resultierenden Ziele.

Motivations-sichten	Herausforderungen	Ziele
<b>sich wandelnde Marktsituation</b>	kurze Produktentwicklungszeiten	► frühe Absicherung von Konstruktionen
	hohe Lohnkosten und globale Konkurrenz	► Steigerung des Automatisierungsgrads
	verstärkte Standortsicherung	► Innovationsbedarf
	kundenorientierte Produkte	► Flexibilität und Wiederverwendbarkeit
<b>bestehende Herausforderungen im Werkzeug- und Formenbau</b>	aufwändige Konstruktionen	► automatisierte CAx-Kette
	kostenintensive formgebende Bereiche	► reduzierte Anzahl an Prozessschritten
	sequentielle, zeit- und lohnkostenintensive Fertigung	► Steigerung des Automatisierungsgrads
	keine Wiederverwendbarkeit	► Flexibilität und Wiederverwendbarkeit
<b>Defizite im Bereich des Rapid Tooling</b>	hoher Nachbearbeitungsaufwand	► reduzierte Anzahl an Prozessschritten
	hohe Prozess- und Anlagenkosten	► einfaches, investitionsarmes Konzept
	Technologievorteile nicht im Prototypenwerkzeugbau nutzbar	► Ausrichtung auf Anforderungen des Prototypenwerkzeugbaus
	keine Wiederverwendbarkeit	► Flexibilität und Wiederverwendbarkeit

Tabelle 1: Einteilung in Motivationssichten und Ableitung von Zielen

Eine Revolution in der Auslegung von Spritzgießwerkzeugen ist darin zu sehen, ein im Bereich der formgebenden Elemente flexibles System zu entwickeln, das durch Anpassung seiner eigenen Gestalt das mit dem Werkzeug herstellbare Produktspektrum erweitert und damit auf sich ändernde Randbedingungen reagiert. Die hohe Wiederverwendbarkeit eines solchen formflexiblen Werkzeugsystems bietet enormes Einsparpotenzial im Werkzeug- und Formenbau, was mittels einer anzustrebenden automatisierten Gestaltänderung vollständig ausgeschöpft werden kann. Gerade im Hinblick auf die zunehmende Konkurrenz des globalen Markts kann der innovative Ansatz der Formflexibilität im Bereich der Werkzeugauslegung als standortsichernder Faktor fungieren. Durch eine konsequente Ausrichtung des Werkzeugsystems im Hinblick auf einen hohen Automatisierungsgrad, der neben dem eigentlichen Einstellvorgang auch die Ableitung der Werkzeugkavität beinhaltet, können zusätzliche, lohnkostenintensive Arbeitsschritte reduziert und der wirtschaftliche Einsatz eines formflexiblen Spritzgießwerkzeugs bei Kleinserien und Prototypen gewährleistet werden. Allerdings ist darauf zu achten, dass der technologische Aufwand zur Realisierung der Formflexibili-

tät möglichst gering gehalten wird, um die Potenziale dieses Ansatzes auch bei Kleinserien oder der „Losgröße 1“ noch nutzen zu können. Darin unterscheidet sich dieses Konzept grundlegend von anderen Rapid-Tooling-Verfahren, die meist auf hoch technologisierten Anlagen basieren. Gerade unter den hier beschriebenen Voraussetzungen kann ein formflexibles Werkzeugkonzept besonders wirtschaftlich bei der Erprobung von Erstserien, der Markteinführung und -abschätzung oder sogar bei der Absicherung der Serienproduktion und des Produktionsstarts eingesetzt werden. Hinzu kommt die Möglichkeit der schnellen, kostengünstigen Herstellung serienidentischer Prototypen aus dem Originalwerkstoff mit dem Serienfertigungsverfahren Spritzgießen. Dies ist besonders bei der Absicherung der Serienproduktion relevant, da die Eigenschaften von Spritzgießbauteilen sehr stark von den Prozessparametern im Produktionsprozess abhängen. Aus diesem Grund ist es unabdingbar, Formwerkzeuge herzustellen, mit denen Prototypenbauteile unter möglichst serienidentischen Bedingungen produzierbar sind. Gerade dieser Aspekt spiegelt den Bedarf der Wiederverwendbarkeit und Formflexibilität von Werkzeugen im Produktentstehungsprozess wider.

Die dargelegten Anforderungen an ein wiederverwendbares, formflexibles Werkzeug werden derzeit von keinem der bekannten Rapid-Tooling-Verfahren erfüllt. Die Notwendigkeit der Entwicklung von Formflexibilität ist daher unbestritten. Im Rahmen dieser Arbeit soll am Beispiel des Spritzgießens das Potenzial von Formflexibilität aufgezeigt, aber auch ein Ausblick auf zukünftige Anwendungsmöglichkeiten skizziert werden.

## 1.5 Gliederung der vorliegenden Arbeit

Auf Grund der zuvor beschriebenen Situation lassen sich die in Abschnitt 1.4 definierten Motivationssichten und Ziele ableiten. Damit bildet das Kapitel 1 die Basis für die im Folgenden beschriebenen Darstellungen und Handlungsschritte (siehe Abbildung 4). Im Einleitungskapitel wurde besonderes Augenmerk auf die Motivationsicht „sich wandelnde Marktsituation“ sowie „bestehende Herausforderungen im Werkzeug- und Formenbau“ gelegt. Die dritte Motivationssicht („Defizite im Bereich des Rapid Tooling“) blieb dabei nur angedeutet. Dies ist sinnvoll, da im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Entwicklung eines neuen Werkzeugkonzepts im Bereich des Rapid Tooling behandelt wird. Damit ist der zentrale Aspekt in Kapitel 2 (Stand der Technik) festgelegt und beinhaltet die noch notwendige detaillierte Darstellung der Techniken beim Rapid Tooling.



Abbildung 4: Struktur der vorliegenden Arbeit

Daraus lassen sich derzeit existierende Defizite ableiten. Somit wird der bereits angedeutete, zentrale Handlungsbedarf zur Entwicklung eines wiederverwendbaren formflexiblen Werkzeugs beim Rapid Tooling identifizierbar (siehe Kapitel 3). Die größte Herausforderung bei der Umsetzung von Formflexibilität für die Werkzeugauslegung ist in der physikalischen Realisierung der formflexiblen Elemente zu sehen. Es hat sich gezeigt, dass in den meisten Fällen ein Umsetzungsanstöß in Form einer Initialidee fehlt. Daher beschreibt Kapitel 4 die Entwicklung und Anwendung einer Methode, die aufbauend auf Anforderungen an ein geplantes formflexibles System physikalische Grundprinzipien vorschlägt, die dem Anspruch der Formflexibilität entsprechen. Am Beispiel des Spritzgießens zeigt dieses Kapitel die Einsetzbarkeit der Methode und schafft somit die Basis für den zentralen Kern der Arbeit: die Konzeption und Entwicklung eines formflexiblen Werkzeugsystems (siehe Kapitel 5). Dessen praktische Einsetzbarkeit wird in Kapitel 6 anhand verschiedener Einsatzszenarien aufgezeigt und durch die Beschreibung praktischer Versuchsreihen bewiesen. Diese Ergebnisse sind Grundlage für die abschließende wirtschaftliche Betrachtung des entwickelten Systems (siehe Kapitel 7) und die zusammenfassende Darstellung der Vor- und Nachteile eines formflexiblen Werkzeugs im Vergleich zu konventionellen Ansätzen im Bereich des Rapid Tooling für das Spritzgießen. Weitere zukünftige Handlungsfelder in Wissenschaft und Industrie sind Kapitel 8 zu entnehmen.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Rapid-Technologien im Bereich des Spritzgießens

Der folgende Abschnitt gibt eine inhaltliche Bündelung des Themenbereichs der Rapid-Technologien für das Spritzgießen wieder. Eine detaillierte Darstellung der relevanten Verfahren zur Herstellung von Prototypenwerkzeugen (Rapid Tooling) kann den nachfolgenden Unterabschnitten entnommen werden.

Die technische Anwendung der Rapid-Technologien für das Spritzgießen ist durch einen modularen Werkzeugaufbau möglich (siehe Abschnitt 1.3). Ein standardisierter Formrahmen, die Stammform, wird durch einen individuell herzustellenden Einsatz ergänzt, der die Aufgabe der Formgebung hat (BREITINGER 2003). Dieser kann mittels folgender ausgewählter Rapid-Technologien gefertigt werden:

- Metall verarbeitende generative Fertigungsverfahren
- Derivate konventioneller spanender Verfahren
- Verfahrenskombinationen (z. B. generativ-spanend, generativ-abformend)
- Modularisierungsansätze zur schnellen Werkzeugherstellung

Bei Metall verarbeitenden, generativen Fertigungsverfahren wird zwischen den direkt arbeitenden und den indirekt arbeitenden Verfahren unterschieden. Direkte Metall verarbeitende generative Fertigungsverfahren oder auch Systeme für Direct Metal Fabrication (DMF) sind grundlegend nach deren Fertigungsprinzip, der schichtweisen Verfestigung eines pulverförmigen Werkstoffs mit Hilfe einer strahlbasierten Energiequelle, charakterisierbar (ZÄH et al. 2006c). Häufig wird dabei ein Laserstrahl eingesetzt, der die notwendige Energie zum Aufschmelzen des metallischen Pulvermaterials erzeugt. Demgegenüber sind auch Verfahren bekannt, die zur Energieeinkopplung beschleunigte und fokussierte Teilchen in Form eines Elektronenstrahls nutzen.

Um die Vor- und Nachteile der generativen Fertigung aufzeigen zu können (siehe Unterabschnitt 2.1.1) und damit den Handlungsbedarf im Bereich des Rapid Tooling zu identifizieren (siehe Kapitel 3), ist es notwendig, die gesamte Prozesskette von der Arbeitsvorbereitung über den eigentlichen Herstellprozess bis hin zur Nachbearbeitung aufzuzeigen. Bei der generativen Fertigung eines Werkzeugformteils wird üblicherweise wie folgt vorgegangen (siehe Abbildung 5).

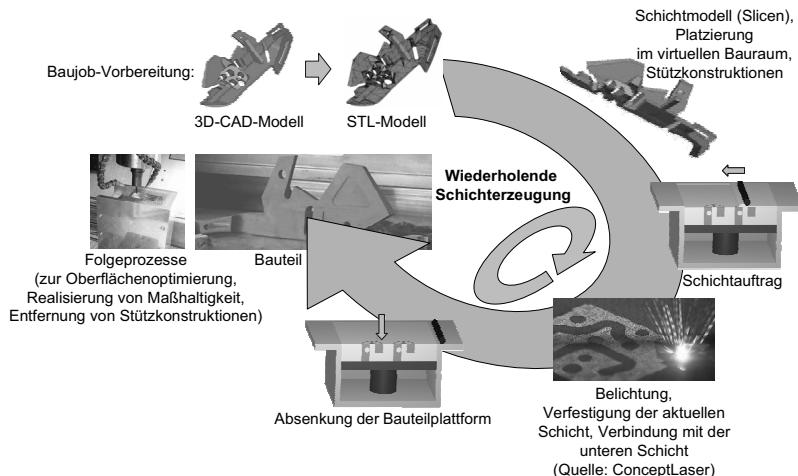


Abbildung 5: Prozessablauf bei generativ arbeitenden Verfahren (in Anlehnung an MEINDL 2004)

Als Datenbasis dient ein Volumenmodell des zu fertigenden Produkts bzw. beim Rapid Tooling die CAD-Geometrie des Werkzeugformeneinsatzes. Beides wird überwiegend manuell erstellt. Das Volumenmodell des Werkzeugeinsatzes liegt beim Rapid Tooling üblicherweise als STL-Datei (Standard Triangulation Language) vor. Bei diesem Format handelt es sich um eine hinreichend genaue Annäherung der Geometrie-  
außenfläche über Dreiecke (siehe Unterabschnitt 5.3).

In der Bauprozessvorbereitung werden die STL-Daten virtuell im Bauraum platziert und je nach Prozess durch notwendige Stützkonstruktionen ergänzt. Diese Strukturen verhindern ein ungewolltes Verschieben einzelner Schichten während des Schichtauftrags und müssen nach dem eigentlichen generativen Fertigen über spanende Nachbearbeitung entfernt werden. Zusätzlich sind in der Bauprozessvorbereitung die für den Bau benötigten Schichtdaten durch das so genannte Slicen, das Definieren der Schichtdicke durch Zerlegen der CAD-Geometrie, zu erzeugen. Mit dem Einstellen der Bauprozessparameter kann die manuelle Bauprozessvorbereitung abgeschlossen werden und der automatisierte Bauprozess beginnen. Nach erfolgreichem schichtweisen Aufbau des Bauteils oder des Werkzeugformeneinsatzes folgt das manuelle Entpacken mit anschließender Nachbearbeitung. Hierbei werden die Stützkonstruktionen entfernt und prozessbedingte Pulveranhäufungen beseitigt. Ebenfalls kann dabei die Maßhaltigkeit des Bauteils optimiert werden. Für diese Nacharbeiten sind gerade bei komplexen

Geometrien entsprechende CNC-Programme zu erstellen, die eine zusätzliche CAD/CAM-Kopplung erfordern. Nach erfolgreicher Nachbearbeitung werden die generierten Werkzeugeinsätze zu einem Werkzeug komplettiert und abgemustert.

Neben rein generativ, also schichtweise arbeitenden Technologien, werden beim Rapid Tooling auch Derivate konventioneller Fertigungsverfahren verwendet, die dem Gedanken der schnellen Herstellung von Werkzeugen entsprechen. Diese sind unter dem Sammelbegriff *Hochleistungszerspanung* (High Performance Cutting, HPC) gebündelt und beinhalten sowohl das High Speed Cutting (HSC, hohe Schnittgeschwindigkeit) als auch das Hochvorschubfräsen (PALM 2006).

Beim HSC werden besondere Anforderungen an das Werkzeug, die Maschine, den Schneidstoff sowie die Frästrategie gestellt, um die Bearbeitungs- und Nachbearbeitungszeiten im Werkzeug- und Formenbau zu senken. Neben technologischen Vorteilen, wie z. B. bessere Oberflächen oder geringere Zerspankräfte, kann auf Grund der 5- bis 10-fach höheren Schnittgeschwindigkeiten beim HSC mit deutlich höheren Vorschubgeschwindigkeiten gearbeitet werden als beim konventionellen Fräsen (HOCK 1996).

Das Hochvorschubfräsen (hoher Vorschub pro Schneide) im Bereich des Rapid Tooling einzusetzen ist darin zu begründen, dass bei diesem Fertigungsverfahren ein sehr hohes Zeitspanvolumen im Vergleich zum konventionellen Fräsen möglich wird, was die Herstellzeit eines Werkzeugformeneinsatzes erheblich senkt. Vorteilhaft bei dieser Technik ist die Möglichkeit der Bearbeitung auf konventionellen Fräsmaschinen. Dabei muss ein spezielles Zerspanungswerkzeug verwendet werden, das hinsichtlich Schneidstoff, Beschichtung und Schneidegeometrien der hohen Schnittkraftbelastung standhält.

Die Prozesskette bei der Herstellung von Werkzeugen mittels der HSC-Technologie oder auch des HochvorschubfräSENS gliedert sich in folgende Punkte:

1. Werkzeugkonstruktion
2. NC-Programmierung
3. Rüst-/Fräspanzess
4. Nachbearbeitung/Komplettierung
5. Abmusterung

Bei diesem Prozessablauf ist der eigentliche Fertigungsschritt vollautomatisiert. Im Bereich der Arbeitsvorbereitung dominiert allerdings die manuelle Tätigkeit. Die Werkzeugkonstruktion sowie die NC-Programmierung müssen, je nach Komplexität des Werkzeugs, mit 23 % bis 35 % der kompletten Herstellzeit angesetzt werden (ZÄH et al. 2006c und FÄHRER 1999). Daher kann in diesem Bereich der Werkzeug- und Formen-

bau durch intelligente Softwareprogramme sowie Algorithmen zur Werkzeugkonstruktion und automatischen Generierung von Ansteuerbefehlen weiter rationalisiert werden.

Neben der stetigen Optimierung der spanenden und generativen Fertigungsverfahren ist verstärkt ein Trend zur Verfahrenskombination festzustellen. Dabei wird versucht, vorhandene Defizite einer Technologie durch die geschickte Kombination mit einer anderen zu kompensieren. Ein Beispiel für solche Hybrid-Verfahren ist die Kombination von Rapid-Technologien mit der Fräsbearbeitung, das so genannte Präzisions-Laserstrahlsintern (PLS). In Abhängigkeit der vorliegenden Bauteilgeometrie wird der schichtweise Bauprozess durch mehrere Fräsbearbeitungsschritte unterbrochen. Mit einem Fräswerkzeug kann die Kontur der vorher generativ aufgebauten Schichtpakete geschlichtet werden, um die notwendige Maßgenauigkeit und Oberflächengüte zu erhalten. Die Höhe der versinterten Schichtpakete wird dabei so gewählt, dass die Zugänglichkeit mit dem Fräswerkzeug möglich ist. Im Anschluss an die Fräsbearbeitung können neue Pulverschichten aufgetragen und der generative Fertigungsprozess fortgesetzt werden. Allerdings ist diese Technologie noch im Forschungsstadium und nicht kommerziell erhältlich.

Weitere im Werkzeug- und Formenbau eingesetzte Verfahrenskombinationen sind das Controlled Metal Build Up (FRAUNHOFER-IPT 2007), die Alchemy-Technologie der Firma *Hermle* (HAIDER 2007), das Melato-Verfahren (FRAUNHOFER-IWS 2007), das Metall-Spray- (AUMÜLLER et al. 2002) oder das RTS-1000-Verfahren (WOHLERS 2007). Diese hybriden Technologien sind detailliert im Unterabschnitt 2.1.3 beschrieben und sind an dieser Stelle nur erwähnt.

Eine weitere Strategie beim Rapid Tooling besteht in der Modularisierung von Werkzeugen. Die bekanntesten Verfahren, die auf dem Prinzip der Modularisierung basieren, sind das Space Puzzle Molding (siehe Unterabschnitt 2.1.4.1) oder das ecoMold-Verfahren (siehe Unterabschnitt 2.1.4.2). Mit diesen Verfahren hergestellte Werkzeuge bestehen aus einer Vielzahl standardisierter und individueller Elemente. Aus der Kombination solcher Module setzt sich das Werkzeug zusammen. Der Fertigungsaufwand jedes Moduls ist im Vergleich zur Herstellung eines Gesamtwerkzeugs geringer. Die Flexibilität hinsichtlich Produktänderungen beim modularen Werkzeug ist allerdings eingeschränkt, da lediglich einzelne Module getauscht bzw. ersetzt werden können.

## 2.1.1 Rapid Tooling mittels Metall verarbeitender generativer Fertigungsverfahren

### 2.1.1.1 Direkte Metall verarbeitende Verfahren

Die relevanten Technologien im Bereich der direkten Metall verarbeitenden Fertigungsverfahren (DMF) sind das LaserCusing (LC) der Firma *ConceptLaser*, das Selective Laser Melting (SLM) der Firma *MCP HEK Tooling* und das Direct Metal Laser Sintering (DMLS) der Firma *eos*. Trotz der verfahrensspezifischen Unterschiede, wie beispielsweise die auf einzelne Prozesse abgestimmten Scanstrategien oder die angepassten Werkstoffe, ist das technologische Grundprinzip generativer Metall verarbeitender Verfahren weitgehend identisch. Unterschiede ergeben sich durch variierende Energiequellen bzw. -einkopplungsmechanismen. Beispielsweise basiert das LC-Verfahren auf einem Nd:YAG-Laser mit einer Leistung von 100 W (Anlage M3 linear). Beim DMLS hingegen kommt ein Yb-Faserlaser mit einer Leistung von 200 W zum Einsatz. Bei der Firma *MCP HEK Tooling* wird zur Verfestigung einzelner Schichten ebenfalls ein Yb-Laser mit einer durchschnittlichen Leistung von 30 W und einer Spitzenleistung von 200 W verwendet (BRANNER 2008).

Zur Verfestigung einzelner Materialschichten werden Mechanismen wie Festphasensintern, Flüssigphasensintern, partielles sowie vollständiges Aufschmelzen unterschieden (SEEFRIED 2005). Durch die sehr starke lokale Energieeinbringung, die zum Verfestigen der Metallwerkstoffe nötig ist, kommt es bei allen direkt arbeitenden Verfahren zu starken inneren Spannungen, die zu erheblichem Bauteilverzug führen können. Ebenso sind Anhaftungen von Pulverpartikeln in den Randzonen der geschmolzenen Bereiche nicht zu verhindern, was die Oberflächenqualität mindert und immer eine spanende Nachbearbeitung erfordert.

Der große Vorteil bei der Verwendung von generativen Rapid-Technologien im Werkzeug- und Formenbau besteht im Vergleich zu konventionellen Verfahren in der Reduzierung der Fertigungskosten gerade bei sehr komplexen Geometrien. Dies ist darin begründet, dass generative Verfahren auf einer werkzeuglosen Fertigung basieren, damit völlig flexibel hinsichtlich der geometrischen Ausgestaltung sind und zusätzlich die Herstellkosten lediglich von dem herzustellenden Volumen des Bauteils abhängen und nicht vom Grad der Komplexität. Daher werden diese Verfahren im Bereich des Spritz- oder auch Druckgießens vor allem bei Werkzeugen angewendet, die eine komplexe Geometrie, beispielsweise mit konturnahen Kühlkanälen, aufweisen. Unter dem so genannten Conformal Cooling wird dabei verstanden, konturnahe Kühlkanäle

frei im Spritzgießwerkzeug anzuordnen, um somit eine an die Geometrie optimal angepasste Kühlung in hoch beanspruchten Werkzeugbereichen zu ermöglichen (SCHWARZE 2007). Damit können bei gleichzeitiger Erhöhung der Standzeit des Werkzeugs die Zykluszeiten beim Spritzgießen um bis zu 66 % reduziert werden, bei einer Kühlzeitreduktion von bis zu 70 % (HOFMANN 2007).

Neben der Reduzierung der Zykluszeit führt eine konturnahe Kühlung zusätzlich zu einer Senkung der Stückkosten bei verbesserter Teilequalität, da der Verzug des Kunststoffbauteils durch den optimierten Wärmehaushalt im Werkzug vermindert wird und damit die Maßhaltigkeit und Abformgenauigkeit steigt (MAYER 2007). Daher eignen sich die direkt arbeitenden generativen Fertigungsverfahren für die Herstellung von Werkzeugen, die im Serien- und Großserienbereich angewendet werden. Die derzeit hohen Werkzeugfertigungs- und Nachbearbeitungskosten, die beim Einsatz von DMF-Verfahren entstehen, können bei diesem Anwendungsfeld auf eine ausreichend hohe Produktstückzahl umgelegt werden. Die Anwendung der DMF-Technologien im Prototypen- und Kleinserien-Werkzeugbau erscheint jedoch nicht von Vorteil, da weder die hohen Fertigungskosten für das Werkzeugs eine wirtschaftliche Herstellung von Kleinserien zulassen noch die erzielbare reduzierte Zykluszeit bei kleinen Stückzahlen Relevanz hat.

### 2.1.1.2 Indirekte Metall verarbeitende Verfahren

Die indirekten Metall verarbeitenden, generativen Fertigungsverfahren, wie beispielsweise das „Indirekte Metall-Laser-Sintern“ (IMLS), basieren auf einem zweistufigen Vorgehen. Dabei ist dem formgebenden Prozess des Generierens ein zweiter, festigkeitsbildender Ofenprozess mit Bronzeinfiltration angeschlossen. Diese Verfahren basieren auf einem mehrkomponentigen Ausgangsmaterial, bestehend aus Metall- und Kunststoffanteilen (z. B. Metallpartikel mit Kunststoffummantelung). Im ersten Prozessschritt werden die Kunststoffanteile im Werkstoffgemisch (auch Binder genannt) mittels Laserstrahlung (zwischen 9 und 50 Watt) geschmolzen. Sie verbinden bzw. verkleben beim anschließenden Erstarren die Metallanteile (ZÄH & BRANNER 2007). Die im Vergleich zu DMF-Verfahren geringe Laserleistung ist darin begründet, dass zum einen das Aufschmelzen von Kunststoffen geringere Temperaturen erfordert und zum anderen das Ausgangsmaterial bereits im Bauraum auf hohen Temperaturen gehalten wird. Der Laserstrahl muss daher nur noch eine geringe Temperaturdifferenz überbrücken helfen, um die Kunststoffanteile im Werkstoff vollständig zu schmelzen. Der so entstehende „Grünling“ besitzt allerdings eine relativ geringe Festigkeit, was das Auspacken aus dem Pulverbett und die Reinigung gerade in schwer zugänglichen Be-

reichen, wie beispielsweise den konturnahen Kühlkanälen, erheblich erschwert oder teilweise unmöglich macht. Hier ist ein Defizit gegenüber den DMF-Verfahren zu erkennen. Während des nachfolgenden Ofenprozesses diffundiert der Kunststoffanteil aus der Struktur des Bauteils und wird durch Bronze ersetzt. Adhäsions- und Reibungskräfte zwischen den Metallpartikeln garantieren in dieser Phase die Formstabilität des Grünlings (VAIL 1994). Unter Nutzung der steigenden Ofentemperatur bilden die einzelnen Metallpartikel so genannte Sinterhälse. Die Ausbildung der Sinterhälse dauert so lange, bis die im Prozess befindliche Bronze schmilzt und durch die Kapillarwirkung des porösen Sinterskeletts in die Bauteilstruktur diffundiert (siehe Abbildung 6).

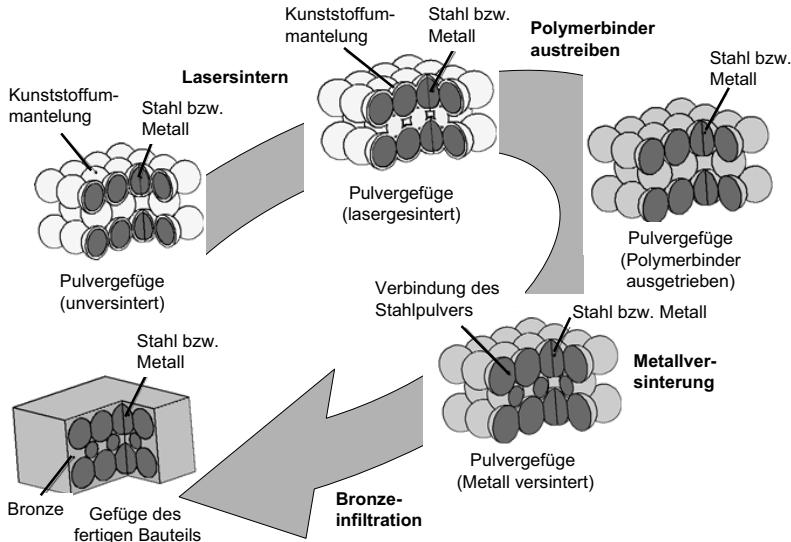


Abbildung 6: Physische und chemische Vorgänge beim „Indirekten Metall-Laser-Sintern“ (BREITINGER 2003)

Nach dem Abkühlen des Bauteils liegt ein vollkommen dichter Körper vor. Ein Vorteil des IMLS-Verfahrens ist die geringe Wärmeeinbringung in das Bauteil während des Generierens. Dadurch entsteht im Vergleich zu DMF-Verfahren ein verzugs- und spannungsfreies Bauteil, das auch nach dem Ofenprozess eine sehr gute Maßhaltigkeit aufweist. Ein weiterer Vorteil des IMLS ist die gute Wärmeleitfähigkeit des mit Bronze infiltrierten Materials, was gerade in einem Spritzgießwerkzeug die Kühlwirkung fördert. Allerdings muss vor dem Einsatz eines mittels IMLS gefertigten Werkzeug-

formeinsatzes ebenfalls eine spanende Nachbearbeitung durchgeführt werden, um die notwendige Oberflächenqualität zu erreichen.

### 2.1.2 Rapid Tooling mittels konventioneller Fertigungsverfahren

#### 2.1.2.1 High Speed Cutting (HSC)

Bei der Herstellung von Konturgeometrien im Werkzeug- und Formenbau ist die HSC-Bearbeitung den konventionellen Fräsenverfahren bezüglich Wirtschaftlichkeit, Flexibilität, Reaktionsfähigkeit und Durchlaufzeit überlegen (HOCK 1996). Das Hochgeschwindigkeitsfräsen ist dabei nicht nur eine beschleunigte Variante des bisher bekannten Fräsen, vielmehr handelt es sich um ein eigenständiges Fertigungsverfahren mit sehr speziellen Anforderungen und Leistungsdaten. Die Span-, Schneiden- und Werkstücktemperatur steigt bei hohen Schnittgeschwindigkeiten (DOBBLER et al. 2003). Damit ist ein höherer Werkzeugverschleiß verbunden, den es durch entsprechende Gegenmaßnahmen zu kompensieren gilt, um die Wirtschaftlichkeit und Produktivität des HSC dennoch zu gewährleisten. Die HSC-Bearbeitung zeichnet sich durch hohe Schnittgeschwindigkeiten (realisiert durch hohe Drehzahlen des Werkzeugs), schnellen Vorschub und geringe Schnitttiefen aus. Die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit resultiert in einer Reduzierung der Schnittkraft. Ein Verzug des Werkstücks aufgrund der Zerspanungswärme wird verhindert, da die Schnittgeschwindigkeit größer ist als die Wärmeleitgeschwindigkeit im Bauteil und dadurch die Wärme im Span verbleibt (ZÄH 2008). Durch die proportionale Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit mit der Schnittgeschwindigkeit bei konstanten Spanungsquerschnitten nimmt demnach die Temperatur an der Schneide nicht mehr zu (siehe Abbildung 7).

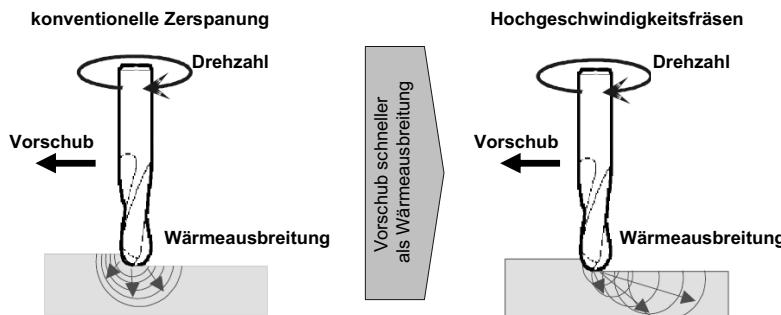


Abbildung 7: Wärmeausbreitung bei der konventionellen Zerspanung und beim Hochgeschwindigkeitsfräsen (PIEVERLING 2003)

Damit genügt beim HSC in den meisten Anwendungen eine Druckluftkühlung, die den heißen Span von der Bearbeitungsstelle entfernt. Die Maschinentechnik und hier besonders die beim HSC eingesetzten Hochfrequenz-Motorspindeln sind in der Aufnahme von Querkräften und der Antriebsleistung begrenzt und damit ein limitierender Faktor. Die Schlichtbearbeitung mittels der HSC-Technik bietet die größten Vorteile. Auf Grund der hohen Drehzahl des Werkzeugs und den damit möglichen hohen Vorschubgeschwindigkeiten kann ein entsprechend enger Bahnabstand, bei im Vergleich zum konventionellen Fräsen gleichbleibender Fräsezeit, realisiert werden. Die Oberflächenqualität wird gesteigert und damit reduziert sich die manuelle Nachbearbeitungszeit beispielsweise beim Polieren oder Touchieren der Werkzeuge, was die Produktionskosten im Werkzeug- und Formenbau sinken lässt. Die Ableitungen der Werkzeuggeometrie sowie der CAD/CAM-Kopplung zur Ansteuerung der HSC-Maschine bleiben hingegen weiterhin manuell.

### 2.1.2.2 Hochvorschubfräsen

Die Anwendung moderner Zerspanwerkzeuge ermöglicht es, auf konventionellen Maschinen durch das Hochvorschubfräsen die Produktivität des Fräsvorganges erheblich zu steigern. Damit wird eine Einordnung in die Gruppe der Rapid-Technologien gerechtfertigt und der Einsatz beim Rapid Tooling sinnvoll. Insbesondere bei der Herstellung von Werkzeugformeneinsätzen können mit dieser Technik zerspanungsintensive Schrubbearbeitungen schneller und folglich kostengünstiger durchgeführt werden. Die Werkzeuge beim Hochvorschubfräsen weisen spezielle Schneidstoffe und Beschichtungen sowie Schneidengeometrien auf. Diese sind gekennzeichnet durch Schneidkanten, die beispielsweise gegenüber Rundwendeplatten einen sehr viel größeren Radius aufweisen. Dadurch wird zwar die axiale Zustellung  $a_p$  begrenzt, bedingt durch den verkleinerten Anstellwinkel  $\kappa$  reduziert sich die radiale Schnittkraftbelastung auf den Fräser jedoch stark, so dass sehr hohe Zahnvorschübe realisierbar sind. Während bei einem herkömmlichen Fräser (z. B. Rundwendeschneidplatten) ein Zeitspanvolumen von  $100 \text{ cm}^3/\text{min}$  erreicht werden kann, zerspannt ein Hochvorschubfräser das fünfzehnfache Volumen (THOMAS 2006). Damit steigt die Produktivität gerade beim Schrappen. Das Hochvorschubfräsen kann somit als ideale Ergänzung zum HSC gesehen werden. Allerdings sind auch bei diesem Ansatz die aufwändige manuelle Werkzeugkonstruktion und die Generierung der Fräsbahnen über CAD/CAM-Technik notwendig.

## 2.1.3 Rapid Tooling mittels Verfahrenskombinationen

### 2.1.3.1 Controlled Metal Build Up

Generativ arbeitende Fertigungsverfahren haben derzeit noch den Nachteil, dass die Maßhaltigkeit und die Oberflächenqualität ohne entsprechende Nacharbeit nicht den industriellen Anforderungen im Bereich des Prototypen- oder auch Serienwerkzeugbaus genügen. Ein finalisierender Fräsen- oder Schleifprozess ist fast immer unumgänglich. Ähnliches gilt für das manuelle Auftragsschweißen, was häufig Verwendung in der Reparatur von Werkzeugen und Formen findet. Aus dieser Situation heraus hat das Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie (IPT) eine Verfahrenskombination aus Laserauftragsschweißen und Hochgeschwindigkeitsfräsen entwickelt und unter dem Namen Controlled Metal Build Up (CMB) am Markt platziert (KLOCKE & FREYER 2004). Dabei handelt es sich um eine Fertigungstechnik, bei der intermittierend Schweiß- und Fräsvorgänge durchgeführt werden. Jede erzeugte Schicht des Schweißguts wird plan gefräst, um eine definierte Fläche für die nächste Lage zu erzeugen. Die Außenkontur ist in Abhängigkeit von ihrer Gestalt entweder komplett am Ende des Bauprozesses aus einem Quasi-Schruppzustand oder jeweils nach einer gewissen Anzahl von Schichten zu bearbeiten. Dies kann abhängig von der Auskraglänge der verwendeten Fräswerkzeuge auch in sehr kurzen Abständen erfolgen und erlaubt so den Einsatz kleinstster Werkzeuge sowie die Herstellung tiefer Nuten mit sehr kleinen Innenrändern. Damit wird diese Fertigungstechnik ebenfalls zu den generativ arbeitenden Verfahren gezählt (FRAUNHOFER 2007). Die Eigenschaften der generierten Bauteile haben gezeigt, dass ein Einsatz des CMB neben dem Rapid Tooling auch im Serienwerkzeugbau vor allem zur Reparatur und Modifikation sinnvoll ist. Auf Grund des Materialauftrags mittels Auftragsschweißen sind derzeit Warm- und Kaltarbeitsstähle verarbeitbar, die als schweißbarer Draht am Markt erhältlich sind. Ähnlich wie bei den direkt Metall verarbeitenden generativen Fertigungsverfahren kann mit dem CMB-Verfahren ein nahezu porenfreies Gefüge mit einer Härte von über 60 HRC realisiert werden (FREYER 2004). Der beim CMB-Verfahren notwendige letzte Fräsvorgang ermöglicht eine Oberflächengüte sowie Maß- und Formgenauigkeit eines konventionell gefertigten Bauteils oder Werkzeugs. Dieses Verfahren ist derzeit noch nicht im industriellen Serieneinsatz.

### 2.1.3.2 Innovaris Alchemy-Technologie

Als Entwicklungs- bzw. Forschungszentrum der *Hermle AG* beschäftigt sich die Firma *Innovaris GmbH* seit 2004 mit der Entwicklung innovativer Fertigungsverfahren und Produkte. Eine neue, äußerst interessante Fertigungstechnik für den Werkzeug- und Formenbau ist die so genannte Alchemy-Technologie. Diese Technik basiert auf dem kinetischen Kompaktieren von Metallpulver (Mikroschmieden). Grundlage dieses generativen Verfahrens ist ein Metallpulver, das mittels hochenergetischen Wassers in Gasform sukzessive aufgebracht wird (MASCHINENMARKT 2007). Dabei nimmt ein Wasserdampfstrahl das Metallpulver mit mehrfacher Schallgeschwindigkeit auf. Der Metall-Wasserdampfstrahl tritt durch eine Düse im Abstand von 150 bis 200 mm aus und prallt auf die Bauplatzform bzw. das entstehende Werkstück. Dort geht das aufgeschossene Wasser-Metall-Gemisch durch die hohe Geschwindigkeit eine homogene Verbindung mit dem Werkstück ein. In Kombination mit einem Fräsvorprozess können so maßgenaue Bauteile generiert werden. Im Wesentlichen sind alle schmiedbaren, metallischen Werkstoffe, wie beispielsweise Buntmetalle und Werkzeugstähle, verarbeitbar. Auch die Verbindung von unterschiedlichen metallischen Werkstoffen ist möglich. Damit ergeben sich im Bereich der konturnahen Kühlung Vorteile gegenüber einkomponentigen Werkstoffen, da kühlungsoptimierte Werkstoffkombinationen realisierbar werden. Beispielsweise ist es denkbar, einen wärmeleitfähigen Kern aus Kupfer und einen Außenbereich aus Werkzeugstahl zu generieren, was mit anderen Metall verarbeitenden generativen Fertigungsverfahren derzeit nicht möglich ist. Auch Gradientenwerkstoffe mit einem fließenden Übergang zwischen Aluminium und Stahl sind realisierbar (INNOVARIS 2007). Ähnlich wie beim Präzisions-Laserstrahlsintern (siehe Unterabschnitt 2.1.3.4) werden Maßhaltigkeit und Oberflächengüte bei diesem Verfahren durch den Fräsvorprozess im Anschluss an das Generieren bestimmt. Dabei kommt ein 5-Achsen-Bearbeitungszentrum mit 2-Achsen-NC-Schwenkrundtisch zum Einsatz, in das der Materialauftrag integriert ist. Die Firma *Hermle AG* prognostiziert die Serienreife dieser Technologie bis Mitte 2008 (HERMLE 2007).

### 2.1.3.3 Metall-Spray-Technologie

Ein weiteres Verfahren zur schnellen und kostengünstigen Herstellung von Prototypenwerkzeugen für das Spritzgießen ist das Metallspritzen (Metall-Spray). Dabei werden mit Hilfe einer Lichtbogenpistole Spritzdrähte aus Aluminium, Kupfer, Zink, Stahl oder Molybdän bei Temperaturen zwischen 400 °C und 2000 °C aufgeschmolzen, durch Druckluft in kleine Partikel zerstäubt und auf das in ca. 200 mm Entfernung befindliche Positivmodell aufgespritzt. Nach dem erfolgreichen Besprühen (3 bis 4 mm dicke

Metallschicht) wird ein Stahlrahmen um das Modell aufgebaut, der ein anschließendes Hinterfüllen der Metallschicht mit einem Aluminium-gefüllten Werkzeuggießharz oder einer niedrig schmelzenden Legierung erlaubt. Nach dem Aushärten der Hinterfüllung kann das positive, formgebende Modell entfernt und die entstandene Negativform als Werkzeug genutzt werden. Die Vorteile dieser Technik gegenüber anderen Verfahren zur Herstellung von Prototypenwerkzeugen auf Basis von Abformprozessen, wie beispielsweise dem Harzabgießen, sind: eine höhere Wärmeabfuhr der Werkzeuge durch die bessere Leitfähigkeit des Metalls der gespritzten Schicht, eine höhere zu erreichende Schusszahl von bis zu einigen tausend Stück mit einem Werkzeug sowie die hohe Festigkeit des Werkzeugs und damit die Möglichkeit, mit großen Zuhaltkräften arbeiten zu können (AUMÜLLER et al. 2002). Jedoch bietet diese Technik keine Wiederverwendbarkeit des Werkzeugs im Hinblick auf geänderte Produktgeometrien und erfordert zudem den Aufbau eines zu besprühenden, positiven Bauteils. Die Herstellung dieser Grundgeometrie ist meist sehr aufwändig, wodurch die Werkzeugkosten steigen.

### 2.1.3.4 Präzisions-Laserstrahlsintern

Generative Verfahren basieren auf dem Grundgedanken, ein Bauteil schichtweise herzustellen. Die Eigenschaften der erzeugten Komponenten bleiben jedoch hinsichtlich Maßhaltigkeit, Oberflächengüte und Festigkeit meist weit hinter den Standards zurück, die im Werkzeug- und Formenbau gefordert sind, weshalb die Bauteile in Folgeprozessen spanend nachbearbeitet werden müssen. Einen Weg zur nachhaltigen Verbesserung der Fertigung stellt die prozessintegrierte Kombination dieser Technologien in einem Hybridverfahren dar. Durch die Nutzung des FräSENS und der generativen Fertigung in einem Prozess können die oben genannten Nachteile von Laser-Sinter-Verfahren und die Nachteile des FräSENS (z. B. geringe Materialausnutzung durch unnötig große Zerspanvolumina, Limitierung der Geometrieformen durch eingeschränkte Zugänglichkeit des Fräser) sinnvoll kompensiert werden. Daraus ergeben sich die Vorteile des PLS-Verfahrens: hohe Genauigkeit, hohe Strukturauflösung und hohe Oberflächenqualität (ZÄH et al. 2006c). Der Aufbau sehr komplexer Bauteile ist dennoch möglich. Der Prozessablauf ist in zwei Schritte untergliedert. Zu Beginn wird eine dünne Pulverschicht auf eine Bauplattform aufgebracht und mittels Laserstrahl selektiv belichtet bzw. verfestigt. Im Anschluss kann mit Hilfe eines Fräser oder Schleifstifts die generierte Kontur nachbearbeitet werden. Dabei ist ein sehr kurzer Fräser mit sehr kleinem Durchmesser (beispielsweise < 1 mm) im Einsatz (LOHNER & SIEVERS 2001). Das Präzisions-Laserstrahlsintern befindet sich aktuell noch in der Entwicklung. Zukünftig wird es jedoch möglich sein, beispielsweise geometrisch komplexe Werkzeugformen-sätze herzustellen, die die hohen Anforderungen an die Oberflächengüte

und Festigkeit erfüllen. Bisher konnten solche Werkzeugeinsätze nur durch sequentielle Fertigungsketten mit umfangreicher Fräsen- und Erodierbearbeitung erreicht werden. Die Flexibilität der generativen Verfahren bleibt erhalten, da die spanende Bearbeitung stets im optimalen Werkzeugeingriff stattfindet und nicht vom Aspektverhältnis tiefer Nuten abhängig ist. Der technologische Aufwand bei diesem Verfahren ist erheblich, was in erster Linie ein Grund dafür ist, dass dieses Hybridverfahren noch nicht am Markt erhältlich ist.

### **2.1.4 Rapid Tooling durch Modularisierung**

#### **2.1.4.1 Space Puzzle Molding**

Das Space Puzzle Molding (SPM-Verfahren) ist eine Verfahrenskombination aus dem Rapid Tooling und dem Rapid Prototyping mit dem Ziel einer kostengünstigen und schnellen Herstellung von Prototypen-Spritzgießwerkzeugen, bei zeitgleichem risikoarmen Produktionsanlauf für die Großserie (TRAPP 2007). Ursprünglich wurde das Verfahren für die singuläre Prototypen-Produktion entwickelt, es findet aber durch stetige Verbesserung bereits Anwendungen in der Kleinserie. Das SPM-Verfahren basiert auf einer optimierten und auf Modulen aufbauenden CAD-Konstruktion des Werkzeugs, das sehr schnell und kostengünstig aus mehreren Aluminium-Formeinsätzen gefertigt wird. Zur Herstellung dieser werden generative Verfahren sowie das High-Speed-Cutting eingesetzt. Grundlage dieses Werkzeugkonzept ist eine modulare, dreidimensional zusammengesetzte, variable Formkonstruktion, die auch Hinterschneidungen durch fixierte oder lose Einlegeteile ermöglicht. Auf komplizierte Schieber, einen großformatigen Formaufbau sowie umfangreiche Temperierung oder Auswerferpakte wird bewusst verzichtet. Der im Vergleich zum konventionellen Werkzeugbau um 50 % kürzere Herstellprozess eines solchen Werkzeugs ermöglicht bis zu 60 % geringere Fertigungskosten (PROTOFORM 2006). Derzeit erreicht ein SPM-Werkzeug eine Ausbringungsmenge von bis zu tausend Stück. Aus patentrechtlichen Gründen ist ein SPM-Werkzeug derzeit nur bei der Firma *Protoform K. Hofmann GmbH* in Fürth erhältlich. Die Kunststoff-Formteile können auf einer handelsüblichen Spritzgießmaschine mit einem SPM-Werkzeug abgeformt werden. Durch manuelle Demontage des Formwerkzeugs außerhalb der Spritzgießanlage wird der Spritzling entformt. Die dadurch erheblich steigende Zykluszeit muss bei der Entscheidung für ein SPM-Werkzeug bedacht werden. Da ein solches Werkzeug aus einer Vielzahl von formgebenden Modulen besteht, sind Änderungen bei der Bauteilgeometrie verhältnismäßig einfach durch neue Formteile zu realisieren. Eine Wiederverwendbarkeit der form-

gebenden Werkzeugsegmente ist bei Geometrieveränderungen allerdings auch hier nicht gegeben.

### 2.1.4.2 ecoMold

Ein weiteres Beispiel zur Modularisierung von Werkzeugen ist die so genannte ecoMold-Technologie, die am Fraunhofer IFAM (Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung) entwickelt wurde. Dieses Konzept beruht auf einer Segmentierung der Werkzeugelemente, die separat gefertigt werden können (KLOCKE et al. 2004). Jedes Segment wird zusätzlich in eine Grundgeometrie und eine Formgeometrie unterteilt. Unter Grundgeometrie werden Volumenbereiche des Werkzeugeingesatzes verstanden, die keine formgebenden Flächen aufweisen. Durch diese Trennung sind die Grundmodule standardisiert und damit kostengünstig, beispielsweise durch Fräsen, herstellbar. Die formgebenden Geometrien des Einsatzes werden bei der ecoMold-Technologie mittels generativer Laserverfahren hergestellt. Dadurch kann der Vorteil der generativen Technologie hinsichtlich der realisierbaren Bauteilkomplexität gezielt in den relevanten Bereichen genutzt werden, was die Gesamt fertigungskosten und -zeiten reduziert. Aber auch bei diesem Verfahren ist es notwendig, die Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität der generierten Formgeometrie nachzubearbeiten. Die verschiedenen Module werden finalisierend montiert, wodurch ein Werkzeug entsteht (siehe Abbildung 8).

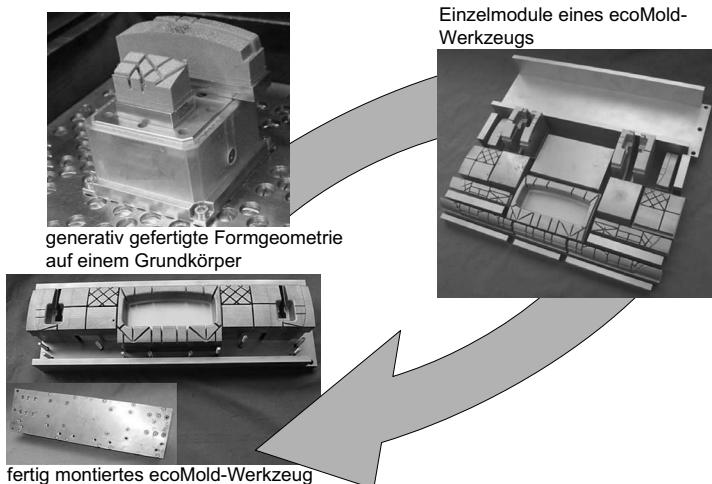


Abbildung 8: Ergebnis und Teilschritte des ecoMold-Verfahrens (HENNIGS et al. 2004)

Durch die Modularisierung des Werkzeugs und die Kombination aus Lasersinter- und Fräswerfahren kann die generative Fertigung auch bei großen Werkzeugen im Rapid Tooling angewendet werden. Eine Limitierung hinsichtlich der Bauteilgröße durch den eingeschränkten Bauraum der generativ arbeitenden Anlage ist nicht mehr relevant. Erste Erfahrungen und Kalkulationen haben ergeben, dass im Vergleich zu konventionell hergestellten Werkzeugeinsätzen die Kosten um ca. 35 % und die benötigten Bauzeiten um ca. 30 % reduziert werden können (HENNIGS et al. 2004). Allerdings sollte der erheblich größere konstruktive Aufwand zur Realisierung eines ecoMold-Werkzeugs gegenüber einem konventionellen Werkzeug bedacht werden.

### **2.1.4.3 Lamellenwerkzeuge für die Prototypenherstellung**

Der Modularisierungsansatz bei Lamellenwerkzeugen besteht darin, Bleche oder Folien zur Formgebung zu verwenden. Prinzipiell unterscheiden sich die Verfahren Melato (Metal Laminated Tooling) des Fraunhofer Instituts für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS) und das Metallfolien-LOM (Laminated Object Manufacturing) des Bayerischen Laserzentrums (blz) durch die zum Einsatz kommenden Ausgangswerkstoffe und die Anordnung der verwendeten Bleche bzw. Folien. Beim Melato-Verfahren werden Bleche zu einem vertikalen Lamellenwerkzeug gefügt (FRAUNHOFER-IWS 2007), beim Metallfolien-LOM hingegen entsteht das Werkzeug aus horizontal paketierten Folien (BAYERISCHES LASERZENTRUM 2007). Die Prozessketten dieser beiden Ansätze gestalten sich sehr ähnlich. Beide Techniken basieren darauf, dass ausgehend von den 3D-CAD-Daten des herzustellenden Werkzeugs aus einer Ausgangsplatine mittels Laserstrahl eine jeweilige Schichtkontur ausgeschnitten wird. Durch Zusammensetzen dieser Schichten und ein entsprechend dem Ausgangsmaterial geeignetes Fügeverfahren kann so ein Werkzeugeinsatz hergestellt werden. Zum Fügen der einzelnen Bleche kommen meist Schweiß-, Löt- oder Pressverfahren zum Einsatz. Beim Metallfolien-LOM ist beispielsweise ein Diffusionsschweißprozess in Verwendung. Dabei wird das Folienpaket bei einer Temperatur von ca. 1100 °C unter Flächenpressungen im Bereich von 0,1 bis 10 N/mm<sup>2</sup> stoffschlüssig gefügt (PRECHTL 2006). Zur Vermeidung der Bildung von Diffusionsbarrieren (z. B. Oxide) wird der Prozess unter Schutzatmosphäre (Vakuum, Stickstoff, Argon) durchgeführt. Lamellenwerkzeuge finden unter anderem Verwendung beim Spritzgießen, aber auch der Einsatz im Bereich des Umformens (Prägen und Tiefziehen) konnte mit dem Melato-Verfahren realisiert werden.

Neben den genannten Verfahren entwickelten Mitarbeiter des Lehrstuhls für Umformtechnik (LFU) der Universität Dortmund ein Werkzeugsystem, das ebenfalls auf Blechlamellen aufbaut. Dieser Ansatz basiert, wie das Melato-Verfahren auch, auf einer

vertikalen Ausrichtung der Lamellen (KLEINER & KRUX 2001). Die vertikale Anordnung erlaubt es, gerade im Anwendungsgebiet der Umformtechnik, die Standzeit des Werkzeugs im Vergleich zu horizontal angeordneten Lamellenwerkzeugen erheblich zu erhöhen.

Es bleibt jedoch auch hier festzuhalten, dass die industriell notwendige Oberflächenqualität und auch die Maßhaltigkeit eines Lamellenwerkzeugs erst durch einen weiteren Prozessschritt bzw. die mechanische Nachbearbeitung mittels Fräsen oder Schleifen erreicht werden können. Je nach Fügeprinzip ist es allerdings ohne großen Aufwand möglich, Werkzeuggbereiche bei Geometrieänderungen zu ersetzen, was in gewisser Weise eine Wiederverwendbarkeit des Werkzeugs ergibt. Voraussetzung hierfür ist ein mechanisches Klemmen der Lamellen in einem Spannrahmen, wie es allerdings nur beim Melato-Verfahren verwirklicht ist. Ein Fügen über Schweiß- oder Lötprozesse bietet die angedeutete Flexibilität im Hinblick auf die Wiederverwendbarkeit nicht.

## **2.2 Ansätze zur Realisierung von Wiederverwendbarkeit durch Formflexibilität**

### **2.2.1 Reconfigurable Tooling Systems (RTS)**

Im Bereich der wiederverwendbaren, frei konfigurierbaren Abformwerkzeuge entwickelte die Firma *2Phase Technologies Inc., Santa Clara (USA)* ein Werkzeugsystem, das auf einem speziellen Material basiert (WOHLERS 2007). Dieses ermöglicht es, bei Raumtemperatur den Aggregatzustand zu verändern, d. h. von einem flüssigen in einen festen Zustand zu wechseln. Dabei bleibt das Volumen des Materials konstant. In umgekehrter Weise kann sich das Material auch vom festen in den flüssigen Zustand wandeln. Diese Eigenschaft wird bei dem entwickelten System genutzt, um von einem positiven Modell des Bauteils eine negative Form abzunehmen. Dabei kommt eine Lösung zum Einsatz, die aus keramischen Partikeln sowie einem anorganischen, flüssigen Binder besteht und in einer elastischen Membran gelagert ist. Der Abformprozess eines Bauteils erfolgt in mehreren Schritten. Zu Beginn wird in das formflexible Werkzeugbett bzw. in die mit dem flüssigen Material gefüllte Membran das abzuformende Bauteil gelegt. Die elastische Membran umschließt das Bauteil, und das darin befindliche Material wird evakuiert, d. h. die Flüssigkeit wird aus der Membran entzogen, bis die Keramikpartikel sich nicht mehr gegeneinander bewegen können. Das Evakuieren geschieht bei Raumtemperatur, wodurch eine Volumenänderung des keramischen Materials ausgeschlossen ist. Allerdings bleibt die entstandene Form nur

so lange erhalten, wie das Vakuum an der Membran anliegt. Durch das Erwärmen des Werkzeugs wird eine reversible, chemische Reaktion zwischen den Binderanteilen und den Keramikpartikeln initiiert, die es ermöglicht, die Form auch ohne ein permanentes Vakuum aufrecht zu erhalten. Nach dem Aushärten dieser ist das keramikähnliche Material bis zu einer Temperatur von 427 °C belastbar. Diese Limitierung ergibt sich auf Grund des Einsatzes des anorganischen Binders, der keine höheren Temperaturen zulässt. Allerdings beschränken die elastische Membran sowie das Werkzeugbett das Einsatzgebiet der Form derzeit auf 204 °C (CROWLEY et al. 2004). Soll der theoretisch mögliche Temperaturbereich erreicht werden, so muss auf die Membran verzichtet werden.

Wird eine so hergestellte Form nicht mehr benötigt, so kann das verfestigte Ausgangsmaterial wieder mit Flüssigkeit geflutet werden, wodurch die chemische Reaktion zwischen Binder und Keramikpartikeln rückgängig gemacht wird. Damit ist das Werkzeugsystem wiederverwendbar. Das vorgestellte System findet Verwendung in abformenden Bereichen, wie beispielsweise der Herstellung von Kunststoffverbund-Bauteilen oder der Prototypenherstellung in der Produktentwicklung. Derzeit sind zwei Varianten des Werkzeugsystems erhältlich. Der Unterschied dieser liegt in der Größe des Werkzeugbetts. Das RTS-1000-System bietet einen Abformbereich von beispielsweise 760 mm x 460 mm x 230 mm, wohingegen das RTS-2500-System einen Werkzeugbereich von 1530 mm x 1220 mm x 460 mm aufweist. Mit diesen Systemen ist es möglich, verhältnismäßig schnell ein Werkzeug für mittlere bis große Bauteile ohne hohen Komplexitätsgrad herzustellen. Derzeit verwenden die amerikanische Luftwaffe und die Marine das System, um beispielsweise Flügelspitzen abzuformen. Damit wird eine einfache Reparatur von Tragflächen auch in Krisengebieten bzw. im Einsatzgebiet möglich.

## 2.2.2 Automatisiertes Modellieren großflächiger Sandgussformen

Großflächige Gussstücke werden häufig durch verlorene Sandgussformen produziert. Bei der Serienfertigung erfolgt das Herstellen der Kavität meist in einem Handformverfahren, bei dem die Kontur eines Modells im Formstoff abgebildet wird. Die manuelle Tätigkeit verursacht einen hohen Zeitanteil in der Produktion. Um dieses Defizit auszugleichen, sind Ansätze erarbeitet worden, die ein automatisiertes Herstellen der Sandgussformen ermöglichen (WESTKÄMPER et al. 2000). Auf Basis eines modulbasierten Werkzeugbetts (konturnah eingestelltes Stempelkissen) wird ein schüttfähiger Formstoff in einem additiven Prozess und einer freien räumlichen Modellierung in einem formgebenden Prozess zu einer negativen Form gewandelt, die dann mit einer Metall-

schmelze ausgegossen werden kann. Durch diese verlorene Sandgussform ist es möglich, ein Metallgussbauteil mit sehr geringen Kosten herzustellen. Der Vorteil bei der Verwendung des Stempelkissens ist darin zu sehen, dass nur ein sehr kleines Volumen des Formstoffs notwendig ist, um die finale Kontur zu erzielen. Lediglich die Differenz der Sollkontur mit der konturnahen Stempeloberfläche muss durch die Formmasse gefüllt werden. Mit der so erzielbaren Formmaterialeinsparung durch die wiederverwendbaren Stempel können die Kosten zur Herstellung einer verlorenen Sandgussform erheblich reduziert werden. Zusätzliche Einsparungseffekte ergeben sich durch die automatische Formgenerierung und Formmassenverdichtung über ein Robotersystem. Mittels entsprechender Werkzeuge kann ein Roboterarm eine bestimmte Menge an Formsand auftragen und diese über Walzen in die notwendige Form bringen, wodurch gleichzeitig eine Verdichtung des Materials erfolgt. Mit dem beschriebenen System gelang es am Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart eine Formhälfte für einen Propellerflügel herzustellen (siehe Abbildung 9).

