

Lehrstuhl für  
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik  
der Technischen Universität München

**Ganzheitliche Optimierung des indirekten  
Metall-Lasersinterprozesses**

**Jörg Fährer**

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. H. Hoffmann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann

Die Dissertation wurde am 07.08.2001 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 13.12.2001 angenommen.



***Forschungsberichte***

---

***iwb***

***Band 163***

***Jörg Fährer***

***Ganzheitliche Optimierung  
des indirekten Metall-  
Lasersinterprozesses***

---

***herausgegeben von  
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart***

---

***Herbert Utz Verlag***



# Forschungsberichte iwb

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

herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart  
Technische Universität München  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist  
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

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 2002

ISBN 3-8316-0124-0

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

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

## **Geleitwort des Herausgebers**

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

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

Ziel der Forschungsarbeiten des *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.

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

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann, dem Leiter des Lehrstuhls für Produktentwicklung der Technischen Universität München, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich.

München, im März 2002

*Jörg Fährer*





## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Einleitung .....	1
1.2	Zielsetzung .....	3
1.3	Vorgehensweise.....	4
<b>2</b>	<b>Stand der Erkenntnis und Problemstellung .....</b>	<b>7</b>
2.1	Generative Verfahren im Werkzeug- und Formenbau .....	7
2.1.1	Generative Fertigungsverfahren.....	7
2.1.2	Grundlagen des Druckgießens .....	9
2.1.3	Stand der Anwendung generativer Verfahren im Werkzeug- und Formenbau.....	13
2.1.4	Vergleich geeigneter generativer Verfahren .....	15
2.2	Vorarbeiten zum indirekten Metall-Lasersinterprozess .....	24
2.2.1	Entwicklung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses ...	24
2.2.2	Kommerziell erhältlicher Prozess (Rapid Steel).....	25
2.2.3	Vorarbeiten.....	27
2.3	Zusammenfassung, Defizite und Handlungsbedarf.....	30
<b>3</b>	<b>Konzeption der Vorgehensweise.....</b>	<b>33</b>
3.1	Zielsetzung .....	33
3.2	Zielkriterien bei der Optimierung.....	34
3.3	Wahl der Vorgehensweise .....	35
3.3.1	Statistische Versuchsmethodik.....	35

3.3.2	Systemtheorie.....	37
3.4	Zuordnen von Methoden.....	40
3.4.1	Situationsanalyse.....	40
3.4.2	Modellierung.....	41
3.4.3	Festlegung der Optimierungsschwerpunkte.....	46
3.4.4	Lösung des Optimierungsproblems.....	49
3.5	Zusammenfassung.....	52
<b>4</b>	<b>Analyse der Prozesskette.....</b>	<b>55</b>
4.1	Anforderungen an das Lösungssystem.....	55
4.1.1	Anforderungen.....	55
4.1.2	Produktmerkmale.....	57
4.1.3	Zusammenfassung.....	63
4.2	Grobstrukturierung des Problemfeldes.....	65
4.3	Differenzierte Analyse.....	66
4.3.1	Vorgehensweise.....	68
4.3.2	Selektives Lasersintern.....	68
4.3.3	Ausbrennen des Binders.....	76
4.3.4	Sintern.....	79
4.3.5	Infiltrieren.....	85
4.4	Zusammenfassung.....	91
<b>5</b>	<b>Modellierung.....</b>	<b>93</b>
5.1	Vorgehensweise.....	93

5.2	Selektives Lasersintern .....	94
5.3	Ausbrennen des Binders .....	95
5.4	Sintern.....	96
5.5	Infiltrieren.....	97
5.6	Zusammenfassung .....	98
<b>6</b>	<b>Festlegung der Optimierungsschwerpunkte.....</b>	<b>101</b>
6.1	Mängel bei den Ausprägungen der Produktmerkmale .....	101
6.2	Einfluss der Prozessschritte .....	104
6.3	Aufstellen der Teilprobleme.....	105
6.3.1	Vorgehensweise.....	105
6.3.2	Selektives Lasersintern .....	106
6.3.3	Ausbrennen des Binders .....	107
6.3.4	Sintern .....	107
6.3.5	Infiltrieren.....	107
6.4	Zusammenfassung .....	107
<b>7</b>	<b>Lösung des Optimierungsproblems.....</b>	<b>109</b>
7.1	Genauigkeit.....	109
7.2	Versuchsvoraussetzungen.....	111
7.3	Optimierung des Merkmals Genauigkeit .....	113
7.3.1	Lösungen für den Prozessschritt „Selektiver Lasersinterprozess“ .....	113
7.3.2	Lösungen für den Prozessschritt „Ausbrennen des Binders“ .....	116

7.3.3	Lösungen für den Prozessschritt „Sintern“ .....	118
7.3.4	Lösungen für den Prozessschritt „Infiltrieren“ .....	125
7.4	Zusammenfassung.....	133
<b>8</b>	<b>Anwendungsbeispiel .....</b>	<b>139</b>
8.1	Genauigkeit .....	140
8.2	Herstellungszeit.....	141
8.3	Standmenge .....	143
8.4	Kosten.....	144
8.5	Zusammenfassung.....	146
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>147</b>
<b>10</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>151</b>
<b>11</b>	<b>Verwendete Abkürzungen .....</b>	<b>165</b>

# 1 Einleitung und Zielsetzung

## 1.1 Einleitung

Verfahren zur Großserienfertigung wie das Spritz- und Druckgießen sind in erster Linie so konzipiert, dass sie eine kostengünstige Herstellung von Bauteilen in hohen Stückzahlen ermöglichen. Die hohe Produktivität dieser Verfahren rechtfertigt einen hohen Zeit- und Kostenaufwand für die Herstellung der entsprechenden Produktionsmittel wie beispielsweise Werkzeuge (SPUR & STÖFFERLE 1981; WARNECKE & WESTKÄMPER 1998).

Aufgrund der zunehmenden Marktsättigung vor allem in der Kraftfahrzeug- und Konsumgüterindustrie ist seit längerem ein Trend zu größerer Typenvielfalt und Modelldifferenzierung zu beobachten. Das bedeutet mehr Varianten bei geringeren Stückzahlen (vgl. MILBERG 1997; NOWAK 1998). Die Auswirkungen dieses Trends können durch Maßnahmen wie Plattformkonzepte nur gedämpft, nicht jedoch beseitigt werden. Daraus ergibt sich die Anforderung, beispielsweise Spritz- und Druckgussteile auch bei geringeren Stückzahlen wirtschaftlich herzustellen, um die Vorteile urformender Verfahren, wie die hohe Gestaltungsfreiheit für Bauteile, auch weiterhin nutzen zu können.

Hinzu kommt die Forderung nach wesentlich kürzeren Fertigungszeiten für die entsprechenden Werkzeuge bei gleichzeitig hohen Qualitätsanforderungen (REINHART 2000). Schnelle Modellwechsel bei den Produkten machen auch im Werkzeug- und Formenbau ein hohes Maß an Flexibilität und Reaktionsfähigkeit erforderlich (KLOCKE U. A. 2000).

Um Montagekosten zu vermeiden, wird in einzelne Bauteile eine zunehmende Anzahl von Funktionen integriert. Dies hat eine Steigerung der Komplexität von Bauteilen und damit auch von Formeinsätzen der entsprechenden Spritz- und Druckgießwerkzeuge zur Folge (KLOCKE U. A. 2000). Gleichzeitig kommen neue Gusswerkstoffe zum Einsatz, über deren Verhalten noch unzureichende Erfahrungen vorliegen. Ein Beispiel dafür ist die Wiederentdeckung von Magnesium als Konstruktionswerkstoff (DEINZER 1998).

Diesen neuen Anforderungen kann der Werkzeug- und Formenbau nur durch den Einsatz neuer Organisationsformen, Vorgehensweisen sowie Fertigungsverfahren gerecht werden.

Zu den neuen Fertigungsverfahren zählen die generativen Verfahren, die Bauteile auf Grundlage von 3D-CAD-Daten schichtweise erzeugen. Generative Verfahren haben bereits den Muster- und Prototypenbau revolutioniert. Da Fertigungszeit und -kosten nicht von der Komplexität der Geometrie des zu fertigenden Bauteils abhängig sind, sind sie vor allem bei der Herstellung von komplexen Modellen nicht mehr wegzudenken (GEBHARDT 2000; STETTIN 2000). Diese Unabhängigkeit von der Bauteilgeometrie führt zu einer hohen Flexibilität.

Weitere Vorteile der generativen Verfahren sind der weitgehend mannlöse Betrieb sowie der im Vergleich zu abtragenden Verfahren geringe Aufwand für die Arbeitsvorbereitung. Unter abtragenden Verfahren werden in diesem Zusammenhang alle Fertigungsverfahren verstanden, die das Bauteil durch das Aufheben des Stoffzusammenhalts gestalten, also spanende Verfahren sowie das Senkerodieren.

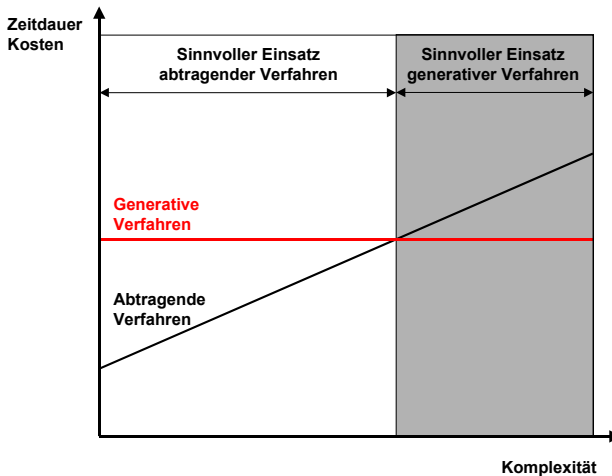


Abbildung 1-1: Vergleich abtragender und generativer Verfahren

Der Einsatz von generativen Fertigungsverfahren verspricht auch im Werkzeug- und Formenbau, vor allem bei Herstellung von komplexen Formeinsätzen für das

Spritz- und Druckgießen, eine Verkürzung der Durchlaufzeit sowie eine Erhöhung der Flexibilität.

Während die Anwendung generativer Verfahren beim Spritzgießen zumindest für die Herstellung von Prototypen- und Kleinserienwerkzeugen bereits weit verbreitet ist (KÜHNLE U. A. 1999; KLOCKE U. A. 2000), gibt es für den Druckgießprozess erst pilothafte Realisierungen. Dies liegt an der Kombination von hohen Genauigkeitsanforderungen mit hohen Festigkeits- und Temperaturbeanspruchung.

Nur wenige generative Verfahren sind daher für das Anwendungsgebiet Druckgießen überhaupt geeignet. Zu diesen Verfahren zählt auch der indirekte Metall-Lasersinterprozess (IMLS).

Der an der Universität von Texas in Austin entwickelte und von der US-amerikanischen Firma DTM Corp. kommerziell vertriebene indirekte Metall-Lasersinterprozess ist wie alle generativen Verfahren ein vergleichsweise junger Prozess. Die erste Variante (Rapid Steel) ist seit 1996 erhältlich (DTM 1998). Obwohl Nachweise der grundsätzlichen Eignung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses zur Herstellung von Formeinsätzen für den Druckgießprozess erbracht wurden (LORENZEN & BREITINGER 1996; SEITZ 2000; BREITINGER 2001), ist es bislang noch nicht gelungen, das Potenzial dieses Prozesses, nämlich die schnelle Erzeugung komplexer Geometrien bei einfacher Arbeitsvorbereitung und weitgehend manlosem Betrieb, für die Herstellung von Druckgießwerkzeugen nutzbar zu machen (KÜHNLE U. A. 1999; STETTIN 2000). Als Grund für die zurückhaltende Nutzung wird neben den hohen Einstiegskosten in die Technologie im wesentlichen eine unzureichende Erfüllung der Qualitätsanforderungen des Werkzeug- und Formenbaus genannt (KÜHNLE U. A. 1999).

### **1.2 Zielsetzung**

Ziel der Arbeit ist es daher, den indirekten Metall-Lasersinterprozess so zu optimieren, dass damit Formeinsätze hergestellt werden können, die den Anforderungen des Druckgießprozesses genügen.

Dabei soll sich die Optimierung nicht auf das Finden einer geeigneten Parametereinstellung innerhalb des bestehenden Prozessablaufs beschränken. Vielmehr gilt es, Lösungsansätze zu finden, bei denen auch Veränderungen des bestehen

den Prozesses berücksichtigt werden. Dadurch soll die Wahrscheinlichkeit erhöht werden, nachhaltige Verbesserungen zu erzielen.

Im Rahmen dieser Arbeit ist daher eine geeignete Vorgehensweise zu entwickeln, die über eine Unterstützung der Optimierung innerhalb der bestehenden Strukturen des indirekten Metall-Lasersinterprozesses hinausgeht.

### 1.3 Vorgehensweise

Um die genannte Zielsetzung zu erreichen, wird folgendermaßen vorgegangen (vgl. Abbildung 1-2):

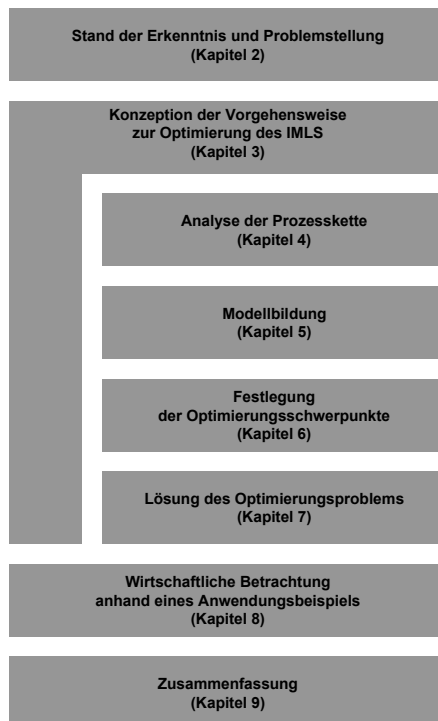


Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit



In Kapitel 2 wird der Stand der Technik beim Einsatz generativer Verfahren im Werkzeug- und Formenbau für das Druckgießen dargestellt. Hierzu werden die Grundlagen der generativen Verfahren sowie des Werkzeug- und Formenbaus erläutert.

Nach der Darstellung des Standes der Anwendung von generativen Verfahren im Werkzeug- und Formenbau folgt ein Vergleich der für den Einsatz im Druckgießprozess geeigneten generativen Verfahren einschließlich des indirekten Metall-Lasersinterprozesses. Der momentane Stand der Erkenntnis beim indirekten Metall-Lasersinterprozess wird dargestellt. Aus den vorhandenen Defiziten wird abschließend der Forschungsbedarf abgeleitet.

Kapitel 3 befasst sich mit der Konzeption der Vorgehensweise für die Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses unter Berücksichtigung der Zielsetzung. Mögliche Vorgehensweisen zur Optimierung von Fertigungsprozessen werden diskutiert und die Auswahl einer auf der Systemtheorie basierenden Vorgehensweise begründet. Den einzelnen Schritten dieser Vorgehensweise, Situationsanalyse, Modellierung, Festlegung der Optimierungsschwerpunkte und Lösung des Optimierungsproblems, werden geeignete Methoden zugeordnet.

In den Kapiteln 4 bis 7 erfolgt die Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses entsprechend der in Kapitel 3 erarbeiteten Vorgehensweise:

In Kapitel 4 beinhaltet die Analyse der Prozesskette des indirekten Metall-Lasersinterprozesses. Hier werden zum einen die Anforderungen erarbeitet, die an den indirekten Metall-Lasersinterprozess gestellt werden. Zum anderen werden nach einer Aufteilung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses in geeignete Teilprozessschritte die Wirkzusammenhänge innerhalb der Teilprozessschritte abgeleitet.

Durch die in Kapitel 5 dargestellte Modellierung sollen die in Kapitel 4 erarbeiteten Zusammenhänge innerhalb der einzelnen Prozessschritte des indirekten Metall-Lasersinterprozesses abgebildet und strukturiert werden.

Auf dieser Grundlage werden in Kapitel 6 geeignete Optimierungsschwerpunkte festgelegt. Nach der Identifikation der primär zu beseitigenden Mängel werden durch Analyse der Anforderungen und der entsprechenden Wirkzusammenhänge Teilprobleme formuliert, durch deren Lösung die Anforderungen erfüllt werden sollen.

In Kapitel 7 werden für die festgelegten Teilprobleme Lösungen erarbeitet. Diese Lösungen werden hinsichtlich ihrer quantitativen Auswirkungen auf die Ausgangsgrößen des indirekten Metall-Lasersinterprozesses analysiert und bewertet.

Kapitel 8 beinhaltet ein Anwendungsbeispiel, anhand dessen die erarbeitete Lösung praktisch erprobt und nach wirtschaftlicher Kriterien beurteilt wird.

Kapitel 9 fasst die Arbeit abschließend zusammen.

## **2 Stand der Erkenntnis und Problemstellung**

Im folgenden wird der momentane Stand der Technik beim Einsatz generativer Verfahren im Werkzeug- und Formenbau dargestellt. Hierzu wird zunächst das Grundprinzip der generativen Verfahren erläutert. Anschließend werden die Grundlagen des Werkzeug- und Formenbaus behandelt sowie die Möglichkeiten, die ein Einsatz generativer Verfahren im Werkzeug- und Formenbau bietet.

Es folgt eine Gegenüberstellung der für den Einsatz im Druckgießprozess relevanten generativen Verfahren, d. h. es werden die generativen Verfahren behandelt, mit denen Formeinsätze hergestellt werden können, die sich für den Einsatz im Druckgießprozess eignen. Es wird dabei gezeigt, warum gerade der indirekte Metall-Lasersinterprozess in diesem Einsatzbereich besondere Vorteile bietet.

Der momentane Stand der Erkenntnis beim indirekten Metall-Lasersinterprozess wird dargestellt. Aus den vorhandenen Defiziten wird abschließend der Forschungsbedarf abgeleitet.

### **2.1 Generative Verfahren im Werkzeug- und Formenbau**

#### **2.1.1 Generative Fertigungsverfahren**

Mit dem Begriff „generative Verfahren“ werden Fertigungsverfahren bezeichnet, die dreidimensionale Objekte durch das Aufeinanderfügen von Materialschichten erzeugen. Die Schichten werden automatisch unter Nutzung der Geometriedaten des herzustellenden Körpers generiert (GEUER 1996). Für die generativen Verfahren gibt es zahlreiche andere Bezeichnungen, die bekanntesten sind „Rapid Prototyping“, „Solid Freeform Manufacturing“, „Additive Manufacturing“ und „Layer Manufacturing“ (GEBHARDT 1996). Im Rahmen dieser Arbeit wird durchgängig der Begriff „generative Verfahren“ verwendet.

Ausgangsbasis für alle generativen Verfahren ist ein dreidimensionales CAD-Modell des herzustellenden Bauteils, beim Einsatz im Werkzeug- und Formenbau entsprechend ein Modell des herzustellenden Formeinsatzes.

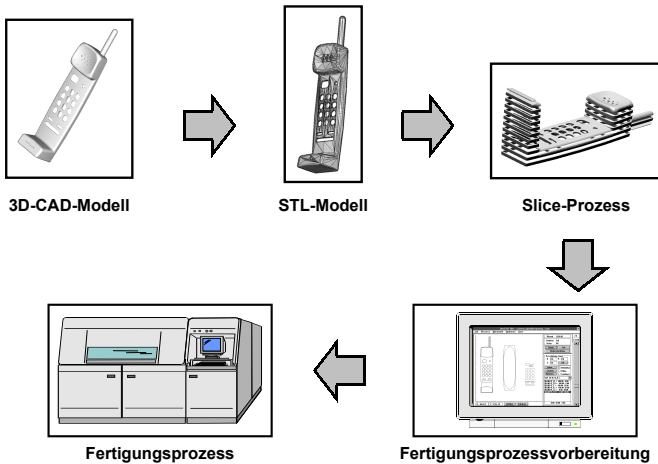


Abbildung 2-1: Prozesskette generative Verfahren

Das 3D-CAD-Modell wird für den folgenden generativen Fertigungsprozess in das STL-Format (Standard Transformation Language) exportiert (GEBHARDT 1996). Das CAD-Modell im STL-Format wird dann in einem virtuellen Bauraum platziert. Eventuell muss je nach Verfahren eine Stützkonstruktion erzeugt werden, um auskragende Bauteilabschnitte abzustützen. Die STL-Daten des Bauteils und die Stützkonstruktion werden anschließend in einem sogenannten Slice-Prozess in einzelne, gleich dicke Schichten zerlegt.

Die so erzeugten Schichtdaten bilden dann die Fertigungsinformation für die unterschiedlichen generativen Fertigungsverfahren. Den einzelnen Schichten werden im Rahmen der Vorbereitung für den Fertigungsprozess spezifische Prozessparameter wie z. B. Laserleistung zugewiesen. Schicht für Schicht wird dann das Modell in der entsprechenden Fertigungsanlage aufgebaut (MACHT 1999).

Durch diese Vorgehensweise wird ein komplexes dreidimensionales Fertigungsproblem auf viele, aber einfachere zweidimensionale Fertigungsschritte reduziert (REINHART U. A. 1997). Wesentlicher Vorteil der generativen Verfahren im Vergleich zu abtragenden Fertigungsverfahren ist, dass Fertigungszeit und Kosten nicht von der geometrischen Komplexität des zu fertigenden Bauteils abhängig sind. Daher ist der Einsatz dieser Verfahren in erster Linie bei der Herstellung von geometrisch sehr komplexen Bauteilen sinnvoll. Wesentlicher Nachteil der

generativen Fertigungsverfahren ist, dass im Vergleich zu den abtragenden Verfahren nur aus einer kleinen Werkstoffpalette ausgewählt werden kann (GEBHARDT 2000).

In beschränktem Rahmen kann hierbei Abhilfe durch die Kombination von generativen Verfahren mit Folgetechniken wie z. B. dem Vakuumgießen oder dem Feinguss geschaffen werden (REINHART U. A. 1997).

### **2.1.2 Grundlagen des Druckgießens**

#### **2.1.2.1 Druckgießwerkzeuge**

Unter Werkzeugen werden Fertigungshilfsmittel verstanden, die auf ein bestimmtes Material unmittelbar zum Zweck der Form- oder Substanzveränderung mechanischer bzw. physikalisch-chemischer Art einwirken (EVERSHEIM & KLOCKE 1998). Da diese Definition auch Standardwerkzeuge wie Fräsköpfe etc. umfasst, ist es notwendig, eine Abgrenzung der Erzeugnisse des Werkzeug- und Formenbaus vorzunehmen.

Nach EVERSHEIM & KLOCKE (1998) sind die im Werkzeug- und Formenbau hergestellten Werkzeuge durch eine teilweise oder vollständige Abbildung der Werkstückform auf der Werkzeuggeometrie charakterisiert und werden daher auch als Hohlformwerkzeuge bezeichnet. Hohlformwerkzeuge werden bei den Fertigungsverfahren Umformen und Urformen verwendet.

Das Druckgießen ist wie das Spritzgießen ein urformendes Verfahren. Beim Druckgießen wird ein geschmolzenes Leichtmetall unter hohem Druck und mit hoher Geschwindigkeit in die Formhöhlung des Druckgießwerkzeuges gepresst. Nach dem Erstarren wird das Bauteil ausgeworfen.

Dabei bestehen die Aufgaben des Werkzeugs darin, die Schmelze aufzunehmen, zu verteilen, auszuformen, abzukühlen und damit in einen festen Zustand zu überführen sowie das resultierende Bauteil auszuwerfen (vgl. MENGES & MOHREN 1991). Diese technologisch bedingten Aufgaben sind begleitet von konstruktiv bedingten Aufgaben wie Aufnehmen der Kräfte, Übertragen der Bewegungen und Führen der Werkzeigteile.

Zur Lösung der genannten Aufgaben gibt es in einem Werkzeug die in Abbildung 2-2 aufgelisteten Funktionskomplexe (MENGENS & MOHREN 1991):

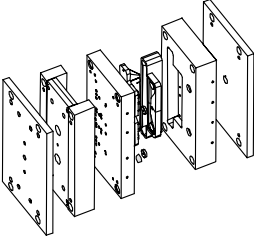
- Angussystem
  - Formeinsatz
  - Temperierung
  - Entformungssystem
- 
- Führung und Zentrierung
  - Maschinenaufnahme
  - Kraftaufnahme
  - Bewegungsübertragung

Abbildung 2-2: Aufgliederung eines Werkzeugs in Funktionskomplexe

Die Bauteilgestalt wird durch die Formeinsätze abgebildet. Nur bei Formeinsätzen kann ein entsprechender Komplexitätsgrad auftreten, der eine Wahl zwischen unterschiedlichen Fertigungstechnologien, wie zwischen abtragenden und generativen Verfahren, überhaupt notwendig macht. Das bedeutet, dass der Einsatz von generativen Verfahren nach dem derzeitigen Erkenntnisstand im Werkzeug- und Formenbau ausschließlich bei der Herstellung von Formeinsätzen sinnvoll ist.

### 2.1.2.2 Druckgießverfahren

Neben dem Werkzeug wird für die Durchführung des Druckgießprozesses noch eine entsprechende Druckgießanlage benötigt. Entsprechend dem Bauprinzip der Anlage wird zwischen dem Warmkammer- und dem Kaltkammerverfahren unterschieden (FISCHER U. A. 1990):

#### Warmkammerverfahren

Beim Warmkammerverfahren befindet sich die Druckkammer in der Schmelze (vgl. Abbildung 2-3). Mit diesem Verfahren können nur Metalle vergossen werden, welche auch bei dauerndem Kontakt der Metallschmelze mit der Druckkammer diese nicht zerstören (z.B. Magnesium, Zink). Durch einen Kolben wird bei jedem Gießvorgang eine genau vorbestimmte Menge an Metallschmelze in die Form gedrückt.

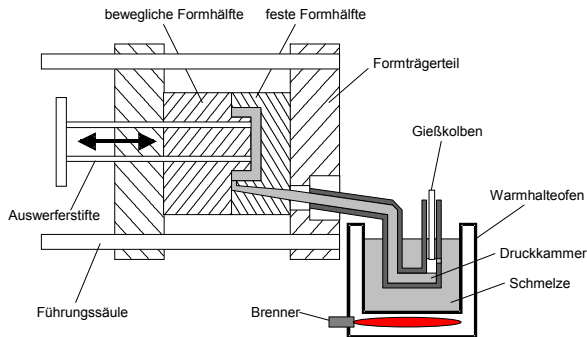


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des Warmkammer-Druckgießens (FISCHER U. A. 1990)

### Kaltkammerverfahren

Beim Kaltkammerverfahren befindet sich die Druckkammer dagegen außerhalb der Schmelze (vgl. Abbildung 2-4). Deshalb können mit diesem Verfahren z.B. Aluminium- und Kupferlegierungen vergossen werden, welche die Werkstoffe von Druckkolben und Druckkammer angreifen würden. Hier wird immer nur die für ein Werkstück ausreichende Schmelze vom getrennt aufgestellten Warmhalteofen in die Druckkammer eingefüllt und in die Form gedrückt.

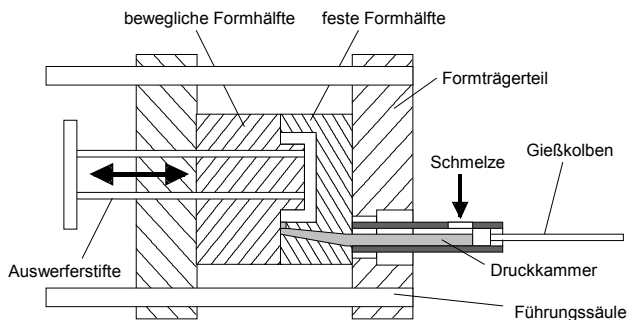


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung des Kaltkammer-Druckgießens (FISCHER U. A. 1990)

### 2.1.2.3 Druckgusswerkstoffe

Insbesondere im Automobilbau gewinnen Leichtmetalle, vor allem Aluminium- und Magnesiumlegierungen, aufgrund der zunehmenden Forderung nach Verbrauchsreduzierung immer mehr an Bedeutung (MERTZ U. A. 1999). Dies spiegelt sich z. B. in der Vervielfachung der Verwendung von Bauteilen aus Aluminium oder Magnesium in Kraftfahrzeugen wieder (vgl. Abbildung 2-5).

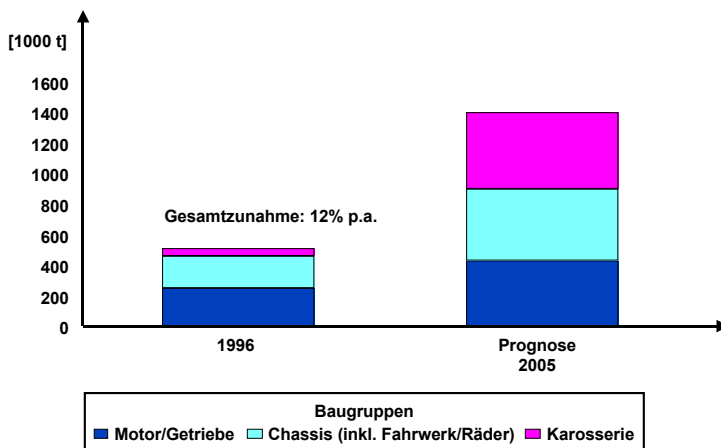


Abbildung 2-5: Prognose für den Aluminiumverbrauch bei der Automobilherstellung (Europa) (MERTZ U. A. 1999)

Das Druckgießen ermöglicht die Verarbeitung von Leichtmetallen. Wesentliche Vorteile des Druckgießens im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren sind hierbei:

- Hohe Produktivität.
- Hohe gestalterische Freiheit bei der entsprechenden Bauteilgeometrie.
- Endabmessungsnahe Fertigung, d. h. niedriger Nachbearbeitungsaufwand.

Aus diesen Gründen gehört das Druckgießen zu den wichtigsten Fertigungsverfahren bei der Verarbeitung von Leichtmetallen. Somit steigt seine Bedeutung proportional zur Anwendung der Leichtmetallwerkstoffe.



Die Art des verwendeten Leichtmetalls spielt eine wichtige Rolle hinsichtlich der Beanspruchungen, denen Werkzeugformeinsätze beim Druckgießen ausgesetzt sind. Während sowohl für Aluminium-, als auch für Magnesiumlegierungen die Gießdrücke zwischen 400 und 1600 bar und die Einfließgeschwindigkeiten zwischen 30 und 60 m/s liegen, gibt es bei der thermischen Belastung für den verwendeten Formeingsatz einen signifikanten Unterschied zwischen beiden Materialien. So bringt Aluminium im Vergleich zu Magnesium etwa die zweieinhalbfache Wärmemenge in das Werkzeug ein (MERTZ 1997).

Nachfolgend sind die wichtigsten Aluminium- und Magnesiumlegierungen tabellarisch aufgelistet:

Legierung	Festigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Schmelzbereich [°C]	Anwendungen
G-AlSi9Cu3 (226)	240 - 310	600 - 650	Maschinen- und Motorenteile
G-AlSi12 (230)	370	600 - 650	Maschinen- und Motorenteile
AlSi12Cu1 (231)	220 - 300	600 - 680	Gehäuse und Rippenkörper

*Tabelle 2-1: Wichtige Al-Guss-Legierungen*

Legierung	Festigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Schmelzbereich [°C]	Anwendungen
GD-MgAl9zn1 (AZ91)	200 - 250	420 - 600	Motorenteile, Maschinenteile, Rechnerteile
GD-MgAl8Zn1 (AZ 81)	200 - 240	425 - 615	Motorenteile, Maschinenteile, Rechnerteile
GD-MgAl6Mn (AM60)	190 - 230	445 - 630	Sitzteile; Instrumententafeln, Felgen

*Tabelle 2-2: Wichtige Mg-Guss-Legierungen*

### 2.1.3 Stand der Anwendung generativer Verfahren im Werkzeug- und Formenbau

Der Vorteil generativer Verfahren bei der Herstellung von komplexen Geometrien kann in erster Linie bei der Herstellung von Formeinsätzen genutzt werden.

Der optimale Einsatzbereich liegt bei der Herstellung von Formeinsätzen, die sich mit abtragenden Fertigungsverfahren nur schwierig und unter großem Zeit- und Kostenaufwand fertigen lassen, d. h. der Formeinsatz kann nicht mehr ausschließlich über Fräsen hergestellt werden.

Nach HOCK (1996) ist Fräsen ab einem Verhältnis von Fräserlänge zu Fräserdurchmesser größer als fünf zu eins nur noch bedingt einsetzbar. Sind Formelemente zu fertigen, die aus diesem Grund den Einsatz von Fräsern schwierig gestalten, ist das Senkerodieren des Formeinsatzes notwendig (BREITINGER 2001). Dazu wird aus dem CAD-Modell des Formeinsatzes ein NC-Programm zur Herstellung der entsprechenden Elektroden erstellt. Die Elektroden werden dann aus Kupfer oder Graphit gefräst. Abschließend erfolgt der Senkerodiervorgang (KLOCKE & EVERSHEIM 1998).

Durch den Einsatz generativer Verfahren soll das Senkerodieren vermieden werden können. Im Vergleich zum Senkerodieren werden bei Anwendungen generativer Verfahren in der Literatur Zeiteinsparungen bis zu 80% und Kosteneinsparungen bis zu 30% genannt (SEITZ 1997; SHELLABEAR & WEILHAMMER 1999). Nach einer von der Ingenieurschule St. Gallen erstellten Studie liegen jedoch nur 4% der Anwendungen generativer Verfahren im Werkzeug- und Formenbau (SCHUMACHER 1997), wovon die Herstellung von Formeinsätzen für das Spritzgießen den wesentlichen Anteil ausmacht (KÜHNLE & STETTIN 1999).

Daraus ergibt sich eine Diskrepanz zwischen einem offensichtlich vorhandenen hohen Potenzial der generativen Verfahren bei der Herstellung von Formeinsätzen für den Druckguss zum einen und der geringen Zahl der tatsächlichen Anwendungen zum anderen. Hierfür lassen sich folgende Gründe aufführen:

- Die im Werkzeug- und Formenbau geforderten Form- und Lagetoleranzen können ohne spanende Nachbearbeitung nicht eingehalten werden (KÜHNLE U. A. 1999; KLOCKE U. A. 2000).
- Die Oberflächen generativ hergestellter Formeinsätze sind prozessbedingt stufig und können die geforderte Qualität erst nach z. T. aufwändiger, manueller Nachbearbeitung erreichen (KLOCKE U. A. 2000).
- Die thermisch-mechanische Belastung generativ hergestellter Formeinsätze ergibt sich direkt aus dem Einsatzbereich Druckgießprozess. Da die thermisch-mechanische Belastung im Druckgießprozess generell sehr hoch ist, gibt es nur eine geringe Anzahl an generativen Verfahren, die diese Anforderung

rung überhaupt erfüllen, selbst wenn Folgetechniken berücksichtigt werden (GEBHARDT 1998; FÄHRER & MEINDL 2000).

### 2.1.4 Vergleich geeigneter generativer Verfahren

Nachfolgend sollen diejenigen generativen Fertigungsverfahren und darauf basierende Prozessketten verglichen werden, die für einen Einsatz im Druckgießprozess wenigstens prinzipiell geeignet sind. In der Regel ist für einen Einsatz im Druckgießprozess die Herstellung metallischer Werkzeugeinsätze erforderlich.

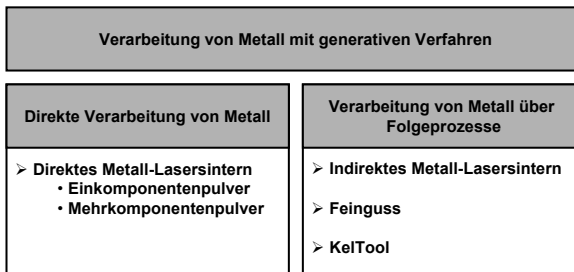


Abbildung 2-6: Generative Verfahren für die Herstellung metallischer Formeinsätze

Die generativen Verfahren, die mit Aussicht auf Erfolg angewendet werden können, lassen sich in zwei Gruppen aufteilen (GEBHARDT 1998):

- Verfahren, die Metalle direkt verarbeiten: Hierzu zählt der direkte Metall-Lasersinterprozess entweder mit Einkomponenten- oder Mehrkomponentenpulver. Der direkte Metall-Lasersinterprozess mit Einkomponentenpulver wird auch als Laserschmelzen bezeichnet.
- Verfahren, die Kunststoffmodelle erzeugen: Der metallische Einsatz wird hier über einen Folgeprozess erzeugt. Wesentlicher Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass generative Verfahren, die Kunststoffe verarbeiten, gut beherrschbar sind. Als Nachteil erweist sich die längere und damit störanfällige Prozesskette. Zu diesen Verfahren zählt die Feingussprozesskette mit generativ hergestellten, verlorenen Modellen, das KelTool-Verfahren und der indirekte Metall-Lasersinterprozess.

Der Vergleich dieser prinzipiell geeigneten generativen Verfahren erfolgt nach folgenden Kriterien:

Kriterium	Erläuterung
Standmenge	Anzahl der Bauteile, die sich mit einem Formeinsatz im Druckguss fertigen lassen
Herstellungsdauer	Zeit, die zum Herstellen eines Formeinsatzes mit der jeweiligen Prozesskette benötigt wird
Genauigkeit	Abweichungen zwischen Ist- und Sollmaß
Auflösung	Größe des kleinsten mit der jeweiligen Prozesskette noch herstellbaren Formelementes
Aspektverhältnis	Verhältnis von Höhe zu Breite bzw. Durchmesser bei Formelementen
Oberflächenrauigkeit	Der arithmetische Mittelwert aller Abstände des Oberflächenprofils von der Mittellinie ( $R_a$ )
Maximale Baugröße	Abmessungen des größten Formeinsatzes, der mit dem jeweiligen Verfahren noch hergestellt werden kann

*Tabelle 2-3: Vergleichskriterien für generative Verfahren zur Herstellung von Formeinsätzen für den Druckguss*

### 2.1.4.1 Direkter Metall-Lasersinterprozess

Das direkte Metall-Lasersintern (DMLS) basiert auf dem Prinzip des selektiven Lasersinterns (SLS).

Beim SLS-Prozess wird ein pulverförmiges Ausgangsmaterial schichtweise aufgetragen und mit einem Laser innerhalb der Schicht und mit den bereits vorhandenen Schichten entsprechend den Fertigungsinformationen verschmolzen (NELSON 1993; LAKSHMINARAYAN 1992).

