

# **Forschungsberichte**



***Band 177***

*Frank Breitinger*

***Ein ganzheitliches Konzept  
zum Einsatz des indirekten  
Metall-Lasersinterns für  
das Druckgießen***

---

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

---

*Herbert Utz Verlag*



# Forschungsberichte iwb

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

herausgegeben von

Univ.-Prof.Dr.-Ing. Michael Zäh

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

Technische Universität München

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2002

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2003

ISBN 3-8316-0227-1

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1 SEQUENZIELLE PRODUKTENTWICKLUNG	1
1.2 INTEGRIERTE PRODUKT- UND PROZESSENTWICKLUNG	2
1.3 RAPID PROTOTYPING UND RAPID TOOLING	4
1.3.1 <i>Einsatz von Modellen</i>	4
1.3.2 <i>Einsatz des Rapid Tooling</i>	5
<b>2 ZIEL DER ARBEIT</b>	<b>8</b>
2.1 AUSGANGSBASIS	8
2.2 ZIELSETZUNG	8
2.3 ANWENDUNGSFELD	8
2.4 VORGEHEN	10
<b>3 STAND DER ERKENNTNISSE UND GRUNDLAGEN</b>	<b>12</b>
3.1 LÖSUNGSANSÄTZE IN DER LITERATUR	12
3.1.1 <i>Prototypenwerkzeuge über spanende Fertigungsverfahren</i>	12
3.1.2 <i>Prototypenwerkzeuge mit generativen Fertigungsverfahren</i>	13
3.1.3 <i>Cera-Cast</i>	14
3.2 ANFORDERUNGEN AN DIE WERKZEUGE FÜR DEN DRUCKGIEßPROZESS	15
3.2.1 <i>Beschreibung Druckgießprozess</i>	15
3.2.1.1 Warmkammerverfahren	16
3.2.1.2 Kaltkammerverfahren	16
3.2.2 <i>Druckgusswerkstoffe</i>	17
3.2.2.1 Aluminiumlegierungen	17
3.2.2.2 Magnesiumlegierungen	18
3.2.3 <i>Anforderungen an Druckgießwerkzeuge</i>	19
3.2.3.1 Thermisch-mechanische Anforderungen	19
3.2.3.2 Geometrische Anforderungen	20
3.3 ÜBERSICHT RAPID TOOLING-VERFAHREN	20
3.3.1 <i>Rapid Prototyping und Abformtechnologien</i>	21
3.3.1.1 Rapid Prototyping und Feinguss	21
3.3.1.2 Gussschale über Rapid Prototyping	23
3.3.1.2.1 Abgegossene Formeinsätze	24
3.3.1.2.2 Spray Metal Tooling	25
3.3.1.2.3 Sand-Lasersintern	25
3.3.1.2.4 Direct Shell Production Casting	25
3.3.1.3 Green Body Fabrication	26
3.3.2 <i>Direkte Rapid Prototyping-Verfahren</i>	27
3.3.2.1 Bridge-Tooling	28
3.3.2.1.1 Stereolithographie	28
3.3.2.1.2 Kunststoff-Lasersintern	29
3.3.2.2 Three Dimensional Printing	29