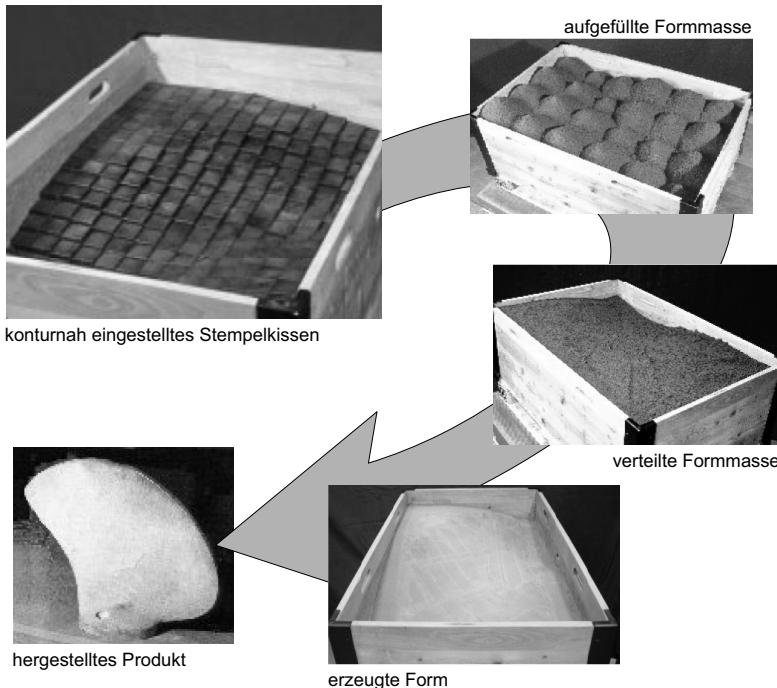


Abbildung 9: Prozessablauf bei der automatisierten Herstellung von Sandgussformen  
(SCHAAF 2005)

### 2.2.3 Sonstige modulbasierte, wiederverwendbare Werkzeugsysteme

Über die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Ansätze hinaus existieren noch weitere wiederverwendbare Werkzeugsysteme. Die Ausgründung *OptiMal Forming Solutions* vertreibt beispielsweise die Forschungsergebnisse aus einem Projekt des Fachbereichs Maschinenwesen der Technischen Universität Eindhoven (Niederlande), welches das Umformen von Blechen mittels flexibler Werkzeuge beinhaltet (BOERS et al. 2007). Dieses System basiert auf 1.846 axial verschiebbaren Modulen, die in einem verspannbaren Rahmen von 40 mm x 50 mm x 25 mm angeordnet sind. Über einen automatisierten Ablauf können diese Module in ihrer relativen Höhe zueinander positioniert werden und bilden so eine Kavität, in die ein Blech eingeformt werden kann (siehe Abbildung 10).

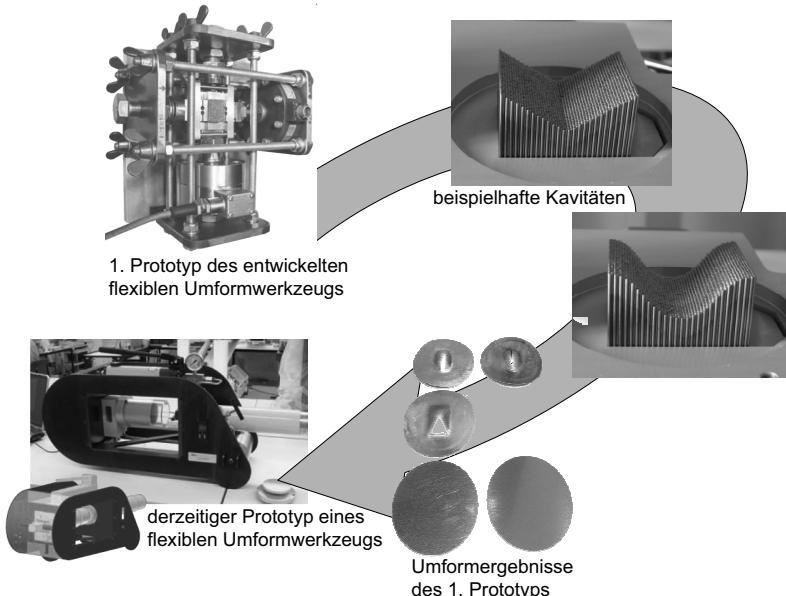


Abbildung 10: Flexibles Umformwerkzeug

Bei diesem System besteht die Werkzeugunterseite aus den beschriebenen verschiebbaren Modulen. Die Werkzeugoberseite wird hingegen durch ein Gummikissen realisiert, das unter Verwendung von hydraulischer Kraft das Blech in die Kavität drückt und somit umformt. Um zu vermeiden, dass sich die Rasterung der Module im Blechbauteil abdrückt, verwendet die Ausgründung *OptiMal Forming Solutions* so ge-

nannte Interpolatoren in Form von elastischen Folien. Diese Folien gleichen die Differenz zwischen der durch die Module angenäherten Kavität und der tatsächlich zu realisierenden Geometrie aus und ermöglichen so die Herstellung eines Blechbauteils mit einer entsprechend glatten Oberfläche sowie ausreichender Maßgenauigkeit. Die geometrische Einschränkung des Verfahrens ist durch diese Folienverwendung begründet. Rechte Winkel bzw. spitze Kanten und Ecken sind bei Verwendung des Interpolators nicht herstellbar, was im Bereich der Umformtechnik allerdings tolerierbar ist. Der erste Prototyp des entwickelten flexiblen Umformwerkzeugs bot einen Umformbereich von 20 mm x 30 mm und konnte einen Pressdruck von 5 Tonnen aufnehmen (Boers et al. 2004).

Neben dem von der Ausgründung *OptiMal Forming Solutions* angebotenen Werkzeug existieren noch weitere am Markt erhältliche Systeme, die auf einem modularen Ansatz basieren. Ein Beispiel ist ein so genanntes rekonfigurierbares Werkzeug, bei dem ebenfalls Stifte zur Formgebung verwendet werden. Dabei unterscheidet der Hersteller *Surface Generation* zwischen zwei möglichen Einsatzszenarien dieses Werkzeugs. Zum einen existiert ein „Near-Net-Shape-Pin-Tooling-Werkzeug“ (NPT), zum anderen ein „Subtractive-Pin-Tooling-Werkzeug“ (SPT). Das NPT-Werkzeug wird vorwiegend zur Herstellung von polymerischen Bauteilen bei geringen Drücken und Temperaturen eingesetzt. Diese Variante kann sowohl zur Unterstützung bei der Herstellung von Kunststoffbauteilen (Harzgießen) eingesetzt werden als auch als Montagevorrichtung oder für Messaufbauten Verwendung finden (SURFACE GENERATION LTD. 2007). Andere Einsatzgebiete sind das Streckformen oder das Gießen von Formgedächtnis-Kunststoffen. Die formgebenden Stifte dieses Werkzeugkonzepts werden über eine Einstellvorrichtung in der axialen Lage zueinander verschoben und bilden so eine konturnahe Oberfläche des herzustellenden Bauteils ab. Das Werkzeug ist damit zum Befüllen mit einer Formmasse (z. B. Epoxydharz oder mit Aluminium gefülltes Harz) geeignet, die nach dem Aushärten entnommen werden kann. Durch Folgeprozesse am Bauteil, wie beispielsweise das Glätten der Oberfläche durch Fräsen, sind die Bauteile zu finalisieren. Dieses Werkzeugsystem kommt bei Temperaturen des zu verarbeitenden Werkstoffs bis maximal 180 °C und einem maximalen Druck von 10 bar zum Einsatz. Abbildung 11 zeigt die Anwendung eines NPT-Werkzeugs.

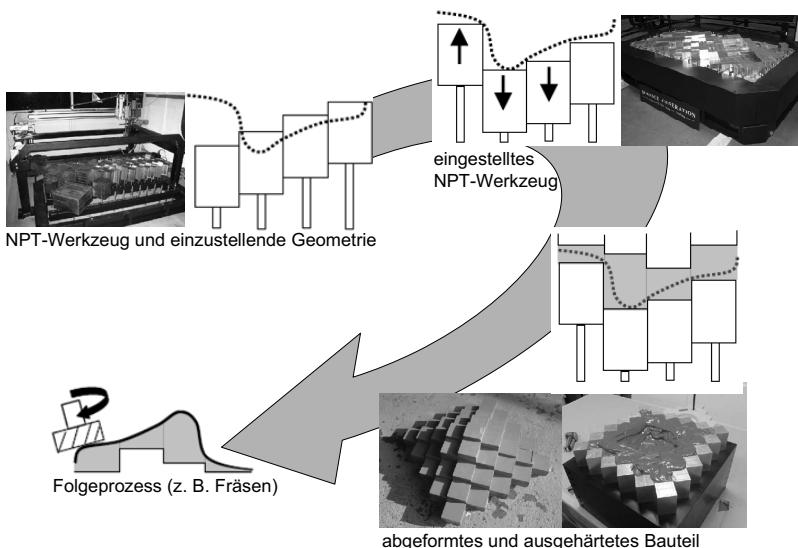


Abbildung 11: Verfahrensablauf bei einem NPT-Werkzeug

SPT-Werkzeuge finden hingegen im Bereich des Metallgusses bei hohen Temperaturen und Spritzdrücken Verwendung. Dabei sind Temperaturen bis zu 350 °C sowie Drücke bis maximal 2000 bar realisierbar. Die Werkzeuge basieren auf dem bereits vorgestellten Stiftsystem. Der Unterschied im Vergleich zum NPT-Werkzeug ist darin zu sehen, dass das SPT-Werkzeug selbst in einem Folgeprozess bearbeitet wird. Die auf Basis der herzustellenden Geometrie sowie mit einem entsprechenden Aufmass eingestellten Stifte werden mittels Fräsen nachbearbeitet, um die Endkontur zu erhalten. Durch die Verwendung unterschiedlicher Stiftmaterialien kann in Abhängigkeit des Einsatzfelds ein direkt verwendbares Werkzeug hergestellt werden. Das SPT-Werkzeug wird hauptsächlich beim Formpressen, bei der Herstellung von Bauteilen aus metallischen Verbundwerkstoffen, bei Vakuumformverfahren oder beim einfachen Abformen verwendet. Derzeit befinden sich Stifte aus Kunststoff, Metall oder Keramik im Einsatz, die mit einem quadratischen Querschnitt von 25 mm x 25 mm bis hin zu 500 mm x 500 mm erhältlich und in einem 2 m x 1 m großen Werkzeugrahmen angeordnet sind (SURFACE GENERATION LTD. 2007). Je nach Anwendungsfall und Detaillierungsgrad kann somit ein optimal an die Geometrie angepasstes Werkzeug konfiguriert werden. Im Bereich des Spritzgießens findet dieses Werkzeugsystem auf Grund der groben Stempel keine Verwendung.

Ergänzend zu den bereits dargestellten modular aufgebauten Werkzeugsystemen wurde am Lehrstuhl für Umformende Fertigungsverfahren der Universität Dortmund ein weiteres numerisch einstellbares Werkzeugsystem entwickelt, das beim Tief- und Streckziehen eingesetzt wird (KLEINER & SMATLOCH 1991). Dabei handelt es sich ebenfalls um ein flexibles Werkzeug, das auf einer Segmentierung der Werkzeugwirkfläche basiert. Durch eine Vielzahl verstellbarer Formkörper entsteht eine hinsichtlich der Geometrie flexible Werkzeugoberfläche. Eine Besonderheit dieses Systems ist, dass die Einstelleinheit nicht direkt die Formkörper positioniert, sondern eine Gewindestiftmatrix als Zwischenschritt zum Einsatz kommt. Dabei stellt eine zentrale Schraubereinheit jeden Gewindestift sequentiell ein. Nach erfolgter Positionierung wird das eigentliche flexible Werkzeugsystem auf die Gewindestiftmatrix aufgesetzt, so dass bei gelöster Verspannung die Formelemente auf die Gewindestifte gleiten. Damit überträgt sich die Geometrie der Gewindestiftmatrix auf die Werkzeugoberfläche. Der Vorteil ist darin zu sehen, dass das flexible Tiefziehwerkzeug beispielsweise in einer Presse weiterhin zur Produktion genutzt und parallel eine neue Geometrie in die Gewindestiftmatrix eingeprägt werden kann. Das hier beschriebene System bietet eine maximale Ziehtiefe von 100 mm und eine Werkzeugwirkfläche von 200 mm x 200 mm. Jedes Formelement besitzt eine Kantenlänge von ca. 6 mm x 6 mm x 450 mm (SMATLOCH 1996).

Ein weiterer Ansatz eines flexiblen Werkzeugsystems ist in einer Dissertationsschrift am Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart beschrieben (GERTH 2006). Im Bereich der Optimierung von elektrochemisch hergestellten Oberflächen im Werkzeug- und Formenbau kommt dabei eine segmentierte Anode zum Einsatz. Diese besteht aus einem Nagelbrett, bei dem jeder der 850 Nägel in einer Lochmaske geführt ist. Durch axiales Verschieben dieser Nägel kann eine entsprechende Anodenform realisiert werden.

Neben den bereits beschriebenen industriell oder wissenschaftlich genutzten Ansätzen zur Realisierung flexibler Werkzeugsysteme bestehen bereits seit Ende der siebziger Jahre zwei Patente des Automobilherstellers *Ford*, die mehrere Varianten zur Werkzeugsegmentierung bzw. -modularisierung im Bereich der Umformtechnik beinhalten (OFFENLEGUNGSSCHRIFT 1929539 1969, OFFENLEGUNGSSCHRIFT 1945011 1970).

Ein weiteres Patent ist von der Firma *Nissan Motor Co., Ltd.*, Yokohama im Jahre 1994 zur Anmeldung gekommen. Dieses Patent bezieht sich auf eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Erstellen von Formen mit variabler Gestalt, die zur Herstellung von Metallgussformen und Kunststoffspritzformen für kleine Losgrößen eingesetzt werden (PATENTSCHRIFT DE 41 12 736 C 2 1994). Die Firma *Nissan Motor Co., Ltd.*, nutzt die

bekannten Ansätze aus der Umformtechnik und patentierte diese für die Anwendung beim Spritzgießen. Ähnlich wie bei allen bereits genannten flexiblen Werkzeugen wird auch hier die Verwendung von Stiften zur Herstellung der wiederverwendbaren Form angedacht. Allerdings wird die Integration von beispielsweise spritzgießrelevanten Funktionen oder eine Strategie zur Reduktion der Nadelrasterung am Bauteil in diesem Patent nicht erwähnt. Weiterhin ist ein sehr aufwändiger Einstellvorgang der Nadeln bei diesem System beschrieben, der auf dem Bereitstellen und sequentiellen Einlegen jeder einzelnen Nadel durch Pick & Place-Roboter beruht. Bei der notwendigen Genauigkeit eines Spritzgießwerkzeugs erscheint dieses Vorgehen schwer vorstellbar, da im Vergleich zur Umformtechnik erheblich feinere Stempel zum Einsatz kommen müssen und daher eher von feinen Nadeln gesprochen werden muss.

Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass zur Realisierung eines flexiblen und wiederverwendbaren Werkzeugsystems immer eine Modularisierung der Wirkfläche des Werkzeugs vorgeschlagen wird und diese meist durch Stempel, Stifte oder Formelemente zu realisieren ist. Die Recherchen haben gezeigt, dass der Einsatz solcher Werkzeugsysteme in der Umformtechnik bereits verbreitet ist. Im Bereich des Spritzgießens konnte hingegen nur die oben genannte Patentschrift gefunden werden. Die in dieser Arbeit vorgestellte methodische Konzeption und Realisierung eines flexiblen, wiederverwendbaren Spritzgießwerkzeugs sowie dessen Erprobung ist nach Abschluss der Recherchen des Stands der Technik weltweit einmalig.



### **3 Handlungsbedarf vor dem Hintergrund der bestehenden Defizite im Rapid Tooling**

#### **3.1 Zusammenfassung von Vor- und Nachteilen**

##### **3.1.1 Metall verarbeitende generative Fertigungsverfahren im Bereich des Rapid Tooling**

Die werkzeuglose Fertigung der generativ arbeitenden Verfahren bietet ein hohes Maß an geometrischer Freiheit und damit Potenzial zur Realisierung von komplexen Strukturen. Der Einsatz dieser Technologien im Werkzeug- und Formenbau ist derzeit jedoch noch mit hohen Kosten sowie hohem Technologie- und Nachbearbeitungsaufwand verbunden (ZÄH & HAGEMANN 2006). Bei einem Investitionsbedarf von durchschnittlich 330.000,- bis 970.000,- € (ZÄH et al. 2006a) für eine Metall verarbeitende Anlage und einem Maschinenstundensatz von 50,- € ohne Nachbearbeitung sowie Materialkosten von ca. 54,- €/kg (BEHRENDT 2007) ist der Einsatz eines generativ gefertigten Formeinsatzes in einem Prototypenwerkzeug nur wirtschaftlich, wenn konventionelle Verfahren eine Fertigung nicht erlauben.

Auf Grund der Verwendung von Pulvermaterialien kommt es bei allen Metall verarbeitenden generativen Fertigungsverfahren bis heute zu ungewollten Pulveranhaltungen an der Bauteiloberfläche. Des Weiteren entstehen durch die sehr fokussierte Energieeinbringung hohe Temperaturgradienten im Bauteil, die zu Verzügen und damit Maßgenauigkeiten führen. Folglich müssen die hergestellten Geometrien über ein konventionelles Verfahren, wie beispielsweise Fräsen, nachbearbeitet werden, denn erst dadurch ist die notwendige Präzision für den Werkzeug- und Formenbau gewährleistet. Ein generierter Formeinsatz ist demnach als eine formnahe Normalie zu sehen, die durch entsprechende Folgeprozesse finalisiert werden muss.

Bei den schichtweise arbeitenden Fertigungsverfahren sind weitere Defizite in den geringen Aufbauraten von 5 bis 30 cm<sup>3</sup>/Stunde (SCHWARZE 2007), den derzeitig begrenzten Bauraumgrößen (maximal 300 x 350 x 300 mm<sup>3</sup>, BRANNER 2008) sowie in der nicht vorhandenen Wiederverwendbarkeit generativ gefertigter Formeinsätze zu sehen.

Die Vorteile dieser Technologien, wie beispielsweise das so genannte Conformal Cooling zur Zykluszeitreduktion (siehe Unterabschnitt 2.1.1), können im Bereich des Spritzgießens von Kleinserien oder der „Losgröße 1“ nicht wirtschaftlich genutzt

werden. Der Vorteil einer geringen Zykluszeit ist bei einem Prototypenwerkzeug nicht entscheidend. Vielmehr liegt der Fokus in der Minimierung der Herstellkosten des Werkzeugs, was durch die hohen Investitionen bei Metall verarbeitenden, generativen Fertigungstechnologien nur sehr schwer möglich ist. Die generativen Fertigungsverfahren werden daher in Zukunft im Bereich der Herstellung von Hightech-Serienwerkzeugen anzusiedeln sein.

Aufgrund der beschriebenen Vor- und Nachteile eines generativen Fertigungsprozesses im Bereich des Spritzgießens lässt sich ein entsprechender Handlungsbedarf bei der Entwicklung eines wiederverwendbaren, formflexiblen Prototypenwerkzeugs ableiten. Zum einen gilt es, den Vorteil der werkzeuglosen Fertigung zu realisieren, zum anderen sind der hohe Technologieaufwand und die hohen Anlagenkosten zu vermeiden. Hinzu kommt, dass bei generativer Fertigung zwar von einem flexiblen Fertigungsverfahren gesprochen werden kann, eine Flexibilität der hergestellten Formeinsätze jedoch nicht vorhanden ist. Das Ziel der Wiederverwendbarkeit eines Werkzeugs durch Formflexibilität ist mit der generativen Fertigungstechnologie nicht zu erreichen.

#### **3.1.2 Konventionelle Fertigungsverfahren im Bereich des Rapid Tooling**

Die konventionellen Fertigungsverfahren bei der Prototypenwerkzeugherstellung basieren auf dem Zerspanen mit geometrisch bestimmter Schneide, in der Regel also dem Fräsen. Im Prototypenwerkzeugbau werden in erster Linie Aluminium-Werkstoffe verwendet, die Defizite in der Standzeit im Vergleich zu einem Stahlwerkzeug aufweisen, jedoch eine kürzere Herstellzeit durch schnellere Vorschubgeschwindigkeiten und größere Spanungsdicken ermöglichen. Sowohl das High Speed Cutting als auch das Hochvorschubfräsen erlauben zudem die Übernahmen bestehender Strukturen und Organisationsformen aus dem Serienwerkzeugbau sowie die Adaption an den Prototypenwerkzeugbau ohne große Änderung. Ein weiterer Vorteil des konventionellen Prototypenwerkzeugbaus besteht in der Verwendung von auf Formrahmen basierenden, flexiblen Werkzeugsystemen, die lediglich durch formgebende Einsätze ergänzt werden müssen. Diese können über HSC oder Hochvorschubfräsen realisiert werden. Allerdings bedarf es bei der Herstellung eines Prototypenwerkzeugs mit konventionellen Verfahren immer einer aufwändigen Prozesskette. Lediglich 50 % der Herstellzeit eines Prototypenwerkzeugs entfällt auf das automatisierte Fräsen der Formeinsätze (BREITINGER 2005). Ein großer Anteil der Herstellzeit ist in der überwiegend manuell durchgeführten Konstruktion bzw. Ableitung der Werkzeuggeometrie und der anschließenden CAD/CAM-Kopplung zu finden. Optimierungspotenzial im Bereich der kon-

ventionellen Fertigung für Prototypenwerkzeuge ist demnach eher in der Durchgängigkeit der Automatisierung zu sehen als in einer weiteren technologischen Verbesserung des HSC oder des Hochvorschubfrässens. Auf Basis dieser Tatsache lässt sich die Notwendigkeit einer ab der Konstruktionszeichnung des herzustellenden Bauteils vollständig automatisierten Fertigungskette identifizieren. Des Weiteren bieten konventionell gefertigte Formeinsätze keine Möglichkeit, Geometrieänderungen oder Varianten mit einem einzigen Werkzeugeinsatz abzubilden. Jede Änderung bedingt einen Neubeginn der gesamten Prozesskette.

Geometrien, wie beispielsweise tiefe Kavitäten mit geringen Aspektverhältnissen, bei denen Fräswerkzeuge an Bearbeitungsgrenzen stoßen, erfordern neben dem eigentlichen Fräsen weitere Fertigungsverfahren. Gerade dann kommen häufig Erodierverfahren zum Einsatz. Damit sind zusätzliche, für den Erodierprozess notwendige Werkzeuge zu konstruieren, herzustellen und einzusetzen. Auch hier ist der große manuelle Arbeitsanteil zu beachten. Bei der Entwicklung eines formflexiblen Spritzgießwerkzeugs gilt es daher, die Vorteile der konventionellen Fertigungsverfahren (z. B. hohe Oberflächenqualität oder kurze Fräsezeiten) zu nutzen und durch entsprechende Automatisierungsstrategien den manuellen Herstellzeitanteil so gering wie möglich zu halten (einfache CAD/CAM-Kopplung oder automatisches Ableiten der Werkzeuggeometrie).

#### 3.1.3 Rapid Tooling mittels Verfahrenskombinationen

Im Bereich der Verfahrenskombinationen wird versucht, bestehende Defizite eines Fertigungsverfahrens durch die Kombination mit einem anderen Verfahren zu eliminieren. Ein Beispiel einer solchen Verfahrenskombination ist im Präzisions-Laserstrahlsintern zu sehen (siehe Unterabschnitt 2.1.3.4). Dabei wird die Maßgenauigkeit und schlechte Oberfläche eines generativ hergestellten Formeinsatzes bereits während des Herstellens durch einen integrierten Fräsvorprozess ausgeglichen. Auch beim Controlled Metal Build Up (siehe Unterabschnitt 2.1.3.1) wird diese Strategie eingesetzt, um maßhaltige Prototypenwerkzeugeinsätze realisieren zu können. Solche Verfahrenskombinationen aus *Aufbauen von Material* und *Finalisieren der Geometrie mittels spanender Verfahren* sind technisch sinnvolle Lösungen, die vorhandenen Defizite generierender Verfahren auszugleichen. Allerdings steigt der bereits hohe technologische Aufwand generativ arbeitender Anlagen durch die Integration einer fräsenden Einheit zusätzlich. Die Frage nach der Wirtschaftlichkeit einer Verfahrenskombination muss daher generell sehr detailliert analysiert werden. Der Vorteil der Verfahrenskombinationen gegenüber einer sequentiellen Prozesskette besteht in der Möglichkeit der maßgenauen Herstellung eventuell später nicht mehr zugänglicher Be-

reiche (z. B. Kühlkanäle) mit optimierten Oberflächen. Es bedarf auch in diesem Punkt einer genauen Analyse der Notwendigkeit dieser Optimierungsmöglichkeit sowie eines Vergleichs zwischen einer Verfahrenskombination in einer Anlage und aufeinander folgender Prozesse. Bei den meisten Anwendungsbeispielen des Prototypenbaus von Spritzgießwerkzeugen ist es fraglich, ob der technische Aufwand und damit die Herstellkosten des Formeinsatzes adäquat sind und die erzielbaren Vorteile einer Verfahrenskombination diesen Mehraufwand rechtfertigen. Bei der Entwicklung des formflexiblen, wiederverwendbaren Spritzgießwerkzeugs muss daher darauf geachtet werden, dass die Herstellkosten der Werkzeugkavität möglichst geringer sind als im konventionellen Prototypenwerkzeugbau bei gleichzeitigem Minimieren der Investition in das Werkzeugsystem.

#### 3.1.4 Rapid Tooling durch Modularisierungsansätze

Die in Unterabschnitt 2.1.4 dargestellten Verfahren beruhen auf einer Modularisierung des eigentlichen Werkzeugs bzw. des formgebenden Bereichs. Dabei werden Einsätze in verschiedene Modularisierungsgrade unterteilt. Die Verfahren Space Puzzle Molding (siehe Unterabschnitt 2.1.4.1) und ecoMold (siehe Unterabschnitt 2.1.4.2) gliedern das Werkzeug in 3-dimensionale, formgebende Segmente, die durch konventionelle und generative Fertigungsverfahren hergestellt werden. Im Bereich der Lamellenwerkzeuge werden hingegen quasi 2-dimensionale Elemente verwendet (siehe Unterabschnitt 2.1.4.3), so dass durch deren Kombination ein 3-dimensionaler Formeinsatz entsteht. Bei allen dargestellten Modularisierungsansätzen ist von Vorteil, dass bei einer Geometrieänderung nur die betroffenen Module ersetzt werden müssen. Damit ist der erste Schritt in Richtung einer Wiederverwendbarkeit von Prototypenwerkzeugen vollzogen. Beim SPM und ecoMold ist allerdings anzumerken, dass sowohl generative als auch konventionelle Fertigungstechniken eingesetzt werden. Damit sind die bereits beschriebenen Defizite beider Verfahren zu berücksichtigen (siehe Abschnitt 3.1 und Unterabschnitt 3.1.2). Durch einen sinnvollen Einsatz im Hinblick auf die Notwendigkeit der Verfahren zur Realisierung bestimmter Geometrien bei den unterschiedlichen Modulen können die Herstellkosten des gesamten Werkzeugs gesenkt werden. Allerdings ist zu beachten, dass bei beiden Modularisierungsansätzen eine sehr aufwändige Konstruktion des Prototypenwerkzeugs notwendig wird. Durch den Verzicht auf Schieber steigt zudem die Zykluszeit beim Spritzgießen, so dass das Werkzeug zur Entnahme des Spritzlings vollständig zerlegt und anschließend wieder zusammenge setzt werden muss. Bei den Lamellenwerkzeugen, die nicht dauerhaft gefügt sind, ist es im Fall einer Geometrieänderung einfach, die betroffenen Bereiche zu ersetzen. Da diese Lamellenwerkzeuge auf sehr dünnen Folien oder Blechen basieren, ist der

Modularisierungsgrad hoch und die auszuwechselnden Bereiche können exakt definiert werden. Die Wiederverwendbarkeit der Lamellen selbst ist bei diesem Ansatz nicht realisiert, da die Modularisierung nur in einer Raumrichtung durchgeführt wird. Die konsequente Weiterentwicklung eines Lamellenwerkzeugs ist demnach in den in Unterabschnitt 2.2.3 dargestellten modulbasierten, wiederverwendbaren Werkzeugsystemen zu sehen, die auf Stempeln beruhen.

### 3.1.5 Wiederverwendbare Werkzeugsysteme

Sowohl die Entwicklungen des Instituts für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart als auch die Werkzeuge der Ausgründung *OptiMal Forming Solutions* und der Firma *Surface Generation Ltd.* nutzen den Ansatz der Modularisierung zur Herstellung von wiederverwendbaren Werkzeugsystemen. Bei allen Systemen sind Stempel in Gebrauch, die direkt oder indirekt als Werkzeugwirkfläche fungieren. Die Detailauflösung aller Systeme ist den Einsatzgebieten angepasst. Beim Umformen kommen Stempel mit einem Querschnitt von beispielsweise 6 mm x 6 mm zum Einsatz (Smatloch 1996), bei der Herstellung eines SPT-Werkzeugs sind minimale Querschnitte von 25 mm x 25 mm denkbar. Vorteilhaft bei allen in Abschnitt 2.2 dargestellten modulbasierten Systemen ist die Bestrebung zur vollständigen Automatisierung der Kavitätseinstellung. Bei der Entwicklung des formflexiblen Spritzgießwerkzeugs ist der hohe Automatisierungsgrad demnach auch eine Grundvoraussetzung. Die Schwierigkeit dabei ist in der hohen notwendigen Detailauflösung zu sehen, da die Stempel bzw. Module filigran auszulegen sind und damit eine sehr präzise arbeitende Einstellvorrichtung notwendig wird. Hinzu kommt, dass die Dichtigkeit der modulbasierten, wiederverwendbaren Werkzeuge im Bereich des Sandgusses und der Umformtechnik im Vergleich zum Spritzgießen geringere Relevanz hat. Des Weiteren bedarf es der Integration spritzgießrelevanter Funktionen, wie Auswerfer oder Einlegerne bzw. Schieber. Die Anforderungen an ein modulares, wiederverwendbares Werkzeugsystem für das Spritzgießen unterscheiden sich demnach in der Anzahl und Ausprägung erheblich von den aus der Umformtechnik bekannten Ansätzen. Ein einfaches Übertragen der Systeme ist daher nicht zielführend.

Der Einsatz eines Vakuumkissens, wie es beim RTS-Verfahren genutzt wird, ist beim Abformen großer Bauteile sinnvoll, jedoch scheidet die Anwendung des Systems beim Spritzgießen aus. Zum einen ist es nicht möglich, beispielsweise einen für das Entformen des Spritzlings notwendigen Auswerferstift zu integrieren, zum anderen kann das Vakuumkissen bzw. die elastische Membran nur einen eingeschränkten Detailierungsgrad abbilden. Erschwerend kommt hinzu, dass scharfe Kanten und spitze

Winkel durch das RTS-Verfahren nicht dargestellt werden können. Auch das Einprägen der Form durch das manuelle Abformen eines bereits vorhandenen Bauteils ist, zur Erfüllung der Zielsetzung eines hohen Automationsgrads bei der Formgenerierung, undenkbar. Der Ansatz der Modularisierung durch Stempel erscheint nach der Betrachtung des Stands der Technik am vielversprechendsten.

## 3.2 Identifizierter Handlungsbedarf

Anhand des vorangegangenen Abschnitts kann konstatiert werden, dass die Entwicklung eines formflexiblen, wiederverwendbaren Werkzeugsystems sinnvoll ist. In Ergänzung zu den in Abschnitt 1.4 definierten Zielen, die sich aus der wandelnden Marktsituation (Motivationssicht 1), den Herausforderungen im Werkzeug- und Formenbau (Motivationssicht 2) sowie den allgemein vorherrschenden Defiziten im Bereich des Rapid Tooling (Motivationssicht 3) ergeben haben, lässt sich weiterer Handlungsbedarf aus dem dargelegten Stand der Technik ableiten. Folgende Aufzählung fasst die identifizierten Herausforderungen bei der Entwicklung eines formflexiblen, wiederverwendbaren Werkzeugsystems zusammen:

- Entwicklung eines Werkzeugsystems mit geringer Anlagenkomplexität
- hohe Wiederverwendbarkeit durch Formflexibilität
- geringer Nachbearbeitungsaufwand
- automatisierte Abläufe (Werkzeugableitung und Formgenerierung)
- Möglichkeit zur Absicherung der Serienproduktion bzw. des Produktionsstarts
- Ermittlung von Gestaltungsfehlern und Absicherung des Fließverhaltens
- schnelle und kostengünstige Formänderungen in jeder Projektphase
- geringe Investitions- und Herstellkosten
- Herstellung von Kleinserien aus Originalkunststoffen in Serienqualität
- werkzeuglose Fertigung
- einfache Schnittstellenrealisierung (Verzicht auf aufwändige CAD/CAM-Kopplungen)
- Erfüllung spritzgießrelevanter Anforderungen

Nach der Identifikation des Handlungsbedarfs und der Definition von Zielen bei der Realisierung eines wiederverwendbaren Werkzeugsystems ist es notwendig, ein technisches Umsetzungskonzept zu erarbeiten. Die vorangegangenen Kapitel und Abschnitte beschreiben die Notwendigkeit zur Entwicklung von Formflexibilität zur Realisierung von Wiederverwendbarkeit im Bereich des Spritzgießens. Bisherige Arbeiten aus anderen Bereichen der Produktionstechnik betrachten in erster Linie die technische Umsetzung von flexiblen Werkzeugsystemen. Eine entwicklungsunterstützende Methode zum strukturierten Vorgehen bei der Realisierung von Formflexibilität existiert bislang nicht. Im folgenden Kapitel wird daher eine allgemeingültige Entwicklungsmethode vorgestellt und am Beispiel des Spritzgießens angewendet.

### 3.2 Identifizierter Handlungsbedarf

## 4 Methode zur Realisierung von Formflexibilität in der Werkzeugentwicklung

### 4.1 Motivation für die Erarbeitung einer allgemeingültigen Methode

Die vorangegangenen Kapitel beschreiben detailliert, weshalb das Ergebnis der Entwicklung von formflexiblen Werkzeugen eine zukunftsweisende Technologie ist. Neben Kosteneinsparungen im Bereich der Werkzeugherstellung durch eine variable Einsetzbarkeit und damit reduzierte Werkzeugvarianten und -mengen sind auch verkürzte Herstellzeiten von Produkten, die mittels formflexibler Werkzeuge produziert werden, von Relevanz. Für den Endverbraucher können die Preise trotz gesteigerter Produktindividualität somit gesenkt werden. Allerdings werden die beschriebenen Potenziale der Formflexibilität derzeit noch nicht breitenwirksam industriell genutzt. Dies ist darin begründet, dass bisher nur vereinzelt Ansätze der physikalischen Realisierung betrachtet wurden (siehe Abschnitt 2.2).

Die zukünftige Notwendigkeit des Einsatzes von Formflexibilität in der Produktionstechnik ist durch die dargestellten Potenziale begründbar. Sobald allerdings die Realisierung von Formflexibilität angegangen werden soll, wird sehr schnell klar, dass ein Umsetzungsanstoss bzw. eine initiale Idee, auf Grund der nicht vorhandenen Erfahrung mit dem Thema Formflexibilität, nur schwerlich zu finden ist. Weiterhin werden unkonventionelle, innovative Ansätze häufig von Bedenkenträgern bereits in frühen Entwicklungsstadien unverhältnismäßig stark angegriffen. Derzeit fehlt es an der nötigen Wissensbasis, die die bereits vorhandenen Erfahrungen und Ideen mit Formflexibilität bzw. mit dem Umgang derselben dokumentiert. Zur Überwindung dieser Hindernisse ist es notwendig, eine allgemeingültige Methode zur gezielten Entwicklung von Formflexibilität anzubieten. Die konsequente Anwendung dieser hilft dabei, mögliche physikalische Realisierungsansätze auf Grund gegebener Anforderungen an das zu entwickelnde formflexible Werkzeug oder Produkt zu finden und gleichzeitig bei der detaillierten Ausarbeitung des gesamten Systems zu unterstützen.

Die in der Methode hinterlegten physikalischen Prinzipien und Anforderungen sind im Laufe der Erarbeitung dieser Dissertation erfasst und entwickelt worden und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr ist es Sinn dieser Sammlung bzw. Strukturierung, eine Datenbasis zu schaffen, die durch zukünftige Forschung ergänzt

und ausgebaut werden kann und somit einen erstmaligen Wissensspeicher im Bereich der Formflexibilität für nachfolgende Arbeiten darstellt.

## 4.2 Entwickelte und adaptierte Methodenbausteine

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode gliedert sich in zwei Phasen. Die erste dient zur Findung des am besten geeigneten physikalischen Grundprinzips zur Realisierung von Formflexibilität, die zweite beinhaltet ein Vorgehensmodell, das sich bei der Entwicklung eines formflexiblen Werkzeugs im Bereich des Spritzgießens bewährt hat. Phase 1 beginnt mit einer abstrakten Anforderungsanalyse des zu entwickelnden Systems. Dabei unterstützt die Methode darin, dass bereits allgemeingültig formulierte mögliche Anforderungen gesammelt und in Form einer Anforderungsmatrix strukturiert bzw. hinterlegt sind (siehe Abbildung 12, links oben).

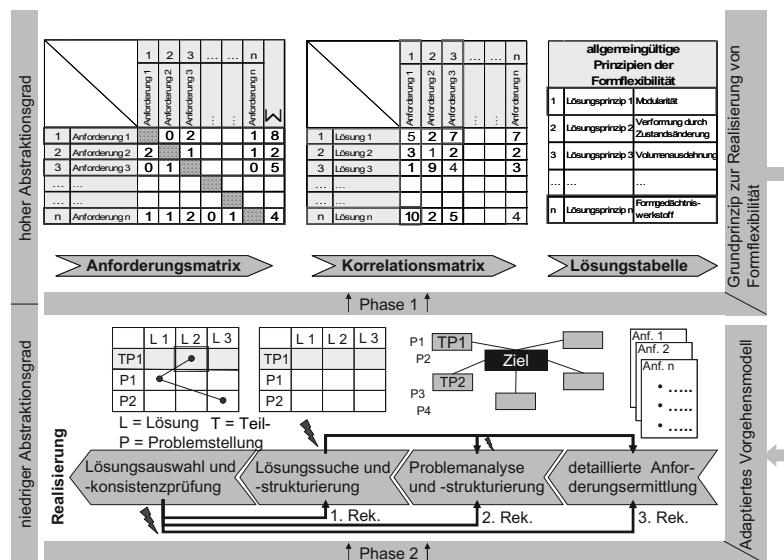


Abbildung 12: Entwicklungsunterstützende Methode zur Realisierung von Formflexibilität

Diese allgemeingültigen, so genannten Phase-1-Anforderungen charakterisieren ein zu entwickelndes formflexibles System anwendungsbezogen. Hierbei sind konkrete Anforderungen zur technischen Realisierung des Systems noch zu vernachlässigen.

Vielmehr geht es darum, die essenziellen Eigenschaften des Systems zur Erfüllung des geplanten Einsatzgebiets zu finden.

Das Ergebnis der Auswertung der Anforderungsmatrix ist eine Hierarchisierung der Phase-1-Anforderungen. Im zweiten Schritt der 1. Methodenphase werden diese in eine Korrelationsmatrix überführt. Diese Matrix kombiniert die Anforderungen mit den in der Methode hinterlegten Lösungsprinzipien zur Realisierung von Formflexibilität. Die Korrelationsmatrix beinhaltet eine Bewertung des Erfüllungsgrads jedes Lösungsprinzips im Hinblick auf die vordefinierten Phase-1-Anforderungen. Bei dieser Bewertung findet eine Unterteilung in direkt und indirekt bewertbare Anforderungen statt. Indirekt bewertbare Anforderungen können dabei nicht über die Vergabe einer einzigen Note bewertet werden. Daher sind pro indirekt bewertbarer Anforderung weitere Subanforderungen in der Methode hinterlegt, die eindeutig mit einer Note bewertet werden können. Eine detaillierte Beschreibung dieses Ablaufs am konkreten Beispiel des formflexiblen Spritzgießwerkzeugs ist Abschnitt 4.3 zu entnehmen. Der Mittelwert aller definierten Subanforderungen ergibt die Gesamtbewertung der indirekt bewertbaren Anforderung in der Korrelationsmatrix. Über einen Microsoft-Excel-Algorithmus werden dem Anwender der Methode automatisch die auf Basis seiner Anforderungen am sinnvollsten einzusetzenden Lösungsprinzipien angeboten. In der Lösungstabelle kann abschließend zur Phase 1 das allgemeingültige identifizierte physikalische Grundprinzip anhand von konkreten Beispielen im Grad der Abstraktion reduziert werden, was den Übergang der abstrakten Phase 1 in die konkrete Phase 2 darstellt.

Ziel von Phase 2 ist es, eine übersichtliche Struktur aller Anforderungen und damit Aufgaben bzw. Problemstellungen bei der technischen Realisierung formflexibler Systeme zu erhalten und diese in untereinander kompatible Subsysteme und Teillösungen bzw. Einzellösungen zu gliedern. In Anlehnung an die VDI-Richtlinie „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ (VDI 2221) wird dazu ein systematischer Problemlösungszyklus genutzt. Anhand einer rekursiven Problemlösung kann jedes Teilproblem analysiert, ähnlichen Thematiken zugeordnet und anschließend in Form von morphologischen Kästen gelöst werden. Ein großer Vorteil dieses strukturierten, methodischen Vorgehens ist darin zu sehen, dass die Komplexität des Ausgangsproblems, die Entwicklung flexibler Systeme, durch die Definition von Einzelproblemen abnimmt.

Aus diesem Grund beginnt Phase 2 ähnlich wie Phase 1 mit der Sammlung von Anforderungen. In diesem Fall schlägt die Methode keine allgemeingültigen Anforderungen vor (vergleiche Phase 1). Vielmehr liegt der Fokus hierbei auf der Sammlung der relevanten technisch umzusetzenden Eigenschaften des speziell be-

trachteten formflexiblen Systems, um diese im folgenden Schritt zu strukturieren (ZÄH et al. 2007b). Dazu werden die identifizierten Anforderungen in zu lösende Teilprobleme überführt. Die entwickelte Methode sieht hierbei eine Mind Map vor. Diese ist gegliedert in Teilprobleme und Einzelprobleme und stellt so einen möglichst vollständigen Aufgabenkatalog dar. Auf Basis dieser Mind Map kann ein morphologischer Kasten erstellt werden, der in der Horizontalen alle zu lösenden Teil- und Einzelproblemstellungen enthält und in der Vertikalen eine Sammlung geeigneter Lösungsprinzipien beinhaltet. Es ist für die zielgerichtete Gesamtlösungsfindung essenziell, dass in der ersten Zeile des morphologischen Kastens Lösungen gefunden werden, die das abstrakt formulierte und in Phase 1 identifizierte Realisierungsprinzip von Formflexibilität ermöglichen. Folglich ist gewährleistet, dass bei der Findung von Teilproblemlösungen immer auch die Eignung zur Integration in das Realisierungskonzept der Formflexibilität möglich wird. Sobald der morphologische Kasten mit Lösungsprinzipien gefüllt ist, kann in einem weiteren Schritt für jedes Teilproblem die am besten geeignete Lösung für jedes Einzelproblem ermittelt werden. Hierzu sind verschiedene Bewertungsmethoden aus der Produktentwicklung einzusetzen. Sowohl ein paarweiser Vergleich als auch eine Bewertung durch Notenvergabe ist bei der Lösungsfindung möglich (LINDEMANN 2002). Sobald für jedes Einzelproblem eine Lösungsvariante gefunden ist, werden diese Lösungsvarianten zu Lösungsketten zusammengefasst. Ergänzend muss jede Kette hinsichtlich ihrer Konsistenz teilproblemintern und -extern überprüft werden. Dabei sind die Teilprobleme im Hinblick auf ihre Relevanz für das gesamte formflexible System zu bewerten und zusätzlich ist jedes Einzelproblem innerhalb eines Teilproblems zu priorisieren. So entsteht eine Problemhierarchie. Die darauf aufbauende Konsistenzprüfung besteht aus dem Vergleichen der jeweils ausgewählten Einzellösungen eines Teilproblems hinsichtlich Verträglichkeit mit dem in der Problemhierarchie höher stehenden Einzelproblem. Im Fall der Inkonsistenz muss die zweitplatzierte Einzellösung des weniger wichtigen Einzelproblems hinsichtlich Konsistenz geprüft und gegebenenfalls ausgewählt werden. In gleicher Weise wird eine Konsistenzprüfung aller Teilprobleme durchgeführt. Auch hier ist das weniger relevante Teilproblem bei einer Inkonsistenz mit einem relevanter bewerteten Teilproblem gegebenenfalls über die Einzelproblemlösungen anzupassen. Sukzessive entsteht eine Lösungskette, die für alle Teilprobleme eine technisch realisierbare Möglichkeit bietet und im Hinblick auf das zu entwickelnde gesamte formflexible System keine Inkonsistenzen bzw. Unverträglichkeiten aufweist. Sollte die Konsistenzprüfung ergeben, dass ein Teilproblem bzw. keine der gefundenen Einzellösungen dieses Teilproblems in die identifizierte Lösungskette passt bzw. passen, so greift die Rekursionsmöglichkeit der 2. Phase. Die Methode muss erneut durchlaufen werden (siehe Abbildung 12, unten). Hierbei empfiehlt es sich allerdings, zuerst eine erneute

Lösungssuche und -strukturierung zu erarbeiten. Sollte sich zeigen, dass diese 1. Rekursion im Hinblick auf eine konsistente Lösungskette nicht zielführend ist, so erfolgt eine 2. Rekursion. Dabei wird erneut eine Problemanalyse und -strukturierung durchgeführt und Phase 2 der Methode nochmals durchlaufen. Falls nach dieser 2. Rekursion weiterhin eine Inkonsistenz besteht, so ist eine 3. Rekursion vorgesehen. Hierbei wird überprüft, ob die Anforderungen, die zur Definition des inkonsistenten Teilproblems führen, relevant sind oder ob eine Änderung dieser möglich ist und damit die Inkonsistenz der Lösungskette behoben werden kann.

Das Ergebnis von Phase 2 der entwicklungsunterstützenden Methode zur Realisierung von Formflexibilität besteht aus einem morphologischen Kasten, der sowohl alle Anforderungen (beschrieben durch Teil- und Einzelproblemstellungen) an das flexible System als auch eine Dokumentation aller Lösungsideen beinhaltet. Die Definition der angesprochenen Lösungskette ermöglicht eine gezielte Entwicklung und ist die Basis für die Realisierung des formflexiblen Systems. Im folgenden Abschnitt ist der Methodenablauf am Beispiel des Spritzgießens verdeutlicht.

## 4.3 Methodenablauf und -anwendung der Phase 1 am Beispiel des Spritzgießens

### 4.3.1 Anforderungsmatrix

Wie bereits im Abschnitt 4.2 erwähnt, besteht der erste Schritt der Phase 1 darin, abstrakt formuliert und in der Methode bereits hinterlegte Anforderungen hinsichtlich eines spezifischen Anwendungsfalls zu gewichten. Die entwickelte Methode beinhaltet dabei eine Matrix, mit deren Hilfe die Bewertung der Phase-1-Anforderungen möglich wird. Diese Matrix stellt die verschiedenen Anforderungen paarweise gegenüber. Dabei werden die jeweiligen Zeilen mit den Spalten verglichen und in Bezug auf das Anwendungsgebiet (hier Spritzgießen) bewertet.

Ist die Anforderung der Zeile wichtiger als die der verglichenen Spalte, so wird die Note „2“ vergeben. Besteht zwischen den Anforderungen kein Unterschied, so ist die „1“ zu wählen. Sollte die Anforderung der Zeile weniger Relevanz im Vergleich zur Anforderung in der Spalte haben, so ist die „0“ zu verwenden. Die Anforderungsmatrix spiegelt automatisch die ausgefüllten Felder an der Matrizendiagonalen und invertiert die vergebenen Noten. Bei Anforderungen, die für den Anwendungsfall keine Relevanz haben, bleibt die Matrix unausgefüllt. Die Auswertung der Matrix erfolgt durch die

Bildung einer Summe aller Werte pro Zeile. Dadurch entsteht die angesprochene Anforderungshierarchie (siehe Abbildung 13).

		Detailauflösung										Alternative Beispiele		
		Maßgenauigkeit	Verschleißfestigkeit	Nachbearbeitbarkeit	Realisierbarkeit von Rippen, Hinterschnitten...	Prozesssicherheit	Wiederverwendbarkeit	Gewichtungs-vorschlag			Gewichtungs-vorschlag	Gewichtungs-vorschlag	Gewichtungs-vorschlag	
		1	1	1	1	0	2	1			20 %	0 %	5 %	
Detailauflösung		1	1	1	1	0	2	(12)			10 %	0 %	13 %	
Maßgenauigkeit		1	2	1	1	1	1	(10)			15 %	15 %	30 %	
...		...	...	...	...	...	...				10 %	20 %	20 %	
Verschleißfestigkeit		1	0	1	0	1	1	(11)			25 %	0 %	2 %	
...		...	...	...	...	1	...				10 %	35 %	25 %	
Nachbearbeitbarkeit		1	1	1	1	1	2	1	1	(10)	10 %	30 %	5 %	
...		...	...	...	...	...	...				100 %	100 %	100 %	
Realisierbarkeit von Rippen, Hinterschnitten, ...		1	1	2	2	0	2	(13)			100 %	100 %	100 %	
...		...	...	...	...	...	...							
Prozesssicherheit		2	1	1	0	2	1	(10)						
...		...	...	...	...	...	...							
Wiederverwendbarkeit		0	1	1	1	0	1	(10)						
...		...	...	...	...	...	...							

Abbildung 13: Auswahl und Gewichtung von Phase-1-Anforderungen beim Spritzgießen (Ausschnitt)

Das Ergebnis der vollständig ausgefüllten Anforderungsmatrix im Fall des Spritzgießens ergibt, dass die folgenden Phase-1-Anforderungen relevant sind:

- Realisierbarkeit von Rippen und Hinterschnitten (13 Punkte)
- Detailauflösung (12 Punkte)
- Verschleißfestigkeit (11 Punkte)
- Maßgenauigkeit (10 Punkte)
- Prozesssicherheit (10 Punkte)
- Wiederverwendbarkeit (10 Punkte)
- Nachbearbeitbarkeit (10 Punkte)

Um die aus dem Phase-1-Portfolio selektierten Anforderungen für den nächsten Methodenschritt verwenden zu können, bietet die Anforderungsmatrix die Möglichkeit, eine Gewichtung der selektierten Anforderungen durchzuführen. Dabei wird automatisch der Gewichtungsvorschlag 1 angeboten (siehe Abbildung 13, rechts), der die ermittelte Punktzahl pro Anforderung in Prozent umrechnet. Bei einer Staffelung von 5 Prozentschritten bedeutet dies, dass 13 Punkte einer 25 %-Gewichtung entsprechen, analog dazu 12 Punkte 20 %, 11 Punkte 15 % und 10 Punkte 10 % gleich kommen. Die

Gewichtungsvorschläge 2 und 3 sind vom Benutzer der Methode auszufüllen und ermöglichen eine Beeinflussung des Ergebnisses der Phase 1. Die ermittelten und gewichteten Anforderungen werden im Anschluss an die so genannte Korrelationsmatrix übergeben.

### 4.3.2 Korrelationsmatrix

Die Anforderungen mit den höchsten Bewertungen und der in der korrelierenden Matrix entsprechend festgelegten Gewichtung werden für das weitere Vorgehen der Phase 1 berücksichtigt. Diese Korrelationsmatrix schlägt prinzipielle Lösungsmöglichkeiten vor, die dem Ansatz der Formflexibilität entsprechen und verbindet diese mit den Phase-1-Anforderungen. In dieser Matrix ist die Eignung des jeweiligen Lösungsprinzips im Hinblick auf jede Anforderung entweder direkt oder indirekt bewertet. Bei der direkten Bewertung erhält jede Anforderung eine Note von 0 bis 10 (schlechte bis sehr gute Eignung). Indirekt bewertbare Anforderungen sind mit einer Note nur unpräzise zu bewerten und werden daher in zusätzliche Sub-Anforderungen untergliedert. Deren Beurteilung kann aufsummiert und auf die Notenskala von 0 bis 10 normiert werden (siehe Abbildung 14).

Unter Verwendung des entwickelten Bewertungsschemas kann die eigentliche Korrelationsmatrix aufgestellt werden. Hier sind die Subanforderungen vernachlässigt und durch eine Gesamtnote pro indirekt bewertbarer Anforderung berücksichtigt.

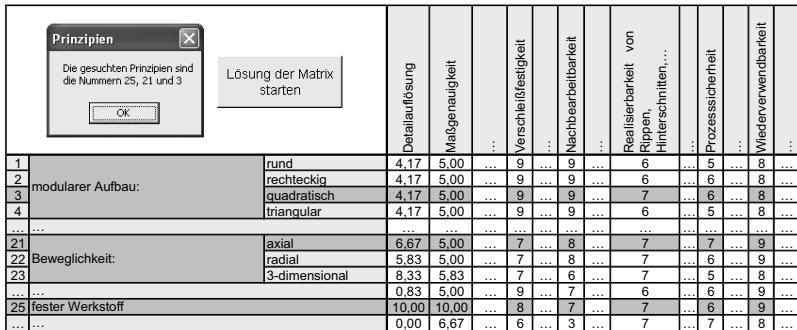
Ziel der eigentlichen Korrelationsmatrix ist die Ermittlung des für die identifizierten Anforderungen geeigneten Lösungsprinzips. Dazu werden die Bewertungen (Noten) in den jeweiligen Spalten miteinander verglichen. Die Zeile, die die höchste Summe der Bewertungen enthält, ist das gesuchte Lösungsprinzip, das die gestellten Anforderungen am besten erfüllt. Dabei wird die prozentuale Gewichtung aus der Anforderungsmatrix berücksichtigt. Um die entsprechenden Lösungsprinzipien zu ermitteln, ist in die Korrelationsmatrix ein Microsoft-Excel-Makro integriert, das einen automatischen Lösungsalgorithmus enthält. Dieses Makro wird über eine Schaltfläche aufgerufen und bestimmt nach Eingabe der relevanten Anforderungen die geeigneten Lösungsprinzipien. Hierbei wird zeilenweise folgende Formel angewendet:

$$\text{Punktzahl Prinzip } i = \sum_{m=1}^n \left( \text{Note}_{im} \cdot \frac{\text{Gewichtungsschlüssel } G}{100} \right) \quad (1)$$

Anforderungen		Lösungsprinzipien für Formflexibilität		ausgewählte Anforderungen																			
		Soll-Anforderungen		Detailauflösung			Maßgenauigkeit				Verschleißfestigkeit		Nacharbeitbarkeit		Realisierbarkeit von Rippen, Hinterschichten,...		Prozesssicherheit		Wiederverwendbarkeit				
Legende: ++ 4 + 3 0 2 - 1 -- 0																							
1	modularer Aufbau:	rund		filigrane Strukturen Eckerradien Aspektverhältnis	-	5	4,17	Rasterung Schwund Toleranzen	++	6	5	...	9	...	9	...	6	...	5	...	6	...	
2		rechteckig		filigrane Strukturen Eckerradien Aspektverhältnis	--	5	4,17	Rasterung Schwund Toleranzen	--	6	5	...	9	...	9	...	6	...	6	...	6	...	
3		quadratisch		filigrane Strukturen Eckerradien Aspektverhältnis	-	5	4,17	Rasterung Schwund Toleranzen	++	6	5	...	9	...	9	...	7	...	6	...	6	...	
4		triangular		filigrane Strukturen Eckerradien Aspektverhältnis	-	5	4,17	Rasterung Schwund Toleranzen	0	6	5	...	9	...	9	...	6	...	5	...	6	...	
5	chemische Reaktion:	Wärmeentwicklung		filigrane Strukturen Eckerradien Aspektverhältnis	-	0	0,00	Rasterung Schwund Toleranzen	++	6	5	...	6	...	9	...	4	...	4	...	8	...	
6	temporäre Verfestigung			filigrane Strukturen Eckerradien Aspektverhältnis	+	7	5,83	Rasterung Schwund Toleranzen	++	0	8	6,67	...	5	...	3	...	8	...	7	...	10	...
7	örtliche Verfestigung			filigrane Strukturen Eckerradien Aspektverhältnis	0	4	3,33	Rasterung Schwund Toleranzen	-	5	4,17	...	5	...	3	...	7	...	7	...	10	...	
8	schichtweiser Aufbau:	konstante Schichtdicke		filigrane Strukturen Eckerradien Aspektverhältnis	-	5	4,17	Rasterung Schwund Toleranzen	+	4	3,33	...	5	...	3	...	6	...	7	...	10	...	
9		unterschiedliche Schichtdicken		filigrane Strukturen Eckerradien Aspektverhältnis	+	7	5,83	Rasterung Schwund Toleranzen	-	5	4,17	...	5	...	3	...	6	...	7	...	10	...	
10	Volumenausdehnung			filigrane Strukturen Eckerradien Aspektverhältnis	-	3	2,50	Rasterung Schwund Toleranzen	++	0	6	5	...	6	...	6	...	5	...	6	...	7	...
11	Verformung durch Zustandsänderung (physikalisch):	Erwärmen		filigrane Strukturen Eckerradien Aspektverhältnis	-	0	0,00	Rasterung Schwund Toleranzen	++	6	5	...	8	...	6	...	2	...	5	...	2	...	
12		Krafteinbringung		filigrane Strukturen Eckerradien Aspektverhältnis	0	0	5	Rasterung Schwund Toleranzen	++	10	8,33	...	10	...	6	...	3	...	5	...	2	...	
...	...	...		...	...	...	...	indirekt bewertbare Anforderungen											direkt bewertbare Anforderungen				

Abbildung 14: Ausschnitt der Bewertung von indirekt und direkt bewertbaren Anforderungen

Die Lösungsprinzipien mit den höchsten Punktzahlen werden am Bildschirm ausgegeben. Bei der Nutzung der Korrelationsmatrix mit den aus der Anforderungsmatrix ermittelten Phase-1-Anforderungen ergibt sich für das Spritzgießen folgendes Ergebnis (siehe Abbildung 15):



The screenshot shows a software interface for solving a correlation matrix. On the left, a dialog box titled 'Prinzipien' displays the message: 'Die gesuchten Prinzipien sind die Nummern 25, 21 und 3'. Below the dialog is a button labeled 'OK'. To the right of the dialog is a button labeled 'Lösung der Matrix starten'. The main area is a correlation matrix table with the following data:

		Detailauflösung	Maßgenauigkeit	Verschleißfestigkeit	Nachbearbeitbarkeit	Realisierbarkeit von Rippen, Hinterschlitzen...	Prozesssicherheit	Wiederverwendbarkeit	
1	rund	4,17	5,00	...	9	...	6	...	...
2	rechteckig	4,17	5,00	...	9	...	6	...	...
3	modularer Aufbau:	4,17	5,00	...	9	...	7	...	8
4	quadratisch	4,17	5,00	...	9	...	6	...	8
...	triangular	4,17	5,00	...	9	...	5	...	8
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21	axial	6,67	5,00	...	7	8	7	7	9
22	Beweglichkeit:	5,83	5,00	...	7	...	7	...	9
23	radial	8,33	5,83	...	7	...	7	...	8
...	3-dimensional	0,83	5,00	...	9	...	6	...	9
25	fester Werkstoff	10,00	10,00	...	8	7	7	6	9
...	...	0,00	6,67	...	6	3	7	7	8

Abbildung 15: Exemplarische Lösung der Korrelationsmatrix (Ausschnitt)

Die nach Gewichtungsvorschlag 1 bewerteten Anforderungen (siehe Abbildung 13, Gewichtungsvorschlag 1) führen über den Lösungsalgorithmus des Microsoft-Excel-Makros zu den Lösungsprinzipien „modularer Aufbau quadratisch“, „Beweglichkeit axial“ und „fester Werkstoff“. Durch Änderungen der Gewichtung der einzelnen Anforderungen (siehe Unterabschnitt 4.3.1) können weitere denkbare Lösungsprinzipien ermittelt werden. Die zweite vorgenommene Gewichtung (siehe Abbildung 13, Gewichtungsvorschlag 2) führt zu den Prinzipien „Volumenausdehnung“, „räumliche Begrenzung“ und „schütt-/rieselfähiger Werkstoff“. Ein nochmals veränderter Gewichtungsschlüssel (siehe Abbildung 13, Gewichtungsvorschlag 3) ergibt die Auswahl „räumliche Begrenzung“, „fester Werkstoff“ und „mehrstufige Herstellung“. Mit diesen Lösungsprinzipien bietet die Methode eine initiale Idee, wie ein formflexibles Spritzgießwerkzeug gestaltet bzw. ausgelegt werden kann.