Da der SLS-Prozess ein thermischer Prozess ist, können damit prinzipiell alle schmelzbaren Materialien verarbeitet werden (VAIL 1994). Ursprünglich für die Verarbeitung von Wachs, amorphen und semikristallinen Thermoplasten verwendet, kam das SLS deshalb bald bei Versuchen zur Verarbeitung von Metallen zur Anwendung (CARTER & JONES 1993; VAIL 1994).

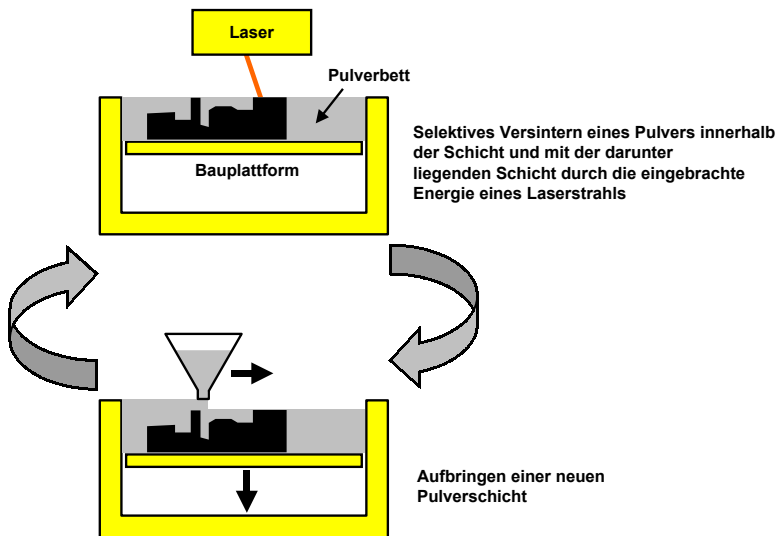


Abbildung 2-7: Prinzip des selektiven Lasersinterprozesses

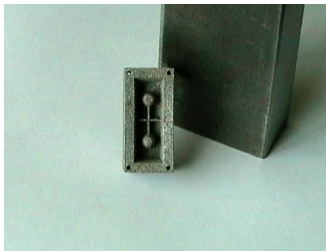
Mit dem Begriff „direktes Metall-Lasersintern (DMLS)“ werden die SLS-Verfahren bezeichnet, bei denen das Endmaterial direkt im Lasersinterprozess verarbeitet wird. Dabei ist das Sintern von Ein- und Mehrkomponentenpulver zu unterscheiden.

### **Sintern von Einkomponentenpulver (Laserschmelzen bzw. direktes Metall-Schmelzen)**

Beim Sintern von Einkomponentenpulver wird hochschmelzendes Metallpulver direkt durch die vom Laserstrahl in das Pulver eingebrachte Energie verschmolzen. Vor allem durch die direkte Verarbeitung von Werkzeug- oder Edelstahl erhofft man sich einen großen Zeit- und Kostenvorteil bei der Herstellung von komplexen Formeinsätzen.

Im Vergleich zum gut beherrschten Versintern von Kunststoffpulver treten allerdings eine Reihe von Problemen auf. Aufgrund der hohen Schmelztemperaturen dieser Materialien entsteht ein nur schwierig zu beherrschender Prozess. So werden die Gebrauchseigenschaften der Formeinsätze durch die Porosität, die unzu

reichende Oberflächenqualität und den hohen Verzug der Teile stark eingeschränkt.



*Abbildung 2-8: Mit direktem Metall-Schmelzen hergestelltes Testbauteil (WOLTER 1999)*

Diese Probleme sind bedingt durch thermisch induzierte Spannungen und die im Vergleich zu Thermoplasten um mehrere Größenordnungen höheren Oberflächenspannungen der metallischen Schmelze, die zur Bildung von Schmelzkugeln führt (SONG 1996; KLOCKE U. A. 1996; MEINERS & WISSENBACH 1997, MEINERS U. A. 1997). Aufgrund der hohen Schwindung ist dieses Verfahren zur Zeit auf die Herstellung sehr kleiner Formeinsätze beschränkt (GEBHARDT 1998; WOLTER 1999). Erfahrungen aus dem Einsatz im Druckgießprozess liegen noch nicht vor.

### **Sintern von Mehrkomponentenpulvern**

Um die genannten Nachteile des Einkomponentenpulvers zu vermeiden, wurden für den SLS-Prozess Mehrkomponentenpulver entwickelt. Mehrkomponentenpulver bestehen aus einer hoch- und einer niedrigschmelzenden Komponente. Beim Sintern wird die niedrigschmelzende Komponente durch den Laserstrahl aufgeschmolzen und benetzt die hochschmelzende Komponente (GEIGER & COREMANS 1997). Die niedrigschmelzende Komponente dient als Binder und verbleibt im Bauteil. Die Partikel der hochschmelzenden Komponente gehen keine Verbindung miteinander ein. Die Korngrößen und die Ausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien sind so aufeinander abgestimmt, dass die resultierende Schwindung minimiert wird (GEBHARDT 1998).

Resultat dieses Prozesses ist ein Körper hoher Porosität. Diese Porosität von etwa 30% ist ebenfalls als Grund für den geringen auftretenden Schwund anzusehen (LEIBELT U. A. 1997, COREMANS 1998). Durch eine Infiltration der Teile kann diese Porosität beseitigt werden.

Dieser Prozess ist zur Zeit mit bronze-/nickel- und stahlbasierten Metallpulvern kommerziell verfügbar (SHELLABEAR & WEILHAMMER 1999). Als Infiltrat zur Beseitigung der Porosität kann bei den bronze-/nickel-basierten Pulvern ein Epoxydharz oder ein niedrigschmelzendes Lot (Sn60PbAg) verwendet werden. Zur Infiltration des stahlbasierten Pulvers wird zur Zeit Aluminiumphosphat verwendet.

Während die bronze/nickel-basierte Variante aufgrund ihrer niedrigen Temperaturbeständigkeit nur im Kunststoffspritzguss eingesetzt werden kann, ist die stahlbasierte Variante prinzipiell auch für den Leichtmetalldruckguss geeignet. Die Standmenge ist jedoch deutlich beschränkt. So berichten JUNIOR & SHELLABEAR (2000) von 70 Bauteilen die in einer direkt lasergesinterten Form im Magnesiumdruckguss hergestellt wurden. Die Form war danach bis auf leichte Korrosionen am Einspritzpunkt noch verwendbar. Bei anderen Untersuchungen (WOLTER 1999) brach jedoch bereits nach vier Schuss das erste Formelement ab. Nach 40 Schuss waren drei weitere Formelemente zerstört.

Hierfür werden zwei Ursachen zu Grunde gelegt. Zum einen wird die Warmfestigkeit des direkt lasergesinterten Formeinsatzes in erster Linie durch die Warmfestigkeit der niedriger schmelzenden Komponente bestimmt, da die Partikel der hochschmelzenden Komponente keine Verbindung miteinander eingehen. Zum anderen ist es schwierig mit diesem Verfahren einen völlig massiven Formeinsatz herzustellen. In verbleibende Porositäten kann selbst nach einer Infiltration beim Druckguss Schmelze eindringen, was entweder zum Festbacken des Bauteils führt oder zur Ausweitung der Porositäten zu Rissen. In Versuchen wurde das Infiltrat durch die in den Formeinsatz eingeschossene Metallschmelze z. T. aus den Porositäten herausgewaschen. Obwohl beim direkten Metall-Lasersinterprozess nur ein Prozessschritt durchlaufen werden muss, ist dieses Verfahren kaum schneller als Prozessketten mit mehreren Fertigungsschritten wie z. B. das KelTool-Verfahren. So benötigt ein Formeinsatz der Größe 130 x 130 x 70 mm etwa 84 Stunden (DAAS 2000). Dies liegt an der für diesen Prozess charakteristischen langsamen Belichtungsdauer der einzelnen Schichten. Die Genauigkeit des Verfahrens ist mit 0,1 % Abweichung sehr gut. Es können Details bis zu 0,5 mm abgebildet werden. Die geforderte Oberflächenrauigkeit wird erst

nach der Infiltration und nachträglicher manueller Bearbeitung erreicht. Die maximale Baugröße beträgt zur Zeit 250 x 250 x 150 mm (WOLTER 1999).

### 2.1.4.2 Feinguss

Der Feinguss war eines der ersten Folgeverfahren, die zur Erweiterung des Werkstoffspektrums der generativen Verfahren genutzt wurde. Der Feinguss zählt zu den Gießverfahren mit verlorenem Modell und verlorener Form. Das Modell besteht aus einem ausschmelzbaren oder ausbrennbaren Werkstoff (GEUER 1996).

Das Modell wird mit Angüssen und Überläufen aus Wachs versehen und mit einem hochtemperaturbeständigen Keramiküberzug umhüllt. Das umhüllte Modell wird anschließend in mehreren Zyklen mit Sand bestreut, in keramische Masse getaucht und getrocknet, bis sich eine ca. 6–15 mm dicke Schale gebildet hat (GEUER 1996). Neben diesem Schalenformverfahren gibt es das Kompaktformverfahren. Dabei wird das mit einem Anguss versehene Modell in eine Kastenform vollständig mit Keramik eingegossen. Das Modell wird dann entweder ausgeschmolzen oder ausgebrannt. Anschließend wird die Keramikschale gebrannt. Danach kann der Gießwerkstoff in die entstandene Form gefüllt werden. Zum Entformen wird der Formwerkstoff vom Werkstück abgeschlagen.

Mit Hilfe der generativen Verfahren ist es möglich, die verlorenen Modelle für das Schalen- und das Kompaktformverfahren herzustellen. Dadurch erübrigt sich die Fertigung von üblicherweise zur Modellherstellung verwendeten Wachs-spritzformen, was vor allem bei kleinen Stückzahlen zu großen Zeit- und Kosteneinsparungen führt. Für die Herstellung von verlorenen Modellen sind die Verfahren Stereolithographie, Selektives Lasersintern und Fused Deposition Modeling gebräuchlich (GEBHARDT 1996).

Ein Vorteil des Feingusses ist die große Auswahl an verarbeitbaren Gießwerkstoffen. Z. B. kann Warmarbeitsstahl vergossen werden, so dass die Standmenge von Formeinsätzen, die mit dieser Prozesskette hergestellt werden, der Standmenge von konventionell hergestellten Formeinsätzen entspricht. Eine Wärmebehandlung der Formeinsätze ist ebenfalls möglich.

Allerdings weist diese Prozesskette eine Reihe von Nachteilen auf, die sie für den Einsatz im Werkzeug- und Formenbau ungeeignet erscheinen lassen.



Zwar lassen sich durch die Verwendung von generativen Verfahren zur Herstellung der verlorenen Modelle Zeitvorteile gegenüber der konventionellen Feingussprozesskette erreichen. Im Vergleich zu den anderen für den Werkzeug- und Formenbau geeigneten generativen und auch den abtragenden Verfahren ist die Feingussprozesskette aufgrund der aufwendigen Herstellung der Keramikschale mit ca. drei Wochen aber zu langsam (REINHART U. A. 1999).

Mit einer Streubreite von  $\pm 0,6\%$  vom Nennmaß ist die Genauigkeit dieser Prozesskette selbst für den Druckguss nicht mehr ausreichend. Erschwerend kommt hinzu, dass es sich bei Formeinsätzen in der Regel um massive Bauteile handelt. Durch Schwindungen, die beim Feinguss nicht prozesstechnisch ausgeglichen werden können, entstehen Lunker und zusätzliche Maßabweichungen (ALMOND 1996; WOLTER 1999).

Tiefe Kavitäten können nur schlecht abgebildet werden, da der keramische Schalenformstoff ab einem bestimmten Aspektverhältnis aufgrund seiner Zähigkeit nicht mehr eindringen kann. Die Oberfläche entspricht der Oberfläche des nachbearbeiteten verlorenen Modells, soweit sie nicht durch Lunker beeinträchtigt wird. Die Baugröße wird zum einen durch die Baugrößen der RP-Anlagen beschränkt, mit denen die verlorenen Modelle hergestellt werden. Zum anderen nimmt die Neigung zu Lunkern und Verzug mit zunehmendem Volumen des Bauteils stark zu.

### 2.1.4.3 KelTool

Beim KelTool-Verfahren handelt es sich um ein Abformverfahren. Ausgangspunkt ist ein Stereolithographiemodell des zu fertigenden Formeinsatzes. Das nachbearbeitete Stereolithographiemodell wird mit Silikonmasse umgossen (TRAPP 2000). Nach dem Aushärten der Silikonmasse wird das Stereolithographiemodell entfernt. Dadurch entsteht im Silikon eine Kavität in die ein epoxydharzgebundenes Werkzeugstahl-Pulver eingefüllt wird. Da ein Pulver mit einem weiten Spektrum an Korngrößen verwendet werden kann, werden Oberflächen und Strukturen sehr gut abgebildet. Der Binder härtet nach etwa 18 Stunden aus, der Einsatz kann aus der Silikonform entformt werden. In einem 45 Stunden dauernden Ofenprozess wird aus dem so entstandenen Grünteil des Formeinsatzes der Epoxydharzbinder thermisch ausgetrieben, wobei die verbleibenden Partikel versintern. In einem weiteren Ofenprozess werden die Einsätze mit einer Bronze-Legierung infiltriert (3D-SYSTEMS 2000).

Ein mit dem KelTool-Verfahren hergestellter Formeinsatz erlaubt die Herstellung von etwa 500 Magnesiumdruckgussbauteilen (WOLTER 1999). Hinsichtlich eines Einsatzes im Aluminiumdruckguss liegen noch keine Erfahrungswerte vor. Ein Formeinsatz kann innerhalb von acht Tagen hergestellt werden. Die Genauigkeit beträgt etwa 0,1% und wird im Wesentlichen durch die Genauigkeit des Stereolithographiemodells bestimmt. Damit ist das KelTool-Verfahren zur Zeit die genaueste auf generativen Verfahren basierende Prozesskette zur Herstellung von Formeinsätzen. Das Gleiche gilt für die Auflösung und die erzielbare Oberflächenrauigkeit. Eine Beschränkung des Einsatzbereiches liegt in der Größe. Zur Zeit können Einsätze bis ca. 230 x 150 x 110 mm hergestellt werden (WOLTER 1999). Eine weitere Einschränkung stellt das geringe erreichbare Aspektverhältnis dar. Spalte mit einem Verhältnis Breite zu Tiefe größer als eins zu vier sind nicht mehr abzubilden. Diese Einschränkung ist auf das Entformen des Grünteils aus der Silikonform zurückzuführen. Die bei diesem Vorgang entstehenden Kräfte führen zu einem Abbrechen von zu schmalen Formelementen am Grünteil.

### **2.1.4.4 Indirekter Metall-Lasersinterprozess (IMLS)**

Ebenso wie beim direkten Metall-Lasersinterprozess ist beim indirekten Metall-Lasersinterprozess der selektive Lasersinterprozess die Ausgangsbasis. Beim indirekten Prozess wird einem hochschmelzenden Metallpulver, z. B. Stahl, ein niedrigschmelzender thermoplastischer Polymerbinder hinzugefügt. Das resultierende Pulver wird dann im SLS-Prozess bearbeitet, wobei der Laser nur den niedrigschmelzenden Polymerbinder aufschmilzt. Dieser benetzt im aufgeweichten Zustand die Metallpulverpartikel, so dass nach einer erneuten Verfestigung des Binders durch diesen das Metallpulver zusammengehalten wird. Resultat ist der Grünling. In einem Ofenprozess wird zuerst der Polymerbinder thermisch ausgetrieben. Die verbleibenden Stahlpartikel werden durch eine weitere Temperaturerhöhung drucklos versintert. Das entstandene Gerüst aus Metall, der Braunling, wird nach einer abermaligen Temperaturerhöhung durch Schmelzen eines zugegebenen Infiltrats über die Kapillarwirkung infiltriert. Ergebnis ist ein massives Bauteil, das zu etwa 60% aus Stahl und zu 40% aus dem Infiltrat, wie z. B. Kupfer besteht (vgl. hierzu BREITINGER 2001; BEAMAN U. A. 1997).

Für den indirekten Metall-Lasersinterprozess liegen im Gegensatz zu den anderen vorgestellten Prozessen sowohl für den Magnesiumdruckguss, als auch für den Aluminiumdruckguss Erfahrungen vor. So beträgt die Standmenge bei

Formeinsätzen aus Stahl/Kupfer im Magnesiumdruckguss etwa 500 Teile, im Aluminiumdruckguss die Hälfte. Die Herstellung eines Formeinsatzes benötigt fünf Tage. Mit den genannten Materialien wird bei einer Schwindung von insgesamt 4% eine Genauigkeit von etwa 1% erreicht. Die Auflösung beträgt 0,5 mm. Beim Aspektverhältnis gibt es keinerlei Einschränkungen. Die benötigte Oberflächenrauigkeit wird erst nach manuellem Polieren erreicht. Das bisher größte erfolgreich eingesetzte Segment eines mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess hergestellten Formeinsatzes hat eine Größe von 280 x 150 x 200 mm (REINHART & FÄHRER 2000).

### 2.1.4.5 Bewertung

Anhand der genannten Aspekte kann eine qualitative Bewertung der behandelten generativen Verfahren hinsichtlich ihrer Eignung für die Herstellung von Formeinsätzen für den Druckguss erfolgen.

In Abbildung 2-9 sind die Ergebnisse der qualitativen Bewertung in einer Matrix aufgeführt. Dabei sind den Matrixzeilen die einzelnen Bewertungskriterien und den Matrixspalten die einzelnen Verfahren zugeordnet.

Es zeigt sich, dass die Feingussprozesskette aufgrund der langen Herstellungsdauer, der schlechten Genauigkeit und dem niedrigen erreichbaren Aspektverhältnis im Vergleich zu den anderen vorgestellten Prozessketten am schlechtesten abschneidet.

Der direkte Metall-Lasersinterprozess hat im Vergleich zu den beiden indirekten Prozessen zur Zeit beim Druckguss starke Einschränkungen hinsichtlich der Standmenge. Verbesserungen sind hier jedoch durch neue Materialsysteme und eine verbesserte Prozessbeherrschung zu erwarten. Zu Beachten sind beispielsweise bei der Bearbeitung von Einkomponentenpulvern Arbeiten des Fraunhofer Instituts für Lasertechnik in Aachen (vgl. etwa MEINERS & WISSENBACH 1997, MEINERS 1999) und im Bereich der Bearbeitung von Mehrkomponentenpulvern Arbeiten des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie in Erlangen (vgl. etwa GEIGER & COREMANS 1997, NIEBLING U. A. 2000).

Der KelTool-Prozess besticht zwar durch seine hohe Genauigkeit und Oberflächenqualität. Jedoch erweist sich das niedrige abbildbare Aspektverhältnis als nachteilig, da gerade hier die Vorteile generativer Verfahren und darauf basierender Prozessketten liegen sollten.

Hingegen weist der im Rahmen dieser Arbeit zu optimierende indirekte Metall-Lasersinterprozess hinsichtlich der genannten Kriterien keine signifikanten Schwächen auf. Er bietet somit zur Zeit, verglichen mit den anderen generativen Verfahren, die beste Ausgangsbasis, um schnell und kostengünstig für den Druckguss geeignete Formeinsätze herzustellen.

	DMLS	Feinguss	KelTool	IMLS
<b>Standmenge</b>	⊕	⊖	⊕	⊕
<b>Herstellungsdauer</b>	⊕	⊕	⊕	⊕
<b>Genauigkeit</b>	⊖	⊕	⊖	⊕
<b>Auflösung</b>	⊕	⊕	⊕	⊕
<b>Oberfläche</b>	⊕	⊕	⊖	⊕
<b>Max. Baugröße</b>	⊕	⊕	⊕	⊖
<b>Aspektverhältnis</b>	⊖	⊕	⊕	⊖

**Legende:**

- ⊖ Kaum Defizite hinsichtlich des jeweiligen Merkmals
- ⊕ Noch akzeptable Defizite
- ⊕ Gravierende Defizite

*Abbildung 2-9: Qualitative Bewertung generativer Verfahren hinsichtlich ihrer Eignung für den Werkzeug und Formenbau*

## 2.2 Vorarbeiten zum indirekten Metall-Lasersinterprozess

### 2.2.1 Entwicklung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses

Seit Beginn der Entwicklung generativer Verfahren bestand der Wunsch, damit auch metallische Werkstoffe verarbeiten zu können. Aufgrund der Schwierigkeiten, auf die man bei der direkten Verarbeitung von Metallen beim selektiven Lasersintern stieß (vgl. Kap. 2.1.4.1), wurde seit 1991 die Verarbeitung von Metallen über einen indirekten Prozess entwickelt (vgl. VAIL & BARLOW 1991; VAIL & BARLOW 1994; BADRINARAYAN & BARLOW 1994). Beim indirekten Prozess werden die Probleme des direkten Metall-Lasersinterns durch den Einsatz eines Polymerbinders umgangen (vgl. auch Kap. 2.1.4.4). Der Polymerbin

der ermöglicht ähnliche Prozessparameter wie beim Kunststofflasersintern, da nur der Binder versintert werden muss. Resultat des selektiven Lasersinterns ist dann ein Grünling, der aus Metallpulver und dem die einzelnen Metallpulverpartikel verbindenden thermoplastischen Binder besteht.

Grünlinge können nach dem thermischen oder chemischen Entfernen des Binders abhängig vom Materialsystem auf unterschiedliche Art und Weise weiterverarbeitet werden. Beispielsweise ist es möglich, durch Sintern oder heißstatisches Pressen (HIP) der Grünlinge Bauteile mit sehr hoher Dichte zu erzeugen. Allerdings ist die Porosität lasergesinteter Grünlinge so hoch, dass das Erzeugen einer hohen Dichte mit den genannten Verfahren zu einem sehr hohen Schwund führen würde. Daher wurde für den seit Anfang 1996 kommerziell erhältlichen Prozess (Rapid Steel) das Infiltrieren mit einem niedriger schmelzenden Material als Verfahren gewählt, um ein Bauteil mit möglichst geringer Porosität herzustellen (vgl. BEAMAN U. A. 1997).

### **2.2.2 Kommerziell erhältlicher Prozess (Rapid Steel)**

Der seit 1996 von der Firma DTM Corp. eingeführte kommerziell erhältliche indirekte Metall-Lasersinterprozess verwendet ein Stahlpulver (kohlenstoffarmer Stahl 1080), dessen 50µm große Partikel mit einer 5µm dicken Polymerschicht umhüllt sind (BEAMAN U. A. 1997; BREITINGER 2001).

Das Pulver wird in der Lasersinteranlage mit einem Rollermechanismus in 0,13 mm dünnen Schichten aufgetragen. Nach dem Auftrag wird dem Bauteilquerschnitt entsprechend der Laserstrahl über die Oberfläche der jeweiligen Pulverschicht geführt. Die Kunststoffummantelung des Stahlpulvers muss dabei soweit angeschmolzen werden, dass sich die Schichten zu einem zusammenhängenden Bauteil verbinden können.

Der resultierende Grünling wird danach in ein Polymerbad getaucht. Durch die Kapillarwirkung wird der Grünling vollständig mit Polymer (Epoxidharz) infiltriert. Anschließend erfolgt die Trocknung des Grünlings in einem Wärmeschrank bei einer Temperatur von ca. 50 °C. Diese Infiltration mit einem vernetzenden Polymer erwies sich als notwendig, da die Stahlpartikel ansonsten während des nachfolgenden Ofenprozesses auf der bei Glasübergangstemperatur zerfließenden Polymerbeschichtung unkontrollierbar gleiten würden (HEJMADI & MCALEA 1996).

Der polymerinfiltrierte Grünling wird anschließend gewogen. Aus dem Gewicht ergibt sich die erforderliche Menge des Infiltrats, in diesem Fall Kupfer.

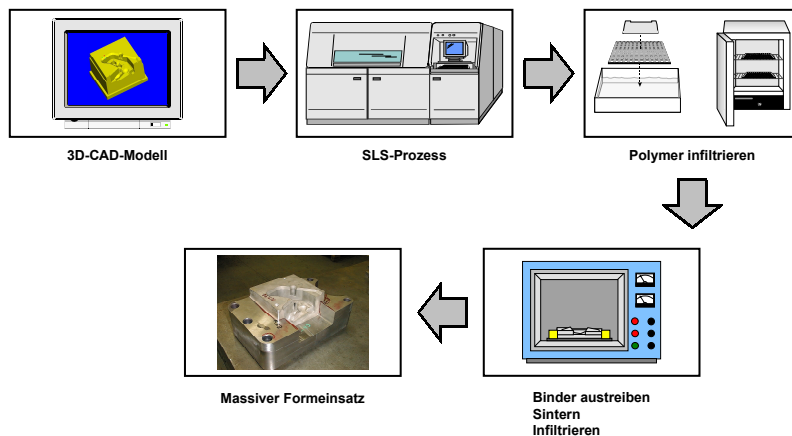


Abbildung 2-10: Ablauf des indirekten Metall-Lasersinterprozesses

Der Grünling wird auf einer Aluminiumoxidplatte in einen Tiegel platziert. An den Grünling werden seitlich sogenannte Chargiertabs angelegt. Chargiertabs sind quaderförmige Braunlinge und ermöglichen eine Infiltration von der Seite. Auf die Chargiertabs werden Kupferblöcke gelegt. Die genannten Elemente werden mit Aluminiumoxidpulver bedeckt (vgl. Abbildung 2-11).

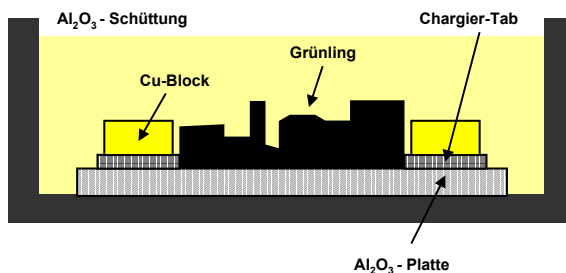


Abbildung 2-11: Präparation des Tiegels für den Ofenprozess

In dem nachfolgenden Sinterofenprozess wird der Polymerbinder in zwei Stufen ausgetrieben. Die verbleibenden Stahlpartikel werden durch eine Temperaturerhöhung drucklos versintert, bis sich diffusionsgetriebene Verbindungshälse gebildet haben. Resultat ist ein poröses Gerüst aus Stahl, der Braunling. Durch eine weitere Temperaturerhöhung schmilzt das Kupfer und gelangt durch Kapillarkwirkung über die Chargiertabs in das Bauteil bzw. den Formeinsatz.

Nach dem Abkühlen auf Raumtemperatur kann der Formeinsatz dem Ofen entnommen werden. Ergebnis ist ein massiver Formeinsatz, der zu etwa 60% aus Stahl und zu 40% aus Kupfer besteht (BREITINGER 2001).

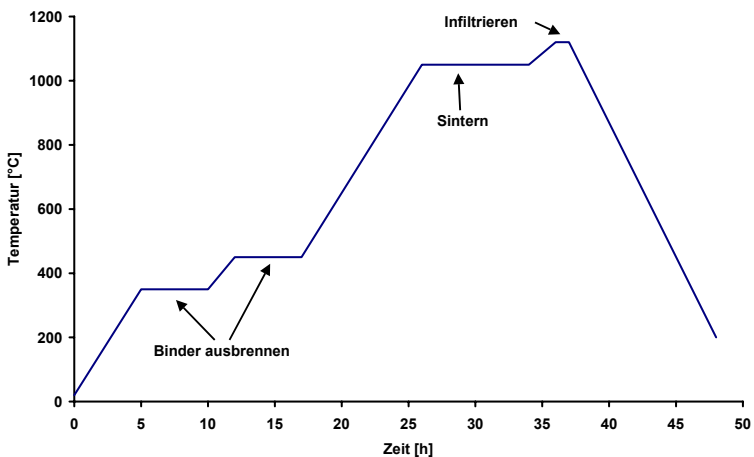


Abbildung 2-12: Temperaturverlauf im Sinterofen (vgl. BEAMAN U. A. 1997)

### 2.2.3 Vorarbeiten

Wesentliche Voraussetzung für den indirekte Metall-Lasersinterprozess in der vorgestellten Form war die Entwicklung eines für den SLS-Prozess geeigneten Bindersystems. Das verwendete Bindersystem basiert hauptsächlich auf den Vorarbeiten von Barlow (BADRINARAYAN & BARLOW 1995), Vail (VAIL 1995) und Badrinarayan, die an der Universität von Texas in Austin durchgeführt wurden.

Die genannten Arbeiten behandeln die Auswahl für den SLS-Prozess geeigneter Bindersysteme, die Herstellung dieser Bindersysteme sowie Verfahren zum Aufbringen des Binders auf das entsprechende hochschmelzende Material wie Metall oder auch Keramik. Gegenstand der Forschung war weiter das Verhalten von Pulvern aus hochschmelzendem Material und Binder im SLS-Prozess, der ebenfalls an der Universität von Texas in Austin entwickelt wurde.

In diesem Zusammenhang wurde auch das Ausbrennen des Binders untersucht. Schwerpunkt der Untersuchungen waren geeignete Atmosphären sowie Zusammenhänge zwischen Zeit, Temperatur und dem Grad der Verbrennung des Binders (BEAMAN U. A. 1997). Auf dieser Grundlage entwickelte die US-amerikanische Firma DTM Corp. die vorgestellte kommerzielle Form des indirekten Metall-Lasersinterprozesses.

Erste erfolgreiche Anwendungen des indirekten Metall-Lasersinterprozesses gab es bei der Herstellung von Formeinsätzen für den Spritzgießprozess. So wurde von GEUER (1996) ein mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess hergestellter Schieber als Bestandteil eines Spritzgießwerkzeugs für Bohrmaschinengetriebegehäuse eingesetzt. Weitere Beispiele sind Formeinsätze für die Herstellung von Funktelefonen (LORENZEN & BREITINGER 1996) oder Schaltschrankstützen (LORENZEN U. A. 1997).

Zur Herstellung von Formeinsätzen für den Druckguss wurde der indirekte Metall-Lasersinterprozess erstmals im Jahre 1997 verwendet. Das von BREITINGER (1997) beschriebene Magnesiumdruckgusswerkzeug mit lasergesinterten Formeinsätzen war gleichzeitig der erste Einsatz von mit generativen Verfahren hergestellten Formeinsätzen im Druckguss überhaupt. Der Nachweis für einen möglichen Einsatz im Aluminiumdruckguss gelang im gleichen Jahr (LORENZEN & BREITINGER 1997).

Die in Abschnitt 2.1.3 genannten Qualitätsmängel verhindern jedoch eine breitere Anwendung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses zur Unterstützung des Werkzeug- und Formenbaus. So bezeichnen beispielsweise KÜHNLE & STETTIN (1999; S. 434) die durch den Prozess verursachte hohe Schrumpfung der Formeinsätze von mehr als 4% in Grenzbereichen als nicht mehr beherrschbar.

Um Verbesserungen hinsichtlich der Anwendbarkeit im Druckguss zu erreichen, beschäftigten sich Kühnle sowie Breitinger mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess.



In KÜHNLE U. A. (1999) bzw. STETTIN (2000) wird ein neues Werkstoffsystem beschrieben, bei dem ein nicht genauer bezeichneter ferritischer Stahl als hochschmelzender Werkstoff verwendet wird. Infiltriert wird weiterhin mit Kupfer. Mit diesem Werkstoffsystem wurden Verbesserungen bei Form- und Lagetoleranzen erreicht.

BREITINGER (2001) entwickelte mehrere Ansätze, um die Anwendbarkeit des indirekten Metall-Lasersinterprozesses im Druckguss zu verbessern:

- Ausgehend von der oben beschriebenen kommerziell erhältlichen Variante des indirekten Metall-Lasersinterprozesses werden geometrieabhängige Skalierungsfaktoren ermittelt. Abhängig davon, ob der jeweilige Formeinsatz eine konvexe oder eine konkave Gestalt hat, wird der Formeinsatz mit unterschiedlichen Faktoren vorkaliert. Auf diese Weise werden im Vergleich zur Verwendung von einheitlichen Skalierungsfaktoren bei der Herstellung von Formeinsätzen Verbesserungen hinsichtlich der Genauigkeit erreicht. In der Praxis weisen Formeinsätze jedoch nicht immer eine einheitlich konvexe oder konkave Form auf, so dass die gewünschten Verbesserungen nicht in allen Anwendungsfällen erzielt werden können.
- Weiter entwickelte Breitinger ein FEM-Modell für die im Ofenprozess stattfindenden Verzüge. Durch eine entsprechende Vorverzerrung der Geometriedaten ist es möglich, verzugsärmere Formeinsätze herzustellen.
- Um die Standmenge der Formeinsätze zu verlängern untersuchte Breitinger verschiedene Möglichkeiten zur Oberflächenbehandlung lasergesinterter Formeinsätze wie Beschichtungs- und Randschichtvergütungsverfahren. Eine Verbesserung der Standmenge kann durch das Aufbringen einer thermisch gespritzten Wolframkarbid-Kobaltschicht erreicht werden. Jedoch zeigen sich Probleme beim Aufbringen der Schicht in tiefe Nuten und Spalten, was den Anwendungsbereich stark einschränkt.
- Als weiterer Ansatz zur Verlängerung der Standmenge wurden verschiedene Bronzen als alternative Infiltrationsmaterialien verwendet. Eine signifikante Verbesserung der Standmenge konnte jedoch nicht erreicht werden.

### 2.3 Zusammenfassung, Defizite und Handlungsbedarf

Aus dem momentanen Stand der Erkenntnis lässt sich somit folgendes zusammenfassen:

Generative Verfahren sind aufgrund ihres Funktionsprinzips hinsichtlich Herstellungszeit und -kosten unabhängig von der geometrischen Komplexität eines Bauteils. Bei der Herstellung geometrisch komplexer Formeinsätze bieten sie daher die Möglichkeit großer Zeit- und Kosteneinsparungen, was im Kunststoffspritzguss bereits genutzt wird. Zur Herstellung von Formeinsätzen für den Druckguss sind aufgrund der dabei auftretenden hohen thermo-mechanischen Belastung von den zur Zeit marktgängigen Verfahren nur der indirekte Metall-Lasersinterprozess und das KelTool-Verfahren geeignet. Für größere Formeinsätze mit tiefen Nuten ist momentan ausschließlich der indirekte Metall-Lasersinterprozess verwendbar. Jedoch verhindern Qualitätsmängel eine nachhaltige Nutzung des Potentials des indirekten Metall-Lasersinterprozesses.

Erste Ansätze zur Behebung der Qualitätsmängel sind vorhanden und führen teilweise auch zu Verbesserungen. Allerdings basieren die vorhandenen Ansätze, soweit veröffentlicht, stark auf der kommerziellen Variante des indirekten Metall-Lasersinterprozesses. So werden entweder reine Kompensationslösungen entwickelt (geometrieabhängige Skalierungsfaktoren, Vorverzerren der Geometriedaten auf Basis von FEM-Berechnungen), bei denen Prozessablauf und -parameter unverändert bleiben. Oder es werden einzelne Parameter verändert wie beispielsweise das Infiltrationsmaterial. Das Hinzufügen eines zusätzlichen Arbeitsschrittes wie die nachträgliche Beschichtung eines lasergesinterten Formeinsatzes greift ebenfalls nicht in den vorhandenen Prozess ein.

Die Beibehaltung der vorhandenen Strukturen und Abläufe des kommerziellen Prozesses bei den vorhandenen Lösungsansätzen wirkt stark determinierend auf die bei einer Optimierung erzielbaren Ergebnisse. D. h., die Art der möglichen Lösungen wird eingeschränkt. Die Wahrscheinlichkeit eine nachhaltige Verbesserung zu erzielen ist damit geringer als ohne diese Einschränkung.

Weiter beruhen die vorhandenen Lösungsansätze auf einer induktiven Vorgehensweise bei der Betrachtung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses. Der Prozess wird dabei über eine Messung der zugänglichen Eingangs- und Ausgangsgrößen betrachtet. Die anschließende Korrelation der Eingangs- und Ausgangsgrößen lässt zwar Vorhersagen über das Ein-/Ausgangsverhalten zu, ermöglicht jedoch keine weiteren Untersuchungen der prozessinternen Vorgänge.

Das Verständnis der Zusammenhänge innerhalb des Prozesses wird dadurch nicht gefördert.

Die genannten Grundlagenarbeiten zum indirekten Metall-Lasersinterprozess behandeln ausschließlich den ersten Teilprozessschritt, also den selektiven Lasersinterprozess. Hinsichtlich des Ofenprozesses sind lediglich Verfahrensweisungen oder Veröffentlichungen zur Vermarktung der Technologie vorhanden. Die prozessinternen Vorgänge und technologischen Gesetzmäßigkeiten waren noch nicht Gegenstand der Forschung.

Um den indirekten Metall-Lasersinterprozess nachhaltiger zu optimieren und grundlegende Verbesserungen zu erzielen, können somit folgende Anforderungen an eine Lösung formuliert werden:

- Lösungsansätze zur Verbesserung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses sollen nicht durch die vorhandenen Strukturen und Abläufe des kommerziellen Prozesses eingeschränkt werden. Hierfür ist eine geeignete Vorgehensweise zu entwickeln. Den Hintergrund hierfür bildet die Überlegung, dass es sich beim indirekten Metall-Lasersinterprozess noch um einen vergleichsweise jungen Prozess handelt, der somit noch erhebliches Verbesserungspotential bietet. Daher ist es sinnvoll, eine Vorgehensweise zu verwenden, die den Prozess nicht in seinen momentan vorhandenen Strukturen und Abläufen „einfriert“.
- Um ein tiefgehendes Verständnis des indirekten Metall-Lasersinterprozesses zu erhalten, sollte die Vorgehensweise auf einem deduktiven Ansatz beruhen.
- Auf dieser Grundlage sind geeignete Lösungskonzepte zu entwickeln, umzusetzen und hinsichtlich ihrer Eignung zu überprüfen.

Eine mögliche Lösung dieser Aufgabenstellung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit beschrieben.



### 3 Konzeption der Vorgehensweise

Kapitel 3 befasst sich mit der Konzeption der Vorgehensweise für die Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses. Hierzu werden die Zielsetzung der Vorgehensweise festgelegt, die Auswahl der Vorgehensweise begründet und schließlich die verwendete Vorgehensweise dargestellt.

#### 3.1 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist die Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses, also eines Produktionsprozesses. Ein Prozess bezeichnet nach VDI-RICHTLINIE 3633 (1996) eine Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder gespeichert wird.