3.3.2.3	Direktes Metall-Lasersintern	29
3.3.2.3.1	Einphasensystem	30
3.3.2.3.2	Mehrphasensystem	31
3.3.2.4	Indirektes Metall-Lasersintern	32
3.3.3	<i>Rapid Tooling-Verfahren im Forschungsstadium</i>	35
3.3.4	<i>Rapid Tooling-Verfahren für das Druckgießen</i>	36
3.4	DEFIZITE	37
<b>4</b>	<b>KONZEPTBESCHREIBUNG</b>	<b>39</b>
4.1	UNTERSUCHUNG AUF MACHBARKEIT	40
4.2	ANALYSE DER VERFAHRENSSPEZIFISCHEN DEFIZITE UND MAßNAHMEN ZUR PROZESSVERBESSERUNG	42
4.3	UMSETZUNG DER PROZESSVERBESSERUNGEN	43
<b>5</b>	<b>ANALYSE DES INDIREKTNEN METALL-LASERSINTERNS</b>	<b>46</b>
5.1	UNTERSUCHUNG ZUR EIGNUNG DES INDIREKTNEN METALL-LASERSINTERNS FÜR DAS DRUCKGIEßen	46
5.1.1	<i>Ermittlung der Werkstoffkennwerte</i>	46
5.1.1.1	Mechanische Untersuchungen	46
5.1.1.2	Metallurgische Untersuchungen	51
5.1.1.3	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	53
5.1.2	<i>Druckgieß-Feldversuche</i>	53
5.1.2.1	Feldversuch Magnesiumdruckguss	53
5.1.2.2	Feldversuch Aluminiumdruckguss	54
5.1.2.3	Zusammenfassung der Feldversuche	55
5.1.3	<i>Einfluss des Formwerkstoffes auf die Bauteileigenschaften</i>	56
5.2	ANALYSE DER VERFAHRENSSPEZIFISCHEN DEFIZITE UND MAßNAHMEN ZUR PROZESSVERBESSERUNG	58
5.2.1	<i>Ableitung der Einflussgrößen</i>	58
5.2.2	<i>Analyse der erreichbaren Genauigkeit</i>	60
5.2.2.1	Versuchsbeschreibung	60
5.2.2.1.1	Versuchsbautelle	60
5.2.2.1.2	Aufteilung der Prozessschritte	64
5.2.2.2	Einfluss ausgewählter Parameter	65
5.2.2.2.1	Parameter Bauteilgröße	65
5.2.2.2.2	Parameter Bauteilgestalt	71
<b>6</b>	<b>VERBESSERUNG DER GENAUIGKEIT DES INDIREKTNEN METALL-LASERSINTERPROZESSES</b>	<b>73</b>
6.1	ERMITTlung GEOMETRIEABHÄNGIGER SKALIERUNGSFAKTOREN	73
6.1.1	<i>Vorgehensweise</i>	73
6.1.2	<i>Einschränkungen</i>	74
6.1.3	<i>Evaluierung</i>	74
6.2	KOMPENSATION DER NICHTLINEAREN SCHWINDUNG	75
6.2.1	<i>Datenfluss und Schnittstellen</i>	75
6.2.2	<i>Modellierung</i>	79

---

6.2.2.1	Erstellung von Analogiemodellen	79
6.2.2.2	Vorarbeiten zur Entwicklung makroskopischer Berechnungs-Modelle	85
<b>7</b>	<b>STANDZEITERHÖHUNG BEI DRUCKGIEßWERKZEUGEN</b>	<b>88</b>
7.1	OBERFLÄCHENBEHANDLUNG	88
7.1.1	<i>Elektrochemische Verfahren</i>	88
7.1.1.1	Verfahrensbeschreibung und Schichtwerkstoff	88
7.1.1.2	Ergebnis des Vorversuchs	89
7.1.2	<i>Thermisches Spritzverfahren</i>	90
7.1.2.1	Verfahrensbeschreibung	90
7.1.2.2	Schichtwerkstoffe	91
7.1.2.3	Ergebnis des Vorversuchs	92
7.1.3	<i>PVD-Verfahren</i>	94
7.1.3.1	Verfahrensbeschreibung	94
7.1.3.2	Schichtwerkstoffe	95
7.1.3.3	Ergebnis des Vorversuchs	95
7.1.4	<i>CVD-Verfahren</i>	97
7.1.4.1	Verfahrensbeschreibung und Schichtwerkstoff	97
7.1.4.2	Ergebnis des Vorversuchs	98
7.1.5	<i>Zusammenfassung der Beschichtungsvorversuche</i>	99
7.1.6	<i>Nitrieren</i>	99
7.1.7	<i>Möglichkeiten zum Umwandlungshärten der Randschicht</i>	100
7.1.8	<i>Evaluierung</i>	100
7.1.8.1	Versuchsbeschreibung	100
7.1.8.2	Ergebnis der Feldversuche	101
7.2	ALTERNATIVE INFILTRATIONSWERKSTOFFE	102
7.2.1	<i>Auswahl geeigneter Infiltrationswerkstoffe</i>	102
7.2.2	<i>Vorversuche zur Infiltration</i>	103
7.2.2.1	Vorversuch mit DTM-Kupfer	103
7.2.2.2	Vorversuch mit Zinnbronze CuSn9P	104
7.2.2.3	Vorversuch mit Zinnbronze CuSn4	104
7.2.2.4	Vorversuch mit Aluminiumbronze CuAl10Ni5Fe4	105
7.2.3	<i>Ermittlung der mechanischen Eigenschaften</i>	106
7.2.3.1	DTM-Kupfer	107
7.2.3.2	Zinnbronze CuSn9P	108
7.2.3.3	Zinnbronze CuSn4	109
7.2.3.4	Aluminiumbronze CuAl10Ni5Fe4	110
7.2.3.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	111
7.2.4	<i>Evaluierung</i>	113
<b>8</b>	<b>ANWENDUNGSBEISPIEL</b>	<b>115</b>
8.1	ÜBERSICHT ZU DEN PROZESSOPTIMIERUNGEN	115
8.1.1	<i>Geometrieabhängige Skalierungsfaktoren</i>	115
8.1.2	<i>Kompensation der nicht linearen Schwindung</i>	116
8.1.3	<i>Oberflächenbehandlung der Formeinsätze</i>	116
8.1.4	<i>Alternative Infiltrationswerkstoffe</i>	116