### 4.3.3 Lösungstabelle

Um die noch abstrakt definierten Lösungsprinzipien weiter zu präzisieren, sind in der Lösungstabelle konkrete Beispiele für jedes Lösungsprinzip hinterlegt. Unter den Prinzipien „modularer Aufbau quadratisch“, „Beweglichkeit axial“ und „fester Werkstoff“ kann beispielsweise das in dieser Arbeit realisierte formflexible Werkzeug auf Basis eines Nadelkissens als Gesamtlösung verstanden werden. Bei diesem werden im Querschnitt quadratische Metallnadeln in einem Werkzeugrahmen geführt. Durch das axiale Verschieben jeder Nadel kann eine Kavität realisiert werden, die zum Abformen von Bauteilen genutzt werden kann. Nach erfolgter Spritzapplikation sind die Nadeln erneut zu verschieben und realisieren damit eine formflexible Oberfläche mit wiederverwendbaren Bestandteilen.

Der zweite Vorschlag aus der Korrelationsmatrix („Volumenausdehnung“, „räumliche Begrenzung“ und „schütt-/rieselfähiger Werkstoff“) kann ein Granulat oder Pulver sein, das einen elastischen Körper füllt und nach Eindrücken eines Bauteils evakuiert wird (siehe Abschnitt 2.2.1). So entsteht eine Form, die als Kavität für das Spritzgießen Verwendung findet. Durch Fluten des elastischen Körpers ist das Granulat wieder rieselfähig, und eine neue Form kann eingeprägt werden.

Das dritte vorgeschlagene Gesamtkonzept „räumliche Begrenzung“, „fester Werkstoff“ und „mehrstufige Herstellung“ ist derart interpretierbar, dass ein zu entwickelnder Schaum durch beispielsweise fräsende Bearbeitung zu einem Spritzgießwerkzeug geformt wird und nach erfolgreicher Spritzapplikation durch eine chemische Reaktion mit den zuvor abgetragenen Spänen aufgelöst, erneut verfestigt und mit neuer Geometrie überfräst werden kann.

Diese denkbaren und im Sinn des formflexiblen Einsatzes beim Spritzgießen anwendbaren Lösungsvorschläge sind das Ergebnis der ersten Phase und werden in Form eines morphologischen Kastens der Phase 2 übergeben (siehe Tabelle 2). Dieser füllt und ergänzt sich durch das sequentielle Abarbeiten der zweiten Phase der Methode.

	Lösungsvorschlag 1	Lösungsvorschlag 2	Lösungsvorschlag 3
<b>Problemstellungen</b>			
Auslegung/Verfahren des formflexiblen Werkzeugs (Ergebnis der Phase 1)	Nadelkissen	Granulat/Pulver im Vakuumsack	Schaum fräsen
<b>Teilproblemstellung 1</b>			
Ergebnisse der Phase 2	n. n.	n. n.	n. n.
<b>Teilproblemstellung 2</b>			
Ergebnisse der Phase 2	n. n.	n. n.	n. n.
<b>Teilproblemstellung 3</b>			
Ergebnisse der Phase 2	n. n.	n. n.	n. n.
<b>Teilproblemstellung ...</b>			
Ergebnisse der Phase 2	n. n.	n. n.	n. n.
<b>Teilproblemstellung n</b>			
Ergebnisse der Phase 2	n. n.	n. n.	n. n.

Tabelle 2: Morphologischer Kasten aus Phase 1

## 4.4 Methodenablauf und -anwendung der Phase 2 am Beispiel des Spritzgießens

### 4.4.1 Anforderungsermittlung

In Anlehnung an einen systematischen Problemlösungszyklus besteht die Phase 2 der entwickelten Methode im ersten Schritt aus einer Sammlung aller relevanten und im

Vergleich zu den Phase-1-Anforderungen konkreten Anforderungen an ein formflexibles Spritzgießwerkzeug. Darauf aufbauend werden diese in zu lösende Teilprobleme überführt. Bei der Anforderungsanalyse kann auf die Darstellungen im Abschnitt 1.4 verwiesen werden. Zum einen gilt es, spritzgießrelevante Funktionen in dem zu entwickelnden formflexiblen Werkzeug zu realisieren, zum anderen sind die Vorteile, die die unterschiedlichen Rapid-Tooling-Verfahren (siehe Kapitel 2) bieten, zu nutzen bzw. sind deren Defizite (siehe Kapitel 3) zu vermeiden. Zusammenfassend lassen sich daher die im Folgenden lediglich exemplarisch aufgelisteten Phase-2-Anforderungen identifizieren:

- geeignete Maschinenaufnahme
- ausreichende Kraftaufnahme
- Führung und Zentrierung zwischen Werkzeug und Spritzgießanlage
- Integration eines Auswerferpaketes
- Integration eines Angussystems
- Realisierbarkeit von minimalen Rippen und Stegen
- Realisierbarkeit von Hinterschnitten
- Realisierbarkeit von fließenden Übergängen und Freiformflächen
- Entformbarkeit von Oberflächenstrukturen
- Entformbarkeit von Hinterschnitten
- ausreichende Maßgenauigkeit
- ausreichende Detailauflösung
- hohe abbildbare Komplexität
- vergleichbare Zykluszeiten beim Spritzgießen
- geringe Werkzeugsystemherstellkosten
- geringe Werkzeugkosten pro Geometrie/Variante
- kurze Werkzeugherstellzeit
- kurze Umrüstzeit
- hohe Haltbarkeit und damit Wiederverwendbarkeit des Werkzeugs
- hohe Formflexibilität des Werkzeugs

- vergleichbare Qualität des formflexiblen Werkzeugs mit den konventionell gefertigten Prototypenwerkzeugen und Prozesssicherheit
- hoher Automatisierungsgrad
- geringe Lagerkosten
- etc.

Es ist für die spätere Realisierungsphase notwendig, eine vollständige Auflistung der Anforderungen als Grundlage in Phase 2 zu verwenden, um bei der Planung und Konzeption des Werkzeugsystems bereits zu Beginn alle relevanten Werkzeug-eigenschaften berücksichtigen zu können. Bei der vollständigen Konzeption des formflexiblen Werkzeugs unterstützt die Phase 2 darin, die definierten Anforderungen in zu lösende Teilproblemstellungen umzuwandeln und die Lösungen zu den einzelnen Teilproblemen in einer Konsistenzprüfung hinsichtlich deren Verträglichkeit untereinander zu überprüfen. Damit entsteht eine detaillierte, vollständig dokumentierte und nachvollziehbare Darstellung des Realisierungskonzepts eines formflexiblen Spritzgießwerkzeugs, das allen definierten Anforderungen gerecht wird und für jedes Teilproblem eine optimale, mit dem Gesamtkonzept abgeglichene, technische Lösung anbietet.

### 4.4.2 Problemanalyse und -strukturierung

Neben einer vollständigen Aufstellung aller Phase-2-Anforderungen hat es sich als nützlich erwiesen, diese in einem 2. Schritt zu strukturieren. Dazu dient eine so genannte Mind Map. Im Zentrum der Mind Map steht das Ziel, ein formflexibles Spritzgießwerkzeug zu entwickeln. Darauf aufbauend werden die im ersten Schritt der Methode gefundenen Phase-2-Anforderungen in entsprechende Problemstellungen bzw. Herausforderungen überführt und in Teil- bzw. Einzelprobleme gegliedert. Zur späteren Findung von Lösungen für jedes Einzelproblem schlägt die entwickelte Methode vor, alle Teilprobleme in dem aus Phase 1 zur Verfügung gestellten morphologischen Kasten aufzuführen und durch die Einzelprobleme zu untergliedern (siehe Unterabschnitt 4.4.3). In Abbildung 16 ist die für die Entwicklung eines formflexiblen Spritzgießwerkzeugs erstellte Mind Map auszugsweise dargestellt. Die hellgrau hinterlegten Begriffe beinhalten die gefundenen Teilproblemstellungen, die durch die Einzelproblem-lösungen inhaltlich gelöst werden müssen.

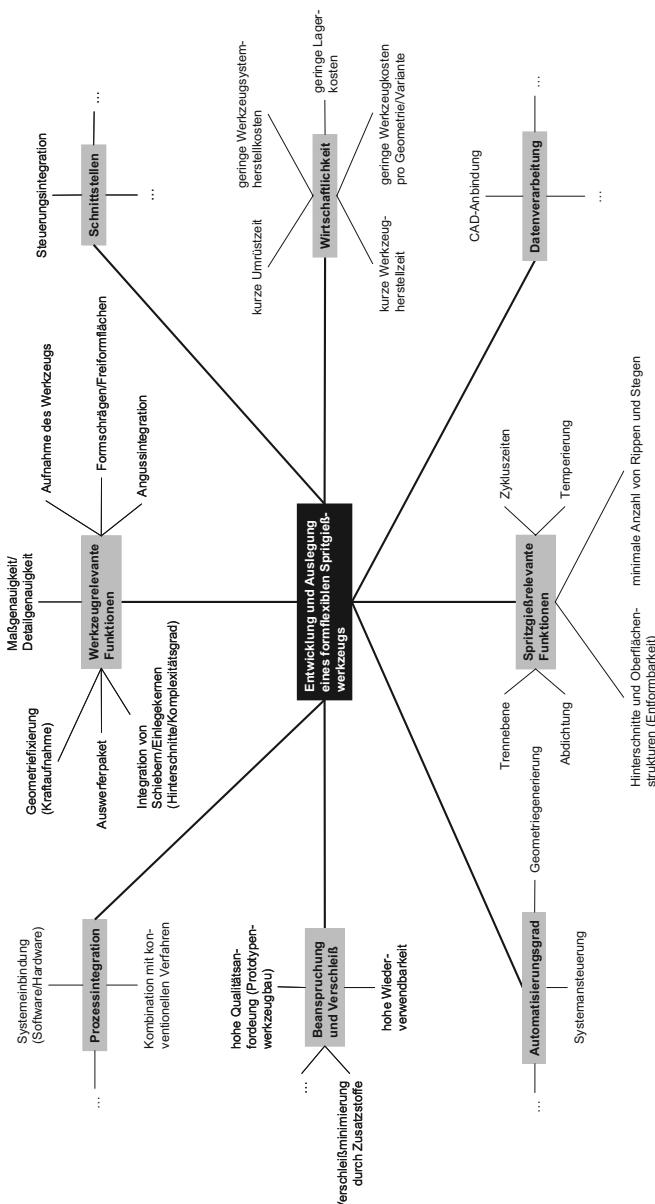


Abbildung 16: Problemstrukturierung zur Lösungsfindung (Ausschnitt)

### 4.4.3 Lösungssuche und -strukturierung

Bei der Lösungssuche und -strukturierung, dem dritten Schritt der Phase 2, besteht die Zielsetzung darin, für jedes Einzelproblem und damit auch für alle Teilprobleme prinzipielle Lösungsvorschläge zur technischen Realisierung zu finden (siehe Tabelle 3). Dabei soll der Einsatz in einem formflexiblen Werkzeug zwar theoretisch möglich sein, die Lösungsvorschläge sind aber nicht auf eine spezielle Realisierungsvariante von Formflexibilität bezogen.

		Lösungsvorschlag 1	Lösungsvorschlag 2	Lösungsvorschlag 3
<b>Problemstellung Formflexibilität</b>				
<b>Einzelproblemstellungen</b>				
<b>Werkzeuge-relevanten Funktionen (Teilproblem 1)</b>	Auslegung/Verfahren des Werkzeugs	Nadelkissen	Granulat/Pulver in Vakuumsack	Schaum fräsen
	Aufnahmen des Werkzeugs	Schrauben	Klemmen	Stecken
	Auswerferpaket	Standardauswerfer	Zwischenfolie spannen	Nadeln gezielt steuern
	Geometriefixierung	Mech. Backenklemmung durch Rahmen	Elektromagnetische Klemmung	Pneumatische Klemmung (Vakuum)
	Formschrägen/Freiformflächen	Fräsen/Schleifen	Zwischenfolien	Laserabtragen
	Angussintegration	Standardanguss	Anguss über Auswerferpaket	Anguss über aufgebohrte Module
	Maßgenauigkeit/Detailgenauigkeit	Zwischenschichten	Nadelabstand reduzieren	Nadelführung eliminieren
	Integration von Schiebern/Einlegekerne	Gefräste Einlegekerne verspannen	Nadelpakete als Schieber verwenden	konventionelle Schieber
<b>Spritzgieß-relevanten Funktionen (Teilproblem 2)</b>				
<b>Einzelproblemstellungen</b>				
<b>Schnittstellen (Teilproblem 3)</b>				
<b>Einzelproblemstellungen</b>				
<b>Wirtschaftlichkeit (Teilproblem 4)</b>				
<b>Einzelproblemstellungen</b>				
<b>Datenverarbeitung (Teilproblem 5)</b>				
<b>Einzelproblemstellungen</b>				
<b>Prozessintegration (Teilproblem 6)</b>				
<b>Einzelproblemstellungen</b>				
<b>Beanspruchung und Verschleiß (Teilproblem 7)</b>				
<b>Einzelproblemstellungen</b>				
<b>Automatisierungsgrad (Teilproblem 8)</b>				
<b>Einzelproblemstellungen</b>				

Tabelle 3: Ausschnitt eines morphologischen Kastens für die spätere Lösungsauswahl

Vielmehr geht es darum, innovative Lösungen für jedes Einzelproblem durch entsprechende Methoden der Produktentwicklung zu finden. Beispielsweise können Kreativitätstechniken, wie das Brainstorming, die Reizwortanalyse oder die Bionik, genutzt werden, um Lösungsideen zu finden bzw. zu entwickeln (LINDEMANN 2005). Dieser Schritt zielt auf eine umfangreiche Sammlung und Strukturierung von denkbaren Lösungsvorschlägen ab und enthält bewusst keine Bewertung der erarbeiteten Lösungsideen. Dadurch wird verhindert, dass eine sinnvolle Idee bereits zu früh bzw. eventuell auf Grund eines unbewusst falschen Kontexts verworfen wird. Der Ausschnitt (siehe Tabelle 3) des bei der Entwicklung eines formflexiblen Spritzgießwerkzeugs auf Basis

von Tabelle 2 und Abbildung 16 erstellten morphologischen Kastens zeigt beispielhafte Lösungsvorschläge für jedes Einzelproblem des Teilproblems „Werkzeugrelevante Funktionen“. Eine vollständige Auflistung aller Lösungsvorschläge für alle Einzelproblemstellungen ist für die Darstellung der Methodenanwendung ohne Mehrwert, weshalb im Rahmen dieser Arbeit darauf verzichtet werden kann.

Der große Vorteil bei der Verwendung von Ordnungsschemata, wie dem morphologischen Kasten, ist die Erarbeitung eines reichhaltigen, systematischen Lösungsfelds, das alle wesentlichen Lösungsansätze erkennen lässt (EHRLENSPIEL et al. 2003). Durch eine entsprechende Verknüpfung und Kombination der Lösungen jedes Einzelproblems kann ein optimales Gesamtkonzept zur Lösung aller Teilprobleme gefunden werden. Die Kombination und Auswahl der geeigneten Lösungen ist im folgenden Unterabschnitt erläutert und stellt den vierten und damit letzten Schritt der 2. Phase dar.

#### **4.4.4 Lösungsauswahl und Konsistenzprüfung**

Im letzten Schritt der Phase 2 sind die für die Erfüllung der Anforderungen an ein formflexibles Spritzgießwerkzeug geeigneten Lösungsvarianten für die Einzelprobleme auszuwählen und über eine Konsistenzprüfung bezüglich einer gegenseitigen Verträglichkeit zu überprüfen. Dazu werden die Lösungsvorschläge jedes Einzelproblems des morphologischen Kastens hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile analysiert und gezielt im Hinblick auf den Einsatz beim Spritzgießen mit einer Notenvergabe von 1 bis 6 (sehr gut bis schlecht) bewertet. So kann pro Einzelproblem eine optimale Lösung gefunden werden. Für jedes Teilproblem sind damit die Einzellösungen selektiert. Die Kombination dieser gefundenen Einzellösungen ist im Anschluss auf Verträglichkeit untereinander zu überprüfen. Dazu werden die Einzelprobleme zueinander prozentual gewichtet, um so eine Problemhierarchie pro Teilproblemstellung zu erhalten. Bei einer Inkonsistenz zweier oder mehrerer Einzelprobleme bleibt das höher gewichtete unberührt und die ausgewählte Lösung des in der Hierarchie geringer bewerteten Einzelproblems wird getauscht bzw. durch die zweitplatzierte Einzellösung ersetzt.

Anhand des beispielhaften Teilproblems der „Werkzeugrelevanten Funktionen“ soll im Folgenden gezeigt werden, wie die Lösungsauswahl der entsprechenden Einzelprobleme durchgeführt wird. Tabelle 4 stellt den entsprechenden Ausschnitt des morphologischen Kastens mit der bereits durchgeführten Gewichtung der Teilprobleme und Einzellösungen dar.

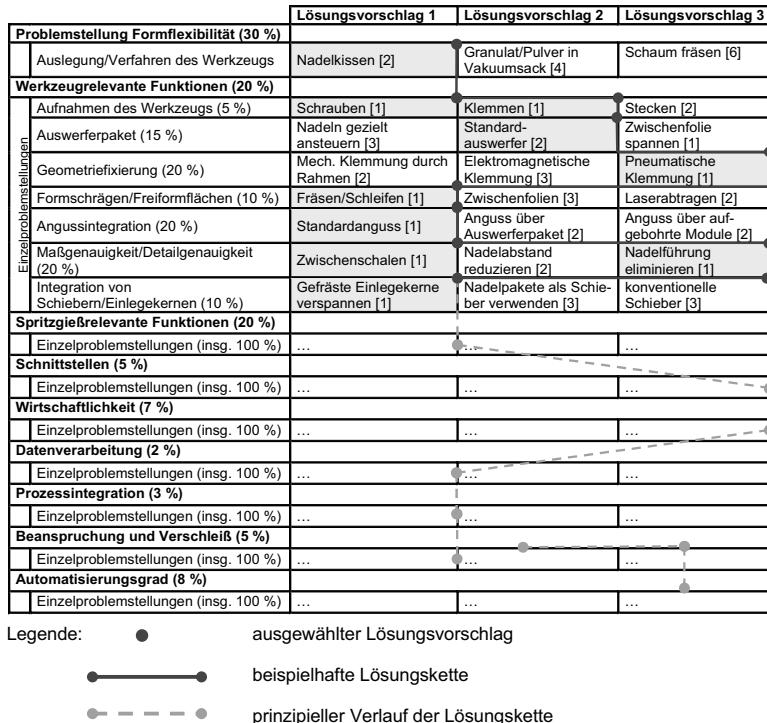


Tabelle 4: Bewertung und Auswahl der Lösungsvorschläge

Die Betrachtung aller Lösungsvorschläge jedes Einzelproblems hat eine Bewertung ergeben, die anhand der Noten im morphologischen Kasten erkennbar ist (Werte in eckigen Klammern). In diesem Beispiel ist das so genannte Nadelkissenprinzip aus Phase 1 der entwickelten Methode Grundlage bei der Bewertung der Einzelproblem-lösungen. Bei der Notenvergabe ist es denkbar, dass zwei Einzellösungen mit der gleichen Note bewertet werden. In diesem Fall sind beide Varianten bei der späteren Realisierung zu bedenken, bzw. es kann die Konsistenzprüfung im Anschluss ergeben, dass eine Variante ausscheidet. Durch die Kombination aller ausgewählten Lösungsvorschläge pro Teilproblemstellung entsteht eine Lösungskette, die im Folgenden auf Konsistenz überprüft werden muss. Dabei kann beispielsweise festgestellt werden, dass eine sehr gut benotete Einzellösung mit einem anderen Lösungsvorschlag eines weiteren Einzelproblems nicht harmoniert. Der Lösungsvorschlag des Einzelproblems mit der höheren Gewichtung (siehe Tabelle 4, Prozentzahlen in runden Klammern) ist

zu bevorzugen. Dieses Vorgehen wird durch das folgende Beispiel der Einzelprobleme „Auswerferpaket“ und „Maßgenauigkeit/Detailgenauigkeit“ verdeutlicht. Ersteres ist nach der Bewertung der Lösungsvorschläge am sinnvollsten durch die Verwendung von Zwischenfolien zu lösen, die gespannt werden und dadurch den Spritzling aus der Kavität entformen. Dieser Lösungsvorschlag eignet sich bei der Verwendung des Nadelkissens zur Formgebung, da die Integration eines zusätzlichen Auswerfers entfällt und lediglich eine elastische Folie zwischen Kavität und Spritzmasse zum Einsatz kommt. Allerdings passt diese Lösung nicht mit der ausgewählten Lösungsvariante, die Maß-/Detailgenauigkeit des Nadelkissens durch formnahe Zwischenschalen zu erhöhen, zusammen. Mit diesen Schalen ist es möglich, auch rechte Winkel und scharfe Kanten zu realisieren, was mit einer elastischen Zwischenfolie nicht erreichbar ist. Auf Grund der in der Problemhierarchie höher priorisierten Maß-/Detailgenauigkeit (20 %) im Vergleich zum Auswerferpaket (15 %) wird die Lösungsvariante „Zwischenfolien spannen“ durch die nächst bessere Variante, die Integration eines Standardauswerfers in das Nadelkissen, ersetzt. In gleicher Weise gestaltet sich der Ablauf bei der Konsistenzprüfung der gefundenen Teilproblemlösungen. Auch hier ist eine Priorisierung der Teilprobleme die Basis. Anhand dieser kann im Fall eines Konfliktes zwischen zwei Einzellösungsketten eine Entscheidung getroffen werden. Dies hat zur Folge, dass die minder priorisierte Lösungskette erneut auf der Ebene der Einzelprobleme analysiert wird und die Lösungssuche, Bewertung und Auswahl erneut erfolgen bzw. die in Abschnitt 4.2 genannten Rekursionen in der entwickelten Methode greifen.

Nach dem Ausfüllen und der Bildung von Lösungsketten sowie der vollständigen Konsistenzprüfung und gegebenenfalls der Durchführung von Rekursionen dient der entstandene morphologische Kasten als Dokumentation und Entwicklungsbasis zur Realisierung der Formflexibilität im Bereich der Spritzgießwerkzeuge und schließt damit die entwickelte Methode ab. Das folgende Kapitel 5 verlässt die theoretische Betrachtungsebene und zeigt detailliert die Realisierung ausgewählter Komponenten und Bestandteile des formflexiblen Spritzgießwerkzeugs. Dabei werden die identifizierten Lösungsprinzipien aus Tabelle 4 zur Konzeption und Realisierung des formflexiblen Werkzeugsystems auf Basis eines Nadelkissens (Problemstellung Formflexibilität: Lösungsvorschlag 1) herangezogen.



## 5 Konzeption und Realisierung eines formflexiblen Spritzgießwerkzeugs

### 5.1 Konzept des formflexiblen Werkzeugs für das Spritzgießen

Kapitel 5 befasst sich mit der technischen Realisierung des formflexiblen Werkzeugs und geht dabei detailliert auf ausgewählte Komponenten ein. Eine vollständige Darstellung der technischen Lösungen aller in den Unterabschnitten 4.4.3 und 4.4.4 aufgezeigten Problemstellungen wird hierbei bewusst vermieden, um dem Leser eine thematische Fokussierung auf relevante Aspekte bei der Realisierung von Formflexibilität im Spritzgießen zu bieten. Abschnitt 5.1 gibt einen ersten Überblick über diese fokussierten Themen und ist als inhaltliche Zusammenfassung des Konzepts zu verstehen, das durch die folgenden Abschnitte vertieft wird. Die Entwicklung des Werkzeugsystems ist dabei nach den gängigen Methoden der Produktentwicklung durchgeführt worden (LINDEMANN 2005).

Die Anwendung und Auswertung der in Kapitel 4 vorgestellten Methodik hat gezeigt, dass das Konzept des Nadelkissens zur Realisierung der Formflexibilität im Bereich des Spritzgießens viel versprechend ist. Die Formflexibilität wird bei dem ausgewählten Konzept durch in einem Rahmen stehend angeordnete Nadeln erzeugt, die gegeneinander verschiebbar gelagert sind (siehe Unterabschnitt 5.2.1 und Abbildung 17).

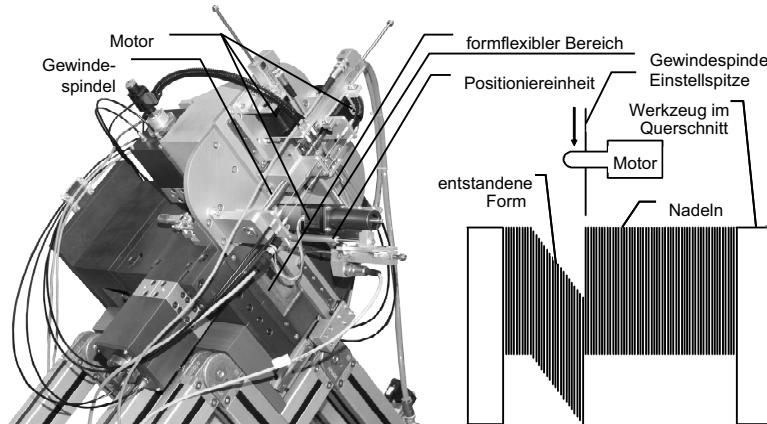


Abbildung 17: Formgebungsprinzip des Werkzeugsystems

Die Form bzw. Kavität entsteht bei diesem Konzept durch Justage aller relevanten Nadeln mit anschließendem Verspannen (siehe Unterabschnitt 5.2.2). Nach dem Einsatz des Werkzeugs kann die temporäre Fixierung gelöst und jede Nadel erneut positioniert werden, wodurch die Wiederverwendbarkeit gegeben ist. Der prinzipielle Ablauf beim Einsatz des Werkzeugsystems ist Abbildung 18 zu entnehmen.

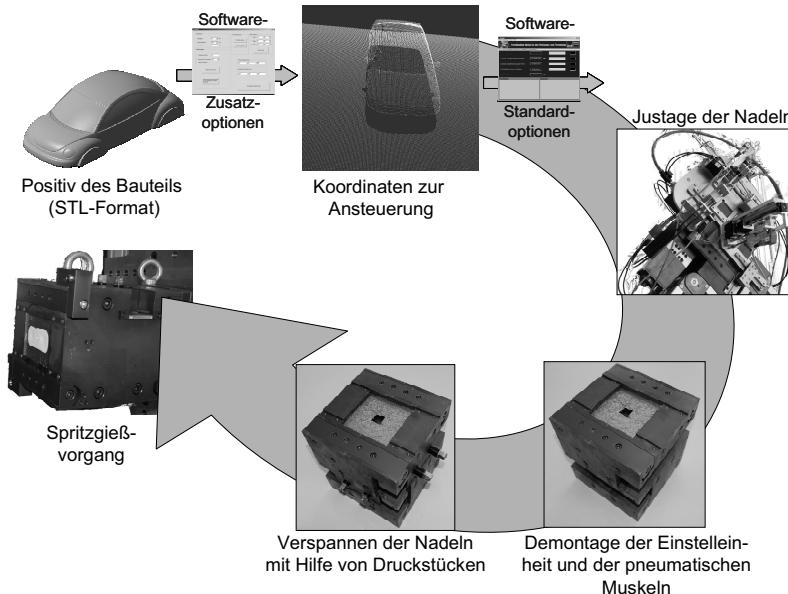


Abbildung 18: Prinzipieller Ablauf beim Einsatz des Werkzeugsystems

Basierend auf den CAD-Daten des herzustellenden Bauteils werden über eine speziell entwickelte Software die für den Einstellvorgang relevanten Nadelkoordinaten berechnet (siehe Unterabschnitt 5.3.1 und Unterabschnitt 5.3.2). Dabei kommt das so genannte STL-Datenformat (Standard Triangulation Language) zum Einsatz. Die ermittelten Koordinaten werden von einer Hardware-Steuereinheit (siehe Unterabschnitt 5.3.4) an die Positioniereinheit (siehe Unterabschnitt 5.3.3) weitergegeben, die das Einstellen der Nadeln durchführt (siehe Abbildung 17). Die Positioniereinheit basiert auf 3 linearen Achsen (Gewindespindeln), die durch jeweils einen Schrittmotor angetrieben werden. Die Einstellspitze der Positioniereinheit fährt während des Einstellvorgangs jede Nadel des formflexiblen Werkzeugbereichs an und justiert die einzustellende Nadel in der jeweiligen Position. Um zu verhindern, dass benachbarte Nadeln während des Einstellens ungewollt verschoben werden, bedarf es eines Spannmechanismus, der das

gezielte Spannen und Entspannen einzelner Nadeln realisiert. Dieser basiert auf einer Blendentechnik und der Verwendung zweier pneumatischer Muskeln, wie sie seit einigen Jahren als Standardeinheiten von der Firma *FESTO AG & Co. KG, Esslingen*, angeboten werden. Diese Muskeln erzeugen die benötigte Spannkraft, wohingegen die Blenden das gezielte Spannen und Entspannen der Nadeln ermöglichen. Eine detaillierte Beschreibung dieses Spannsystems ist Unterabschnitt 5.2.2 zu entnehmen. Die von den Muskeln aufgebrachte Kraft reicht nicht für das Spannen des gesamten Nadelpakets während des Spritzgießprozesses aus. Daher bedarf es eines weiteren Spannmechanismus, der die notwendige Spannkraft zum Kompensieren des Einspritzdrucks während des Spritzgießens aufbringt. Dieser besteht aus Druckstücken, die durch Verschrauben gespannt werden (siehe Abbildung 21). Bevor das Werkzeug für das Spritzgießen eingesetzt werden kann, ist daher der Spannmechanismus, der zum Einstellen der Nadeln genutzt wird, zu demontieren und die für den Spritzvorgang konzipierten Druckstücke einzusetzen (siehe Abbildung 18). Ein ungewolltes Verschieben der Nadeln während des Wechsels der Spannsysteme ist dabei auszuschließen, da die Nadeln beim Einstellvorgang und beim Spannsystemwechsel in der Horizontalen liegen (siehe Abbildung 18). Danach kann das Werkzeugsystem auf einer Spritzgießanlage genutzt werden.

Nachdem der prinzipielle Ablauf bei der Verwendung des Werkzeugsystems beschrieben ist, soll im Folgenden aufgezeigt werden, welche Aspekte bei der Auswahl der einzelnen Komponenten des Werkzeugsystems Relevanz hatten und damit auf die nachstehende detaillierte Beschreibung der Werkzeugbestandteile übergeleitet werden.

Recherchen haben ergeben, dass die Anwendung von Stempelkissen im industriellen Einsatz etabliert ist (siehe Abschnitt 2.2). Die Stempel bei diesen Ansätzen sind größtenteils über Lochmasken geführt. Die Führung der Nadeln im formflexiblen Werkzeug ist indirekt abhängig von der zu erzielenden Enddichtigkeit des Werkzeugs und direkt von der Nadelgeometrie. Verschiedene Nadeln und Führungsvarianten wurden untersucht. Diese Überlegungen haben gezeigt, dass eine zusätzliche Führung jeder einzelnen Nadel, beispielsweise durch Lochmasken, in dieser Anwendung nicht sinnvoll ist, da die Abbildungsgenauigkeit und die Oberflächenqualität des Werkzeugs damit nicht ausreichend hoch sind. Daher können in diesem Konzept nur Nadeln zum Einsatz kommen, die sich gegenseitig lagern und keine zusätzlichen Führungen benötigen. Runde Nadelquerschnitte sind folglich ungeeignet. Nach dieser grundlegenden Erkenntnis kommen lediglich n-eckige Nadeln für den Einsatz im formflexiblen Werkzeug in Frage.

Die Forderung nach einer möglichst hohen Detailauflösung der Werkzeugoberfläche führt zu einer Minimierung der Kantenlängen der Nadelquerschnitte. Die Kantenlänge wird dabei durch das erhältliche Rohmaterial bestimmt. Eine Recherche am Markt hat ergeben, dass sowohl 6-eckige als auch 4-eckige Nadeln erhältlich sind, die eine minimale Kantenlänge von 0,28 mm aufweisen.

Bei der Auswahl der Nadelgeometrie müssen auch die Anforderungen eines automatisierten Einstellmechanismus berücksichtigt werden. Im Hinblick auf die Einstellzeit wäre es beispielsweise wünschenswert, jede einzelne Nadel mit einer Aktorik zu versehen, damit ein paralleles Justieren aller Nadeln erzielt werden kann. Die Einstellzeit des gesamten Werkzeugs würde dabei auf ein Minimum reduziert werden. Es bleibt jedoch zu bedenken, dass bei der Verwendung im Querschnitt quadratischer Nadeln mit einer angenommenen Kantenlänge von beispielsweise 0,4 mm und einer Abformfläche des Werkzeugs von 100 mm x 100 mm 62.500 Nadeln angeordnet und mit linear wirkender Aktorik versehen werden müssen. Der damit verbundene technische Aufwand und die so entstehenden hohen Kosten, die ein solches Werkzeugsystem fordert, stehen der Zielsetzung, eine kostengünstige Alternative des bisherigen Rapid Tooling im Spritzgießen – auch bei Kleinstserien – zu entwickeln, entgegen. Daher ist eine Aktorik an jeder Nadel nicht zielführend, und es ist ein sequentielles Einstellen der Nadeln mittels einer zentralen Einstellaktorik zu realisieren (siehe Unterabschnitt 5.3).

Neben der Entwicklung der Einstellaktorik und der Spanneinheit fordert der gewünschte hohe Automatisierungsgrad eine komplette CAx-Kette, die ausgehend von einer 3D-CAD-Datei des positiven Bauteils über entsprechende Algorithmen die Ansteuerbefehle für die Einstellaktorik bzw. eine Steuerungshardware generiert. Dazu wird zunächst, wie einführend erwähnt, eine STL-Datei des Bauteils erzeugt. Dieses Format dient als neutrale Schnittstelle zwischen den unterschiedlichen CAD-Systemen und der Ansteuerosoftware. Das STL-Format gehört zwar zu der Gruppe der nicht genormten Schnittstellen, ist aber auf Grund seiner historisch gesehen frühen Veröffentlichung weit verbreitet. Die Beschreibung der Bauteiloberfläche erfolgt bei einer STL-Datei mit Hilfe von Dreiecken und deren Normalenvektoren (ZÄH et al. 2006c). Die exakte Bauteiloberfläche kann bei Freiformflächen mit Hilfe der Triangulation zwar nur angenähert werden, dafür ist die einfache Handhabbarkeit dieses Formats eine ausreichende Begründung für dessen Einsatz als Schnittstelle.

Auf Basis der STL-Daten eines Bauteils kann durch verschiedene Module der in dem Konzept vorgesehenen Software automatisch die negative Form, also die Werkzeuggeometrie, abgeleitet werden (siehe Abschnitt 5.3). Durch entsprechende Koordinatentransformationen wird die negative Form des Bauteils virtuell in die Abformfläche des

Werkzeugs gelegt und im Anschluss mit der Nadelrasterung angenähert. Aus den so entstehenden Koordinaten der Nadelköpfe werden von der Software Signale an die Steuerkarten gesendet, die wiederum die Motoren der Einstellaktorik antreiben.

Neben den zu berücksichtigenden Anforderungen bei der Realisierung von Formflexibilität gilt es zusätzlich, die spritzgießrelevanten Anforderungen an das Werkzeugsystem zu beachten und in die Konzeptionsphase einfließen zu lassen. Die Integration eines Auswerfersystems in die formflexible Abformfläche ist beispielsweise unabdingbar (siehe Unterabschnitt 1.3.1). Unterabschnitt 5.2.3 zeigt, dass Auswerfer, geführt in so genannten Auswerferhülsen, in das Nadelkissen manuell eingebracht werden können. Diese Hülsen ersetzen bestimmte Nadelbereiche. Um bei wechselnden herzustellenden Bauteilgeometrien den Bereich einer Auswerferhülse wieder mit Nadeln füllen zu können, werden beim Einsetzen einer Hülse die herausgeschobenen Nadeln mittels Spannklammern in ihrem Verbund fixiert. Damit kann beim Entfernen einer Auswerferhülse der frei werdende Bereich im Nadelkissen durch die paketierten Nadeln erneut gefüllt werden, ohne dass der gesamte Nadelverbund des Werkzeugs zerstört wird. Aber auch beim Spritzgießen häufig vorkommende Hinterschneidungen sind bei dem Konzept relevant. Hinterschneidungen des Bauteils können durch den Einsatz von Einlegekernen, wie es im Prototypenwerkzeugbau bzw. bei Kleinserienwerkzeugen üblich ist, realisiert werden. Diese sind durch das Nadelpaket und den bereits notwendigen Spannmechanismus zu positionieren und zu fixieren. Eine weitere Detaillierung technischer Lösungen zur Erfüllung spritzgießrelevanter Anforderungen ist in Unterabschnitt 5.2.3 beschrieben.

Mit der Festlegung, die Formflexibilität des Werkzeugsystems durch die Verwendung verschiebbarer Nadeln zu realisieren, wird eine weitere Komponente im Konzept des Werkzeugsystems notwendig. Da die Herstellung des Bauteils beim Spritzgießen durch das Abformen der Werkzeuggeometrie erfolgt, müssen Strategien entwickelt werden, die Nadelrasterung, die sich unumgänglich im Bauteil abbildet, zu minimieren bzw. gänzlich zu vermeiden. Um die Ausprägung der Nadelrasterung am Bauteil abschätzen zu können, wurden mit Fertigstellung des Grundwerkzeugs erste Abgießversuche durchgeführt. Diese Versuche hatten den Vorteil, dass auf Grund des geringen Einfülldrucks beim Abgießen eine Beschädigung des Werkzeugs auszuschließen ist. Wie die nachfolgenden Spritzgießversuche jedoch zeigten, war diese Vorsichtsmaßnahme unbegründet. Eine detaillierte Darstellung der auf Basis der Abgießversuche entwickelten Strategien kann Unterabschnitt 5.2.4 entnommen werden.

Die folgenden Abschnitte beschreiben detailliert die Entwicklung und Realisierung ausgewählter Komponenten des beschriebenen Werkzeugkonzepts.

## 5.2 Realisierung des formflexiblen Spritzgießwerkzeugs

### 5.2.1 Werkzeugrahmen

Die konstruktive Gestaltung des Werkzeugrahmens wird maßgeblich davon beeinflusst, welche Art von Grundwerkzeug aus dem konventionellen Werkzeug- und Formenbau als Basissystem Verwendung findet. Dabei wird zwischen dem Normal-, Abstreif-, Schieber-, Backen-, Abschraub- und Abreißwerkzeug differenziert (JOHANNABER & MICHAELI 2004). Ein Normalwerkzeug ist der einfachste Werkzeuggrundtyp und besteht lediglich aus zwei Werkzeughälften, die über eine Teilungsebene getrennt werden und somit nur eine Öffnungsbewegung erlauben. Für gewöhnlich werden zur Entformung des Bauteils die Schwerkraft, Hülsen oder Stifte verwendet. Das Abstreifwerkzeug ist vom Aufbau ähnlich dem Normalwerkzeug. Jedoch unterscheiden sich die beiden Werkzeuge in der Art der Entformung, da Abstreifwerkzeuge über so genannte Abstreifplatten und nicht über Auswerfer den Spritzling entformen. Auch das Schieberwerkzeug basiert auf dem Normalwerkzeug; es hat eine Trennebene, bietet aber zusätzlich die Möglichkeit, Hinterschneidungen oder äußere Gewinde abzubilden. Diese werden durch Schieber realisiert, die mittels Steuerfinger zusätzliche Bewegung ermöglichen. Eine ähnliche Zielsetzung im Hinblick auf die Anwendung hat das Backenwerkzeug. Bei diesem Typ werden Backen in das Werkzeug integriert, die ebenfalls das Abformen von Hinterschneidungen zulassen, aber nicht über die Öffnungsbewegung der Spritzgießanlage aktiviert werden. Ein Sonderfall beim Werkzeubau ist im Abschraubwerkzeug zu sehen. Dieser Grundtyp erlaubt die Herstellung von Gewinden. Dabei wird über eine mechanisch eingeleitete Drehbewegung im Werkzeug (z. B. über Spindeln oder Planetengetriebe) das hergestellte Gewinde automatisch entformt. Der komplexeste Werkzeuggrundtyp ist das Abreißwerkzeug. Dieses basiert im Gegensatz zu den anderen Typen auf zwei Trennebenen zur separaten Entformung von Anguss und Spritzgießteil, die durch ein sequentielles Öffnen voneinander abgerissen werden. Die Öffnungsbewegung erfolgt in zwei Phasen und wird über eine Kombination von Zwischenplatten und Klinkenzügen oder Zugankern realisiert.

Allen Grundtypen ist gemeinsam, dass das Werkzeug eine Düsenseite (DS) und eine Auswerferseite (AS) besitzt (siehe Abbildung 2). Bei der Entwicklung eines formflexiblen Werkzeugs ist es daher notwendig, für beide Seiten formflexible Lösungskonzepte zu erarbeiten. Bei der folgenden Realisierung des flexiblen Werkzeugsystems, das in erster Linie die technische Machbarkeit des Konzepts aufzeigen soll, genügt es daher, lediglich eine Werkzeughälfte, die Auswerferseite, zu entwickeln. Allerdings ist

bei der Konstruktion die Einsetzbarkeit auf der Düsenseite eine zusätzlich, zu berücksichtigende Anforderung. Daraus resultiert ein notwendiger modularer Aufbau, der neben der Aufnahme des Auswerfersystems auch ein Angussystem beinhaltet (siehe Unterabschnitt 5.2.3).

Die einleitende Darstellung bestehender Werkzeuggrundtypen sowie die Anforderungs-ermittlungen in Kapitel 4 bedingen eine Kombination zwischen einem Normalwerkzeug und der Modifikation eines Backenwerkzeugs für die Realisierung des formflexiblen Werkzeugs. Die Modifikation des Backenwerkzeugs basiert darauf, dass im formflexiblen Werkzeug backenähnliche Einlegekerne Verwendung finden, die in den formflexiblen Nadelbereich integriert werden können. Damit wird die Realisierung von Hinterschneidungen möglich, die zu einer signifikanten Steigerung des Einsatzbereichs des formflexiblen Werkzeugs führen. Kombiniert mit dem Auswerfersystem des Normalwerkzeugs entsteht so ein universell nutzbares, aber mit geringem Aufwand herstellbares Werkzeug. Dazu ist ein Werkzeugrahmen zu gestalten, der sowohl den formflexiblen Bereich als auch die oben genannten Systeme aufnimmt. Weiterführende Analysen bei Industriepartnern haben gezeigt, dass mit einem theoretischen, maximalen Bauteilvolumen pro flexibler Werkzeughälfte von  $500 \text{ cm}^3$  das formflexible Werkzeugsystem 75 % der untersuchten konventionellen Werkzeuge abdeckt. Daraus leiten sich die für den Nadelbereich notwendigen Abmaße ab. Bei einer Grundfläche von 100 mm x 100 mm sind die Nadeln maximal 50 mm zu verfahren. Diese Randbedingung in Kombination mit der Notwendigkeit eines Spannsystems beeinflusst die Höhe des Formrahmens, die sich zu mindestens 250 mm ergibt.

Das zentrale Element des formflexiblen Werkzeugkonzepts ist die Nadellagerung durch den Werkzeugrahmen. An diesen Rahmen werden daher weitere Anforderungen gestellt. Zum einen ergeben sich diese aus dem Bedarf nach einem Spannsystem, das ein gezieltes Spannen und Entspannen einzelner Nadeln ermöglicht. Zum anderen sind bei der Konstruktion des Rahmens Anforderungen zu erfüllen, die sich aus der Notwendigkeit der Integration des Werkzeugsystems in eine konventionelle Spritzgießanlage ergeben. Darunter sind beispielsweise die maximalen Abmaße des Werkzeugs sowie die Anschlussmöglichkeiten der Auswerferbetätigung oder der Einspritzdüse zu verstehen. Die Nutzbarkeit des gesamten Werkzeugs in der Spritzgießanlage ist ebenfalls bei der Auslegung des Werkzeugrahmens bzw. des Auswerfer- und Angussystems zu berücksichtigen. Ergänzend sind Anforderungen hinsichtlich der Aufnahme der Schließ- und Zuhaltkräfte oder der Zentrierung von Auswerfer- und Düsenseite des Werkzeugs in der Trennebene zu beachten.

Um alle oben genannten Anforderungen durch den Werkzeugrahmen erfüllen zu können, besteht der Rahmen aus zwei 100 mm x 200 mm x 250 mm großen Formhälften. Die in Abbildung 19 dargestellte Teilung des Rahmens ist notwendig, da der Bereich der späteren Nadelführung eine sehr hohe Anforderung in Bezug auf Maß- und Formtoleranzen erfüllen muss. Auf Grund der späteren Funktion dieses Bereichs, nämlich der Aufnahme von im Querschnitt quadratischen Nadeln (0,4 mm x 0,4 mm bzw. 2 mm x 2 mm Kantenlänge), ist es unabdingbar, dass der Nadelbereich hinsichtlich Parallelität der gegenüberliegenden Flächen sowie der Maßhaltigkeit höchst präzise zu fertigen ist. Nur diese Voraussetzungen ermöglichen die Integration des Nadelpakets in den Rahmen. Daher sind neben den Fräsprozessen zur Herstellung des Werkzeugrahmens auch Schleifverfahren zur Realisierung der Parallelität notwendig.

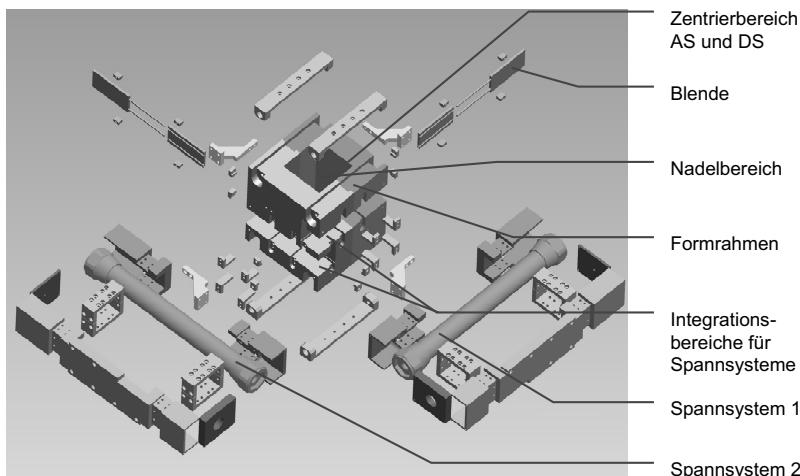


Abbildung 19: Struktur des Werkzeugrahmens

Die Zentrierung der Auswerferseite mit der Düsenseite kann bei dem oben dargestellten Werkzeugrahmen über die quadratische Aussparung des Nadelbereichs realisiert werden.

Die nach unten und oben hin geöffnete Konstruktion des Formrahmens erlaubt es, dass sowohl ein Auswerfersystem als auch ein Angussystem in den Nadelbereich integriert werden können. Damit wird dieser Formrahmen der geforderten Modularität gerecht. Eine detaillierte Darstellung der Integration kann Unterabschnitt 5.2.3 entnommen werden. Durch den beidseitig geöffneten Formrahmen ist die Frage der Befestigung des gesamten Werkzeugsystems in der Spritzgießanlage nicht bei der Entwicklung und

Konstruktion des Formrahmens zu beantworten, sondern findet bei der konstruktiven Ausgestaltung des Auswerfer- und Angussystems Berücksichtigung.

Zur Realisierung eines automatischen Einstellvorgangs der Nadeln bedarf es eines gezielten Spannens und Entspannens jeder einzelnen Nadel. Das dafür entwickelte Prinzip ist bereits angedeutet und wird im folgenden Unterabschnitt 5.2.2 vertieft. Allerdings ist bereits bei der Gestaltung des Formrahmens die Integrationsmöglichkeit dieses Systems vorzusehen. Daher wurde eine in zwei Freiheitsgraden bewegliche Lagerung der in Abbildung 19 dargestellten Blenden entwickelt, die ein bi-axiales Verschieben erlaubt (siehe Abbildung 20). Zusätzlich bietet der Integrationsbereich der Spannsysteme eine ausreichend hohe Festigkeit im Hinblick auf den auftretenden Kraftfluss beim Einsatz des Spannsystems. Im folgenden Unterabschnitt wird auf die Konzeption und Realisierung des Spannsystems eingegangen.

### 5.2.2 Spannprinzip und -mechanismus

Die Anforderung an das Werkzeugsystem, hoch automatisiert zu sein, fordert die Entwicklung eines Einstellmechanismus sowie einer vorgelagerten CAx-Kette. Wie im Abschnitt 5.1 erwähnt und in Unterabschnitt 5.2.1 detailliert beschrieben, sind die einzelnen Nadeln in einem Formrahmen stehend gegeneinander gelagert, ohne dabei auf eine zusätzliche Nadelführung (bspw. durch Lochmasken) zurückzugreifen. Auf Grund dieser Konstellation ist es für den automatisierten Einstellvorgang essenziell, die Positionen der bereits eingestellte Nadeln nicht durch benachbarte, noch zu verstellende Nadeln zu verändern. Ein ungewolltes Verschieben kann nicht vermieden werden, wenn die Reibung zwischen zwei Nadeln zu groß wird. Um diesen Effekt zu kompensieren, muss das Spannprinzip zum einen eine ausreichend hohe seitliche Kraft aufbringen, so dass ein durch Reibkräfte unbeabsichtigtes Verstellen benachbarter Nadeln unmöglich wird, und zum anderen so flexibel sein, dass gezielt die einzustellende Nadel aus dem Spannpaket gelöst werden kann. Dazu wurde das nachfolgend beschriebene Konzept entwickelt (siehe Abbildung 20) und in den Formrahmen integriert.

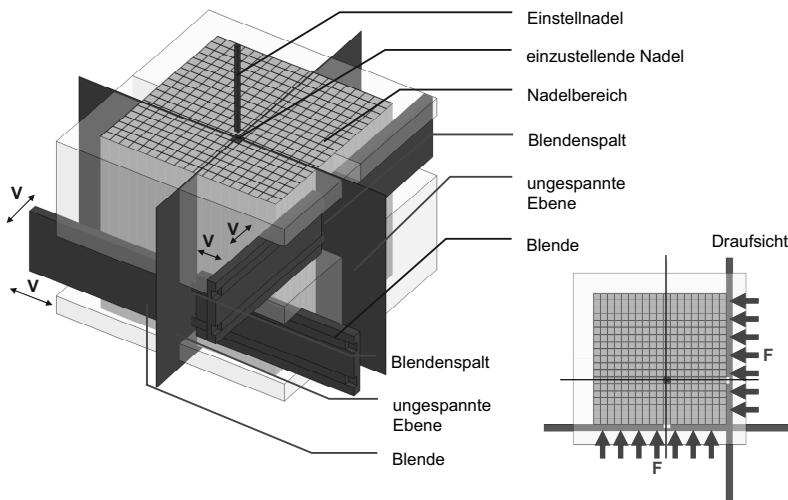


Abbildung 20: Nadelspannkonzept mit zwei Blenden zur Ansteuerung einer Nadelposition in der xy-Ebene

Dieses Konzept basiert auf der Integration stehender, im Querschnitt quadratischer Nadeln, die in einem partiell geöffneten Rahmen angeordnet sind. Die offenen Bereiche des Rahmens werden mit 2-fach axial verschiebbaren Blenden geschlossen. Diese Blenden weisen einen Spalt auf, der die Breite einer Nadelreihe besitzt. Werden die Blenden mit Hilfe der Kraft  $F$  gegen das Nadelpaket gedrückt, so wird genau eine Reihe pro Blende nicht gespannt. Durch die orthogonale, in der Höhe unterschiedliche Anordnung der beiden Blenden im Formrahmen wird mit diesem Prinzip somit genau eine Nadel gelöst. Parallel mit dem Einstellkopf des Einstellmechanismus (siehe Unterabschnitt 5.3.3) werden die Blenden verschoben, so dass jede Nadel individuell aus dem Spannverbund gelöst, eingestellt und wieder fixiert werden kann. Sobald das gesamte Nadelkissen positioniert ist, wird der Spalt in der Blende geschlossen und das Werkzeug gespannt.

Der Spannmechanismus muss zwei Aufgaben erfüllen: Zum einen ist es erforderlich, eine hohe Dynamik beim Spannen und Entspannen zu bieten und dabei die notwendige Kraft zum Kompensieren der Reibkräfte zwischen den Nadeln während des Einstellvorgangs aufzubringen, zum anderen sind die beim Betrieb auftretenden Einspritzkräfte aufzunehmen. Im Folgenden wird daher der Kraftbedarf des Spannsystems im Fall des Spritzgießens berechnet. Im Regelfall liegen die Einspritzdrücke beim Spritzgießen zwischen 800 und 1200 bar bei Standardkunststoffen (z. B. PE), zwischen 1000 und

1800 bar bei Ingenieurkunststoffen (z. B. ABS) und zwischen 1000 und 2000 bar bei Hochtemperatur-Kunststoffen (z. B. PPS, Kunststoffgruppen nach JOHANNABER & MICHAELI 2004). Ein durchschnittlicher Wert im Bereich des Prototypenwerkzeug-einsatzes ist bei ca. 1500 bar zu sehen und wird daher für die folgende theoretische Be-trachtung angenommen:

Parameter	Abk.	Wert	Einheit
Einspritzdruck	$p_{einspr}$	1500	bar
Düsendurchmesser	d	3	mm
Kantenlänge der Nadeln	$l_n$	0,4	mm
Nadelquerschnitt	$A_{Nadel}$	$0,4 \times 0,4 = 0,16$	mm <sup>2</sup>
Reibkoeffizient	$\mu$	0,15 (BEITZ & GROTE 1997)	-
Spannkraft pro Nadel	$F_{spann}$	gesucht	N
Spannkraft pro Blende	$F_{spann, Blende}$	gesucht	N
Einspritzkraft	$F_{einspr}$	gesucht	N

Tabelle 5: Auslegungsparameter des Spannsystems beim Spritzgießen

Um die maximale Kraft zu bestimmen, die durch das Einspritzen des Kunststoffes auf eine Nadel wirken kann, ist der an der Einspritzdüse vorherrschende Druck in eine Ein-spritzkraft auf die Nadel umzurechnen. Folgende Gleichung wird verwendet:

$$F_{einspr} = p_{einspr} \times A_{Nadel} = 150 \frac{N}{mm^2} \times 0,16 mm^2 = 24 N \quad (2)$$

Die Spannkraft, die von den Blenden aufgebracht werden muss, soll verhindern, dass die Nadeln durch das Einspritzen verschoben werden. Da sich die Nadeln gegen-einander lagern, ist zur Bestimmung der Spannkraft die Reibung zwischen den Nadeln und der Blende zu berücksichtigen. Aus der folgenden Gleichung ergibt sich die von der Spanneinheit aufzubringende Kraft während eines Spritzgießvorgangs:

$$F_{einspr} = \mu \times F_{spann} \quad (3)$$

$$F_{spann} = \frac{F_{einspr}}{\mu} = \frac{24 N}{0,15} = 160 N \quad (4)$$

Durch Multiplikation der Nadelanzahl pro wirkender Blende mit der errechneten Spannkraft pro Nadel ergibt sich die von dem Spannsystem aufzubringende Kraft.

$$F_{spann, Blende} = Anz \times F_{spann} = 250 \times 160 N = 40 kN \quad (5)$$

Die benötigte, auf die Blenden aufzubringende, Kraft  $F_{\text{spann, Blende}}$  beträgt 40 kN. Auf Grund einer möglichst einfachen und damit kostengünstigen Auslegung des Spannsystems, das zusätzlich in den Bauraum einer konventionellen Spritzgießanlage integrierbar sein muss, kann diese Kraft allein durch ein mechanisches System erzeugt werden. Pneumatische und hydraulische Anwendungen scheiden auf Grund des hohen Platzbedarfs bei den benötigten Kräften aus. Allerdings bieten mechanische Ansätze, wie das Verschrauben oder eine Keilanordnung, nicht die Dynamik, die beim Einstellvorgang gefordert wird. Auf Grund der stark differierenden Anforderungen an das Spannsystem beim Einstellen bzw. Einspritzen ist dieses anwendungsbezogen aufzuteilen. Beim Einsatz des Werkzeugs in der Spritzgießanlage wird die benötigte Kraft über zwei verschraubbare Druckstücke pro Blende aufgebracht (siehe Abbildung 21). Die Auslegung dieser Verschraubung ist gemäß NIEMANN et al. 2001 durchgeführt worden. Dabei ergab sich ein ausreichend hoher Sicherheitsfaktor.

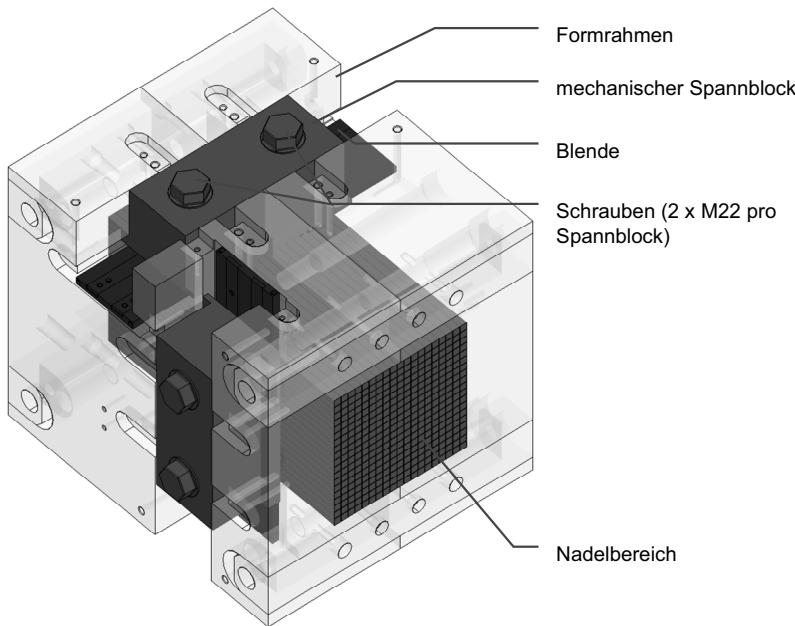


Abbildung 21: Mechanisches Verspannen des Nadelpakets durch Druckstücke

Die entsprechend der obigen Berechnung (Formel 2 bis 5) notwendige Dimensionierung gewährleistet ein sicheres Verspannen des Nadelpakets beim Spritzgießen. Versuche

mit einer Spritzgießanlage haben gezeigt, dass mit diesem Spannsystem sogar Einspritzdrücke von maximal 1800 bar aufnehmbar sind (siehe Unterabschnitt 6.4.2).

Im Hinblick auf die bereits angesprochene Dynamik, die beim Einstellvorgang vom Spannsystem zu realisieren ist, bietet sich der Einsatz von pneumatischen Komponenten für das zweite auszulegende System, d. h. dasjenige für den Einstellvorgang, an. Pneumatik hat den Vorteil, dass mit entsprechenden Aktoren sehr kostengünstig ein gleichmäßiger Druck bzw. eine gleichmäßige Flächenpressung auf alle Bereiche der Blende ausgeübt wird, was für den Einstellvorgang essenziell ist. Der Einsatz mehrerer pneumatischer Zylinder verursacht allerdings einen hohen Kostenanteil, der durch die aufwändige Ansteuerung über Ventile nochmals erhöht wird und somit zum Ausscheiden dieser Lösung führt. Die Firma *FESTO AG & Co. KG, Esslingen*, bietet eine sehr innovative Technik zur Realisierung von linearen Bewegungen über Pneumatik an. Ein pneumatischer Muskel wird mit Druckluft beaufschlagt und kontrahiert sich dadurch. Er zieht sich in der Länge zusammen und vergrößert kontinuierlich seinen Durchmesser. Die eigentliche Aufgabe des pneumatischen Muskels ist konstruktiv bedingt in der Realisierung von linearen Kräften (Zugkräfte) zu sehen. Bei der Anwendung des Muskels im formflexiblen Werkzeug wird allerdings der Nebeneffekt des Durchmesserzuwachses genutzt, um die Blenden mit dem Nadelpaket durch die entstehenden Kräfte zu verspannen (siehe Abbildung 22). Dadurch kann ein sehr gleichmäßiges Anpressen der Blenden erfolgen. Ein weiterer Vorteil im Hinblick auf die Realisierung der automatischen Ansteuerung liegt in der individuellen Aktivierung bzw. Deaktivierung lediglich eines Ventils pro Muskel.