Unter Optimierung ist im Rahmen dieser Arbeit eine unter den gegebenen Randbedingungen größtmögliche Verbesserung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses hinsichtlich der Erfüllung des aus dem Einsatzgebiet Druckguss vorgegebenen Anforderungsspektrums zu verstehen.

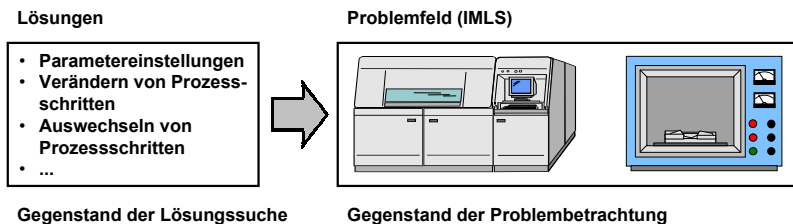


Abbildung 3-1: Problemfeld und Lösung (vgl. HABERFELLNER 1999, S. 20)

Die Optimierung eines komplexen Prozesses wie des indirekten Metall-Lasersinterprozesses, stellt ein Problem dar. Dabei bildet der indirekte Metall-Lasersinterprozess das Problemfeld, also jenen Bereich, in dem Problemzusammenhänge untersucht werden (vgl. HABERFELLNER 1999, S. 19). Für dieses Problemfeld werden geeignete Lösungen gesucht, die zu einer Verbesserung des Prozessergebnisses führen sollen (vgl. Abbildung 3-1).

Da die Lösungen nicht offensichtlich sind, muss die Lösungsfindung durch eine strukturierte und systematische Vorgehensweise unterstützt werden. Die Ziele, die durch die Anwendung der Vorgehensweise erreicht werden sollen, ergeben sich direkt aus der Aufgabenstellung:

- Es soll eine nachhaltige Verbesserung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses erreicht werden.
- Die Lösungsansätze sollen nicht durch die vorhandenen Strukturen und Abläufe des kommerziellen Prozesses eingeschränkt werden.
- Es soll ein tiefgehendes Verständnis des indirekten Metall-Lasersinterprozesses erreicht werden.

## 3.2 Zielkriterien bei der Optimierung

Der Erfüllungsgrad hinsichtlich des Anforderungsspektrums, der durch die Anwendung einer Lösung auf das Problemfeld erreicht wird, wird gewöhnlich anhand von Zielgrößen bewertet. Dabei muss neben den technischen Zielgrößen, die zur Beurteilung technischer Spezifikationen einbezogen werden, auch solchen Zielgrößen Rechnung getragen werden, die wirtschaftliche Aspekte beinhalten (vgl. MAYERS 1997, S. 65).

Wesentlich ist, welche Beziehungen die Zielkriterien zueinander aufweisen. So können Zielgrößen voneinander abhängig oder unabhängig sein. Sind Zielgrößen voneinander unabhängig, so können sie ohne gegenseitige Berücksichtigung optimiert werden. Sind sie jedoch abhängig liegt eine mehrkriterielle Problemstellung vor, d. h. die gegenseitigen Beziehungen der Zielgrößen müssen bei der Optimierung berücksichtigt werden.

Hinsichtlich mehrkriterieller Problemstellungen werden in der Literatur unterschiedliche Möglichkeiten für die Bewertung einer Lösung angegeben (ESTER 1987):

- Die wichtigste Zielgröße wird als Bewertungskriterium festgelegt. Die anderen abhängigen Zielgrößen werden lediglich als Bedingungskriterien (Randbedingungen) betrachtet.
- Alle abhängigen Zielgrößen können über eine entsprechend zu gestaltende Funktion zu einer einzigen Zielgröße beispielsweise zu einer Kennzahl zu

sammengefasst werden. Der Erfüllungsgrad ergibt sich dann aus der Ausprägung dieser einen Kennzahl.

### **3.3 Wahl der Vorgehensweise**

Zur Optimierung von Produktionsprozessen steht bereits eine Reihe von Vorgehensweisen zur Verfügung. Diese Vorgehensweisen entstammen vielfach dem Qualitätsmanagement. Eine der umfassendsten und leistungsfähigsten Vorgehensweisen des Qualitätsmanagements, die klassische Versuchsmethodik, wird exemplarisch für konventionelle Vorgehensweisen der Prozessoptimierung vorgestellt. Die Defizite konventioneller Vorgehensweisen werden aufgezeigt.

Vorgehensweisen der Systemtheorie bzw. der Systemtechnik bieten Möglichkeiten zur Optimierung von Produktionsprozessen, die die Defizite der konventioneller Vorgehensweisen zur Prozessoptimierung vermeiden. Eine solche Vorgehensweise ist der sogenannte Optimierungszyklus, der nach einer Erläuterung der wichtigsten Grundlagen der Systemtheorie dargestellt wird.

#### **3.3.1 Statistische Versuchsmethodik**

Eine der leistungsfähigsten Techniken zur effizienten und reproduzierbaren Optimierung bestehender Prozesse stellt die statistische Versuchsmethodik dar. Ziel der statistischen Versuchsmethodik ist es, mit möglichst wenig Versuchen eine geeignete Parametereinstellung für einen Prozess zu finden, so dass die Vorgaben für die zu optimierenden Größen erfüllt werden (MAYERS 1997, S. 2).

Bei der statistischen Versuchsmethodik handelt es sich nicht um eine einzelne Methode, sondern um ein umfangreiches Spektrum einzelner Verfahren, die einen problemspezifischen Einsatz der Methodik ermöglichen (PFEIFER U. A. 1998). Ein wesentlicher Punkt ist die gleichzeitige Variation mehrerer Parameter, die als Einflussgrößen oder Faktoren bezeichnet werden. Die Veränderungen der Faktoreinstellungen erfolgen dabei nach zuvor eingestellten statistischen Gesetzmäßigkeiten, so dass neben den unmittelbaren Einflüssen der einzelnen Faktoren, auch eventuell vorhandene Wechselwirkungen zwischen den untersuchten Faktoren ermittelt werden können und so ein optimales Nutzen/Aufwandverhältnis erzielt wird (MASING 1999, REINHART U. A. 1996).

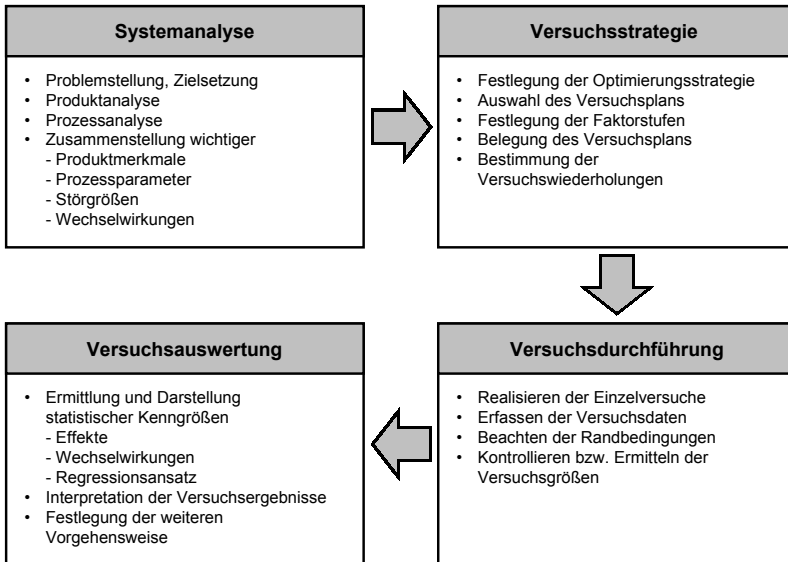


Abbildung 3-2: Teilaufgaben der statistischen Versuchsmethodik (MAYERS 1997, S. 6)

Untersuchungen mit Hilfe statistisch geplanter Versuche lassen sich in vier wesentliche Hauptschritte gliedern (MAYERS 1997, S.6). Dies sind die Systemanalyse, das Erarbeiten und Festlegen einer geeigneten Versuchsstrategie, die Versuchsdurchführung und die abschließende Versuchsauswertung (vgl. Abbildung 3-2).

Allerdings gelangen die Vorgehensweisen der klassischen Versuchsmethodik sowie die aus ihr abgeleiteten Methoden und Verfahren bei zunehmender Komplexität des zu untersuchenden Systems, d. h. bei einer hinreichend großen Anzahl an Einflussgrößen, an die Grenzen des wirtschaftlich vertretbaren Versuchsaufwandes.

Wesentlicher Kritikpunkt ist jedoch, dass nur bestehende Systemstrukturen untersucht werden. D. h. eine Optimierung kann nur innerhalb der Grenzen vorgenommen werden, die durch das bestehende System vorgegeben sind. Die übergeordneten Strukturen wie beispielsweise Prozessabläufe werden dagegen nicht in Frage gestellt. Die Art der möglichen Lösung beschränkt sich ausschließlich auf



geeignete Parametersätze. Die Wahrscheinlichkeit eine Lösung zu finden, die wirklich zu einer nachhaltigen Verbesserung des zu optimierenden Prozesses führt, ist damit geringer als ohne die genannte Beschränkung.

Gleiches gilt auch für rein mathematische Optimierungsverfahren wie numerische Rechenverfahren beispielsweise auf der Grundlage eines analytischen Modells des zu optimierenden Systems (vgl. hierzu ABAY 1999, S. 5). Daher muss eine andere Vorgehensweise zur Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses gefunden werden.

### 3.3.2 Systemtheorie

Aus den Bereichen der Problemlösungs- und Systemtheorie (EHRENSPIEL 1995, HABERFELLNER 1999) ergeben sich Ansätze, die bei der Optimierung von komplexen Produktionsprozessen den Nachteil einer Beschränkung auf bestehende Strukturen und Abläufe vermeiden. Vor allem bei der Strukturierung und Abgrenzung des Problems können Methoden und Vorgehensweisen der Systemtheorie, die auf einem Denken in Wirkzusammenhängen, der Verwendung von Modellen und anderen Strukturierungshilfen beruhen, Unterstützung bieten (STEINS 2000).

#### 3.3.2.1 Grundlagen

Die Systemtheorie ist eine Betrachtungsweise, die es ermöglicht, komplexe Erscheinungen (Systeme) besser verstehen und gestalten zu können. Nach HABERFELLNER (1999) zeichnet sich die Systemtheorie inhaltlich aus, indem sie

- Begriffe zur Beschreibung komplexer Gesamtheiten und Zusammenhänge beinhaltet,
- Ansätze, die das ganzheitliche Denken unterstützen, bereitstellt und
- modellhafte Ansätze anbietet, die eine Veranschaulichung realer komplexer Erscheinungen ohne unzulässige Vereinfachungen erlauben.

Ein System besteht grundsätzlich aus einer Menge von Elementen (z. B. Teilen, Komponenten), die Eigenschaften besitzen und durch Beziehungen untereinander verbunden sind (EHRENSPIEL 1995). Der Begriff Beziehungen wird dabei sehr allgemein verstanden. Hierdurch können Materialflussbeziehungen, Informati

onsflussbeziehungen, Lagebeziehungen, Wirkzusammenhänge usw. beschrieben werden (HABERFELLNER 1999). Nach VDI-RICHTLINIE 3633 (1996) ist ein System außerdem durch Zustandsgrößen und –übergänge gekennzeichnet.

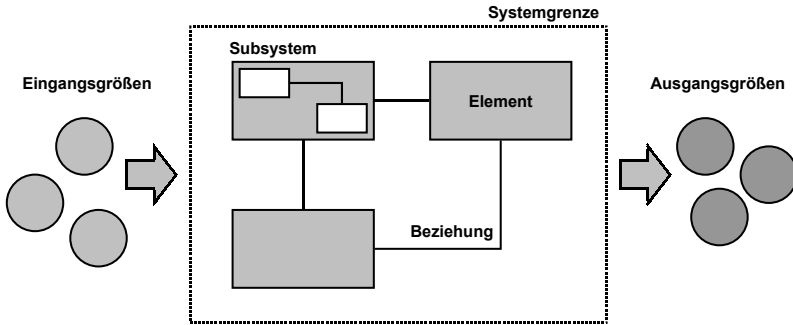


Abbildung 3-3: Grundbegriffe des Systemdenkens (TROSSIN 1999, S. 11)

Die Abgrenzung eines Systems gegenüber der Umwelt erfolgt durch die frei festlegbare Systemgrenze (DAENZER 1983). Diese beliebige Festlegung der Systemgrenze macht es möglich, die Komplexität einer Problemstellung auf ein überschaubares Maß zu reduzieren. So werden lediglich die Elemente und Beziehungen erfasst, die das System selbst beeinflussen bzw. vom System beeinflusst werden. Mit der Umwelt steht das System durch Eingangs- und Ausgangsgrößen in Beziehung.

#### 3.3.2.2 Optimierungszyklus

Ein auf der System- und der allgemeinen Problemlösungstheorie basierender Ansatz zur Optimierung von Produktionsprozessen ist der von STEINS (2000) vorgeschlagene Optimierungszyklus. Der Optimierungszyklus besteht aus den Schritten Situationsanalyse, Modellierung, Festlegung der Optimierungsschwerpunkte und Lösung des Optimierungsproblems.

Der erste Ablaufschritt innerhalb des Optimierungszyklus ist die Situationsanalyse. Ziel der Situationsanalyse ist es, das Gesamtsystem bestehend aus Problem- und Lösungsfeld zu verstehen. Dazu ist zum einen die prinzipielle Funktionsweise des betrachteten Systems mit seinen wesentlichen Einflussfaktoren und den relevanten Aspekten der Systemumgebung hinreichend genau zu beschreiben,

zum anderen sind Forderungen an eine neue oder verbesserte Lösung zu untersuchen (HABERFELLNER U. A. 1999).



Abbildung 3-4: Der Optimierungszyklus (vgl. STEINS 2000, S. 44)

Bei der Modellierung als zweitem Schritt gilt es, die in der Situationsanalyse erhaltenen Informationen zu visualisieren und das Systemverständnis weiter zu verbessern (STEINS 2000).

Bei der Festlegung der Optimierungsschwerpunkte erfolgt eine weitere Konkretisierung der Problemformulierung sowie die Festlegung und Charakterisierung der Ziele, die durch die Lösung des Optimierungsproblems erreicht werden sollen. Zwar existieren bereits Erwartungen hinsichtlich der Ziele, die schließlich Anlass zur Optimierung eines Systems geben. Jedoch sind zu diesem Zeitpunkt weder der Problem- noch der Lösungsbereich hinreichend bekannt. Daher erfolgt die Formulierung der Optimierungsschwerpunkte zeitlich nach der Situationsanalyse und der Modellierung.

Innerhalb des letzten Schrittes, der Lösung des Optimierungsproblems, kann zwischen der Synthese und Analyse von Lösungen zum einen und der zugehörigen Bewertung und Entscheidung zum anderen unterschieden werden.

#### 3.4 Zuordnen von Methoden

Um den Optimierungszyklus zur Lösung eines Problems wie der Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses anwenden zu können, müssen den einzelnen Schritten des Optimierungszyklus geeignete Methoden zugeordnet werden.

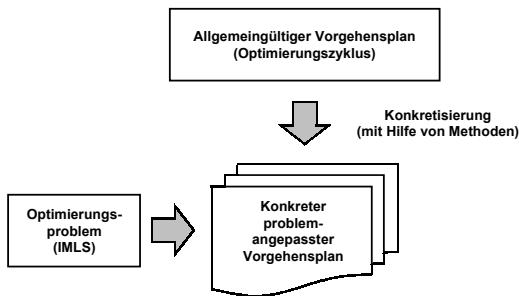


Abbildung 3-5: Konkretisierung eines allgemeingültigen Vorgehensplans (vgl. DEMERS 2000, S. 54)

##### 3.4.1 Situationsanalyse

Ziel der Situationsanalyse ist es, das Gesamtsystem bestehend aus Problemfeld und Lösungssystem zu verstehen. Um dieses Ziel zu erreichen, wird in Anlehnung an HABERFELLNER (1999) folgendermaßen vorgegangen:

Der erste Schritt beinhaltet die Analyse der Problem- und Aufgabenstellung. Im wesentlichen geht es darum, das Problem und die Forderungen an eine Problemlösung zu beschreiben. Hierzu sind die Anforderungen zu erarbeiten, die an das Ergebnis des Prozesses, in diesem Fall an die Formeinsätze, gestellt werden. Die Anforderungen ergeben sich aus dem Einsatzbereich der Formeinsätze, in diesem Fall dem Druckguss.

Es erfolgt die Grobstrukturierung des Problemfelds. Dies beinhaltet die Definition des Problemfeldes, also des indirekten Metall-Lasersinterprozesses, mit seinen Elementen und Beziehungen.

In der differenzierten Analyse erfolgt dann die Sammlung und Interpretation von Daten und Fakten zum Problemfeld. Bereits bei der differenzierten Analyse muss entschieden sein, ob im nächsten Schritt des Optimierungszyklus ein induktiver oder ein deduktiver Modellierungsansatz gewählt wird.

Beim induktiven Modellierungsansatz wird der Prozess zunächst über die einer Messung zugänglichen Eingangs- und Ausgangsgrößen beobachtet, die nach einer statistischen Analyse im Modell miteinander korreliert werden. Daher müssen für einen induktiven Modellierungsansatz in der differenzierten Analyse vor allem die entsprechenden Ein- und Ausgangsgrößen erfasst werden.

Bei der entsprechend der Aufgabenstellung in dieser Arbeit erforderlichen deduktiven Modellierung steht die Untersuchung der prozessinternen Wirkzusammenhänge im Vordergrund. In der differenzierten Analyse müssen daher alle Zustände und Vorgänge des jeweiligen Prozesses beschrieben werden, die als Phänomene mess- oder beobachtbar sind. Der wesentliche Inhalt dieses ersten Schrittes des Optimierungszyklus ist damit die Analyse der Prozesskette.

### **3.4.2 Modellierung**

Den zweiten Schritt im Ablauf des Optimierungszyklus stellt die in enger inhaltlicher Verbindung zu den Ergebnissen der Analyse der Prozesskette stehende Modellierung dar. Ziel der Modellierung ist es, Transparenz hinsichtlich der bestehenden Problemstellung zu schaffen. Damit soll eine Identifizierung der Stellhebel zur Prozessverbesserung beim indirekten Metall-Lasersinterprozess ermöglicht werden.

Ein Modell ist eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Originalsystems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System (VDI 1992). Nach STACHOWIAK (1993) weist ein Modell folgende drei Hauptmerkmale auf:

- **Abbildungsmerkmal:** Ein Modell ist Abbildung bzw. Repräsentation eines Originals.

- Verkürzungsmerkmal: Bei der Abbildung wird versucht die Komplexität des Originals zu reduzieren. Dies wird dadurch erreicht, dass nicht alle Attribute des Originals abgebildet werden, sondern nur diejenigen, die für eine bestimmte Aufgabenstellung relevant sind.
- Pragmatisches Merkmal: Modelle werden zweckgebunden aufgebaut, d. h. bei der Modellbildung ist auf den Zusammenhang zu achten, in dem das Modell zur Anwendung kommt.

Es existiert eine Vielzahl von Methoden, die zur Modellierung von Produktionssystemen und -prozessen geeignet sind. Bei der Modellierung von Prozessen ist prinzipiell zwischen den dabei zur Anwendung kommenden Notationen und Methoden zu unterscheiden. Jedoch ist eine scharfe Trennung zwischen Notation und Methode nicht immer möglich, so dass beide Begriffe in der Literatur häufig synonym verwendet werden (GOLM 1996).

Nach VDI-RICHTLINIE 3633 (1996) werden Modelle in experimentierfähige und nicht experimentierfähige Modelle eingeteilt.

Nach dem Anwendungszweck lassen sich ablaufbeschreibende Methoden sowie die Wirkzusammenhänge eines Systems modellierende Methoden unterscheiden (STEINS 2000).

Mit Hilfe der Methoden zur Modellierung von Abläufen können logische, räumliche und zeitliche Folgen von menschlichen und/oder technischen Verrichtungen im Rahmen des Verknüpfungs-, Informations- oder Materialflusses dargestellt werden. Korrespondierend zur Vielfalt der Ablaufbeziehungen in technischen Systemen lassen sich zu deren Darstellung eine Vielzahl verschiedener Modellierungstechniken differenzieren (HABERFELLNER 1999).

Die Methoden zur Modellierung von Wirkzusammenhängen ermöglichen durch eine problemspezifische Aufbereitung, Strukturierung und Darstellung der Informationen eine Komplexitätsreduktion des betrachteten Systems und seiner inneren Zusammenhänge.

Methoden zur Modellierung von Abläufen	Methoden zur Modellierung von Wirkzusammenhängen
Blockschaltbild Flussdiagramm Datenflussplan Balkendiagramm Netzplantechnik SADT ...	Ishikawa-Diagramm primärfunktionsorientiertes Ursache- Wirkungsdiagramm Ursachenmatrix Intensitäts-Beziehungsmatrix FE-Modell Analytisches Modell ...

Abbildung 3-6: Methoden der Modellierung (vgl. STEINS 2000, S. 70)

Dieser Gruppe kann beispielsweise das aus dem Bereich des Qualitätsmanagements bekannte Ishikawa-Diagramm sowie das aus dem Bereich des Problemlösens stammende primärfunktionsorientierte Ursache-Wirkungsdiagramm zugeordnet werden (KAMISKE & BRAUER 1999; TERNINKO U. A. 1998; TEUFELSDORFER & CONRAD 1998).

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal bildet die Formalisierungsebene des Modells. Nach CHOUIKHA U. A. (1998) lassen sich grundsätzlich drei Formalisierungsebenen unterscheiden:

- Informale Beschreibung: nicht grundsätzlich vollständige Syntax (z. B. Sprache oder Skizzen).
- Semi-formale Beschreibung: vollständige Syntax, aber keine mathematische Basis (z. B. Ishikawa-Diagramm).
- Formale Beschreibung: vollständige Syntax und mathematische Basis (z. B. FE-Modell)

Bei nicht formalen Beschreibungen existiert keine einheitliche Festlegung von Konstrukten und Modellierungsregeln. Die Modelle haben den Nachteil, dass der jeweilige Autor sie zwar sehr gut versteht, die abgebildeten Zusammenhänge jedoch nicht ohne weiteres anderen Personen kommuniziert werden können, weil eben Konstrukte und Regeln nicht präzise definiert sind und die Inhalte erst mit

ergänzenden Erläuterungen verstanden und interpretiert werden können (GAUSEMEIER & FINK 1999).

Semi-formale Beschreibungstechniken basieren auf einem vorgegebenen Satz von graphischen Konstrukten und unterliegen bei der Modellerstellung Regeln zur Anordnung und Verwendung dieser Konstrukte. Die oben genannten Probleme werden somit vermieden. Die entstehenden Modelle sind kommunizierbar. Sie sind jedoch nicht so formalisiert, dass sie durch einen Computer interpretiert werden können.

Die Verarbeitung durch rechnergestützte Werkzeuge erfordert eine formale Spezifikation, also Modelle, die präzise und interpretationsfrei sind. Der Aufwand zur Erstellung solcher Modelle ist im Vergleich zur semi-formalen oder nicht formalen Darstellung sehr hoch (GAUSEMEIER & FINK 1999).

Die genannten Einteilungsmöglichkeiten können zur Auswahl einer geeigneten Modellierungsmethode verwendet werden (Abbildung 3-7):

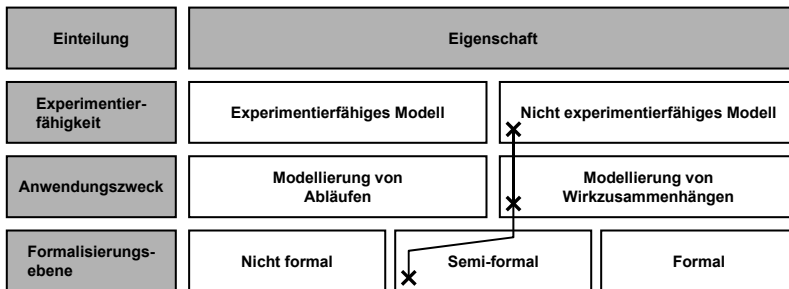


Abbildung 3-7: Möglichkeiten der Einteilung von Modellen und jeweils ausgewählte Eigenschaft

Für die Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses ist ein experimentierfähiges Modell nicht unbedingt notwendig, da mit dem Originalprozess mit vertretbarem Aufwand experimentiert werden kann.

Hinsichtlich des Anwendungszwecks ist es entsprechend der Aufgabenstellung in erster Linie wichtig, die Wirkzusammenhänge innerhalb des indirekten Metall-Lasersinterprozesses zu erfassen. Daher kommen für die Modellierung im Rahmen dieser Arbeit Methoden zur Modellierung von Wirkzusammenhängen in die engere Auswahl.



Die Modellart soll das Finden von neuen Lösungen unterstützen bzw. darf nicht von vornherein auf eine bestimmte Art von Lösungen beschränken wie beispielsweise analytische Modelle (vgl. hierzu TROSSIN 1999, S. 28). Daher bieten sich in erster Linie Modellarten an, die dem Bereich der Produkt- und Prozessinnovation entstammen (vgl. STEINS 2000, S. 61). Zu diesen Modellarten gehören die primärfunktionsorientierte Ursache-Wirkungs-Modelle (TERNINKO U. A. 1998). Grundlegender Gedanke bei diesen Modellen ist, die Beziehungen zwischen den einzelnen Ursachen und den zugehörigen Wirkungen innerhalb eines Systems darzustellen. Durch die semi-formale Beschreibung ist eine Kommunizierbarkeit des Modells gewährleistet.

Die primärfunktionsorientierte Ursache-Wirkungs-Modellierung entstammt dem Methodenbaukasten TRIZ. TRIZ ist ein Akronym für russische Begriffe, die durch „Theorie der Lösung von Erfindungsproblemen“ übersetzt werden können. Weitere Literatur zu diesem Thema findet sich etwa in ALTSCHULLER (1984), TERNINKO U. A. (1998), LINDEMANN U. A. (1998) sowie DEMERS (2000).

Im Mittelpunkt der Nomenklatur der primärfunktionsorientierte Ursache-Wirkungs-Diagramme steht die Funktion. In Erweiterung des klassischen Funktionsbegriffs der Systembeschreibung umfasst der Begriff „Funktion“ auch Ereignisse, Vorgänge, Zustände und Parameter (vgl. TERNINKO U. A. 1998, DEMERS 2000, STEINS 2000).

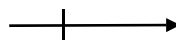
Unterschieden wird zwischen „nützlichen“ und „schädlichen“ Funktionen. Um nützliche und schädliche Funktionen im Diagramm visuell unterscheiden zu können, werden nützliche Funktionen durch Kreise, schädliche Funktionen hingegen durch Quadrate gekennzeichnet.

Zwischen zwei Funktionen gibt es nach dem Formalismus der primärfunktionsorientierten Ursache-Wirkungs-Modellierung prinzipiell drei mögliche Verknüpfungen bzw. Relationen (TERNINKO U. A. 1998):

- Eine nützliche Funktion ist Voraussetzung für eine nützliche Funktion



- Eine nützliche Funktion ist zur Eliminierung einer schädlichen Funktion vorhanden



- Eine nützliche oder schädliche Funktion verursacht eine schädliche Funktion



Im Diagramm werden die drei Verknüfungsprinzipien durch die jeweils abgebildete Pfeilart dargestellt. Über die Art des Zusammenhangs zwischen zwei Funktionen wird jedoch keine Aussage gemacht.

Die in dieser Art erarbeitete formalisierte Beschreibung des Problemfelds mit allen Beziehungen zwischen den einzelnen Funktionen erleichtert die Lösung.

#### 3.4.3 Festlegung der Optimierungsschwerpunkte

Auf der Basis des nach Abschluss der Analyse der Prozesskette und Modellierung hinreichend genau beschriebenen Ist-Zustandes sind im Rahmen des dritten Schrittes des Optimierungszyklus geeignete Optimierungsschwerpunkte festzulegen. Optimierungsschwerpunkte sind Ziele, die es im Rahmen der Optimierung zu erreichen gilt. Idealerweise können Ziele bis auf konkret zu lösende Teilprobleme präzisiert werden.

Nach HABERFELLNER (1999) und STEINS (2000) sind bei der Zielformulierung folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Worauf beziehen sich die Ziele?  
Benennung des Zielobjekts, das neu gestaltet oder verändert werden soll. Bei einer Prozessoptimierung wie in diesem Fall ist das Zielobjekt in der Regel der Gesamtprozess bzw. geeignete Teilprozesse.
- Was soll erreicht werden?  
Vollständige Festlegung der Zieleigenschaften. Beispiele hierfür sind Verbesserungen des aus dem Prozess resultierenden Produkts, die anhand der Produktmerkmale festgestellt werden oder die Beseitigung schädlicher Auswirkungen des Prozesses wie Abgase etc.
- Wie viel soll erreicht werden?  
Definition von messbaren und realistischen Kriterien der Zielerreichung. Dies umfasst beispielsweise die Ausprägungen der festgelegten Produktmerkmale oder einen Grenzwert für eine schädliche Auswirkung.

Zur Präzisierung der Ziele kann die Teilproblemformulierung verwendet werden. Bei der Teilproblemformulierung handelt es sich um eine auf der primärfunktionsorientierten Modellierung aufbauende Methode.

Zur Formulierung der Teilprobleme werden die zuvor in der Modellierung erarbeiteten primärfunktionsorientierten Ursache-Wirkungs-Diagramme systematisch ausgewertet. Es gilt, die Ursachen für erwünschte bzw. unerwünschte Wirkungen herauszufinden. Resultat sind Wirkungsketten, die die Zusammenhänge zwischen der Wirkung und den zugehörigen Ursachen aufzeigen. Aus jeder solchen Wirkungskette kann dann ein Teilproblem formuliert werden. Die einzelnen Teilprobleme bilden ihrerseits Ausgangspunkte für die Lösungsideen zur Lösung des Optimierungsproblems (TERNINKO U. A 1998).

Grundsätzlich lassen sich folgende Arten von Teilproblemen differenzieren:

- Die erste Gruppe von Teilproblemen resultiert aus der Suche nach alternativen Funktionen für nützliche Funktionen bzw. aus der Suche nach Möglichkeiten zu Eliminierung, Reduzierung oder Prävention von schädlichen Funktionen (STEINS 2000).
- Eine zweite Klasse von Teilproblemen ergibt sich aus dem Versuch, eine Verbesserung einer nützlichen Funktion zu erzielen bzw. Nutzen aus einer schädlichen Funktion zu ziehen (STEINS 2000).
- Eine letzte Gruppe von Teilproblemen ergibt sich für den Fall, dass eine nützliche Funktion einerseits Voraussetzung für eine oder mehrere andere nützliche Funktionen ist, andererseits jedoch eine oder mehrere schädliche Funktionen verursacht. Bei einer solchen Konfiguration handelt es sich um einen Widerspruch (DEMERS 2000).

Die Formulierung der Teilprobleme wird durch die im folgenden beschriebene Systematik unterstützt:

Teilproblemformulierung für nützliche Funktionen		
	Fragestellung	Teilproblem
<b>Gruppe 1</b>	Existiert ein alternativer Weg für die nützliche Funktion?	Finde einen alternativen Weg für die nützliche Funktion
<b>Gruppe 2</b>	Lässt sich eine Verbesserung der nützlichen Funktion erzielen?	Finde einen Weg, um die nützliche Funktion zu verbessern bzw. zu verstärken
<b>Gruppe 3</b>	Besitzt die nützliche Funktion die beiden Ausgänge $\longrightarrow$ und $\blacksquare \longrightarrow$ ?	Finde einen Weg zur Auflösung des Widerspruchs

Abbildung 3-8: Systematik zur Formulierung von Teilproblemen (nützliche Funktionen)

Teilproblemformulierung für schädliche Funktionen		
	Fragestellung	Teilproblem
<b>Gruppe 1</b>	Existiert ein Weg zur Vermeidung der schädlichen Funktion?	Finde einen Weg zur Eliminierung, Reduzierung oder Prävention der schädlichen Funktion
<b>Gruppe 2</b>	Lässt sich Nutzen aus der schädlichen Funktion ziehen?	Finde einen Weg, um Nutzen aus der schädlichen Funktion zu ziehen

Abbildung 3-9: Systematik zur Formulierung von Teilproblemen (schädliche Funktionen)

Sind die einzelnen Teilprobleme formuliert, kann zum nächsten Schritt des Optimierungszyklus, der Lösung des Optimierungsproblems, übergegangen werden.

### 3.4.4 Lösung des Optimierungsproblems

Im Rahmen der Lösung des Optimierungsproblems als viertem und letztem Schritt des Optimierungszyklus sind basierend auf den zuvor identifizierten Optimierungsschwerpunkten Lösungen zu generieren und im Anschluss die am besten geeigneten Varianten auszuwählen.

Ausgangsbasis bilden die im vorangegangenen Schritt erarbeiteten Teilprobleme. Mit geeigneten Methoden zur Synthese und Analyse von Lösungen sind für jedes der erarbeiteten Teilprobleme Lösungen zu finden. Methodenübergreifend weisen Synthese und Analyse von Lösungen nach HABERFELLNER (1999) und STEINS (2000) folgende grundlegende Schritte auf:

- **Analyse der Gestaltungsaufgabe:**  
Hierbei werden die Ergebnisse aus Situationsanalyse, Modellierung und Festlegung der Optimierungsschwerpunkte noch einmal reflektiert mit dem Ziel, den Gestaltungsraum zu definieren und die Grenzen der Gestaltungsfreiheit von Lösungen zu klären.
- **Generieren und Sammeln von Lösungsideen:**  
Es gilt, alternative Lösungsansätze zu erzeugen. Zwar handelt es sich beim Generieren von Lösungen letztendlich um einen kreativen Prozess (HABERFELLNER 1999). Dieser kann jedoch durch die Anwendung geeigneter Methoden unterstützt werden.
- **Systematisches Ordnen der Ideen:**  
Tauglich erscheinende Ideen werden geordnet. Hierdurch können relevante, brauchbare, realisierbare bzw. erfolversprechende Lösungsansätze besser erkannt werden.
- **Entwerfen und Erarbeiten von Lösungsvorschlägen:**  
Ideen werden in Lösungsvorschläge umgesetzt entsprechend dem Konkretisierungsniveau der Problemformulierung.
- **Systematische Analyse der Lösungsvorschläge:**  
Alle tauglich erscheinenden Lösungsvorschläge bzw. -varianten sind zu analysieren und zu bewerten. Hierbei geht es zunächst darum, Lösungsvorschläge, die die Anforderungen erfüllen, von denen zu trennen, die die Anforderungen nicht erfüllen. Anschließend sind aus den verbleibenden Lösungsvor

schlagen anhand von Kriterien die besten herauszufinden. Somit trennen Anforderungen Lösungen von Nicht-Lösungen und bilden damit die Grenze des Lösungsraums. Kriterien trennen hingegen gute von schlechten Lösungen (vgl. DEMERS 2000, S. 98). Was Anforderung und was Kriterium ist sowie die Bedeutung der einzelnen Kriterien, muss aus der aktuellen Situation abgeleitet werden (DEMERS 2000).

- Um- bzw. Weiterbearbeitung der Lösungen:  
Eventuell müssen Lösungsvorschläge noch verbessert werden, falls sich Ansatzpunkte für Schwachstellen oder Unvollständigkeiten zeigen.

Um den indirekten Metall-Lasersinterprozess strukturiert verbessern zu können, sind insbesondere den Schritten 2 und 4, also der eigentlichen Synthese, konkrete Methoden zuzuordnen. Im Rahmen dieser Arbeit werden Methoden verwendet, die auf den primärfunktionsorientierten Ursache-Wirkungs-Modellen und der zugehörigen Teilproblemformulierung aufbauen.

Ein erster Hinweis, welche Methoden zur Lösungsfindung eingesetzt werden können, ergibt sich bereits aus der Art des Teilproblems. Für die ersten beiden Gruppen von Teilproblemen stehen grundsätzlich folgende Methoden zur Verfügung (LINDE & HILL 1993):

- Analogisieren: Beim Analogisieren wird das Ziel verfolgt, in Systemen funktionelle und/oder strukturelle Merkmale nach dem Prinzip der Ähnlichkeit zu ermitteln und in neue Lösungen umzusetzen.
- Variieren: Ziel des Variierens ist es, bereits vorhandene Merkmale einer Ausgangs- oder Basislösung zu optimieren. Variable Merkmale können in diesem Zusammenhang sowohl Eigenschaften von Objekten wie Menge oder Gestalt als auch Relationen zwischen den Objektelementen wie Anordnungen darstellen.
- Kombinieren: Beim Kombinieren wird ein System durch Synthese einzelner Teillösungen zu konkreten Ausführungsmöglichkeiten geführt. Durch die Verknüpfung einfacher Teillösungen können komplexe Gesamtlösungen generiert werden, die einen Überblick über mögliche Lösungsvarianten bieten.

Methoden	Analogisieren	Variieren	Kombinieren
<b>Ziel</b>	Erzeugen von Assoziationen durch Analogiebildung – Generieren von Lösungselementen	Veränderung von Lösungselementen mit Merkmalen	Verknüpfen von Lösungselementen mit Merkmalen
<b>Methodische Hilfsmittel</b>	Kataloge: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Effekte</li> <li>• Standards</li> <li>• Prinzipien</li> <li>• Prinzip- und Widerspruchslösungen</li> </ul>	Kataloge: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Universelle Merkmale</li> <li>• Variationsoperatoren</li> </ul>	Kataloge: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Universelle Merkmale</li> <li>• Morphologischer Kasten</li> </ul>
<b>Ergebnis</b>	Ausgangslösung mit Merkmalen	Variationslösung	Kombinationslösung

Abbildung 3-10: Allgemeine Merkmale von Methoden zur Lösungsfindung (LINDE & HILL 1993)

Diese Methoden können bei allen Teilproblemen der Gruppen eins und zwei angewandt werden. Eine Ausnahme bildet die Prävention einer schädlichen Funktion. Die Prävention einer schädlichen Funktion erfolgt durch die Beeinflussung der Ursachen. Damit werden die der schädlichen Funktion vorgelagerten Funktionen Gegenstand der Betrachtung für die dann wiederum Teilprobleme aufzustellen und schließlich zu lösen sind. Die Prävention einer schädlichen Funktion erfordert somit ein iteratives Vorgehen.