8.2 ANWENDUNGSBEISPIEL: PROTOTYPEN-DRUCKGIEßWERKZEUG FÜR KOFFERRAUM- GRIFFLEISTE	116
<b>9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBlick</b>	<b>119</b>
<b>10 LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>121</b>
<b>11 ANHANG</b>	<b>135</b>
11.1 BESTIMMUNG DES ELASTIZITÄTSMODULS DURCH EINEN WARMBIEGEVERSUCH	135
11.2 BERECHNUNG DER GE SAMT SCHWINDUNG UND DES SKALIERUNGSFAKTORS	136
11.3 SCHNITTSTELLE FEM-RP	138
11.3.1 <i>Elementgenerierung</i>	138
11.3.2 <i>Addition Verschiebung</i>	139
11.3.3 <i>STL-Konvertierung</i>	140
11.4 SPANNUNGS-DEHNUNGS-DIAGRAMME	144
11.5 ABBILDUNGSVERZEICHNIS	146
11.6 TABELLENVERZEICHNIS	149

# 1 Einleitung

Die Situation auf den Märkten hat sich in den letzten Jahren entscheidend gewandelt. Der rasche technologische Fortschritt führt zu kürzeren Produktlebenszyklen, während zusätzlich die Produkte komplexer werden. Die für jedes Produkt aufgelegte Menge nimmt ab, so dass es schwieriger wird, die Erfahrungskurve zur Reduzierung der Herstellkosten zu durchlaufen (*Reichwald & Koller 1996, S. 242 ff.*). Gleichzeitig sind durch die zunehmende Globalisierung neue Anbieter in den Markt eingetreten. Gerade das Auftreten von Konkurrenten aus Billiglohnländern mit günstigeren Lohnkosten lässt die Marktpreise unter Druck geraten.

Diese veränderten Rahmenbedingungen stellt die Wandlungsfähigkeit der Marktteilnehmer vor neue Aufgaben. Es wird immer wichtiger, neue erfolgreiche Produkte zu entwickeln und diese in kurzer Zeit auf den Markt zu bringen. Für die Betrachtung der Effizienz der Produktentwicklung sind neben den Großen Produktqualität und die während des Produktlebenszyklus entstehenden Kosten vor allem die benötigte Entwicklungszeit von entscheidender Bedeutung.

Dabei sollen die Produkte schneller als die Konkurrenz, in jedem Fall jedoch gleich schnell entwickelt und auf den Markt gebracht werden. In verkürzten Entwicklungszeiten steckt ein erhebliches Gewinnpotential, das auf mehrere Arten nutzbar ist.

Zum einen ist dies durch einen früheren Markteintritt möglich. Ein sechsmonatiger Vorsprung gegenüber der Konkurrenz kann bei durchschnittlichen Produktlebenszyklen von 18 bis 24 Monaten das dreifache des durchschnittlichen Gewinns bringen. Wird dagegen das Marktfenster verpasst, droht eine Gewinnminderung. Eine Verzögerung des Markteintritts von sechs Monaten kann den gesamten Projektgewinn kosten, weitere Verzögerungen bringen sogar Verlust (*Wheelwright u.a. 1992, S. 21f.*)

Die weitere Möglichkeit zur gewinnbringenden Nutzung kürzerer Entwicklungszeiten ist, bei Beibehaltung des anvisierten Markteintritts den Entwicklungsbeginn hinauszögern. Durch die Verfügbarkeit von aktuelleren Marktdaten bei Projektbeginn, können kurzfristige Veränderungen der Marktsituation bzw. der Kundenwünsche noch vor Projektbeginn berücksichtigt werden. Dies reduziert gerade bei sich schnell ändernden Märkten das Risiko des Produktflops und ermöglicht es, durch überlegene Produkte mit größerer Kundenakzeptanz größere Marktanteile zu erlangen (*Wheelwright u.a. 1992, S. 21f.*)

## 1.1 Sequenzielle Produktentwicklung

Der klassische Ansatz der Produktentwicklung zeichnet sich durch einen starren, streng sequentiellen Ablauf mit klar definierten Phasen aus (*Horváth u.a.*