Der pneumatische Muskel des Herstellers *FESTO AG & Co. KG, Esslingen*, besteht aus einem elastischen Schlauch, der umgeben ist von einem Netz aus diagonal verwobenen Fasern in Rautenform. Auf Grund des „Drei-Kräfte-Satzes<sup>2</sup>“ (FESTO 2006) entstehen bei einer Auslenkung der Fasern sehr hohe Kräfte an deren Enden. Ein Muskel nach dem so genannten McKibben-Prinzip<sup>3</sup> nutzt genau diese Eigenschaft (KLUTE et al. 1999). Dehnt sich der Schlauch unter Druck aus, verändern sich die Winkelverhältnisse der Fasergrauten des Muskels und erzeugen dadurch Axialkräfte (siehe Abbildung 23).

---

<sup>2</sup> Drei Kräfte sind im Gleichgewicht, wenn sich ihre Wirkungslinien im Lageplan in einem Punkt schneiden und im Kräfteplan ein geschlossenes Dreieck bilden.

<sup>3</sup> McKibben entwickelte in den 50iger Jahren einen pneumatischen Muskel als orthopädisches Hilfsmittel für Poliopatienten (NEUBERT & FRANKEN 2002). Dieser Muskel ist Ausgangspunkt für viele Weiterentwicklungen pneumatischer Aktoren.

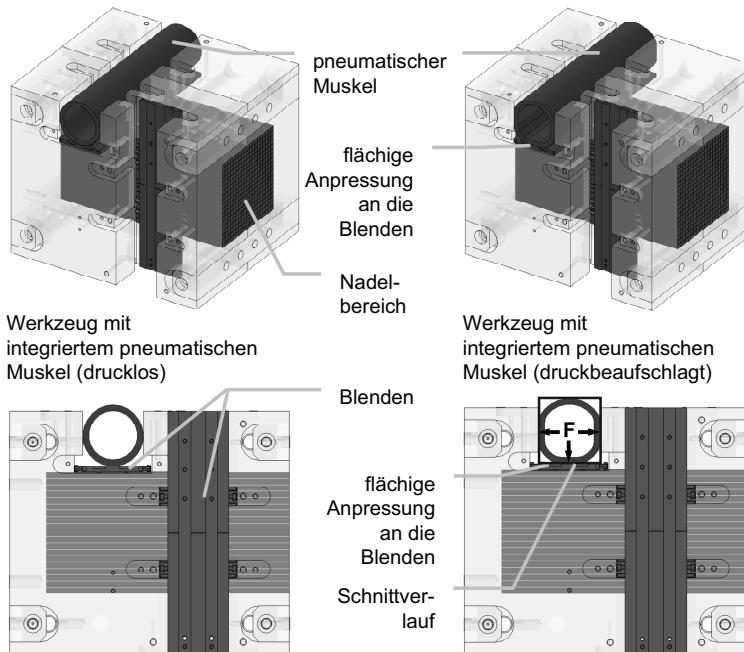


Abbildung 22: Spannprinzip des pneumatischen Muskels im Werkzeugsystem

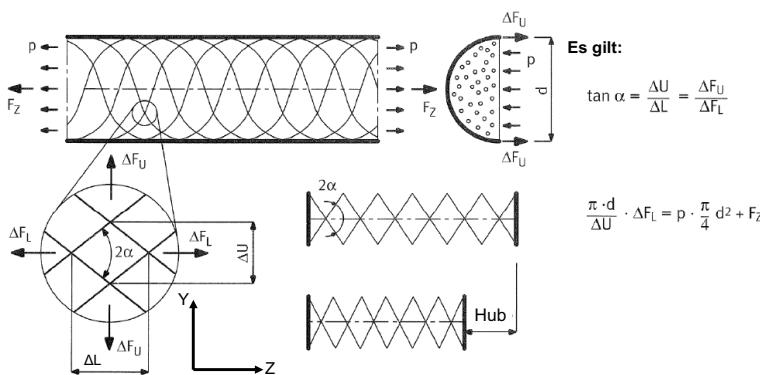


Abbildung 23: Prinzipaufbau des pneumatischen Muskels (FESTO 2006)

Für die Abschätzung der radialen Kraft des Muskels ist die Betrachtung der Faserrauten nicht relevant, da um den Muskel das betrachtete System freigeschnitten werden kann (siehe Abbildung 22). Der Muskel behält beim Beaufschlagen mit Druck nicht seine runde Querschnittsfläche, sondern liegt konstruktiv bedingt sowohl an der Blende als auch am Werkzeug an. Die nicht anliegenden Bereiche des Muskels dehnen sich auf Grund ihrer Elastizität aus, erzeugen dabei aber keine Kraft auf den Werkzeugrahmen oder die Blende und werden daher vernachlässigt. Um eine Abschätzung der resultierenden Spannkraft des Muskels zu erhalten, ist folgende Gleichung zu verwenden:

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \Rightarrow \text{Kraft} = \text{Druck} \times \text{Fläche} \quad (6)$$

Bei einem Innendruck von 6 bar und einer für die Berechnung der Spannkraft relevanten Kontaktfläche des Muskels mit der Blende von  $5400 \text{ mm}^2$  ergibt sich folgende Kraft:

$$F_S = 0,6 \text{ N/mm}^2 \times 5400,0 \text{ mm}^2 = 3240,0 \text{ N} \quad (7)$$

Mit einer Spannkraft von ca. 3240 N pro Muskel kann der Einsatz dieses Spannsystems während des Spritzgießens nicht erfolgen. Allerdings zeigen praktische Versuche, dass die Kraft des Muskels für das Spannen der Nadeln beim Einstellvorgang ausreichend groß ist.

Eine genaue Berechnung der notwendigen Spannkraft ist auf Grund von Fertigungstoleranzen, Maßgenauigkeiten, elastischen Verformungen sowie fertigungsbedingten Graten an den Nadeln sowohl über analytische als auch numerische Berechnungen nicht bzw. nur mit erheblichem Aufwand durchzuführen. Zur Beantwortung der Frage, ob der pneumatische Muskel die nötige Spannkraft beim Einstellvorgang aufbringt, ist der Aufwand einer Modellierung und Simulation des beschriebenen Spannens unverhältnismäßig hoch. Eine Vielzahl von praktischen Versuchen hat belegt, dass die Spannkraft der Muskeln selbst bei der am weitesten von der Blende entfernten Nadel ausreichend hoch ist, um einen sicheren Einstellvorgang zu gewährleisten. Die technische Integration des pneumatischen Muskels in den Formrahmen des Werkzeugsystems zeigt folgende Abbildung.

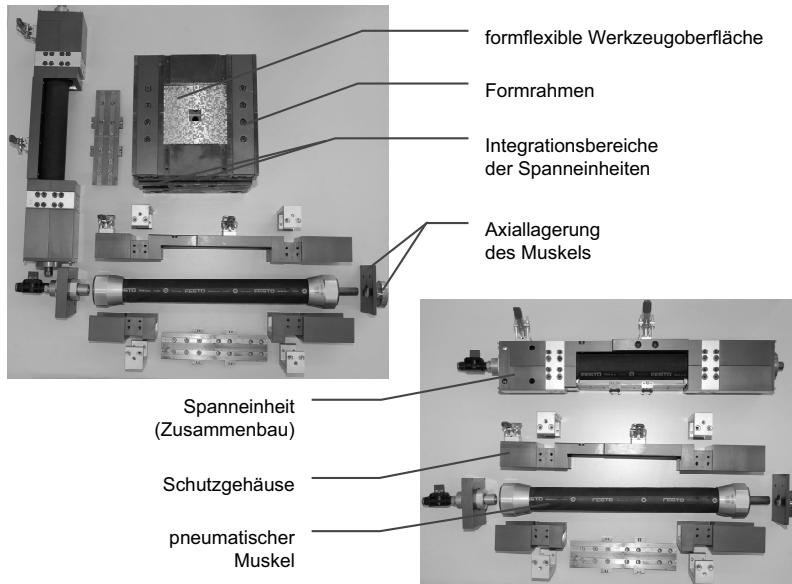


Abbildung 24: Realisierung des pneumatischen Spannsystems (für den Einstellvorgang)

Wie bereits erwähnt, ist die direkte Anwendung des Muskels als Spannsystem unter Verwendung der rotatorischen Ausdehnung seitens des Herstellers nicht angedacht. Daher kann es zu einem verstärkten Abrieb des Mantelmaterials kommen, was im ungünstigsten Fall zum Versagen des Muskels führt. Daher ist bei der Auslegung der Spanneinheit ein ausreichend dimensioniertes Schutzgehäuse vorzusehen. Selbst beim Platzen des Muskels ist somit ausgeschlossen, dass es zu Beschädigungen der Umgebung des Werkzeugsystems und zur Verletzung des Bedieners kommen kann. Allerdings zeigt eine über zweijährige, intensive Nutzung des Muskels in diesem Anwendungsszenario keine Beschädigung des Mantels. In Ergänzung zum Sicherheitsaspekt des Schutzgehäuses dient dieses zur axialen Lagerung des Muskels bei der Kontraktion sowie zur Befestigung der Spanneinheit im Formrahmen. Des Weiteren werden die Blenden während des Einstellvorgangs ebenfalls in den Spanneinheiten aufgenommen und axial gelagert.

Zusätzlich zum Aufbringen der notwendigen Kraft auf das Nadelpaket bedarf es bei der Realisierung des in Abbildung 20 dargestellten Spannkonzepts einer mechanischen Kopplung der Blenden mit dem Einstellmechanismus. Diese Kopplung muss ein paralleles Verfahren des Blendenspalts mit der Einstellnadel gewährleisten. Da die De-

montage der Spanneinheit nach dem Einstellvorgang sowie die Montage der für das Spritzgießen entwickelten Spanneinheit möglichst einfach sein sollen (siehe Abschnitt 5.1), scheidet eine Kopplung, beispielsweise über Stangensysteme, mit entsprechenden axialen Lagerungen aus. Anstelle dessen kommt ein Bowdenzugsystem zum Einsatz, das durch eine ausreichende Vorspannung das parallele Verfahren des Blendenspalts mit der Einstinnadel erlaubt. Die Ankopplung an den Einstellmechanismus ist Unterabschnitt 5.3.3 zu entnehmen. Mit der technischen Realisierung des Werkzeugrahmens sowie der Integration des Nadelpakets und der Spannsysteme ist das eigentliche Werkzeug fertig gestellt. Allerdings ist es mit diesem nicht möglich, Kavitäten automatisiert zu generieren. Dazu bedarf es der Entwicklung eines Einstellmechanismus, dessen Steuerungshardware und Regelung sowie einer entsprechenden Software. So entsteht eine durchgängige CAx-Kette für das Werkzeugsystem (siehe Abschnitt 5.3). Neben den im angestrebten Automatisierungsgrad begründeten Komponenten müssen zusätzlich spritzgießrelevante Funktionen vom Werkzeugsystem erfüllt werden. Der folgende Unterabschnitt greift diese Thematik auf und schildert deren Umsetzung.

### 5.2.3 Integration von spritzgießrelevanten Funktionen

Bei allen Spritzgießwerkzeugen ist nach dem Erstarren des eingespritzten Kunststoffs die Entformung technisch zu realisieren. In der Praxis löst sich das Formteil nicht von alleine, da auf Grund des Volumenschwunds beim Erstarren ein Aufschrumpfen des Kunststoffs auf Kerne oder Stege des Werkzeugs entsteht (JOHANNABER & MICHAELI 2004). Neben der Integration von Entformungseinrichtungen oder Auswerfern können auch eine sorgfältige Politur des Werkzeugs bzw. in manchen Fällen auch ein leichtes Aufrauen sowie eine Konizität in Entformungsrichtung das Entformen des Formteils unterstützen (MENGES & MOHREN 1991). In konventionellen Spritzgießanlagen werden Auswerfersysteme mechanisch, hydraulisch oder pneumatisch betätigt. Diese Systeme sind für gewöhnlich in der beweglichen Werkzeughälfte integriert. Durch das Verfahren der Werkzeughälfte bei einer mechanisch betätigten Entformungseinrichtung wird das Auswerferpaket zur Trennebene des Werkzeugs verschoben, was das Entformen des Spritzlings initiiert. Dabei muss sichergestellt werden, dass beim Öffnen des Werkzeugs das Formteil in der beweglichen Werkzeughälfte verbleibt. Hier wird gezielt der Effekt des Volumenschwunds beim Erstarren genutzt, um ein temporäres Anhaften in der bewegten Werkzeugseite zu erzielen. Bei der Auslegung des Auswerferpaketes ist entscheidend, welche Geometrie geformt werden soll und wie hoch die dazu benötigte Entformungskraft ist. Danach richten sich die Art der Auswerferstifte und deren Anzahl sowie die Verteilung im Werkzeug. Folgende Faktoren haben Einfluss auf die Entformungskräfte (BANGERT et al. 1980):

**Werkzeug:**

- Steifigkeit der Konstruktion
- Kühlung
- thermische Eigenschaften des Werkzeugs
- Reibverhalten des Werkzeugs
- Oberflächenqualität des Werkzeugs

**Formteil:**

- Wanddicken
- Querschnitte
- projizierte Fläche
- Hinterschneidungen

**Formmasse/Werkstoff:**

- Reibverhalten
- E-Modul
- thermische Stoffkennwerte
- Wärmedehnung
- thermodynamisches Verhalten

**Verarbeitung:**

- Druckverlauf
- Verlauf der Formteiltemperatur
- Verlauf der Werkzeugtemperatur
- Entformungszeitpunkt
- Kontakttemperatur
- Auswerfergeschwindigkeit

Die Fülle der Einflussfaktoren zeigt deutlich, dass eine allgemeingültige, alle Anforderungen erfüllende Auslegung eines Auswerfersystems nicht existieren kann. In Abhängigkeit des zu verarbeitenden Materials und der Bauteilgeometrie sowie des erforderlichen Werkzeugaufbaus ist das Auswerfersystem entsprechend zu gestalten. Hier soll daher am Beispiel eines zentralen, im Werkzeug angebrachten Auswerferstifts die grundsätzliche Integrierbarkeit aufgezeigt werden.

Das bei dieser Aufgabe gewählte Lösungskonzept sieht das Ersetzen einer entsprechenden Nadelanzahl im formflexiblen Bereich durch eine im Querschnitt quadratische Führungshülse, in der ein Auswerferstift gelagert wird, vor. Sollte die Geometrie des zu fertigenden Bauteils eine andere Position des Auswerferstifts erfordern, so kann der Bereich dieser Führungshülse wieder mit den zuvor ersetzenen Nadeln aufgefüllt werden (siehe Abschnitt 5.1). In gleicher Weise können mehrere Auswerferhülsen in das Nadelkissen integriert werden. Eine Führungshülse bietet den Vorteil, dass der Auswerferstift trotz des verspannten Nadelpakets betätigt werden kann und somit der Spritzling entformbar wird. Allerdings stellt sich bei diesem Lösungskonzept die Frage, wie die Führungshülsen integriert werden können, ohne die Funktionalität des Spannsystems zu beeinträchtigen. Eine Führungshülse verhindert das gezielte Spannen und Entspannen in den, aus Sicht der Blenden, durch die Hülsen verdeckten Nadelbereichen.

Diese Herausforderung wird dadurch bewältigt, dass zuerst der komplette formflexible Bereich mit Hilfe des Einstellmechanismus positioniert wird. Das Spannsystem kann uneingeschränkt genutzt werden. Nach Positionierung der Nadeln erfolgt das Einsetzen einer Auswerferhülse an der entsprechenden Position. Das Funktionsprinzip, das im Spannsystem integriert ist und das gezielte Positionieren einer Nadel ermöglicht, wird in diesem Fall genutzt, um die Auswerferhülse in den formflexiblen Bereich zu integrieren, ohne dabei die bereits justierten Nadeln zu verstellen. Dies wird durch einen Blendenaufsatz realisiert, der auf Basis unterschiedlicher Standardmodule (Druckplatten und Distanzplatten in varierender Größe) eine einstellbare Breite des Blendenspalts, der Spaltanzahl sowie der Spaltposition ermöglicht. Über eine variable Modulführung in Kombination mit Spannstiften kann die entsprechend der Auswerferanordnung notwendige Modulkombination erzeugt werden (siehe Abbildung 25).

Durch die resultierenden Blendenspalte werden gezielt die Nadelbereiche gelöst, die durch die Auswerferhülse ersetzt werden sollen. Alle benachbarten Bereiche bleiben hingegen gespannt und damit positioniert.

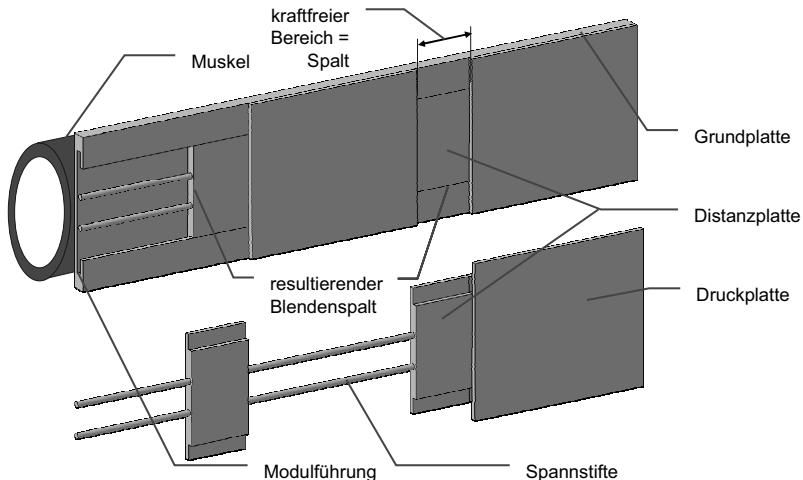


Abbildung 25: Aufbau des Blendenaufsatzes zur Integration von Auswerferhülsen

Da die auf die Werkzeugkavität gerichtete Seite der Auswerferhülse an die jeweilige herzustellende Geometrie angepasst werden muss, wird ein zusätzlicher formangepasster Adapter integriert (siehe Abbildung 26). Dieser weist die Negativform des relevanten Bereichs des Bauteils auf und kann beispielsweise über spanende Verfahren

hergestellt werden. So ist die Wiederverwendbarkeit der Auswerferhülsen gewährleistet und die Wirtschaftlichkeit des gesamten Werkzeugsystems wird sichergestellt.

Neben der Integration eines Auswerferstifts muss zusätzlich die Betätigungen des Auswerfers realisiert werden. Der Aufbau des Auswerferpaketes kann beim formflexiblen Werkzeug in gleicher Weise erfolgen wie bei einem konventionellen Werkzeug (siehe Unterabschnitt 1.3.1). Mehrere Führungssäulen lassen eine translatorische Bewegung der Auswerferplatte zu, die mit dem Auswerferstift gekoppelt ist. Distanzelemente ermöglichen dabei den notwendigen Verfahrweg in Entformungsrichtung. Des Weiteren dient das Auswerferpaket als Flansch zwischen Werkzeugsystem und Spritzgießanlage. Mittels Spannpratzen kann das mit dem formflexiblen Werkzeug verschraubte Auswerfersystem über die Aufspannplatte an der Auswerferseite der Spritzgießanlage angebracht werden. Die Konstruktion des Auswerferpaketes ist in Abbildung 26 dargestellt.

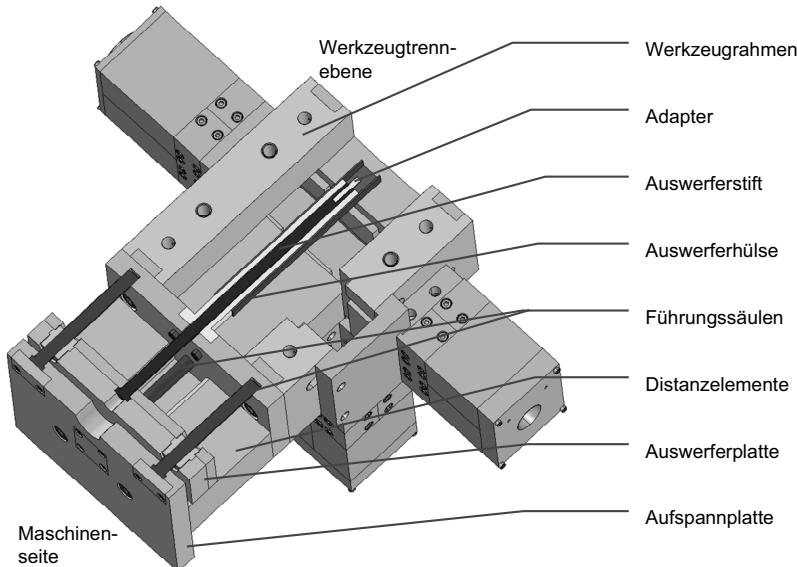


Abbildung 26: Auswerfersystem im formflexiblen Werkzeug

Ergänzend zur notwendigen Integration eines Auswerfersystems ist eine weitere spritzgießrelevante Funktion in der Realisierung eines Angussystems zu sehen. Dieses System dient dazu, die vom Plastifizierzylinder kommende aufgeschmolzene Formmasse aufzunehmen und in die Werkzeugkavität zu leiten. Bei der Gestaltung des Angusses muss immer ein Kompromiss zwischen einer schnellen Erstarrung des Werk-

stoffes – und damit kurzen Zykluszeiten – und den Qualitätsanforderungen an das Bauteil gefunden werden (MENGES & MOHREN 1991). Ein Angussystem besteht in der Regel aus mehreren Segmenten, dem Angusskegel, dem Angusskanal und dem Angussteg. Der Angusskegel übernimmt die plastische Formmasse von der Düse des Plastifizierzylinders und führt diese direkt in die Kavität. Bei einfachen Werkzeugen, so genannten Werkzeugen mit Stangenanguss, bildet der Angusskegel das gesamte Angussystem. Bei komplexeren Werkzeugen mit mehreren gleichen Formnestern besteht das Angussystem zusätzlich aus einem Angusskanal, der die Schmelze zu den Formnestern bringt, sowie den Angusstegen, die die Formnester finalisierend mit Formmasse füllen. Dabei ist besonders auf eine symmetrische Anordnung der Formnester zu achten, damit das Material mit gleichem Druck und gleicher Temperatur eingeschossen wird. Nur unter dieser Voraussetzung ist eine gleichmäßige Bauteilqualität aus jedem Formnest erzielbar. Neben der geometrischen Ausgestaltung eines Angussystems ist ein weiteres Unterscheidungsmerkmal die thermische Auslegung des Angusses. Hierbei wird zwischen normalen Verteikanälen, Heißkanälen und Kaltkanälen differenziert. Bei Prototypenwerkzeugen wird aus Kostengründen für gewöhnlich ein normaler Verteikanal ohne zusätzliche Temperierung bevorzugt. Für die Integration des Angusses in das formflexible Werkzeug ist daher lediglich der Stangenanguss relevant. Ähnlich zur Integration der Auswerferhülse kann ein speziell gefertigter Anguss in das formflexible Werkzeug eingebracht werden. Dieser weist einen quadratischen Außenquerschnitt auf und besitzt eine konische Durchgangsbohrung, die dem Angusskegel entspricht. Auch hier ist der Anguss im Hinblick auf dessen Position flexibel in das Werkzeugsystem einzubringen und ersetzt spezifische Nadelbereiche. Im Fall einer Geometriänderung oder dem Wunsch der Herstellung eines neuen Bauteils kann ein solcher Anguss entfernt, der frei werdende Bereich durch Nadeln aufgefüllt und der Anguss an anderer Stelle im Werkzeug erneut eingebracht werden. Allerdings ist dabei zu beachten, dass kein Adapter zwischen Kavität und Anguss eingesetzt werden kann, wie es bei der Auswerferhülse der Fall ist. Der Anguss muss demnach immer an die entsprechende Geometrie des Bauteils angepasst werden, wodurch die Wiederverwendbarkeit des Angussystems einschränkt ist.

Die für das formflexible Werkzeug letzte spritzgießrelevante Anforderung ist die Realisierung von Hinterschneidungen. Unter Hinterschneidungen sind Geometrieelemente zu verstehen, die eine Entformung des Bauteils behindern, weil sie quer zur Entformungsrichtung liegen. Prinzipiell sind zwei Arten von Hinterschnitten zu unterscheiden. Zum einen liegen äußere Hinterschneidungen vor. Diese werden beispielsweise durch Schieber realisiert. Zum anderen existieren innere Hinterschneidungen, die durch zusammensetzbare Kerne ermöglicht werden. Diese führen auf Grund der er-

höhten Komplexität automatisch zu hohen Werkzeugkosten. Um die Anzahl der erforderlichen Hinterschneidungen gering zu halten, muss daher eine sinnvolle Hauptentformungsrichtung festgelegt werden. Durch geschickte Konstruktion des Bauteils sind möglichst viele Hinterschneidungen zu eliminieren. Bei der Entwicklung des formflexiblen Werkzeugs kann nicht auf ein aufwändiges, kaum wiederverwendbares Schiebersystem für äußere Hinterschnitte zurückgegriffen werden. Hier erscheint es am wirtschaftlichsten, den Ansatz der Integration von Kernen, wie es bei inneren Hinterschnitten der Fall ist, zu verwenden. Ein solcher Einlegekern kann für den speziellen Einsatzfall gefertigt und in das bereits eingestellte Nadelpaket eingesetzt werden. Nach erfolgtem Applizieren und Erstarren der Formmasse entformt das Auswerfersystem den Spritzling samt Einlegekernen. Manuell ist dann jeder Kern zu entfernen und erneut in das Werkzeug einzusetzen. Dieser manuelle Arbeitsschritt erhöht die Zykluszeit bei der eigentlichen Fertigung der Kunststoffbauteile. Allerdings ist es im hier betrachteten Anwendungsfall der Herstellung von Kunststoffbauteilen in Kleinserien mittels Prototypenwerkzeugen gängige Praxis, manuell zu bedienende Einlegekerne zu verwenden.

Mit der Integration von Auswerfer- und Angussystemen sowie der Möglichkeit der Realisierung von Hinterschneidungen im formflexiblen Werkzeug sind alle relevanten Anforderungen an ein Prototypen- bzw. Kleinserien-Spritzgießwerkzeug erfüllt. Im Hinblick auf die Oberflächengenauigkeit der formgebenden Kavität besteht allerdings noch Handlungsbedarf. Daher werden im folgenden Unterabschnitt Möglichkeiten vorgestellt, die entstehende Nadelrasterung bei dem entwickelten Konzept zu minimieren und damit das Spritzgießergebnis zu optimieren.

### 5.2.4 Reduktion der Nadelrasterung zur Optimierung des Spritzgießergebnisses

Mit Fertigstellung der in Unterabschnitt 5.2.1 bis 5.2.3 vorgestellten Werkzeugkomponenten konnten erste Abgießversuche mit einem niedrig-schmelzenden Kunststoff durchgeführt werden. Diese hatten das Ziel zu zeigen, dass es mit dem Nadelkissenprinzip möglich ist Bauteile abzuformen, ohne dabei das Risiko einzugehen, das Werkzeug auf einer Spritzgießanlage zu beschädigen. Diese bereits in Abschnitt 5.1 erwähnten Abgießversuche zeigten, dass die Oberflächenqualität eines Bauteils bei zur Werkzeugtrennebene senkrechten Bereichen durch die Nadelflanken zufriedenstellend ist, wohingegen erwartungsgemäß bei Freiformflächen mit sehr kleinen Winkeln zur Werkzeugtrennebene die Nadelrasterung sehr ausgeprägt ist (siehe Abbildung 27).

Auf Basis dieser Versuche konnten zur Optimierung der Abformgenauigkeit von beispielsweise Freiformflächen zusätzliche Lösungsstrategien entwickelt werden, die die Nadelrasterung minimieren bzw. ganz verhindern. Innerhalb dieses Unterabschnitts sollen die prinzipiellen Ideen und Konzepte zur Reduktion der Nadelrasterung vorgestellt werden, da diese direkten Einfluss auf die in Unterabschnitt 5.3.2 dargestellte Entwicklung der Software zur automatisierten Einstellung der Nadeln im Bereich der *Software-Zusatzoptionen* haben. Eine genaue Beschreibung der Realisierung und des Einsatzes dieser Konzepte ist in Abschnitt 6.2 enthalten.

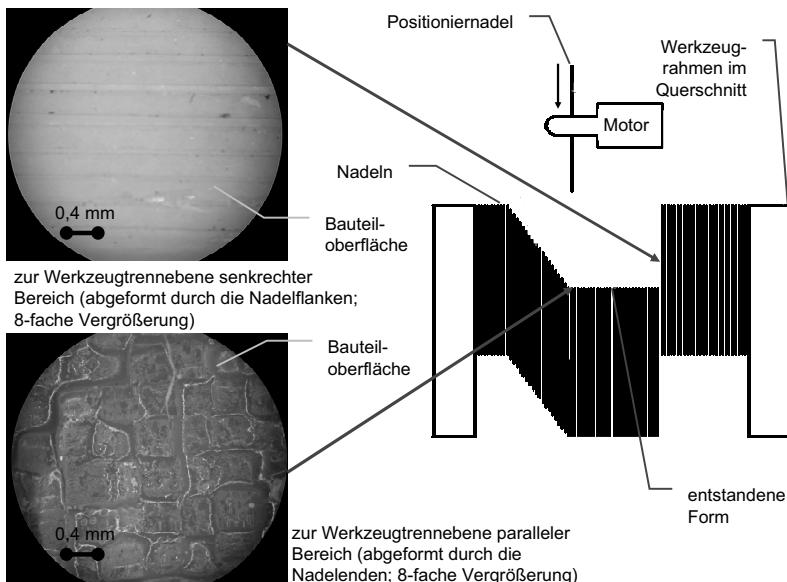


Abbildung 27: Mikroskop-Aufnahmen eines Bauteils, hergestellt durch einen Abgießversuch

Das erste Konzept sieht vor, nach dem Einstellen der Kavität einen angeschlossenen Frä- oder Schleifprozess durchzuführen. Die Wiederverwendbarkeit und Flexibilität des Nadelkissens ist dadurch nur minimal eingeschränkt, da die abzutragenden Zustelltiefen sehr gering ausfallen. In einem ersten Schritt wird über die automatisierte Einstellaktorik eine Kavität mit einem Aufmaß eingeprägt. Dieses kann in einem nachfolgenden Prozessschritt abgespant werden. Die Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit

des Spritzlings erhöht sich dadurch erheblich. Im Bereich der *Software-Zusatzoptionen* ist folglich eine Möglichkeit zu integrieren, die es erlaubt, ein Aufmaß auf die 3D-CAD-Geometrie vorzusehen. Nach erfolgreicher Spritzapplikation können die Nadeln wieder in die neutrale Position verfahren und durch erneute spanende Bearbeitung auf ein einheitliches Maß gebracht werden. Diese Strategie bietet neben der Reduktion der Nadelrasterung den Vorteil, dass durch den nachgeschalteten Frä- oder Schleifprozess eine gröbere Nadelrasterung zum Einsatz kommen kann. Dadurch reduzieren sich Einstellzeit und Kosten der Kavität bei gleichzeitiger deutlicher Erhöhung der Qualität des Werkzeugs. Nachteilig an diesem Konzept ist ein erhöhter CAD/CAM-Aufwand, der zur Nachbearbeitung notwendig ist.

Eine weitere Strategie zur Minimierung der Nadelrasterung beinhaltet die zusätzliche Verwendung von sehr dünnen, formgebenden Schalen als Zwischenschichten. Diese sind in das Nadelkissen zu integrieren und verhindern so die Nadelrasterung am Spritzling. Beispielsweise können Stereolithographie-Schalen mit einer Wandstärke von wenigen Millimetern kostengünstig hergestellt werden, da das entsprechende Bauteilvolumen gering ist. Versuche mit einem konventionellen Stereolithographieharz haben gezeigt, dass Harze mit einer Schmelztemperatur von 120 °C für Kleinserien und Prototypen einsetzbar sind. Die formgebende Innenseite dieser Schale ist für die Geometrieverzeugung und Oberfläche des Spritzlings zu nutzen. Die Außenseite kann gezielt an die Nadelrasterung angepasst werden. Der Vorteil dieser Kombination ist, dass die Schalen nur Anforderungen an die Temperaturbeständigkeit besitzen sollten, ansonsten aber keine Anforderungen an die Festigkeit aufweisen müssen. Die Festigkeit sowie Maßgenauigkeit ergibt sich durch die konturnah eingestellten Nadeln im Werkzeugsystem. Dabei werden prozessbedingte Maßgenauigkeiten der Zwischenschale durch das Anschmiegen an die Nadeln im elastischen Bereich des Stereolithographieharzes ausgeglichen. Ein genauer Einstellvorgang ist hierfür Grundvoraussetzung, um eine möglichst optimale Nadelunterstützung zu garantieren. Andernfalls wird die Schale durch die hohen Drücke während des Spritzgießens zerstört. Ein manuelles Eindrücken der Zwischenschale in das Nadelkissen bietet auf Grund des unkontrollierten Verschiebens der Nadeln nicht die benötigte Genauigkeit.

Die Konstruktion einer solchen Zwischenschale ist durch die notwendige Nadelrasterung auf der dem Nadelpaket zugewandten Seite der Schale sehr aufwändig, da wie bereits erwähnt ein genaues Abbild des eingestellten Nadelmusters für ein maßgenaues Spritzgießergebnis vorhanden sein muss. Um diesen konstruktiven Aufwand zu minimieren, ist bei der Entwicklung der *Software-Zusatzoptionen* ein Algorithmus zu integrieren, der ein automatisches Ableiten der Zwischenschalengeometrie ermöglicht (siehe Unterabschnitt 5.3.2).

Die Kombination einer sehr feinen, dünnen, labilen und dadurch kostengünstigen Schale mit der Flexibilität und Festigkeit des Nadelkissenkonzepts bietet einen hohen Grad an Wiederverwendbarkeit bei gleichzeitig guter Oberflächenqualität und Maßgenauigkeit des kompletten Werkzeugsystems. Neben Stereolithographie-Schalen können beispielsweise auch Schalen aus IMLS- bzw. DMLS-Verfahren eingesetzt werden. Hinzu kommt, dass es bei der Verwendung von generativ gefertigten Zwischenschalen möglich wird, die realisierbare Bauteilkomplexität, die diese Verfahren erlauben, zu nutzen und konturnahe Kühlkanäle in die Schalen zu integrieren. Der größte Nachteil dieser Verfahren (hohe Herstellkosten, begründet in Bauzeit und Materialkosten) kann durch das Schalenkonzept und die filigrane Ausgestaltung der Zwischenschalen auf Grund des geringen Bauvolumens eliminiert werden. Mit der Verwendung einer konturnah gekühlten Zwischenschale wird es zusätzlich möglich, die Zykluszeiten des bisher ungekühlten Werkzeugsystems zu erhöhen. Bei der Verwendung von Zwischenschalen kommt es zu keiner Abnutzung der Nadeln, was dem Gedanken der Wiederverwendbarkeit entspricht. Die Zwischenschalen sind allerdings nicht für unterschiedliche Geometrien einsetzbar. Da die Kosten dieser Schalen aber auf Grund des geringen Bauvolumens nicht besonders ins Gewicht fallen, kann in diesem Punkt auf eine Wiederverwendbarkeit verzichtet werden.

Eine weitere Strategie besteht darin, die Nadeln zuerst in der Ausgangsposition zu lassen und die von der Nadelposition abhängige Geometrie, die jeder Nadelkopf später im Werkzeug haben muss, beispielsweise durch Laserabtragen herzustellen. Im Anschluss an die Formgebung der Nadelköpfe werden diese durch den automatischen Einstellmechanismus in die entsprechende Position verschoben und der Spritzvorgang kann gestartet werden. Der Vorteil dieses Vorgehens liegt in der Eliminierung der Einschränkung, die ein Laserabtragsystem durch die Kegelform des Lasers gerade bei tiefen Kavitäten besitzt. Durch die Bearbeitung der Nadelköpfe in einer Ebene mit anschließendem Positionieren ist diese Beschränkung umgangen. Nach einem Spritzvorgang kann die nicht mehr benötigte Form überfräst und damit eine einheitliche Ausgangslänge der Nadeln für erneute Abtragsvorgänge geschaffen werden. Dieses Vorgehen ist allerdings auf Grund des technologischen Aufwands beim Laserabtragen nur von theoretischer Natur. Daher wird diese Alternative im Folgenden nicht weiter betrachtet und eine Unterstützung dieses Konzepts durch die *Software-Zusatzoptionen* ist nicht angedacht.

Sowohl bei der direkten Verwendung der Nadeln zum Herstellen von Spritzgießbauteilen als auch beim Einsatz der oben beschriebenen Zwischenschalen ist es notwendig, die Nadeln in ihrer Position möglichst genau zu verstetzen. Im folgenden Abschnitt wird

daher die Realisierung der bereits angesprochenen Aktorik, Sensorik und Software zur automatischen Positionierung der Nadeln detailliert dargestellt.

### 5.3 Rechnergestützte Positioniereinheit zur automatischen Nadeljustage

Wie bereits in Abschnitt 1.4 und Abschnitt 5.1 erwähnt, bedarf es bei der Entwicklung eines innovativen Werkzeugsystems, neben der hohen Wiederverwendbarkeit, einer automatisierten Prozesskette, damit die Herstellkosten im Vergleich zum konventionellen Werkzeug- und Formenbau minimiert werden können und ein einfaches Ändern des Werkzeugs bei neuen Produkten oder Varianten ermöglicht wird. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Spritzgießwerkzeug bietet durch die formflexible Werkzeugoberfläche auf Basis von axial verschiebbaren Nadeln die Möglichkeit einer gezielten Ansteuerung jeder einzelnen Nadel. Dazu ist die Entwicklung einer kompletten CAx-Kette, beginnend beim 3D-CAD-Positivbauteil (dem zu fertigenden Produkt) über die automatisierte Generierung der Werkzeugkavität, die Ableitung der Ansteuerbefehle sowie die Realisierung der Ansteuerungshardware und des Einstellmechanismus bis hin zur Regelung beim Einstellvorgang, erforderlich. Bei der Entwicklung dieser CAx-Kette lassen sich zwei Kernbereiche identifizieren: Zum einen existieren Problemstellungen, die softwaretechnisch zu lösen sind (Softwarekomponenten), zum anderen solche, die eine Entwicklung auf Hardwarebasis erfordern (Hardwarekomponenten, siehe Abbildung 28).

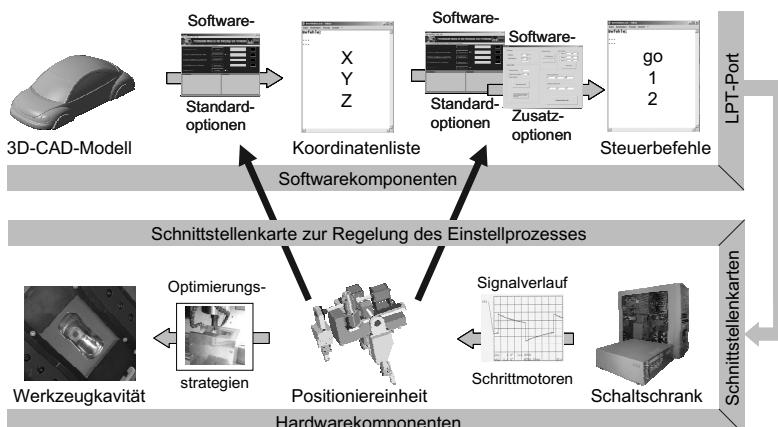


Abbildung 28: Prozesskette und Schnittstellen beim Einstellvorgang der Nadeln

Zwischen den beiden Kernbereichen sind zusätzlich entsprechende Schnittstellen vorzusehen (z. B. LPT-Port), welche die Kommunikation zwischen Soft- und Hardware ermöglichen. Jeder Kernbereich lässt sich wiederum in zwei Teilbereiche aufgliedern. Im Kernbereich der Softwarekomponenten sind die Teilbereiche *Software-Standardoptionen* sowie *Software-Zusatzeoptionen* zu unterscheiden. Hingegen erfolgt im Kernbereich Hardwarekomponenten die Unterteilung in die Hardware-Steuereinheit (Schaltschrank) und die Hardware-Positioniereinheit. Die folgende Auflistung zeigt eine Zusammenfassung der Anforderungen an die unterschiedlichen Bereiche:

### **Software-Standardoptionen:**

- Einlesen der CAD-Daten des Bauteils
- automatisiertes Erstellen der Werkzeugkavität
- Ableiten der Nadelkoordinaten
- Generierung von Ansteuerbefehlen
- Ansteuerung der Aktorik (Einstelleinheit und Spanneinheit)
- Regelung des Verfahrvorgangs
- Verwendung variabler Nadelgrößen und Werkzeuggrößen
- manuelles Aktivieren und Deaktivieren der Spanneinheit
- variable Motor- und Aktorikparameter
- Visualisierung der virtuellen Werkzeugkavität
- manuelles Verfahren der Einstellaktorik

### **Software-Zusatzeoptionen:**

- Unterstützung bei der Minimierung der Nadelrasterung
- Erzeugen von Aufmaßen der Kavität
- Ableiten von Zwischenschalengeometrien
- 3D-Skalierung von STL-Daten
- Reparatur von STL-Daten
- Schnittstelle zwischen *Software-Standardoptionen* und dem Betriebssystem des Einstellrechners

- Zugriff auf die Systemschnittstellen

#### **Hardware-Positioniereinheit:**

- lineare Verfahrrachsen
- Wegmesssysteme
- Kopplung mit dem Spannsystem
- einfache Montage und Demontage der Einstelleinheit

#### **Hardware-Steuereinheit:**

- Spannungsversorgung der Einstellaktorik
- Spannungsversorgung der Spanneinheit
- Schnittstellen – Ansteuerung
- Schnittstellen – Spanneinheit
- Schnittstellen – Regelung

Eine detaillierte Darstellung der Realisierung bzw. Umsetzung dieser Anforderungen ist den folgenden Unterabschnitten zu entnehmen.

##### **5.3.1 Software-Standardoptionen**

Die im Rahmen dieser Arbeit unter Verwendung der Skriptsprache Python entwickelte Software zur Realisierung einer virtuellen Werkzeugkavität auf Basis der vorhandenen, positiven Produktgeometrie gliedert sich in mehrere Programmberiche, die unterschiedliche Funktionalitäten bieten. Das primäre Ziel bei der Anwendung des entwickelten Programms ist das Erzeugen einer Tabelle, die die Koordinaten der Werkzeugkavität beinhaltet. Jedes Koordinatentripel besteht aus x-, y- sowie z-Werten und ist repräsentativ für einen Nadelkopf im formflexiblen Bereich. Diese Koordinaten werden von einem Softwaremodul genutzt, um Ansteuerbefehle für die automatisierte Einstellhardware zu generieren und zusätzlich das Einstellergebnis zu überprüfen. Zur vereinfachten Bedienung des entwickelten Programms wird eine grafische Benutzeroberfläche verwendet (Graphical User Interface, GUI). Diese beinhaltet unterschiedlichste Bedien-, Auswahl- und Anzeigeelemente sowie ein Berichts- und ein Statusfenster (siehe Abbildung 29).

Der Aufbau dieser GUI ist derart, dass die durchzuführenden Bearbeitungsschritte chronologisch angeordnet sind und damit der Ablauf bei der Bedienung des Programms

im Auswahlreiter „Berechnung“ festgelegt ist (siehe Abbildung 29, Schritt 1 bis 4). Berechnungsschritte unterstützende Daten werden über die weiteren Reiter abgefragt.

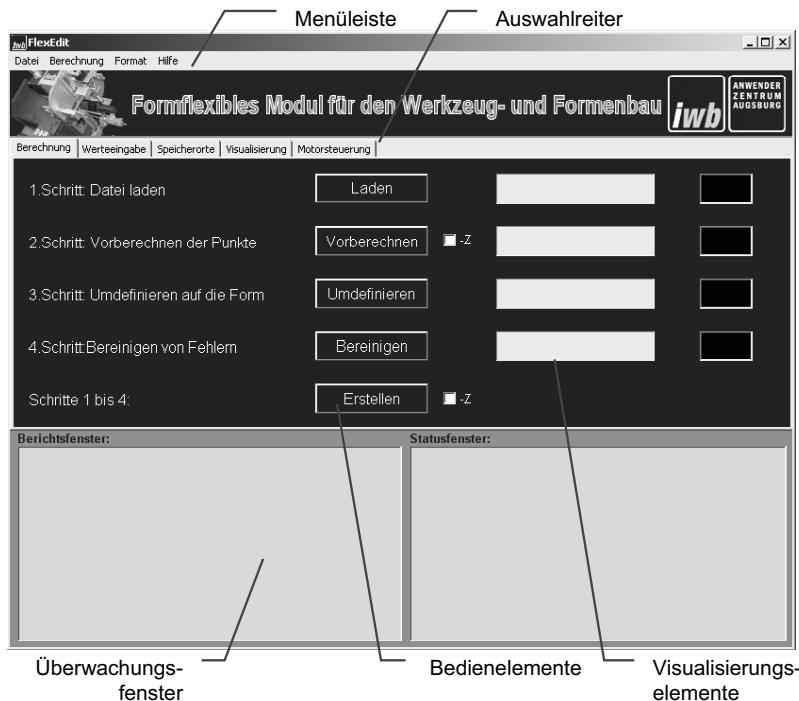


Abbildung 29: Graphische Benutzeroberfläche (GUI) der entwickelten Software

Der erste Schritt zum Generieren einer Werkzeugkavität besteht darin, die Geometrie des gewünschten Produkts über das Bedienelement „Laden“ in das Programm einzubinden. Dazu werden die Geometrieeinformationen des Bauteils in den Programmspeicher (entspricht hier dem Arbeitsspeicher) eingelesen und entsprechend für die weiteren Berechnungsschritte angepasst. Da beabsichtigt ist, das entwickelte Werkzeugsystem zukünftig in der Größe des formflexiblen Bereichs zu skalieren und derzeit bereits unterschiedliche Nadelgeometrien zum Einsatz kommen, ist es notwendig, das entwickelte Programm parametrisiert aufzubauen. Daher besteht der nächste Schritt zur Erstellung einer Werkzeugkavität in der Eingabe der Werkzeugparameter. Dies kann über den Auswahlreiter „Werteingabe“ des GUI durchgeführt werden.

Über diesen Reiter sind vom Benutzer zu Beginn die Geometriemaße des Werkzeugsystems einzugeben. Darunter sind sowohl die Abmaße des formflexiblen Bereichs als auch die Größe der im Querschnitt quadratischen Nadeln zu verstehen. Nach erfolgter Eingabe kann der Benutzer auf den nächsten Reiter wechseln. Dort sind die Speicherorte der einzelnen Berechnungsschritte festzulegen („Speicherorte“). Das Programm vergibt für die Daten der einzelnen Berechnungsschritte automatisch einen Dateinamen, der aus dem Erstelldatum, der Erstellzeit und einer Zuordnung zu dem jeweiligen Berechnungsschritt besteht. Daher genügt die Angabe des Verzeichnisses, in das die Berechnungsergebnisse gespeichert werden sollen. Im folgenden Reiter („Visualisierung“) kann der Benutzer festlegen, ob die Berechnungsergebnisse dargestellt werden sollen. Dazu generiert das Programm automatisch eine VRML-Datei (Virtual Reality Modelling Language) aus den berechneten Koordinaten. Eine VRML-Datei bietet den großen Vorteil, dass sie im Klartext (ASCII bzw. UTF-8) geschrieben und somit auch mit einem einfachen Texteditor erstellt werden kann. Bei der Darstellung der Berechnungsschritte werden die einzelnen Koordinaten der Nadelköpfe über die Syntax der VRML visualisiert (siehe Abbildung 30, rechts).

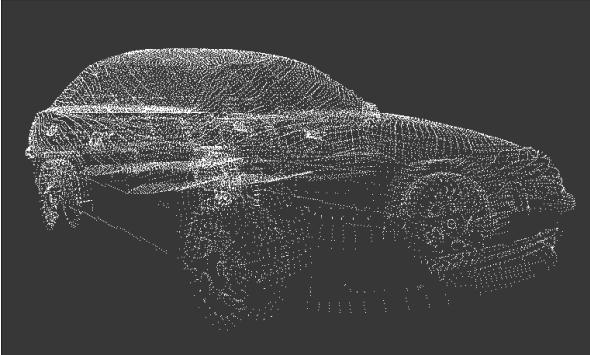
	<pre> VRML V2.0 utf8 #Datei SET.WRL: Fahrzeug als Punktwolke, #Drahtgitter und Koerper Transform {# Punktfolke translation -6 0 0 children [ Shape { geometry PointSet{ coord Coordinate{ point [ 11.0495, 18.16891, 2.813462 11.14013, 18.46479, 2.763763 11.19474, 18.67651, 2.802528 11.19479, 16.90773, 4.59684 11.26385, 17.26803, 4.51424 11.2814, 17.41115, 4.66243 11.19479, 16.90773, 4.59684 11.29799, 17.46733, 4.984992 11.29361, 17.44473, 5.157185 11.04954, 16.76126, 2.082972 11.14017, 16.80543, 4.78621 11.19479, 16.90773, 4.59684 ] } } } } </pre>
<p>Darstellung einer geladenen Geometrie in Form einer Punktwolke mittels eines VRML-Plug-ins für den Internet Explorer</p>	<p>Ausschnitt aus der generierten VRML-Syntax</p>

Abbildung 30: VRML-Darstellung des Berechnungsschritts „Laden“

Nachdem der Benutzer die beschriebenen Reiter bedient hat, kann mit dem zweiten Schritt für die Erstellung der Werkzeugkavität begonnen werden. Dieser beinhaltet das „Vorberechnen“ (siehe Abbildung 29, Schritt 2) der relevanten Koordinaten im Reiter „Berechnung“. In Abhängigkeit von der Position der im Konstruktionsprogramm definierten Trennebene des Bauteils haben die Normalenvektoren jedes Dreiecks beim STL-Export (siehe Abschnitt 5.1) über dieser Ebene ein positives Vorzeichen und die

unterhalb liegenden ein negatives. So lässt sich feststellen, welche Abformhälften bearbeitet werden soll. Der Benutzer bekommt dafür eine Interaktionsschaltfläche zur Auswahl angeboten, um die jeweiligen zu berechnenden Abformhälften auszuwählen. Da jedes Dreieck beliebig im Raum orientiert sein kann, werden zunächst zwei Koordinaten (siehe Abbildung 31, Punkt 1 und Punkt 2) eines Dreiecks aus der STL-Datei betrachtet. Durch diese zwei Eckpunkte legt ein Algorithmus der Software eine virtuelle Gerade. Mit dieser ist es nun möglich, alle Punkte im Intervall [Punkt 1, Punkt 2] in Abhängigkeit von der Nadelstärke des formflexiblen Werkzeugs zu berechnen. Dabei ermittelt der Algorithmus zusätzlich den Abstand zwischen der Trennebene und den einzelnen Punkten. So entsteht für jeden Punkt das gesuchte Koordinatentripel. Die Gerade wird nach dem Bestimmen der Koordinaten in Richtung des dritten Punktes parallel um das Maß einer Nadelquerschnittskante verschoben und der oben beschriebene Vorgang so lange wiederholt, bis Punkt 1, 2 und 3 aufeinander fallen (siehe Abbildung 31). Anschließend erfolgt eine Wiederholung des beschriebenen Vorgehens mit dem nächsten Dreieck der STL-Datei. Die in jedem Schritt berechneten Punkte werden zur Minimierung der Programmlaufzeit gleich nach der Berechnung in einer vom Programm vordefinierten Datei gespeichert.

- Bestimmen der Eckpunkte des ausgewählten Dreiecks
- Definition einer Geraden durch zwei Eckpunkte
- Rasterung der Geraden zur Koordinatenermittlung aller Punkte in dem Intervall [Punkt 1; Punkt 2]
- Parallelverschiebung der Geraden in Richtung des dritten Dreieckpunkts
- Bestimmung aller Koordinaten auf der verschobenen Geraden
- Schleifenendbedingung: Punkte 1, 2 und 3 sind identisch

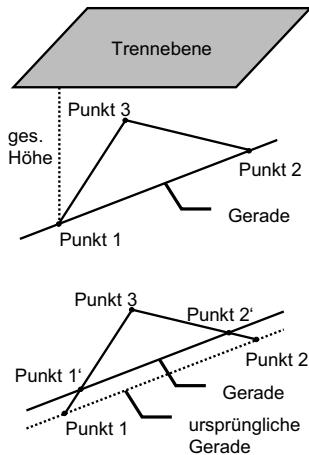


Abbildung 31: Vorberechnung relevanter Koordinaten

Dieses Vorgehen wiederholt sich solange, bis alle Dreiecke bearbeitet sind. Das Resultat dieser Vorberechnung ist eine Datei mit den 3D-Koordinaten eines kompletten Bauteils. Nach erfolgreicher Vorberechnung kann der Benutzer den Schritt des Umdefinierens einleiten. Dabei werden die berechneten Koordinatenpunkte mit Hilfe von

Koordinatentransformationen auf das Nadelraster verschoben, wodurch jede Koordinate den Mittelpunkt eines Nadelquerschnitts repräsentiert. Im Hinblick auf die Detailgenauigkeit des späteren Bauteils ist dieser Schritt legitim, da die Detailauflösung des Werkzeugs immer abhängig von der Nadelgröße ist. Somit wird das Bauteil virtuell in die Werkzeugoberfläche eingebettet. Während dieser Berechnungen hat der Benutzer des Weiteren die Möglichkeit, die Orientierung des Bauteils zu ändern, falls die Abformfläche durch das Programm falsch identifiziert wurde. Dies kann über die Möglichkeit der Visualisierung mittels der VRML-Schnittstelle überprüft werden. Eine Fehlerquelle, die im Schritt „Umdefinieren“ noch nicht beseitigt wurde, ist die Doppeldeutigkeit von Koordinaten. Wie aus Abbildung 32 ersichtlich ist, besitzt die STL-Datei des Automobils entsprechend Abbildung 30 sowohl die Koordinaten der hinteren Sitzgarnitur als auch die des Dachs. Somit sind für eine Vielzahl von x- und y-Koordinaten noch zahlreiche z-Koordinaten enthalten, die im Schritt „Bereinigen“ entfernt werden müssen. In diesem Teil der Software wird die ganze Punkteliste betrachtet, um Punkte mit gleichen x- und y-Koordinaten herauszufiltern bzw. nur die für das Werkzeug relevanten z-Koordinaten zu speichern. Die so entstandene bereinigte Koordinatenliste wird zum Einstellen der Werkzeugkavität verwendet. Aus dem in Abbildung 30 dargestellten positiven Bauteil entsteht durch die vier Berechnungsschritte der Software eine virtuelle Werkzeugkavität (siehe Abbildung 32), die für das erfolgreiche Positionieren der Kavität in das reale formflexible Spritzgießwerkzeug verwendet werden kann.

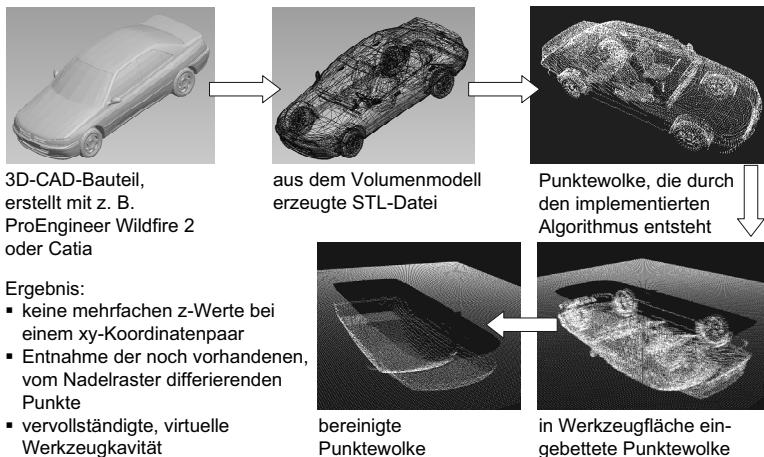


Abbildung 32: Zusammenfassung des Ablaufs zur Generierung der virtuellen Werkzeugkavität

Nach erfolgter Bereinigung bzw. dem vollständigen Erstellen der Koordinatenliste der Werkzeuggeometrie ist es möglich, die vorhandene Datei für die Ansteuerung der Motoren des Einstellmechanismus zu verwenden. Dazu wird die Eingabe weiterer Parameter notwendig. Der Benutzer muss im Reiter „Motorsteuerung“ den Unterreiter „Werteeingabe“ öffnen und die entscheidenden Parameter des zum Einsatz kommenden Einstellmechanismus eingeben.

Da zum Einstellen der Nadeln Schrittmotoren Verwendung finden (siehe Unterabschnitt 5.3.3), wird im ersten Unterreiter („Werteeingabe“) für die einzelnen Motoren die Anzahl der Schritte pro Umdrehung abgefragt. Zusätzlich ist es notwendig, die Steigung der verbauten Gewindespindeln (siehe Abschnitt 5.1 und Unterabschnitt 5.3.3) anzugeben. Aus diesen Daten kann das Ansteuerprogramm auf Basis der Koordinatenwerte die benötigte Anzahl an Schritten für die jeweiligen Motoren ermitteln, um die entsprechenden Positionen anzufahren. Diese Schrittzahl wird an die Schnittstellenkarten der einzelnen Motoren weitergegeben (siehe Unterabschnitt 5.3.4), die das Einstellen initiieren. Zusätzlich zur Motorschritt- und Steigungseingabe existiert weiterhin eine Eingabemaske für den maximalen Verfahrweg der einzelnen Motoren. Diese vom Benutzer zu füllenden Felder dienen der Überprüfung, ob die zu generierende Geometrie in der realen Form Platz findet. Sollte dies nicht der Fall sein, wird der Überstand bei der Formgenerierung automatisch ausmaskiert. Die Einstelleinheit fährt daher nur die erreichbaren Koordinaten an.

Über die zum Einsatz kommenden Wegmesssysteme wird die tatsächliche Position der Einstellnadel abgefragt und mit dem jeweiligen Zielwert verglichen. Eine eventuell notwendige Korrektur wird automatisch eingeleitet. Zusätzlich zum automatisierten Einstellen bietet der Unterreiter „Test“ die Möglichkeit eines manuellen Verfahrens der Motoren. Dazu ist jeder Motor einzeln anzuwählen, die Verfahrrichtung zu selektieren und ein entsprechender Verfahrweg in mm anzugeben. Zusätzlich können über zwei Schaltflächen die pneumatischen Muskeln des Spannmechanismus aktiviert oder deaktiviert werden. Neben der automatisierten Einstellung der Nadeln auf Basis der generierten Koordinatenliste ist es somit möglich, ein Verstellen von Nadeln auch manuell durchzuführen. Eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus und der Funktionalität der entwickelten Software ist im Anhang enthalten.

### 5.3.2 Software-Zusatztionen

Wie bereits erwähnt, ist das Programm, das die *Software-Standardoptionen* enthält, in der Skriptsprache Python programmiert. Der Hauptgrund für die Verwendung dieser Sprache liegt in der Möglichkeit der dynamischen Typisierung, d. h. dass den Variablen

während des Programmablaufs unterschiedliche Typen zugeordnet werden (weak typing). In der Sprache C würde die Zuweisung von Variablen mit unterschiedlichen Typen zu Fehlern während des Kompilierens führen (HÖGL 2006). Bei den aufwändigen Koordinatentransformationen, den Bereinigungsalgorithmen und der Ansteuerbefehlableitung ist die dynamische Typisierung hilfreich. Allerdings wird der Zugriff aus Python auf den LPT-Port des Ansteuerrechners durch das Betriebssystem eingeschränkt bzw. behindert. Daher erfolgte die Programmierung der *Software-Zusatzeoptionen* in der Sprache C++, um einen einfachen, uneingeschränkten Zugriff bei der Motoransteuerung auf den LPT-Port über so genannte Gates zu ermöglichen.