Ein besonderes Gewicht bei der Synthese von Lösungen liegt auf der dritten Gruppe von Teilproblemen, den Widersprüchen, da in der Regel gerade Widersprüche die Weiterentwicklung eines Systems aufhalten. Bei Widersprüchen werden Funktionen betrachtet, die zwar einerseits Voraussetzung für eine oder mehrere nützliche Funktionen sind bzw. eine schädliche Funktion verhindern, andererseits jedoch eine oder mehrere schädliche Funktionen verursachen.

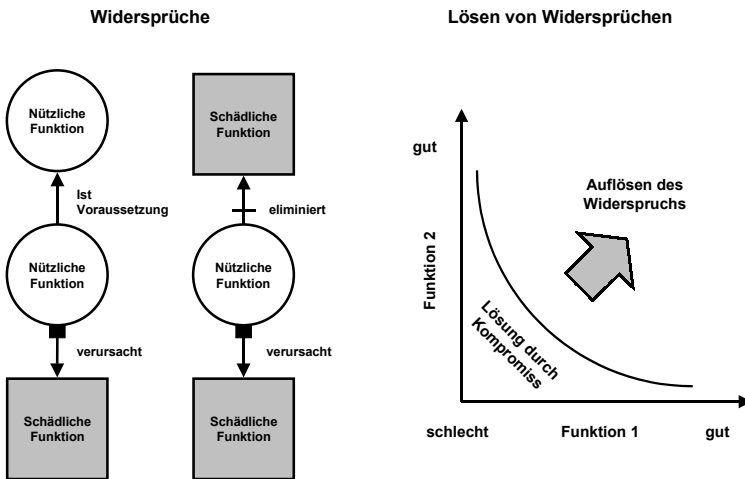


Abbildung 3-11: Widersprüche

Für die Bearbeitung von Widersprüchen stehen prinzipiell zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

- Lösen des Widerspruchs durch Kompromisse. Hierbei wird eine Lösung gesucht, die innerhalb des Systemrahmens zu einer annehmbaren Lösung führt. Ein Beispiel hierfür ist eine geeignete Parametereinstellung.
- Auflösen des Widerspruchs. Dies ist nur durch einen Eingriff in das System zu bewerkstelligen. Zum Auflösen eines Widerspruchs kann wieder auf Analogien zurückgegriffen werden. Eine methodische Unterstützung bei der Analogiebildung zur Lösung technischer Widersprüche bietet die in diesem Zusammenhang von Altschuller entwickelte Widerspruchsmatrix, die zugleich eines der bekanntesten Werkzeuge der TRIZ-Methodik darstellt (vgl. STEINS 2000).

### 3.5 Zusammenfassung

Durch die Anwendung der vorgestellten Vorgehensweise soll eine nachhaltige Verbesserung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses erreicht werden. Wesentliches Merkmal und damit wichtigster Unterschied zu konventionellen Me



thoden der Prozessoptimierung wie der statistischen Versuchsmethodik ist, dass die resultierenden Lösungsansätze nicht durch die Strukturen und Abläufe des bereits vorhandenen Prozesses eingeschränkt werden. Anders als konventionelle Methoden der Prozessoptimierung, wie beispielsweise die mathematische Optimierung auf der Grundlage eines analytischen Modells, führt die vorgestellte Vorgehensweise nicht zu einem Optimum innerhalb eines bestehenden Systems, sondern soll Verbesserungen durch Veränderungen am zu optimierenden System selbst bewirken (vgl. Abbildung 3-12).

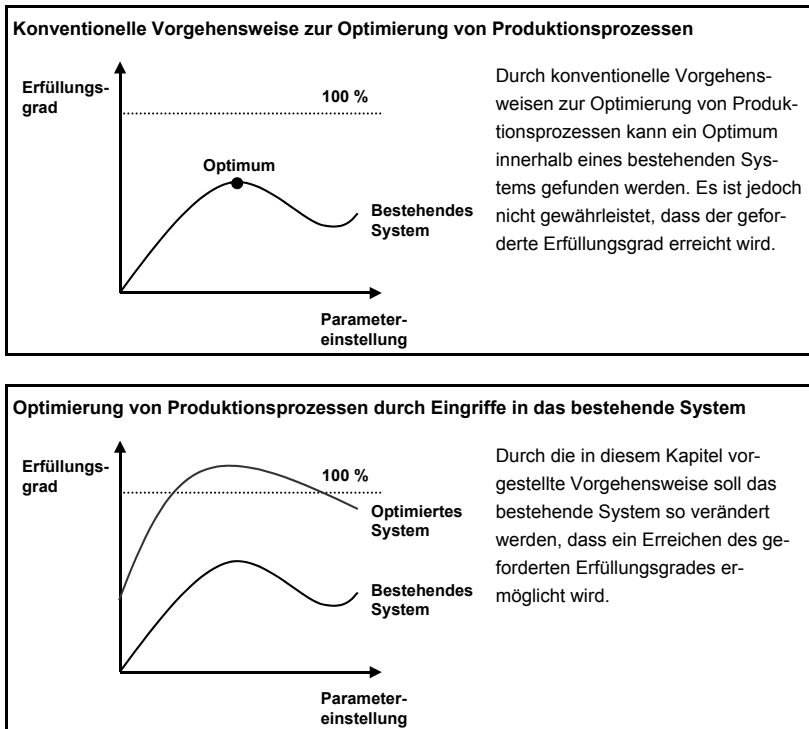


Abbildung 3-12: Gegenüberstellung der Optimierung innerhalb eines bestehenden Systems und der Optimierung durch Veränderung des Systems

Die vorgestellte Vorgehensweise basiert auf dem Optimierungszyklus, einem Ansatz zur Optimierung von Produktionsprozessen, der sich aus der Systemtheorie ableitet. Der Optimierungszyklus setzt sich aus den Schritten Situationsanaly

se, Modellierung Festlegung der Optimierungsschwerpunkte und der abschließenden Lösung des Optimierungsproblems zusammen:

- In der Situationsanalyse werden zum einen die Anforderungen an den indirekten Metall-Lasersinterprozess aufgestellt. Zum anderen werden nach einer geeigneten Abgrenzung und Strukturierung die Zusammenhänge innerhalb des Prozesses erarbeitet. Es gilt somit, die Prozesskette zu analysieren
- Zur Verbesserung des Systemverständnisses werden die Zusammenhänge in einem Modell abgebildet. Als geeignet hierfür erweist sich die primärfunktionsorientierte Ursache-Wirkungsmodellierung.
- Im nächsten Schritt des Optimierungszyklus werden die Optimierungsschwerpunkte festgelegt. D. h. es ist festzulegen, welche Merkmale des aus dem Prozess resultierenden Produkts zu verbessern sind. Zur Verbesserung dieser Merkmale werden entsprechende Teilprobleme formuliert.
- Diese Teilprobleme bilden den Ausgangspunkt für die Lösungssuche zur abschließenden Lösung des Optimierungsproblems.

In den folgenden vier Kapiteln erfolgt die Umsetzung der Optimierung entsprechend dem vorgestellten Konzept.

## **4 Analyse der Prozesskette**

Durch die Analyse der Prozesskette des indirekten Metall-Lasersinterprozesses werden die grundlegenden Voraussetzungen für eine Optimierung geschaffen. Die Analyse erfolgt in zwei Schritten:

Im Rahmen der Grobstrukturierung wird das Problemfeld, also der indirekte Metall-Lasersinterprozess, in geeignete Teilprozesse gegliedert. Danach erfolgt die differenzierte Analyse der einzelnen Teilprozesse. Dabei werden die prozessinternen Wirkzusammenhänge aufgestellt.

Daneben sind noch die Anforderungen an die vom Lösungssystem zu bewirkenden Änderungen zu erarbeiten. Die Anforderungen an das Lösungssystem ergeben sich aus dem im Rahmen dieser Arbeit festgelegten Einsatzbereich des indirekten Metall-Lasersinterprozesses, der Herstellung von Formeinsätzen für Druckgusswerkzeuge. Somit beinhaltet dieses Kapitel alle Arbeitsschritte, die bei HABERFELLNER (1999) unter dem Begriff Situationsanalyse zusammengefasst werden.

### **4.1 Anforderungen an das Lösungssystem**

Um den indirekten Metall-Lasersinterprozess zielgerichtet optimieren zu können, müssen die Anforderungen festgelegt werden, die durch die Anwendung des Lösungssystems zu erfüllen sind.

Hierzu werden im ersten Schritt die Anforderungen an Formeinsätze für Prototypen- und Kleinserienwerkzeuge festgelegt. Dabei erfolgt eine Einschränkung auf das anfangs festgelegte Anwendungsgebiet Leichtmetalldruckguss. Es folgt die Auswahl der zur Beurteilung des Erfüllungsgrades relevanten Produktmerkmale eines Formeinsatzes. Die geforderten und die zur Zeit mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess erreichbaren Ausprägungen der Produktmerkmale werden erarbeitet.

#### **4.1.1 Anforderungen**

Das zur Zeit wichtigste Anwendungsgebiet des indirekten Metall-Lasersinterprozesses ist die Herstellung von komplexen Formeinsätzen. Dadurch soll die Ferti

gung von Prototypen- und Kleinserienwerkzeugen beschleunigt werden, um so möglichst schnell und kostengünstig serienidentische Prototypen oder eine kleine Anzahl an Serienbauteilen bereitstellen zu können.

Prototypen dienen der Vorhersage oder Überprüfung der späteren Produkteigenschaften einer Serie (vgl. LINDEMANN & REICHWALD 1998; GEUER 1996). Für Formeinsätze in Prototypenwerkzeugen bedeutet dies, dass sie möglichst die identischen bauteileigenschaftsbestimmenden Merkmale wie die Formeinsätze des späteren Serienwerkzeugs aufweisen sollten. Der Standard wird hierbei durch Formeinsätze aus Warmarbeitsstahl gesetzt, die gewöhnlich mit abtragenden Verfahren wie Fräsen oder Erodieren hergestellt werden. Die Anforderungen an Prototypenformeinsätze orientieren sich daher an Leistungsdaten der genannten Fertigungsverfahren und Werkstoffe. Stimmen die bauteileigenschaftsbestimmenden Merkmale von Prototypenformeinsätzen mit denen der in der Serie verwendeten Formeinsätze weitestgehend überein, kann bei Verwendung identischer Gießprozessparameter sowie dem bei der Serie verwendeten Gießmaterial eine größtmögliche Übereinstimmung der Eigenschaften von Gussprototypen und den Seriengussbauteilen erwartet werden. Nur dann haben die resultierenden Prototypen eine entsprechende Aussagekraft, die Vorhersagen über die Eigenschaften der späteren Serienbauteile und über den Fertigungsprozess zulassen.

Merkmale eines Prototypenwerkzeugs, die sich nicht auf die Eigenschaften der Gussbauteile auswirken, können vom späteren Serienwerkzeug abweichen. Bei bestimmten Merkmalen wie Herstellungszeit und- kosten ist dieser Unterschied zum Serienwerkzeug sogar gefordert.

Beim Kleinserienwerkzeug sind die Eigenschaften der resultierenden Produkte, d. h. der Bauteile der Kleinserie maßgeblich. Somit stehen bei Kleinserienwerkzeugen die generativen Verfahren mit den konventionellen Verfahren direkt über die bauteileigenschaftsbestimmenden Merkmale in Konkurrenz. Jedoch orientieren sich die Anforderungen auch bei Kleinserienwerkzeugen zur Zeit noch stark an den Qualitätsmerkmalen von konventionell mit abtragenden Verfahren hergestellten Werkzeugen (vgl. KLOCKE U.A. 2000, S. 20).

Daraus ergeben sich folgende Anforderungen an lasergesinterte Formeinsätze:

Anforderungen	Herstellung von Prototypen	Herstellung einer Kleinserie
<b>Qualität</b>	Identität bauteileigenschaftsbestimmender Merkmale mit denen der entsprechenden Serienformeinsätze	Keine Abstriche bei Qualitätsmerkmalen im Vergleich zu Großserienformeinsätzen
<b>Zeit</b>	Deutliche Zeiteinsparung im Vergleich zur Herstellung von Großserienformeinsätzen	
<b>Kosten</b>	Kosteneinsparungen im Vergleich zur Herstellung von Großserienformeinsätzen	
<b>Standmenge</b>	Ausreichende Anzahl für die Durchführung von Versuchen	Anzahl entsprechend der Stückzahl der Kleinserie

Abbildung 4-1: Anforderungen an lasergesinterte Formeinsätze

### 4.1.2 Produktmerkmale

Diese Anforderungen müssen sich in messbaren Merkmalen des Formeinsatzes, den Ausgangsgrößen, wiederfinden. Weiter sind die erforderlichen und die zur Zeit mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess erreichbaren Ausprägungen des jeweiligen Produktmerkmals zu erarbeiten.

Ein Formeinsatz kann durch folgende Produktmerkmale charakterisiert werden:

Technische Merkmale	Wirtschaftliche Merkmale
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Größe</li> <li>• Genauigkeit</li> <li>• Auflösung</li> <li>• Oberflächenrauigkeit</li> <li>• Temperaturbeständigkeit</li> <li>• Wärmeleitfähigkeit</li> <li>• Zugfestigkeit</li> <li>• Härte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Standmenge</li> <li>• Nachbearbeitungsaufwand</li> <li>• Herstellungszeit</li> <li>• Kosten</li> </ul>

Abbildung 4-2: Produktmerkmale eines Formeinsatzes

### 4.1.2.1 Größe

Druckgussbauteile und damit die entsprechenden Formeinsätze gibt es im Größenbereich von wenigen Zentimetern bis zu mehreren Metern. Die Bauräume von RP-Anlagen sind aber in der Größe beschränkt. Durch Segmentierung eines Formeinsatzes lassen sich zwar theoretisch beliebige Größen herstellen, meist jedoch nicht wirtschaftlich (KÜHNLE & STETTIN 1999).

Nach einer entsprechenden Umfrage (OSTERMANN & WEIB 1997) haben jedoch nur 7% der geforderten Prototypen Abmessungen größer als 500 x 500 x 500 mm. Kleiner als 250 x 250 x 250 mm sind immerhin noch 51% der Prototypen. Für Serienbauteile gilt folglich das entsprechende. Formeinsätze sind etwa 10%-20% größer als die zugehörigen Bauteile.

Mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess ist zur Zeit die Herstellung von Formeinsätzen bzw. Einsatzsegmenten bis zu einer Größe von maximal 380 mm x 300 mm x 400 mm möglich (REINHART & FÄHRER 2000). Folglich wird durch die momentan vorhandene Anlagengröße weit mehr als die Hälfte der erforderlichen Formeinsatzgrößen abgedeckt.

### 4.1.2.2 Genauigkeit

Die Maß- und Formtoleranzen eines Formeinsatzes schlagen sich direkt in der Genauigkeit der resultierenden Bauteile nieder. Die Genauigkeit der Bauteile kann nicht besser sein, als die Genauigkeit der Formeinsätze. Es hat sich gezeigt, dass bei der Genauigkeit keine Abschlüsse im Vergleich zu Großserienbauteilen akzeptiert werden. Somit sind sowohl für Prototypen- als auch Kleinserienteile die Vorgaben der VDG (Vereins Deutscher Gießereifachleute) maßgeblich. Gefordert wird im Druckguss gemäß VDG Merkblatt P680 (April 1985) für Aluminium- und Magnesium-Legierungen eine Genauigkeit von 1% bei einer Raumdiagonale von 80 bis 500 mm. Da der Druckgießprozess ebenfalls Ungenauigkeiten verursacht, sollten die Toleranzen bei den entsprechenden Formeinsätzen besser sein als die genannten 1%. Erwartet wird eine Genauigkeit von 0,2%.

Mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess werden zur Zeit eine Genauigkeit von etwa 1% erreicht (BREITINGER 2001). Dies liegt deutlich außerhalb der Anforderungen. In begrenztem Umfang kann die Genauigkeit im Rahmen der Nachbearbeitung verbessert werden.

### 4.1.2.3 Auflösung

Die Auflösung bezeichnet die Größe des kleinsten Formelements, das mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess noch gefertigt werden kann. Die Auflösung ist jedoch auch durch charakteristische Eigenschaften des Druckgießverfahrens begrenzt. Beispielsweise brechen beim Druckgießen Formelemente eines Formeinsatzes unterhalb einer bestimmten Mindestgröße ab. Es reicht aus, wenn die Auflösung des IMLS innerhalb dieser durch das Fertigungsverfahren vorgegebenen Restriktionen liegt. Die vom indirekten Metall-Lasersinterprozess erreichte Auflösung von 0,5 mm ist mehr als ausreichend (REINHART & FÄHRER 2000).

### 4.1.2.4 Oberflächenrauigkeit

Die Oberflächenrauigkeit eines Formeinsatzes bildet sich direkt in den Bauteilen ab. Sie wird somit von den Anforderungen an die Bauteile bestimmt. Daneben übt die Oberflächenrauigkeit auch einen Einfluss auf die Entformbarkeit der Bauteile aus. Ab einer gewissen Oberflächenrauigkeit können die Bauteile abhängig von der Entformungsschräge nicht mehr aus dem Formeinsatz ausgeworfen werden. Beim Druckgießverfahren, insbesondere bei der Verarbeitung von härteren Leichtmetallen wie Aluminium, ist die Entformbarkeit das ausschlaggebende Merkmal. Hier ist eine Oberflächenrauigkeit von weniger als 50µm ( $R_a$ ) gefordert. Die Oberflächenrauigkeit kann durch Nachbearbeitung verbessert werden. Eine Verbesserung der Oberflächenrauigkeit beim indirekten Metall-Lasersinterprozess führt daher zu einer Verringerung des Nachbearbeitungsaufwands. Zur Zeit werden auf einer ebenen Fläche mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess Oberflächenrauigkeiten von 80 µm ( $R_a$ ) erreicht (REINHART & FÄHRER 2000).

### 4.1.2.5 Temperaturbeständigkeit

Die erforderliche Temperaturbeständigkeit eines Formeinsatzes wird durch die Schmelztemperatur der beim Druckgießen verwendeten Gießwerkstoffe vorgegeben. D. h. ein Formeinsatz muss mindestens eine Temperaturbeständigkeit von 680 °C (Schmelztemperatur von G-AlSi12Cu1, der Al-Legierung mit dem höchsten Schmelzbereich) aufweisen. Die beim indirekten Metall-Lasersinterprozess verwendete Materialkombination aus Stahl/Kupfer weist eine Temperaturbeständigkeit von über 1100 °C auf (BREITINGER 2001).

### 4.1.2.6 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit eines Formeinsatzes beeinflusst zum einen die Zyklendauer des Druckgießprozesses. Je niedriger die Wärmeleitfähigkeit, desto länger muss das Werkzeug geschlossen bleiben, bis das Bauteil erstarrt ist.

Zum anderen wird bei metallischen Gießwerkstoffen die Gefügestruktur des Bauteils durch die Wärmeleitfähigkeit der Formeinsätze beeinflusst. Die Wärmeleitfähigkeit von generativ hergestellten Formeinsätzen sollte daher weitestgehend der von konventionell hergestellten Formeinsätzen aus Warmarbeitsstahl entsprechen. Dies ist bei Druckgießwerkzeugen kritischer als bei Spritzgießwerkzeugen, da bei ersteren die Wärmeleitfähigkeit einen wichtigen Einfluss auf die Gefügestruktur und damit die Festigkeit des Bauteils hat. Als Richtwert wird die Wärmeleitfähigkeit von Warmarbeitsstahl mit  $\lambda = 30 \text{ W/mK}$  verwendet.

### 4.1.2.7 Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit ist ein Maß für die mechanische Beanspruchbarkeit eines Formeinsatzes. Referenz bilden auch bei diesem Merkmal Formeinsätze aus Warmarbeitsstahl, die eine Zugfestigkeit von ca.  $950 \text{ N/mm}^2$  aufweisen. Lasergesinterte Formeinsätze aus Stahl/Kupfer erreichen eine Zugfestigkeit von etwa  $475 \text{ N/mm}^2$ .

### 4.1.2.8 Härte

Die Härte ist ein Maß für die Verschleißfestigkeit eines Formeinsatzes. Nicht gehärtete Formeinsätze aus Stahl weisen eine Härte von etwa 200 HRC (Härteprüfung nach Rockwell) auf. Lasergesinterte Formeinsätze aus Stahl/Kupfer erreichen eine Härte von etwa 164 HRC.

### 4.1.2.9 Standmenge

Unter der Standmenge versteht man die Anzahl der Bauteile, die mit einem Satz von Formeinsätzen gefertigt werden kann. Die Anzahl wird durch Schäden an den Formeinsätzen beschränkt, die ab einem gewissen Zeitpunkt die resultierenden Bauteile unbrauchbar machen. Diese Schäden können plötzlich auftreten,



wie beim Abbrechen von Formelementen, oder kontinuierlich zunehmen, wie beispielsweise durch Abnutzung.

Die Anforderung an die Standmenge ergibt sich bei Prototypenwerkzeugen aus der geforderten Anzahl an benötigten Bauteilen. Nach einer Umfrage (OSTERMANN & WEIß 1997) benötigen nur 14% der Befragten mehr als 100 Bauteile. Erfahrungen aus Industrieprojekten des iwv zeigen aber, dass diese Zahl eher die untere Grenze darstellt. Weiter muss berücksichtigt werden, dass bei Druckgießprozessen in der Regel eine Anzahl von bis zu 20 Stück allein zum Einfahren des Prozesses benötigt wird. Erst die anschließend gewonnenen Bauteile können dann als Prototypen, beispielsweise im Versuch, verwendet werden.

Bei Kleinserienwerkzeugen ist die Anforderung an die Ausprägung des Merkmals Standmenge noch unklarer. Aus Projekten von Dienstleistern, die Kleinserienwerkzeuge anbieten ergibt sich, dass eine Stückzahl zwischen 300 und 1000 Stück gefordert wird.

Anders als die bisher genannten Merkmale lässt sich die Ausprägung der Standmenge nicht direkt am Formeinsatz messen. Daher muss die Standmenge auf andere direkt messbare Merkmale zurückgeführt werden. Hierbei gibt es zahlreiche Einflussfaktoren. Druckgießformen unterliegen im Betrieb einer komplexen Beanspruchung, die sich aus einer Überlagerung von thermisch-mechanischen Wechselbeanspruchungen sowie chemisch-physikalischen und mechanischen Einwirkungen des flüssigen Gießmetalls ergibt (KREBS 1989, LIEBY 1965). Diese Beanspruchungen treten allgemein bei der Bemusterung mit Leichtmetallen auf, jedoch abhängig vom Leichtmetall unterschiedlich intensiv.

Die thermisch-mechanische Beanspruchung führt zur Ermüdung des Materials und dadurch an den am stärksten beanspruchten Stellen eines Werkzeugs wie an den Kanten und an Querschnittsübergängen zur Brandrissbildung. Zunächst entstehen feine Haarrisse, die mit der Zeit breiter werden. Wird die Oberflächengüte des Gussteils durch die Risse zu stark beeinträchtigt, muss der Formeinsatz ausgewechselt werden (WORBY 1987).

Die mechanische Beanspruchung führt zu Erosion und Auswaschungen am Formeinsatz. Außerdem führt sie zu Deformationen einzelner Formelemente bis hin zum Bruch. Die chemisch-physikalischen Einwirkungen des Gießmetalls auf den Formeinsatz führen zum Kleben des Gussmaterials an der Formwand (KLEIN & WÜST 1990). Nach LIEBY (1965) und REIMER (1968) ergeben sich daraus folgende Anforderungen an direkt messbare Einflussgrößen:

- Hohe Härte
- Niedrige Oberflächenrauigkeit
- Hohe Temperaturbeständigkeit
- Hohe Wärmeleitfähigkeit
- Hohe Zugfestigkeit

Mit lasergesinterten Formeinsätzen aus Stahl/Kupfer können in Aluminium etwa 500 – 600 Teile gefertigt werden, in Magnesium knapp das doppelte (vgl. hierzu BREITINGER 2001). Diese Werte hängen allerdings stark von der Geometrie der Formeinsätze ab.

### **4.1.2.10 Nachbearbeitungsaufwand**

Um Anpassungen von Qualitätsmerkmalen und Änderungen an Formeinsätzen vornehmen zu können, ist häufig eine Nachbearbeitung notwendig. Meist beinhaltet diese ein Polieren der Oberfläche, ein Überfräsen der Trennfläche sowie Bohren von Kühlkanälen und Auswerferbohrungen. Der Nachbearbeitungsaufwand wird beeinflusst durch die Ausprägung der Qualitätsmerkmale. Je weniger ein lasergesintertes Formeinsatz den Anforderungen an die geforderten Qualitätsmerkmale genügt, um so aufwendiger ist die Nacharbeit. Zusätzlich wird der Nachbearbeitungsaufwand durch die Bearbeitbarkeit mit den unterschiedlichen Fertigungsverfahren beeinflusst.

### **4.1.2.11 Herstellungszeit**

Die Herstellungszeit der Formeinsätze macht je nach Größe und Komplexität des Werkzeugs einen unterschiedlichen Anteil an der gesamten Herstellungszeit eines Werkzeugs aus. In dem Größenbereich, in dem generative Verfahren sinnvoll einsetzbar sind, hat nach REINHART U. A. (1999) die Herstellungszeit von Formeinsätzen einen Zeitanteil von 34%. Sie ist somit signifikant.

Nach der oben genannten Umfrage (OSTERMANN & WEIB 1997) benötigen 66% der Befragten Bauteile innerhalb von 4 Wochen. Daraus ergibt sich eine Herstellungszeit für die entsprechenden Formeinsätze von maximal zwei Wochen wie in Referenzprojekten ermittelt wurde (REINHART U. A. 1999). Dieser Wert

besitzt allerdings nur Gültigkeit für eine Bauteilgröße von maximal 250 x 250 x 250 mm, da nur Projekte mit Bauteilen aus diesem Größenbereich untersucht wurden. Für größere Bauteile werden nach Erfahrungen aus Industrieprojekten längere Herstellungszeiten akzeptiert.

Ein einzelner Formeinsatz ist mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess innerhalb von fünf Tagen herzustellen. Können mehrere Formeinsätze aufgrund ihrer Größe nicht parallel hergestellt werden, so ergibt sich ein Abstand von drei Tagen zwischen der Fertigung von zwei Formeinsätzen unter der Voraussetzung, dass nur ein System, bestehend aus einer SLS-Anlage und einem Retortenofen, vorhanden ist.

#### **4.1.2.12 Herstellungskosten**

Ebenso bilden die Herstellungskosten für die Formeinsätze nur einen Anteil an den Gesamtkosten der Herstellung eines Werkzeugs. Die Höhe dieses Anteils wird durch zahlreiche Faktoren wie Größe und Komplexität des Werkzeugs beeinflusst. Wie bei der Herstellungszeit ist der Anteil der Formeinsätze an den Herstellungskosten signifikant. Es hat sich gezeigt, dass bei entsprechender Schnelligkeit sogar gleiche Kosten wie bei einem Großserienwerkzeug in Kauf genommen werden.

#### **4.1.3 Zusammenfassung**

Nachfolgend werden die geforderten den zur Zeit mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess erreichbaren Ausprägungen der einzelnen Produktmerkmale noch einmal zusammenfassend gegenübergestellt (Tabelle 4-1):

Merkmal	Geforderte Ausprägung	Erreichte Ausprägung	
<b>Größe</b>	500 x 500 x 500 mm	380 x 300 x 400 mm	
<b>Genauigkeit</b>	0,2 %	1 %	
<b>Auflösung</b>	1 mm	0,5 mm	✓
<b>Oberflächenrauigkeit (R<sub>a</sub>)</b>	50 µm	80 µm	
<b>Temperaturbeständigkeit</b>	680 °C	1100 °C	✓
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	30 W/mK	185 W/mK	✓
<b>Zugfestigkeit</b>	950 N/mm <sup>2</sup>	475 N/mm <sup>2</sup>	
<b>Härte</b>	200 HRC	164 HRC	
<b>Standmenge</b>	300 – 1000 Stück	500 (Al) bzw. 1000 (Mg) Stück	✓
<b>Nachbearbeitungsaufwand</b>	Bauteilabhängig	Bauteilabhängig	
<b>Herstellungszeit</b>	Ca. 2 Wochen	Ca. 1 Woche	✓
<b>Kosten</b>	Bauteilabhängig	Bauteilabhängig	

*Tabelle 4-1: Geforderte und erreichbare Ausprägungen von Merkmalen lasergesinteter Formeinsätze. Erfüllte Anforderungen sind mit ✓ gekennzeichnet*

Es zeigt sich, dass Optimierungsbedarf bei den Merkmalen Größe, Genauigkeit, Oberflächenrauigkeit, Zugfestigkeit und Härte besteht.

## 4.2 Grobstrukturierung des Problemfeldes

Ziel der Grobstrukturierung ist die Definition des indirekten Metall-Lasersinterprozesses als Problemfeld mit seinen Elementen und Beziehungen. Aus Gründen der Komplexitätsbeherrschung ist eine Unterteilung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses in mehrere Teilprozesse sinnvoll.

Eine Unterteilung in die Ablaufschritte, also in selektiven Lasersinterprozess und Ofenprozess, wie beispielsweise in BREITINGER (2001), ist für diese Arbeit nicht zielführend, da gerade eine Unabhängigkeit vom momentanen Ablauf des Prozesses angestrebt wird. Die Unterteilung in Teilprozesse erfolgt daher anhand der für den Gesamtprozess erforderlichen Funktionen. Danach lässt sich der indirekte Metall-Lasersinterprozess in insgesamt vier Teilprozesse unterteilen:

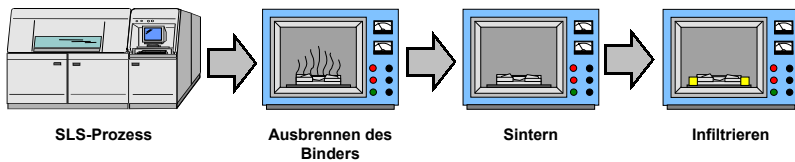


Abbildung 4-3: Teilprozesse des indirekten Metall-Lasersinterprozesses

- Selektiver Lasersinterprozess:

Im selektiven Lasersinterprozess schmilzt ein Laser entsprechend den datentechnisch definierten Gestaltinformationen den niedrigschmelzenden Polymerbinder an, durch den dann nach dessen Erstarrung die Partikel des hochschmelzenden Pulvers zusammengehalten werden. Funktion des selektiven Lasersinterprozesses ist es somit, die bis zu diesem Zeitpunkt nur rechnerisch festgelegte Gestaltinformation durch Energieeinbringung in das Pulver zu übertragen. Resultat ist der Grünling. Durch den schichtweisen Aufbau ist eine Unabhängigkeit der Komplexität des Fertigungsprozesses von der geometrischen Komplexität des herzustellenden Bauteils gewährleistet. Die Verwendung eines Binders führt zu einem gut beherrschbaren Prozess.

- Ausbrennen des Binders

Durch das Ausbrennen wird der Binder entfernt. Zurück bleibt allein lose aufeinander liegende Pulverpartikel der hochschmelzenden Komponente. Die Gestaltinformation muss dabei erhalten bleiben. Da der Formeinsatz nach dem Ausbrennen des Binders und vor dem Versintern nicht handhabbar ist, müssen ablauftechnisch zumindest das Ausbrennen und das nachfolgende Versintern zusammen in einem einzigen Ofenprozess stattfinden.

- Sintern

Durch das Versintern wird zwischen den lose zusammenliegenden Partikeln des Pulvers ein Stoffzusammenhalt erzeugt. Resultat ist der Braunling. Hierfür wird dem oben genannten Partikelkörper in einem Ofenprozess Wärme zugeführt. Allerdings besteht nach diesem Prozessschritt noch ein hohes Maß an Restporosität, so dass der resultierende Formeinsatz noch nicht für den Druck- oder Spritzgussbetrieb verwendbar ist.

- Infiltrieren

Beim Infiltrieren wird eine niedrigerschmelzende Komponente aufgeschmolzen, die dann, durch Kapillarwirkung angetrieben, die Porosität des Braunlings auffüllt. Resultat ist ein nahezu porositätsfreier Formeinsatz, der nach entsprechender Nachbearbeitung eingesetzt werden kann.

Auf dieser Detaillierungsebene können neue Lösungen durch Austauschen bzw. Ersetzen von Prozessschritten erzeugt werden. Für eine Optimierung der einzelnen Prozessschritte ist daher ein weiterer Detaillierungsschritt erforderlich, der in der differenzierten Analyse erfolgt.

### 4.3 Differenzierte Analyse

In der differenzierten Analyse erfolgt die Sammlung und Interpretation von Daten und Fakten zum Problemfeld. Im wesentlichen müssen alle Zustände und Vorgänge innerhalb der einzelnen Prozessschritte beschrieben werden. Auf dieser Grundlage werden dann die Zusammenhänge innerhalb der Prozessschritte aufgestellt. Dabei wird, soweit möglich, auf vorhandenes Wissen zurückgegriffen. Dem liegt die Überlegung zugrunde, dass zwar noch keine zusammenhängende Betrachtung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses vorliegt. Jedoch

existiert Wissen zu den Teilprozessen, die zusammen den indirekten Metall-Lasersinterprozess bilden, wenn auch in anderem Zusammenhang. Dieses Wissen ist dann an die besonderen Gegebenheiten des indirekten Metall-Lasersinterprozesses anzupassen.

Das Ergebnis der einzelnen Prozessschritte des indirekten Metall-Lasersinterprozesses wird durch das Zusammenwirken zahlreicher Einflussgrößen bestimmt. Neben den für jeden Prozessschritt festzulegenden Prozessparametern bestimmen jeweils noch anlagen-, material- und bauteilbezogene Einflussgrößen das Prozessergebnis. Beim selektiven Lasersinterprozess kommen noch Einflüsse aus der Datenvorbereitung hinzu.

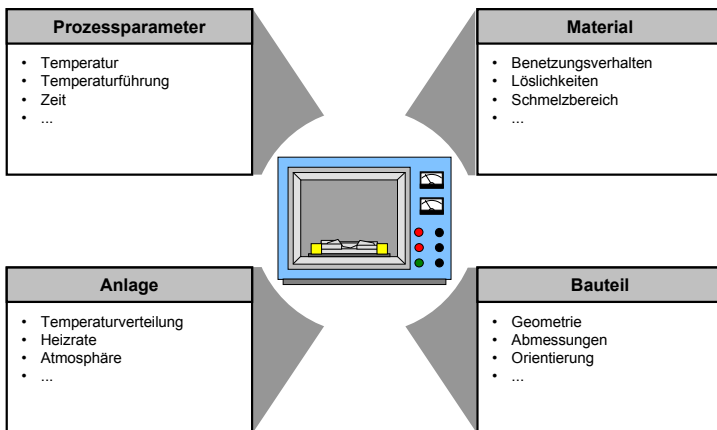


Abbildung 4-4: Einflussgrößen auf einen Prozessschritt (hier: Prozessschritt: „Infiltrieren“)

Im Rahmen der differenzierten Analyse werden anlagenbezogene Einflussgrößen vernachlässigt. D. h. es wird angenommen, dass beispielsweise die SLS-Anlage beliebig genau arbeitet, der Ofen eine homogene Temperaturverteilung hat, etc. Ebenso werden bauteilbezogene Einflussgrößen wie ungleichmäßige Materialverteilung nicht berücksichtigt.

### 4.3.1 Vorgehensweise

Für jeden Prozessschritt werden die Grundlagen beschrieben, d. h. die wesentlichen Vorgänge, die während des Prozessschrittes stattfinden. Anschließend werden die Zusammenhänge innerhalb des jeweiligen Prozessschritts aufgestellt. Ausgangspunkt bilden die jeweiligen Einflussgrößen. Es wird dargestellt, welche Effekte die Einflussgrößen innerhalb des Prozessschritts bewirken. Mit Hilfe der in Kapitel 3.4.2 vorgestellten primärfunktionsorientierten Ursache-Wirkungsdiagramme können diese Zusammenhänge dargestellt werden. Dies wird exemplarisch für die Einflussgröße „eingebrachte Energie“ im Teilprozess „selektives Lasersintern“ gezeigt. Diese so dargestellten Zusammenhänge bilden dann die Voraussetzung für die Modellierung der Teilprozesse im folgenden Kapitel.

### 4.3.2 Selektives Lasersintern

Das selektive Lasersintern ist der erste Prozessschritt des indirekten Metall-Lasersinterprozesses. Durch das selektive Lasersintern wird ungebundenes Metall-Polymer-Pulver entsprechend der datentechnisch definierten Gestaltinformation zu einem Grünkörper verbunden.

Der selektive Lasersinterprozess ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (SUN & BEAMAN 1991; WEISSMAN & HSU 1991, NELSON 1993, SONG 1995; NÖKEN 1997 und STEINBERGER 2000). Wenn auch aufgrund der hohen Komplexität des Prozesses bisher kein analytisch lösbares Prozessmodell erstellt werden konnte (NÖKEN 1997, S. 87), so sind doch die wichtigsten Einflussgrößen und deren Auswirkungen bekannt. Allerdings konzentrieren sich die meisten Untersuchungen auf das Kunststofflasersintern von amorphen oder teilkristallinen Thermoplasten (NÖKEN 1997, STEINBERGER 2000) bzw. auf das direkte Lasersintern von ein- oder mehrkomponentigem Metallpulver (SONG 1995). Beim indirekten Metall-Lasersinterprozess wird hingegen ein Metall-Polymerpulver verwendet. Des weiteren ist der entstehende Grünkörper nicht das Endprodukt, sondern muss den Anforderungen mehrerer Folgeprozesse genügen.

#### 4.3.2.1 Grundlagen

Um einzelne Partikel eines pulverförmigen Werkstoffs mit Hilfe eines Laserstrahls gezielt zu verbinden, wird die Energie des Laserstrahls in das Pulverbett



eingekoppelt. Durch Absorption an der Pulveroberfläche bzw. in einer oberflächennahen Schicht kommt es zu einer Umsetzung der Strahlungsenergie des Lasers in Wärme. Ausgehend von der aufgeprägten Wärmequelle breitet sich die eingebrachte Wärme durch die elementaren Wärmetransportmechanismen Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung in der Pulverschicht aus. Die Temperaturverteilung im Pulverbett bedingt dann den eigentlichen Sintervorgang, der bei dem verwendeten amorphen thermoplastischen Binder ab der Erweichungstemperatur einsetzt. An den Stellen, an denen die Erweichungstemperatur überschritten wird, verbinden sich die Partikel (NÖKEN 1997). Auf diese Weise kann ein Stoffzusammenhalt sowohl innerhalb einer Schicht als auch zwischen übereinander liegenden Schichten gezielt erzeugt werden. Dieser Vorgang muss Schicht für Schicht wiederholt werden, um einen dreidimensionalen Formeinsatz zu erzeugen.