Das Programm zur Realisierung der *Software-Zusatzeoptionen* gliedert sich in zwei Hauptbereiche. Zum einen unterstützt es bei der Handhabung der 3D-CAD-Daten und der Realisierung der Strategien zur Nadelrasterreduktion. Zum anderen stellt dieses Programm bzw. stellen Teile dieses Programms das Bindeglied zwischen den *Software-Standardoptionen* und den Systemschnittstellen (LPT- und USB-Port) des Steuerrechners dar. Der LPT-Port dient zur Ankopplung der Steuereinheit, wohingegen der USB-Port zur Anbindung des Messsystems der Einstellaktorik bei der Regelung des Einstellvorgangs genutzt wird (siehe Unterabschnitt 5.3.3).

Sowohl die Steuerung der Einstelleinheit als auch die Aktivierung des Spannmechanismus wird über den LPT-Port eines PC realisiert. Seit der Einführung des Betriebssystems Windows NT ist es für selbst programmierte Software nicht mehr möglich, direkt auf Systemschnittstellen zuzugreifen. Dies begründet sich in den erhöhten Sicherheitsanforderungen dieses Betriebssystems. Windows unterscheidet daher bei einem Zugriff auf Hardwareschnittstellen zwischen zwei Arten zugreifender Programme. Zum einen gibt es so genannte Programme, die im „Kernel-Mode“ betrieben werden. Diese Programme können direkt auf die Schnittstellen zugreifen, da sie im Ring 0 des Betriebssystems arbeiten. Zum anderen existieren Programme, die im „User-Mode“ ausgeführt werden und damit im Ring 1 bis 3 anzusiedeln sind. Selbst erstellte Software ist in der Regel als User-Mode-Programm kategorisiert und damit den Ringen 1 bis 3 zuzuordnen. Diese Ringe bezeichnen im Umfeld der Betriebssystem-Programmierung und des Multitaskings eine Privilegierungs- bzw. Sicherheitsstufe eines Prozesses (CAP 2006). Diese schränkt den Prozess auf einen nutzbaren Befehlsatz und Speicherbereich ein. Die Nutzung von Privilegierungsebenen ist sinnvoll, um die Hardware zu abstrahieren und um Prozesse voneinander abzugrenzen. Allerdings ist der Befehlsatz für unprivilegierte Prozesse derart eingeschränkt, dass sie nicht direkt auf die Hardware zugreifen können und sich auch nicht aus ihrer Privilegierungsebene befreien können. Der Zugriff auf den Speicherbereich anderer Prozesse wird durch Speichervirtualisierung verhindert. Somit ist gewährleistet, dass Prozesse z. B. im Ring

3 in keinem Fall Prozesse im Ring 0 oder auch andere Prozesse im Ring 3 beeinflussen können. Da die unprivilegierten Prozesse nicht direkt auf Hardware zugreifen können, existieren so genannte Gates zu dem darunterliegenden Ring, um über die Schnittstelle des Kernels die notwendigen Aktionen anzufordern. Ein solches Gate kann die verwendete `inpout32.dll` sein, eine Bibliothek, die sowohl das Schreiben als auch das Lesen auf bzw. vom LPT-Port ermöglicht. Über die Nutzung solcher Bibliotheken kann neben dem Zugriff auf den LPT-Port auch der Zugriff auf den USB-Port erreicht werden. Das Verwenden eines solchen Gates ist bedeutend einfacher zu realisieren als die Programmierung eines Kernel-Programms.

Das Programm *Software-Zusatzeoptionen* liest die Daten zur Ansteuerung aus den *Software-Standardoptionen* aus und schreibt diese direkt auf den LPT-Port. Das gleiche Vorgehen kommt bei der Regelung der Ansteuereinheit zur Anwendung. Hier erhält das Programm *Software-Zusatzeoptionen* die Daten des Messsystems vom USB-Port und gibt diese an das Programm *Software-Standardoptionen* weiter, das diese verwendet, um neue Ansteuerbefehle zu erzeugen, wodurch ein geschlossener Regelkreis des Einstellvorgangs entsteht.

Neben den beschriebenen Schnittstellenaufgaben der *Software-Zusatzeoptionen* unterstützt dieses Programm bei der Generierung der Zwischenschalen zur Reduktion der Nadelrasterung. Die prinzipielle Herausforderung bei der Verwendung der Zwischenschalen ist darin zu sehen, dass der konstruktive Aufwand dieser Schalen minimiert werden muss. Wie bereits in Unterabschnitt 5.2.4 erwähnt, besteht eine Zwischenschale aus einer formgebenden und einer unterstützenden Seite. Gerade die unterstützende Seite mit der eingeprägten Nadelrasterung bedeutet einen signifikanten konstruktiven und damit manuellen Aufwand. Daher verfügen die *Software-Zusatzeoptionen* über einen Algorithmus, der aufbauend auf den bereits vorhandenen CAD-Daten des Bauteils automatisch die Nadelrasterung bzw. die Geometrie der unterstützenden Seite ableitet (siehe Abbildung 33).

Die Idee, die hinter der automatischen Generierung der Zwischenschalen steht, basiert auf der Anwendung von Boolschen Operationen. In CAD-Systemen können diese Operationen auf zwei oder mehrere Flächen bzw. Volumina angewendet werden, wodurch Schnittmengen, Vereinigungen oder Differenzen der Körper entstehen. Die Berechnung einer Schnittmenge in Form einer Differenzenbildung wird im Fall der automatischen Zwischenschalengenerierung dazu genutzt, aus dem positiven Bauteil und einem vergrößerten, negativen Stempel die Zwischenschale zu erzeugen.

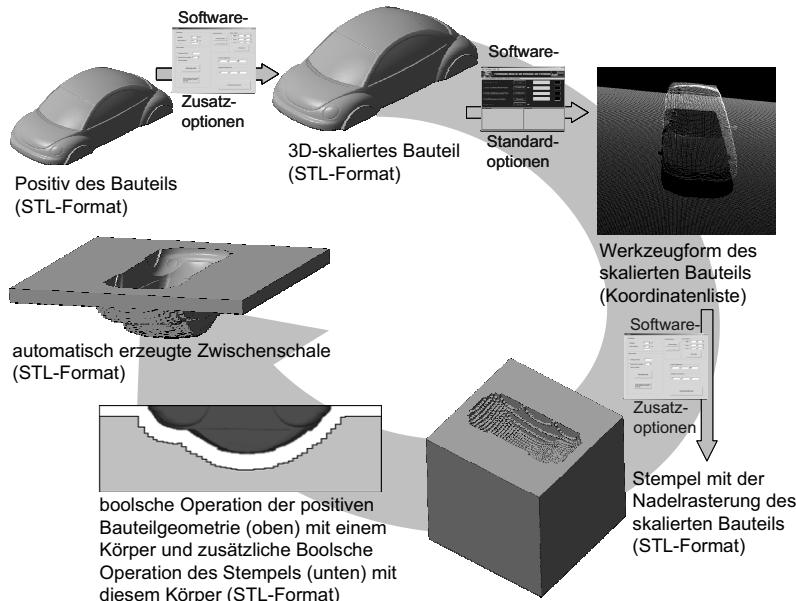


Abbildung 33: Ablauf zur automatischen Generierung von Zwischenschalen

Beginnend mit den 3D-CAD-Daten des Bauteils kann über die Skalierungsfunktion der *Software-Zusatzeoptionen* das Bauteil 3-dimensional vergrößert werden. Diese vergrößerte Bauteilgeometrie dient später als Basis für die Stempelgeometrie. Das skalierte Bauteil wird ebenfalls als STL-Format gespeichert und kann somit von den *Software-Standardoptionen* genutzt werden, um die für den weiteren Ablauf notwendige negative Form des skalierten Bauteils zu erzeugen. Dieser Ablauf entspricht den Beschreibungen in Unterabschnitt 5.3.1 und wird daher an dieser Stelle nicht erneut dargestellt. Nach erfolgreichem Durchlaufen der *Software-Standardoptionen* liegt eine Punktwolke des im virtuellen Werkzeugsystem eingebetteten, skalierten Bauteils vor. Darauf aufbauend kann mit Hilfe der *Software-Zusatzeoptionen* eine STL-Datei des in Abbildung 33 dargestellten Stempels erzeugt werden. Dazu werden die Koordinatenpunkte, die repräsentativ für den Mittelpunkt eines Nadelkopfes sind, selektiert und parallel zur Trennebene zwei Dreiecke definiert, die die Stirnfläche der Nadelköpfe beschreiben. Die Eckpunkte dieser Dreiecke repräsentieren somit die Nadelecken des Querschnitts am Nadelende. Daher ist die Definition dieser Dreiecke abhängig von der bei den *Software-Standardoptionen* vorgegebenen Kantenlänge der Nadelquerschnitte.

Zusätzlich zur Bildung dieser Dreiecke werden mittels Kreuzprodukt die Normalenvektoren jedes Dreiecks berechnet. Mit den Informationen der Dreieckspunktkoordinaten sowie den dazugehörigen Normalenvektoren kann bereits die Oberfläche des Stempels über das STL-Format beschrieben werden. Um die spätere Boolsche Operation durchführen zu können, ist es allerdings notwendig, einen geschlossenen, 3-dimensionalen Körper zu generieren. Daher werden zusätzlich zu jeder Nadelstirnfläche rechtwinklig die vier Nadelflanken und Nadelenden virtuell definiert. Dies geschieht über geometrische Berechnungen jedes Nadeleckpunkts und das Verbinden dieser Eckkoordinaten zu Dreiecken mit anschließender Definition der jeweiligen Normalenvektoren. Dabei erfolgt die Berechnung analog zu der Definition der Nadelstirnfläche. Damit ist der für die Erstellung der unterstützenden Seite der Zwischenschale notwendige Stempel automatisch im STL-Format generierbar, ohne aufwändige manuelle, konstruktive Arbeiten zu verursachen. Mit Hilfe eines CAD-Programms, wie beispielsweise „Magics“ der Firma *Materialise*, kann dann die Boolsche Operation zwischen dem generierten Stempel (siehe Abbildung 33, links unten hell-grau dargestellt) und einem Grundkörper (siehe Abbildung 33, links unten weiß dargestellt) durchgeführt werden. So entsteht in einem ersten Schritt die unterstützende Seite der Zwischenschale. Die Originaldatei des Bauteils (siehe Abbildung 33, links unten) kann in den Grundkörper eingebettet und ebenfalls durch eine Boolsche Operation (Subtraktion) integriert werden. Durch die Subtraktionen des skalierten Stempels und der originalen Bauteilgeometrie von einem Grundkörper entsteht die benötigte Zwischenschale. Dabei ist die Stärke der Schale durch die Position des eingebetteten Bauteils im Grundkörper sowie der Grad der Skalierung bei der Stempelgenerierung einzustellen. Dies ist besonders relevant, wenn beispielsweise nachträglich in die Zwischenschale eine konturnahe Kühlung integriert werden soll (siehe Unterabschnitt 6.2.2). Ebenfalls über Boolsche Operationen kann diese Kühlkanalanordnung in die entsprechend generierte Zwischenschale eingebracht werden. Das finale Ergebnis einer solchen Zwischenschale ist eine 3D-Geometrie im STL-Format, die, unter Verwendung einer generativ arbeitenden Anlage, direkt für deren Herstellung eingesetzt werden kann.

Ein zusätzlicher Vorteil bei dem vorgestellten Ablauf ist, dass die Daten zur Generierung des Stempels gleichzeitig genutzt werden können, um die Nadeln des formflexiblen Werkzeugs für das Einbetten der Zwischenschale einzustellen, da diese bereits den Koordinaten der unterstützenden Seite der Zwischenschale entsprechen. Ein erneutes Berechnen und Generieren der Ansteuerbefehle mit Hilfe der *Software-Standardoptionen* entfällt damit. Spritzversuche haben die Relevanz des automatischen Nadelpositionierens mittels der Einstelleinheit auch bei Verwendung von Zwischenschalen gezeigt. Ein Eindrücken der gesamten Zwischenschale ohne zuvor positionierte

Nadeln führt zu einem mangelnden Support des Werkzeugsystems und damit zum Versagen der Zwischenschalen beim Spritzgießen. Diese Tatsache zeigt neben dem bereits angesprochenen wirtschaftlichen Aspekt die technische Notwendigkeit eines automatisierten Einstellprozesses der bereits dargestellten CAx-Kette und der im folgenden Unterabschnitt detailliert beschriebenen Positioniereinheit zur Justage der einzelnen Nadeln.

### 5.3.3 Hardware-Positioniereinheit

Die Anforderungsanalyse zu Beginn dieser Arbeit ergab, dass die Wirtschaftlichkeit des formflexiblen Werkzeugsystems erheblich erhöht wird, wenn das Verstellen der Nadeln und damit das Erzeugen der Kavität vollständig automatisiert durchgeführt werden kann. Für die Einstellzeit wäre es wünschenswert, alle Nadeln zeitgleich zu positionieren, was allerdings sowohl wirtschaftlich als auch technisch nicht realisierbar ist. Daher ist eine zentrale Positioniereinheit sinnvoll, die das sequentielle Verstellen der Nadeln ermöglicht.

Diese Positioniereinheit basiert auf einer kartesischen Anordnung. Eine einzustellende Nadel wird von einem Positionerkopf über zwei lineare Achsen angefahren (x-, y-Achse). Die eigentliche Einstellnadel positioniert dann mit Hilfe einer dritten linearen Achse jede einzelne Nadel in der entsprechenden Höhe (z-Achse). Bei der x- und y-Achse kommen jeweils ein bipolarer Schrittmotor in Kombination mit Feingewindespindeln zum Einsatz, da bipolare Schrittmotoren im Vergleich zu unipolaren Schrittmotoren ein ca. 30 % höheres Drehmoment aufweisen (NANOTEC 2007). Schrittmotoren haben sich im Bereich der Positionier- und genauen Drehzahlsteuerung fest etabliert. Dies ist darin begründet, dass bei einem Schrittmotor die Genauigkeit extrem hoch, und somit ein schrittgenaues Positionieren ohne zusätzlichen Weggeber realisierbar ist. Weitere Vorteile des Schrittmotors sind das bei kleinen Drehzahlen hohe Drehmoment sowie die besondere Steifigkeit, die ein Verharren in der Halteposition auch ohne zusätzliche Bremse ermöglicht.

Die in diesem Fall eingesetzten Motoren weisen einen Schrittewinkel von  $0,9^\circ$  auf. Diese Winkeleinteilung entspricht 400 Schritten pro Umdrehung. Die genaue Kenntnis der Steigung der an den Motoren angeschlossenen Gewindespindel in Kombination mit der Schrittzahl pro Umdrehung ermöglicht die Ermittlung der benötigten Schrittzahlen bei der Ansteuerung einer bestimmten Koordinate. In Kombination mit einer in diesem Fall potentiometrischen Wegmesssensorik der Firma *burster Präzisionsmesstechnik GmbH & Co. KG, Gernsbach*, kann überprüft werden, ob die gewünschte Position angefahren wurde oder gegebenenfalls nachgeregelt werden muss. Die potentiometrischen

Wegmesssensoren funktionieren wie ein stetig einstellbarer Spannungsteiler. Je nach Stellung des Schleifers kann ein Spannungswert abgelesen bzw. eine der Spannung proportionale Position errechnet werden. Gekoppelt sind die Wegmesssensoren über eine A/D-Wandlerkarte mit der programmierten Ansteuersoftware. Dadurch wird es möglich, bei jedem Verfahren des Einstellkopfs die Ist-Position mit der Soll-Position zu vergleichen und entsprechende Regelbefehle zu generieren, falls bei einem Schrittmotor wider Erwarten ein Schrittfehler auftritt.

Die dritte Achse setzt sich auf Grund besonderer Anforderungen hinsichtlich der Steifigkeit des Systems aus einem hoch präzisen Linearsystem, das aus einer genauen und ohne Umkehrspiel behafteten Kugelumlaufspindel sowie einem entsprechenden Laufwagen besteht, zusammen. Angetrieben wird diese dritte Achse ebenfalls von einem bipolaren Schrittmotor mit 400 Schritten pro Umdrehung. In Kombination mit einer Spindelsteigung von 1 mm pro Umdrehung sowie der Regelung über die integrierten Messsysteme können mit dieser z-Achse theoretisch minimale Verfahrwege von 0,0025 mm realisiert werden. Abbildung 34 zeigt den entwickelten und auf dem Werkzeugsystem aufgespannten Einstellmechanismus.



Abbildung 34: Entwickelte Positioniereinheit

Neben der eigentlichen Auslegung der Positioniereinheit ist deren Ankopplung an das Werkzeugsystem möglichst einfach zu gestalten. Um eine schnelle Montage bzw. Demontage vor bzw. nach dem Einstellvorgang zu ermöglichen, wurde ein System ent-

wickelt, das eine hohe Genauigkeit durch entsprechende Passungen bietet und zusätzlich über Spanneinheiten verfügt, die ein schnelles Lösen und Spannen der Positioniereinheit erlauben. Die Kopplung dieser mit dem Bowdenzugsystem der Blenden des Spannmechanismus kann bei dem Konzept über das Einhaken und Spannen des jeweiligen Bowdenzugs in den Spindelläufer bzw. die Mantelfixierung der x- und y-Achse erfolgen. Damit ist gewährleistet, dass die Blenden des Spannmechanismus parallel zur Einstellnadel verfahren und somit das gezielte Spannen und Entspannen der einzustellenden Nadeln über diese Kopplung ermöglicht wird.

Ergänzend zur mechanischen Ankopplung der Positioniereinheit an das Werkzeugsystem muss eine elektrische Anbindung an den Ansteuer-PC sowie die entsprechende Stromversorgung für die Positioniereinheit und den Spannmechanismus vorgesehen werden. Daher beschreibt der folgende Unterabschnitt, aus welchen Komponenten die Steuereinheit auf Hardwareseite gestaltet ist und über welche Schnittstellen sowohl die Ankopplung an die Software als auch an die Positioniereinheit realisiert wird.

### 5.3.4 Hardware-Steuereinheit

Das noch fehlende Bindeglied zur Realisierung einer geschlossenen CAx-Kette ist im Schaltschrank zu sehen. Diese Hardware-Steuereinheit beinhaltet die elektrische Versorgung der einzelnen Komponenten (Motoren, Messsysteme, Ventile) und die Schnittstellen der Wegmesssysteme sowie der Motoren mit der Ansteuersoftware. Ein Schwerpunkt ist dabei die Ansteuerung der Schrittmotoren. Da es kommerziell erhältliche Schrittmotorsteuerkarten gibt, soll hier auf eine genaue Beschreibung des verwendeten Schaltungsaufbaus verzichtet und lediglich die prinzipielle Ansteuerung eines Schrittmotors dargestellt sowie dessen Anbindung an die Steuersoftware aufgezeigt werden.

Der Schrittmotor überträgt elektrische Signale in präzise mechanische Bewegungen, wobei jeder elektrische Impuls einen spezifischen Rotationswinkel des Motors erzeugt. Durch digitale Impulse können somit genaue Winkelwerte abgefahren werden. Dabei wird ein elektrisches Magnetfeld in den Spulen des Stators erzeugt, das über eine gezielte Umkehrung des Stromflusses, d. h. in einer definierten Reihenfolge, die Polarität ändert. Diesem rotierenden Statorfeld folgt der gezahnte Permanentmagnet des Rotors. Die Ansteuerkarten der Hardware-Steuereinheit initiieren dabei das rotierende Statorfeld.

Neben der Ankopplung der Schrittmotoren an die Ansteuerkarten muss zusätzlich die für die Motoren notwendige Spannungs- bzw. Stromversorgung realisiert werden. Ein im Schaltschrank integriertes Netzteil ist daher mit den Ansteuerkarten verbunden.

Durch einen in den Ansteuerkarten enthaltenen Mikrocontroller (z. B. L298 oder L297) werden indirekt die Spulen der Motoren entsprechend ihrer Reihenfolge bestromt. Das Eingangssignal zum Ändern des momentanen Bestromungszustands erhält die Ansteuerkarte aus dem Steuer-PC über den LPT-Port. Auf diesen Port schreibt das Programm *Software-Zusatzoptionen* die für die jeweiligen Motoren relevanten Daten-Bits. Jeder Motor kann über zwei mit der Ansteuerkarte verbundene Datenleitungen gezielt verfahren werden. Die Ansteuerkarten interpretieren dazu auf der einen Datenleitung jeden Wechsel des Bits vom Wert 0 auf den Wert 1 als Signal zum Rotieren des jeweiligen Motors um einen Schritt. Die zweite Datenleitung dient dabei als Drehrichtungsgeber. Setzt das Programm *Software-Zusatzoptionen* dieses Bit auf den Wert „1“, so verfährt der Motor beispielsweise im Uhrzeigersinn, wohingegen beim Wert „0“ der Motor gegen den Uhrzeigersinn verfährt. Mit diesen beiden Datenleitungen kann jeder Motor gezielt angesteuert werden. Insgesamt sind für die Motorsteuerung demnach 6 Datenleitungen notwendig.

Neben der Ansteuerung der Schrittmotoren sind parallel dazu die pneumatischen Muskeln während des Einstellvorgangs zu betätigen. Dazu werden die Ventile jedes Muskels über zwei Relaiskarten geschaltet. Diese Karten bestromen und schalten die Ventile. Ebenfalls über den LPT-Port des Steuer-PC kann pro Ventil ein Bit gesetzt werden, das ein Relais über eine Sekundärspannung öffnet oder schließt. Das jeweilige Ventil schaltet und spannt oder entspannt damit den pneumatischen Muskel. Sowohl das Netzteil für die Sekundärspannungen der Relais als auch die Stromversorgung der Ventile ist im Schaltschrank integriert.

Die komplette Anbindung der jeweiligen Ansteuereinheiten des Schaltschranks mit dem Steuer-PC kann folglich mit 8 Datenleitungen ermöglicht werden. Für die Realisierung der Regelung des Einstellmechanismus ist allerdings eine weitere Schnittstelle zum Steuer-PC bzw. zum Programm *Software-Zusatzoptionen* vorgesehen. Hier findet der so genannte USB-Port des Steuer-PC Einsatz. Die drei Wegmesssysteme der Positionierseinheit sind direkt mit einem Multifunktions-Datenerfassungsmodul der Firma *National Instruments Germany GmbH, München* verbunden. Sowohl die Spannungsversorgung der Wegmesssysteme als auch die Messdatenerfassung ist über dieses Modul möglich. Über den USB-Port liest das Programm *Software-Zusatzoptionen* unter Verwendung von Bibliotheken die entsprechenden Spannungsdaten der Sensoren aus. Diese Werte rechnet das Programm *Software-Standardoptionen* in korrelierende Positionsdaten um. Die genaue Position der Einstellnadel kann daraufhin mit der Sollposition aus der Koordinatenliste verglichen und ein gegebenenfalls notwendiges Regeln über die bereits beschriebene Ansteuerkette durchgeführt werden.

Kapitel 5 stellt zusammenfassend alle notwendigen Komponenten des in dieser Arbeit entwickelten wiederverwendbaren, formflexiblen Werkzeugsystems dar. Die Einsatzfähigkeit dieses Konzepts beim Spritzgießen von Kleinserien und die bereits angedeuteten Varianten im Hinblick auf die Reduktion der Nadelrasterung werden daher detailliert im nächsten Kapitel betrachtet.

## **6 Anwendungsszenarien und Erprobung des formflexiblen Spritzgießwerkzeugs**

### **6.1 Notwendigkeit der experimentellen Verifikation**

Die in Abschnitt 1.4 definierte Zielsetzung der Entwicklung eines wiederverwendbaren, formflexiblen Spritzgießwerkzeugs kann nur als erfüllt gelten, wenn das realisierte Werkzeugsystem sich im praktischen Einsatz bewährt und für industrielle Aufgaben zur Verfügung steht. Daher ist eine experimentelle Verifikation unabdingbar. Unter Verwendung von festzulegenden Anwendungsszenarien (siehe Abschnitt 6.2) und auf Basis einer beispielhaften Produktgeometrie (siehe Abschnitt 6.3) kann durch den Versuch gezeigt werden, dass das entwickelte Werkzeugsystem eine technisch mögliche Alternative zum konventionellen Prototypenwerkzeugbau ist. Um diese Anwendungsszenarien zu bilden, werden die bereits angesprochenen Strategien zur Reduktion der Nadelrasterung zugrunde gelegt (siehe Unterabschnitt 5.3.2). Auf Basis dieser Szenarien wird mit dem Versuch nicht nur überprüft, ob das realisierte Werkzeugkonzept einsetzbar ist, sondern es kann auch dokumentiert werden, welche Prozessgrößen (z. B. Einspritzdruck, Einspritztemperatur oder Nachdruck) bei den einzelnen Anwendungsszenarien maximal bzw. minimal vorherrschen dürfen. Um diese für den Anwender relevanten Spritzparameter pro Anwendungsszenarium zu erarbeiten und zu dokumentieren, beschreibt Unterabschnitt 6.4 das Vorgehen bei der statistischen Versuchsplanung und -durchführung. Dabei werden systematisch die relevanten Parameter so lange variiert, bis ein Fehlerbild entsteht und damit der Extremwert für den variierten Prozessparameter gefunden ist. Dieses Kapitel legt somit fest, welche Anwendungsszenarien in der Praxis des Spritzgießens Relevanz haben und im folgenden Kapitel 7 hinsichtlich eines wirtschaftlichen Einsatzes detailliert betrachtet sowie mit einer Auswahl der gängigsten konventionellen Fertigungsverfahren im Prototypenwerkzeugbau verglichen werden müssen.

## 6.2 Definition von Anwendungsszenarien

### 6.2.1 Abfräsen von Nadelköpfen zur Reduktion der Nadelrasterung am Spritzling

Unter Anwendungsszenarien werden in diesem Kapitel die einzelnen Strategien zur Reduktion der Nadelrasterung am Spritzgießbauteil verstanden (siehe Unterabschnitt 5.2.4). Beim ersten Anwendungsszenarium dient das mit groben Nadeln bestückte Werkzeug als Basis. Die Kantenlänge der im Querschnitt quadratischen Nadeln beträgt dabei 2 mm. Nach dem Einstellen der mit einem Aufmaß versehenen Geometrie über den automatischen Einstellmechanismus werden die Nadeln durch HSC-Fräsen bearbeitet, um so eine glatte Oberfläche der Kavität ohne Nadelrasterung zu erzielen.

Der Vorteil dieses Szenariums liegt darin, dass die Oberfläche auf Grund des finalen Schlichtens der Nadeln sehr glatt und vergleichbar mit den Oberflächen eines mit konventionellen Spritzgießwerkzeugen gefertigten Bauteils ist, so dass das hergestellte Prototypenwerkzeug eine realistische Aussage über Flächendesign und Oberflächenqualität des Spritzlings oder das Füllverhalten des Werkzeugs zulässt. Trotz des zusätzlichen Fräsprozesses ist, vor dem Hintergrund der möglichen Wiederverwendbarkeit und einer im Vergleich zum konventionellen Prototypenwerkzeugbau verkürzten Herstellzeit, das Potenzial des formflexiblen Werkzeugsystems erkennbar. Durch die Konturnähe der eingestellten Nadeln ist das Zerspanvolumen bei dem finalisierenden Fräsprozess im Vergleich zum „Spanen aus dem Vollen“ sehr gering.

Ein Nachteil dieses Szenariums ist jedoch der Verlust der Wiederverwendbarkeit und der damit theoretisch unbegrenzten Lebensdauer der Nadeln. Die begrenzte Lebensdauer beträgt für das Szenarium je nach Geometrie und Zerspanvolumen bis maximal 10 aufeinanderfolgende, unterschiedliche Einstellungen. Zusätzlich müssen die Nadeln nach der Fertigung der Kunststoffbauteile in ihre Ausgangsposition zurückgefahren und plan gefräst werden, was einen zusätzlichen Fertigungsschritt und damit Kosten- und Zeitaufwand bedeutet. Nachteilig an diesem Konzept ist auch der erhöhte CAD/CAM-Aufwand, der zur Nachbearbeitung notwendig wird. Jedoch ist dieser im Vergleich zu einem konventionell zu fertigenden Werkzeug geringer, da lediglich die Daten für den finalisierenden Schlichtprozess generiert werden müssen und die vorgeschalteten Schrubb- und Vorschlichtprozesse durch die konturnah eingestellten Nadeln entfallen können.

## 6.2.2 Verwendung von formgebenden Zwischenschalen

Als Basis dient bei diesem Szenarium das Werkzeugsystem, das ebenfalls mit den in Unterabschnitt 6.2.1 beschriebenen groben Nadeln bestückt ist. Durch das Einstellen der Nadeln wird eine Supportgeometrie justiert, die die mechanische Unterstützung für die bereits erwähnte Zwischenschale darstellt (siehe Unterabschnitt 5.2.4). Der Formstoff (z. B. ABS) wird in die Kavität der Zwischenschale eingespritzt. Durch den Einsatz einer Zwischenschale ist es möglich, die Oberflächenqualität der Spritzlinge je nach Herstellverfahren der Schalengeometrie zu steigern. Um den Konstruktionsaufwand der Zwischenschalen zu minimieren, ermöglichen die in Unterabschnitt 5.3.2 beschriebenen *Software-Zusatzausgaben* das automatische Überführen der Schalengeometrie in ein für generative Fertigungsanlagen verarbeitbares Format (siehe Abbildung 35). Der Bauprozess der Schalen kann auf Basis dieser erzeugten Daten begonnen werden. Als Fertigungsverfahren stehen die drei Rapid-Technologien Stereolithographie, direkte Metall verarbeitende Verfahren und indirekte Metall verarbeitende Verfahren zur Verfügung (siehe Abschnitt 2.1), wobei bei den Zwischenschalen aus Stereolithographie die beste Oberflächenqualität ohne zusätzliche Nachbearbeitung erzielt wurde.

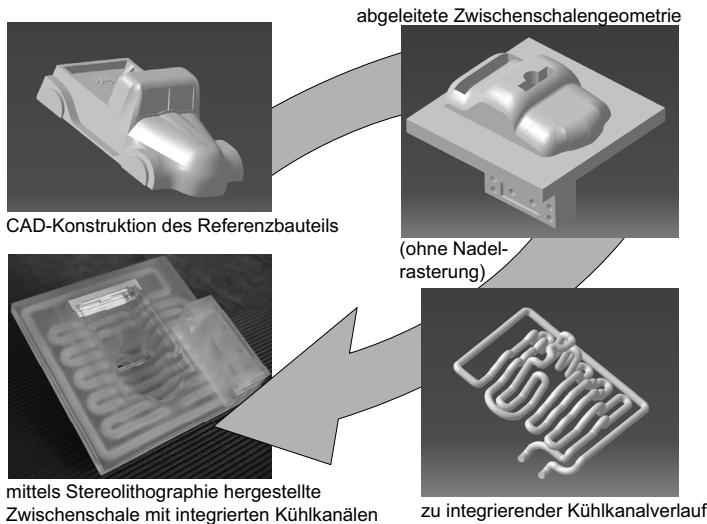


Abbildung 35: Integration eines Kühlkanals in eine Zwischenschale

Da jedoch bei diesem Verfahren Epoxidharz als Zwischenschalenwerkstoff verwendet wird, dessen Temperaturbeständigkeit im Vergleich zu metallischen Schalen sehr gering

ist, muss in die Stereolithographie-Schale ein Kühlsystem integriert werden, damit diese beim Herstellen von Kleinserien nicht zu schmelzen beginnt.

Die Temperaturbeständigkeit der Schalen, die durch Metall verarbeitende Verfahren gefertigt werden, ist so hoch, dass auf ein eigenes Kühlsystem der Schalen verzichtet werden kann. Die Lebensdauer der Nadeln ist bei der Verwendung von Zwischenschalen theoretisch unbegrenzt.

### 6.2.3 Direkte Verwendung der Nadelköpfe zur Formgebung

Beim dritten zu verifizierenden Szenarium wird das Werkzeug mit feinen Nadeln, wie es bei der ursprünglichen Auslegung des Werkzeugsystems (siehe Abschnitt 5.1) angedacht war, bestückt. Der quadratische Querschnitt der Nadeln weist bei diesem Anwendungsszenarium jeweils eine Kantenlänge von 0,4 mm auf. Der Formstoff wird direkt in die Nadelkavität eingespritzt. Da die Nadeln vor dem Einspritzen nicht bearbeitet und auch keine Zwischenschalen verwendet werden, bildet sich auf der Oberfläche des Bauteils eine Rasterung entsprechend den Querschnitten und Positionen der Nadeln ab.

Dieses Szenarium ist sinnvoll bzw. wirtschaftlich einsetzbar, wenn die prinzipielle Herstellbarkeit eines Produkts zu verifizieren ist und der Fokus nicht auf einer glatten, fehlerfreien Oberfläche liegt. Beispielsweise steht die Oberflächenqualität des Bauteils bei der Verifikation eines Werkzeugs bzw. eines Angussystems nicht im Vordergrund. Aber auch eine kostengünstige Herstellung eines bzw. weniger Prototypenbauteile ist mit diesem Szenarium durchführbar. Im Anschluss an das Herstellen der Bauteile über das formflexible Werkzeugsystem sieht das vorgestellte Szenarium das Nacharbeiten jedes einzelnen Bauteils vor. Somit entstehen Kunststoffbauteile mit ausreichender Oberflächenqualität und Festigkeit, die die Eigenschaften (z. B. Festigkeit, E-Modul, etc.) eines mittels Spritzgießens hergestellten Serienbauteils besitzen. Die Kavität kann in diesem Szenarium sehr schnell über den automatischen Einstellmechanismus eingeprägt werden. Im Fall einer mechanischen Nachbearbeitung ist es über die *Software-Zusatzeoptionen* möglich, das Bauteil und darauf basierend die einzuprägende Werkzeugkavität 3-dimensional zu skalieren. Damit wird das nötige Aufmaß für die Nachbearbeitung am Spritzling vorgehalten.

Um das Ziel der experimentellen Verifikation der Anwendungsszenarien zu erreichen und dabei eine für jedes Szenarium relevante Parameterbandbreite zu definieren, ist es essenziell, eine einheitliche Referenzgeometrie zu verwenden. Nur so ist ein Vergleich der Szenarien untereinander und eine allgemeingültige, von der Geometrie unabhängige

Aussage bezüglich der maximal möglichen Spritzparameter pro Szenarium zulässig. Der folgende Abschnitt beschreibt die Eigenschaften dieser Geometrie.

## 6.3 Definition der Referenzgeometrie

### 6.3.1 Anforderungen an das Referenzbauteil aus Sicht des Spritzgießens

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Versuchsreihe auf andere Geometrien zu gewährleisten, gilt es in einem ersten Schritt festzulegen, welche Merkmale ein typisches Spritzgießbauteil aufweisen muss. Die Maximalwerte für Länge, Breite und Höhe des Bauteils ergeben sich direkt aus dem zur Verfügung stehenden Abformbereich des entwickelten Werkzeugsystems, dessen maximales Kavitätsvolumen 100 mm x 100 mm x 50 mm pro Werkzeughälfte beträgt (siehe Abschnitt 5.1 und Unterabschnitt 5.2.1). Weitere typische Geometriemeerkmale bei der Herstellung von Spritzgießbauteilen werden im Folgenden beschrieben.

Wie bereits erwähnt, sind Hinterschneidungen Geometriemeerkmale eines Bauteils, die beim Gießen den Einsatz von Einlegekernen oder Schiebern im Werkzeug notwendig machen (siehe Unterabschnitt 5.2.3). Würde auf diese Elemente des Werkzeugs verzichtet werden, wäre das Bauteil nicht entformbar oder Hinterschneidungen nicht herstellbar. Ein weiteres markantes Geometriemeerkmale eines Kunststoffbauteils sind so genannte Rippen. Sie dienen dazu, das Bauteil mit minimalem Materialeinsatz zu verstetigen. Rippen sind in der Regel dünnwandige Stege, die Zug- oder Druckspannungen im Bauteil aufnehmen. Die meisten Spritzgießbauteile unterliegen dem Anspruch, ergonomisch geformt zu sein bzw. ein ansprechendes Erscheinungsbild zu haben. Dies ist darin begründet, dass Spritzgießbauteile häufig Bedienelemente darstellen (z. B. Fernbedienungen oder Schalter), als Gehäuse zum Einsatz kommen (z. B. Geräteträger) oder im Bereich der Kinderspielzeuge weit verbreitet sind. Diese Bauteile weisen einen hohen Grad an Freiformflächen auf, die im Werkzeug realisiert werden müssen. Freiformflächen sind Oberflächen eines Volumens, die nicht durch einfaches räumliches Verziehen eines Profils entlang einer Kurve beschrieben werden können, also weder eben sind (z. B. Quader), noch aus parallelen Geraden (z. B. Pyramide), Kreisen (z. B. Zylinder) oder Kurven aufgebaut werden können (REMBOLD 2007). Ein weiterer wesentlicher Aspekt eines Spritzgießwerkzeugs sind Entformungsschrägen, die dazu dienen, das Auswerfen des Bauteils zu unterstützen, da die Reibungskräfte beim Entformen dadurch nur noch unmittelbar bei Entformungsbeginn wirken und das Bau-

teil, wenn es ausgeworfen wird, keinen Kontakt mehr zur Werkzeugwand hat. Im Allgemeinen werden diese Schrägen durch eine 2°- bis 5°-Neigung einer rechtwinklig zur Trennebene des Werkzeugs stehenden Fläche realisiert (MENGES & MOHREN 1991). Diese gilt es ebenfalls in das Referenzbauteil zu integrieren. Bei der gussgerechten Konstruktion eines Bauteils sind zusätzlich Radien vorzusehen, die beim Füllen der Form das Fließverhalten des Formstoffs unterstützen. Je größer der Radius, desto gleichmäßiger fließt der Werkstoff ohne Turbulenzen. Je scharfkantiger eine Ecke ist, desto turbulenter ist die Strömung des Formstoffs an dieser Stelle, was zu Gasblasen und Porosität im Bauteil führen kann. Zusätzlich bewirken Radien einen sanften Übergang zwischen Wandstärken, was eine Reduktion der Bauteileigenspannungen bewirkt und damit den Verzug nach dem Gießen vermeidet. Die Eigenspannungen entstehen dadurch, dass bestimmte Bereiche des Bauteils beim Aushärten sehr viel früher erstarren als direkt angrenzende. Dies führt dazu, dass sich der später aushärtende Teil des Bauteils zusammenzieht und der bereits verfestigte Bereich dadurch unter Spannungen gesetzt wird (JOHANNABER & MICHAELI 2004). Verzug ist dabei die Verformung eines Bauteils auf Grund seiner Eigenspannungen (DIN 17014). Weitere typische Merkmale eines Spritzgießbauteils sind filigrane Elemente und Details. Filigrane Elemente können dabei dünnwandige Geometrien sein, während Details zum Beispiel in Form eines Firmenlogos oder Schriftzugs an einem Bauteil vorhanden sein können. Die folgende Aufzählung fasst die zu realisierenden Anforderungen zusammen:

- Abmaße
- Hinterschneidungen
- Rippen
- Entformungsschrägen
- Radien
- filigrane Elemente
- Details

### 6.3.2 Konstruktive Ausgestaltung des Referenzbauteils

Aufbauend auf den definierten Anforderungen in Unterabschnitt 6.3.1 wird im Folgenden ein konkretes Benchmarkbauteil vorgestellt. In Form eines abstrahierten Modellautos mit einer maximalen Länge von 87 mm, einer maximalen Breite von 52 mm und einer Höhe von 30 mm entspricht dieses Modell den vorherrschenden Randbedingungen hinsichtlich der Geometrieabmaße.

Der Abstraktionsgrad bei diesem Beispiel ist bewusst hoch gehalten, um bei der Versuchsdurchführung bzw. späteren -auswertung die relevanten Anforderungen ohne

gegenseitige Beeinflussung bewerten und entsprechende Fehlerbilder bzw. Einschränkungen des Werkzeugsystems einfach auf deren Ursache zurückführen zu können. Eine komplexe, hoch detaillierte Geometrie erschwert diese Auswertung unnötig und beinhaltet keine Vorteile im Hinblick auf die hier zu Grunde liegende Motivation zur Versuchsdurchführung (siehe Abbildung 36).

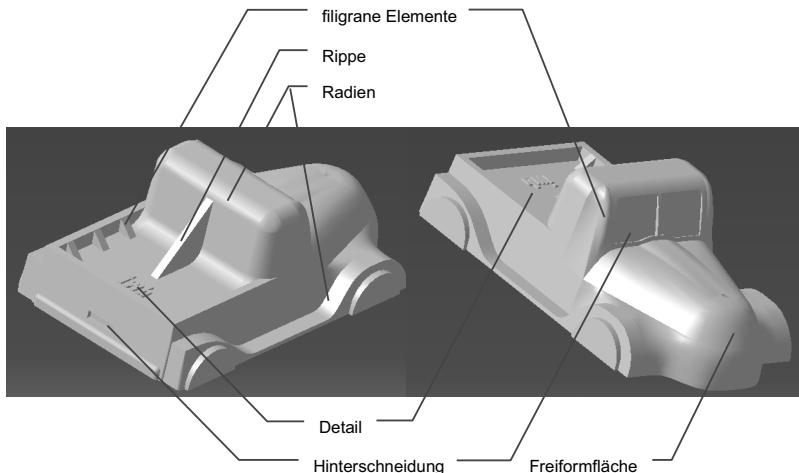


Abbildung 36: Verwendetes Benchmarkbauteil mit stark vereinfachter Geometrie für die Qualifizierung des formflexiblen Werkzeugsystems

Damit dient diese Geometrie zur Ermittlung der Möglichkeiten und Einschränkungen des entwickelten Werkzeugsystems bzw. der unterschiedlichen Anwendungsszenarien. Die Anforderung „Hinterschneidungen“ wird hier durch die Tasche für das Nummernschild auf der Rückseite des Fahrzeugs und die Frontscheiben erfüllt (siehe Abbildung 36). Um diese Hinterschnitte zu realisieren, ist es notwendig, konventionelle Einlegekerne in das Werkzeugsystem zu integrieren. Die Positionierung des Einlegekerns im Werkzeug geschieht direkt durch die Nadeln des Werkzeugsystems. Die Umsetzung aller weiteren definierten Anforderungen gibt Abbildung 36 wieder. Bei der Versuchsauswertung sind die leicht hervorstehenden seitlichen Abschlüsse der Windschutzscheibe, die neben den kleinen Rippen auf der Ladefläche filigrane Elemente darstellen, besonders zu beachten.

## 6.4 Experimentelle Verifikation

### 6.4.1 Versuchsplanung

Im Rahmen der Neu- und Weiterentwicklung von Produkten und Fertigungsprozessen sind Applikationsuntersuchungen unabdingbar, um die gewünschten Eigenschaften und Ziele zu überprüfen und gegebenenfalls zu verbessern. Um diese Versuche mit einem möglichst geringen Aufwand und trotzdem reproduzierbar und aussagekräftig zu gestalten, wird eine Versuchsplanung (auch DoE = Design of Experiments genannt) eingesetzt. Hierbei werden auch statistische Methoden angewendet, um die Versuchsergebnisse auszuwerten. Aufbauend auf den Methoden der klassischen Versuchsplanung hat Taguchi eine Strategie entwickelt, um so genannte robuste Produkte bzw. Prozesse zu erreichen. Robustheit heißt hier, dass eine möglichst geringe Abhängigkeit des Ergebnisses von Störgrößen erreicht wird (KLEPPMANN 2006). Taguchi-Versuchspläne (auch Versuchspläne mit orthogonalen Feldern genannt) kommen normalerweise mit einem Bruchteil der bei faktoriellen Versuchsplänen benötigten Kombinationen aus. Durch die Balancierung, also die gleichmäßige Gewichtung der Faktorstufen, kann jeder Faktor unabhängig von den anderen Faktoren untersucht werden. Ein Versuchsplan mit 4 Faktoren und jeweils 3 Stufen kommt mit beispielsweise nur 9 Versuchen aus (KROTTMAIER 2001). Für das hier beschriebene formflexible Spritzgießwerkzeug können mit diesem Vorgehen sowohl die prinzipielle Anwendbarkeit der einzelnen Anwendungsszenarien gezeigt als auch die optimalen Betriebsparameter für die einzelnen Szenarien ermittelt werden. Dafür werden entsprechende Einflussgrößen (Faktoren) und Zielgrößen (Antworten) gewählt. Passend zu Aufgabenstellung, Anzahl der Faktoren, Stufen pro Faktor und gewünschter Genauigkeit kann daraufhin ein Versuchsplan ausgewählt werden. Anhand dieses Plans werden die Versuche durchgeführt und die Ergebnisse der Zielgrößen erfasst. Die so gewonnenen Daten sind statistisch auszuwerten. Anhand der Ergebnisse können Wechselwirkungen zwischen Faktoren erkannt und einzelne Faktoren optimiert werden, was zu einem verbesserten Prozess führt.

Die Auswahl der drei Faktoren Spritzdruck, Nachdruck und Einspritztemperatur mit zwei Faktorenstufen zwischen den jeweiligen Minimal- und Maximalwerten (insgesamt 4 Faktorstufen) führt zu einer überschaubaren, aber ausreichenden Anzahl an Einzelversuchen. Als Zielgrößen dienen die Bauteilqualität, die Maßhaltigkeit sowie die Detailschärfe des Spritzlings.

Auf Grund der Anzahl an Faktoren und Stufen (3 Faktoren mit 4 Stufen) ist ein Versuchsplan nach der Taguchi-Methode ausgewählt worden, da dieser lediglich aus 16 Einzelversuchen besteht. Im Vergleich dazu würde ein voll faktorieller Versuchsplan  $4^3 = 64$  Einzelversuche benötigen, was einen immensen Versuchsaufwand zur Folge hätte. Darüber hinaus eignet sich ein Versuchsplan nach Taguchi dazu, einen Prozess zu optimieren, der möglichst wenig von Schwankungen der Prozessparameter und von Veränderungen der Versuchsbedingungen abhängt (KLEPPMANN 2006). Die Kombination der Faktorstufen ist daher eindeutig festgelegt und in Tabelle 6 dargestellt.

Nr.	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Nr.	Spritzdruck [bar]	Nachdruck [bar]	Temperatur [°C]
1	1	1	1	1	300	100	190
2	1	2	2	2	300	250	210
3	1	3	3	3	300	400	230
4	1	4	4	4	300	550	250
5	2	1	2	5	600	100	210
6	2	2	1	6	600	250	190
7	2	3	4	7	600	400	250
8	2	4	3	8	600	550	230
9	3	1	3	9	900	100	230
10	3	2	4	10	900	250	250
11	3	3	1	11	900	400	190
12	3	4	2	12	900	550	210
13	4	1	4	13	1200	100	250
14	4	2	3	14	1200	250	230
15	4	3	2	15	1200	400	210
16	4	4	1	16	1200	550	190

*Tabelle 6: Versuchsplan nach Taguchi für die Untersuchung der Anwendungsszenarien: Faktorstufen (links) und (Zahlenwerte) rechts*

Um zu verhindern, dass Trends oder Veränderungen der Versuchsbedingungen die Ergebnisse beeinflussen, wird üblicherweise die Versuchsreihenfolge zufällig bestimmt (randomisiert). In diesem Fall wurde darauf verzichtet und die Versuchsliste nach Temperaturgruppen sortiert, da ein ständiges Aufheizen und Abkühlen der Spritzgießanlage einen reibungslosen Versuchsablauf gestört hätte und die Versuchszeit unverhältnismäßig steigen lassen hätte. Der Ablauf aller Versuchsreihen ist damit definiert (siehe Tabelle 7).

Reihenfolge	Nr.	Spritzdruck [bar]	Nachdruck [bar]	Temperatur [°C]
1	3	300	400	230
2	9	900	100	230
3	8	600	550	230
4	14	1200	250	230
5	2	300	250	210
6	5	600	100	210
7	12	900	550	210
8	15	1200	400	210
9	1	300	100	190
10	6	600	250	190
11	11	900	400	190
12	16	1200	550	190
13	13	1200	100	250
14	10	900	250	250
15	7	600	400	250
16	4	300	550	250

Tabelle 7: Verwendeter Versuchsplan für die Qualifizierung des formflexiblen Werkzeugs

Im folgenden Unterabschnitt wird am Beispiel des Anwendungsszenarios „Abfräsen von Nadelköpfen zur Reduktion der Nadelrasterung am Spritzling“ exemplarisch die Versuchsdurchführung und Auswertung beschrieben. Alle weiteren Anwendungsszenarien werden lediglich durch eine zusammenfassende Auswertung dargestellt.

#### 6.4.2 Versuchsdurchführung und -auswertung

Die Versuche werden nach dem entwickelten Versuchsplan systematisch durchgeführt und die Ergebnisse (Zielgrößen) darin eingetragen. Für die Bewertung der Bauteilqualität sind vier Fehlerbilder definiert, bei deren Vorkommen jeweils ein Notenschritt abgezogen wird. Sind keine der Fehlerbilder vorhanden, kann bei der Zielgröße Qualität die Note 1 vergeben werden. Die Fehlerbilder definieren sich im Vorhandensein von Einfallstellen, Oberflächenfehlern, durch das unvollständige Füllen der Form sowie durch das Eindringen des Kunststoffs in Nadelzwischenräume. Sollte der Kunststoff beim Spritzgießen zwischen die Nadeln gelangen, so ist der Notenabzug entsprechend der Eindringtiefe zu definieren. Bei einer geringen Eindringtiefe ist ein Notenabzug um einen Notenschritt vorgesehen, bei einer hohen Eindringtiefe verschlechtert sich die Bewertung um zwei Notenpunkte. In diesem Fehlerbild ist ein werkzeugseitiges Problem zu sehen, das nicht von der Spritzgießmaschine ausgleichbar ist, wie es beispielsweise bei einem zu geringen Füllvolumen der Fall wäre. Die Beseitigung eines

geringen Füllvolumens ist maschinenseitig beispielsweise durch einen längeren Umschaltweg möglich. Die höhere Gewichtung des Fehlerbildes „Eindringtiefe des Spritzmaterials“ im Verhältnis zu den anderen Fehlerbildern ist daher gerechtfertigt. Die Zielgröße „Detailschärfe“ gibt die Abbildung von Rundungen, Kanten und filigranen Elementen wieder. Hingegen wird der Grad der Maßhaltigkeit damit bewertet, wie weit sich die Nadeln durch den Spritz- bzw. Nachdruck verschieben, was auf einer Notenskala von 1 (Note<sub>min</sub>) bis 6 (Note<sub>max</sub>) zu normieren ist (siehe Formel 8, Versch.<sub>min</sub> und Versch.<sub>max</sub> gemessen). Bei einer unvollständigen Formfüllung wird keine Maßhaltigkeit erreicht und die Note 6 vergeben.

$$Note = \frac{Verschiebung - Versch.\min}{Versch.\max - Versch.\min} \cdot (Note_{\max} - Note_{\min}) + Note_{\min} \quad (8)$$

Die folgende Tabelle gibt am Beispiel des Versuchs beim Anwendungsszenario „Abfräsen von Nadelköpfen zur Reduktion der Nadelrasterung am Spritzling“ die Ergebnisse bzw. die Bewertungen der Spritzgießbauteile wieder.

Reihenfolge	Zielgröße 2					Zielgröße 3					
	Zielgröße 1				Legende: J = ja N = nein	Zielgröße 3					
	Faktoren					Maßhaltigkeit	Detailschärfe	Einfallstellen	Oberflächenfehler	Formfüllung	Eindringtiefe
1	3	300	400	230	1,0	3,0	N	N	J	stark	3,0
2	9	900	100	230	2,7	3,0	N	N	J	stark	3,0
3	8	600	550	230	5,0	2,0	N	N	J	stark	3,0
4	14	1200	250	230	1,3	4,0	N	J	J	keine	2,0
5	2	300	250	210	6,0	6,0	J	J	N	stark	6,0
6	5	600	100	210	1,1	3,0	N	J	J	gering	3,0
7	12	900	550	210	3,3	3,0	N	J	J	gering	3,0
8	15	1200	400	210	1,7	3,0	N	J	J	gering	3,0
9	1	300	100	190	6,0	6,0	J	J	N	stark	6,0
10	6	600	250	190	1,0	4,0	N	J	J	Keine	2,0
11	11	900	400	190	1,0	5,0	N	J	J	keine	2,0
12	16	1200	550	190	1,0	3,0	N	J	J	gering	3,0
13	13	1200	100	250	1,0	3,0	N	J	J	gering	3,0
14	10	900	250	250	1,1	2,0	N	N	J	gering	2,0
15	7	600	400	250	1,3	1,0	N	N	J	stark	3,0
16	4	300	550	250	4,0	1,0	N	J	J	stark	4,0

Tabelle 8: Versuchsplan mit Bewertung der Ergebnisse des Anwendungsszenarios „Abfräsen von Nadelköpfen zur Reduktion der Nadelrasterung am Spritzling“

Anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse und der Auswertung dieser können Zusammenhänge zwischen zwei oder mehreren Faktoren visualisiert und die optimalen Betriebsparameter für das jeweilige Anwendungsszenario identifiziert werden. Dazu werden in einem ersten Schritt die Mittelwerte der jeweiligen Bewertungen gebildet. Um den Mittelwert für einen Faktor (Spritzdruck, Nachdruck, Temperatur) und eine Faktorstufe zu berechnen, werden sämtliche Bewertungen (Noten) aufsummiert, die für die jeweilige Stufe und den zugehörigen Faktor vergeben wurden und im Anschluss durch deren Gesamtanzahl dividiert:

$$\text{Mittelwert}(\text{Faktor, Stufe}) = \frac{1}{12} \cdot \sum_{z=1}^3 \left[ \sum_{i=1}^4 \text{Note}_{z,i}(\text{Faktor, Stufe}) \right] \quad (9)$$

mit: z = Zielgröße (Maßhaltigkeit, Detailschärfe, Bauteilualität)

i = Versuch auf der Stufe des jeweiligen Faktors

Faktor: Spritzdruck, Nachdruck, Temperatur

Stufe: definierte Werte der Faktoren (siehe Unterabschnitt 6.4.1)

Unter Stufe ist dabei eine Bündelung der Versuche mit gleichem Wert für einen Faktor zu verstehen. Alle berechneten Mittelwerte sind in Tabelle 9 aufgelistet. Das Delta gibt die Differenz zwischen dem Minimal- und dem Maximalwert der Mittelwerte an. Daraus ergibt sich der so genannte Rang, der dem Einfluss des Faktors auf das Spritzergebnis entspricht. Damit wird deutlich, dass eine Veränderung des Spritzdrucks den größten Effekt auf das Spritzergebnis (maximales Delta) bei dem hier untersuchten Anwendungsszenario hat. Die Nachdruckänderung beispielsweise weist den geringsten Einfluss auf (minimales Delta).

	Spritzdruck	Nachdruck	Temperatur
Stufe 1	4,333	3,400	3,333
Stufe 2	2,450	3,117	3,508
Stufe 3	2,592	2,333	2,750
Stufe 4	2,417	2,942	2,200
Delta	1,917	1,067	1,308
Rang	1	3	2

Tabelle 9: Antworttabelle der errechneten Mittelwerte

Abbildung 37 zeigt das Haupteffektediagramm der errechneten Mittelwerte. Dabei werden die Mittelwerte der Zielgrößen gebildet und über die Faktorstufen aufgetragen.

In diesem Anwendungsszenario zeigt sich, dass das beste Bauteilergebnis bei einem Spritzdruck von 1200 bar, einem Nachdruck von 400 bar und einer Spritztemperatur von 250 °C zu erzielen ist.

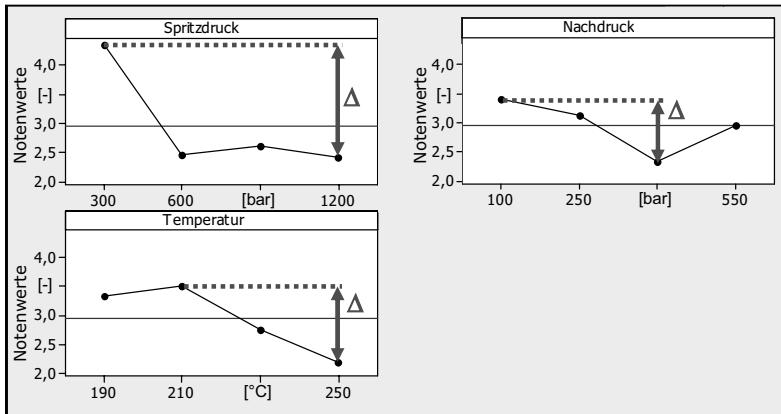


Abbildung 37: Haupteffektediagramm der Mittelwerte

Die Diagramme spiegeln darüber hinaus wider, dass die Spritzgießteile mit zunehmender Temperatur eine immer bessere Qualität aufweisen, diese sich allerdings ab einem Spritzdruck von 600 bar (bei gemittelten Notenwerten für die Temperatur und den Nachdruck) kaum noch ändert. Der Nachdruck hingegen besitzt ein Optimum bei 400 bar (bei gemittelten Notenwerten für die Temperatur und den Spritzdruck). Geringere, aber auch höhere Drücke verschlechtern das Ergebnis. Auch in diesen Diagrammen lässt sich der Rang, den die jeweiligen Faktoren einnehmen, über das eingetragene Delta ablesen.

Zusammenhänge von mehreren Faktoren lassen sich anschaulich in Wirkungsflächen-Diagrammen darstellen. Abbildung 38 zeigt beispielsweise den Einfluss von Spritzdruck und Nachdruck auf die Zielgrößen Detailschärfe, Maßhaltigkeit und Bauteilqualität bei gemitteltem Notenwert für die Temperatur.

Die in den Diagrammen eingezeichneten Extrempunkte stellen den jeweiligen optimalen Betriebspunkt im Hinblick auf die Faktoren und die Zielgrößen sowie das betrachtete Anwendungsszenario dar.

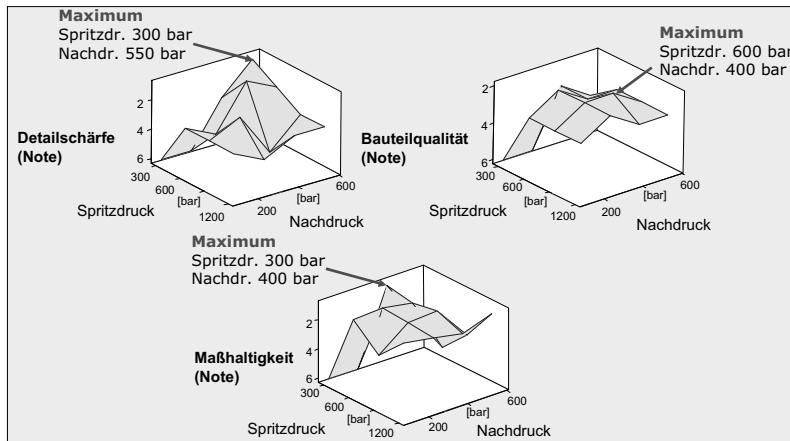


Abbildung 38: Auf Zielgrößen bezogene Wirkungsflächendiagramme

Durch die Auswertung der Fehlerbilder ist es möglich, die Grenzen des Anwendungsszenariums aufzuzeigen. So ist festzuhalten, dass ein Spritzdruck von 1200 bar allein kein Verschieben der Nadeln und damit Versagen des Werkzeugsystems verursacht. Vielmehr ist ein Nachdruck ab 550 bar als Ursache für eine Verschiebung des Nadelpaketes zu sehen. Die Grenze des hier beschriebenen Anwendungsszenariums ist daher bei einem Nachdruck von 550 bar erreicht. Da der Nachdruck je nach eingesetztem Material zwischen 30 % und 60 % des Spritzdrucks liegen sollte (JOHANNABER & MICHAELI 2004), ist eine Erhöhung des Spritzdrucks über die durch die Versuche bei diesem Anwendungsszenario gefundenen optimalen 1200 bar nicht sinnvoll.