#### **4.3.2.2 Aufstellen der Zusammenhänge**

Für das selektive Lasersintern sind folgende Einflussgrößen relevant: eingebrachte Energie, Schichtdicke, Material und die Pulvercharakteristik.

##### **Eingebrachte Energie**

Bei der eingebrachten Energie handelt es sich nicht direkt um eine Einflussgröße, sondern um eine Prozesskenngröße. Diese Prozesskenngröße beschreibt das Zusammenwirken mehrerer Einflussgrößen, die alle mit der Energieeinbringung zusammenhängen.

Durch den Laserstrahl, der sich mit der Leistung  $P_b$  und der Belichtungs-geschwindigkeit  $v_s$  über die Pulveroberfläche bewegt, entsteht infolge der lokalen Erwärmung der vom Laserstrahl überstrichenen Materialpartikel eine gesinterte bzw. geschmolzene Bahn der Breite  $w_s$  und der Tiefe  $d_s$ . Zusätzlich wird durch eine Infrarotheizung Energie eingebracht. Dadurch wird das Pulverbett bis kurz unterhalb der Glasübergangstemperatur des amorphen Thermoplastbinders erwärmt, so dass mit dem Laserstrahl nur die zum Verschmelzen der Partikel nötige Restenergie eingebracht werden muss. Auf diese Weise wird ein hoher Temperaturgradient zwischen belichtetem und nicht belichtetem Pulver vermieden, der zu Verzug führen würde. Somit gilt für die eingebrachte Energie auf der Pulveroberfläche:

$$E = E_b + E_v \quad \text{Gleichung 4-1}$$

mit:

$E_b$ : durch Laserstrahlung eingebrachter Energieanteil

$E_v$ : durch Heizstrahlung eingebrachter Energieanteil

Die während des Belichtungsvorgangs über die Strahlleistung des Lasers auf der Pulverbetttoberfläche  $P_b$  eingebrachte Energiemenge  $E_b$  lässt sich über die Gesamtbelichtungszeit  $t_{ges}$  zu

$$E_b = P_b \cdot t_{ges} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

berechnen. Dabei berechnet sich  $t_{ges}$  aus dem Quotienten aus Belichtungsbahnlänge  $l_x$  und Belichtungsgeschwindigkeit  $v_s$ .

$$t_{ges} = \frac{l_x}{v_s} \quad \text{Gleichung 4-3}$$

Die durch den Laserstrahl eingebrachte Energiemenge kann dann auf die belichtete Fläche bezogen werden. Daraus ergibt sich dann als Kennzahl die mittlere Energiedichte  $E_{b,av}$

$$E_{b,av} = \frac{P_b \cdot t_{ges}}{A} \quad \text{Gleichung 4-4}$$

Ein Bezug auf eine Bahn ist nicht sinnvoll, da in der Regel mit überlappenden Bahnen gearbeitet wird, um sicherzustellen, dass sich die Bahnen verbinden. Unter der Voraussetzung, dass die Schicht mit einer konstanten Belichtungsgeschwindigkeit  $v_s$  in x-Richtung und mit einem konstanten Bahnabstand  $h_s$  in y-Richtung belichtet wird, berechnet sich die Gesamtbelichtungszeit  $t_{ges}$  über die Anzahl  $n_y$  der in y-Richtung belichteten Bahnen. Mit

$$n_y = \frac{l_y}{h_s} \quad \text{Gleichung 4-5}$$

folgt, dass

$$t_{ges} = n_y \cdot t_x = \frac{l_y}{h_s} \cdot \frac{l_x}{v_s} \quad \text{Gleichung 4-6}$$

Die belichtete Fläche berechnet sich aus dem Produkt der beiden Kantenlängen  $l_x$  und  $l_y$  einer rechteckigen Schicht, so dass für die mittlere Energiedichte  $E_{b,av}$  schließlich gilt (FORDERHASE & CORDEN 1993):

$$E_{b,av} = \frac{P_b}{h_s \cdot v_s} \quad \text{Gleichung 4-7}$$

Das bedeutet, dass sich bei konstanter Schichtabmessung die für den Sintervorgang einer Schicht bereitgestellte Energie  $E_{b,av}$  direkt proportional zur Strahlleistung  $P_b$ , sowie umgekehrt proportional zum Bahnabstand  $h_s$  und zur Belichtungsgeschwindigkeit  $v_s$  verhält.

Die eingebrachte Energie beeinflusst hauptsächlich die Zugfestigkeit und die Dichte des Grünlings. Je höher die eingebrachte Energie ist, desto höher sind Dichte und Zugfestigkeit. Dies ist auf die höhere Sinterrate zurückzuführen, die direkt proportional zur Energieeinbringung ist. Diese führt auch zu einem höheren Schwund des Bauteils und damit zu einer schlechteren Genauigkeit.

Daneben bedeutet eine höhere Dichte, dass geringere Abstände zwischen den Partikeln der hochschmelzenden Komponente bestehen, was zu einem besser kontrollierbaren Ausbrennvorgang führt. Eine hohe Zugfestigkeit gewährleistet eine sichere Handhabung der Grünlinge. BADRINARAYAN & BARLOW (1995) wiesen jedoch nach, dass sich Dichte und Festigkeit durch Erhöhung der Energiedichte nicht beliebig steigern lassen. So führte die Erhöhung der Energiedichte bei Versuchen mit Kupferpulver und PMMA-Binder nach einer anfänglichen Zunahme ab einem gewissen Punkt wieder zu einem Abfall von Festigkeit und Dichte. Dies ist auf Zersetzungserscheinungen des Binders zurückzuführen.

Die genannten Zusammenhänge zwischen der Einflussgröße „eingebrachte Energie“ und den Auswirkungen werden exemplarisch in einem primärfunktionsorientierten Ursache-Wirkungsdiagramm dargestellt. Einflussgrößen sowie Produktmerkmale werden dabei als Funktionen dargestellt (vgl. Kap. 3.4.2).

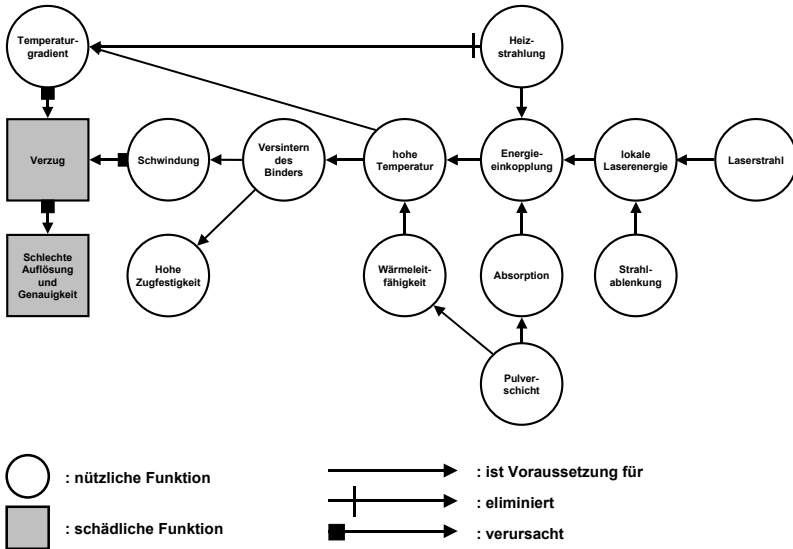


Abbildung 4-5: Ursache-Wirkungsdiagramm für die Eingangsgröße „eingebrachte Energie“

Folgende Lesehilfe soll es erleichtern, das aus der vorangegangenen Beschreibung abgeleitete Ursache-Wirkungsdiagramm zu interpretieren. Nützliche Funktionen sind im Text durch runde Klammern (NF) dargestellt, schädliche Funktionen durch eckige Klammern [SF]:

Durch einen (Laserstrahl) wird über die (Strahl- ablenkung) (lokale Laserenergie erzeugt). Durch (Absorption) der (Pulverschicht) kommt es zu einer (Energieeinkopplung), also der Umsetzung der Laserenergie in Wärme, was sich in einer (hohen Temperatur) zeigt. Voraussetzung hierfür ist eine ausreichende (Wärmeleitfähigkeit) des Pulvers. Die (hohe Temperatur) führt zu einem (Versintern des Binders). Das (Versintern des Binders) führt zu einem zu einer (hohen Zugfestigkeit), zum anderen zu einer entsprechenden (Schwindung). Die (Schwindung) verursacht wiederum [Verzugs] und damit eine [schlechte Auflösung und Genauigkeit]. Die (Heizstrahlung) trägt ebenfalls zur (Energieeinkopplung) und eliminiert den durch die (hohe Temperatur) entstehenden (Temperaturgradienten) innerhalb des Pulverbetts, der einen zusätzlichen [Verzugs] verursachen würde.

Analog können für die weiteren beschriebenen Zusammenhänge Teilmodelle mit Hilfe der primärfunktionsorientierten Ursache-Wirkungsmodellierung erzeugt werden. Diese Teilmodelle werden dann im Rahmen der Modellierung zu einem Gesamtmodell für den jeweiligen Teilprozess vereinigt.

### Schichtdicke

Die für die Auflösung und Genauigkeit in z-Richtung wesentliche Einflussgröße ist die Schichtdicke. Die Schichtdicke kann als Parameter über die Absenkung der Bauplatzform eingestellt werden und wird durch den maximalen Durchmesser der Pulverpartikel nach unten begrenzt. Die Auflösung in vertikaler Richtung kann nicht höher sein als die Dicke der Schicht. Auch auf die Genauigkeit in vertikaler Richtung hat eine hohe Schichtdicke negative Auswirkung, wenn das zu fertigende Maß nicht ein ganzzahliges Vielfaches der Schichtdicke ist.

Auf die Bauzeit wirkt sich eine hohe Schichtdicke hingegen positiv aus. Die Fertigungszeit beim selektiven Lasersintern berechnet sich bei Vernachlässigung von Aufwärmen und Abkühlen der Prozesskammer nach:

$$t = n \cdot (t_{ges} + t_a) \quad \text{Gleichung 4-8}$$

Mit

t	Bauzeit
n	Anzahl der Schichten
t <sub>ges</sub>	gesamte Belichtungszeit je Schicht
t <sub>a</sub>	Auftragszeit je Schicht

Daraus ergibt sich, dass die Anzahl der Schichten direkt proportional zur benötigten Zeit für das selektive Lasersintern ist. Bei gegebener Bauhöhe beeinflusst damit die Schichtdicke direkt die benötigte Bauzeit beim selektiven Lasersinterprozess. Die Schichtdicke ist nach unten durch den Durchmesser der Pulverpartikel, nach oben durch die maximal erzielbare Sintertiefe begrenzt (NÖKEN 1997).

### Material

Das Material, das im indirekten Metall-Lasersinterprozess verwendet wird, setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Dies ist zum einen die hochschmelzende Komponente, in der Regel ein metallisches Pulver. Der metallische Anteil des

Pulvers beeinflusst den selektiven Lasersinterprozess nur zu einem geringen Anteil. Im wesentlichen verändert es die Wärmeleitfähigkeit des Pulvers.

Zum anderen besteht das Pulver aus dem Binderanteil, der den selektiven Lasersinterprozess entscheidend beeinflusst. Im indirekten Metall-Lasersinterprozess werden ausschließlich amorphe Thermoplasten als Binder verwendet. Diese lassen sich hinsichtlich ihres Schwindungsverhaltens besser kontrollieren, als semikristalline Thermoplasten, da sie keine Phasenumwandlung erfahren, sondern nur erweichen.

Zu Berücksichtigen sind der Anteil des Binders am Pulver und der Schmelzindex. Ein niedriger Anteil des Binders ist erstrebenswert, da dann beim nachfolgenden Prozessschritt weniger Material ausgebrannt werden muss, was die Genauigkeit positiv beeinflusst. Ein höherer Binderanteil führt nach BADRI-NARAYAN & BARLOW (1995) jedoch zu einer besseren Festigkeit des Grünlings.

Ein Schmelzindex beschreibt das Fließverhalten eines Thermoplasten in Abhängigkeit von der Temperatur. Ein Thermoplast mit einem niedrigen Schmelzindex hat bei gleicher Temperatur eine höhere Viskosität als ein Werkstoff mit einem höheren Schmelzindex. Je höher der Schmelzindex, desto höher ist damit der Grad der Versinterung bei sonst gleichen Prozessparametern und damit die Dichte und die Festigkeit des Werkstoffs.

### **Pulvercharakteristik**

Die Pulvercharakteristik umfasst die Korngröße, die Korngrößenverteilung, die Kornform und die Art der Binderzugabe.

Die Korngröße beeinflusst die Auflösung und Genauigkeit sowie die Oberflächenrauigkeit. Grundsätzlich ermöglichen feinere Pulver eine bessere Auflösung, eine höhere Genauigkeit und eine geringere Oberflächenrauigkeit. Geringere Korngrößen führen aufgrund der höheren Ausgangsdichte des Pulverbetts, der größeren Gesamtoberfläche des Pulversystems und der größeren Kontaktfläche zu einem verbesserten Wärmeaufnahme- und -leitungsvermögen, das wiederum zu höheren Sinterraten und damit zu höherer Dichte und Festigkeit führt (NÖKEN 1997).

Die Korngrößenverteilung bestimmt ebenfalls die Ausgangsdichte des Pulverbetts. Nach Untersuchungen von MCGEARY (1961) konnte die maximale Packungsdichte von 60% bei einmodalen Pulvern bis auf 95% bei einem multimodalen Pulver unter der Annahme rein kugelförmiger Partikel gesteigert werden.

Damit führt eine höhere Korngrößenverteilung ebenfalls zu einer höheren Sinter-  
rate und damit zu einer höheren Dichte und Festigkeit.

Die Kornform hat aufgrund ihres Einflusses auf die Kontaktfläche zwischen den  
Partikeln und damit auf das Wärmeleitungsvermögen des Pulvers ebenfalls einen  
Einfluss auf die Sinterrate. Demnach haben rein kugelförmige Partikel im Ver-  
gleich zu anderen Partikeln gleicher Masse aufgrund ihrer kleinen Kontaktfläche  
bei sonst gleichen Prozessparametern die niedrigste Sinterrate.

Weiter ist die Art zu berücksichtigen, mit der der Binder dem Pulver zugegeben  
wird. Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten:

- Die Beschichtung der hochschmelzenden Komponente mit dem Binder
- Das direkte Mischen des Binders mit der hochschmelzenden Komponente

Die Beschichtung gewährleistet eine gleichmäßige Verteilung des Binders und  
damit homogene Dichte und Festigkeitseigenschaften des gesinterten Bauteils.  
Hingegen kann es beim Zumischen des Binders zu einer ungleichmäßigen Ver-  
teilung des Binders aufgrund von Entmischungsvorgängen kommen, was zu in-  
homogenen Bauteileigenschaften führt (BEAMAN U. A. 1997).

### 4.3.3 Ausbrennen des Binders

Durch das Ausbrennen wird der für das Lasersintern notwendige Binder entfernt. Dabei muss jedoch die Gestalt des Formeinsatzes erhalten bleiben, bis sie durch das nachfolgende Sintern verfestigt ist. Das Ausbrennen findet daher im selben Ofenzyklus statt wie das nachfolgende Sintern. Idealerweise hat der Verbrennungsvorgang bis auf das Entfernen des Binders keine Auswirkungen auf die Eigenschaften des Formeinsatzes.

#### 4.3.3.1 Grundlagen

Beim Ausbrennen des Binders handelt es sich um einen Verbrennungsvorgang, bei dem der Binder in Reaktionsprodukte zersetzt wird. Beim vorangehenden SLS-Prozess wird der Binder durch die thermische Einwirkung des Lasers zur Bindung des Formeinsatzes aufgeweicht, jedoch noch nicht zersetzt. Die Zersetzung erfolgt erst beim Ausbrennen bei einer entsprechenden Reaktionstemperatur.

#### 4.3.3.2 Aufstellen der Zusammenhänge

Das Ausbrennen des Binders kann wie ein gewöhnlicher Verbrennungsvorgang behandelt werden. Hierbei müssen als Einflussgrößen das Bindermaterial, der Binderanteil und die Verbrennungstemperatur berücksichtigt werden.

#### **Bindermaterial**

Verwendet wird derzeit ein organischer Binder, der sowohl für die Anforderungen des selektiven Lasersinterprozesses geeignet sein, als auch geeignete Verbrennungseigenschaften aufweisen muss. Die Anforderungen, die sich aus dem selektiven Lasersintern ergeben, werden wie erwähnt am besten mit amorphen Thermoplasten erfüllt. Stand der Technik sind Binder auf PMMA-Basis (Polymethylmethacrylat), die sich nach folgender Reaktionsgleichung zersetzen:



Beim Verbrennungsvorgang darf der Binder nicht langsam aufweichen, da der Formeinsatz dann langsam zerfließen würde. Diese Gefahr besteht jedoch bei den



verwendeten amorphen Thermoplasten bei Erreichen der Glasübergangstemperatur (HEJMADI & MCALEA 1996). Vielmehr muss der Binder die Gestalt des Formeinsatzes erhalten und sich dann in kurzer Zeit zersetzen und verflüchtigen. Aus diesem Grunde wird derzeit beim indirekten Metall-Lasersinterprozess der mit einem amorphen Thermoplasten versinterte Grünling vor dem Ausbrennen mit einem vernetzenden Polymer (Epoxydharz) getränkt und anschließend getrocknet. Dieser vernetzende Polymer verhindert ein Auseinanderfließen des Formeinsatzes bei der Erwärmung.

Nach dem Ausbrennen des Binders halten die Metallpartikel dann bis zum Versintern durch Reibungskräfte und Zersetzungsprodukte zusammen (BEAMAN U. A. 1997).

### **Binderanteil**

Der Binderanteil ist so niedrig wie möglich zu halten. Ein hoher Binderanteil führt beim Verbrennen aufgrund von Verschiebungen der Metallpartikel zu Ungenauigkeiten (BEAMAN U. A. 1997). Da noch nicht versinterte Bauteile nicht handhabbar sind, können die genauen Auswirkungen jedoch nicht gemessen werden.

Der erforderliche Mindestanteil an Binder wird, wie schon das Bindermaterial, durch die Anforderungen des selektiven Lasersinterprozesses festgelegt. Der Binderanteil bei den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Pulvern beträgt etwa 1,5% der Masse.

Zu Berücksichtigen ist hierbei auch die Art, mit der der Binder dem Pulver zugegeben wird. Die Beschichtung gewährleistet wie erwähnt eine gleichmäßige Verteilung des Binders, verhindert jedoch den Kontakt zwischen den Partikeln des hochschmelzenden Materials. Ist die Beschichtung zu dick, kann es beim Ausbrennen zu signifikanten Verschiebungen und damit zu Ungenauigkeiten kommen.

Beim Zumischen befindet sich ein Großteil des Binders zwischen den Partikeln des hochschmelzenden Materials, die auch Kontakt miteinander haben. Die Gefahr von Verschiebungen ist damit auch bei einem größeren Binderanteil deutlich geringer (BEAMAN U. A. 1997).

### Verbrennungstemperatur

Die Verbrennungstemperatur muss genügend hoch sein, um eine vollständige Verbrennung des Binders zu gewährleisten. Mit einer Simultan-Thermo-Analysen-Anlage wurde die Gewichtsänderung beim Aufheizen eines Pulvergemenges aus Edelstahl 316 und einem Binder aus PMMA gemessen. Ab 300 °C zeigt das Pulver einen deutlichen Gewichtsverlust, der bis 500 °C abgeschlossen ist. Bei weiterer Temperaturerhöhung findet kein weiterer Masseverlust mehr statt. Da der Masseverlust insgesamt etwa 1,5% beträgt, kann von einer vollständigen Verbrennung des Binders ausgegangen werden.

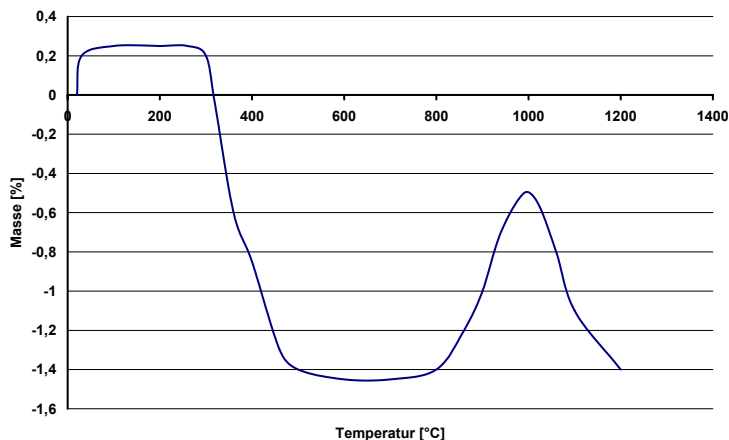


Abbildung 4-6: Simultan-Thermo-Analyse von Pulver (Edelstahl 316 und PMMA-Binder)

### 4.3.4 Sintern

Beim Sintern handelt es sich um den vorletzten Teilprozess des indirekten Metall-Lasersinterprozesses. Durch das Sintern werden die nach dem Ausbrennen des Binders verbleibenden Partikel des Metallpulvers miteinander verbunden. Resultat ist der Braunling, ein poröser Körper, bestehend aus den miteinander verbundenen Metallpartikeln.

#### 4.3.4.1 Grundlagen

Das Sintern ist ein Verfahrensschritt zur Erzeugung von Werkstücken aus körnigen Ausgangsmaterialien. Hierzu wird ein mit einer großen freien Energiemenge versehenes disperses System, der Pulverschüttling, in einen stabileren Zustand und weniger porösen Körper überführt (SCHATT 1992). Dies geschieht durch Zuführung von Wärme, in manchen Anwendungsfällen unterstützt durch Druck. An den Stellen innerhalb der Pulverschüttung, an denen die Temperatur größer oder gleich der Sintertemperatur ist, erweicht der Werkstoff und es findet eine Kontaktbildung und schließlich Kontaktverstärkung zwischen den einzelnen Partikeln der Pulverschüttung statt. Bei diesem Vorgang nähern sich die Mittelpunkte der Partikel aneinander an, was sich makroskopisch in einer Schwindung des verfestigten Pulversystems zeigt. Sinkt die Temperatur, verfestigt sich der Werkstoff wieder und der Sintervorgang bricht ab. Dichte und damit Schwindung sind die wesentlichen Ausgangsgrößen des Sinterprozesses.

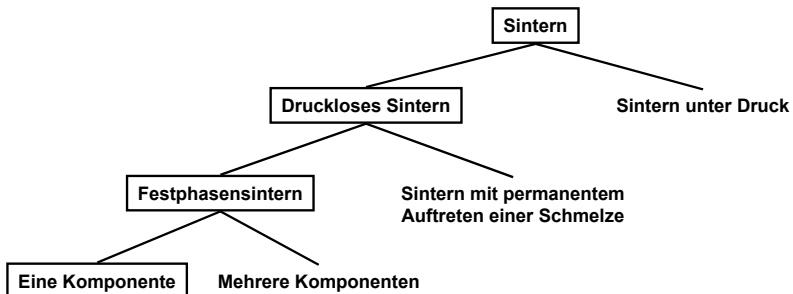


Abbildung 4-7: Einteilung Sinterprozesse nach GERMAN (1996)

Beim Sinterprozess des indirekten Metall-Lasersinterprozess handelt es sich nach der Einteilung von GERMAN (1996) um ein druckloses Festphasensintern mit einer Komponente.

Die treibende Kraft für den Sintervorgang ist die Differenz der freien Energie zwischen Ausgangs- und Endzustand. Die Wege des Differenzausgleichs bestehen in der Reduzierung aller äußeren und inneren Oberflächen sowie dem Abbau von Strukturdefekten. Verschiedene Arbeiten beschäftigen sich mit den Grundlagen des Sinterns, wie z. B. den verschiedenen Massetransportmechanismen (beispielsweise FRENKEL 1945). Für die Ziele dieser Arbeit ist jedoch eine phänomenologische Betrachtung des Sintervorgangs ausreichend.

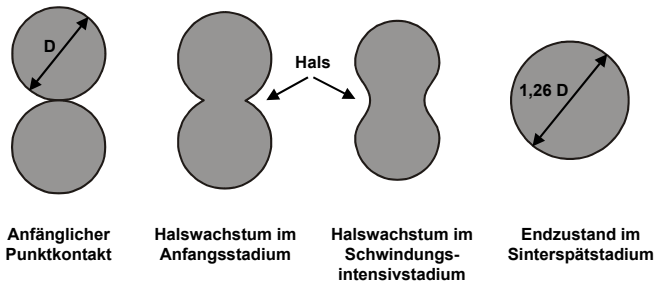


Abbildung 4-8: Stadien des Sinterprozesses für zwei Teilchen (VGL. GERMAN 1996)

Das Sintern beginnt bei etwa 50% – 80% der Schmelztemperatur des zu sinternden Werkstoffs. Der Sintervorgang kann in drei Stadien unterteilt werden, die allerdings stufenlos ineinander übergehen: das Anfangsstadium, das Schwindungsintensivstadium und das Endstadium.

Im Anfangsstadium des Sinterprozesses erfolgt die noch wenig schwindungsbehaftete (< 3%) Kontaktbildung und Kontaktverstärkung zwischen den einzelnen Partikeln. Das Verhältnis zwischen Verbindungshals- und Partikeldurchmesser beträgt weniger als 0,3. Während des Stadium des intensiven Schwindens wachsen die Kontakthälse stark an. Es erfolgt eine Umordnung der Partikel. Die Dichte des Bauteils beträgt zwischen 70% und 92% der theoretisch möglichen Dichte. Das Sinterspätstadium ist erreicht, wenn die Verdichtung soweit fortgeschritten ist, dass die Porosität in Form geschlossener, voneinander isolierter Poren vorliegt. Da für den nachfolgenden Prozessschritt „Infiltrieren“ eine Min

destporosität von 10% nicht unterschritten werden darf, sollte somit beim indirekten Metall-Lasersinterprozess das Schwindungsintensivstadium vermieden werden (GERMAN 1996).

#### 4.3.4.2 Aufstellen der Zusammenhänge

Die wichtigsten Eingangsparameter beim Sintern sind nach SCHATT (1992) und GERMAN (1996) die Sinterdauer, die Temperatur, die Pulvercharakteristik und die Anfangsdichte.

##### Sinterdauer

Der Einfluss der Sinterdauer auf die Dichte und damit die Schwindung eines Bauteils kann durch unterschiedliche Sintermodelle hergeleitet werden. Das am meisten verbreitete Sintermodell ist das Zweiteilchenmodell. Bei diesem Modell wird von zwei gleich großen, kugelförmigen Teilchen ausgegangen, die sich unter Sinterbedingungen berühren. Unter der Annahme isothermer Bedingungen und unter Vernachlässigung der Schwerkraft wird die Verbindung der beiden Kugeln betrachtet.

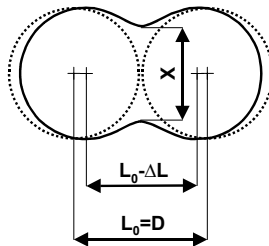


Abbildung 4-9: Zentrumsannäherung zwischen den Partikeln

Im Anfangsstadium des Sinterprozesses, das ja für den indirekten Metall-Lasersinterprozess relevant ist, kann die Schwindung als Verhältnis von Halsdurchmesser und Partikeldurchmesser beschrieben werden (SCHATT 1992):

$$\frac{\Delta L}{L_0} = -\frac{X^2}{2D^2} \quad \text{Gleichung 4-9}$$

Mit

$\Delta L$ : Differenz zwischen Ausgangsabstand der Kugelmittelpunkte und Abstand nach dem Sintern

$L_0$ : Ausgangsabstand der Kugelmittelpunkte

$X$ : Halsdurchmesser

$D$ : Partikeldurchmesser

Dieser Zusammenhang wurde in etwa auch an Schüttungen gleich großer Kugeln für das frühe isotherme Sintern gemessen. Damit kann die Schwindung in dem für den indirekten Metall-Lasersinterprozess relevanten Anfangsstadium durch folgendes Potenzgesetz beschrieben werden (GERMAN 1984):

$$\left(\frac{X}{D}\right)^n = \frac{B \cdot t}{D^m} \quad \text{Gleichung 4-10}$$

Mit

$X$ : Halsdurchmesser

$D$ : Partikeldurchmesser

$B$ : zusammengefasste Materialparameter

$t$ : Zeit

$n$ : materialtransportabhängiger Exponent

$m$ : materialtransportabhängiger Exponent

Allerdings kann diese Gleichung nicht zur Vorherbestimmung von Schwindungen bestimmter Stoffe verwendet werden, da sich die einzelnen Diffusionsmechanismen, die zum Bestimmen der Konstanten ( $B$ ) und Exponenten ( $m$ ,  $n$ ) notwendig sind, nicht isoliert betrachten lassen. Vielmehr müssen die entsprechenden Kurven für einen bestimmten Werkstoff und die jeweilige Isotherme durch Versuche ermittelt werden (SCHATT 1992).

Jedoch lassen sich die wesentlichen Zusammenhänge beim Sintern aus dieser Gleichung ableiten. So ist zu erkennen, dass die Zeit als Wurzelfunktion eingeht. D. h. mit zunehmender Zeitdauer wird die Zunahme der Schwindung geringer.

### **Temperatur**

Eine weitere wichtige Einflussgröße bildet die Temperatur. Damit überhaupt ein Sintervorgang stattfinden kann ist das Erreichen der Sintertemperatur notwendig, (BARGEL & SCHULZE 1988). Aus oben genannter Formel (Gleichung 4-10) ist

der Einfluss der Temperatur nicht direkt zu erkennen, da der Einfluss der Temperatur in der Konstanten B enthalten ist. Nach GERMAN (1996) führt eine höhere Sintertemperatur zu einer größeren Schwindung und damit zu einer höheren Dichte und Festigkeit sowie einer Zunahme der Schwindungsgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 4-10).

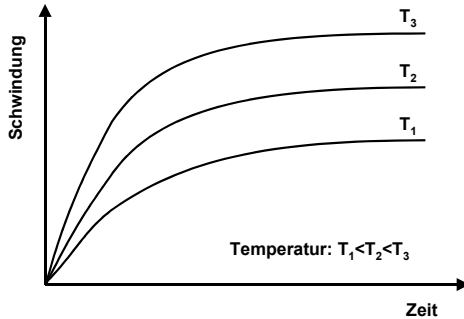


Abbildung 4-10: Abhängigkeit der Schwindung von der Temperatur und der Zeit

Weiter führt eine hohe Sintertemperatur zu höherem Kornwachstum und damit zu größeren Poren.

### Pulvercharakteristik

Die Pulvercharakteristik umfasst die Korngröße, die Korngrößenverteilung sowie die Kornform.

Die Partikelgröße ist im Gegensatz zur Sinterzeit und zur Sintertemperatur in diesem Prozessschritt nicht frei wählbar, sondern wird bereits durch das für den selektiven Lasersinterprozess verwendete Pulver vorgegeben. Wie aus Gleichung 4-10 erkennbar ist, führt eine kleinere Partikelgröße zu höheren Sinterraten und damit zu höherer Dichte und Festigkeit. Des Weiteren führt eine kleinere Partikelgröße zu einer schnelleren Versinterung. Gleiches gilt für eine weite Korngrößenverteilung und eine unregelmäßige Kornform.

### Anfangsdichte

Die letzte wesentliche Eingangsgröße für das Sintern bildet die Anfangsdichte des zu sinternden Formeinsatzes. Auch die Anfangsdichte ist nicht frei wählbar, sondern wird ausschließlich durch den vorgeschalteten selektiven Lasersinterpro

zess und das Ausbrennen des Binders beeinflusst. Eine höhere Anfangsdichte führt zu geringerer Schwindung, kleineren Poren und zu einer höheren Enddichte (GERMAN 1996). Nach dem Ausbrennen des Binders kann jedoch von einer losen Schüttung ausgegangen werden. Weiter ist eine gleichmäßige Dichteverteilung notwendig (BEAMAN U. A. 1997). Auch dies kann nach dem Ausbrennen des Binders angenommen werden.



### 4.3.5 Infiltrieren

Beim Infiltrieren handelt es sich um den letzten Teilprozess des indirekten Metall-Lasersinterprozesses. Durch das Infiltrieren soll der aus dem hochschmelzenden Material bestehende poröse Sinterkörper in ein vollständig massives Bauteil überführt werden, welches dann die vom jeweiligen Anwendungsfall gegebenen Anforderungen erfüllen muss. Das Grundprinzip des Infiltrierens ist schon seit längerem bekannt. So wurden für die Herstellung elektrischer Kontakte Tränklegerungen verwendet, die durch die Infiltration eines gesinterten porenhaltigen Grundkörpers aus einer Eisen-Basis-Legierung mit Kupfer hergestellt wurden (SCHREINER 1964). Im wesentlichen ging es beim Einsatz des Infiltrierens darum, Legierungen herzustellen, die auf schmelzmetallurgischem Weg nicht zu erhalten waren. Da das Infiltrieren jedoch keine verbreitete Technik darstellt, ist es nur in geringem Umfang Gegenstand von Untersuchungen.

#### 4.3.5.1 Grundlagen

Beim Infiltrieren handelt es sich um einen zweistufigen Prozess. Im ersten Schritt dringt eine flüssige Phase in die offenen Poren einer gesinterten porösen Struktur einer festen Phase. Im zweiten Schritt erstarrt die flüssige Phase aufgrund der Abkühlung der Umgebungstemperatur und bildet zusammen mit dem infiltrierten Körper eine Einheit (GERMAN 1996).

Zur Infiltration wird das Infiltrat zusammen mit dem porösen Sinterkörper erwärmt. Die Temperatur, bei der die Infiltration stattfindet, muss über der Schmelztemperatur des Materials der flüssigen Phase, aber unter der Schmelztemperatur des Materials der festen Phase liegen.

Das Füllen der Poren beruht maßgeblich auf der Tendenz der festen und der flüssigen Phase die Oberflächenspannung durch Benetzung abzubauen. Dies resultiert dann bei vorhandenen Poren in kapillarem Materialtransport. Benetzt die flüssige Phase die feste Phase z. B. aufgrund der Materialpaarung schlecht, kann eine Infiltration nur unter äußerem Druck stattfinden.

Die Infiltration erfordert eine Struktur von offenen und untereinander verbundenen Poren. In der Literatur wird eine Mindestporosität von 10% genannt (GERMAN 1996).

### 4.3.5.2 Aufstellen der Zusammenhänge

Wie erwähnt bildet die Tendenz der Phasen, die Oberflächenspannung abzubauen die maßgebliche Triebkraft für die Infiltration. Wichtige Einflussgrößen sind die Temperatur, die Temperaturführung, die Materialien und die Zeit.

#### Benetzung

Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik strebt jedes System nach einer Minimierung seiner Gesamtenergie. Trifft nun eine feste auf eine flüssige Phase, so bildet sich eine Grenzfläche fest-flüssig. Dabei gilt dann, dass die flüssige Phase nach einer Minimierung ihrer Energie strebt. Ebenso strebt die feste Phase durch eine Stabilisierung oder Verringerung ihrer Oberflächenspannungen ein niedrigeres Energieniveau an. Aufgrund der Wechselwirkung der beiden Phasen tritt eine Grenzflächenspannung ( $\gamma_{LS}$ ) auf. Für diese Grenzflächenspannung gilt nach dem horizontalen Kräftegleichgewicht die „Youngsche Gleichung“

$$\cos(\theta) = \frac{\gamma_s - \gamma_{LS}}{\gamma_L} \quad \text{Gleichung 4-11}$$

Mit

- $\gamma_s$ : Oberflächenspannung der festen Phase
- $\gamma_L$ : Oberflächenspannung der flüssigen Phase
- $\gamma_{LS}$ : Oberflächenspannung an der Grenzfläche „fest-flüssig“
- $\theta$ : Kontaktwinkel zwischen fester und flüssiger Phase

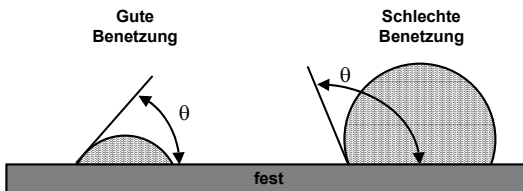


Abbildung 4-11: Grad der Benetzung, charakterisiert durch den Kontaktwinkel  $\theta$

Der Grad der Benetzung kann durch den Kontaktwinkel  $\theta$  zwischen fester und flüssiger Phase charakterisiert werden. Je kleiner der Winkel  $\theta$  ist, um so besser ist die Benetzung zwischen flüssiger und fester Phase und um so besser ist die Infiltration (GERMAN 1996). Für eine ideale Benetzung müsste der Winkel  $\theta$  einen Wert von Null annehmen, d. h. Zähler und Nenner des Bruches müssten gleiche Zahlenwerte haben. Während die Oberflächenspannung der festen Phase  $\gamma_S$  als konstant angenommen werden kann, werden sowohl  $\gamma_L$ , als auch  $\gamma_{LS}$  durch Temperatur und Legierungsbestandteile beeinflusst.

### Kapillarer Materialtransport

Eine benetzende Flüssigkeit in einem dünnen Rohr führt zu dem als kapillarer Materialtransport bekannten Phänomen. Dabei wird die Flüssigkeit aufgrund des Kapillardrucks durch die Poren transportiert. Für den Kapillardruck gilt in einer geraden Röhre folgende Formel (GERMAN 1996):

$$\Delta p = \frac{2 \cdot \gamma_L \cdot \cos \theta}{d} \quad \text{Gleichung 4-12}$$

Mit

- $\gamma_L$ : Oberflächenspannung der flüssigen Phase
- $\theta$ : Kontaktwinkel zwischen fester und flüssiger Phase
- d: Kapillardurchmesser

Es zeigt sich, dass der Kapillardruck mit abnehmendem Kapillardurchmesser, in diesem Fall mit abnehmendem Porendurchmesser, zunimmt. Die beim kapillaren Materialtransport entstehenden Kräfte wirken auch auf die feste Phase des porösen Körpers und führen bei einer gut benetzenden flüssigen Phase, d. h. bei kleinem Kontaktwinkel ( $\theta \rightarrow 0$ ) zu einem Schwinden des resultierenden Körpers. Hingegen führt eine schlecht benetzende Phase zu einem Schwellen. Als Grenze wird ein Kontaktwinkel von etwa  $60^\circ$  genannt (GERMAN 1996).