Die im Detail dargestellte Vorgehensweise bei der Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung am Beispiel des Anwendungsszenariums „Abfräsen von Nadelköpfen zur Reduktion der Nadelrasterung am Spritzling“ lässt sich direkt auf die anderen in Abschnitt 6.2 definierten Anwendungsszenarien übertragen. Daher wird in diesem Rahmen auf eine ausführliche Darstellung der durchgeführten Versuche aller Szenarien verzichtet. Die folgende Tabelle 10 zeigt zusammenfassend die jeweils ermittelten optimalen Prozessparameter. Die definierten Zielgrößen und Fehlerbilder bleiben gleich.

Prozessparameter	Abfräsen von Nadelköpfen zur Formgebung (2 mm x 2 mm))	Verwendung von Zwischenschalen		Direkte Verwendung der Nadelköpfe zur Formgebung (0,4 mm x 0,4 mm)
		IMLS/DMLS	SLA	
Spritzdruck [bar]	1200	1800	1050	850
Nachdruck [bar]	400	650	350	320
Temperatur [°C]	250	280	210	250
Kunststoffgruppen (nach JOHANNABER & MICHAELI 2004):	Standardkunststoff	Ingenieurskunststoff/ Hochtemperatur-Kunststoff	Standardkunststoff	Standardkunststoff

Tabelle 10: Szenarienbasierte Ergebnisse der Versuchsreihen

Auf Basis der entwickelten Versuchsplanung und einer strukturierten Auswertung aller Versuche zeigt sich zum einen, welche Prozessparameter optimal einzusetzen sind, und zum anderen, wo sich die Prozessgrenzen der einzelnen Anwendungsszenarien befinden. Die technische Anwendbarkeit des entwickelten Werkzeugsystems ist somit dargestellt (siehe Abbildung 39).

Ergänzend zur Darstellung der technischen Einsetzbarkeit des formflexiblen Werkzeugs ist es notwendig, das entwickelte System hinsichtlich dessen Wirtschaftlichkeit gegenüber konkurrierenden Ansätzen des Prototypenwerkzeugbaus zu untersuchen. Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit dieser noch fehlenden Betrachtung und gibt darauf basierend eine zusammenfassende Einsatzempfehlung des Werkzeugsystems ab.

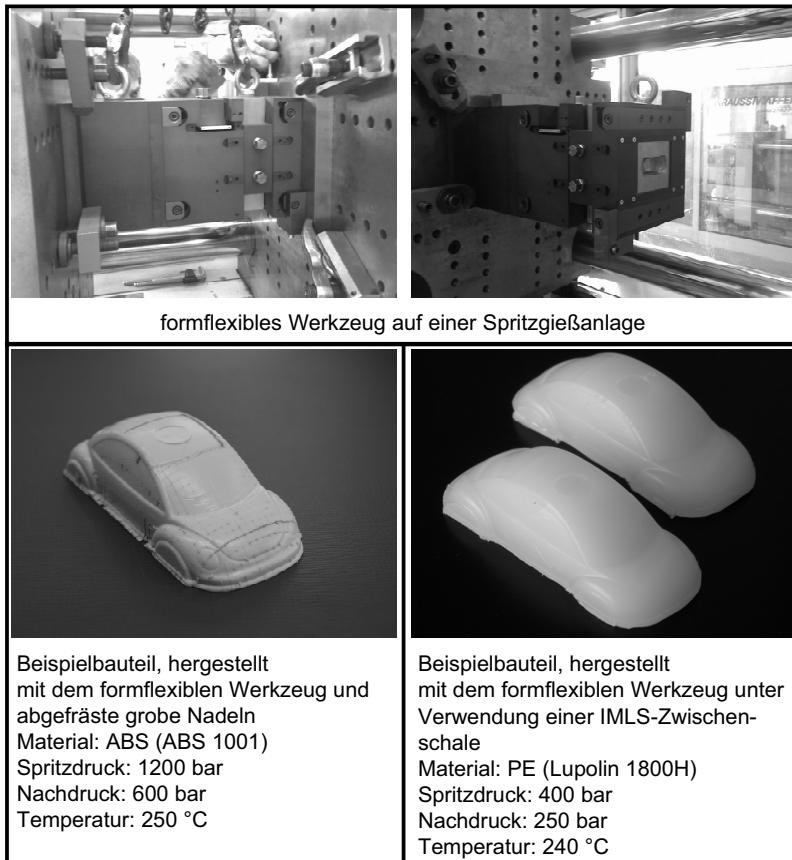


Abbildung 39: Anwendung des formflexiblen Werkzeugs

## 7 Wirtschaftliche Bewertung des formflexiblen Werkzeugs für das Spritzgießen

### 7.1 Vorgehensweise

Neben der rein technischen Einsetzbarkeit des entwickelten Werkzeugsystems ist zusätzlich eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchzuführen, die aufzeigt, dass verschiedene Anwendungen des formflexiblen Werkzeugsystems im Vergleich zu konventionellen Prototypenwerkzeugen konkurrenzfähig sind. Zusätzlich kann identifiziert werden, unter welchen Randbedingungen die jeweiligen Anwendungsszenarien aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten zum Einsatz kommen müssen. Um einen Vergleich zwischen verschiedenen Möglichkeiten des Prototypenwerkzeugbaus durchzuführen zu können, wird im Folgenden das in Kapitel 6 definierte Referenzbauteil betrachtet. Da dieses Bauteil im Hinblick auf eine möglichst hohe Anzahl repräsentativer Geometriemerkmale im Spritzgießen entwickelt wurde und diese direkt die Herstellkosten des Werkzeugs beeinflussen, ist dieses Vorgehen gerechtfertigt. Zusätzlich werden die in Abschnitt 6.2 genannten Anwendungsszenarien genutzt und durch Stückzahlengerüste sowie konventionelle Verfahren des Prototypenwerkzeugbaus ergänzt (siehe Abschnitt 7.2). Dabei finden die am häufigsten zum Einsatz kommenden konventionellen Verfahren des Prototypenwerkzeugbaus Berücksichtigung. Über einen im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Bewertungsansatz können die unterschiedlichen Anwendungsszenarien daraufhin miteinander verglichen werden.

Grundsätzlich wird die Bewertung in Bezug auf die drei Wettbewerbsfaktoren Kosten, Zeit und Qualität fokussiert. Eine gleichzeitige Optimierung dieser ist jedoch unmöglich, da immer ein Zielkonflikt entstehen muss (BULLINGER et al. 2003) und keinem Faktor eine höhere Bedeutung zugemessen werden kann als einem anderen. Aus diesem Grund werden in der entwickelten Bewertungsmethode die Faktoren zunächst getrennt voneinander in Bewertungsklassen strukturiert und in einzelne Kriterien mit zugeordneten Kenngrößen untergliedert. Innerhalb jeder Bewertungsklasse kann so eine gewichtete Punktewertung durchgeführt werden. Dieses Vorgehen hat sich bewährt, da damit eine sehr differenzierte Bewertung der Anwendungsszenarien möglich ist. Zusätzlich zu den Faktoren Kosten, Zeit und Qualität ist eine weitere definiert worden, die so genannte Technologieklasse. Sie enthält Kriterien und Kennwerte, die für die Analyse der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Verfahren unabdingbar sind, aber keiner der drei anderen Bewertungsklassen direkt zugeordnet werden können. Ein solches

Kriterium ist zum Beispiel die durchschnittliche Lebensdauer des untersuchten Werkzeugs oder der Grad der Automatisierbarkeit bei der Werkzeugherstellung.

Mit diesem Ansatz sind Bewertungsfaktoren definiert, die einen späteren Vergleich der unterschiedlichen Werkzeugkonzepte erlauben. Dabei werden sowohl monetär als auch nicht-monetär quantifizierbare Faktoren berücksichtigt. Die daraus gewonnenen Ergebnisse bieten bei entsprechender Auswertung eine theoretische Aussage, beispielsweise hinsichtlich monetärer Einspareffekte bei der Verwendung des formflexiblen Spritzgießwerkzeugs im Vergleich zu den konkurrierenden Konzepten. Auf Basis dieser Bewertung kann zusammenfassend eine Empfehlung in Form einer Anwendungsmatrix gegeben werden. Diese Matrix erlaubt eine Einschätzung, welches Szenarium bei speziellen Anforderungen bzw. Randbedingungen im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit ein geeignetes Verfahren zur Herstellung eines Prototyps oder einer Kleinserie ist. Dabei sind nicht nur die Szenarien des formflexiblen Werkzeugsystems, sondern auch konventionelle Verfahren im Prototypenwerkzeugbau berücksichtigt worden. Der folgende Abschnitt definiert die Szenarien.

## 7.2 Definition von Bewertungsszenarien

Für die Durchführung der Bewertungsmethode werden im Folgenden die bereits in Abschnitt 6.2 verwendeten Anwendungsszenarien des formflexiblen Werkzeugsystems herangezogen und ergänzt sowie zusätzlich durch die am häufigsten im Einsatz befindlichen konventionellen Verfahren des Prototypenwerkzeugbaus erweitert. Im Falle der Erweiterung der Anwendungsszenarien mit dem formflexiblen Werkzeugsystem ist darunter zum einen eine Betrachtung der notwendigen Folgeprozesse zur Reduktion der Nadelrasterung am Bauteil, beispielsweise durch Schleifen, zu verstehen. Ein Folgeprozess wird notwendig, wenn die Formmasse in die feinen Nadeln appliziert wird. Zum anderen ist es bei der wirtschaftlichen Betrachtung erforderlich, die mit dem Werkzeug herzustellenden Stückzahlen in den Anwendungsszenarien zu berücksichtigen. Zusätzlich gilt es die am weitesten verbreiteten, konkurrierenden Verfahren zur Herstellung von Prototypenwerkzeugen zu betrachten (z. B. HSC-Fräsen eines Werkzeugs aus Aluminium oder Stahl). Auch diese Verfahren sind in Form von Anwendungsszenarien berücksichtigt. Eine Aufstellung aller definierten Szenarien und der einzelnen Anwendungsvarianten ist Tabelle 11 zu entnehmen.

	Anwendungs-variante 1	Anwendungs-variante 2	Anwendungs-variante 3	Anwendungs-variante 4	Anwendungs-variante 5	Anwendungs-variante 6	Anwendungs-variante 7	Anwendungs-variante 8
Szenario 1	ffW, feine Nadeln, Nadeln unbearbeitet, Losgröße 1, keine Nachbearbeitung	ffW, feine Nadeln, Nadeln unbearbeitet, Losgröße 1, Nachbearbeitung durch Gleitschleifen	ffW, feine Nadeln, Nadeln unbearbeitet, Losgröße 100, Nachbearbeitung durch Sandstrahlen	ffW, feine Nadeln, Nadeln unbearbeitet, Losgröße 100, Nachbearbeitung durch Sandstrahlen	ffW, feine Nadeln, Nadeln unbearbeitet, Losgröße 100, Nachbearbeitung durch Gleitschleifen	-	-	-
	ffW, grobe Nadeln, Nadeln abgerästet, Losgröße 100	ffW, grobe Nadeln, Nadeln abgerästet, abgerästet, Losgröße 1000	ffW, grobe Nadeln, Nadeln abgerästet, abgerästet, Losgröße 1000	ffW, grobe Nadeln, Nadeln abgerästet, abgerästet, Losgröße 1000	ffW, grobe Nadeln, Nadeln abgerästet, abgerästet, Losgröße 1000	-	-	-
Szenario 2	ffW, grobe Nadeln, Nadeln abgerästet, Losgröße 1	ffW, grobe Nadeln, Nadeln abgerästet, abgerästet, Losgröße 100	ffW, grobe Nadeln, Nadeln abgerästet, abgerästet, Losgröße 1000	ffW, grobe Nadeln, Nadeln abgerästet, abgerästet, Losgröße 1000	ffW, grobe Nadeln, Nadeln abgerästet, abgerästet, Losgröße 1000	ffW, grobe Nadeln, Nadeln abgerästet, abgerästet, Losgröße 1000	ffW, grobe Nadeln, Nadeln abgerästet, abgerästet, Losgröße 1000	ffW, grobe Nadeln, Nadeln abgerästet, abgerästet, Losgröße 1000
	ffW, grobe Nadeln, SLA-Zwischenschale, Losgröße 1	ffW, grobe Nadeln, SLA-Zwischenschale, Losgröße 100	ffW, grobe Nadeln, SLA-Zwischenschale, Losgröße 100	ffW, grobe Nadeln, SLA-Zwischenschale, Losgröße 100	ffW, grobe Nadeln, SLA-Zwischenschale, Losgröße 1000			
Szenario 3	konventionelles Werkzeug, Stahl, Losgröße 1	konventionelles Werkzeug, Stahl, Losgröße 1	konventionelles Werkzeug, Stahl, Losgröße 100	konventionelles Werkzeug, Stahl, Losgröße 100	konventionelles Werkzeug, Stahl, Losgröße 100	konventionelles Werkzeug, Stahl, Losgröße 1000	konventionelles Werkzeug, Stahl, Losgröße 1000	konventionelles Werkzeug, Stahl, Losgröße 1000
	HSC-gefrästes Werkzeug, Stahl, Losgröße 1	HSC-gefrästes Werkzeug, Stahl, Losgröße 1	HSC-gefrästes Werkzeug, Stahl, Losgröße 100	HSC-gefrästes Werkzeug, Stahl, Losgröße 100	HSC-gefrästes Werkzeug, Stahl, Losgröße 100	HSC-gefrästes Werkzeug, Stahl, Losgröße 1000	HSC-gefrästes Werkzeug, Stahl, Losgröße 1000	HSC-gefrästes Werkzeug, Stahl, Losgröße 1000
Szenario 4	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000
	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000
Szenario 5	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000
	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000
Szenario 6	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000	konventionelles Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000
	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 100	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000	HSC-gefrästes Werkzeug, Aluminium, Losgröße 1000
Szenario 7	ffW, feine Nadeln, Nadeln unbearbeitet, Losgröße 1	ffW, feine Nadeln, Nadeln unbearbeitet, Losgröße 1	ffW, feine Nadeln, Nadeln unbearbeitet, Losgröße 100	ffW, feine Nadeln, Nadeln unbearbeitet, Losgröße 100	ffW, feine Nadeln, Nadeln unbearbeitet, Losgröße 100	ffW, feine Nadeln, Nadeln unbearbeitet, Losgröße 1000	ffW, feine Nadeln, Nadeln unbearbeitet, Losgröße 1000	ffW, feine Nadeln, Nadeln unbearbeitet, Losgröße 1000
	SLA, Zwischenschale, Losgröße 1000	SLA, Zwischenschale, Losgröße 1000	SLA, Zwischenschale, Losgröße 1000	SLA, Zwischenschale, Losgröße 1000	SLA, Zwischenschale, Losgröße 1000	SLA, Zwischenschale, Losgröße 10000	SLA, Zwischenschale, Losgröße 10000	SLA, Zwischenschale, Losgröße 10000

**Legende:**

ffW = formflexibles Werkzeug

SLA = Stereolithographie

DMLS = Direktes Metall-Laser-Sintern

IMLS = Indirektes Metall-Laser-Sintern

HSC = High Speed Cutting

Tabelle 11: In der Bewertung verwendete Szenarien

Auf die Bewertung von generativ arbeitenden Verfahren im Prototypenwerkzeugbau wird hier verzichtet, da diese Techniken bei den Anwendungsszenarien des formflexiblen Werkzeugs genutzt werden, die auf der Verwendung von Zwischenschalen basieren. Wie in Unterabschnitt 6.2.2 bereits beschrieben, bieten diese Zwischenschalen die gleichen Möglichkeiten, die ein generativ gefertigter Formeinsatz aufweist (z. B.

konturnahe Kühlkanäle). Die Herstellkosten bei generativen Verfahren sind immer volumenabhängig. Die Zwischenschale hat im Vergleich zu einem generativ gefertigten Formeinsatz ein geringeres Volumen und ist somit kostengünstiger herzustellen. Berücksichtigt man bei der Kostenaufstellung, dass bei einem generativ gefertigten Formeinsatz ein zusätzlich anzupassender Formrahmen notwendig wird und bei einer Zwischenschale Kosten für das formflexible Werkzeug entstehen, so ist die Schale im Prototypenwerkzeugbau, auf Grund der hohen Wiederverwendbarkeit des formflexiblen Werkzeugs, dennoch wirtschaftlicher einzusetzen als ein generativ gefertigter Formeinsatz.

Im folgenden Abschnitt wird die entwickelte Bewertungsmethode systematisch eingeführt und anschließend werden die Kriterien der einzelnen Bewertungsklassen sowie deren Kenngrößen, das Vorgehen bei der Ermittlung der Kennwerte und die Wertefunktionen für die Ermittlung der Punktwerte anhand der errechneten Kennwerte vorgestellt.

### 7.3 Systematische Ein- und Durchführung der Bewertungsmethode

Die entwickelte Methode zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des formflexiblen Werkzeugsystems enthält einige Elemente bekannter Bewertungsvorgehensweisen (z. B. gewichtete Punktbewertung und Nutzwertanalyse) und ermöglicht in dieser speziellen Kombination eine differenzierte und quantifizierte Beurteilung der Wirtschaftlichkeit verschiedener Anwendungsszenarien des Prototypenwerkzeugbaus. Sie bietet eine strukturierte Betrachtung von relevanten Kriterien unterschiedlicher Wertigkeit und bewirkt eine intensive Auseinandersetzung mit den Szenarien sowie eine Objektivierung des Bewertungsprozesses. Die folgende Abbildung zeigt das systematische Vorgehen der angewendeten Bewertungsmethode. Der erste Schritt besteht darin, die Bewertungsklassen (in diesem Fall Kosten, Zeit, Qualität und Technologie) festzulegen. Anschließend werden die Bewertungskriterien der einzelnen Bewertungsklassen definiert. Nach der Festlegung aller Kriterien sind diese untereinander und innerhalb der jeweiligen Bewertungsklassen zu gewichten. Dies erfolgt unter Verwendung von Zielpräferenzmatrizen, die im Folgenden noch vorgestellt werden. Die Bestimmung der Punktwerte für jedes Kriterium kann, wie bei der einfachen und gewichteten Punktbewertung (EHRLENSPIEL 2007), anhand der absoluten Ausprägungen unter Zuhilfenahme einer Wertfunktion durchgeführt werden. Durch eine solche Normierung wird es möglich, unterschiedliche Kriterien miteinander zu vergleichen.

Deren Ausprägung ist anhand der definierten Szenarien zu bestimmen. Dabei wird bei jedem Kriterium das Szenarium detailliert theoretisch und praktisch betrachtet und unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, im Hinblick auf die Zielsetzung des definierten Kriteriums, der Erfüllungsgrad errechnet.

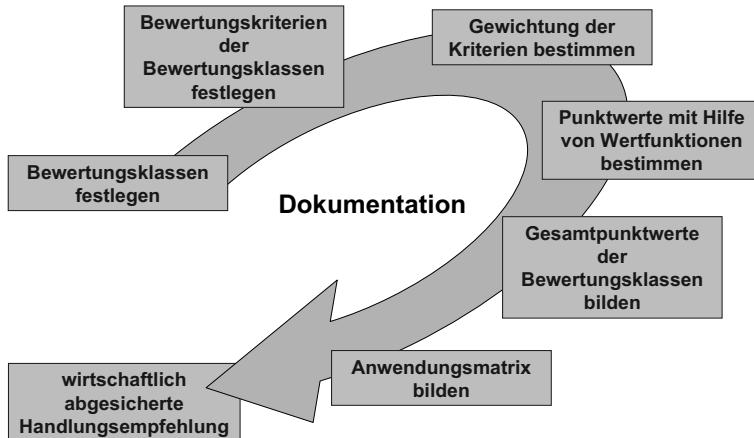


Abbildung 40: Ablauf der wirtschaftlichen Bewertung

Die Ergebnisse dieser Betrachtung sind in den Unterabschnitten 7.3.1, 7.3.2, 7.3.3 und 7.3.4 zusammenfassend dargestellt. Auf eine detaillierte Darlegung der Berechnung aller Kriterien für alle definierten Szenarien wird, auf Grund der Fokussierung dieses Kapitels auf eine Handlungsempfehlung, verzichtet.

Um die notwendigen Wertfunktionen zu erstellen, ist folgendes Vorgehen empfehlenswert: Zuerst ist der Verlauf der Funktion zu wählen, der dem betrachteten Bewertungskriterium am besten gerecht wird. Der Verlauf kann linear, progressiv, degressiv, steigend oder fallend sein. Im Anschluss erfolgt die Bestimmung eines Wertsystems. Hier bieten sich ganzzahlige, dimensionslose Punkteskalen an, deren Breite vom Abstraktions- bzw. Konkretisierungsgrad der vorliegenden Lösungen abhängt. Beispielsweise kann ein Wertsystem eine Punktskala von 1 bis 10 sein. Hierbei drücken niedrige Punktwerte in der Regel schlechte, hohe Punktwerte gute Kennzahlen aus. Alle Konstanten einer solchen Wertfunktion werden aus den gegebenen Randbedingungen abgeleitet.

Die Ermittlung der Gesamtpunktwerte einer Bewertungsklasse eines Szenariums erfolgt durch die Multiplikation der Punktwerte mit der Kriteriengewichtung und die an-

schließende Addition der Produkte aller Kriterien je Bewertungsklasse. Durch das Ausfüllen von Bewertungsformblättern sind diese Bewertungsergebnisse dokumentiert. Auf Basis der Bewertungsergebnisse können Analysegruppen gebildet werden. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der beabsichtigten herzustellenden Stückzahl des Prototyps oder der Kleinserie. Pro Analysegruppe sind die Gesamtpunktwerte aller Bewertungsklassen aufgelistet. Dadurch entsteht eine Hierarchisierung aller Szenarien in Bezug auf die einzelnen Bewertungsklassen. Zusätzlich kann die Gesamtleistung des jeweiligen Anwendungsszenariums durch Addition aller Gesamtpunktwerte gebildet werden. Mit dieser Hierarchisierung liegt dem Anwender des formflexiblen Werkzeugsystems eine Entscheidungsgrundlage dafür vor, unter welchen Produktionsbedingungen das jeweilige Anwendungsszenario ein wirtschaftliches Herstellungsverfahren ist.

### 7.3.1 Bewertungsklasse „Kosten“

Wie bereits einführend dargestellt, gilt es in jeder Bewertungsklasse den jeweiligen Kriterien Punktwerte über zu definierende Wertfunktionen zuzuordnen. Über eine Gewichtung der Kriterien untereinander kann somit für jede Bewertungsklasse ein entsprechender Erfüllungsgrad abgeleitet werden. Die Bewertungsklasse Kosten enthält die drei Kriterien „Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück“, „Mehrkosten pro hergestelltem Stück bei Geometrieänderung nach Erstellung des Werkzeugs“ und „Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten“. Zur Ermittlung des Werts „Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück“ sind bei allen Szenarien sowohl Materialkosten als auch Fertigungskosten zu berücksichtigen. Unter Verwendung einer Wertfunktion wird der ermittelte Wert in einen normierten Punktwert umgewandelt. Bei allen Szenarien ist die gleiche Wertfunktion für das jeweilige Kriterium in Verwendung.

Im Fall der Ermittlung des Werts bzw. der Ausprägung des Kriteriums „Mehrkosten pro hergestelltem Stück bei Geometrieänderung nach Erstellung des Werkzeugs“ kann allerdings keine einheitliche Vorgehensweise bei der Berechnung angegeben werden. Beim formflexiblen Werkzeugsystem unter Verwendung von Zwischenschalen (siehe Tabelle 11, Szenario 3, Anwendungsvariante 1 bis 8 bzw. S3A1-A8) sind beispielsweise anfallende Herstellkosten für angepasste Schalengeometrien zu berücksichtigen, wohingegen beim direkten Einspritzen in die Nadeln (siehe S1A1-A5 und S2A1-A4) nur Mehrkosten auf Grund des neuen Einstellvorgangs entstehen. Bei Geometrieänderungen eines über konventionelle Technologien hergestellten Prototypenwerkzeugs (siehe S4-S7) fallen hingegen die kompletten Kosten für ein neues Werkzeug an. Auf eine detaillierte Darstellung der einzelnen Berechnungsschritte aller Szenarien wird hier verzichtet und auf die eigentlichen, relevanten Ergebnisse in den Bewertungsform-

blättern verwiesen (siehe Tabelle 13 und Anhang). Auch bei diesem Kriterium findet eine Normierung über Wertfunktionen statt.

Das dritte Kriterium, der „Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten“, kann hingegen wieder für alle Szenarien identisch berechnet werden. Die Gewichtung der Kriterien in den Bewertungsklassen erfolgt anhand von Zielprefärenzmatrizen, da diese ein möglichst objektives Vorgehen gewährleisten. Tabelle 12 zeigt die angewendete Präferenzmatrix für die Bewertungsklasse „Kosten“.

	a	b	c	Präferenzen	Schlüssel	Gewichtung
Herstellkosten	a	a	a	2	4	0,57143
Mehrkosten	b		c	0	1	0,14286
Werkzeugkostenanteil	c			0	2	0,28571
0 0 1				Summe:	7	

Tabelle 12: Präferenzmatrix der Bewertungsklasse „Kosten“

In der Präferenzmatrix sind alle zu gewichtenden Bewertungskriterien abgebildet und mit einem Buchstaben versehen („a“, „b“, „c“). Die Bewertungskriterien sind einander paarweise gegenüber zu stellen und der Buchstabe des präferierten Kriteriums, also des Kriteriums mit der höheren Wichtigkeit, ist in die entsprechende Zelle der Matrix einzutragen. Nach dem Vergleich aller Kriterien untereinander wird für jedes Kriterium die Gesamtzahl der Präferenzen ermittelt. Zu diesem Zweck ist die Anzahl der Nennungen des jeweiligen Kriteriums sowohl in der entsprechenden Zeile als auch der dazugehörigen Spalte zu bilden sowie zu addieren. Im Anschluss kann eine Gewichtung für die spätere Bewertung berechnet werden.

In der Bewertungsklasse „Kosten“ ist die Gewichtung so gewählt, dass die Herstellkosten eines Bauteils die größte Relevanz haben. Dies entspricht auch der Realität, da die Herstellkosten eines Produkts dessen Mindestpreis aus Sicht des Herstellers direkt bestimmen und dieser wiederum maßgeblichen Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber der Konkurrenz auch im Prototypenwerkzeugbau besitzt. Dies ist legitim, da ein Prototypenwerkzeug auch genutzt wird, um den Übergang von der Produktentwicklung zur Serie zu überbrücken. In dieser Phase ist meist noch kein Serienwerkzeug vorhanden, die Bauteile werden allerdings vom Kunden bereits in Serienqualität zu Serienpreisen gefordert. Aus diesem Grund wird das Kriterium „Herstellkosten“ gegenüber den beiden anderen präferiert (siehe Tabelle 12). Die Präferenz des Werkzeugkostenanteils an den Herstellkosten gegenüber den Mehrkosten bei Produktänderung kann ebenfalls damit begründet werden, dass der Werkzeugkostenanteil einen erheblichen Effekt auf die Produktkosten hat. Damit ergibt sich die Gesamtsumme der Präferenzen

für die Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück zu 2, für die Mehrkosten bei Produktänderung zu 0 und für den Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten zu 1. Nach Anwendung eines Schlüssels, der verhindert, dass ein nicht präferiertes Kriterium unberücksichtigt bleibt, ergeben sich die in Tabelle 12 dargestellten Gewichtungen. Die eigentliche Bewertung des jeweiligen Szenariums erfolgt über das Ermitteln und Ausfüllen der jeweiligen Bewertungsformblätter. Ein Beispiel eines solchen Formblattes ist in Tabelle 13 dargestellt.

Bewertungsklasse „Kosten“, Szenarium 2							
	Kriterium	Kenngröße	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Anwendungsvar. 1	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	$H_K$	428,99 €	8,57	0,57143	4,90	6,34
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieveränderung nach Erstellung des Werkzeugs	$M_K$	385,81 €	8,07	0,14286	1,15	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	$W_K$	89,93 %	1,01	0,28571	0,29	
Anwendungsvar. 2	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	$H_K$	6,67 €	9,98	0,57143	5,70	8,06
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieveränderung nach Erstellung des Werkzeugs	$M_K$	385,81 €	8,07	0,14286	1,15	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	$W_K$	57,84 %	4,22	0,28571	1,21	
Anwendungsvar. 3	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	$H_K$	2,83 €	9,99	0,57143	5,71	9,33
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieveränderung nach Erstellung des Werkzeugs	$M_K$	385,81 €	8,07	0,14286	1,15	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	$W_K$	13,63 %	8,64	0,28571	2,47	
Anwendungsvar. 4	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	$H_K$	2,44 €	9,99	0,57143	5,71	9,67
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieveränderung nach Erstellung des Werkzeugs	$M_K$	385,81 €	8,07	0,14286	1,15	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	$W_K$	1,58 %	9,84	0,28571	2,81	

Tabelle 13: Formblatt der Bewertungsklasse „Kosten“ am Beispiel von Szenarium 2

Bei diesem Beispiel handelt es sich um die Bewertung von Szenarium 2 (Applizieren in überfräste grobe Nadeln) mit allen dazugehörigen Anwendungsvarianten. Im Anhang dieser Arbeit befinden sich die Bewertungsformblätter aller weiteren in Tabelle 11 hinterlegten Szenarien.

### 7.3.2 Bewertungsklasse „Zeit“

Die zweite Bewertungsklasse berücksichtigt alle relevanten Aspekte, die mit der Thematik Zeit zusammenhängen. Die dabei betrachteten Kriterien orientieren sich an den typischen Teilprozessschritten der jeweiligen Szenarien, was zu der folgenden Aufstellung führt: „Werkzeugherstellzeit“, „Rüstzeit“, „Prozesszykluszeit“, „Nachbearbeitungszeit“ und „Zeitaufwand bei Produktänderungen nach der Herstellung des eigentlichen Werkzeugs“. Beim Bewertungskriterium „Werkzeugherstellzeit“ muss für jedes Szenarium ein einzelnes Vorgehen bei der Ermittlung des entsprechenden Werts herangezogen werden. Beispielsweise ist es bei den Szenarien 4 bis 7 notwendig, die komplette Fräsezeit zur Herstellung des Werkzeugs zu ermitteln. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die dafür notwendigen Werte über eine Frässimulation berechnet. Bei Szenarium 1 beispielsweise gilt es, die Einstellzeiten der Referenzgeometrie beim formflexiblen Werkzeug zu bestimmen. Zusätzlich zur Einstellzeit des formflexiblen Werkzeugs ist bei Szenarium 2 der finalisierende Schlichtprozess bei der Werkzeugherstellzeit zu berücksichtigen, während es bei Szenarium 3 die Zeit für die Herstellung der Zwischenschalen zu beachten gilt. In gleicher Weise wie in Unterabschnitt 7.3.1 kommt bei diesem Kriterium ebenfalls eine Wertfunktion zur Normierung in notwendige Punktwerte zum Einsatz. Beim Kriterium „Rüstzeit“ kann davon ausgegangen werden, dass für alle Szenarien die gleichen Rüstzeiten anfallen und eine getrennte Betrachtung der Ermittlung dieses Werts nicht notwendig ist. Unter der Rüstzeit sind hier die Zeit zum Einbringen des Werkzeugs in die Maschine sowie die benötigte Zeit, um die Spritzgießmaschine nach erfolgter Spritzapplikation wieder in den ursprünglichen Zustand zu versetzen, zu verstehen. Die Prozesszykluszeit ist ein empirisch ermittelter Wert und basiert auf den Zeiten zum Schließen des Werkzeugs, zum Einspritzen des Kunststoffs, zum Nachdrücken, zum Auskühlen, zum Öffnen des Werkzeugs sowie zum Auswerfen des Spritzlings. Die Nachbearbeitungszeit fällt lediglich bei Szenarium 1 an. Mit dieser Zeit wird berücksichtigt, dass bei den Anwendungsvarianten dieses Szenariums jedes Bauteil nach dem Spritzprozess zusätzlich bearbeitet werden muss. Im Fall einer Geometrieveränderung ist der Zeitbedarf zur Realisierung der neuen Werkzeugkavität zusätzlich anzurechnen. Ähnlich wie bei der Herstellzeit sind auch bei diesem Kriterium alle notwendigen Prozessschritte beachtet. Zur Bestimmung der entsprechenden Punktwerte jedes Kriteriums werden die errechneten bzw. ermittelten

Werte normiert. Auch bei der Bewertungsklasse „Zeit“ ist eine objektive Gewichtung der Kriterien durchzuführen. Tabelle 14 zeigt die dazu verwendete Präferenzmatrix.

	a	b	c	d	e	Präferenzen	Schlüssel	Gewichtung	
Werkzeugherstellzeit	a	a	a	a	a	4	4	0,38095	
Rüstzeit	b		b	b	b	2	2	0,19048	
Zeitaufwand bei Änderung	c		c	c	c	2	2	0,19048	
Prozesszykluszeit	d		d	d	d	1	2	0,19048	
Nachbearbeitungszeit	e						0	1	0,04762
	0	0	0	1	0		Summe:	21	

Tabelle 14: Präferenzmatrix der Bewertungsklasse „Zeit“

Die Gewichtung wurde so gewählt, dass die Werkzeugherstellzeit die höchste Bedeutung erhält. Der Grund dafür ist, dass diese beim Spritzgießen erfahrungsgemäß sehr viel höher ist als die Zeiten der übrigen Kriterien und an der Zeit zwischen Beginn der Herstellung eines Werkzeugs bis zum fertig produzierten Los den entscheidenden Anteil hat. Somit besitzt die Werkzeugherstellzeit das größte Potenzial, die Gesamtzeit des Produktionsprozesses positiv zu beeinflussen. Daher kann die Werkzeugherstellzeit in jeder Paarung präferiert werden. Weil die Rüstzeit zwangsläufig bei jedem Fertigungsprozess anfällt, eine Produktänderung nach der Erstellung eines Werkzeuges jedoch seltener ist, sollte die Rüstzeit gegenüber dem Zeitaufwand bei Produktänderungen präferiert werden. Die Prozesszykluszeit ist gegenüber der Rüstzeit höher zu gewichten, da sie ab der Serienfertigung den größeren Anteil an der Gesamtzeit hat. Der Zeitaufwand für eine Produktänderung erhält gegenüber der Prozesszykluszeit den Vorzug, da im Fall einer Produktänderung eine Produktion mit dem nicht geänderten Werkzeug nicht möglich ist. Da die Nachbearbeitung eines Produkts bei den betrachteten Szenarien und im Bereich von Prototypen und Kleinserien kaum eine Rolle spielt (sie tritt ausschließlich in Szenario 1 auf), ist ihre Bedeutung für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eher gering einzuschätzen. Sie besitzt daher gegenüber keinem der anderen Kriterien eine Präferenz. Nach der Berechnung der entsprechenden Gewichtungen unter Verwendung eines Schlüssels kann die eigentliche Bewertung der Szenarien im Hinblick auf die Bewertungsklasse „Zeit“ erfolgen. Anhand des Bewertungsformblatts für das Szenario 2 ist dies in der folgenden Tabelle beispielhaft verdeutlicht. Die Bewertungsformblätter der anderen Szenarien sind dem Anhang zu entnehmen. Eine Unterscheidung in Anwendungsvarianten ist bei dieser Bewertungsklasse nicht relevant.

Bewertungsklasse „Zeit“, Szenario 2						
Kriterium	Kenngröße	Wert	Punkt-wert	Gewich-tung	gew. Punktwert	Summe
Werkzeugherstellzeit	$t_H$	1,4 h	9,83	0,38095	3,74	
Rüstzeit	$t_R$	35 min	2,5	0,19048	0,48	
Zeitaufwand bei Produktänderung nach Herstellung eines Werkzeugs	$t_A$	1,98 h	9,75	0,19048	1,86	
Prozesszykluszeit	$t_P$	120 s	6,00	0,19048	1,14	
Nachbearbeitungszeit	$t_N$	0 s	10	0,04762	0,48	
						7,80

Tabelle 15: Formblatt der Bewertungsklasse „Zeit“ am Beispiel von Szenario 2

### 7.3.3 Bewertungsklasse „Qualität“

Im Bereich der dritten Bewertungsklasse werden qualitative Aspekte der einzelnen Szenarien bzw. Anwendungsvarianten betrachtet. Die Kriterien „Oberflächengüte des Produkts“, „erzielbare Maßgenauigkeit“ sowie „Detailauflösung“ stehen dabei im Fokus. Die erreichbare Oberflächengüte des Produkts korreliert direkt mit dem bei der Herstellung des Werkzeugs eingesetzten Herstellverfahren. Für die Szenarien des konventionellen Prototypenwerkzeugbaus sowie das Szenario 2 gelten daher die mittels Fräsen erzielbaren Mittenrautiefe. Im Fall der Szenarien 1 und 3 kommen bei der Kalkulation der Ausprägung dieses Kriteriums die Mittenrautiefe der jeweiligen Endbearbeitungsverfahren zum Einsatz. Über eine entsprechende linear fallende Wertfunktion mit einer Zuordnung der Mittenrautiefe von 0 bis max. 12  $\mu\text{m}$  auf die Punkt-werte 10 bis 0 kann die Normierung der Werte des Kriteriums der „Oberflächengüte“ durchgeführt werden. Die gleiche Vorgehensweise kommt beim Kriterium „erzielbare Maßgenauigkeit“ zum Einsatz. Auch hier bestimmt das Fertigungsverfahren des Werkzeugs direkt die Ausprägung des Kriteriums. Diese ist bei den Szenarien mit Verwendung von Fräsprozessen sowie von Zwischenschalen erwartungsgemäß höher als beispielsweise bei Szenario 1. Über die Verwendung einer ebenfalls linear fallenden Wertfunktion können den ermittelten Ausprägungen normierte Werte zugeordnet werden. Auch bei der Bewertung des Kriteriums „Detailauflösung“ ist das Endbearbeitungsverfahren maßgeblich für die Ausprägung des Kriteriums. Allerdings findet die Normierung dieses Werts nicht über eine Wertfunktion statt, sondern sie wird über eine Zuordnungstabelle erreicht.

Neben der Ermittlung der Ausprägung jedes Kriteriums bei den einzelnen Szenarien und Anwendungsvarianten ist die Gewichtung der Kriterien in der Bewertungsklasse

„Qualität“ zu definieren. Hierbei wird, wie bei den vorangegangenen Bewertungsklassen, eine Präferenzmatrix verwendet (siehe Tabelle 16).

	a	b	C	Präferenzen	Schlüssel	Gewichtung
Oberflächengüte	a	b	ac	1	1	2
Maßgenauigkeit	b		B	1	2	4
Detailauflösung	c			0	1	2
	0	1	1		Summe:	8

Tabelle 16: Präferenzmatrix der Bewertungsklasse „Qualität“

Die Maßgenauigkeit ist eine Grundvoraussetzung für das Fertigen eines qualitativ hochwertigen Bauteils und erhält daher die höchste Gewichtung (50 %), da die beiden weiteren Qualitätskriterien gegebenenfalls durch Nachbearbeitung beeinflusst werden können. Ein eventuell nicht maßgenaues, beispielsweise zu kleines Bauteil kann im Allgemeinen auch nicht durch Nachbearbeitung verbessert werden. Eine Differenzierung hinsichtlich der Gewichtung zwischen Oberflächengüte und Detailauflösung ist nicht begründbar. Daher sind beide Kriterien mit jeweils 25 % zu gewichten. Das Ergebnis der Szenarienbetrachtung in der Bewertungsklasse „Qualität“ am Beispiel von Szenarium 2 ist Tabelle 17 zu entnehmen. Alle weiteren Bewertungsformblätter sind im Anhang dargestellt.

Bewertungsklasse „Qualität“, Szenarium 2						
Kriterium	Kenngroße	Wert	Punkt-wert	Gewich-tung	gew. Punktwert	Summe
Oberflächengüte des Produktes	Mittenrautiefe	0,4 µm	9,68	0,25	2,42	9,91
Erzielbare Maßgenauigkeit	größte Abweichung vom Nennmaß	0,05 mm	9,97	0,5	4,99	
Detailauflösung		„sehr gut“	10	0,25	2,5	

Tabelle 17: Formblatt der Bewertungsklasse „Qualität“ am Beispiel von Szenarium 2

### 7.3.4 Bewertungsklasse „Technologie“

Wie bereits in Abschnitt 7.1 erwähnt, bedarf es neben den Bewertungsklassen „Zeit“, „Qualität“ und „Kosten“ einer Bewertungsklasse „Technologie“. Diese Klasse beinhaltet Kriterien, die unter anderem für die Erfüllung der in dieser Arbeit definierten Zielsetzungen (siehe Abschnitt 1.4) von Relevanz sind und bei einer wirtschaftlichen Betrachtung des entwickelten formflexiblen Werkzeugsystems unabdingbar sind.

Hierunter fallen die Kriterien „Lebensdauer des Werkzeugs“, „Wiederverwendbarkeit des Werkzeugs“ sowie „Automationsgrad bei der Herstellung des Werkzeugs“. Diese Kriterien bewerten den Kern des in dieser Arbeit vorgestellten Werkzeugsystems. Eine Gewichtung der Kriterien, wie es bei den vorangegangenen Klassen der Fall war, kann bei dieser Klasse nicht sinnvoll begründet werden, da die einzelnen Kriterien auf Grund ihrer Unterschiedlichkeit nicht miteinander verglichen werden können. Die Klasse „Technologie“ dient daher als Sammelbegriff für gleichwertige Kriterien. Ansonsten bleibt das Vorgehen bei der Bewertung der einzelnen Kriterien gleich. Zwei linear steigende Wertfunktionen im Fall der Bewertung der Lebensdauer des Werkzeugs und des Automationsgrads sowie eine Zuordnungstabelle bei der Bewertung der Wiederverwendbarkeit dienen als Normierungsansatz der szenarienbasierten Werte. Am Beispiel von Szenario 2 kann das Ergebnis der Bewertungsklasse „Technologie“ eingesehen werden. Alle weiteren Bewertungsformblätter sind dem Anhang zu entnehmen.

Bewertungsklasse „Technologie“, Szenario 2				
Kriterium	Kenngroße	Wert	Punktwert	Summe
Lebensdauer des Werkzeugs	–	10000	10	
Wiederverwendbarkeit des Werkzeugs	–	„hoch“	7	
Automationsgrad der Herstellung des Werkzeugs	–	69,16 %	6,92	23,92

*Tabelle 18: Formblatt der Bewertungsklasse „Technologie“ am Beispiel von Szenario 2*

Durch die getrennte Bewertung aller Szenarien und Anwendungsvarianten im Hinblick auf die Bewertungsklassen „Kosten“, „Zeit“, „Qualität“ und „Technologie“ ist es möglich, für die relevanten Randbedingungen im Bereich der Prototypen- und Kleinserienherstellung von Spritzgießbauteilen ein entsprechendes Verfahren zur Herstellung eines Prototypenwerkzeugs zu wählen. Neben der technologischen Einsetzbarkeit der Verfahren (siehe Kapitel 6) kann zusammen mit der in Abschnitt 7.3 durchgeführten systematischen Bewertung eine wirtschaftlich abgesicherte Handlungsempfehlung für den Einsatz von Prototypenwerkzeugen begründet werden. Die Grundlagen für diese Empfehlung sind die aufgestellten Bewertungsformblätter, die im folgenden Abschnitt in einer zusammenfassenden Darstellung ausgewertet und gebündelt werden.

## 7.4 Handlungsempfehlung auf Basis der wirtschaftlichen Bewertung

In diesem Abschnitt erfolgt eine Analyse der Szenarien anhand der oben ermittelten Gesamtpunktswerte. Dabei wird aufgezeigt, welches Szenarium (S) für gegebene Anwendungsbedingungen (herzustellende Stückzahl, Prioritäten hinsichtlich Kosten, Zeit und Qualität) im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit am besten geeignete ist. Zunächst werden Gruppen von vergleichbaren Anwendungsvarianten (A) der Szenarien gebildet. Das Einteilungskriterium ist dabei die zu produzierende Menge an Bauteilen. Dies führt zu den folgenden vier Analysegruppen (siehe Tabelle 19): In Gruppe 1 befinden sich alle Anwendungsvarianten, in denen nur ein Prototyp hergestellt werden soll. Gruppe 2 enthält die Anwendungsvarianten, in denen die Fertigung von 100 Bauteilen vorgesehen ist. Gruppe 3 bündelt die Anwendungsvarianten, in denen 1.000 Bauteile gefertigt werden und in Gruppe 4 befinden sich die Anwendungsvarianten, in denen 10.000 Bauteile hergestellt werden. Die linke Spalte jeder Gruppe enthält die Ziffer des Szenariums, aus dem die Anwendungsvariante stammt, deren Ziffer in der rechten Spalte aufgelistet ist.

Analysegruppe 1	
Szenarium (S)	Anwendungsvariante (A)
1	1
1	2
1	3
2	1
3	1
3	2
4	1
5	1
6	1
7	1

Analysegruppe 2	
Szenarium (S)	Anwendungsvariante (A)
1	4
1	5
2	2
3	3
3	4
4	2
5	2
6	2
7	2

Analysegruppe 3	
Szenarium (S)	Anwendungsvariante (A)
2	3
3	5
3	6
4	3
5	3
6	3
7	3

Analysegruppe 4	
Szenarium (S)	Anwendungsvariante (A)
2	4
3	7
3	8
4	4
5	4
6	4
7	4

Tabelle 19: Auf Stückzahlen beruhende Analysegruppen

Zunächst wird Analysegruppe 1 betrachtet. Dazu sind die Gesamtpunktwerte der Bewertungsklassen „Kosten“, „Zeit“, „Qualität“ und „Technologie“ für alle in dieser Gruppe befindlichen Anwendungsvarianten aufgelistet und anschließend in Form verschiedener Rangfolgen (Rk.= Rankings) gegliedert. Die ersten vier Rankings beziehen sich auf jeweils eine Bewertungsklasse. Eine fünfte Rangfolge berücksichtigt die Gesamtleistung der jeweiligen Anwendungsvariante (Av. Rk.), indem eine Durchschnittsplatzierung aus den vier vorhergehenden Rankings ermittelt wird (siehe Tabelle 20).

Analysegruppe 1												
S	A	Kosten	Zeit	Qualität	Tech.	Rk. Kosten	Rk. Zeit	Rk. Q.	Rk. Tech.	Av. Rk.		
1	1	8,03	5,93	5,25	29,84	3	6	9	1	4,75	4	
1	2	8,04	5,85	4,71	29,84	2	8	10	1	5,25	7	
1	3	8,07	5,91	5,94	29,84	1	7	8	1	4,25	2	
2	1	6,34	7,8	9,91	23,92	5	1	1	4	2,75	1	
3	1	6,62	6,65	9	22,57	4	2	6	6	4,5	3	
3	2	2,43	6,09	9	22,7	6	3	6	5	5	5	
4	1	0,31	5,44	9,91	18,7	10	9	1	7	6,75	10	
5	1	1,27	5,95	9,91	17,97	8	4	1	9	5,25	7	
6	1	0,54	5,44	9,91	18,7	9	9	1	7	6,5	9	
7	1	1,48	5,95	9,91	17,97	7	4	1	9	5	5	

Tabelle 20: Auswertung der ersten Analysegruppe

Wie Tabelle 20 veranschaulicht, sind die Anwendungsvarianten des Szenariums 1 die kostengünstigsten, gefolgt von den Anwendungsvarianten der Szenarien 2 und 3. Die Szenarien 4 bis 7 des konventionellen Prototypenwerkzeugbaus belegen hier die hinteren Ränge. Es fällt auf, dass für die Herstellung eines Prototyps alle Szenarien des formflexiblen Werkzeugsystems bezüglich der Kosten besser abschneiden als die Szenarien des konventionellen Prototypenwerkzeugbaus. Ein Grund für die guten Platzierungen der Anwendungsvarianten des 1. Szenariums ist der geringe Aufwand hinsichtlich der Optimierung der Oberflächenqualität des Werkzeugs. Dies führt zu äußerst geringen Werkzeugkosten und einem relativ niedrigen Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten.

Bezüglich der Bewertungsklasse „Zeit“ schneiden die Szenarien 2 und 3 gut ab. Den geteilten Platz vier belegen die Anwendungsvarianten der Szenarien 5 und 7, die auf der HSC-Technologie basieren. Die Anwendungsvarianten des Szenariums 1 belegen die Plätze 6 bis 8 und die Szenarien 4 und 6 liegen auf Platz 9. Der Grund für die relativ schlechte Platzierung der Anwendungsvarianten des Szenariums 1 liegt hier in der langen Dauer zur Einstellung der Geometrie im Werkzeug, die sich auf Grund der Verwendung der feinen Nadeln ergibt. Da die Dauer der Geometrieeinstellung im Werk-

zeug bei der Verwendung der groben Nadeln sehr viel geringer ist, erreichen die Szenarien 2 und 3 sehr gute Platzierungen.

In der Bewertungsklasse „Qualität“ sind die Szenarien des konventionellen Werkzeugbaus und Szenarium 2 gleich gut bewertet und belegen gemeinsam Platz 1. Der Grund dafür ist, dass das maßgebliche Fertigungsverfahren zur Erlangung der Oberflächenqualität des Werkzeugs (das Fräsen) bei allen diesen Szenarien eingesetzt wird. Die Anwendungsvarianten des Szenariums 3 erreichen Platz 6, während die Anwendungsvarianten des Szenariums 1 die Plätze 8 bis 10 zugeordnet bekommen.

Im Ranking der Bewertungsklasse „Technologie“ erzielen die Szenarien des formflexiblen Werkzeugs die Plätze 1 bis 6, die Szenarien des konventionellen Prototypenwerkzeugbaus rangieren auf den hinteren Plätzen. Dies zeigt die Vorteile der formflexiblen Technologie im Prototypenbau bei kleiner Stückzahl bzw. der Losgröße „1“.

Aus den oben beschriebenen Rankings resultiert das in Tabelle 20 einzusehende Gesamtranking (Av. Rk.). Eine Teilmenge der Anwendungsvarianten der Szenarien 2 und 3 belegen dabei die Plätze 1 und 3.

Tabelle 21 zeigt die Auswertung der Analysegruppe 2, die alle Anwendungsvarianten enthält, in denen die Herstellung von 100 Bauteilen vorgesehen ist.

Analysegruppe 2												
S	A	Kosten	Zeit	Qualität	Tech.	Rk. Kosten	Rk. Zeit	Rk. Q.	Rk. Tech.	Av. Rk.		
1	4	9,35	5,83	4,71	29,84	2	6	9	1	4,5	4	
1	5	9,47	5,45	5,94	29,84	1	7	8	1	4,25	2	
2	2	8,06	7,8	9,91	23,92	3	1	1	3	2	1	
3	3	8	6,65	9	22,57	4	2	6	5	4,25	2	
3	4	6,21	6,09	9	22,7	5	3	6	4	4,5	4	
4	2	5,78	5,44	9,91	18,7	9	8	1	6	6	8	
5	2	5,86	5,95	9,91	17,97	7	4	1	8	5	7	
6	2	5,82	5,44	9,91	18,7	8	9	1	6	6	8	
7	2	5,87	5,95	9,91	17,97	6	4	1	8	4,75	6	

Tabelle 21: Auswertung der zweiten Analysegruppe

Auch hier sind die Szenarien des formflexiblen Werkzeugs denen des konventionellen Prototypenwerkzeugbaus bezüglich der Bewertungsklasse „Kosten“ überlegen, wobei die Anwendungsvarianten des Szenariums 1 am kostengünstigsten sind, was erneut daran liegt, dass in Szenarium 1 ein sehr geringer Aufwand zur Optimierung der Oberfläche des Werkzeugs betrieben wird.

Die Rangfolge der Szenarien bezüglich der Bewertungsklassen „Zeit“, „Qualität“ und „Technologie“ ist gegenüber Analysegruppe 1 nur geringfügig verändert.

Im Gesamtranking schneidet Szenario 2 am besten ab. Anwendungsvariante 3 des Szenariums 3 erzielt den geteilten Platz 2 zusammen mit Anwendungsvariante 5 des Szenariums 1. Wiederum sind die Szenarien des konventionellen Prototypenwerkzeugbaus auf den hinteren Rängen, was hauptsächlich in ihrem sehr schlechten Abschneiden bezüglich der Bewertungsklassen „Kosten“ und „Zeit“ begründet ist.

In Tabelle 22 sind alle Anwendungsvarianten dargestellt, in denen die Herstellung von 1.000 Bauteilen vorgesehen ist.

Analysegruppe 3											
S	A	Kosten	Zeit	Qualität	Tech.	Rk. Kosten	Rk. Zeit	Rk. Qualität	Rk. Tech.	Av. Rk.	
2	3	9,33	7,8	9,91	23,92	1	1	1	1	1	1
3	5	9,29	6,65	9	22,57	2	2	6	3	3,25	2
3	6	7,51	6,09	9	22,7	3	3	6	2	3,5	3
4	3	6,58	5,44	9,91	18,7	7	6	1	4	4,5	7
5	3	6,72	5,95	9,91	17,97	5	4	1	6	4	5
6	3	6,62	5,44	9,91	18,7	6	6	1	4	4,25	6
7	3	6,75	5,95	9,91	17,97	4	4	1	6	3,75	4

Tabelle 22: Auswertung der dritten Analysegruppe

Alle auf Formflexibilität basierenden Szenarien sind hinsichtlich der Bewertungsklassen „Kosten“, „Zeit“ und „Technologie“ gegenüber nahezu allen Szenarien des konventionellen Prototypenwerkzeugbaus auch bei einer Stückzahl von 1.000 Bauteilen im Vorteil. Die Gründe für die vorderen Platzierungen dieser Szenarien sind hier hauptsächlich in den geringen Werkzeugkosten und der geringen Werkzeugherstellzeit zu sehen. Auffällig ist, dass die Differenz in den Punktbewertungen zwischen den Szenarien des formflexiblen Werkzeugsystems und den Szenarien des konventionellen Prototypenwerkzeugbaus bezüglich der Bewertungsklasse „Kosten“ gegenüber Analysegruppe 1 stark abgenommen hat. Ein Grund dafür ist die kürzere Prozesszykluszeit, die immer stärker ins Gewicht fällt, je höher die Anzahl der gefertigten Bauteile wird. Im Ranking der Bewertungsklasse „Qualität“ gibt es bezüglich Analysegruppe 1 keine Veränderungen.

Platz 1 im Gesamtranking belegt wiederum Szenario 2, gefolgt von den beiden Anwendungsvarianten 5 und 6 des Szenariums 3.

Tabelle 23 zeigt die Auswertung der Analysegruppe 4, die alle Anwendungsvarianten mit einer Losgröße von 10.000 Bauteilen beinhaltet.

Analysegruppe 4												
S	A	Kosten	Zeit	Qualität	Tech.	Rk. Kosten	Rk. Zeit	Rk. Qualität	Rk. Tech.	Av. Rk.		
2	4	9,67	7,8	9,91	23,92	1	1	1	1	1	1	
3	7	9,65	6,65	9	22,57	2	2	6	3	3,25	2	
3	8	8,52	6,09	9	22,7	3	3	6	2	3,5	3	
4	4	8,03	5,44	9,91	18,7	7	6	1	4	4,5	7	
5	4	8,12	5,95	9,91	17,97	5	4	1	6	4	5	
6	4	8,05	5,44	9,91	18,7	6	6	1	4	4,25	6	
7	4	8,13	5,95	9,91	17,97	4	4	1	6	3,75	4	

Tabelle 23: Auswertung der vierten Analysegruppe

Die Platzierungen der Szenarien in den jeweiligen Rankings verändern sich dabei gegenüber Analysegruppe 3 nicht.

Hier stellt sich jedoch die Frage, ob das für den Prototypenbau entwickelte Bewertungsschema zur Wirtschaftlichkeitsanalyse uneingeschränkt auf Szenarien anwendbar ist, in denen eine Serie von 10.000 Bauteilen gefertigt wird. Dazu muss konstatiert werden, dass z. B. in der Bewertungsklasse „Kosten“ die Gewichtungen der Werkzeugherstellkosten und die des Anteils der Werkzeugkosten an den Herstellkosten sehr viel geringer sein müssten, als in dem in Abschnitt 7.3 dargestellten Bewertungsschema. Dies ist damit zu begründen, dass bei einer solchen Losgröße fast ausschließlich die Stückkosten eines Bauteils von Interesse sind, weil diese den Großteil der Gesamtproduktionskosten ausmachen. Ebenso müssen die Gewichtungen in der Bewertungsklasse „Zeit“ angepasst werden. Beispielsweise ist bei der Herstellung einer Serie von 10.000 Bauteilen die Prozesszykluszeit gegenüber der Werkzeugherstellzeit deutlich höher zu gewichten als in dem hier zum Einsatz kommenden Schema.

Abbildung 41 und Abbildung 42 zeigen eine Gegenüberstellung der Gesamtkosten und der Gesamtzeit von der Herstellung des Werkzeugs bis zum Abrüsten der verwendeten Anlagen beispielhaft für die Szenarien 2 (gestrichelte Linie) und 7 (durchgezogene Linie). Aus der Abbildung geht hervor, dass die Gesamtkosten von Szenarium 7 ab einer Produktionsmenge von ungefähr 1.650 Stück geringer sind als die Gesamtkosten von Szenarium 2. Außerdem wird deutlich, dass die Gesamtherstellzeit des Szenariums 7 ab einer produzierten Stückzahl von ungefähr 1.800 Stück geringer ist als die des Szenariums 2.

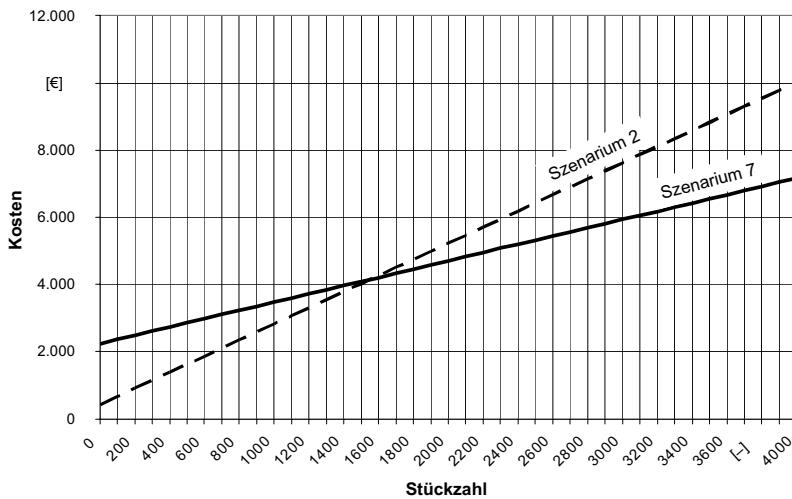


Abbildung 41: Vergleich der Gesamtkosten zwischen Szenario 2 und Szenario 7

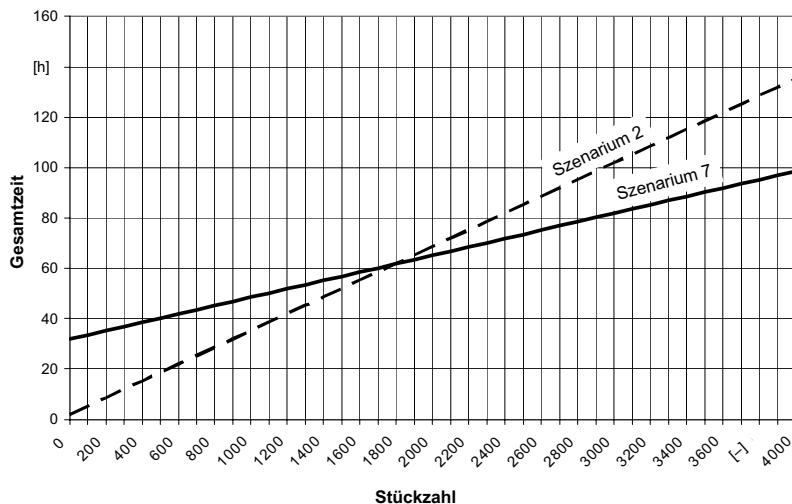


Abbildung 42: Vergleich der Gesamtzeit zwischen Szenario 2 und Szenario 7

Nachdem die oben beschriebenen Änderungen im Bewertungsschema bei den Anwendungsvarianten, die die Herstellung von 10.000 Bauteilen vorsehen, durchgeführt

sind, ergibt sich eine Überlegenheit der Szenarien des konventionellen Prototypenwerkzeugbaus gegenüber den Szenarien des formflexiblen Werkzeugsystems. Der Grund dafür ist das bessere Abschneiden der Szenarien des konventionellen Prototypenwerkzeugbaus bezüglich der Kriterien „Herstellkosten pro Stück“ und „Prozesszykluszeit“ bei einer Serienstückzahl von 10.000. Dennoch bleibt festzuhalten, dass das formflexible Werkzeugsystem bis zu einer maximalen Stückzahl zwischen 1.650 und 1.800 wirtschaftlicher einzusetzen ist als die betrachteten Verfahren des konventionellen Prototypenwerkzeugbaus.

Um dem Anwender des formflexiblen Werkzeugsystems eine Entscheidungsgrundlage hinsichtlich eines wirtschaftlichen Einsatzes zu geben, sind die obigen Auswertungen der Analysegruppen 1 bis 4 in Form einer Anwendungsmatrix in Tabelle 24 zusammengefasst. Diese beschreibt, unter welchen Voraussetzungen welche Anwendungsvariante der einzelnen Szenarien unter wirtschaftlichen Bedingungen verwendet werden soll.

1 Stück	K	Z	Q	G	100 Stück	K	Z	Q	G
K	S1A3	S3A1 S2A1	S2A1	-	K	S1A5	S2A2	S2A2	-
Z		S2A1	S2A1	-	Z		S2A2	S2A2	-
Q			S2A1	-	Q			S2A2	-
G				S2A1	G				S2A2
1.000 Stück	K	Z	Q	G	10.000 Stück	K	Z	Q	G
K	S3A5	S2A3	S2A3	-	K	S7A4	S7A4	S7A4	-
Z		S2A3	S2A3	-	Z		S7A4	S7A4	-
Q			S2A3	-	Q			S7A4	-
G				S2A3	G				S7A4
Legende:		K = Kosten		Z = Zeit		Q = Qualität		G = Gesamtleistung	

Tabelle 24: Anwendungsmatrix des formflexiblen Spritzgießwerkzeugs

Die Anwendungsmatrix ist unterteilt in vier kleinere Matrizen, mit denen sich die jeweils günstigste Anwendungsvariante unter gegebenen Produktionsbedingungen be-

stimmen lässt. Der Anwender legt die Produktionsbedingungen „produzierte Menge“ (1, 100, 1.000, 10.000) und die für ihn relevanten Prioritäten (Kosten = K, Zeit = Z, Qualität = Q, Gesamtleistung = G) fest. Damit ist bestimmt, ob nur eine der drei Bewertungsklassen bei der Auswahl der Fertigungsmethode zu berücksichtigen ist, ob zwei von ihnen oder alle drei (Gesamtleistung) von Bedeutung für den Anwendungsfall sind. Nach der Festlegung dieser Rahmenbedingungen kann die am besten geeignete Anwendungsvariante ermittelt werden. Folgendes Beispiel soll die Verwendung der Matrix veranschaulichen:

Es soll eine Serie von 1.000 Bauteilen hergestellt werden. Neben einer kostengünstigen Herstellung der Bauteile ist vor allem eine gute Oberflächenqualität notwendig. Damit sind die Prioritäten Kosten und Qualität von Relevanz. In der Matrix ist die Matrize links unten zu wählen (siehe Tabelle 24). Der Schnittpunkt zwischen der Zeile „K“ und der Spalte „Q“ enthält die einzusetzende Anwendungsvariante unter Berücksichtigung der vorherrschenden Produktionsbedingungen. In diesem Beispiel wird Szenarium 2 mit Anwendungsvariante 3 vorgeschlagen („S2A3“).

Befinden sich in einer Zelle der Matrix zwei Einträge, so konnten im Rahmen der Bewertung zwei mögliche Einsatzszenarien für die geforderten Produktionsbedingungen gefunden werden.

Insgesamt kann konstatiert werden, dass alle Szenarien des formflexiblen Werkzeugsystems im Bereich der Prototypen- und Kleinserienfertigung wirtschaftlicher sind als die damit verglichenen Szenarien des konventionellen Prototypenwerkzeugbaus. Die Technologie des formflexiblen Spritzgießwerkzeugs stößt ab einer zu produzierenden Menge von ca. 1.800 Stück derzeit wirtschaftlich an ihre Grenzen, da ab dieser Losgröße der konventionelle Prototypenwerkzeugbau auf Grund der steigenden Stückzahl und der damit verbundenen geringeren anteiligen Werkzeugkosten eine höhere Wirtschaftlichkeit besitzt. Dieses Ergebnis bestätigt eine zielgerichtete Entwicklung des formflexiblen, wiederverwendbaren Spritzgießwerkzeugs im Hinblick auf eine wirtschaftliche Einsetzbarkeit des Serienfertigungsverfahrens Spritzgießen bei kleinen Losgrößen bis hin zur Stückzahl „1“. Es ist damit als neuartige und viel versprechende Technologie des zukünftigen Prototypenwerkzeug- und Formenbaus zu sehen.



## 8 Schlussbetrachtung

### 8.1 Zusammenfassung

Die derzeitige Marktentwicklung hin zu individualisierten Produkten führt auch im Werkzeug- und Formenbau zu reduzierten Stückzahlen pro Bauteilvariante. Die Wirtschaftlichkeit des Spritzgießens ist damit durch hohe Werkzeugkosten eingeschränkt, da diese auf immer geringere Anzahlen von Bauteilen umgelegt werden können. Bisherige Lösungsmöglichkeiten durch Modularisierung bzw. Standardisierung von Werkzeugsegmenten bieten nur eine eingeschränkte Wiederverwendbarkeit. Das Konzept der Formflexibilität hingegen ermöglicht es, ein Werkzeug für unterschiedliche Geometrien zu nutzen. Dabei ist kein bzw. nur ein sehr geringer Materialaufwand bei der eigentlichen Werkzeugformgenerierung notwendig.

Die Herausforderung für diese Arbeit bestand in der Entwicklung eines innovativen, formflexiblen Werkzeugs für das Spritzgießen, das dem Anspruch genügt, verschiedene Geometrien mit dem gleichen Werkzeug abzuformen und damit der Zielsetzung hinsichtlich Flexibilität und Wiederverwendbarkeit aus der ersten Motivationsicht gerecht wird („sich wandelnde Marktsituation“, siehe Unterabschnitt 1.4). Dabei hat sich gezeigt, dass die Idee der Formflexibilität häufig an der Realisierung scheitert. Um einen allgemeingültigen, bisher nicht vorhandenen Ansatz und damit einen vereinfachten Zugang zur Formflexibilität anzubieten, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine entwicklungsunterstützende Methode zur Realisierung von Formflexibilität erarbeitet. Auf Basis einer detaillierten, angeleiteten und unterstützten Anforderungsanalyse bietet diese Methode über zwei definierte Phasen und unter Verwendung einer Korrelationsmatrix und Lösungstabelle physikalische Prinzipien zur Realisierung von Formflexibilität sowie Beispiele und Ideen zu deren technologischer Umsetzung an. Nach Anwendung dieser Methode konnte der in dieser Arbeit vorgestellte viel versprechende Ansatz eines formflexiblen Werkzeugs durch das Prinzip eines Nadelkissens realisiert werden. Dieses Kissen besteht aus einer Vielzahl von im Querschnitt quadratischen Nadeln, die gegeneinander verschiebbar gelagert sind. Zum Einprägen der Kavität in die Nadelkissenoberfläche wird bei diesem Werkzeugsystem eine Einstelleinheit verwendet, die mittels linearer Aktoren jede einzelne Nadel verschieben kann. Der automatische Einstellprozess basiert auf einer speziell entwickelten computerunterstützten Anwendung, die mit handelsüblichen CAD-Systemen gekoppelt wird. Aus den CAD-Daten des positiven Bauteils werden durch mehrere Rechenoperationen die Geometriedaten der benötigten Kavität (Negativgeometrie) automatisch ermittelt und visualisiert.

Die erzeugten Daten dienen daraufhin direkt zur Generierung der Ansteuersignale. Über entsprechende Schnittstellen kann ein handelsüblicher PC eingesetzt werden, um über die Einstellnadel die Kavität zu erzeugen. Mit dieser CAx-Kette und dem einhergehenden gesteigerten Automatisierungsgrad ist die Zielsetzung der zweiten Motivationssicht („Eigenschaften des Werkzeug- und Formenbaus“, siehe Unterabschnitt 1.4) erreicht.

Bei der automatischen Nadelpositionierung ist es besonders wichtig, bereits eingestellte Nadeln durch die Justage benachbarter Nadeln nicht unbeabsichtigt zu verstellen. Ein spezielles pneumatisch-mechanisches Spannprinzip erlaubt es, den gesamten Nadelbereich zu spannen, aber gleichzeitig gezielt die einzustellende Nadel aus dem Spannverbund zu lösen. Dieser Mechanismus arbeitet gekoppelt mit der Einstelleinheit. Des Weiteren wird ein zweiter Spannmechanismus dazu verwendet, die Nadeln während des eigentlichen Spritzvorgangs an der entsprechenden Position zu halten.

Spritzgießrelevante Funktionen, wie beispielsweise das Auswerferpaket, können in das formflexible Werkzeug integriert werden. Dazu ersetzen im Querschnitt quadratische Führungshülsen entsprechende Bereiche der Nadeln, in denen der Auswerferstift gelagert wird. Beim Einbringen einer neuen Kavität werden die Auswerferhülsen wieder durch Nadelpakete ersetzt und der Einstellvorgang dieser Kavität kann beginnen. In gleicher Weise erfolgt das Integrieren eines Angussystems. Dabei sind Düsen im Einsatz, die einen quadratischen Außenquerschnitt aufweisen. Hinterschnitte sind bei diesem Werkzeugkonzept über den Einsatz konventionell gefertigter Einlegekerne zu realisieren. Diese sind in das Nadelkissen einsetzbar und können nach erfolgtem Spritzvorgang gemeinsam mit dem Spritzling entnommen werden. Nachdem der Einlegekern wieder in den Nadelverbund eingesetzt wurde, erfolgt der Spritzvorgang erneut. Im Vergleich zum Einsatz eines Schiebers verlängert sich dadurch die Zykluszeit, was allerdings bei dem Einsatzgebiet dieses Werkzeugsystems im Prototypen- und Kleinserienbetrieb nur eine sekundäre Rolle spielt, da bei Kleinserien vor allem die Werkzeugkosten und nicht die Spritzkosten oder -zeiten ausschlaggebend sind.

Zur Optimierung der Abformgenauigkeit von beispielsweise Freiformflächen wurden zusätzliche Lösungsstrategien entwickelt, die die Nadelrasterung deutlich minimieren bzw. ganz verhindern. Ein Konzept sieht vor, nach dem Einstellen der Kavität einen anschließenden Frä- oder Schleifprozess durchzuführen. Die Wiederverwendbarkeit und Flexibilität des Nadelkissens ist dadurch nur minimal eingeschränkt, da die abzutragenden Zustelltiefen auf Grund des Einsatzes filigraner Nadelquerschnitte sehr gering ausfallen. Eine weitere Strategie zur Minimierung der Nadelrasterung beinhaltet die zusätzliche Verwendung sehr dünner, formgebender Schalen als Zwischenschichten.

Diese können in das Nadelkissen integriert werden und verhindern so die Nadelrasterung am Spritzling. Die formgebende Innenseite dieser Schale ist für die Geometrieerzeugung und Oberfläche des Spritzlings zu nutzen. Die Außenseite kann gezielt an die Nadelrasterung angepasst werden. Die Zwischenschalen sind allerdings nicht für unterschiedliche Geometrien einsetzbar. Da die Kosten dieser Schalen aber auf Grund des geringen Bauvolumens eine geringe Relevanz haben, kann in diesem Punkt auf eine Wiederverwendbarkeit verzichtet werden. Das formflexible Werkzeugsystem bietet folgende grundlegenden Vorteile beim Spritzgießen von Kleinserien und Prototypen:

- Erstmals kann ein einziges Werkzeug für weitgehend beliebige Produktvarianten im Bereich der maximalen Abmessungen des Werkzeugs (100 mm x 100 mm x 50 mm) verwendet bzw. wiederverwendet werden.
- Es ist möglich, die „time-to-market“ eines neuen Produkts durch frühzeitige Absicherung im Produktentwicklungsprozess zu reduzieren.
- Auf Formänderungen des Werkstücks kann schnell und kostengünstig reagiert werden.
- Das Spritzgießen von Kleinserien bis hin zur „Losgröße 1“ ist wirtschaftlich.

Alle Szenarien des formflexiblen Werkzeugkonzepts sind hinsichtlich deren realer Einsetzbarkeit durch statistisch abgesicherte Versuchsreihen untermauert. Für jedes Szenarium ist ein optimaler Parametersatz ermittelt worden, den es bei der zukünftigen Anwendung des formflexiblen Werkzeugs zu berücksichtigen gilt. Die Entscheidung, welches Anwendungsszenarium für gegebene Randbedingungen herangezogen werden sollte, ist somit technisch begründet, kann aber zusätzlich durch die in dieser Arbeit durchgeführte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und den Vergleich gegenüber konventionellen Herstellverfahren im Prototypenwerkzeugbau gefestigt werden. Dabei erfolgt eine Priorisierung hinsichtlich der drei Aspekte „Qualität“, „Kosten“ und „Zeit“ sowie „Technologie“. Bis zu einer Stückzahl von ca. 1.650 bis 1.800 Bauteilen konnte gezeigt werden, dass die Anwendung der Szenarien des formflexiblen Werkzeugkonzepts eine kostengünstige Fertigung von Spritzgießbauteilen im Prototypenbereich ermöglicht, womit den Zielsetzungen der dritten und letzten Motivationssicht vollständig entsprochen wird (berücksichtigen von „Defiziten im Bereich des Rapid Tooling“, siehe Unterabschnitt 1.4).

## 8.2 Ausblick

Die zukünftigen Anwendungsgebiete von Formflexibilität sind vielfältig. Neben dem Einsatz in der Umformtechnik oder im Bereich der Spannsysteme ist beispielsweise auch die Nutzung von Nadelkissenkonzepten im Feld der Automation und Robotik als flexible Greifer vorstellbar. Aber auch eine Verwendung des entwickelten Systems in anderen urformenden Bereichen, wie beispielsweise beim Formpressen bzw. Blas-extrudieren oder dem Formen von Schaumstoffen ist nicht auszuschließen. Besonders die Herstellung von Formverpackungen oder Spezialformteilen aus expandiertem Poly-propylen (EPP) und expandiertem Polystyrol (EPS) bietet unter Verwendung des form-flexiblen Werkzeugsystems ein hohes Potenzial. Die in dieser Arbeit entwickelte allgemeingültige Methode zur Realisierung von Formflexibilität stellt für zukünftige Forschergenerationen eine ideale Ausgangsbasis dar, um diesen innovativen Ansatz in anderen Bereichen der Produktionstechnik anforderungsgerecht zu nutzen und zu integrieren. Denkbar wäre beispielsweise die Gestaltung von formflexiblen Frä- oder Drehwerkzeugen, die einen Werkzeugwechsel überflüssig machen und den Herstell-prozess damit vereinfachen sowie beschleunigen.

Am formflexiblen Spritzgießwerkzeug selbst gilt es, zukünftig Optimierungen im Be-reich des Spannmechanismus und der Verfahrgeschwindigkeit des Einstellmechanismus durchzuführen, damit eine Erweiterung des formflexiblen Abformbereichs unter wirt-schaftlichen Aspekten erzielt wird.

Eine ergänzende Idee für das hier vorgestellte formflexible Werkzeugkonzept im Be-reich des Spritzgießens ist ein Ausbau der Anzahl der eingesetzten Nadelkissen. Das momentane System basiert auf einem einzelnen, flexiblen Bereich. Um jedoch zu-künftig die Möglichkeiten bezüglich der mit dem Werkzeug herstellbaren Teile zu er-höhen bzw. auf Einlegeteile verzichten zu können, ist eine Weiterentwicklung unabdingbar. Aus dieser Motivation heraus entstand die Vision des 6-seitigen form-flexiblen Werkzeugs. Basierend auf dem entwickelten einteiligen Nadelkissen können insgesamt sechs solcher Systeme so angeordnet werden, dass diese eine 3-dimensionale, flexible Werkzeugkavität ergeben. Über eine mechanische Kopplung der Nadelkissen wird das Schließen und Öffnen des Werkzeugs über die Spritzgießanlage initiiert (siehe Abbildung 43).

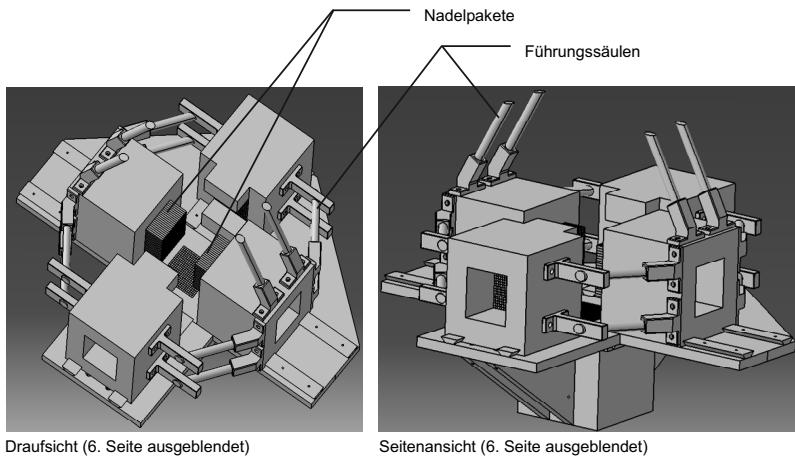


Abbildung 43: Ansatz zur Weiterentwicklung des formflexiblen Werkzeugkonzepts als 6-seitiges Werkzeug

Durch das neue 6-seitige Werkzeugkonzept kann, neben dem Verzicht auf Einlegekerne, zusätzlich ein Auswerfersystem eingespart werden, da dieses 6-seitige Werkzeugkonzept durch translatorisches, paralleles Öffnen in allen kartesischen Freiheitsgraden ein automatisches Entformen des Spritzlings gewährleistet. Allerdings ist der mechanische Aufwand bei einem 6-seitigen formflexiblen Werkzeug beträchtlich, was die Frage nach der Wirtschaftlichkeit dieses neuen Systems gerade im Hinblick auf den Einsatz in der Prototypenfertigung aufwirft. Auch dieser Aspekt ist durch zukünftige Arbeiten zu beleuchten.



## Literaturverzeichnis

### AUMÜLLER et al. 2002

Aumüller, B.; Schneider, W.; Elsnegg, K.; Krauss, H.; Krömmer, W.: Herstellung von Kleinserienwerkzeugen für die Blechumformung durch gespritzte Schichten in Schalenbauweise. In: Journal of High Temperature Material Processes (Hrsg.): International Thermal Spray Conference. Essen, 4.-6.03.2002. Düsseldorf: DVS-Verlag 2002. ISBN: 978-3-87155-783-5.

### BANGERT et al. 1980

Bangert, H.; Döring, E.; Lichius, U.; Kemper, W.: Bessere Wirtschaftlichkeit beim Spritzgießen durch optimale Werkzeugauslegung. 10. Kunststofftechnisches Kolloquium. Aachen, 12.-14. März 1980.

### BAYERISCHES LASERZENTRUM 2007

Seidel, S. (Bearb.): Metallfolien-LOM <<http://www.blz.org/index.php?id=82>> - 22.09.2007.

### BEHRENDT 2007

Behrendt, U.: e-Manufacturing – next generation of integrated production. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Rapid Manufacturing – Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung. Augsburg, 05.07.2007. 1. Aufl. München: Herbert Utz 2007, S. 3-1 bis 3-26. ISBN: 978-3-89675-086-0 (iwb Seminarberichte 86).

### BEITZ & GROTE 1997

Beitz, W.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. 19. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1997. ISBN: 3-540-62467.

### BOERS et al. 2004

Boers, S. H. A.; Schreurs, P. J. G.; Geers, M. G. D.: Optimum path and discrete 3D forming. Informationsbroschüre, Technische Universität Eindhoven (2004). <<http://www.optimalforming.com/jaarverslagen.html>> - 12.01.2008.

### BOERS et al. 2007

Boers, S. H. A.; Schreurs, P. J. G.; Geers, M. G. D.: Optimum Forming Strategies with a 3D Reconfigurable Die. Informationsbroschüre, Technische Universität Eindhoven (2007). <<http://www.optimalforming.com/jaarverslagen.html>> - 02.11.2007.

### BRANNER 2008

Branner, G.: Die Nase vorn im Wettbewerb. FORM+Werkzeug 17 (2008) 1/08, S. 46 - 49.

### BREITINGER 2003

Breitinger, F.: Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen. Diss. Technische Universität München (2002). München: Herbert Utz 2003. ISBN: 3-8316-0227-1. (iwb Forschungsberichte Band 177).

BREITINGER 2005

Breitinger, F.: Ist Rapid Tooling ohne RP-Technologie möglich? Innovation im Werkzeug- und Formenbau – Achtes 3D-Erfahrungsforum. Darmstadt, 11./12.05.2005, S. 1 bis 7, Vortrag 14.

BREUN 2006

Breun, F.: Produktionsstandort Deutschland: Stärken und Herausforderungen. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium Zukunft voraus – Denken für den Standort Deutschland. München, 9./10.03.2006. München: Herbert Utz 2006, S. 23-37. ISBN: 3-8316-0575-0.

BULLINGER et al. 2003

Bullinger, H.-J.; Warnecke, H. J.; Westkämper, E.: Neue Organisationsformen im Unternehmen – Ein Handbuch für das moderne Management. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2003. ISBN: 978-3-540-67610-2.

BUNDESAGENTUR FÜR ARBEIT 2006

Bundesagentur für Arbeit: Arbeitsmarkt in Zahlen – Beschäftigungsstatistik. Bonn: Bundeszentrale für politische Bildung 2006. (Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte nach Wirtschaftsgruppen in Deutschland).

BÜRKLE et al. 2008

Bürkle, E.; Ammer, D.; Würtele, M.: Spritzgießen. In: Wintermantel, E. et al. (Hrsg.): Medizintechnik – Life Science Engineering. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2008, S. 495-531. ISBN: 978-3-540-74924-0.

CAP 2006

Cap, C. H.: Verteilte Systeme – Threads & Synch. Vorlesungsskript, Heinz Nixdorf Stiftungslehrstuhl für Informations- und Kommunikationsdienste, Institut für Informatik Universität Rostock (2006).  
<[https://typo3/fileadmin/wwwiuk/download/Scriptum/verteilte-systeme/Uebungen/VertSys\\_Ue04\\_060613.pdf](https://typo3/fileadmin/wwwiuk/download/Scriptum/verteilte-systeme/Uebungen/VertSys_Ue04_060613.pdf)> - 01.11.2007.

CROWLEY et al. 2004

Crowley, J. L.; Clements, L. L.; Jacobson, T.: Low-Cost, Re-Formable, Multi-Use Tooling System for Composite Applications. SAMPE Journal Vol. 40 (2004) No. 1.

DIN 8580

DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth 2003.

DIN 17014

DIN 17014: Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen; Kurzangabe von Wärmebehandlungen. Berlin: Beuth 1976.

DOBLER et al. 2003

Dobler, H. D.; Doll, W.; Fischer, U.; Günter, W.; Heinzler, M.; Ignatowitz, E.; Vetter, R.: Fachkunde Metall. 54. Aufl. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel 2003. ISBN: 3-8085-1154-0.

**DUDENREDAKTION 2004**

Dudenredaktion (Hrsg.): Duden – Die deutsche Rechtschreibung, 23. Aufl. Mannheim: Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG 2004. ISBN: 3-411-04013-0.

**EHRLENSPIEL 2007**

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 3. Aufl. München: Carl Hanser 2007. ISBN: 978-3-446-40733-6.

**EHRLENSPIEL et al. 2003**

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. 4. Aufl. Berlin: Springer 2003. ISBN: 3-540-44214-6.

**FÄHRER 1999**

Fährer, J.: Anwendung von generativen Verfahren im Rapid Tooling. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Rapid Manufacturing – Methoden für reaktionsfähige Produktion. Augsburg, 14.10.1999. München: Herbert Utz 1999, S. 5-1 – 5-18. ISBN: 389675050X (iwb Seminarberichte 50).

**FESTO 2006**

Festo (Hrsg.): Fluidic Muscle – Die Funktionsweise. Esslingen: April 2006.

**FRAUNHOFER 2007**

Demmer, A. (Bearb.): Controlled Metall Build Up: Aufbau, Reparatur und Modifikation von Werkzeugen  
<<http://www.ikt.fraunhofer.de/Leistungsspektrum/Prozesstechnologie/Lasermaterialbearbeitung/Forschungsthemen/ControlledMetallBuildUp.jsp>> -

**FRAUNHOFER-IPT 2007**

Demmer, A. (Bearb.): Controlled Metall Build Up: Aufbau, Reparatur und Modifikation von Werkzeugen  
<<http://www.ikt.fraunhofer.de/Leistungsspektrum/Prozesstechnologie/Lasermaterialbearbeitung/Forschungsthemen/ControlledMetallBuildUp.jsp>> - 22.09.2007.

**FRAUNHOFER-IWS 2007**

Himmer, T. (Bearb.): MELATO – Werkzeugfertigung durch Fügen von Metallblechen <[http://www.iws.fhg.de/~melato/index\\_d-Dateien/frame.htm](http://www.iws.fhg.de/~melato/index_d-Dateien/frame.htm)> - 22.09.2007.

**FREYER 2004**

Freyer, C.: CMB-Verfahren bringt Zeit und Kostenvorteile – Schichtweise zur endgültigen Geometrie. VDI-Z Integrierte Produktion 146 (2004) 3, S. 24 - 25.

**GASTROW 1998**

Gastrow: Der Spritzgießwerkzeugbau in 130 Beispielen. 5. Aufl. München: Carl Hanser 1998.

GERTH 2006

Gerth, C.: Ein Beitrag zur Optimierung von elektrochemisch hergestellten Oberflächen im Werkzeug- und Formenbau. Diss. Universität Stuttgart (2006). 1. Aufl. Heimsheim: Jost Jetter Verlag 2006. ISBN: 3-936947-91-0. (IPA-IAO Forschung und Praxis 438).

GRIMM 2006

Grimm, M.: Der Werkzeugbau: Eine Schlüsselbranche der industriellen Fertigung in Zahlen und Bild. Frankfurt: VDMA 2006.

HAGEMANN 2007

Hagemann, F.: Rapid Tooling durch formflexible Werkzeuge im Spritzgießen. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): 3D-Erfahrungsforum – Innovation im Werkzeug- und Formenbau. München, 30.-31.05.2007. München: Herbert Utz 2007, S. 8-1 bis 8-10. ISBN: 978-3-89675-085-3 (iwb Seminarberichte 85).

HAIDER 2007

Haider, W.: Wasserdampf wird zum Schmiedehammer. Industrieanzeiger 129 (2007) 52, S. 22.

HENNIGS et al. 2004

Hennigs, D.; Wirth, I.; Stührmann, S.: ecoMold – Rapid-Tooling für den Spritzguss- und Al-Druckgusswerkzeugbau. RTe-Journal – Forum für Rapid Technologien, 1 (2004) 1/04, S. 1 - 11.

HERMLE 2007

Hermle, B.: Produktionstechnologie der Zukunft. VDI-Z Integrierte Produktion 149 (2007) 7/8, S. 30-32.

HOCK 1996

Hock, S.: Hochgeschwindigkeitsfräsen im Werkzeug- und Großformenbau. Diss. Technische Hochschule Darmstadt (1996). Aachen: Shaker 1996. (Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung D17).

HOFFMANN 2003

Hoffmann, H.: Visionen ins Visier genommen – Die Hochschule als Bindeglied zwischen Wissenschaft und Wirtschaft. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Grenzen überwinden – Wachstum der neuen Art. Garching, 27./28.02.2003. 1. Aufl. München: Herbert Utz 2003, S. 53 - 57. ISBN: 978-3831602223 (Münchener Kolloquium 7).

HOFMANN 2007

Hofmann, G.: LaserCUSING – Neue innovative Möglichkeiten der Werkzeugtemperierung. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): 3D-Erfahrungsforum – Innovation im Werkzeug- und Formenbau. München, 30./31.05.2007. München: Herbert Utz 2007, S. 9-1 – 9-17.

**HÖGL 2006**

Högl, H.: OO-Softwareentwicklung mit Python (OOSW). Skript für die Vorlesung Objektorientierte Software- und Systementwicklung, Fachhochschule Augsburg (2006). <<http://www.fh-augsburg.de/~hhoegl>> - 02.11.2007.

**HORVÁTH et al. 1994**

Horváth, P.; Lamla, J.; Höfig, M.: Rapid-Prototyping – der schnelle Weg zum Produkt. Harvard Business Manager 16 (1994) 3, S. 42-53.

**INNOVARIS 2007**

Discherl, M. (Hrsg.): Alchemy-Technologie: Die Evolution in der zerspanenden Fertigungstechnik <<http://www.innovaris.de/index.php?8>> - 22.09.2007.

**JOHANNABER & MICHAELI 2004**

Johannaber, F.; Michaeli, W.: Handbuch Spritzgießen. 2. Aufl. München: Carl Hanser 2004. ISBN: 3-446-22966-3.

**KLEINER & SMATLOCH 1991**

Kleiner, M.; Smatloch, C.: Flexible Werkzeuge zum Tiefziehen mit verstellbaren Stempeln. Bänder, Bleche, Rohre 32 (1991) 12, S. 33-37.

**KLEINER & KRUX 2001**

Kleiner, M.; Krux, R.: Entwicklung eines Verfahrens zur schnellen Herstellung von Tief- und Streckziehwerkzeugen aus Blechlamellen für die Prototypen- und Kleinserienfertigung (Rapid Tooling). 1. Aufl. Düsseldorf: Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH 2001. ISBN: 3-934238-37-8. (Forschungsberichte für die Praxis P 384).

**KLEPPMANN 2006**

Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung. 4. Aufl. München: Carl Hanser 2006. ISBN: 978-3-446-40617-9.

**KLOCKE & FREYER 2004**

Klocke, F.; Freyer, C.: Quick Manufacture, Repair and Modification of Steel Moulds Using Controlled Metal Build Up (CMB). Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE). Erlangen, 21.-24.09.2004, S. 579 - 587.

**KLOCKE et al. 2004**

Klocke, F.; Brosemer, M.; Ader, C.: Research on Layer Manufacturing Techniques at Fraunhofer. Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas (USA), 2.-4.08.2004, S. 26 - 37.

**KLUTE et al. 1999**

Klute, K.; Czerniecki, J. M.; Hannaford, B.: McKibben Artificial Muscles: Pneumatic Actuators with Biomechanical Intelligence. In: IEEE/ASME (Hrsg.): International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Atlanta, Georgia (USA), 19.-23.09.1999. IEEE Press 1999, S. 221-226. ISBN: 978-0780350380.

**KROTTMAIER 2001**

Krottmaier, J.: Versuchsplanung – Ein integraler Bestandteil der TQM Strategie. 3. Aufl. Köln: TÜV Media GmbH 2001. ISBN: 978-3824901791.

**LANGEN 1998**

Langen, M.: Einsatz des Rapid Prototyping und Rapid Tooling im Rahmen eines Simultaneous Engineering in der Spritzgießverarbeitung. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen (1998). Aachen: Wissenschaftsverlag 1998. ISBN: 3-89653-410-6. (IKV Berichte aus der Kunststoffverarbeitung 71).

**LINDEMANN 2002**

Lindemann, U.: Methoden der Produktentwicklung. Skript zur Vorlesung, Technische Universität München (2002).

**LINDEMANN 2005**

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Berlin, Heidelberg: Springer 2005. ISBN: 3-540-14041-7.

**LOHNER & SIEVERS 2001**

Lohner, A.; Sievers, T.: Das Präzisionslaserstrahlsintern (PLS) im Produktentstehungsprozess von Kunststoffbauteilen. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Rapid Manufacturing – Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile und Kleinserien. München: Herbert Utz 2001, S. 5-1 – 5-4. Seminarberichte 58).

**MASCHINENMARKT 2007**

Kuttkat, B. (Red.): Auftragsverfahren definiert Grenzen des Machbaren neu <<http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/spanendefertigung/maschinen/articles/67600/>> - 22.09.2007.

**MATRIX 2007**

Meintrup, H. (Geschäftsführer): Konturgerechtes Abformen in der Zerspanung <<http://www.matrix-innovations.com>> - 16.04.2008.

**MAYER 2007**

Mayer, R.: Laser-generativ hergestellte Modelle, Werkzeuge und Bauteile. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Rapid Manufacturing – Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung. Augsburg, 05.07.2007. 1. Aufl. München: Herbert Utz 2007, S. 6-1 bis 6-20. ISBN: 978-3-89675-086-0 (iwb Seminarberichte 86).

**MEINDL 2004**

Meindl, M.: Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing. Diss. Technische Universität München (2004). München: Herbert Utz 2004.

**MENGES & MOHREN 1991**

Menges, G.; Mohren, P.: Spritzgieß-Werkzeuge – Anleitung zum Bau von Spritzgieß-Werkzeugen. 3. Aufl. München: Carl Hanser 1991. ISBN: 3-446-15756-5.

**NANOTEC 2007**

Nanotec (Hrsg.): FAQ – Alles Wissenswerte über Schrittmotoren und deren Ansteuerung. Landsham bei München: 2007.  
<[http://www.nanotec.de/page\\_static\\_downloads\\_de.html](http://www.nanotec.de/page_static_downloads_de.html)> - 04.11.2007.

**NEUBERT & FRANKEN 2002**

Neubert, B.; Franken, T.: Artifical Muscles. Referatsthema, Universität Zürich (2002).

**NIEMANN et al. 2001**

Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.-R.: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2001. ISBN: 3-540-65816-5. (Maschinenelemente Band 1).

**OFFENLEGUNGSSCHRIFT 1929539 1969**

Offenlegungsschrift 1929539 Körper mit einer bestimmten Oberflächengestalt, zum Beispiel Formwerkzeug, und Verfahren zur Herstellung derselben (19.02.1970). Ford-Werke AG. Pr.: P 19 29 539.7. Körper mit einer bestimmten Oberflächengestalt, zum Beispiel Formwerkzeug, und Verfahren zur Herstellung derselben.

**OFFENLEGUNGSSCHRIFT 1945011 1970**

Offenlegungsschrift 1945011 Stufenförmig ausgebildetes Ziehwerkzeug (19.03.1970). Ford-Werke AG. Pr.: P 1945011.4. Stufenförmig ausgebildetes Ziehwerkzeug.

**OFFENLEGUNGSSCHRIFT DE 43 39 102 A1 1994**

Offenlegungsschrift DE 43 39 102 A1 Handhabungsvorrichtung zum mechanischen Greifen, Halten, Bewegen oder dergleichen; Handhaben von Gegenständen insbesondere für Handhabungsgeräte (01.06.1994). Sehrt, F. Pr.: DE 43 39 102 A 1. Handhabungsvorrichtung zum mechanischen Greifen, Halten, Bewegen oder dergleichen; Handhaben von Gegenständen insbesondere für Handhabungsgeräte.

**PALM 2006**

Palm, I. F.: MMS-Bearbeitung in der Praxis. FA MFS – Symposium der Berufsgenossenschaft Metall Süd. Triefenstein-Lengfurt, 20.01.2006.

**PATENTSCHRIFT DE 41 12 736 C 2 1994**

Patentschrift DE 41 12 736 C 2 Vorrichtung und Verfahren zum Erstellen einer Form mit variabler Gestalt (15.12.1994). Nissan Motor Co., Ltd. Pr.: P 41 12 736.6-24. Vorrichtung und Verfahren zum Erstellen einer Form mit variabler Gestalt.

PHAM et al. 2007

Pham, D. T.; Su, S. Z.; Li, M. Z.; Liu, C. G.; Massabé, F.: Digitally adjustable tooling technology for dieless forming and jigless assembly of panels. In: Bárto, P. J. et al. (Hrsg.): Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping. Leiria, Portugal, 24.-29.09.2007. Padstow Cornwall: TJ International Ltd 2007, S. 403-408. ISBN: 978-0-415-41602-3.

PIEVERLING 2003

Pieverling, J.-C. v.: Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling. Diss. Technische Universität München (2002). München: Herbert Utz Verlag 2003. ISBN: 3831602301. (Forschungsberichte iwb 178).

PRECHTL 2006

Prechtl, M.: Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien – System und Prozesstechnik. Diss. Friedrich-Alexander-Universität-Erlangen-Nürnberg (2006). 1. Aufl. Bamberg: Meisenbach 2006. ISBN: 978-3-87525-238-5.

PROTOFORM 2006

protoform (Hrsg.): Wirtschaftliche Kleinserien-Produktion per SPM-Verfahren Space Puzzle Molding®. Fürth: 2006.

REINHART & HAGEMANN 2007

Reinhart, G.; Hagemann, F.: Industrielle Produktion – weiterhin Jobmaschine Nr. 1 in Deutschland. In: Tönshoff, H. K. et al. (Hrsg.): acatech Workshop: Migration von Wertschöpfung. Hannover, 08.05.2007. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007, S. 17 bis 31. ISBN: 978-3-8167-7419-8 (acatech DISKUTIERT).

REMBOLD 2007

Rembold, R. W.: Einstieg in Catia V5 – Objektorientiert konstruieren in Übungen und Beispielen. 4., aktualisierte Aufl. München: Carl Hanser 2007. ISBN: 978-3-446-40974-3.

SCHAAF 2005

Schaaf, W. H.: Automatisiertes Modellieren großflächiger Sandgussformen. Diss. Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart (2004). Stuttgart: Jost-Jetter Verlag 2005. ISBN: 3-936947-47-3. (IPA-IAO Forschung und Praxis 409).

SCHUMPETER 1952

Schumpeter, J.: Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung. 5. Aufl. Berlin: Duncker und Humboldt 1952.

SCHWARZE 2007

Schwarze, D.: Kundenindividuelle Bauteile für industrielle und medizinische Anwendungen durch "Selective Laser Melting". In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): 3D-Erfahrungsforum – Innovation im Werkzeug- und Formenbau. München, 30./31.05.2007. München: Herbert Utz 2007, S. 6-1 bis 6-14. ISBN: 978-3-89675-085-3.

SEEFRIED 2005

Seefried, M.: Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern. Diss. Technische Universität München (2005). München: Herbert Utz 2005. (Forschungsberichte iwb 194).

SMATLOCH 1996

Smatloch, C.: Entwicklung eines numerisch einstellbaren Werkzeugsystems für das Tief- und Streckziehen. Diss. Universität Dortmund (1995). 1. Aufl. Aachen: Shaker 1996. ISBN: 3-8265-1465-3. (Berichte aus der Fertigungstechnik 290).

SPATH 2004

Spath, D.: Innovationsmotor wieder in Gang bringen. *wt Werkstatttechnik online* 2004 (2004) 1/2, S. 1.

SURFACE GENERATION LTD. 2007

Surface Generation Ltd. (Hrsg.): Reconfigurable Pin Tooling – Reducing Time & Cost to Market for Large & Low Volume Components. Leicestershire: 2007.

THOMAS 2006

Thomas, D.: Kleiner Kappawinkel – Hochvorschubfräsen auf konventionellen Maschinen. *FORM+Werkzeug* 15 (2006) 1, S. 46-47.

TRAPP 2007

Trapp, W. G.: Small Batch Production for Plastic Parts by "SPM". *Industriethemen* 24 (2007) 01/07, S. 9 - 10.

UHLMANN 2003

Uhlmann, E.: Wandel der Fabrik durch Produktindividualisierung. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Marktchance Individualisierung. 1 Aufl. Berlin: Springer 2003, S. 119-127. ISBN: 3540005943.

VAIL 1994

Vail, N.: Preparation and Characterization of Microencapsulated, Finely Divided Ceramic Materials for Selective Laser Sintering. Diss. University of Texas at Austin (1994). Austin, Texas (USA): 1994.

VDI 2221

VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth 1993.

WESTKÄMPER et al. 2000

Westkämper, E.; Schraff, R. D.; Schaaf, W. H.: ROBOTYPING – Neue Rapid-Prototyping-Verfahren mit Industrierobotern. *wt Werkstatttechnik online* 90 (2000) 5, S. 217 - 219.

WILDEMANN et al. 2007

Wildemann, H.; Ann, C.; Broy, M.; Günther, W. A.; Lindemann, U.: Plagiatsschutz – Handlungsspielräume der produzierenden Industrie gegen Produktpiraterie. München: TCW Transfer-Centrum GmbH & Co. KG 2007.

WINTERMANTEL et al. 2008a

Wintermantel, E.; Krampe, E.; Jümpertz, I.: Kunststoffverarbeitung für die Medizintechnik. In: Wintermantel, E. et al. (Hrsg.): Medizintechnik – Life Science Engineering. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2008a, S. 489-494. ISBN: 978-3-540-74924-0.

WINTERMANTEL et al. 2008b

Wintermantel, E.; Hoffstetter, M.; Ammer, D.; Ebert, K.-H.: Mikrospritzgießen. In: Wintermantel, E. et al. (Hrsg.): Medizintechnik – Life Science Engineering. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2008b, S. 615-637. ISBN: 978-3-540-74925-7.

WOHLERS 2007

Wohlers, T.: Wohlers Report 2007. Fort Collins, Colorado 80525 USA: Wohlers Associates 2007. ISBN: 0-9754429-3-7.

YANAN 2006

Yanan, C.: Der chinesische Markt für den Werkzeug- und Formenbau. China Werkzeugbau Formenbau Synergiebörs. Frankfurt, 29.11.2006.

ZÄH 2008

Zäh, M. F.: Spanende Fertigungsverfahren. Skript zur Vorlesung, Technische Universität München (2008).

ZÄH & HAGEMANN 2006

Zäh, M. F.; Hagemann, F.: Individualisierte Produkte durch formflexible Werkzeuge. VDI-Z Integrierte Produktion 148 (2006) 3, S. 37-40.

ZÄH & BRANNER 2007

Zäh, M. F.; Branner, G.: Optimierung des indirekten Metallasersinterns (IMLS) mit Hilfe von neuartigen Simulationsmethoden. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): 3D-Erfahrungsforum – Innovation im Werkzeug- und Formenbau. München, 30./31.05.2007. 1. Aufl. München: Hebert Utz 2007, S. 7-1 bis 7-11. ISBN: 978-3-89675-085-3 (iwb Seminarberichte 85).

ZÄH et al. 2006a

Zäh, M. F.; Hagemann, F.; Sigl, M.: Weniger Risiken – Der Weg zum Rapid Tooling. FORM+Werkzeug 15 (2006a) 1, S. 50 - 53.

ZÄH et al. 2007a

Zäh, M. F.; Branner, G.; Hagemann, F.: Chancen und Risiken des Werkzeug- und Formenbaus im globalen Wettbewerb. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): 3D-Erfahrungsforum – Innovation im Werkzeug- und Formenbau. München, 30./31.05.2007. 1. Aufl. München: Herbert Utz 2007a, S. 1-1 bis 1-17. ISBN: 9783896750853 (iwb Seminarberichte 85).

ZÄH et al. 2006b

Zäh, M. F.; Hagemann, F.; Branner, G.; Lutzmann, S.: Entwicklungstrends im Bereich Rapid Manufacturing. Berlin: Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb 2006b.

ZÄH et al. 2007b

Zäh, M. F.; Hagemann, F.; Branner, G.; Schilp, J.: Formflexibilität als Ansatz zur Wiederverwendbarkeit – Auslegung und Herstellung formflexibler Werkzeuge für das Spritzgießen. *wt Werkstattstechnik online* 97 (2007b) 11-12, S. 837-841.

ZÄH et al. 2006c

Zäh, M. F.; Hagemann, F.; Kahnert, M.; Meindl, M.; Müller, A.; Seefried, M.; Sigl, M.: *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien – Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren*. 1 Aufl. München: Carl Hanser 2006c. ISBN: 3-446-22854-3.



## Anhang

### Aufbau des Programms “FlexEdit”

Das Programm „FlexEdit“ besitzt auf Grund der Komplexität der Aufgabe einen sehr umfangreichen Quellcode und zahlreiche Programmsprünge zwischen den einzelnen Programmbausteinen.

Um sich die Abläufe des Programms besser vor Augen führen zu können, ist das Programm in Programmmodulen, Klassen, Klassenmodule und Beziehungen gegliedert (siehe Abbildung 44).

- Programmmodul:

Ein Modul ist in diesem Fall eine eigenständige Python-Datei mit der Wildcard „\*.py“, die einen beliebigen Programmiercode enthält und von anderen Modulen aufgerufen werden kann.

- Klasse:

In einem beliebigen Modul können, sofern objektorientiert programmiert wird, beliebig viele Klassen implementiert werden.

- Klassenmodule:

In diesen Programmbausteinen werden die eigentlichen Aktionen innerhalb einer Klasse ausgeführt. Dabei können beliebig viele Klassenmodule erstellt werden. Der große Vorteil bei der Verwendung von Klassenmodulen liegt darin, die Übersichtlichkeit innerhalb des Source-Codes zu erhöhen und die bessere Lesbarkeit für den Programmierer zu garantieren.

- Beziehungen:

Beziehungen sind Verknüpfungselemente, die die einzelnen Programmmodulen, Klassen und Klassenmodule miteinander verbinden.

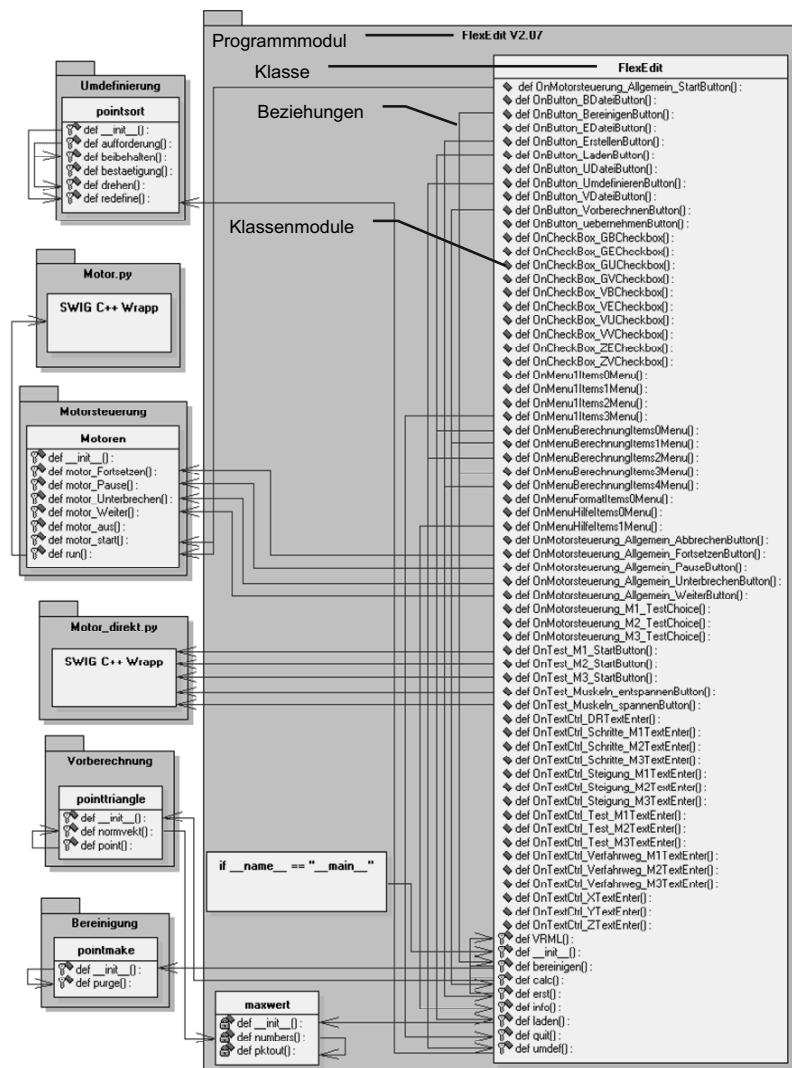


Abbildung 44: Übersicht des Programms FlexEdit (Unified-Modelling-Language-Diagramm)

## Hauptprogramm

Mit Hilfe des Hauptprogramms ist es möglich, auf Basis einer CAD-Datei des herzustellenden Bauteils die Koordinaten der Werkzeugkavität zu ermitteln. Dabei dient das Hauptprogramm der Verknüpfung der einzelnen Berechnungsmodule und Optimierungsalgorithmen und stellt die Benutzeroberfläche (GUI) zur intuitiven Bedienung der Software zur Verfügung. Neben diesen Funktionalitäten ist das Hauptprogramm ebenfalls Schnittstelle zu einer beliebigen CAD-Software, da auf dem standardisierten STL-Format aufgebaut wird. Damit es möglich wird, das Hauptprogramm permanent als Prozess zur Verfügung zu stellen und gleichzeitig einen Nebenprozess arbeiten zu lassen (z. B. die Motorsteuerung), ist das so genannte Threading notwendig. Darunter wird die Erstellung von Leichtgewichtprozessen verstanden, die eine Parallelisierung der Arbeitsschritte ermöglichen.

Für die Erstellung einer Werkzeugkavität benötigt das Hauptprogramm in erster Linie die folgenden 5 Module:

- FlexEdit (Kernprogramm)
- Vorberechnung (Koordinatengenerierung)
- Umdefinierung (Koordinatentransformation)
- Bereinigung (Fehlerbehebung)
- Motorsteuerung (automatisiertes Verfahren)
- Motor direkt (manuelles Verfahren)

Weitere Module dienen der Verarbeitung und Darstellung der GUI und werden daher nicht explizit betrachtet. Durch die objektorientierte Programmierung besteht das eigentliche Hauptprogramm lediglich aus den folgenden Zeilen:

```
if __name__ == "__main__":  
    app = wx.PySimpleApp(0)  
    wx.InitAllImageHandlers()  
    Frame_1 = FlexEdit(None)  
    app.SetTopWindow(Frame_1)  
    Frame_1.Show()  
    app.MainLoop()
```

Diese beinhalten den Aufruf der GUI, wobei dies in einer Endlos-Schleife geschehen muss, damit das Programm permanent zur Verfügung steht. Das eigentliche Kern-

programm der GUI wird hierbei mit dem Aufruf der Klasse „FlexEdit“ aktiviert. Diese Klasse definiert zu Beginn entsprechende Methoden. Darunter werden beispielsweise die komplette Menüführung in der GUI inklusive der benötigten Untermenüs sowie die Auswahlreiter zur Programmnutzung verstanden. Zusätzlich werden in diesem Schritt Bedien-, Eingabe- und Visualisierungselemente definiert und mit den entsprechenden Verknüpfungen zu den ausführenden Funktionen verbunden. Im Anschluss an die Definition der oben beschriebenen Elemente folgt die Zuweisung der GUI-Elemente mit den entsprechenden Programmfunctionen. Beispielsweise wird festgelegt, welche eingegebenen Daten durch den Button „Einstellungen speichern“ gesichert werden und in welcher Form diese später erneut aufgerufen werden können. Dazu wird eine Datei erzeugt, in der die eingegebenen Daten bzw. Variablenwerte codiert werden. Durch entsprechende Decodierung lässt sich eine Zuweisung der Inhalte der Datei zu den einzelnen Variablen im Falle der „Einstellung Laden“-Funktion durchführen. Im Falle eines Eingabeelements überprüft die Klasse „FlexEdit“ die korrekte Eingabe des Datenformats und weist den Benutzer gegebenenfalls auf eine falsche Eingabe hin. Im Fall einer korrekten Eingabe wird diese von der Klasse „FlexEdit“ bestätigt. Das Hauptprogramm bietet zusätzlich die Möglichkeit, für die erstellten Dateien einen Speicherort anzugeben. Sollte der Benutzer keinen expliziten Speicherort angeben, so definiert die Klasse „FlexEdit“ einen Default-Speicherort. Eine Ausnahme hierbei stellt die Möglichkeit der Speicherortübernahme für alle Teilschritte in der Klasse dar. Sollte kein Speicherort ausgewählt worden sein, so weist die Klasse „FlexEdit“ darauf hin, dass eine Übernahme des Speicherorts nicht möglich ist. Zusätzlich bietet die Klasse „FlexEdit“ eine Methode, die beim Laden einer Datei die entsprechenden Formattierungen überprüft und einen eventuellen Abbruch auf Grund von bestimmten Bedingungen initiiert. Ein vom Benutzer eingeleiteter Abbruch beim Einstellvorgang wird ebenfalls über die Klasse „FlexEdit“ verwaltet. Dabei werden alle bislang angefahrenen Koordinaten aus der ursprünglichen Ansteuerdatei entfernt und die so editierte Datei programmintern gespeichert. Beim Betätigen der Schaltfläche „Fortsetzen“ kann diese Datei erneut geladen und der Einstellvorgang fortgesetzt werden. Neben diesen definierenden und überprüfenden Funktionalitäten ermöglicht diese Klasse zusätzlich das Laden einer STL-Datei in das Hauptprogramm. Dazu wird eine Liste definiert, in der die eingelesenen STL-Koordinaten gespeichert werden. Diese Liste ist in Form einer dynamischen Matrix aufgebaut. Ein Leerzeichen dient als Erkennungssymbol zum Sprung in ein neues Listenfeld, das „CR“ dient als Erkennungssymbol zum Sprung in eine neue Zeile. Dieses Vorgehen wird so lange durchgeführt, bis das Ende der Datei erreicht ist. Eine weitere Information, die die Klasse „FlexEdit“ dem Anwender zur Verfügung stellt, ist die Ausgabe der Gesamtanzahl der eingelesenen Dreiecke sowie aller Koordinatenpunkte.

Grundsätzlich kann die STL-Datei in zwei genormten Formaten erstellt werden:

- Binary: Enthält die Punktkoordinaten in einer binären Form.
- ASCII: Die Punkte der Dreiecke werden hier als ASCII-Zeichen dargestellt, was ein Auslesen der Koordinaten vereinfacht und hier Verwendung findet.

Eine ASCII-Datei enthält immer die beschreibenden Eckpunkte eines Dreiecks sowie den Normalenvektor auf die Dreiecksfläche. Eine ASCII-STL-Datei ist folgendermaßen aufgebaut:

```
solid RAD_SX
facet normal -1.000000e+00 0.000000e+00 0.000000e+00
  outer loop
    vertex -5.000000e+00 -2.414582e+01 -2.317820e+01
    vertex -5.000000e+00 -3.150831e+01 -2.464195e+01
    vertex -5.000000e+00 -3.256747e+01 -2.322411e+01
  endloop
endfacet
```

Der hier abgebildete Testabschnitt beinhaltet lediglich ein Dreieck. Für jedes weitere Dreieck ist eine Wiederholung der gesamten Formatierung notwendig, um im Anschluss die neuen Punktkoordinaten zu füllen.

In einer ASCII-STL-Datei sind sowohl die Koordinaten der Dreiecksnormalen (facet normal) als auch die Koordinaten der Dreieckspunkte (vertex) enthalten. Um diese unterschiedlichen Koordinaten zu identifizieren, wird die Klasse „maxwert“ von der Klasse „FlexEdit“ aufgerufen. Diese orientiert sich an den oben genannten Schlüsselwörtern. Welche Werte die Klasse ausliest, hängt vom Aufruftyp ab. So werden beim Aufruf durch den Benutzer alle Koordinaten der Dreieckspunkte ausgelesen. Für die spätere Identifizierung der abzubildenden Ausrichtung der Kavität beim Vorberechnen kann die Klasse „maxwert“ von der Klasse „Pointtriangle“ aufgerufen werden und gibt in diesem Fall die dort benötigten Normalenvektoren wieder. Dabei wird von der Klasse „maxwert“ die dynamisch erzeugte Matrix als Ausgangsbasis verwendet. In dieser Matrix sind alle Daten in Form einer Zeichenkette (string) und nicht als Gleitkomma-zahlen abgelegt, was für die spätere Verarbeitung von Relevanz ist. Hierbei findet das Modul „pktout“ der Klasse „maxwert“ Verwendung. Dieses Modul detektiert in der dynamischen Matrix das Schlüsselwort „vertex“ und speichert die drei danach folgenden Zelleninformationen in eine Liste. Jeder Zelleninhalt ist repräsentativ für den Achswert eines Koordinatenpunkts. Zusätzlich wandelt das Modul „numbers“ die

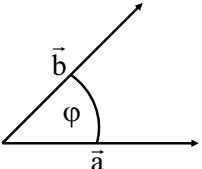
String-Zeichenkette in eine Gleitkommazahl um. Durch die Aneinanderreihung aller Achswerte entsteht eine Liste, die zur weiteren Verarbeitung der Koordinaten verwendet wird und klassenübergreifend zur Verfügung steht.

Neben der Möglichkeit, eine STL-Datei zu laden, beinhaltet die Klasse „FlexEdit“ den Aufruf der oben genannten Module. Zum Ausführen des Moduls „Vorberechnung“ werden verschiedene Hilfsfunktionen von der Klasse „FlexEdit“ bereitgestellt. Beispielsweise generiert „FlexEdit“ den Dateinamen zum Speichern der Ergebnisdaten der Vorberechnung. Dazu wird die aktuelle Windows-Systemzeit verwendet, um daraus einen eindeutig identifizierbaren Dateinamen zu bilden. Basis für das Vorberechnen ist die oben genannte Koordinatenliste und die vom Benutzer einzugebenden, für diesen Schritt relevanten Parameter des formflexiblen Werkzeugs (z. B. Nadelbereich und Nadelstärke). Sollte einer dieser Parameter nicht definiert sein, so weist die Klasse „FlexEdit“ den Benutzer darauf hin und verlangt die fehlende Eingabe. Zum eigentlichen Starten der Vorberechnung wird die Klasse „Pointtriangle“ aus der Klasse „FlexEdit“ aufgerufen. Diese Klasse wird im Folgenden beschrieben.

## **Vorberechnung**

Das Programmmodul „Vorberechnung“ wird über den Aufruf in der Klasse „FlexEdit“ ins Hauptprogramm eingebunden und hat die Aufgabe, die Punkte mit den gültigen Höhendaten aus den STL-Dreiecken zu berechnen und diese in Abhängigkeit der Nadeldicke und der Formabmaße bereitzustellen. Da beim Werkzeug- und Formenbau ein Werkzeug aus mindestens zwei Formhälften besteht und demnach mindestens eine Trennebene besitzt, wird diese Trennebene als Nullebene für die Auswahl der Formhälfte bzw. die Bestimmung von relevanten Höhendaten verwendet. Die Definition der Klasse „Pointtriangle“, die wiederum die Module „normvekt“ und „point“ enthält, dient zur Identifizierung der relevanten Koordinaten. Im Modul „normvekt“ werden alle Normalenvektoren der STL-Datei selektiert. Dazu wird die dynamische Matrix, die in der Klasse „maxwert“ erzeugt wurde, eingelesen. In diesem Fall dient das Schlüsselwort „normal“ zur Identifizierung der relevanten Koordinaten-Tripel. Alle gefundenen Koordinaten werden, wie auch beim Laden im Modul „pktout“, in einer Liste abgespeichert und durch das Modul „numbers“ in Gleitkommazahlen umgewandelt. Das Modul „normvekt“ greift diese umgewandelte Liste auf, sortiert diese Daten nach Vorzeichen und speichert alle Höhenkoordinaten der Normalenvektoren mit den jeweils zugehörigen Dreieckskoordinaten in eine Liste. Dadurch kann für jede Werkzeughälfte ein relevantes Koordinatenspektrum erstellt werden. Die Matrix mit den aussortierten Dreieckskoordinaten wird daraufhin an das Modul „point“ der Klasse „Pointtriangle“ weiter gegeben. Das Modul „point“ füllt diese Dreiecke im Folgenden mit den der

Nadelrasterung entsprechenden Punktkoordinaten. Dazu werden die Eckpunktkoordinaten des ersten Dreiecks lokal in Variablen gespeichert, um den Ursprungszustand für nachfolgende Berechnungen zu sichern. Zwischen den Eckpunkten wird jeweils ein Vektor aufgespannt. Der Vektor 12 dient als Richtungsangabe für die Rasterung zwischen den Punkten 1 und 2. Auf diesem Vektor werden im Abstand der Nadelrasterung Koordinatenpunkte generiert und in eine Textdatei geschrieben. Nach dem Erreichen des Punkts 2 wird der Vektor 12 parallel um die Nadelstärke verschoben.