### Temperatur

Ein direkter Zusammenhang zwischen der Oberflächenspannung von flüssigen Phasen und der Temperatur wurde von KEENE (1993) erarbeitet, allerdings nur für reine Metalle:

$$\gamma_T = \gamma_m + \left( \frac{\partial \gamma}{\partial T} \right) \cdot (T - T_m) \quad \text{Gleichung 4-13}$$

Mit

$\gamma_T$ : Oberflächenspannung bei der Temperatur T (in °C)

$\gamma_m$ : Oberflächenspannung am Schmelzpunkt

$T_m$ : Temperatur am Schmelzpunkt (in °C)

T: Bezugstemperatur (in °C)

$\frac{\partial \gamma}{\partial T}$ : linearer Oberflächenspannungsgradient (<0)

Es besteht somit ein linearer Zusammenhang zwischen Temperatur und Oberflächenspannung: Mit steigender Temperatur sinkt die Oberflächenspannung der flüssigen Phase. Der Einfluss von Legierungselementen auf die Oberflächenspannung ist nicht exakt berechenbar, jedoch hat sich aus Experimenten ergeben, dass die Oberflächenspannung von Metallen bei Zumischung von Elementen mit niedrigerer Oberflächenspannung abnimmt (KEENE 1993).

Insgesamt zeigt sich, dass eine Bedingung für eine ideale Benetzung nur unter der Abstimmung aller drei Oberflächenspannungskomponenten ( $\gamma_s$ ,  $\gamma_L$  und  $\gamma_{LS}$ ) annähernd möglich ist. In der Praxis genügt es meist, die Oberflächenspannung der flüssigen Phase durch Temperaturerhöhung soweit zu verringern, bis eine Benetzung auftritt. Voraussetzung dafür ist jedoch eine passende Werkstoffpaarung von fester und flüssiger Phase.

### Temperaturführung

Während die Temperaturführung bei einkomponentigen Infiltrationswerkstoffen wie etwa reinem Kupfer keine große Rolle spielt, wird sie bei zwei- oder mehrkomponentigen Werkstoffen zu einer wichtigen Einflussgröße. Zwei- oder mehrkomponentige Materialien besitzen keinen eindeutigen Schmelzpunkt, sondern einen Schmelzbereich. Dieser Schmelzbereich liegt zwischen der Solidus- und der Liquiduslinie des Materials. Die Zusammensetzung des Infiltrationsmaterials als Verhältnis aus fester und flüssiger Phase ändert sich beim Durchfahren des Schmelzbereichs. Erst nach dem Überschreiten der Liquiduslinie liegt nur noch eine schmelzflüssige Phase vor.

Wird nun bei einem zweiphasigen Infiltrationswerkstoff während des Prozessschritts Infiltrieren die Temperatur entsprechend langsam über die Soliduslinie erhöht, beginnen die niedrigschmelzenden Anteile das Bauteil zu infiltrieren.

Dies führt im Infiltrat zu einer Verarmung an den niedrigschmelzenden Anteilen. Durch die Konzentrationsänderung liegt nun eine von der Ausgangsmischung unterschiedliche Zusammensetzung des noch nicht infiltrierten Infiltrationsmaterials vor. Damit wird auch die für ein weiteres Aufschmelzen relevante Hilfslinie konstanter Konzentration im binären Phasendiagramm zur neuen Konzentration, also in Richtung der höher schmelzenden Komponente hin verschoben. Als Folge ändert sich die Grenztemperatur, bis zu der nur feste Phase vorliegt, sowie die Grenztemperatur, ab der nur noch flüssige Phase vorliegt. Für mehrphasige Systeme gilt das Entsprechende.

Mit der Temperaturführung sollte ein möglichst schnelles Durchwandern des Phasengebiets angestrebt werden, um die oben genannten Effekte zu vermeiden. Aufgrund von Aufkocherscheinungen gibt es hierfür jedoch Grenzen.

### **Materialien**

Wie gesehen spielt neben der Temperatur die Auswahl der Materialien eine entscheidende Rolle bei der Infiltration. Dabei spielen folgende Faktoren eine Rolle:

- Das bereits behandelte Benetzungsverhalten
- Die Löslichkeiten der Materialien zueinander

Die Oberflächenspannungen  $\gamma_S$ ,  $\gamma_L$ ,  $\gamma_{LS}$  und damit der für das Benetzungsverhalten charakteristische Kontaktwinkel  $\theta$  sind neben der Temperatur auch von den Materialien abhängig. Die Materialauswahl entscheidet somit darüber, ob eine Infiltration grundsätzlich möglich ist und schließlich über das Schwellen oder Schwinden beim Infiltrieren.

Die Löslichkeiten der Materialien zueinander können ebenfalls ein Schwellen oder Schwinden des Bauteils bewirken. Zu Beachten sind die Löslichkeit der flüssigen Phase des Infiltrats in der festen Phase der Metallpulverpartikel und die Löslichkeit der festen Phase in der flüssigen Phase.

Besteht eine hohe Löslichkeit der flüssigen Phase in der festen, bilden sich an der Oberfläche der festen Phase Mischverbindungen, die die weitere Infiltration behindern. Idealerweise sollten bei der Infiltration keine intermetallischen Verbindungen zwischen der festen und der flüssigen Phase entstehen. Ist hingegen die feste Phase in der Flüssigkeit löslich, kommt es zu Auflösungserscheinungen bei der festen Phase. In einem solchen Fall besteht die Möglichkeit, die flüssige Phase mit der Komponente der festen Phase vorzusättigen.

Zusammenfassend lässt sich für die Materialauswahl sagen, dass sich gut benetzende Materialien, die nicht ineinander löslich sind, für eine Infiltration eignen. Die Materialeigenschaften wie Oberflächenspannungen sind jedoch nur sehr schwierig zu erfassen, insbesondere dann, wenn es sich nicht um reine Elemente handelt, da bereits geringfügige Konzentrationsunterschiede von Komponenten zu großen Veränderungen führen können.

In der Praxis greift man daher für die Infiltration auf eine Reihe von Materialkombinationen zurück, die sich bewährt haben. Hierzu zählen Fe-Cu, Fe-CuSn, Cr-Cu, TiC-Ni, Co-Cu (GERMAN 1996).

Die verwendeten Materialien sind weiter entscheidend für die Materialeigenschaften des Formeinsatzes. Hierzu zählen die Härte, die Wärmeleitfähigkeit und die Festigkeitswerte wie die Zugfestigkeit. Die Materialeigenschaften des resultierenden Formeinsatzes ergeben sich aus:

- den Materialeigenschaften des als feste Phase verwendeten Werkstoffs sowie dem Sintergrad der festen Phase. Dieses Merkmal wird vom vorhergehenden Prozessschritt, dem Sintern übernommen,
- den Materialeigenschaften des Infiltrats,
- den Anteilen der beiden Werkstoffe am fertig infiltrierten Formeinsatz. Die Anteile sind durch die Porosität des Braunlings im wesentlichen schon vorgegeben, wenn man eine vollständige Beseitigung der Porosität nach der Infiltration voraussetzt,
- den durch die Infiltration entstehenden Legierungen zwischen Braunling und Infiltrat wie z. B. intermetallische Verbindungen.

Für den Einsatz im indirekten Metall-Lasersinterprozess sind somit aus der Menge der geeigneten Materialpaarungen noch diejenigen Materialkomponenten auszuwählen, die hinsichtlich ihrer Werkstoffeigenschaften wie z. B. Zugfestigkeit oder Wärmeleitfähigkeit den jeweiligen Anforderungen entsprechen.

### **Zeit**

Die mögliche Infiltrationshöhe  $h$  lässt sich nach GERMAN (1996) wie folgt berechnen:

$$h = \sqrt{\frac{td\gamma_L \cos\theta}{4\eta}}$$

Gleichung 4-14

mit

h	Infiltrationshöhe
d	Porendurchmesser
$\theta$	Kontaktwinkel
$\eta$	Viskosität der flüssigen Phase
$\gamma_L$	Oberflächenspannung der flüssigen Phase
t	Zeit

Es zeigt sich, dass für die mögliche Infiltrationshöhe neben den material- und temperaturabhängigen Parametern und dem erwähnten Porendurchmesser die Infiltrationszeit eine wichtige Rolle spielt. Prinzipiell lässt sich nach Gleichung 4-14 durch eine Verlängerung der Infiltrationszeit eine beliebige Infiltrationshöhe erreichen. Dies ist entscheidend, da die Zeit nach Festlegung der Materialien die einzig frei beeinflussbare Einflussgröße ist. Die Temperatur als ebenfalls beeinflussbarer Parameter muss schließlich unterhalb der Schmelztemperatur der festen Phase bleiben. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass eine Ausdehnung der Infiltrationszeit zu einer Fortsetzung des Versinterns der festen Phase führt. Dies hat wiederum sowohl eine entsprechende Schwindung und damit Ungenauigkeit, als auch eine Verkleinerung der Porengröße und damit eventuell eine Behinderung der Infiltration zur Folge.

#### 4.4 Zusammenfassung

Neben den Anforderungen an die Ergebnisse des indirekten Metall-Lasersinterprozesses, bildet die Aufstellung der prozessinternen Zusammenhänge den Kernpunkt dieses Kapitels. Durch eine Aufteilung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses in die Teilprozesse selektives Lasersintern, Ausbrennen des Binders, Sintern und Infiltrieren, ist es möglich, hierfür bereits vorhandenes Wissen zu diesen Teilprozessen zu nutzen und in den Kontext des indirekten Metall-Lasersinterprozesses zu bringen.





## 5 Modellierung

Durch die Modellierung sollen die wesentlichen Zusammenhänge innerhalb der einzelnen Prozessschritte des indirekten Metall-Lasersinterprozesses abgebildet werden. Dabei werden die Ergebnisse verwendet, die in der Analyse der Prozesskette und dabei insbesondere in der differenzierten Analyse gewonnen wurden. Hierdurch soll eine verbesserte Transparenz hinsichtlich der bestehenden Problemstellung geschaffen werden, wodurch dann eine Identifizierung der wichtigen Stellhebel zur Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses möglich wird.

### 5.1 Vorgehensweise

Als Unterteilung für die Modellierung werden weiterhin die in der Grobstrukturierung festgelegten vier Teilprozesse des indirekten Metall-Lasersinterprozesses verwendet, nämlich der selektive Lasersinterprozess, das Ausbrennen des Binders, das Versintern und das Infiltrieren. Ebenso gilt weiterhin die in der differenzierten Analyse vorgenommene Einschränkung auf Material- und Prozesseinflüsse.

Die Darstellung der Zusammenhänge innerhalb der Teilprozesse erfolgt in der in Kapitel 3.4.2 vorgestellten primärfunktionsorientierten Ursache-Wirkungs-Modellierung.

Ausgangspunkt für die Modellierung bildet die primär im jeweiligen Prozessschritt zu verwirklichende Funktion. Ausgehend davon gilt es, alle weiteren Funktionen zu finden, die eine Verbindung zu den Eingangs- und Ausgangsgrößen herstellen. Die Erstellung des Ursache-Wirkungs-Diagramms wird im Hinblick auf den systematischen Aufbau und die Gewährleistung einer vollständigen Abbildung der Zusammenhänge durch folgende Fragen unterstützt (TERNINKO U. A. 1998):

- Sind andere Funktionen für die betrachtete Funktion Voraussetzung?
- Ist die betrachtete Funktion Voraussetzung für eine andere Funktion?
- Verursacht die betrachtete Funktion eine andere Funktion?
- Eliminiert die betrachtete Funktion eine andere Funktion?

Die Antworten auf diese Fragen ergeben sich aus den in der differenzierten Analyse erarbeiteten Zusammenhängen, die in entsprechende Teilmodelle überführt werden können (vgl. Beispiel in Kap. 4.3.2.2). Zu beachten ist, dass die Einflussgrößen und die Produktmerkmale, die im Rahmen der Optimierung verbessert werden sollen, ebenfalls als Funktionen dargestellt werden. Auf diese Weise ist eine Identifikation der Wirkungsketten gewährleistet, über die die jeweiligen Produktmerkmale beeinflusst werden.

### 5.2 Selektives Lasersintern

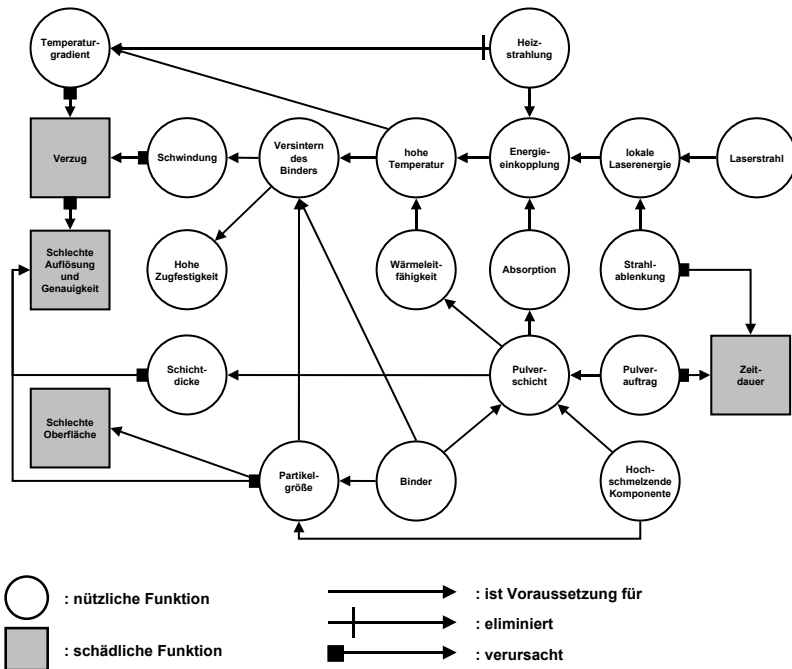


Abbildung 5-1: Primärfunktionsorientiertes Ursache-Wirkungsdiagramm des selektiven Lasersinterprozesses

Die primär im selektiven Lasersinterprozess zu verwirklichende Funktion ist das selektive Erzeugen eines Stoffzusammenhalts durch Versintern des Binders. Voraussetzung für das Versintern ist der Binder sowie die entsprechende Sinter-temperatur.

Das Versintern des Binders führt zu einer Steigerung der Zugfestigkeit des resultierenden Grünlings. Die Festigkeit des Grünlings ist zwar wichtig für die Handhabung zur Vorbereitung des Ausbrenn- und Sintervorgangs. Die Festigkeit des resultierenden Bauteils bzw. Formeinsatzes beeinflusst sie jedoch nicht.

Das Versintern hat ein Schwinden zur Folge, das zum Verzug und damit zu einer Verschlechterung der Genauigkeit sowie der Auflösung führt. Weitere Ursachen für die schlechte Genauigkeit und Auflösung sind die Schichtdicke sowie die Partikel, die gleichzeitig eine schlechte Oberfläche verursachen.

Ebenfalls eine Ausgangsgröße dieses Prozessschritts ist die Herstellungszeit, die sich aus der Zeit für den Pulverauftrag und für die Strahlablenkung ergibt. Die Materialeigenschaften des Formeinsatzes werden durch die Wahl der hochschmelzenden Komponente beeinflusst.

### **5.3 Ausbrennen des Binders**

Bei diesem Prozessschritt ist das Ausbrennen des Binders die primär zu verwirklichende Funktion. Voraussetzung hierfür ist neben dem Binder eine ausreichend hohe Reaktionstemperatur.

Das Ausbrennen des Binders verursacht eine Verschiebung der Partikel, die wiederum zu Verzug und damit zu Ungenauigkeiten führt. Eine weitere Ursache für den Verzug stellt das Aufweichen des Binders dar, das ein Zerfließen des Bauteils zur Folge hat. Das Aufweichen des Binders wird allerdings durch ein vernetzendes Polymer verhindert.

Der Prozessschritt „Ausbrennen des Binders“ hat ausschließlich auf die Genauigkeit Einfluss, unter der Annahme, dass der Binder vollständig ausbrennt.

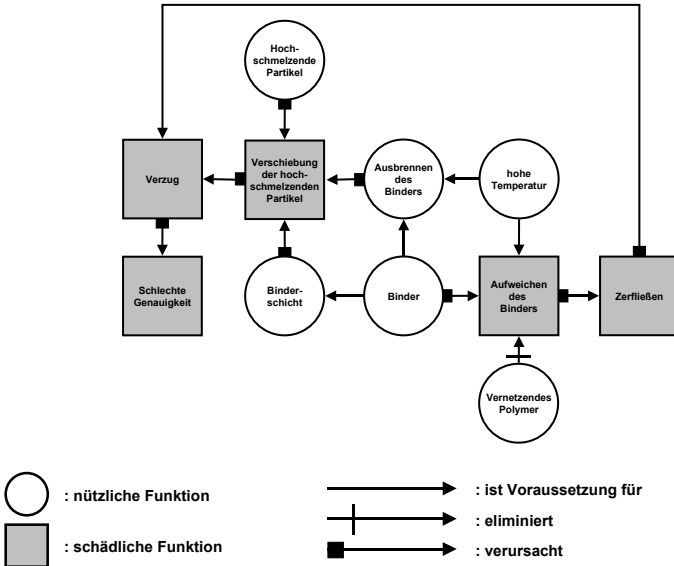


Abbildung 5-2: Primärfunktionsorientiertes Ursache-Wirkungsdiagramm des Ausbrennvorgangs

### 5.4 Sintern

Primäre Funktion beim Sintern ist das Herstellen des Stoffzusammenhalts zwischen den Partikeln der hochschmelzenden Komponente. Voraussetzung dazu ist der Pulverschüttling bestehend aus den Partikeln der hochschmelzenden Komponente, eine ausreichend hohe Temperatur sowie Zeit. Weiter wird der Sintervorgang durch die Eigenschaften des Pulverschüttlings, also die Anfangsdichte sowie die Partikelgröße beeinflusst.

Das Sintern führt zu einer Schwindung und damit zu Verzug und einer Verschlechterung der Genauigkeit. Gleichzeitig ist es Voraussetzung für eine Erhöhung der Zugfestigkeit des resultierenden Formeinsatzes. Die anderen Materialeigenschaften werden in diesem Prozessschritt durch die Ausprägung der Porenstruktur beeinflusst, da dadurch der Anteil der niedrighschmelzenden Komponente

festgelegt wird. Ebenfalls einen Einfluss auf die Porenstruktur haben die Eigenschaften des Pulverschüttlings, also Partikelgröße und Anfangsdichte.

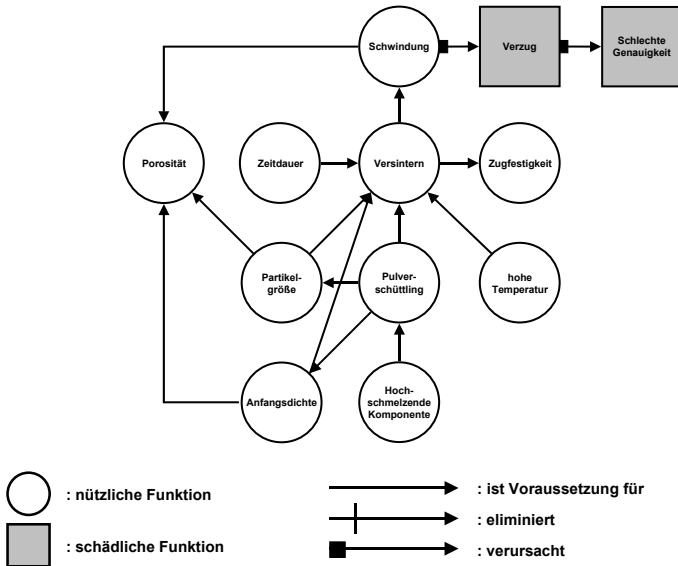


Abbildung 5-3: Primärfunktionsorientiertes Ursache-Wirkungsdiagramm des Sintervorgangs

## 5.5 Infiltrieren

Voraussetzung für das Infiltrieren ist der kapillare Materialtransport. Kapillarer Materialtransport findet bei entsprechender Benetzung und Porenstruktur sowie ausreichender Zeitdauer statt.

Die Zeitdauer verursacht zusammen mit der für das Schmelzen des Infiltrats notwendigen hohen Temperatur das Nachversintern der hochschmelzenden Komponente. Das Nachversintern führt zu einer Schwindung, die wiederum Verzug und schlechte Genauigkeit zur Folge hat. Eine weitere Ursache für die Schwindung bildet das gute Benetzungsverhalten, das jedoch Voraussetzung für die Benetzung ist.

Sowohl Mischverbindungen und Auflösungserscheinungen können durch schlechte Löslichkeiten der hochschmelzenden Komponente und des Infiltrats, also durch eine geeignete Materialpaarung verhindert werden.

Das Infiltrieren beeinflusst neben der Genauigkeit, die in diesem Diagramm unter Materialeigenschaften zusammengefassten Ausgangsgrößen Temperaturbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Härte und Zugfestigkeit.

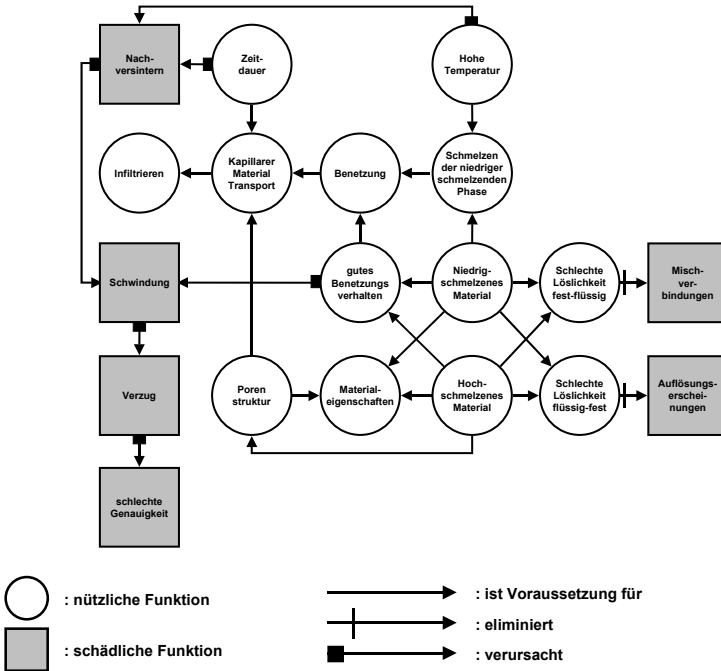


Abbildung 5-4: Primärfunktionsorientiertes Ursache-Wirkungsdiagramm des Infiltrierens

### 5.6 Zusammenfassung

Kapitel 5 beinhaltet die Modellierung der in der differenzierten Analyse aufgestellten Zusammenhänge der einzelnen Teilprozesse. Dies ermöglicht eine trans

parente Darstellung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen Zuständen, Ereignissen, und Parametern innerhalb der Teilprozessschritte. Diese Strukturierung der Zusammenhänge ist Voraussetzung für die folgenden Schritte des Optimierungszyklus.





## **6 Festlegung der Optimierungsschwerpunkte**

Im Rahmen der Analyse der Prozesskette und der Modellierung wurden die Zusammenhänge innerhalb der Teilprozesse erfasst. Auf dieser Grundlage werden nun im dritten Schritt des Optimierungszyklus geeignete Optimierungsschwerpunkte festgelegt, d. h. Ziele, die durch die Optimierung erreicht werden sollen.

Zielobjekte sind die Teilprozesse des indirekten Metall-Lasersinterprozesses. Erreicht werden soll eine Verbesserung bei den Ausprägungen der Merkmale eines resultierenden Formeinsatzes.

Die Produktmerkmale, bei denen Optimierungsbedarf besteht, ergeben sich aus der in Kapitel 4.1 erarbeiteten Gegenüberstellung von geforderten und zurzeit mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess tatsächlich erzielbaren Ausprägungen. Eine Hierarchie der Merkmale hinsichtlich der Dringlichkeit der Optimierung kann durch eine Bewertung erzeugt werden. Hierbei wird das Maß der Abweichung zwischen der jeweils geforderten und der zur Zeit erzielbaren Ausprägung erfasst. Je größer die Abweichung, um so höher ist der Optimierungsbedarf.

Zur Festlegung der Teilprobleme, durch deren Lösung eine Verbesserung der zu optimierenden Produktmerkmale erreicht werden soll, werden die in der Modellierung erarbeiteten primärfunktionsorientierten Ursache-Wirkungs-Diagramme analysiert. Es gilt, die Ursachen für die Mängel bei den Ausprägungen des jeweils zu optimierenden Merkmals herauszufinden. Resultat sind Wirkungsketten, die die Zusammenhänge zwischen dem zu behebbenden Mangel und den Ursachen aufzeigen. Jede solche Wirkungskette stellt ein Teilproblem dar und bildet einen Kristallisationspunkt für die folgende Lösung des Optimierungsproblems.

### **6.1 Mängel bei den Ausprägungen der Produktmerkmale**

In Kapitel 4.1 wurden bereits die relevanten Produktmerkmale sowie deren jeweils geforderte und zur Zeit erzielbare Ausprägung aufgestellt. Durch eine Hierarchisierung soll das Produktmerkmal gefunden werden, bei dem der größte Optimierungsbedarf besteht. Dieses Produktmerkmal bildet dann einen Optimierungsschwerpunkt.

Die Reihenfolge innerhalb der Hierarchie ergibt sich aus dem Erfüllungsgrad, den die einzelnen Produktmerkmale aufweisen. Der Erfüllungsgrad lässt sich

durch abstrakte Maßzahlen (z. B. von 0% bis 100%) darstellen. Die Zuordnung erfolgt über eine sogenannte Bewertungsfunktion. Für die hier betrachteten Produktmerkmale werden lineare Bewertungsfunktionen verwendet.

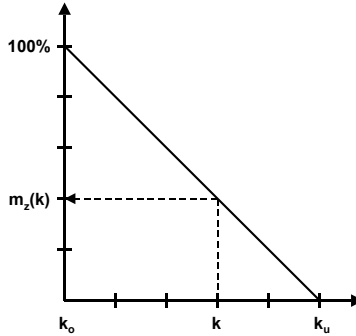


Abbildung 6-1: Zuordnung eines Merkmalsausprägung zu einer Maßzahl

Die Berechnung der Maßzahl  $m_z$  zur Beschreibung des Erfüllungsgrades erfolgt hierbei nach folgender Formel:

$$m_z = \frac{k - k_u}{k_o - k_u} \quad \text{Gleichung 6-1}$$

Mit

- k: Tatsächliche Merkmalsausprägung
- $k_o$ : Geforderte Merkmalsausprägung
- $k_u$ : Untergrenze der Merkmalsausprägung

Die tatsächlichen und die geforderten Merkmalsausprägungen ergeben sich aus den in Kapitel 4.1 aufgestellten Anforderungen an das Lösungssystem (vgl. Tabelle 4-1). Setzt man die Untergrenze der Merkmalsausprägung auf Null, so gibt die Maßzahl  $m_z$  das Verhältnis von tatsächlicher zu geforderter Merkmalsausprägung und damit den Erfüllungsgrad an (vgl. SCHLIFFENBACHER 2000).

Vor der Festlegung der Maßzahlen, sind diejenigen Produktmerkmale zu identifizieren, bei denen eine Optimierung mit der vorgestellten Vorgehensweise sinnvoll durchgeführt werden kann:

Die erreichbare Baugröße ist in erster Linie ein anlagentechnisches Problem und kann durch Veränderungen des Prozesses selbst nicht beeinflusst werden. Die wirtschaftlichen Merkmale wie Standmenge, Nachbearbeitungsaufwand und Kosten können entweder auf andere Merkmale zurückgeführt werden oder sind stark von der Bauteilgröße abhängig. Sie können somit durch eine Prozessoptimierung nur indirekt beeinflusst werden und werden daher erst im Rahmen des Praxisbeispiels (Kapitel 8) näher betrachtet.

Bewertet wird anhand der Maßzahlen somit der Erfüllungsgrad bei den Ausprägungen der technischen Merkmale Genauigkeit, Auflösung, Oberflächenrauigkeit, Temperaturbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Zugfestigkeit und Härte sowie des wirtschaftlichen Merkmals Herstellungszeit. Die Darstellung erfolgt in einem Polargraphen (Abbildung 6-2).

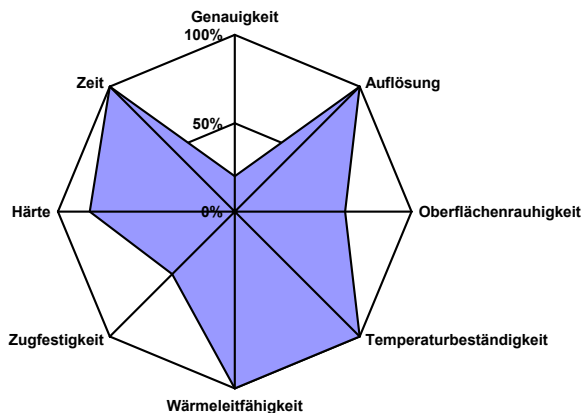


Abbildung 6-2: Erzielbarer Erfüllungsgrad der Ausprägungen der Produktmerkmale

Für jedes der genannten Produktmerkmal wird hierbei eine vom Mittelpunkt des Graphen ausgehende Achse festgelegt. Auf jeder Achse wird die entsprechende Maßzahl  $m_z$  aufgetragen, also das Verhältnis von tatsächlicher zu geforderter Merkmalsausprägung. Dadurch wird eine Identifikation des Erfüllungsgrades bei den einzelnen Produktmerkmalen möglich. Die Verbindung der aufgetragenen

Maßzahlen ergibt eine Fläche, die eine Beurteilung der Aggregation der Zielgrößen erlaubt.

Es ist zu erkennen, dass die Ausprägung der Genauigkeit den größten Mangel darstellt. Wesentliches Ziel der Optimierung muss daher eine Verbesserung der Genauigkeit sein. Als Zielkriterium dient die geforderte Ausprägung des Merkmals Genauigkeit von 0,2%. Die anderen Größen werden als Randbedingungen betrachtet.

Um das Ziel der Genauigkeitsverbesserung auf konkret zu lösende Teilprobleme zu präzisieren, werden die Wirkungsketten aufgestellt, die die Ausgangsgröße Genauigkeit mit den zugehörigen Ursachen verbinden.

### **6.2 Einfluss der Prozessschritte**

Um zu erkennen, bei welchen Prozessschritten die Wirkstrukturen für eine Verbesserung des Merkmals Genauigkeit zu analysieren sind, muss festgehalten werden, durch welchen Prozessschritt die Genauigkeit beeinflusst wird.

Auf Grundlage der Analyse der primärfunktionsorientierten Ursache-Wirkungs-Diagramme ergeben sich die in Tabelle 6-1 dargestellten Zusammenhänge zwischen Prozessschritten und den jeweiligen Produktmerkmalen.

Es zeigt sich, dass das Produktmerkmal Genauigkeit durch jeden der einzelnen Teilprozesse beeinflusst wird. D. h. die primärfunktionsorientierten Ursache-Wirkungs-Diagramme sind für jeden der Teilprozesse zu analysieren.

	SLS	Ausbrennen	Versintern	Infiltrieren
Genauigkeit	✓	✓	✓	✓
Auflösung	✓			
Oberflächenrauigkeit	✓			
Temperaturbeständigkeit	✓		✓	✓
Wärmeleitfähigkeit	✓		✓	✓
Zugfestigkeit	✓		✓	✓
Härte	✓		✓	✓

*Tabelle 6-1: Einfluss der Prozessschritte auf die Produktmerkmale. Beeinflusst ein Prozessschritt ein Produktmerkmal, ist das jeweilige Feld mit ✓ gekennzeichnet.*

### 6.3 Aufstellen der Teilprobleme

Anhand der primärfunktionsorientierten Ursache-Wirkungsdiagramme sind für das zu optimierende Produktmerkmal Genauigkeit die Wirkungsketten der beeinflussenden Teilprozesse zu klären. Auf Grundlage der dadurch dargestellten funktionalen Zusammenhänge sind dann die Teilprobleme zu formulieren, die zur Verbesserung des Merkmals Genauigkeit im nächsten Schritt des Optimierungszyklus zu lösen sind.

#### 6.3.1 Vorgehensweise

Teilprobleme werden für die Funktionen formuliert, bei denen eine Veränderung herbeigeführt werden soll. In diesem Fall soll die Funktion „schlechte Genauigkeit“ verändert werden. Da es sich dabei um eine schädliche Funktion handelt,

besteht das Teilproblem darin, Möglichkeiten zu finden, diese Funktion zu eliminieren, zu reduzieren oder dem Entstehen dieser Funktion vorzubeugen. Die Möglichkeit, einen Nutzen aus dieser schädlichen Funktion zu ziehen wird nicht berücksichtigt, da solche Teilprobleme in der Regel nicht zur Verbesserung des Prozesses führen. Im wesentlichen orientiert man sich bei Formulierung von Teilproblemen an der in Abschnitt 3.4.3 beschriebenen Systematik.

Eine eventuelle Beeinflussung abhängiger Produktmerkmale bei der Optimierung des Merkmals Genauigkeit kann erst im nachfolgenden Schritt des Optimierungszyklus erfasst werden, da sie stark von der Art der Lösung eines Teilproblems abhängig ist. Ebenfalls zeigt sich erst im nächsten Schritt, ob die aufgestellten Teilprobleme überhaupt zu lösen sind und mit welchem Aufwand.

### 6.3.2 Selektives Lasersintern

Aus dem Modell des selektiven Lasersinterprozesses ergeben sich im wesentlichen drei Funktionen, die jeweils Auswirkungen auf die Genauigkeit haben. Dies ist der Verzug, der sich durch die Schwindung des Binders beim Versintern des Formeinsatzes ergibt.

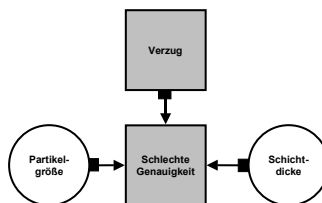
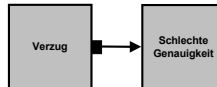


Abbildung 6-3: Wirkungskette für die Genauigkeit beim selektiven Lasersintern

Weiter kommt die Schichtdicke hinzu, die die Genauigkeit in vertikaler Richtung begrenzt. Daneben spielt noch die Partikelgröße eine Rolle. Somit ergibt sich für das selektive Lasersintern aus den genannten Wirkungsketten das Teilproblem einer Eliminierung, Reduktion oder Prävention der schlechten Genauigkeit unter der Bedingung, dass ein Verzug vorhanden ist, sowie eine bestimmte Partikelgröße und Schichtdicke besteht.

### 6.3.3 Ausbrennen des Binders

Beim Ausbrennen führen Verschiebungen der Partikel des hochschmelzenden Materials zu Ungenauigkeiten, da aufgrund der Beschichtung der Partikel mit dem Binder direkter Teilchenkontakt der hochschmelzenden Partikel verhindert wird. Das Teilproblem besteht somit darin, eine Eliminierung, Reduktion oder Prävention der schlechten Genauigkeit aufgrund des Verzugs zu erreichen.



*Abbildung 6-4: Wirkungskette für die Genauigkeit beim Ausbrennen des Binders*

### 6.3.4 Sintern

Beim Versintern führt der Schwindungsvorgang zu einem Verzug, da die Schwindung grundsätzlich nicht gleichmäßig erfolgt. Somit gilt es beim Sintern die Genauigkeit zu verbessern unter der Voraussetzung, dass ein Verzug durch Schwindung vorliegt.

### 6.3.5 Infiltrieren

Auch beim Infiltrieren führt die Schwindung zu einem Verzug. Somit lässt sich beim Infiltrieren analog zum Sintern das Teilproblem formulieren, eine Verbesserung der Genauigkeit zu erreichen, die durch den Verzug durch Schwindung verursacht wird.

## 6.4 Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel beschriebene Festlegung der Optimierungsschwerpunkte umfasst zwei wesentliche Punkte:

Im ersten Schritt wird das zu optimierende Produktmerkmal festgelegt. Es zeigt sich, dass beim Merkmal Genauigkeit der Erfüllungsgrad, d. h. das Verhältnis

von geforderter zu tatsächlich erreichter Ausprägung am niedrigsten ist. Daraus ergibt sich das Merkmal Genauigkeit als Optimierungsschwerpunkt.

Für das Merkmal Genauigkeit werden anschließend die Teilprobleme formuliert. Dies geschieht für jeden Teilprozess, der die Genauigkeit beeinflusst. Das Formulieren der Teilprobleme beinhaltet das Aufstellen der Wirkungsketten von der Funktion, an der Änderungen herbeigeführt werden sollen, bis zu den unmittelbaren Ursachen. Ausgangsfunktion ist jeweils die schlechte Genauigkeit. Die Wirkungsketten bilden dann die Ausgangspunkte für die Lösungssuche im nächsten Schritt des Optimierungszyklus. Das Vorgehen für die Optimierung anderer Merkmale ist analog.



## 7 Lösung des Optimierungsproblems

Im vorangegangenen Schritt wurde das Merkmal Genauigkeit als Optimierungsschwerpunkt festgelegt und die dazugehörigen Teilprobleme aufgestellt. Für diese Teilprobleme gilt es, im vierten und letzten Schritt des Optimierungszyklus Lösungen zu finden.

### 7.1 Genauigkeit

Durch Prozesseinflüsse innerhalb der verschiedenen Prozessschritte des indirekten Metall-Lasersinterprozesses kommt es zu Differenzen zwischen Soll- und Istabmessungen eines Bauteils. In Anlehnung an die entsprechende Literatur zu den einzelnen Prozessschritten (vgl. NÖKEN 1997 für den selektiven Lasersinterprozess, SCHATT 1992 für das Sintern und GERMAN 1996 für das Infiltrieren sowie BREITINGER 2001 für den gesamten Ofenprozess) wird von einer linearen Abhängigkeit zwischen diesen Differenzen und den Sollmaßen in den jeweiligen Koordinatenrichtungen ausgegangen, d. h. mit zunehmenden Sollmaßen nehmen auch die Differenzen zu den Istmaßen zu.

Dieser Zusammenhang lässt sich wie folgt beschreiben:

$$x_{i,ist} - x_{i,soll} = m_{i,x} \cdot x_{i,soll} \qquad \text{Gleichung 7-1}$$

Mit

- $x_{i,ist}$ : Istabmessung eines Einzelmaßes in eine Koordinatenrichtung
- $x_{i,soll}$ : Sollabmessung eines Einzelmaßes in eine Koordinatenrichtung
- $m_{i,x}$ : zugehöriger Proportionalitätsfaktor in eine Koordinatenrichtung; entspricht der relativen Maßabweichung

In einem Diagramm, in dem die Differenzen einzelner Punkte ( $x_{i,ist} - x_{i,soll}$ ) über den Sollmaßen  $x_{i,soll}$  aufgetragen sind, bildet sich dieser Zusammenhang in Ursprungsgeraden mit der jeweiligen Steigung  $m_{i,x}$  ab.

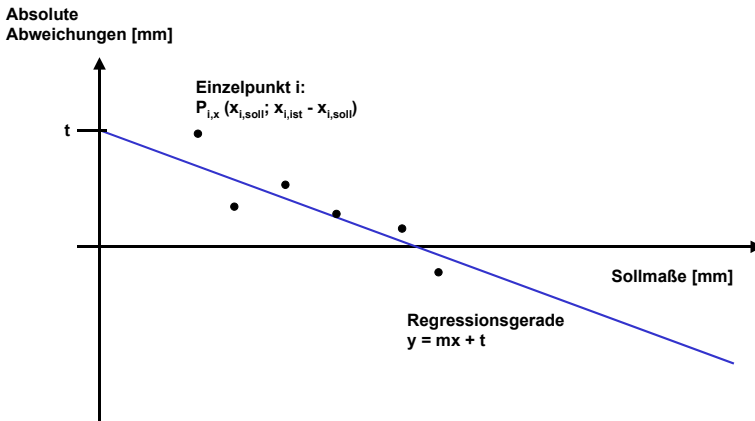


Abbildung 7-1: Bestimmung der relativen Maßabweichung in eine Koordinatenrichtung

Idealerweise sind alle relativen Maßabweichungen gleich groß, so dass sich eine einzige Ursprungsgerade durch alle Punkte legen lässt. In der Realität gibt es jedoch eine Streuung der Punkte, so dass mit Hilfe der linearen Regression eine Ausgleichsgerade durch alle Punkte gelegt werden muss. Diese Ausgleichsgerade beschreibt den linearen Zusammenhang mit einem möglichst kleinen Fehler. Die lineare Regression berechnet sich wie folgt (KAMISKE & BRAUER 1999):

Ansatz für die Ausgleichsgerade:

$$y = m \cdot x + t \qquad \text{Gleichung 7-2}$$

wobei

$$m = \frac{n \sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i}$$

$$t = \frac{\sum y_i + m \cdot \sum x_i}{n}$$

Mit

- y    jeweiliger y-Wert; entspricht  $x_{\text{ist}} - x_{\text{soll}}$
- x    jeweiliger x-Wert; entspricht  $x_{\text{soll}}$
- m    Steigung der Ausgleichsgeraden; entspricht der Schwindung eines Bauteils
- t    Abstand des Schnittpunkts der Regressionsgerade mit der Ordinate vom Nullpunkt; entspricht beim selektiven Lasersintern dem effektiven Laserstrahldurchmesser
- n    Anzahl der Messwerte

Die Steigung der Ausgleichsgeraden wird auch als Schwindung bezeichnet. Durch eine Skalierung des CAD-Modells eines Bauteils bzw. Formeinsatzes entsprechend der Steigung der Ausgleichsgeraden lässt sich die Schwindung ausgleichen. Durch die Einführung eines sogenannten Offset-Werts erfolgt ein Ausgleich hinsichtlich des Abstands des Schnittpunkts von Ausgleichsgeraden und Ordinate vom Nullpunkt.

Nicht ausgleichen lassen sich auf diese Weise die Abweichungen der Einzelmaße von der Ausgleichsgeraden. Je geringer diese Abweichungen sind, desto besser ist die Genauigkeit. Im folgenden wird die Genauigkeit durch die Standardabweichung der relativen Maßabweichungen von der Regressionsgeraden beschrieben unter der Annahme, dass eine Normalverteilung der relativen Maßabweichungen vorliegt. Eine Genauigkeit von 0,05% bedeutet damit, dass 68,3% ( $1\sigma$ ) aller Maße weniger als 0,05% von der Regressionsgeraden abweichen.

Um zu testen, ob der Ansatz der linearen Regression berechtigt ist, wird für jeden Versuch der Korrelationskoeffizient berechnet. Der Korrelationskoeffizient kann Werte von  $-1$  bis  $+1$  annehmen. Dabei bedeutet  $-1$  bzw.  $+1$  einen starken negativen bzw. positiven Zusammenhang. Bei einem Wert von  $0$  besteht kein Zusammenhang (KAMISKE & BRAUER 1999).

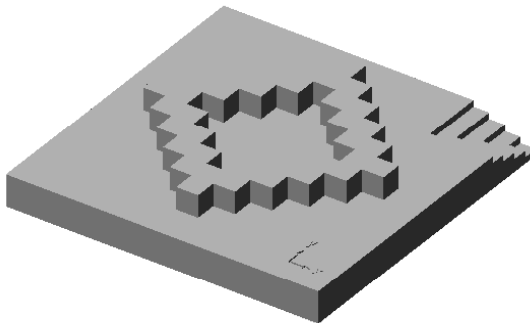
## 7.2 Versuchsvoraussetzungen

Zur Verifikation und Analyse von theoretisch erarbeiteten Lösungen wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurde für den selektiven Lasersinterprozess eine Lasersinteranlage Sinterstation 2500 der Firma DTM Cor

poration und für die Prozessschritte „Ausbrennen des Binders“, „Sintern“ und „Infiltrieren“ ein Retortenofen der Firma Lindberg verwendet.

Die Materialien für die hochschmelzende Komponente wurden von der Firma DTM Corp. zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich zum einen um den kohlenstoffarmer Stahl (1080) in Pulverform mit einer durchschnittlichen Partikelgröße von  $50\ \mu\text{m}$ . Dieser Stahl wird auch bei der im Stand der Technik vorgestellten kommerziellen Variante des indirekten Metall-Lasersinterprozesses verwendet. Zum anderen kommt ein Edelstahl (316) mit einer durchschnittlichen Partikelgröße von  $30\ \mu\text{m}$  zur Anwendung. Edelstahl bietet aufgrund seiner Korrosionsbeständigkeit Vorteile bei der Verwendung von Bindern, die die Stahlpartikel nicht umhüllen.

Die Maßnahmen zur Verbesserung der Genauigkeit sollen jeweils mit beiden hochschmelzenden Komponenten erprobt werden, um so eine breitere Basis für die Ergebnisse der einzelnen Maßnahmen zu gewinnen.



*Abbildung 7-2: Versuchsbauteil*

In allen Einzelversuchen wurde das in Abbildung 7-2 dargestellte Versuchsbauteil verwendet. Das Versuchsbauteil besitzt Abmessungen von  $200 \times 200 \times 34\ \text{mm}$  und weist hinreichend viele, gut zugängliche Messpunkte in allen drei Koordinatenrichtungen auf. Die Grundplatte ist ausreichend dick, um daraus Zugstäbe (DIN 50 125-E  $5 \times 16 \times 50$ ) für ergänzende Versuche gewinnen zu können.

## **7.3 Optimierung des Merkmals Genauigkeit**

Das Merkmal Genauigkeit wird in allen vier Teilprozessen beeinflusst. Daher sind für jeden der vier Teilprozesse Lösungen zu Verbesserung der Genauigkeit zu erarbeiten. Dabei wird im wesentlichen nach dem in Abschnitt 3.5 erläuterten Verfahrensschema vorgegangen.

### **7.3.1 Lösungen für den Prozessschritt „Selektiver Lasersinterprozess“**

#### **7.3.1.1 Analyse der Gestaltungsaufgabe**

Als eine Ursache für die schlechte Genauigkeit beim selektiven Lasersintern wurde der Verzug durch Schwindung ermittelt. Die Schwindung wirkt sich auf die Genauigkeit in alle drei Koordinatenrichtungen aus. Ebenfalls in alle drei Koordinatenrichtungen wirkt sich die Partikelgröße aus. Die Schichtdicke hat hingegen nur Auswirkungen in vertikaler Richtung. Diese drei Ursachen bildeten die Randbedingungen bei der Teilproblemformulierung im vorangegangenen Schritt des Optimierungszyklus.

#### **7.3.1.2 Lösungsmöglichkeiten**

Für eine Lösung des Teilproblems bietet sich eine Prävention der Funktion „schlechte Genauigkeit“ durch Beeinflussung dieser drei Ursachen an. Folgende Lösungsmöglichkeiten stehen zur Verfügung:

- Vermeiden des Verzugs durch Schwindung
- Ausgleich des Verzugs durch Schwindung
- Verändern der Schichtdicke
- Verändern der Partikelgröße

Zur Verbesserung der Genauigkeit des selektiven Lasersinterns sind bereits zahlreiche Lösungsvorschläge erarbeitet worden. Entsprechende Arbeiten konzentrieren sich auf ein Vermeiden oder einen Ausgleich des Verzugs durch Schwin

dung. Die Möglichkeiten zur Vermeidung des Verzugs beruhen darauf, die Schwindung im Bauteil möglichst gleichmäßig zu gestalten. Entsprechend der Ursache-Wirkungs-Kette bedeutet das, die Temperatureinbringung durch den Laser möglichst gleichmäßig zu gestalten, was aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung der Formelemente und damit der Belichtung nicht vorausgesetzt werden kann. Hierfür seien folgende Strategien als Beispiele genannt:

- Durch FEM-Simulation wird die Temperatur-Dichteverteilung in jeder Schicht in Abhängigkeit von der Geometrie des Bauteils berechnet. Diese Information wird genutzt, um den Energieeintrag automatisch anzupassen. Der Verzug wird in dieser von STEINBERGER (2000) vorgeschlagenen Strategie dadurch vermieden, dass die Temperatur an allen vom Laserstrahl belichteten Stellen gleich gehalten wird. Zur Zeit können jedoch die dabei entstehenden Datenmengen in der FEM-Simulation noch nicht hinreichend schnell verarbeitet werden.
- Das Bauteil wird segmentiert belichtet. Dabei wird die zu belichtende Schicht in Segmente unterteilt, die so klein sind, dass innerhalb der einzelnen Segmente keine Temperatur- und damit Dichteinhomogenitäten auftreten. Die Segmente werden so über die Schicht verteilt, dass sie sich nicht gegenseitig beeinflussen. Allerdings führt diese ebenfalls von STEINBERGER (2000) vorgeschlagene Strategie zu einem ineffektiven Belichtungsstil sowie zu Problemen bei der Auflösung.

Weitere Strategien zur Vermeidung oder auch zum Ausgleich des Verzugs durch Schwindung finden sich beispielsweise bei NÖKEN (1997) oder SONG (1995).

Die Verringerung der Schichtdicke ist eine Möglichkeit, die Genauigkeit in vertikaler Richtung zu verbessern. Da die Schichtdicke als Parameter direkt einstellbar ist, scheint die Lösung vorgegeben. Jedoch ist die Schichtdicke durch den maximalen Durchmesser der Pulverpartikel begrenzt. Als minimale Schichtdicke ist etwa die doppelte Partikelgröße erforderlich. Das sind bei den verwendeten Pulvern etwa 100  $\mu\text{m}$ . Weiter ist die Schichtdicke umgekehrt proportional zur Bauzeit, d. h. je kleiner die Schichtdicke, desto länger die Bauzeit. Dies bedeutet einen Widerspruch, der entweder durch Eliminierung der Funktion „Schichtdicke“ gelöst werden kann oder aber eine Kompromisslösung erfordert. Da die Genauigkeit, wie festgelegt, das zu optimierende Kriterium ist, wird die Bauzeit als Randbedingung behandelt, d. h. sie darf einen festgelegten Wert nicht überschreiten. Diese Randbedingung wird bei Verwendung einer durch die Korngröße

ße des Pulvers festgelegte minimale Schichtdicke erfüllt. Bewährt hat sich der doppelte Partikelgrößendurchmesser, also bei einer Partikelgröße von  $50\ \mu\text{m}$   $0,1\ \text{mm}$  Schichtdicke.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Genauigkeit bildet das Verringern der Partikelgröße. Auch hierbei handelt es sich um einen Parameter, der durch das verwendete Pulver vorgegeben wird. Es zeigte sich, dass bei Verwendung zu feiner Partikel Probleme beim Schichtauftrag entstehen. So laden sich die Partikel statisch auf und bleiben an der Transportwalze haften. In den Schichten entstehen dadurch Riefen. Weiter führen zu kleine Partikel zu einer vermehrten Staubentwicklung und erfordern daher Maßnahmen wie das Anbringen von Absaugvorrichtungen zum Schutz der Bediener. Die Partikelgrößen der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Pulver von  $50\ \mu\text{m}$  bzw.  $30\ \mu\text{m}$  stellen einen sinnvollen Kompromiss zwischen Genauigkeit zum einen und einem guten Schichtauftrag zum anderen dar.

### **7.3.1.3 Zusammenfassung**

Wie gesehen gibt es für den selektiven Lasersinterprozess bereits zahlreiche Ansätze zur Verbesserung der Genauigkeit. Deren Umsetzung erfordert jedoch hohe Rechnerleistung (Lösungen auf Basis rechnerischer Simulation) oder Eingriffe in die Anlagentechnik (Scanstrategien, feinkörnigere Pulver).

Im folgenden wird daher mit den genannten Pulvern sowie dem in Tabelle 7-1 genannten Parametersatz gearbeitet. Damit wird für den Teilprozess „selektives Lasersintern“ derzeit eine durchschnittliche Schwundung von  $0,8\%$  und eine durchschnittliche Genauigkeit von  $0,14\%$  erreicht.

Phase	Parameter	Wert
Aufheizen	Heizung Teilebett	120 °C
	Rollergeschwindigkeit	177,8 mm/s
	Schichtdicke	0,203 mm
Bauen	Energie Laser	28 W
	Scangeschwindigkeit	2286 mm/s
	Heizung Teilebett	120 °C
	Schichtdicke	0,127 mm
	Rollergeschwindigkeit	127 mm/s
Abkühlen	Heizung Teilebett	80 °C
	Rollergeschwindigkeit	127 mm/s
	Schichtdicke	0,127 mm

Tabelle 7-1: Parameter für den selektiven Lasersinterprozess

## 7.3.2 Lösungen für den Prozessschritt „Ausbrennen des Binders“

### 7.3.2.1 Analyse der Gestaltungsaufgabe

Ursache für Ungenauigkeiten, die während des Prozessschritts „Ausbrennen des Binders“ verursacht werden, sind Verschiebungen der Partikel des hochschmelzenden Materials durch das Ausbrennen des Binders. Diese Verschiebungen finden vor allem dann statt, wenn die Partikel mit dem Binder beschichtet sind, da in diesem Fall der direkte Teilchenkontakt der hochschmelzenden Partikel durch die Binderschicht verhindert wird. Die Verschiebungen der Partikel sind nicht gleichmäßig. Der resultierende Verzug des Bauteils ist daher über einen linearen Schwindungsfaktor nicht auszugleichen.



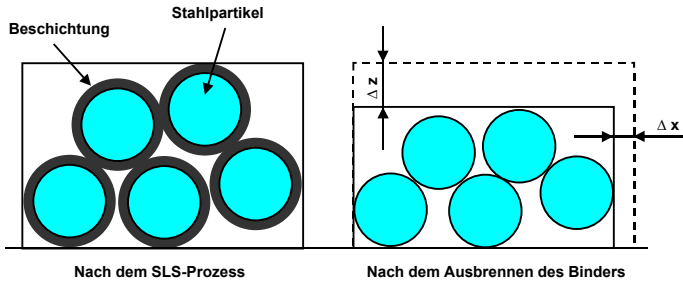


Abbildung 7-3: Verschiebung der Partikel nach dem Ausbrennen des Binders bei Verwendung einer Beschichtung

### 7.3.2.2 Lösungsmöglichkeiten

Eine weitgehende Vermeidung der Ursache der Partikelverschiebung ist durch Verzicht auf Ummantelung des Pulvers mit dem Binder möglich. So kann der Binder auch beigemischt werden. Resultat ist ein bimodales System (vgl. Abbildung 7-4). Hier haben die Partikel der hochschmelzenden Komponente nach dem selektiven Lasersinterprozess direkten Kontakt miteinander, so dass Verschiebungen nur in geringerem Umfang stattfinden können.

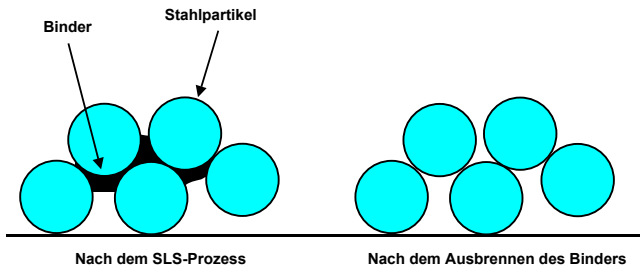


Abbildung 7-4: Bei einem beigemischten Binder herrscht bereits nach dem selektiven Lasersintern Kontakt zwischen den Partikeln

Im weiteren wird ausschließlich ein von der DTM Corp. entwickeltes bimodales System verwendet, das zum einen aus den Partikeln jeweils eines der beiden vorgestellten Stähle besteht, zum anderen aus einem zugemischten PMMA-Binder.

Dem PMMA-Binder ist außerdem direkt ein bei Temperatur vernetzendes Epoxydharz beigegeben. Somit kann die zeitaufwändige und nach BREITINGER (2001) starke Maßabweichungen verursachende Polymerinfiltration entfallen.

### **7.3.3 Lösungen für den Prozessschritt „Sintern“**

#### **7.3.3.1 Analyse der Gestaltungsaufgabe**

Den Ausgangspunkt für die Lösungsfindung bildet entsprechend dem Schritt „Festlegung der Optimierungsschwerpunkte“ die zu eliminierende oder zu reduzierende Funktion „schlechte Genauigkeit“. Da eine direkte Eliminierung oder Reduzierung der Funktion „schlechte Genauigkeit“ nicht möglich ist, bietet sich die Prävention an. Dies kann über die verursachende Funktion geschehen. Aus der differenzierten Analyse und dem primärfunktionsorientierten Ursache-Wirkungsdiagramm ergibt sich, dass die wesentliche Ursache für die Ungenauigkeit der Verzug durch Schwindung ist.

#### **7.3.3.2 Lösungsmöglichkeiten**

Eine Verbesserung der Genauigkeit kann daher im Prozessschritt „Sintern“ durch die Lösung folgender Problemstellungen erfolgen:

- Reduzierung der Auswirkungen der Schwindung
- Eliminierung der Schwindung

Einen Lösungsansatz für die Reduzierung der Auswirkungen des resultierenden Verzugs verfolgt BREITINGER (2001). Dabei wird das 3D-CAD-Modell des zu fertigenden Bauteils mit Hilfe einer Standardschnittstelle in ein FEM-System überführt und dort diskretisiert. Im FEM-System finden dann die notwendigen Berechnungen des gesamten während des Ofenprozesses auftretenden Verzuges durch Verschiebung und Schwindung statt. Im indirekten Metall-Lasersinterprozess wird dann mit entsprechend vorverzerrten Geometriedaten gearbeitet. Resultat ist dann ein Bauteil mit geringerem Verzug und damit geringerer Ungenauigkeit. Dieser Ansatz umfasst alle im Ofenprozess stattfindenden Teilprozesse, also zusätzlich noch das Ausbrennen des Binders und die Infiltration.

Im folgenden werden Lösungsvorschläge zur Verringerung bzw. zur Vermeidung von Schwindung im Sinterprozess generiert und analysiert. Dabei kann auf die in der differenzierten Analyse erarbeiteten Zusammenhänge zurückgegriffen werden.

### 7.3.3.3 Ausarbeiten der Lösung

Aus den erarbeiteten Zusammenhängen ergibt sich, dass die Schwindung und damit die Genauigkeit über die Parameter Anfangsdichte, Partikelgröße, Temperatur und Zeitdauer beeinflusst werden können.

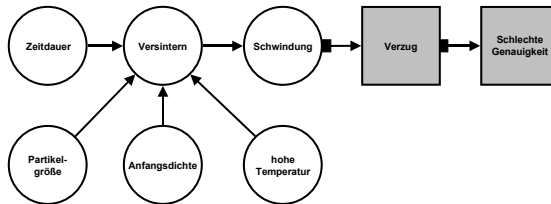


Abbildung 7-5: Wirkstruktur für die schlechte Genauigkeit beim Prozessschritt Sintern

Die Anfangsdichte kann beim indirekten Metall-Lasersinterprozess in der momentanen Konstellation nicht beeinflusst werden. Nach dem selektiven Lasersinterprozess und dem Ausbrennen entspricht die Anfangsdichte innerhalb des Pulverschüttlings der einer losen Schüttung.

Die Partikelgröße ist durch das beim selektiven Lasersinterprozess verwendete Pulver vorgegeben und beträgt bei dem verwendeten kohlenstoffarmen Stahl (1080) 50  $\mu\text{m}$  und bei dem verwendeten Edelstahl (316) 30  $\mu\text{m}$ . Da an diese Einflussgröße Anforderungen von anderen Prozessschritten wie dem selektiven Lasersintern gestellt werden (Auftragsmechanismus, Auflösung), ist es sinnvoll diesen Parameter konstant zu halten.

Der Parameter Temperatur muss mindestens den Wert der Sintertemperatur erreichen. Eine weit darüber hinausgehende Temperaturerhöhung führt zu einer Beschleunigung des Sintervorgangs. Im Sinne einer bestmöglichen Kontrolle des Sintervorgangs sollte die Temperatur daher nahe an der Sintertemperatur gehalten werden. Untersuchungen des Edelstahlpulvers (316) mit Hilfe der Thermo

dilatometrie (nach DIN 51045) ergaben, dass im Bereich zwischen 1080 °C und 1100 °C ein Sintervorgang einsetzt. Sicherheitshalber wird über die Haltezeit hinweg eine Temperatur von 1120 °C eingestellt, bei der die beiden verwendeten Stähle nach den Ergebnissen einer Thermodilatometrie sicher versintern.

Einzigster freier Parameter zur Beeinflussung der Schwindung und der Genauigkeit ist damit die Haltezeit beim Sintern.

Ausgangsgrößen des Sinterprozesses sind Genauigkeit, Zugfestigkeit sowie Porenstruktur- und -größe. Alle Ausgangsgrößen sind über die Schwindung voneinander abhängig.

Das Merkmal Porosität hat eine komplementäre Beziehung zum Merkmal Genauigkeit, d. h. eine geringe Schwindung führt zu einer hohen Genauigkeit und zu der ebenfalls gewünschten hohen Porosität. Hingegen ist die Zugfestigkeit ein zur Genauigkeit konkurrierendes Merkmal. Eine Erhöhung des Sintergrades verbessert die Zugfestigkeit, verschlechtert aber die Genauigkeit. Daraus ergibt sich ein Widerspruch, der entweder durch eine Kompromisslösung oder durch Auflösung des Widerspruchs bearbeitet werden kann. Im folgenden wird eine Kompromisslösung erarbeitet.

Dabei wird der Sintervorgang hinsichtlich des Merkmals Genauigkeit optimiert, die Zugfestigkeit hingegen als Randbedingung berücksichtigt. Randbedingung ist eine ausreichende Zugfestigkeit des Braunlings, um eine sichere Handhabung für den Folgeprozess zu gewährleisten und dem Kapillardruck bei der Infiltration zu widerstehen.

Erreicht werden soll die Verbesserung der Genauigkeit durch eine Verkürzung der Haltezeit beim Sintern. Durch die Verkürzung der Haltezeit verringert sich dann die Schwindung und damit der Verzug.

### **7.3.3.4 Analyse der Lösung**

Mit dem Ziel, eine Verminderung der Schwindung und dadurch eine Verbesserung der Genauigkeit durch eine Verkürzung der Haltezeit beim Sintern nachzuweisen, wurden beim Sintern von Versuchsbauteilen die Haltezeiten variiert. Ausgegangen wird von einer Haltezeit von sechs Stunden, bei der nach BEAMAN U. A. (1997) eine für den nachfolgenden Infiltrationsprozess ausreichende Versinterung gesichert ist. Die Ergebnisse dieser Messungen wurden dann vergli

chen mit Ergebnissen bei Versuchsbauteilen, die einer halb so langen Haltezeit unterzogen wurden. Die Heizrate wurde konstant gehalten. Während der Haltezeit betrug die Sintertemperatur bei der gesamten Versuchsreihe 1120 °C.

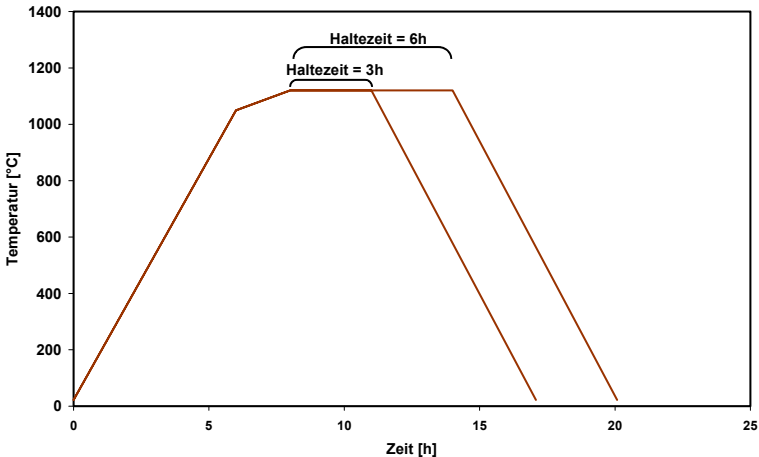


Abbildung 7-6: Temperaturverläufe mit Haltezeiten von 3h und 6h

Gemessen wurden die Maße der Grünlinge und anschließend die Maße der resultierenden Braunlinge, so dass ausschließlich der Einfluss des Prozessschritts Sintern erfasst wurde. Ungenauigkeiten die durch das Ausbrennen des Binders entstehen, konnten im Rahmen dieser Versuchsreihe nicht getrennt ermittelt werden. Jedoch wurden für beide Haltezeiten sowie für beide Stähle jeweils das gleiche Bindersystem verwendet, so dass durch das Ausbrennen des Binders keine unterschiedlichen Einflüsse auf die einzelnen Versuche zu erwarten sind.

Hinsichtlich der Schwindung und der Genauigkeit ergaben sich für den Prozessschritt Infiltrieren die in nachfolgender Tabelle gezeigten Ergebnisse. Bei Schwindung und Genauigkeit ist der arithmetische Mittelwert aus Versuchen mit je drei Versuchsbauteilen wiedergegeben.

Material	Haltezeit [h]	Schwindung [%]	Korrelation	$\sigma$
Kohlenstoffarmer Stahl 1080	6	1,11	-0,98	0,09
Kohlenstoffarmer Stahl 1080	3	0,93	-0,97	0,09
Edelstahl 316	6	0,71	-0,99	0,04
Edelstahl 316	3	0,56	-0,99	0,09

*Tabelle 7-2: Schwindung bei der Verwendung unterschiedlicher Haltezeiten beim Sintern*

Material	Haltezeit [h]	Genauigkeit [%]	$\sigma$
Kohlenstoffarmer Stahl 1080	6	0,15	0,014
Kohlenstoffarmer Stahl 1080	3	0,13	0,016
Edelstahl 316	6	0,05	0,008
Edelstahl 316	3	0,04	0,008

*Tabelle 7-3: Genauigkeiten bei der Verwendung unterschiedlicher Haltezeiten beim Sintern*

Es ist zu erkennen, dass die verkürzte Haltezeit bei beiden Stählen zu einem etwa 20% niedrigeren Schwund führt. Der Einfluss dieser Größe ist damit signifikant. Die Genauigkeit verbessert sich dabei um die gleiche Größenordnung.

Auf entsprechenden Schlibbildern (vgl. Abbildung 7-7) zeigt sich, dass bei dem untersuchten Edelstahl nach einer Haltezeit von sechs Stunden mehr und größere Bindungen vorhanden sind als nach drei Stunden.

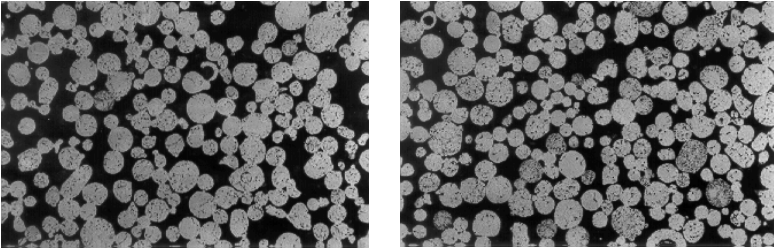


Abbildung 7-7: Schliffbilder von Braunlingen aus Edelstahl (316) nach einer Haltezeit von 3h (links) und 6h (rechts). (Vergrößerung:  $\times 200$ )

Weiter ist von Interesse, ob die unterschiedliche Schwindung bei verschiedener Haltezeit, und die damit verbundene Genauigkeitsverbesserung auch nach dem Infiltrieren noch erhalten bleibt.

Hierzu wurden je zwei Versuchsbauteile, die vorher bei normaler bzw. bei verkürzter Haltezeit gesintert wurden, mit reinem Kupfer infiltriert. Die Bauteile wurden vor und nach dem Infiltrieren vermessen, so dass ausschließlich die Einflüsse des Infiltrationsprozesses erfasst wurden.

Material	Haltezeit [h]	Schwindung [%]	Korrelation	$\sigma$
Kohlenstoffarmer Stahl 1080	6	1,10	-0,98	0,10
Kohlenstoffarmer Stahl 1080	3	1,15	-0,99	0,08
Edelstahl 316	6	0,24	-0,93	0,06
Edelstahl 316	3	0,24	-0,92	0,05

Tabelle 7-4: Schwindung bei der Infiltration von Bauteilen, die mit unterschiedlichen Haltezeiten gesintert wurden

Material	Haltezeit [h]	Genauigkeit [%]	$\sigma$
Kohlenstoffarmer Stahl 1080	6	0,15	0,05
Kohlenstoffarmer Stahl 1080	3	0,13	0,06
Edelstahl 316	6	0,10	0,02
Edelstahl 316	3	0,11	0,04

*Tabelle 7-5: Genauigkeit bei der Infiltration von Bauteilen, die mit unterschiedlichen Haltezeiten gesintert wurden*

Es zeigt sich, dass der unterschiedliche Sintergrad hinsichtlich der Infiltration keine signifikanten Auswirkungen auf die Schwindung und damit die Genauigkeit hat. Aus den in der differenzierten Analyse aufgestellten Zusammenhängen und den Ergebnissen der Versuche lassen sich damit folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

- Die Schwindung wird bei beiden Stählen mit kürzerer Sinterzeit geringer. Dadurch verbessert sich auch die Genauigkeit hinsichtlich des Prozessschritts Sintern signifikant.
- Auf den Infiltrationsprozess hat der unterschiedliche Sintergrad im untersuchten Rahmen keine Auswirkungen, d. h. für eine erfolgreiche Infiltration ist weder die Porengröße zu klein, noch die Zugfestigkeit zu gering. Auswirkungen sind jedoch bei sehr hohen und sehr niedrigen Sintergraden zu erwarten. Bei zu hohen Sintergraden wird das Porenvolumen für eine Infiltration zu klein. Ein zu kleiner Sintergrad führt dagegen zu einer zu geringen Festigkeit des Braulings.

Zum Erreichen einer bestmöglichen Genauigkeit kann daher eine Haltezeit gewählt werden, die eine für das nachfolgende Infiltrieren gerade noch ausreichende Festigkeit ermöglicht. Die Zeitersparnis bietet einen weiteren Vorteil.

Da die Zeit, die benötigt wird, um einen bestimmten Sintergrad und damit Festigkeit zu erreichen, theoretisch von der Größe des Bauteils unabhängig ist, lässt sie sich experimentell für das zu versinternde Material ermitteln und dann allgemein für unterschiedliche Größen und Geometrien von Formeinsätzen anwenden.



### 7.3.4 Lösungen für den Prozessschritt „Infiltrieren“

#### 7.3.4.1 Analyse der Gestaltungsaufgabe

Auch beim Prozessschritt „Infiltrieren“ ist die wesentliche Ursache für die Ungenauigkeit der Verzug durch Schwindung. Eine Verbesserung der Genauigkeit kann somit auch in diesem Prozessschritt durch das Lösen folgender Teilprobleme erreicht werden:

- Reduzierung der Auswirkungen der Schwindung
- Eliminierung der Schwindung

#### 7.3.4.2 Lösungsmöglichkeiten

Für Ansätze zur Kontrolle des Verzugs sei wieder auf BREITINGER (2001) verwiesen. Im folgenden werden Lösungsvorschläge zur Verringerung bzw. der Vermeidung von Schwindung durch den Infiltrationsprozess generiert und analysiert.

Die Schwindung wird im Prozessschritt Infiltrieren zum einen durch die Benetzung zwischen dem hochschmelzenden Material und dem niedrigschmelzenden Infiltrat verursacht. Eine gute Benetzung zwischen hoch- und niedrigschmelzender Komponente ist gleichzeitig Voraussetzung für die Infiltration.

Zum anderen ist die Schwindung Folge eines Nachversinterns des hochschmelzenden Materials. Das Nachversintern wird wiederum durch die Zeitdauer und die hohe Temperatur beim Infiltrationsprozess verursacht. Die Zeitdauer ist Voraussetzung für den kapillaren Materialtransport und bestimmt die mögliche Infiltrationshöhe. Die hohe Temperatur ist zum Schmelzen des Infiltrats erforderlich. Sie wird damit durch die Schmelztemperatur des Infiltrats festgelegt.

Wie beim Sintern ist eine Verbesserung der Genauigkeit über eine geeignete Parametereinstellung möglich. Dies beinhaltet Kompromisslösungen wie beispielsweise eine von der Höhe des Formeinsatzes abhängige Zeitdauer für die Infiltration. D. h. die Zeitdauer wird so berechnet, dass der Formeinsatz gerade noch vollständig infiltriert wird. Dadurch wird eine zu lange Zeitdauer beim Infiltrieren vermieden und damit ein unnötiges Nachversintern. Allerdings schwankt dann die Genauigkeit mit der Höhe des Formeinsatzes.

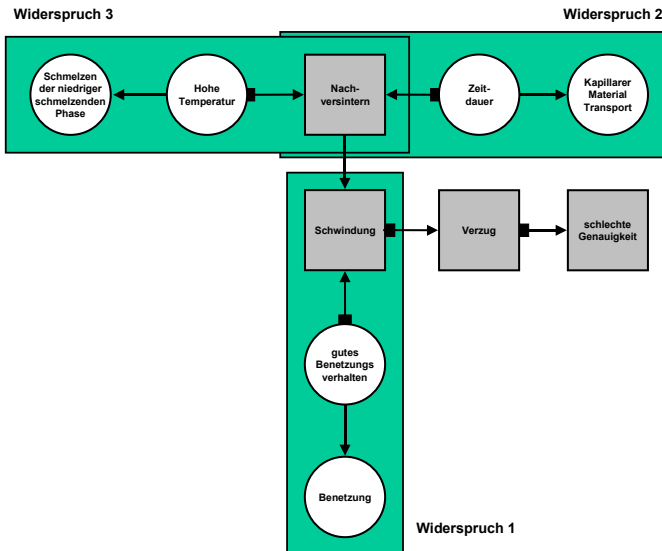


Abbildung 7-8: Wirkstruktur für die schlechte Genauigkeit beim Prozessschritt Infiltrieren

Daher soll im folgenden die Möglichkeit eines Eingriffs in das System untersucht werden. Ein lohnendes Ziel eines Eingriffs stellt die Auflösung von Widersprüchen dar. In der Wirkstruktur für die Infiltration sind drei Widersprüche zu erkennen:

- Das gute Benetzungsverhalten ist für die Benetzung des Braunlings mit dem Infiltrat notwendig, führt jedoch zur unerwünschten Schwindung.
- Die Zeitdauer ist für den kapillaren Materialtransport notwendig, führt jedoch zu einem Nachversintern.
- Die hohe Temperatur wird zum Schmelzen des Infiltrats benötigt, führt jedoch ebenfalls zu einem Nachversintern.

Der letzte Widerspruch kann aufgelöst werden, indem bei der Infiltration die Sintertemperatur der hochschmelzenden Phase soweit unterschritten wird, dass es am Braunling zu keinen thermisch bedingten Maßänderungen mehr kommen kann.

Einen Ansatz hierfür bietet die Verwendung eines höherschmelzenden Materials wie beispielsweise Wolfram zur Herstellung des Braunlings, um auf diese Weise die Sintertemperatur soweit zu erhöhen, dass sie bei der Infiltration nicht erreicht wird. Die Leistungsfähigkeit des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Ofens reicht jedoch nicht aus, um entsprechend hohe Sintertemperaturen zu erzeugen. Daher wurde diese Möglichkeit nicht weiterverfolgt.

Einen weiteren Ansatz zur Vermeidung der Sintertemperatur der hochschmelzenden Komponente findet sich bei HE U. A. (1999). Diese verwendeten unterschiedliche flüssige Polymere zur Infiltration von porösen Sinterkörpern, die dann durch eine chemische Reaktion wie Vernetzung (Epoxyharze) oder Kondensation (Phenolharze) aushärten. Diese chemischen Reaktionen finden unter 100°C statt. Dadurch kann eine Beeinflussung des Braunlings verhindert werden. Allerdings sind die genannten Infiltrationswerkstoffe nur bis zu einer Temperatur von bis zu 230°C beständig und stellen daher für einen Einsatz im Druckguss keine Lösung dar. Bei der Herstellung von Formeinsätzen für den Spritzguss sind jedoch Verbesserungen bei einer Übertragung dieser Technik in den indirekten Metall-Lasersinterprozess hinsichtlich der Genauigkeit vorstellbar.

Um die Temperatur während der Infiltration senken zu können und damit das Nachversintern zu verringern, wird daher die Verwendung eines im Vergleich zu Kupfer niedriger schmelzenden Infiltrats untersucht.

### **7.3.4.3 Ausarbeiten der Lösung**

Bei Verwendung eines anderen Infiltrats sind wieder die Ausgangsgrößen des Prozessschrittes „Infiltrieren“ zu beachten. Dies sind neben dem zu optimierenden Merkmal Genauigkeit, die Materialeigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit Härte und Zugfestigkeit. Durch die Wahl des Infiltrats werden alle Ausgangsgrößen direkt beeinflusst. Diese sind als Randbedingungen zu berücksichtigen und werden durch die Anforderungen des Werkzeug- und Formenbaus für den Druckguss festgelegt.

Anforderungen bestehen bei einem Einsatz im Werkzeug- und Formenbau vor allem an die Materialeigenschaften. Insbesondere die Anforderungen an die Temperaturbeständigkeit beim Druckguss lassen aus der in der detaillierten Analyse genannten Gruppe der Materialkombinationen neben den bereits ver

wendeten Stahl-Kupfer- die Stahl-Bronze-Kombinationen als geeignet erscheinen.