$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos \varphi (\vec{a}; \vec{b}) \quad \text{Definition eines Skalars}$$

$$\cos \varphi = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|} = \frac{a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \cdot \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}} \quad \begin{matrix} \text{Eingeschlossener} \\ \text{Winkel zwischen 2} \\ \text{Vektoren} \end{matrix}$$

Abbildung 45: Skalarprodukt zur Ermittlung des Winkels zwischen zwei Vektoren

Dazu wird mittels des Skalarprodukts zwischen Vektor 1'2' und Vektor 1'3' sowie zwischen Vektor 1'2' und Vektor 2'3' der eingeschlossene Winkel berechnet, über den unter Verwendung von trigonometrischen Funktionen der neue Schnittpunkt 1' und der Schnittpunkt 2' gebildet werden kann. Zwischen diesen beiden Punkten wird ein Vektor 1'2' aufgespannt, der wiederum mit der Nadelrasterung belegt wird. Die Koordinaten werden ebenfalls in die Textdatei gespeichert. Dieses Vorgehen wird für jedes Dreieck solange durchgeführt, bis die Punkte 1', 2' und 3' aufeinander fallen. In diesem Fall wird mit dem nächsten relevanten Dreieck begonnen. Am Ende der Matrix ist die Formgenerierung über die Nadelrasterung fertig gestellt. Aus der Approximation der Oberfläche über Dreiecke (STL-Format) ist so eine Punktwolke generiert worden, die für die spätere Verarbeitung verwendet werden kann.

### Umdefinierung

Das Modul „Umdefinieren“ dient dazu, die berechneten Punktkoordinaten an die real vorhandene Werkzeugparametrik anzupassen. Damit ist beispielsweise gemeint, die berechneten Koordinaten mittig in die formflexible Oberfläche einzubetten. Daher muss eine Koordinatentransformation durchgeführt werden. Zusätzlich werden in diesem Modul die bereits durch das Modul „Vorberechnen“ mit der Nadelrasterung belegten

Dreiecke zueinander angeordnet, um eine entsprechende Nadelrasterung auch zwischen den Dreiecksanten zu gewährleisten.

Folgender Algorithmus kommt beim Umdefinieren zur Anwendung: In einem ersten Schritt wird kontrolliert, ob die Ausrichtung der Punktwolke identisch mit dem Koordinatensystem der Werkzeughälfte ist. Wenn dies nicht der Fall ist, kommt es zu Fehlern bei der virtuellen Erstellung der Kavität. Da das ursprünglich im CAD-System verwendete Koordinatensystem des Bauteils durch die Reduktion auf eine Punktwolke bzw. das STL-Datenformat nicht mehr bekannt ist, dies aber für das Einbetten in die Werkzeugkavität benötigt wird, muss vom Programm eine Annahme hinsichtlich des Koordinatenursprungs und der -ausrichtung getroffen werden. Dabei genügt es in diesem Abschnitt, die z-Achse zu betrachten, da lediglich eine Einstellung der Nadeln in z-Richtung möglich ist bzw. die x- und y- Achsen wegen des symmetrischen Aufbaus des formflexiblen Werkzeugs vertauschbar sind. Zielführend ist es daher, den Mittelpunkt des Bauteils zu definieren, der als neuer, bekannter Koordinatenursprung dient. Im Falle einer falschen Ausrichtung der z-Achse müssen an diesen Punkt alle z-Koordinaten gespiegelt werden. Die x- und y-Koordinaten können dabei vernachlässigt werden. Dazu wird aus dem Betrag der minimalen und maximalen Höhe des Bauteils die Mitte in z-Richtung gebildet. Parallel zur Werkzeugoberfläche (xy-Ebene) und durch diesen errechneten Punkt wird eine Ebene aufgespannt, die als Spiegelfläche aller Koordinaten dient. Bei einer Übereinstimmung der Koordinatensysteme wird die Kavität fehlerfrei erstellt. Im Falle einer notwendigen Koordinatentransformation bietet ein Popup-Fenster die Möglichkeit des Spiegelns an der gefundenen Bauteilmittie. Nach erfolgreicher Koordinatentransformation werden die geänderten Koordinaten für die weitere Bearbeitung bereitgestellt. Darunter wird die Anpassung der Koordinaten an das reale Nadelraster verstanden.

Nach dem Modul „Vorberechnung“ sind alle Dreiecke der STL-Datei mit einem entsprechenden Nadelraster belegt. Damit ist aber noch nicht gewährleistet, dass die gesamte Oberfläche des Bauteils in das Nadelraster einzubetten ist. Durch eine Modulo-Operation wird jeder Koordinatenpunkt in x- und y-Richtung hinsichtlich Teilbarkeit durch die Nadelrasterung überprüft. Der Restwert dieser Modulo-Operation dient als Entscheidungsgrundlage für die Richtung des Verschiebens des Koordinatenpunkts auf der betrachteten Koordinatenachse (x- und y-Achse). Dadurch entsteht eine neue Geometrie, die durch das reale Werkzeug abbildbar wird (siehe Abbildung 46).

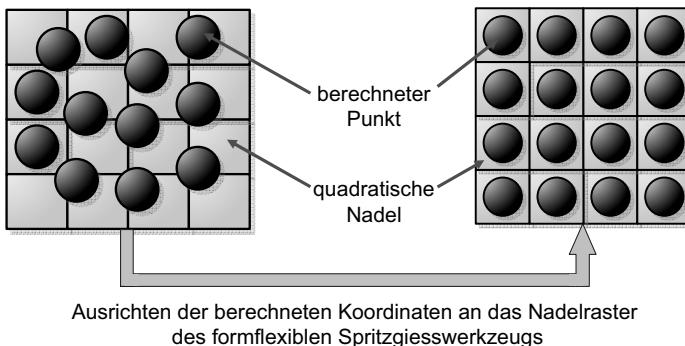


Abbildung 46: Anpassung der Koordinaten an die Nadelrasterung

Die oben durchgeföhrte Einschränkung der z-Koordinatenbetrachtung muss zum Einbetten der Werkzeugkavität in die reale Werkzeugoberfläche aufgehoben werden. Der reale, formflexible Bereich liegt per Definition durch das Programm im ersten Quadranten des xy-Koordinatensystems. Da der Ursprung des Bauteilkoordinatensystems durch die oben beschriebene Vorgehensweise nicht bekannt ist und damit auch in den anderen Quadranten liegen könnte, muss erneut durch eine Koordinatentransformation die richtige Lage des Bauteils sichergestellt werden. Dazu wird sowohl in x- als auch in y-Richtung die Bauteilmittie auf Basis der Minimal- und Maximalkoordinaten errechnet. Der Abstand zwischen der errechneten Bauteilmittie und der im ersten Quadranten liegenden Werkzeugmittie dient im Folgenden der Verschiebung aller Koordinaten. Somit ist gewährleistet, dass nach dieser Anpassung eine Punktwolke vorliegt, die genau in der Mitte des formflexiblen Werkzeugs liegt. In einem weiteren Schritt kann nun überprüft werden, ob die in den ersten Quadranten verschobene Geometrie diesen verlässt. Sollte dies der Fall sein, wird das Modul „Umdefinierung“ mit einer entsprechenden Fehlermeldung abgebrochen. Andernfalls kann mit dem Generieren der kompletten Werkzeugkoordinatendatei begonnen werden. Dazu erstellt das Programm ein Rechteck um die Bauteilgeometrie. Außerhalb dieses Rechtecks werden alle Nadelkopfkoordinaten abgespeichert und mit dem Wert „0“ in z-Richtung versehen. Dies beschleunigt den späteren Vorgang der Datenverarbeitung des Bauteils. Dabei wird der innere Bereich des Rechtecks betrachtet und überprüft, ob eine Koordinate bereits in der Bauteilgeometrie enthalten ist und demnach einen z-Wert besitzt oder noch mit dem z-Wert „0“ belegt werden muss. So entsteht eine Datei, die alle Koordinaten des gesamten formflexiblen Bereichs beinhaltet. Zusätzlich erzeugt die Klasse FlexEdit nach erfolgreichem Beenden des Moduls „Umdefinierung“ eine entsprechende Information im Berichtsfenster.

## **Bereinigung**

Das bisher beschriebene Vorgehen garantiert die Ausrichtung des Bauteils im formflexiblen Werkzeug und die Anpassung an das Nadelraster. Allerdings wird keine Überprüfung der für das Spritzgießen relevanten Koordinaten durchgeführt. Das Modul „Bereinigung“ dient daher dem Entfernen doppelter Koordinatenpunkte in x- und y-Richtung, der Anpassung der z-Koordinaten an die Werkzeugtrennebene sowie dem Auffüllen fehlender z-Koordinaten durch die oben beschriebenen Transformationen. Ein erster Schritt im Modul „Bereinigung“ besteht darin, die Koordinatenliste nach x- und y-Koordinaten zu sortieren. Dies ermöglicht ein schnelleres Auffinden doppelter Wertetripel. Ein Suchalgorithmus identifiziert für gleiche x-Werte (demnach zeilenweise) doppelt vorkommende y-Werte. Sobald ein doppelter y-Wert gefunden ist, muss der für das Spritzgießen relevante z-Wert identifiziert werden. Da es sich beim Spritzgießen um das Abbilden von Außengeometrien handelt, dient als Identifizierungsmerkmal die betragsmäßige Größe des z-Werts. Dabei wird das Koordinatentripel mit dem höchsten z-Wert in der Koordinatenliste beibehalten. Auf Grund der Koordinatenausrichtung im Modul „Umdefinierung“ kommt es dazu, dass x- und y-Koordinatenpaare ungünstigerweise mit dem Wert „0“ für die z-Koordinate versehen werden. Daher bietet das Modul „Bereinigung“ eine Korrekturroutine an, die die betroffenen z-Werte auf das Niveau der benachbarten Nadeln anhebt. Der Bediener kann dazu einen entsprechenden Prüfkorridor definieren. Nachdem die Koordinatendatei durch die oben beschriebenen Algorithmen optimiert wurde, findet das finale Einbetten der Geometrie in die virtuelle Werkzeugform statt. Dazu ermittelt das Modul „Bereinigung“ den minimalen z-Wert der Geometrie und errechnet daraus einen orthogonal zur Werkzeugebene stehenden Vektor, um dessen Länge alle z-Werte in Vektorrichtung verschoben werden. Als Ergebnis des Moduls „Bereinigung“ entsteht eine für die Ansteuerung der automatisierten Einstellaktorik verwendbare Koordinatendatei.

## **Motorsteuerung**

Das Modul „Motorsteuerung“ ist das zentrale Bindeglied zwischen der Software zum Ableiten der notwendigen Werkzeugkoordinaten und der automatisierten Einstellaktorik. Es ermöglicht das gezielte Verfahren der Einstellmotoren über eine Koordinatendatei oder aber das manuelle Verfahren der Einstellnadel zu Testzwecken. Der grundlegende Unterschied des Moduls „Motorsteuerung“ zu den oben beschriebenen Modulen ist in der Art des Aufrufs innerhalb des Hauptprogramms, also der GUI, zu sehen. Hierzu wird das so genannte Threading angewandt. Damit ist geeint, dass das Modul Motorsteuerung in einem eigenen Prozess aufgerufen und abgearbeitet wird, das Hauptprogramm aber zusätzlich editiert bzw. bedient werden kann. So wird es möglich,

während des Einstellens der Werkzeugkavität Pausen zu initiieren, das Einstellen fortzuführen, den Einstellvorgang zu unterbrechen bzw. auch wieder nach längerer Zeit aufzunehmen oder ganz zu beenden. Im Falle des Unterbrechens wird der Bediener aufgefordert, die noch einzustellenden Koordinaten zu speichern, um damit das Fortsetzen der Einstellung zu einem späteren Zeitpunkt zu ermöglichen. So kann das Programm auch während des Einstellens verlassen werden, ohne den Einstellvorgang komplett neu beginnen zu müssen. Der eigentliche Verstellalgorithmus besteht darin, die anzu-fahrenden Koordinaten bzw. die Anzahl der zu verfahrenden Motorschritte an ein mittels „wrappen“ integriertes C++-Programm zu übergeben. Dies ist notwendig, da hohe Laufzeiten bei der Verarbeitung und Ausgabe der Ansteuerbefehle es nicht mög-lich machen, mit Python auf den LPT-Port ausreichend schnell zuzugreifen, da das Be-triebssystem Windows einem externen Open-Source-Programm nur einen im Hinblick auf die Geschwindigkeit eingeschränkten Zugriff gewährt. Hinzu kommt, dass ein C++-Programm als Compilersprache in der Codeverarbeitung grundlegend schneller ist als eine Interpretersprache wie Python. Das eigentlich für das Verfahren der Einstellaktorik verantwortliche C++-Programm beinhaltet eine Schnittstelle zwischen der Ansteuer-hardware und dem Modul „Motorsteuerung“. Dabei werden für die jeweiligen Motoren die Anzahl der für den einzustellenden Koordinatenpunkt notwendigen Schritte an das C++-Programm übergeben. Dieses sendet eine entsprechende Bit-Abfolge an die Steuerungskarten. Pro Schritt muss ein Richtungs-Bit sowie ein Aktions-Bit gesetzt werden. Ausgehend von den Ressourcen „Visual Studio“, der Software „SWIG“ und Python kann das C++-Programm in die Formgenerierungssoftware eingebunden werden. Dazu muss eine Initialisierungsdatei (\*.i) erzeugt werden, die die Übergabe-parameter und den Funktionsnamen des C++-Programms definiert. Die Initialisierungs-datei sowie das zugehörige C++-Programm müssen im Arbeitsbereich von „SWIG“ enthalten sein. Durch Ausführen der folgenden Befehlszeile (swig -python -c++ motor.i) kann die entsprechende Python-Einbindung zur Ansteuerung der Einstell-motoren aus dem C++-Programm erstellt werden. Die so erzeugten Dateien sind nun in den C++-Projektorfdner einzufügen und in das Projekt einzubinden. Nach erfolgreichem Compilieren und Linken der Dateien wird von Visual Studio eine Datei erzeugt, die die Ansteuerung der Motoren enthält und auf die über Python zugegriffen werden kann. Zusätzlich bedarf es einer Dynamic Link Library (.dll), die den schnellen Zugriff auf den LPT-Port ermöglicht. Hierbei wurde auf die bereits vorhandene „inpout32.dll“ zurückgegriffen. Der Ablauf bei der Einstellung der Nadeln ist dabei in zwei Bereiche aufgeteilt. Zuerst werden die x- und y-Koordinaten mit der Einstellaktorik angefahren. Integrierte Wegmesssensoren detektieren die aktuelle Position der Einstellnadel, regeln gegebenenfalls nach und erlauben das Verfahren in der z-Achse erst, nachdem die ent-sprechende x- bzw. y-Koordinate erreicht ist. Der Verfahrweg der z-Achse wird eben-

falls über das Modul „Motorsteuerung“ überwacht. Dies geschieht über das Einbinden eines C++-Programms, das auf die seitens des Herstellers der Schnittstellenkarte zur Verfügung gestellten Bibliotheken zurückgreift und so einen Positionswert zur Regelung bereitstellt. Durch das sequentielle Anfahren aller Koordinatenpunkte mit dem beschriebenen Ablauf im Modul „Motorsteuerung“ entsteht die Werkzeugkavität. Die zum Einstellen notwendigen Motordaten, wie beispielsweise die Schrittzahl pro Umdrehung oder die Spindelsteigung, können durch die GUI vom Benutzer eingegeben werden. Das Ausgangssignal, das über das C++-Programm zur Ansteuerkarte über den LPT-Port weitergegeben wird, besteht aus einem Richtungs-Bit und einem Signal-Bit zur schrittweisen Aktivierung eines Motors. Dabei wird der Wechsel dieses Signal-Bits von „0“ auf „1“ so interpretiert, dass der angesteuerte Motor einen Schritt verfährt. Der Wechsel des Bits von „1“ auf „0“ wird bei den verwendeten Schnittstellenkarten nicht berücksichtigt. Zusätzlich zu den beschriebenen Signalpaaren pro Motor generiert das eingebundene C++-Programm ein Signal zum Spannen und Entspannen des pneumatischen Spannmechanismus der Einstellaktorik. Dabei wird je nach Einstellsituation ein Bit gesetzt und über den LPT-Port an eine Relaiskarte gesendet. Sobald ein Nadelkopf angefahren ist, schaltet die Relaiskarte die Ventile an den pneumatischen Muskeln auf Druckbeaufschlagung und das Einstellen der Nadel in z-Richtung wird durchgeführt. Nach erfolgtem Einstellen werden die Relaiskarten erneut angesteuert und entspannen die pneumatischen Muskeln zum Verfahren der Einstellaktorik. Das eingebundene C++-Programm ist so aufgebaut, dass ein Verfahren der Einstellaktorik bei gespannten Muskeln nicht auftreten kann.

## Bewertungsformblätter

Bewertungsklasse „Kosten“, Szenario 1							
	Kriterium	Kenngröße	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Anwendungsv. 1	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	$H_K$	127,09 €	9,58	0,57143	5,47	8,03
	Mehrkosten pro Stück bei Geometriänderung nach Erstellung des Werkzeugs	$M_K$	74,46 €	9,63	0,14286	1,38	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	$W_K$	58,59%	4,14	0,28571	1,18	
Anwendungsv. 2	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	$H_K$	127,59 €	9,57	0,57143	5,47	8,04
	Mehrkosten pro Stück bei Geometriänderung nach Erstellung des Werkzeugs	$M_K$	74,46 €	9,68	0,14286	1,38	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	$W_K$	58,38%	4,16	0,28571	1,19	
Anwendungsv. 3	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	$H_K$	130,09 €	9,57	0,57143	5,47	8,07
	Mehrkosten pro Stück bei Geometriänderung nach Erstellung des Werkzeugs	$M_K$	74,46 €	9,68	0,14286	1,38	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	$W_K$	57,26%	4,16	0,28571	1,22	
Anwendungsv. 4	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	$H_K$	3,57 €	9,99	0,57143	5,71	9,35
	Mehrkosten pro Stück bei Geometriänderung nach Erstellung des Werkzeugs	$M_K$	74,46 €	9,68	0,14286	1,38	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	$W_K$	20,86%	7,91	0,28571	2,26	

Bewertungsklasse „Kosten“, Szenario 1 (Fortsetzung)							
	Kriterium	Kenngröße	Wert	Punkt-wert	Gewich-tung	gew. Punktwert	Summe
Anwendungsvar. 5	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	$H_K$	4,47 €	9,99	0,57143	5,71	9,47
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieveränderung nach Erstellung des Werkzeugs	$M_K$	74,46 €	9,68	0,14286	1,38	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	$W_K$	16,67%	8,33	0,28571	2,38	

Bewertungsklasse „Zeit“, Szenario 1							
	Kriterium	Kenngröße	Wert	Punkt-wert	Gewich-tung	gew. Punktwert	Summe
Anwendungsvar. 1	Werkzeugherstellzeit	$t_H$	26,2 h	6,73	0,38095	2,56	5,93
	Rüstzeit	$t_R$	35 min	2,5	0,19048	0,48	
	Zeitaufwand bei Produktänderung nach Herstellung eines Werkzeugs	$t_A$	26,78 h	6,65	0,19048	1,27	
Anwendungsvar. 2	Prozesszykluszeit	$t_P$	120 s	6	0,19048	1,14	5,85
	Nachbearbeitungszeit	$t_N$	0 s	10	0,04762	0,48	
	Werkzeugherstellzeit	$t_H$	26,2 h	6,73	0,38095	2,56	
Anwendungsvar. 3	Rüstzeit	$t_R$	35 min	2,5	0,19048	0,48	5,91
	Zeitaufwand bei Produktänderung nach Herstellung eines Werkzeugs	$t_A$	26,78 h	6,65	0,19048	1,27	
	Prozesszykluszeit	$t_P$	120 s	6	0,19048	1,14	
Anwendungsvar. 4	Nachbearbeitungszeit	$t_N$	1800 s	8,33	0,04762	0,4	5,83
	Werkzeugherstellzeit	$t_H$	26,2 h	6,73	0,38095	2,56	
	Rüstzeit	$t_R$	35 min	2,5	0,19048	0,48	
	Zeitaufwand bei Produktänderung nach Herstellung eines Werkzeugs	$t_A$	26,78 h	6,65	0,19048	1,27	
	Prozesszykluszeit	$t_P$	120 s	6	0,19048	1,14	
	Nachbearbeitungszeit	$t_N$	300 s	9,72	0,04762	0,46	
	Werkzeugherstellzeit	$t_H$	26,2 h	6,73	0,38095	2,56	
	Rüstzeit	$t_R$	35 min	2,5	0,19048	0,48	
	Zeitaufwand bei Produktänderung nach Herstellung eines Werkzeugs	$t_A$	26,78 h	6,65	0,19048	1,27	
	Prozesszykluszeit	$t_P$	120 s	6	0,19048	1,14	
	Nachbearbeitungszeit	$t_N$	2100 s	8,06	0,04762	0,38	

Bewertungsklasse „Zeit“, Szenarium 1 (Fortsetzung)							
	Kriterium	Kenngröße	Wert	Punkt-wert	Gewich-tung	gew. Punkt-wert	Summe
Anwendungsvar. 5	Werkzeugherstellzeit	$t_H$	26,2 h	6,73	0,38095	2,56	5,45
	Rüstzeit	$t_R$	35 min	2,5	0,19048	0,48	
	Zeitaufwand bei Produktänderung nach Herstellung eines Werkzeuges	$t_A$	26,78 h	6,65	0,19048	1,27	
	Prozesszykluszeit	$t_P$	120 s	6	0,19048	1,14	
	Nachbearbeitungszeit	$t_N$	21000 s	0	0,04762	0	

Bewertungsklasse „Qualität“, Szenarium 1							
	Kriterium	Kenngröße	Wert	Punkt-wert	Gewich-tung	gew. Punkt-wert	Summe
Anwendungsvar. 1	Oberflächengüte des Produktes	Mittenrautiefe	316 µm	0	0,25	0	5,25
	Erzielbare Maßgenauigkeit	größte Abweichung vom Nennmaß	0,4 mm	8	0,5	4	
	Detailauflösung		"mäßig"	5	0,25	1,25	
Anwendungsvar. 2	Oberflächengüte des Produktes	Mittenrautiefe	0,2 µm	9,85	0,25	2,46	4,71
	Erzielbare Maßgenauigkeit	größte Abweichung vom Nennmaß	0,7 mm	4,49	0,5	2,25	
	Detailauflösung		"sehr schlecht"	0	0,25	0	
Anwendungsvar. 3	Oberflächengüte des Produktes	Mittenrautiefe	0,3 µm	9,76	0,25	2,44	5,94
	Erzielbare Maßgenauigkeit	größte Abweichung vom Nennmaß	0,7 mm	4,49	0,5	2,25	
	Detailauflösung		"mäßig"	5	0,25	1,25	

Bewertungsklasse „Qualität“, Szenario 1 (Fortsetzung)							
	Kriterium	Kenngröße	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Anwendungsvar. 4	Oberflächengüte des Produktes	Mittenerauteife	0,2 µm	9,85	0,25	2,46	4,71
	Erzielbare Maßgenauigkeit	größte Abweichung vom Nennmaß	0,7 mm	4,49	0,5	2,25	
	Detailauflösung		„sehr schlecht“	0	0,25	0	
Anwendungsvar. 5	Oberflächengüte des Produktes	Mittenerauteife	0,3 µm	9,76	0,25	2,44	5,94
	Erzielbare Maßgenauigkeit	größte Abweichung vom Nennmaß	0,7 mm	4,49	0,5	2,25	
	Detailauflösung	–	„mäßig“	5	0,25	1,25	

Bewertungsklasse „Technologie“, Szenario 1				
Kriterium	Kenngröße	Wert	Punktwert	Summe
Lebensdauer des Werkzeugs	–	10.000	10	29,84
Wiederverwendbarkeit des Werkzeugs	–	„unbegrenzt“	10	
Automationsgrad der Herstellung des Werkzeugs	–	98,37 %	9,84	

Bewertungsklasse „Kosten“, Szenario 3							
	Kriterium	Kenngröße	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Anwendungsvar. 1	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	453,67 €	8,49	0,57143	4,85	6,62
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieveränderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	410,33 €	7,95	0,14286	1,14	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	90,45 %	0,96	0,28571	0,27	

Bewertungsklasse „Kosten“, Szenario 3 (Fortsetzung)							
	Kriterium	Kenngröße	Wert	Punkt-wert	Gewichtung	gew. Punkt-wert	Summe
Anwendungsvar. 2	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	1833,07 €	3,89	0,57143	2,22	2,43
	Mehrkosten pro Stück bei Geometriänderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	1789,73 €	1,05	0,14286	0,15	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	97,64 %	0,24	0,28571	0,06	
Anwendungsvar. 3	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	6,92 €	9,98	0,57143	5,70	8,00
	Mehrkosten pro Stück bei Geometriänderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	410,33 €	7,95	0,14286	1,14	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	59,27 %	4,07	0,28571	1,16	
Anwendungsvar. 4	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	20,71 €	9,93	0,57143	5,67	6,21
	Mehrkosten pro Stück bei Geometriänderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	1789,73 €	1,05	0,14286	0,15	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	86,39 %	1,36	0,28571	0,39	
Anwendungsvar. 5	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	2,86 €	9,99	0,57143	5,71	9,29
	Mehrkosten pro Stück bei Geometriänderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	410,33 €	7,94	0,14286	1,13	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	14,34 %	8,57	0,28571	2,45	
Anwendungsvar. 6	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	4,24 €	9,99	0,57143	5,71	7,51
	Mehrkosten pro Stück bei Geometriänderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	1789,73 €	1,05	0,14286	0,15	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	42,21 %	5,78	0,28571	1,65	

Bewertungsklasse „Kosten“, Szenario 3 (Fortsetzung)							
	Kriterium	Kenngröße	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Anwendungsvar. 7	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	$H_K$	2,45 €	9,99	0,57143	5,71	9,65
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieveränderung nach Erstellung des Werkzeugs	$M_K$	410,33 €	7,94	0,14286	1,13	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	$W_K$	1,67 %	9,83	0,28571	2,81	
Anwendungsvar. 8	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	$H_K$	2,59 €	9,99	0,57143	5,71	8,52
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieveränderung nach Erstellung des Werkzeugs	$M_K$	1789,73 €	1,05	0,14286	0,15	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	$W_K$	6,90 %	9,31	0,28571	2,66	

Bewertungsklasse „Zeit“, Szenario 3							
	Kriterium	Kenngröße	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Anwendungsvar. 1	Werkzeugherstellzeit	$t_H$	16,08 h	7,99	0,38095	3,04	6,65
	Rüstzeit	$t_R$	35 min	2,5	0,19048	0,48	
	Zeitaufwand bei Produktänderung nach Herstellung eines Werkzeuges	$t_A$	16,66 h	7,92	0,19048	1,51	
Anwendungsvar. 2	Prozesszykluszeit	$t_P$	120 s	6,00	0,19048	1,14	6,09
	Nachbearbeitungszeit	$t_N$	0 s	10	0,04762	0,48	
	Werkzeugherstellzeit	$t_H$	24,03 h	7,00	0,38095	2,67	
	Rüstzeit	$t_R$	35 min	2,5	0,19048	0,48	
	Zeitaufwand bei Produktänderung nach Herstellung eines Werkzeuges	$t_A$	24,61 h	6,92	0,19048	1,32	
	Prozesszykluszeit	$t_P$	120 s	6,00	0,19048	1,14	
	Nachbearbeitungszeit	$t_N$	0 s	10	0,04762	0,48	

Bewertungsklasse „Qualität“, Szenario 3						
Kriterium	Kenngroße	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Oberflächengüte des Produktes	Mittenrautiefe	0,012 µm	10,00	0,25	2,5	
Erzielbare Maßgenauigkeit	größte Abweichung vom Nennmaß	0,05 mm	8	0,5	4	9
Detailauflösung	–	„sehr gut“	10	0,25	2,5	

Bewertungsklasse „Technologie“, Szenario 3						
	Kriterium	Kenngroße	Wert	Punktwert	Summe	
Anwendungsvar. 1	Lebensdauer des Werkzeugs	–	10.000	10		22,57
	Wiederverwendbarkeit des Werkzeugs	–	„gering“	3		
	Automationsgrad der Herstellung des Werkzeugs	–	95,65 %	9,57		
Anwendungsvar. 2	Lebensdauer des Werkzeugs	–	100.000	10		22,70
	Wiederverwendbarkeit des Werkzeugs	–	„gering“	3		
	Automationsgrad der Herstellung des Werkzeugs	–	96,95 %	9,70		

Bewertungsklasse „Kosten“, Szenario 4							
	Kriterium	Kenngroße	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Anwendungsvar. 1	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	2859,47 €	0,46	0,57143	0,27	0,31
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieänderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	2817,4 €	0	0,14286	0	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	98,53 %	0,15	0,28571	0,04	

Bewertungsklasse „Kosten“, Szenario 4 (Fortsetzung)							
	Kriterium	Kenngröße	Wert	Punkt-wert	Gewich-tung	gew. Punktwert	Summe
Anwendungsvar. 2	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	$H_K$	29,39 €	9,90	0,57143	5,66	5,78
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieänderung nach Erstellung des Werkzeugs	$M_K$	2817,4 €	0	0,14286	0	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	$W_K$	95,86 %	0,41	0,28571	0,12	
Anwendungsvar. 3	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	$H_K$	4,05 €	9,99	0,57143	5,71	6,58
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieänderung nach Erstellung des Werkzeugs	$M_K$	2817,4 €	0	0,14286	0	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	$W_K$	69,57 %	3,04	0,28571	0,87	
Anwendungsvar. 4	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	$H_K$	1,51 €	9,99	0,57143	5,71	8,03
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieänderung nach Erstellung des Werkzeugs	$M_K$	2817,4 €	0	0,14286	0	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	$W_K$	18,66	8,13	0,28571	2,32	

Bewertungsklasse „Zeit“, Szenario 4							
	Kriterium	Kenngröße	Wert	Punkt-wert	Gewich-tung	gew. Punktwert	Summe
Zeitaufwand bei Produktänderung nach Herstellung eines Werkzeugs	Werkzeugherstellzeit	$t_H$	38,42 h	5,20	0,38095	1,98	5,44
	Rüstzeit	$t_R$	35 min	2,5	0,19048	0,48	
	Prozesszykluszeit	$t_P$	60 s	8,00	0,19048	1,52	
	Nachbearbeitungszeit	$t_N$	0 s	10	0,04762	0,48	

Bewertungsklasse „Qualität“, Szenario 4						
Kriterium	Kenngroße	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Oberflächengüte des Produktes	Mittenrautiefe	0,4 µm	9,68	0,25	2,42	
Erzielbare Maßgenauigkeit	größte Abweichung vom Nennmaß	0,05 mm	9,97	0,5	4,99	9,91
Detailauflösung	–	„sehr gut“	10	0,25	2,5	

Bewertungsklasse „Technologie“, Szenario 4				
Kriterium	Kenngroße	Wert	Punktwert	Summe
Lebensdauer des Werkzeugs	–	10.000	10	18,70
Wiederverwendbarkeit des Werkzeugs	–	„keine“	0	
Automationsgrad der Herstellung des Werkzeugs	–	86,99 %	8,70	

Bewertungsklasse „Kosten“, Szenario 5							
	Kriterium	Kenngroße	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Anwendungsvar. 1	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	2359,67 €	2,13	0,57143	1,22	1,27
	Mehrkosten pro Stück bei Geometriänderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	2317,6 €	0	0,14286	0	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	98,22 %	0,18	0,28571	0,05	
Anwendungsvar. 2	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	24,81 €	9,92	0,57143	5,67	5,86
	Mehrkosten pro Stück bei Geometriänderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	2317,6 €	0	0,14286	0	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	93,41 %	0,66	0,28571	0,19	

Bewertungsklasse „Kosten“, Szenario 5 (Fortsetzung)							
	Kriterium	KenngroÙe	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Anwendungsvar. 3	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	$H_K$	3,59 €	9,99	0,57143	5,71	6,72
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieänderung nach Erstellung des Werkzeugs	$M_K$	2317,6 €	0	0,14286	0	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	$W_K$	64,56 %	3,54	0,28571	1,01	
Anwendungsvar. 4	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	$H_K$	1,47 €	10,00	0,57143	5,71	8,12
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieänderung nach Erstellung des Werkzeugs	$M_K$	2317,6 €	0	0,14286	0	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	$W_K$	15,77	8,42	0,28571	2,41	

Bewertungsklasse „Zeit“, Szenario 5							
	Kriterium	KenngroÙe	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Werkzeugherstellzeit	$t_H$	31,28 h	6,09	0,38095	2,32	5,95	
Rüstzeit	$t_R$	35 min	2,5	0,19048	0,48		
Zeitaufwand bei Produktänderung nach Herstellung eines Werkzeugs	$t_A$	31,86 h	6,02	0,19048	1,15		
Prozesszykluszeit	$t_P$	60 s	8,00	0,19048	1,52		
Nachbearbeitungszeit	$t_N$	0 s	10	0,04762	0,48		

Bewertungsklasse „Qualität“, Szenario 5							
	Kriterium	KenngroÙe	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Oberflächengüte des Produktes	Mittenrautiefe	0,4 µm	9,68	0,25	2,42	9,91	
	Erzielbare Maßgenauigkeit	gröÙte Abweichung vom NennmaÙ	0,05 mm	9,97	0,5	4,99	
	Detailauflösung	–	„sehr gut“	10	0,25	2,5	

Bewertungsklasse „Technologie“, Szenarium 5					
Kriterium	Kenngröße	Wert	Punktwert	Summe	
Lebensdauer des Werkzeugs	–	10.000	10		
Wiederverwendbarkeit des Werkzeugs	–	„keine“	0		
Automationsgrad der Herstellung des Werkzeugs	–	79,70 %	7,97		
				17,97	

Bewertungsklasse „Kosten“, Szenarium 6							
	Kriterium	Kenngröße	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Anwendungsvar. 1	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	2745,47 €	0,85	0,57143	0,49	
	Mehrkosten pro Stück bei Geometriänderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	2703,40 €	0	0,14286	0	0,54
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	98,45 %	0,16	0,28571	0,05	
Anwendungsvar. 2	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	28,67 €	9,90	0,57143	5,66	
	Mehrkosten pro Stück bei Geometriänderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	2703,40 €	0	0,14286	0	5,82
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	94,29 %	0,57	0,28571	0,16	
Anwendungsvar. 3	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	3,97 €	9,99	0,57143	5,71	
	Mehrkosten pro Stück bei Geometriänderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	2703,40 €	0	0,14286	0	6,62
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	68,10 %	3,19	0,28571	0,91	
Anwendungsvar. 4	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	1,50 €	10,00	0,57143	5,71	
	Mehrkosten pro Stück bei Geometriänderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	2703,4 €	0	0,14286	0	8,05
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	18,02	8,20	0,28571	2,34	

Bewertungsklasse „Zeit“, Szenario 6						
Kriterium	Kenngröße	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Werkzeugherstellzeit	$t_H$	38,42 h	5,20	0,38095	1,98	5,44
Rüstzeit	$t_R$	35 min	2,5	0,19048	0,48	
Zeitaufwand bei Produktänderung nach Herstellung eines Werkzeugs	$t_A$	39,00 h	5,13	0,19048	0,98	
Prozesszykluszeit	$t_P$	60 s	8,00	0,19048	1,52	
Nachbearbeitungszeit	$t_N$	0 s	10	0,04762	0,48	

Bewertungsklasse „Qualität“, Szenario 6						
Kriterium	Kenngröße	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Oberflächengüte des Produktes	Mittenrautiefe	0,4 µm	9,68	0,25	2,42	9,91
Erzielbare Maßgenauigkeit	größte Abweichung vom Nennmaß	0,05 mm	9,97	0,5	4,99	
Detailauflösung	–	„sehr gut“	10	0,25	2,5	

Bewertungsklasse „Technologie“, Szenario 6				
Kriterium	Kenngröße	Wert	Punktwert	Summe
Lebensdauer des Werkzeugs	–	10.000	10	18,70
Wiederverwendbarkeit des Werkzeugs	–	„keine“	0	
Automationsgrad der Herstellung des Werkzeugs	–	86,99 %	8,70	

Bewertungsklasse „Kosten“, Szenarium 7							
	Kriterium	Kenngröße	Wert	Punkt-wert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Anwendungsvar. 1	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	2245,67 €	2,51	0,57143	1,43	1,48
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieänderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	2203,60 €	0	0,14286	0	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	98,13 %	0,19	0,28571	0,05	
Anwendungsvar. 2	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	23,67 €	9,92	0,57143	5,67	5,87
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieänderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	2203,60 €	0	0,14286	0	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	93,10 %	0,69	0,28571	0,20	
Anwendungsvar. 3	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	3,47 €	9,99	0,57143	5,71	6,75
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieänderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	2203,60 €	0	0,14286	0	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	63,50 %	3,65	0,28571	1,04	
Anwendungsvar. 4	Herstellkosten des Referenzbauteils pro Stück	H <sub>K</sub>	1,45 €	10,00	0,57143	5,71	8,13
	Mehrkosten pro Stück bei Geometrieänderung nach Erstellung des Werkzeugs	M <sub>K</sub>	2203,60 €	0	0,14286	0	
	Werkzeugkostenanteil an den Herstellkosten	W <sub>K</sub>	15,20	8,48	0,28571	2,42	

Bewertungsklasse „Zeit“, Szenario 7						
Kriterium	Kenngröße	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Werkzeugherstellzeit	$t_H$	31,28 h	6,09	0,38095	2,32	5,95
Rüstzeit	$t_R$	35 min	2,5	0,19048	0,48	
Zeitaufwand bei Produktänderung nach Herstellung eines Werkzeugs	$t_A$	31,86 h	6,02	0,19048	1,15	
Prozesszykluszeit	$t_P$	60 s	8,00	0,19048	1,52	
Nachbearbeitungszeit	$t_N$	0 s	10	0,04762	0,48	

Bewertungsklasse „Qualität“, Szenario 7						
Kriterium	Kenngroße	Wert	Punktwert	Gewichtung	gew. Punktwert	Summe
Oberflächengüte des Produktes	Mittenrautiefe	0,4 $\mu\text{m}$	9,68	0,25	2,42	9,91
Erzielbare Maßgenauigkeit	größte Abweichung vom Nennmaß	0,05 mm	9,97	0,5	4,99	
Detailauflösung	–	„sehr gut“	10	0,25	2,5	

Bewertungsklasse Technologie, Szenario 7				
Kriterium	Kenngroße	Wert	Punktwert	Summe
Lebensdauer des Werkzeugs	–	10.000	10	17,97
Wiederverwendbarkeit des Werkzeugs	–	„keine“	0	
Automationsgrad der Herstellung des Werkzeugs	–	79,70 %	7,97	

## Berechnung der Werkzeugherstellkosten des konventionellen Werkzeugbaus

Die in den folgenden Tabellen enthaltenen Kalkulationen basieren auf dem Vorgehen nach MENGES & MOHREN 1991. Grau hinterlegte Felder kennzeichnen Eingabebereiche.

### Konventionelles Werkzeug aus Stahl

<b>Kalkulation der Werkzeugkosten</b>		
<b>Werkzeugkosten</b>	<b>2817,4</b>	<b>€</b>
<b>Kalkulationsgruppe I</b>		
Konturkosten	2245,2	€
Bearbeitungszeitbedarf für Fasson	32,08	h
Bearbeitungszeitbedarf für das Erodieren	0	h
Gemittelter <sup>4</sup> Maschinen- und Lohnstundensatz	70	€/h
Zusätzliche Materialkosten	0	€
Bearbeitungsverfahren (Verfahrensfaktor)	0,85	
Bearbeitungszeit für Konturtiefe	3,3	h
Bearbeitungszeit für Formnestoberfläche	15,8	h
Form der Teilungsebene (Zeitfaktor)	1	
Oberflächengüte (Faktor)	1,4	
Anzahl der Kerne	4	
Toleranzanforderungen (Zeitfaktor)	1	
Schwierigkeitsgrad (Zeitfaktor)	1,2	
Formnestzahl (Zeitfaktor)	1	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Fräsen	0,85	
Anteil Fräsen	1	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Erodieren	1,35	
Anteil Erodieren	0	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Kopieren	1,35	
Anteil Kopieren	0	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Drehen	0,4	
Anteil Drehen	0	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Schleifen	1,2	
Anteil Schleifen	0	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Handarbeit	0,8	
Anteil Handarbeit	0	

<sup>4</sup> ergibt sich aus den Maschinenstundensätzen der eingesetzten Anlagen

## Kalkulation der Werkzeugkosten (Fortsetzung)

Zeitbedarf der Konturtiefe für erste Formnesthälfte	3,3	h
Maß der ersten Vertiefung	15	mm
Flächenverhältnis der ersten Vertiefung	0,35	
Maß der zweiten Vertiefung	27	mm
Flächenverhältnis der zweiten Vertiefung	0,2	
Maß der dritten Vertiefung	15	mm
Flächenverhältnis der dritten Vertiefung	0,3	
Maß der vierten Vertiefung	5	mm
Flächenverhältnis der vierten Vertiefung	0,1	
Maß der fünften Vertiefung	17	mm
Flächenverhältnis der fünften Vertiefung	0,05	
Abtragungsmittel	1	mm/h
Anzahl der Vertiefungen	5	
Zeitbedarf der Konturtiefe für zweite Formnesthälfte	0	h

Formteilloberfläche (Einheit nach MENGES & MOHREN 1991)	20	mm <sup>2</sup> /100
Formnestoberflächenfaktor	0,79	
Drehanteil bei der Bearbeitung	0	
Grundzeit	1	h
Konturfaktor	2	
Anzahl der Kerne gleicher Passkontur	2	

## Kalkulationsgruppe II

<b>Basiswerkzeugkosten</b>	<b>0</b>	€
Werkstoff	0	

## Kalkulationsgruppe III

<b>Grundfunktionskosten</b>	<b>572,18</b>	€
Angussystem	17,5	€
Einarbeitungszeit für den Anguss	0,25	h
Gemittelter Maschinen- und Lohnstundensatz	70	€/h
Angussverteilerkanalsysteme	0	€
Heißkanalsystem	0	€
Temperiersystem	287	€

<b>Kalkulation der Werkzeugkosten (Fortsetzung)</b>		
Schwierigkeitsfaktor	0,41	
Anzahl der Temperierkanalbohrungen	10	
Gemittelter Maschinen- und Lohnstundensatz	70	€/h
Auswerfersystem	267,68	€
Auswerferhülsen	80	€
Herstellkosten der Führungsbolzen etc.	187,68	€
Länge	100	mm
Durchmesser	20	mm
Anzahl	1	
Schwierigkeiten für die Einarbeitung der Führungsbohrungen	2	
Gemittelter Maschinen- und Lohnstundensatz	70	€/h
<b>Kalkulationsgruppe IV</b>		
<b>Sonderfunktionskosten</b>	<b>0</b>	<b>€</b>

Mit HSC-Technologie gefertigtes Stahlwerkzeug

<b>Kalkulation der Werkzeugkosten</b>		
<b>Werkzeugkosten</b>	<b>2317,6</b>	<b>€</b>
<b>Kalkulationsgruppe I</b>		
<b>Konturkosten</b>	<b>1745,43</b>	<b>€</b>
Bearbeitungszeitbedarf für Fasson	24,94	h
Bearbeitungszeitbedarf für das Erodieren	0	h
Gemittelter Maschinen- und Lohnstundensatz	70	€/h
Zusätzliche Materialkosten	0	€
Bearbeitungsverfahren (Verfahrensfaktor)	0,85	
Bearbeitungszeit für Konturtiefe	0,66	h
Bearbeitungszeit für Formnestoberfläche	13,44	h
Form der Teilungsebene (Zeitfaktor)	1	
Oberflächengüte (Faktor)	1,4	
Anzahl der Kerne	4	
Toleranzanforderungen (Zeitfaktor)	1	
Schwierigkeitsgrad (Zeitfaktor)	1,2	
Formnestzahl (Zeitfaktor)	1	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Fräsen	0,85	

## Kalkulation der Werkzeugkosten (Fortsetzung)

Anteil Fräsen	1	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Erodieren	1,35	
Anteil Erodieren	0	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Kopieren	1,35	
Anteil Kopieren	0	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Drehen	0,4	
Anteil Drehen	0	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Schleifen	1,2	
Anteil Schleifen	0	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Handarbeit	0,8	
Anteil Handarbeit	0	
Zeitbedarf der Konturtiefe für erste Formneshälfte	0,66	h
Maß der ersten Vertiefung	15	mm
Flächenverhältnis der ersten Vertiefung	0,35	
Maß der zweiten Vertiefung	27	mm
Flächenverhältnis der zweiten Vertiefung	0,2	
Maß der dritten Vertiefung	15	mm
Flächenverhältnis der dritten Vertiefung	0,3	
Maß der vierten Vertiefung	5	mm
Flächenverhältnis der vierten Vertiefung	0,1	
Maß der fünften Vertiefung	17	mm
Flächenverhältnis der fünften Vertiefung	0,05	
Abtragungsmittel	5	mm/h
Anzahl der Vertiefungen	5	
Zeitbedarf der Konturtiefe für zweite Formneshälfte	0	h
Formteilloberfläche (Einheit nach MENGES & MOHREN 1991)	20	mm <sup>2</sup> /100
Formnestoberflächenfaktor	0,67	
Drehanteil bei der Bearbeitung	0	
Grundzeit	1	h
Konturfaktor	2	
Anzahl der Kerne gleicher Passkontur	2	
<b>Kalkulationsgruppe II</b>		
<b>Basiswerkzeugkosten</b>	<b>0</b>	<b>€</b>
Werkstoff	0	

<b>Kalkulation der Werkzeugkosten (Fortsetzung)</b>		
<b>Kalkulationsgruppe III</b>		
<b>Grundfunktionskosten</b>	<b>572,18</b>	€
Angussystem	17,5	€
Einarbeitungszeit für den Anguss	0,25	h
Gemittelter Maschinen- und Lohnstundensatz	70	€/h
Angussverteilerkanalsysteme	0	€
Heißkanalsystem	0	€
Temperiersystem	287	€
Schwierigkeitsfaktor	0,41	
Anzahl der Temperierkanalbohrungen	10	
Gemittelter Maschinen- und Lohnstundensatz	70	€/h
Auswerfersystem	267,68	€
Auswerferhülsen	80	€
Herstellkosten der Führungsbolzen etc.	187,68	€
Länge	100	mm
Durchmesser	20	mm
Anzahl	1	
Schwierigkeiten für die Einarbeitung der Führungsbohrungen	2	
Gemittelter Maschinen- und Lohnstundensatz	70	€/h
<b>Kalkulationsgruppe IV</b>		
<b>Sonderfunktionskosten</b>	<b>0</b>	€

#### Konventionell gefertigtes Werkzeug aus Aluminium

<b>Kalkulation der Werkzeugkosten</b>		
<b>Werkzeugkosten</b>	<b>2703,4</b>	€
<b>Kalkulationsgruppe I</b>		
<b>Konturkosten</b>	<b>2245,24</b>	€
Bearbeitungszeitbedarf für Fasson	32,08	h
Bearbeitungszeitbedarf für das Erodieren	0	h
Gemittelter Maschinen- und Lohnstundensatz	70	€/h

## Kalkulation der Werkzeugkosten (Fortsetzung)

Zusätzliche Materialkosten	0	€
Bearbeitungsverfahren (Verfahrensfaktor)	0,85	
Bearbeitungszeit für Konturtiefe	3,3	h
Bearbeitungszeit für Formnestoberfläche	15,8	h
Form der Teilungsebene (Zeitfaktor)	1	
Oberflächengüte (Faktor)	1,4	
Anzahl der Kerne	4	
Toleranzanforderungen (Zeitfaktor)	1	
Schwierigkeitsgrad (Zeitfaktor)	1,2	
Formnestzahl (Zeitfaktor)	1	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Fräsen	0,85	
Anteil Fräsen	1	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Erodieren	1,35	
Anteil Erodieren	0	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Kopieren	1,35	
Anteil Kopieren	0	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Drehen	0,4	
Anteil Drehen	0	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Schleifen	1,2	
Anteil Schleifen	0	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Handarbeit	0,8	
Anteil Handarbeit	0	
Zeitbedarf der Konturtiefe für erste Formneshälfte	3,3	h
Maß der ersten Vertiefung	15	mm
Flächenverhältnis der ersten Vertiefung	0,35	
Maß der zweiten Vertiefung	27	mm
Flächenverhältnis der zweiten Vertiefung	0,2	
Maß der dritten Vertiefung	15	mm
Flächenverhältnis der dritten Vertiefung	0,3	
Maß der vierten Vertiefung	5	mm
Flächenverhältnis der vierten Vertiefung	0,1	
Maß der fünften Vertiefung	17	mm
Flächenverhältnis der fünften Vertiefung	0,05	
Abtragungsmittel	1	mm/h
Anzahl der Vertiefungen	5	
Zeitbedarf der Konturtiefe für zweite Formneshälfte	0	h
Formteiloberfläche (Einheit nach MENGES & MOHREN 1991)	20	mm <sup>2</sup> /100
Formnestoberflächenfaktor	0,79	
Drehanteil bei der Bearbeitung	0	
Grundzeit	1	h
Konturfaktor	2	

<b>Kalkulation der Werkzeugkosten (Fortsetzung)</b>		
Anzahl der Kerne gleicher Passkontur		2
<b>Kalkulationsgruppe II</b>		
<b>Basiswerkzeugkosten</b>	<b>-114</b>	<b>€</b>
Werkstoff	1	
<b>Kalkulationsgruppe III</b>		
<b>Grundfunktionskosten</b>	<b>572,18</b>	<b>€</b>
Angussystem	17,5	€
Einarbeitungszeit für den Anguss	0,25	h
Gemittelter Maschinen- und Lohnstundensatz	70	€/h
Angussverteilerkanalsysteme	0	€
Heißkanalsystem	0	€
Temperiersystem	287	€
Schwierigkeitsfaktor	0,41	
Anzahl der Temperierkanalbohrungen	10	
Gemittelter Maschinen- und Lohnstundensatz	70	€/h
Auswerfersystem	267,68	€
Auswerferhülsen	80	€
Herstellkosten der Führungsbolzen etc.	187,68	€
Länge	100	mm
Durchmesser	20	mm
Anzahl	1	
Schwierigkeiten für die Einarbeitung der Führungsbohrungen	2	
Gemittelter Maschinen- und Lohnstundensatz	70	€/h
<b>Kalkulationsgruppe IV</b>		
<b>Sonderfunktionskosten</b>	<b>0</b>	<b>€</b>

## Mit HSC-Technologie gefertigtes Aluminiumwerkzeug

<b>Kalkulation der Werkzeugkosten</b>		
<b>Werkzeugkosten</b>	<b>2203,6</b>	<b>€</b>
<b>Kalkulationsgruppe I</b>		
<b>Konturkosten</b>	<b>1745,44</b>	<b>€</b>
Bearbeitungszeitbedarf für Fasson	24,94	h
Bearbeitungszeitbedarf für das Erodieren	0	h
Gemittelter Maschinen- und Lohnstundensatz	70	€/h
Zusätzliche Materialkosten	0	€
Bearbeitungsverfahren (Verfahrensfaktor)	0,85	
Bearbeitungszeit für Konturtiefe	0,66	h
Bearbeitungszeit für Formnestoberfläche	13,44	h
Form der Teilungsebene (Zeitfaktor)	1	
Oberflächengüte (Faktor)	1,4	
Anzahl der Kerne	4	
Toleranzanforderungen (Zeitfaktor)	1	
Schwierigkeitsgrad (Zeitfaktor)	1,2	
Formnestzahl (Zeitfaktor)	1	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Fräsen	0,85	
Anteil Fräsen	1	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Erodieren	1,35	
Anteil Erodieren	0	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Kopieren	1,35	
Anteil Kopieren	0	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Drehen	0,4	
Anteil Drehen	0	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Schleifen	1,2	
Anteil Schleifen	0	
Bearbeitungsverfahrensfaktor Handarbeit	0,8	
Anteil Handarbeit	0	
Zeitbedarf der Konturtiefe für erste Formnesthälfte	0,66	h
Maß der ersten Vertiefung	15	mm
Flächenverhältnis der ersten Vertiefung	0,35	
Maß der zweiten Vertiefung	27	mm
Flächenverhältnis der zweiten Vertiefung	0,2	
Maß der dritten Vertiefung	15	mm
Flächenverhältnis der dritten Vertiefung	0,3	
Maß der vierten Vertiefung	5	mm
Flächenverhältnis der vierten Vertiefung	0,1	
Maß der fünften Vertiefung	17	mm
Flächenverhältnis der fünften Vertiefung	0,05	
Abtragungsmittel	5	mm/h
Anzahl der Vertiefungen	5	

## Kalkulation der Werkzeugkosten (Fortsetzung)

Zeitbedarf der Konturtiefe für zweite Formnesthälfte	0	h
Formteiloberfläche (Einheit nach MENGES & MOHREN 1991)	20	mm <sup>2</sup> /100
Formnestoberflächenfaktor	0,67	
Drehanteil bei der Bearbeitung	0	
Grundzeit	1	h
Konturfaktor	2	
Anzahl der Kerne gleicher Passkontur	2	

## Kalkulationsgruppe II

<b>Basiswerkzeugkosten</b>	<b>-114</b>	€
Werkstoff	1	

## Kalkulationsgruppe III

<b>Grundfunktionskosten</b>	<b>572,18</b>	€

Angussystem	17,5	€
Einarbeitungszeit für den Anguss	0,25	h
Gemittelter Maschinen- und Lohnstundensatz	70	€/h

Angussverteilerkanalsysteme	0	€
Heißkanalsystem	0	€

Temperiersystem	287	€
Schwierigkeitsfaktor	0,41	
Anzahl der Temperierkanalbohrungen	10	
gemittelter Maschinen- und Lohnstundensatz	70	€/h

Auswerfersystem	267,68	€
Auswerferhülsen	80	€
Herstellkosten der Führungsbolzen etc.	187,68	€
Länge	100	mm
Durchmesser	20	mm

Anzahl	1	
Schwierigkeiten für die Einarbeitung der Führungsbohrungen	2	
Gemittelter Maschinen- und Lohnstundensatz	70	€/h

## Kalkulationsgruppe IV

<b>Sonderfunktionskosten</b>	<b>0</b>	€



# 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 *Meier, 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, I.*  
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 *Bürsner, 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.*  
Klipsmontage 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 *Klippl, C.*  
Mobilier 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 *Kirchhöpf, P.*  
Ermittlung modularer 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 Fertigung automatisierung  
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 *Wrbä, P.*  
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik  
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, 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 *Tuzcek, 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 störmungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten  
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*  
3D-Echtzeitkollisionschutz 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 *Gotz, R.*  
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile  
1991 · 88 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 *Höfmann, 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 Klebeprozesse  
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 *Schräfer, N.*  
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung  
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wissbacher, J.*  
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen  
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnick, F.*  
Laserbearbeitung mit Robotern  
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*  
Digitale Zustandesregelung elektrischer Vorschubantriebe  
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaes, W.*  
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung  
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Heilm, 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 *Wendl, A.*  
Qualitäts sicherung 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 *Strahmayer, R.*  
Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringerseinrichtungen  
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Gles, J.*  
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware  
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stettner, R.*  
Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboter Einsatzes  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*  
Roboter systeme 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 *Kummesteiner, G.*  
3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme  
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*  
Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionsystemen  
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 Produktionsystemen  
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schäpf, 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 Produktionsystemen 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 *Zwanzer, 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-Grohe, V.*  
Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflussteuerungen  
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 *Deutschle, 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.*  
Personorientierte Montageplanung für komplexe und varianteureiche 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 · 87 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moczezuma 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 *Pischetsrieder, 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 varianteureichen 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 Ablaufsimulationsystem  
1997 · 98 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wegner, M.*  
Steuerungsintegrierte 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 3-540-64686-8
- 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 *Pfab, E.*  
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen  
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*  
Erfahrungsgeläufige Planung von Laseranlagen  
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

# Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
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, [info@utz.de](mailto:info@utz.de)

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

- 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 Prototypserien**  
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
- 64 **Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial**  
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 **Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen**  
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 **Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder**  
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 **Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder**  
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 **Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik**  
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 **Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette**  
134 Seiten · ISBN 3-98675-069-0
- 70 **Mechatronik · Strukturdynamik von Werkzeugmaschinen**  
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 **Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten**  
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen
- 72 **Fabrikplanung 2004 · Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen**  
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
- 73 **Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen**  
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
- 74 **Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik**  
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
- 75 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 76 **Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapself zur aseptischen Ampulle**  
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
- 77 **ERP-Systeme · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen**  
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
- 78 **Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen**  
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
- 79 **Produktionsmanagement**  
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
- 80 **Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche**  
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
- 81 **Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder**  
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
- 82 **Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement**  
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
- 83 **Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen**  
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
- 84 **Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?**  
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 **3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau**  
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 **Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung**  
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 **Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand**  
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 **Mechatronik · Vorsprung durch Simulation**  
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 **RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten**  
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1

# Forschungsberichte iwb

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

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [info@utz.de](mailto:info@utz.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 zeitvariante Produktionssysteme**  
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Günter  
**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 Fertigungszelten**  
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 Spreznel, 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
- 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
- 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 telepräsenter 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 Breitinger  
**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
- 181 Joachim Berlak  
**Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen**  
2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr  
**Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung**  
2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber  
**Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken**  
2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt  
**Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern**  
2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer  
**Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten**  
2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger  
**Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme**  
2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl  
**Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing**  
2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch  
**Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie**  
2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

- 189 Thomas Mosandl  
**Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme**  
2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron  
**Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung**  
2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek  
**Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen**  
2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer  
**Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen**  
2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke  
**Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung**  
2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried  
**Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern**  
2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner  
**Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion**  
2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich  
**Erhöhung des Nutzunggrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen**  
2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Härtl  
**Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern**  
2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann  
**Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge**  
2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp  
**Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage**  
2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz  
**Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme**  
2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner  
**Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding**  
2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein  
**Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation**  
2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren  
**Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse**  
2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf  
**Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie**  
2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Griebsch  
**Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia**  
2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrensträßer  
**Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage**  
2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

- 207 Rainer Schack  
**Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik**  
2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff  
**Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion**  
2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller  
**Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen**  
2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler  
**Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme**  
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlickenrieder  
**Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten Kleben großflächiger Bauteile**  
2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller  
**Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme**  
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl  
**Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrbewegungen**  
2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge  
**Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiraumen**  
2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wünsch  
**Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme**  
2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli  
**Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben**  
2008 · 194 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold  
**Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage**  
2008 · 234 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 Loucas Papadakis  
**Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains**  
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 Mathias Mörtl  
**Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung**  
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 Sebastian Weig  
**Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten**  
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 Tobias Hornfeck  
**Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie**  
2008 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 Hans Egermeier  
**Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen**  
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 Matthias Sigl  
**Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns**  
2008 · 185 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0841-6

- 224 Mark Harfensteller  
**Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets**  
2009 · 196 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0849-8
- 225 Jochen Werner  
**Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie**  
2009 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 Florian Hagemann  
**Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen**  
2009 · 226 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 Haitham Rashidy  
**Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry**  
2009 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0862-1