Bronze besitzt einen Schmelzbereich, der niedriger als der Schmelzpunkt von reinem Kupfer ist. So hat die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Bronze CuSn10 einen Schmelzbereich von etwa 830 °C bis 1010 °C während Kupfer einen Schmelzpunkt von etwa 1080 °C aufweist. Der Schmelzbereich der Bronze liegt damit auch noch ausreichend über den beim Druckguss auftretenden Temperaturspitzen von maximal 680 °C (G-AlSi12Cu1).

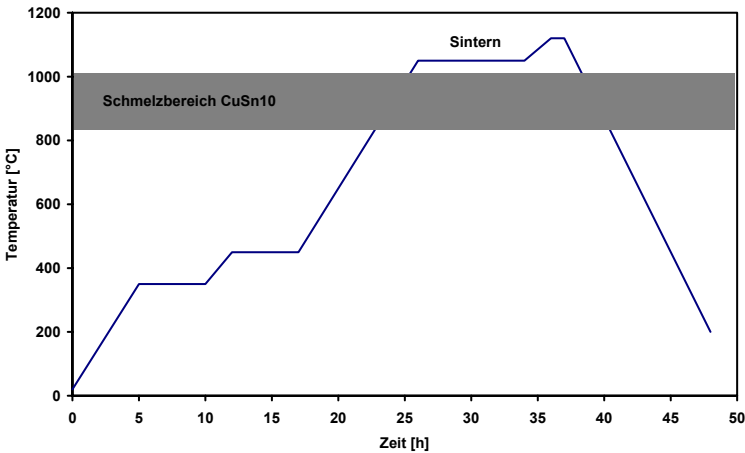


Abbildung 7-9: Für die Infiltration mit niedrigschmelzenden Komponenten ungeeigneter Temperaturzyklus

Betrachtet man den in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Temperaturzyklus (vgl. Abbildung 7-9), so zeigt sich, dass dieser zur Infiltration mit einer Komponente, deren Schmelzpunkt unterhalb der Sintertemperatur der hochschmelzenden Komponente liegt, ungeeignet ist. Denn noch bevor die Sintertemperatur erreicht wird und ein Stoffzusammenhalt erzeugt werden kann, schmilzt die niedrigschmelzende Komponente auf und die Infiltration beginnt.

Daher ist der Temperaturzyklus in zwei Einzelzyklen aufzuteilen. Im ersten findet das Ausbrennen des Binders und das Sintern statt. Die Schmelztemperatur des Infiltrats muss nicht berücksichtigt werden. Im zweiten Zyklus findet dann

die Infiltration statt. Hier sollte wiederum die Sintertemperatur nicht mehr erreicht werden.

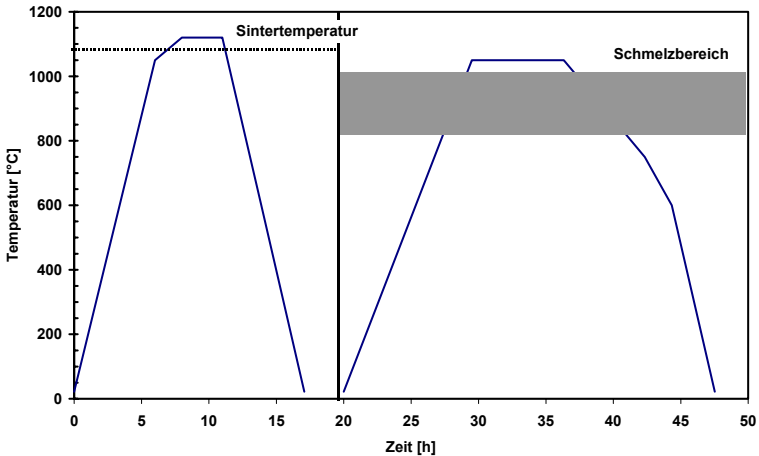


Abbildung 7-10: Temperaturzyklus für die Infiltration mit niedrigerschmelzenden Komponenten

### 7.3.4.4 Analyse der Lösung

Die experimentelle Bestimmung der Auswirkungen auf die Zielgröße Genauigkeit bei einer Umstellung des Infiltrationswerkstoffs wurde durch die Infiltration der aus dem Sinterexperiment resultierenden Braunlinge (Edelstahl 316 und kohlenstoffarmer Stahl 1080) mit jeweils Kupfer (Cu) und Zinnbronze (CuSn10) bestimmt. Die Infiltrationstemperatur beträgt bei Kupfer 1120 °C und bei der Bronze 1050 °C. Für beide Infiltrationsmaterialien wurde die gleiche Heizrate gewählt.

In Abbildung 7-11 ist zu erkennen, dass bei der Infiltration mit Kupfer aufgrund des hohen Schmelzpunktes die Haltetemperatur über der Sintertemperatur des Stahls (1080 °C) liegt, was zu einem Nachversintern führt. Die Bronze hat einen niedrigeren Schmelzbereich, so dass beim Infiltrieren die Sintertemperatur nicht erreicht werden muss.

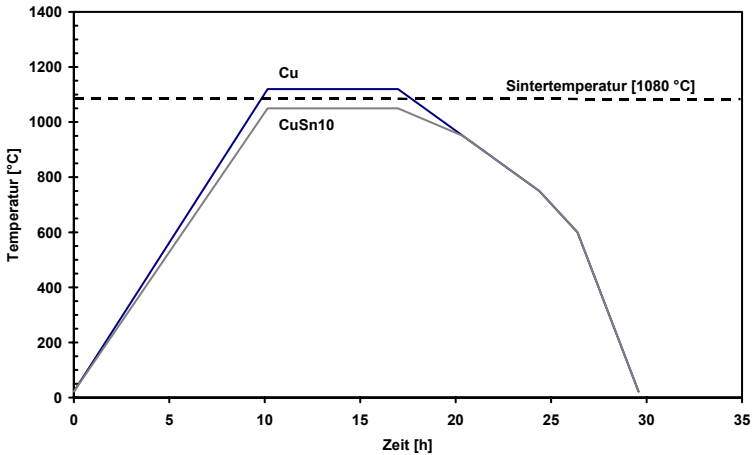


Abbildung 7-11: Temperaturverläufe für die Infiltration mit Cu und CuSn10

Gemessen wurden die Braunlinge und anschließend die infiltrierten Versuchskörper, so dass ausschließlich der Einfluss des Prozessschritts Infiltration erfasst wurde. Hinsichtlich der Schwindung und des Merkmals Genauigkeit ergaben sich für den Prozessschritt Infiltrieren die in Tabelle 7-6 und Tabelle 7-7 gezeigten Ergebnisse.

Material/Infiltrat	Temperatur [°C]	Schwindung [%]	Korrelation	$\sigma$
Kohlenstoffarmer Stahl 1080/ E-Cu	1120	1,15	-0,99	0,08
Kohlenstoffarmer Stahl 1080/ CuSn10	1050	- 0,1	0,42	0,04
Edelstahl 316/ E-Cu	1120	0,24	-0,92	0,05
Edelstahl 316/ CuSn10	1050	- 0,04	0,98	0,06

Tabelle 7-6: Schwindungen bei der Verwendung unterschiedlicher Infiltrationsmaterialien

Material/Infiltrat	Temperatur [°C]	Genauigkeit [%]	$\sigma$
Kohlenstoffarmer Stahl 1080/ E-Cu	1120	0,13	0,06
Kohlenstoffarmer Stahl 1080/ CuSn10	1050	0,05	0,005
Edelstahl 316/ E-Cu	1120	0,11	0,04
Edelstahl 316/ CuSn10	1050	0,06	0,007

Tabelle 7-7: Genauigkeiten bei der Verwendung unterschiedlicher Infiltrationsmaterialien

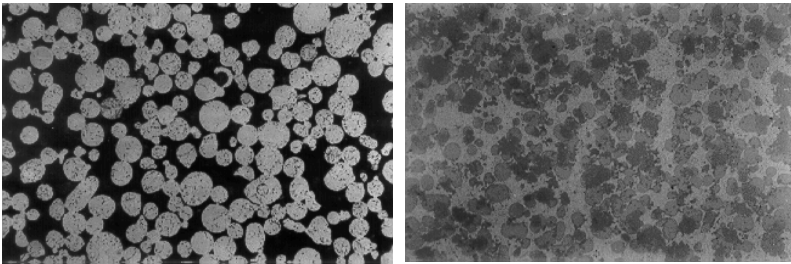
Es zeigt sich, dass bei der Verwendung sowohl von kohlenstoffarmen Stahl, als auch von Edelstahl durch das Infiltrationsmaterial Bronze eine signifikante Verminderung der Schwindung und damit eine Genauigkeitsverbesserung erreicht werden konnte. Allerdings kann diese Genauigkeitsverbesserung nicht ausschließlich auf die Verringerung der Infiltrationstemperatur zurückgeführt werden. Neben der geringeren Schmelztemperatur weist die Bronze bei der Infiltration auch ein im Vergleich zu Kupfer höheres Schwellverhalten auf. Beide Effekte, das geringere Schwinden aufgrund der niedrigeren Infiltrationstemperatur und das höhere Schwellverhalten, überlagern sich, können jedoch im Experiment nicht getrennt erfasst werden.

Neben dem zu optimierenden Merkmal Genauigkeit ist noch die Ausprägung der anderen Ausgangsgrößen von Interesse. Bis auf das Merkmal Zeit sind beim Prozessschritt Infiltrieren alle Ausgangsgrößen materialabhängig. Zur Übersicht sind die Ausprägungen der Produktmerkmale Wärmeleitfähigkeit, Härte und Zugfestigkeit der beiden Materialkombinationen Stahl-Kupfer und Stahl-Bronze in Tabelle 7-8 aufgelistet.

	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Härte [HRC]	Zugfestigkeit [MPa]
Kohlenstoffarmer Stahl 1080/ E-Cu	185	164	475
Edelstahl 316/CuSn10	23	228	580

Tabelle 7-8: Materialeigenschaften bei der Verwendung unterschiedlicher Infiltrationswerkstoffe

Die Materialeigenschaften ergeben sich nicht direkt aus den Eigenschaften der Basismaterialien und deren Anteilen im resultierenden Bauteil. Während Kupfer und kohlenstoffarmer Stahl kaum Verbindungen miteinander eingehen, entstehen zwischen dem Edelstahl und der Bronze intermetallische Verbindungen. Dies ist in Abbildung 7-12 zu erkennen. Verglichen mit den runden Partikeln mit glatten Konturen der hochschmelzenden Phase des Edelstahls (316) im Braunlingsstadium, zeigen sich die Konturen nach der Infiltration mit Bronze aufgelöst.



*Abbildung 7-12: Edelstahlpartikel (316) vor (links) und nach der Infiltration (rechts). Vergrößerung jeweils: 200x*

Dies hat Auswirkungen auf die Zugfestigkeit der gesamten Komponente. Beim kupferinfiltrierten Körpern findet das Versagen lediglich in der Kupferphase und an den Verbindungsstellen zwischen den Partikeln der hochschmelzenden Komponente statt. Somit spielt bei dieser Kombination der Sintergrad eine wichtige Rolle. Die Eisenpartikel selbst tragen zur Festigkeit des Bauteils nichts bei. Hingegen beschränkt sich das Versagen des Bauteils bei der Infiltration mit Bronze nicht auf die infiltrierte Phase. Die globulare Eisenphase wird mit einbezogen (vgl. hierzu auch BREITINGER 2001).

Zusammenfassend sind aus den Untersuchungen zum Einfluss des Infiltrationsmaterials auf die Ausgangsgrößen folgende Aussagen zu treffen:

- Die Verwendung eines niedriger schmelzenden Infiltrationsmaterials vermindert die Schwindung während der Infiltration und verbessert dadurch die Genauigkeit. Hierzu ist die Verwendung einer neuen Prozessführung beim Ofenprozess notwendig.



- Das Infiltrationsmaterial beeinflusst zusammen mit der hochschmelzenden Komponente die Materialeigenschaften des resultierenden Bauteils maßgeblich.
- Auf Grundlage der in der differenzierten Analyse erarbeiteten Zusammenhänge lassen sich die wichtigen Zusammenhänge und Randbedingungen zur gezielten Auswahl eines Infiltrationsmaterials erfassen. Jedoch können nur Tendenzen dargestellt werden. Die Abhängigkeit der Produktmerkmale von den Materialeigenschaften des Infiltrats und des Braunlings entzieht sich sowohl einer rechnerischen Erfassung, als auch der Simulation.

## 7.4 Zusammenfassung

Ziel des letzten Schrittes des Optimierungszyklusses ist es, Lösungen zu finden, die Verbesserungen hinsichtlich der Optimierungsschwerpunkte bewirken, in diesem Fall der Genauigkeit.

Zur Verbesserung der Genauigkeit wurden die im folgenden dargestellten Maßnahmen vorgeschlagen (vgl. Abbildung 7-13):

Prozessschritt	Beschriebene Maßnahmen	Verwendet
<b>SLS</b>	• Rechnergestützte Anpassung der Energieeinbringung	
	• Segmentierte Belichtung	
	• Verringern der Partikelgröße	
	• Verringern der Schichtdicke	
<b>Ausbrennen</b>	• Beimischen des Binders	✓
<b>Sintern</b>	• Verkürzen der Haltezeit	✓
<b>Infiltrieren</b>	• Senken der Infiltrationstemperatur durch Verwendung eines niedrigerschmelzenden Infiltrats	✓

Abbildung 7-13: Auflistung der Maßnahmen zur Verbesserung der Genauigkeit des indirekten Metall-Lasersinterprozesses

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Auswirkungen der verwendeten Maßnahmen hinsichtlich der Genauigkeitsverbesserung des Gesamtprozesses einmal mit kohlenstoffarmen Stahl und einmal mit Edelstahl als hochschmelzender Komponente. Ausgegangen wird jeweils von den Genauigkeitswerten der in Kap. 2.2.2 beschriebenen Version des indirekten Metall-Lasersinterprozesses.

Dargestellt ist die prozentuale Verbesserung der Genauigkeit, die mit der jeweiligen Maßnahme erreicht wird, bezogen auf den Gesamtprozess. Grundlage bildet also die Maßabweichung des jeweils resultierenden Testbauteils vom skalierten CAD-Modell.

Hinsichtlich der Wirksamkeit der Maßnahmen lässt sich dabei folgendes festhalten:

- Nachhaltige Verbesserungen werden durch die Verwendung des neuen Bindersystems erreicht. Zum einen wird durch die Beimischung des Binders die Verschiebung der Partikel vermieden. Zum anderen erübrigt sich bei dem neuen Bindersystem die Polymerinfiltration, die wie erwähnt ebenfalls ein hohes Maß an Ungenauigkeit verursacht.
- Bezogen auf den Gesamtprozess führt die verkürzte Haltezeit beim Sintern als reine Parameteränderung nur zu geringen Verbesserungen.
- Ebenfalls nachhaltige Verbesserungen werden durch die niedrige Infiltrationstemperatur erreicht, was außerdem einen Wechsel des Infiltrationsmaterials sowie eine Unterteilung des Ofenprozesses erforderlich macht.

Insgesamt erreicht man bei der Durchführung aller drei Optimierungsmaßnahmen eine Verbesserung von etwa 68% im Vergleich zum Ausgangsprozess bei Verwendung des kohlenstoffarmen Stahls als hochschmelzender Komponente. Die Genauigkeit beträgt bei dieser Variante 0,32%.

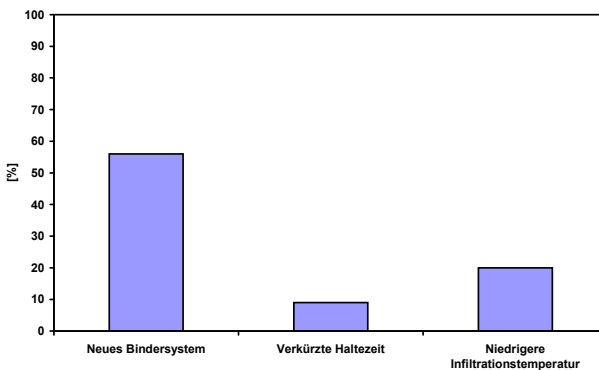


Abbildung 7-14: Prozentuale Verbesserung der Genauigkeit des IMLS nach der Durchführung von Optimierungsmaßnahmen bei kohlenstoffarmen Stahl (1080)

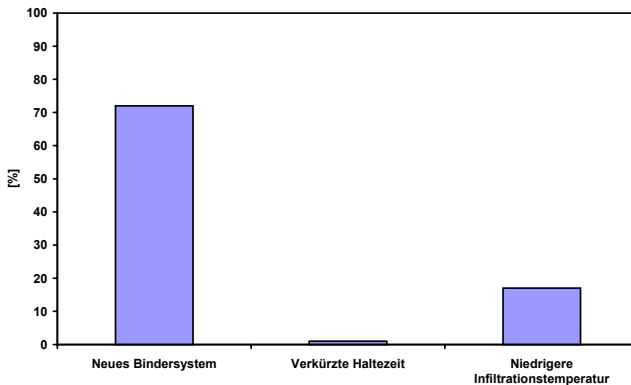


Abbildung 7-15: Prozentuale Verbesserung der Genauigkeit des IMLS nach der Durchführung von Optimierungsmaßnahmen bei Edelstahl (316)

Wird der Edelstahl als hochschmelzende Komponente verwendet, beträgt die Verbesserung insgesamt 76%. Die Genauigkeit beträgt dann 0,24%.

Neben den Auswirkungen der Prozessoptimierung auf die Genauigkeit sind die Auswirkungen auf die anderen Produktmerkmale zu berücksichtigen. Die Auswirkungen einzelner Maßnahmen wurde bereits in den jeweiligen Abschnitten behandelt. In den folgenden Abbildungen ist dargestellt, wie sich die gesamte Prozessoptimierung, repräsentiert durch den insgesamt besten Gesamtprozess (Edelstahl 316, infiltriert mit Bronze (CuSn10) und verkürzter Haltezeit), auf alle technischen Produktmerkmale sowie auf das Merkmal Zeit auswirkt. Verglichen wird mit dem Ausgangsprozess (vgl. Kap. 6.1).

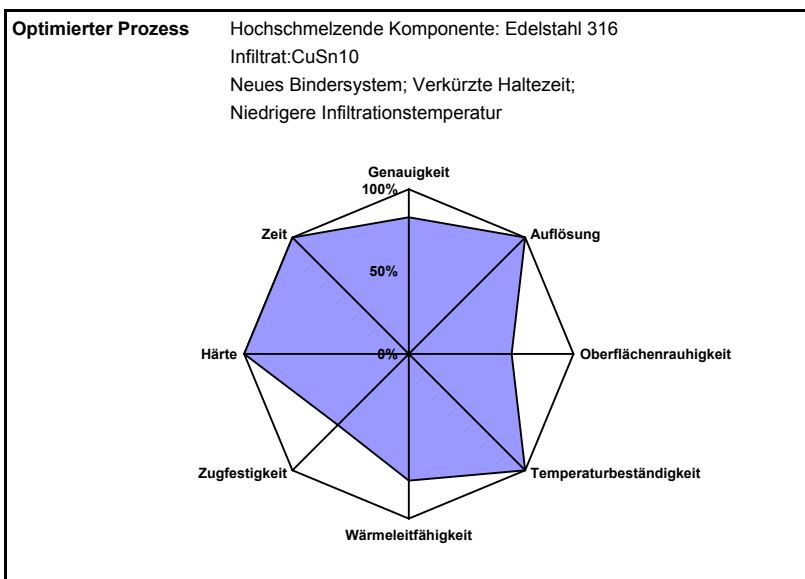
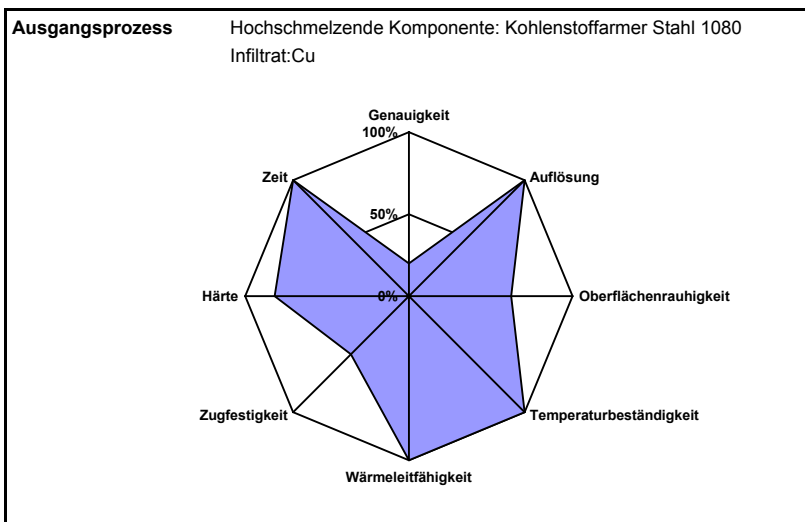


Abbildung 7-16: Erfüllungsgrad der Merkmalsausprägungen vor und nach der Prozessoptimierung

Es zeigt sich, dass sich neben der Genauigkeit auch die Merkmale Härte und Zugfestigkeit verbessert haben. Bei der Zeit, der Auflösung und der Oberflächenrauigkeit ergeben sich keine nennenswerten Änderungen. Einzig bei dem Merkmal Wärmeleitfähigkeit kommt es zu einer Verschlechterung, der sich auf die prinzipielle Funktion des Formeinsatzes jedoch nicht negativ auswirkt (vgl. hierzu das folgende Kapitel).

Hinsichtlich der Vorgehensweise kann zusammenfassend folgendes festgehalten werden:

- Der betrachtete Lösungsraum reicht von einer einfachen Parametervariation wie die Änderung der Haltezeit beim Sintern bis zur Änderungen des Materialsystems, was einen Eingriff in das System durch Änderungen des Verfahrensablaufs notwendig machte.
- Die Änderungen konnten gezielt durch Lösen der aufgestellten Teilprobleme und Nutzung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge erarbeitet werden.
- Die quantitative Auswirkung einer Verbesserung lässt sich erst nach der Anwendung ermitteln.

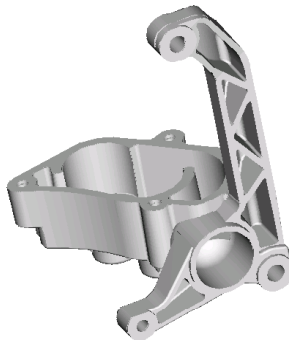
Insgesamt zeigt sich, dass durch die Anwendung der vorgestellten Methode nachhaltige Verbesserungen erreicht werden können.



## 8 Anwendungsbeispiel

Der modifizierte Prozess wird in diesem Kapitel anhand eines Anwendungsbeispiels überprüft. Während die Auswirkungen der Modifikationen auf direkt messbare Produktmerkmale bereits bei der Analyse der Lösungen verifiziert wurden, liegt der Schwerpunkt dieses Kapitels auf der Erfassung wirtschaftlicher Kriterien. Die Ausprägung dieser Kriterien kann allerdings nicht verallgemeinert werden, sondern ist in engem Zusammenhang mit dem vorgestellten Anwendungsfall zu sehen.

Als Anwendungsbeispiel wird die Herstellung eines Formeinsatzes für das Druckgusswerkzeug eines Ölpumpengehäuses aus Magnesium mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess betrachtet.



*Abbildung 8-1: CAD-Modell des Ölpumpengehäuses*

Ausgangsbasis war das aus der Bauteilgeometrie abgeleitete 3D-CAD-Modell des Formeinsatzes. Die Abmessungen betragen 185 x 150 x 130 mm.

Als hochschmelzender Werkstoff wurde das im vorigen Kapitel beschriebene Edelstahlpulver (316) mit einer Korngröße von 30  $\mu\text{m}$  verwendet. Dem Edelstahlpulver war ein PMMA-Binder mit einem vernetzenden Duroplasten zugegeben. Infiltriert wurde mit Bronze (CuSn10).

Im selektiven Lasersinterprozess wurde mit den gleichen Parametern gearbeitet, die auch für die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Versuche verwendet

wurden. Für das Ausbrennen des Binders und das Sintern kam der in Abschnitt 7.3.3 vorgestellte Temperaturzyklus mit einer maximalen Temperatur von 1120 °C und einer Haltezeit von 3 Stunden zur Anwendung, für das Infiltrieren der in Abschnitt 7.3.4 beschriebene Temperaturzyklus mit 1050 °C als maximaler Temperatur und einer Haltezeit von 7 Stunden.



*Abbildung 8-2: Resultierender Formeinsatz*

### 8.1 Genauigkeit

Die größten Abweichungen von den Sollmaßen betragen 0,3% und liegen damit über den bei den Versuchsbauteilen gemessenen 0,24%. Dies ist zum einen auf die ungleichmäßigere Verteilung der Formelemente zurückzuführen. Bei gleicher Schwindung entstehen dabei innerhalb des Bauteils höhere Verzüge. Zum anderen wurde die Genauigkeit anders gemessen. Bei den Versuchsbauteilen wurde kein Skalierungsfaktor verwendet. Die Genauigkeit ergab sich damit als Abweichung von der durchschnittlichen Schwindung. Hingegen wurde bei der Herstellung des Formeinsatzes mit den erarbeiteten Skalierungsfaktoren gearbeitet. Die Genauigkeit ergibt sich damit direkt aus der Abweichung von Ist- und Sollmaß. Jedoch stellt auch diese Genauigkeit eine signifikante Verbesserung gegenüber dem Ausgangsprozess dar und liegt nahe an dem für den Druckguss gut geeigneten Bereich.



## 8.2 Herstellungszeit

Die Herstellungszeit für den Formeinsatz ergibt sich aus der Zeit, die für den indirekten Metall-Lasersinterprozess benötigt wird und der Zeit für die Nachbearbeitung. Für die Prozessschritte des indirekten Metall-Lasersinterprozesses ergaben sich folgende Zeiten:

Prozessschritt	Zeit [h]
Selektives Lasersintern	48,5
Ausbrennen des Binders, Sintern	26
Infiltrieren	27,5
Sonstiges (Prozessvorbereitung etc.)	4
<b>Gesamt</b>	<b>106</b>

*Tabelle 8-1: Zeiten für Prozessschritte: indirekter Metall-Lasersinterprozess*

Bis auf die Arbeitsvorbereitung, die Vorbereitung der Lasersinteranlage und des Tiegels (Sonstiges) laufen alle Prozessschritte weitgehend mannos ab.

Anschließend muss der Formeinsatz noch nachbearbeitet werden. Erforderlich ist eine spanende Bearbeitung der Trenflächen sowie aller Außenflächen um eine Aufnahme in den Formrahmen und ein sicheres Schließen des Werkzeugs zu gewährleisten. Zusätzlich ist der Formeinsatz zu polieren, damit das Bauteil sicher entformt werden kann. Dies ist bei Kernen wichtiger als bei Außenflächen, da das Bauteil beim Abkühlen auf Kerne aufschumpft. Insgesamt ergibt sich folgender Nachbearbeitungsaufwand:

Prozessschritt	Zeit [h]
Spanende Bearbeitung	8
Polieren	12
Messen	2
Sonstiges	2
<b>Gesamt</b>	<b>24</b>

*Tabelle 8-2: Zeiten für Prozessschritte (Nachbearbeitung)*

Es zeigt sich, dass der wesentliche Anteil des Nachbearbeitungsaufwandes auf das Polieren entfällt.

Insgesamt konnte der Formeinsatz ausgehend von der Freigabe der 3D-CAD-Daten innerhalb von fünf Tagen hergestellt werden. Aufgrund des weitgehend manuellen Betriebs müssen diese Tage nicht unbedingt Arbeitstage sein. Nach weiteren drei Arbeitstagen war es möglich, den Formeinsatz in das Werkzeug einzubauen.

Mit der im Stand der Technik beschriebenen Version des indirekten Metall-Lasersinterprozesses (vgl. Kap. 2.2.2) werden für die Herstellung des beschriebenen Formeinsatzes insgesamt 6 Stunden weniger benötigt. Diese ergeben sich aus fünf Stunden, die für die Durchführung des einzelnen Ofenzyklus weniger benötigt werden, als für die Durchführung der beiden getrennten Ofenzyklen. Hinzu kommt eine Stunde, die bei der Prozessvorbereitung eingespart wird, da der Tiegel nur für einen einzigen Ofenprozess präpariert werden muss. Der Prozessschritt „selektives Lasersintern“ benötigt bei beiden Varianten des indirekten Metall-Lasersinterprozesses etwa gleich viel Zeit.

Jedoch liegt die Genauigkeit bei der im Stand der Technik beschriebenen Version des indirekten Metall-Lasersinterprozesses wie beschrieben mit etwa 1% deutlich außerhalb der Anforderungen. Daher ist ein Vergleich der Herstellungszeit zwischen den beiden Versionen des indirekten Metall-Lasersinterprozesses nicht sinnvoll.

Vielmehr muss ein Zeitvergleich der optimierten Variante des indirekten Metall-Lasersinterprozesses mit den abtragenden Verfahren stattfinden, die die Referenz bei der Herstellung von Formeinsätzen für den Leichtmetall-Druckguss bilden.

Um einen Vergleich gegenüber einer Herstellung des Formeinsatzes mit abtragenden Verfahren zu erhalten, wurde von einem Dienstleister für die schnelle Herstellung von Werkzeugen eine entsprechende Zeitkalkulation erstellt. Es wurde davon ausgegangen, dass Teile der Kontur erodiert werden müssen. Somit beinhaltet die Arbeitsvorbereitung neben der Erstellung des Fräsprogramms für Teile der Kontur auch das Ableiten der Elektrodengeometrie und das Erstellen des Fräsprogramms für die Elektroden. Insgesamt ergab sich folgende Kalkulation für eine konventionelle Herstellung der Formeinsätze:

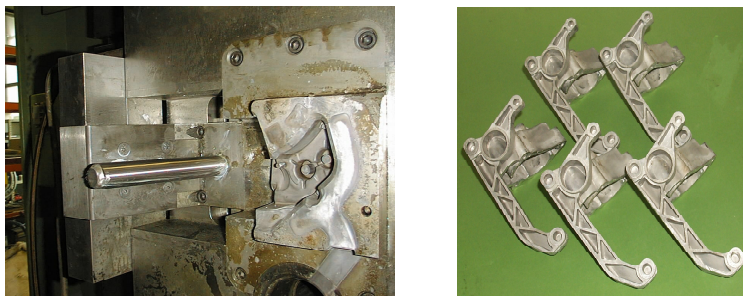
Prozessschritt	Zeit [h]
Ableiten der Elektrodengeometrie	3,6
Erstellen des Fräsprogramms für die Elektroden	4,8
Erstellen des Fräsprogramms für den Formeinsatz	16
Vorfräsen des Rohmaterials	5
Fräsen (HSC) der Kontur	16,6
Fräsen (HSC) der Elektroden	5
Erodieren	10
Polieren	7
Rüsten (insgesamt)	6
<b>Gesamt</b>	<b>74</b>

*Tabelle 8-3: Zeiten für Prozessschritte (konventionelle Fertigung)*

Insgesamt ergibt sich eine Zeit von 74 Stunden im Vergleich zu 130 Stunden beim indirekten Metall-Lasersinterprozess. Die daraus resultierende Herstellungszeit ist allerdings nur schwierig zu beurteilen. Zum einen gibt es eine Reihe von Vorgängen, die prinzipiell parallel ablaufen können wie das Erstellen der Fräsprogramme für Formeinsatz und Elektroden oder Fräsen der Kontur und der Elektroden. Dies ist abhängig von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Anlagen und Lizenzen für Programme. Zum anderen kann jedoch bis auf das Erodieren keiner der Vorgänge mannlos ablaufen, so dass nur Arbeitstage genutzt werden können. Wird von einer linearen Verkettung der Arbeitsvorgänge und einem Einschichtbetrieb ausgegangen, so kann der Formeinsatz innerhalb von 9 Arbeitstagen fertiggestellt werden. Somit können bei einem Formeinsatz dieser Komplexität durch den Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterprozesses etwa zwei bis drei Tage eingespart werden. Dieser Zeitvorteil des indirekten Metall-Lasersinterprozesses erhöht sich bei höherer Komplexität.

### 8.3 Standmenge

Die Bewertung der Standmenge des lasergesinterten Formeinsatzes erfolgte durch eine Bemusterung mit der Magnesiumlegierung AZ91. Insgesamt wurden mit dem Formeinsatz 100 Teile hergestellt.



*Abbildung 8-3: Formeinsatz während des Druckgießens und resultierende Kleinserie*

Die Gussteile wiesen eine hinreichende Oberflächenqualität auf und zeigten im Röntgenbild keine nennenswerten Porositäten. Der Formeinsatz selbst zeigte keinerlei Verschleißerscheinungen wie Brandrisse. In weiteren Projekten zeigte sich, dass eine Stückzahl bis zu 500 Teilen in Magnesium zuverlässig erreicht werden kann. Die maximal erreichbare Standmenge hängt von zahlreichen weiteren Faktoren ab wie Größe der Formelemente oder Vermeidung von hohen Temperaturschwankungen während des Druckgießprozesses.

Beim Einsatz im Aluminiumdruckguss (Aluminiumlegierung  $AlSi12Cu3$ ) konnten mit der vorgestellten Materialkombination nur Standmengen bis zu etwa 300 Bauteilen erreicht werden. Hingegen wurden mit kupferinfiltrierten Formeinsätzen bis zu 1000 Bauteile aus Aluminium gegossen (vgl. BREITINGER 2001; S. 120). Aufgrund der um den Faktor sechs höheren Wärmeleitfähigkeit kupferinfiltrierter Formeinsätze und der damit besseren Ableitung der durch die Aluminiumschmelze eingebrachten Wärmemenge treten Wärmerisse zu einem sehr viel späteren Zeitpunkt auf. Jedoch ist die Genauigkeit wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben signifikant schlechter.

### 8.4 Kosten

Die Kosten, die bei der Herstellung des Formeinsatzes mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess entstehen, können über die Fertigungskosten erfasst werden. Die Fertigungskosten ergeben sich aus den Betriebsmittelkosten, den Personal- und den Materialkosten. Die entstehenden Kosten sind in der nachfolgenden

Tabelle dargestellt. Die angenommenen Stundensätze für die Anlagen können allerdings von Dienstleister zu Dienstleister schwanken.

Kostenart	Satz	Menge	Kosten [DM]
Materialkosten Stahlpulver	121 DM/kg	13 kg	1573,00
Materialkosten Bronze (CuSn10)	91,87 DM/kg	8 kg	734,96
SLS-Anlage	165 DM/h	48,5 h	8002,50
Ofenprozess I	30,61 DM/h	26 h	795,86
Ofenprozess II	30,61 DM/h	27,5 h	841,76
Polieren	75 DM/h	12 h	900
HSC-Fräsen	120 DM/h	8 h	960
Sonstiges	80 DM/h	6 h	480
<b>Gesamtkosten</b>			<b>14288,08</b>

*Tabelle 8-4: Kosten für die Herstellung des Formeinsatzes mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess*

Bei den Kosten ist ebenso wie bei der Herstellungszeit ein Vergleich mit der im Stand der Technik beschriebenen Version des indirekten Metall-Lasersinterprozesses nicht sinnvoll, da dieser die im Werkzeug- und Formenbau geforderten Qualitätskriterien nicht erfüllt.

Um einen Vergleich mit der konventionellen Herstellung des Formeinsatzes zu erhalten, wurde wieder die entsprechende Kalkulation des Dienstleisters für den beschriebenen Formeinsatz verwendet. Diese Kalkulation enthält wie die Kostenaufstellung für den Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterprozesses Gemeinkosten (Tabelle 8-5).

Es zeigt sich, dass die konventionelle Fertigung für dieses Anwendungsbeispiel um fast 20% geringere Kosten verursacht, als die Fertigung mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess. Es ist im Einzelfall zu beurteilen, ob der Zeitvorteil von einer halben Woche diese Mehrkosten der generativen Fertigung rechtfertigt. Bei Formeinsätzen höherer Komplexität verringert sich der Kostennachteil der generativen Verfahren. Gleichzeitig erhöht sich wie beschrieben der Zeitvorteil.

Kostenart	Satz	Menge	Kosten [DM]
Materialkosten Stahl (2767)		30 kg	575,00
Materialkosten Elektroden (Graphit)			450,00
Fräswerkzeuge			300,00
Ableiten der Elektrodengeometrie	195 DM/h	3,6 h	702,00
Erstellen des Fräsprogramms für die Elektroden	195 DM/h	4,8 h	936,00
Erstellen des Fräsprogramms für den Formeinsatz	195 DM/h	16 h	3120,00
Vorfräsen des Rohmaterials (CNC)	320 DM/h	5 h	1600,00
Fräsen der Kontur (HSC)	120 DM/h	16,6 h	1992,00
Fräsen der Elektroden (HSC)	120 DM/h	5 h	600,00
Rüsten	120 DM/h	6 h	720,00
Polieren	75 DM/h	7 h	525,00
Erodieren	40 DM/h	10 h	400,00
<b>Gesamtkosten</b>			<b>11920,00</b>

*Tabelle 8-5: Kosten für die Herstellung des Formeinsatzes mit konventioneller Fertigung*

## 8.5 Zusammenfassung

Die Genauigkeit des modifizierten Prozesses erweist sich für den Druckguss als ausreichend. Weitere Verbesserung könnten jedoch helfen, den Nachbearbeitungsaufwand weiter zu reduzieren. Die Standmenge der vorgestellten Materialkombination genügt für den Magnesiumdruckguss. Im Aluminiumdruckguss bewegt man sich damit an der Grenze der Wirtschaftlichkeit.

Die Herstellungszeit scheint ausreichend kurz, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass auch weit komplexere Formeinsätze derselben Größe keine wesentlich länger Fertigungszeit benötigen.

Hinsichtlich der Kosten ist im Einzelfall abzuwägen, ob sich der Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterprozesses lohnt. Als Faustregel kann gelten, dass ein Einsatz um so sinnvoller ist, je komplexer der Formeinsatz ist. Der indirekte Metall-Lasersinterprozess zeigt sich damit für den Einsatzbereich Kleinserien- und Prototypenwerkzeuge insgesamt als konkurrenzfähig.

## 9 Zusammenfassung

Ziel der Arbeit ist die Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses, um damit eine schnelle Herstellung von komplexen Formeinsätzen für den Leichtmetall-Druckguss zu ermöglichen.

Der indirekte Metall-Lasersinterprozess gehört zu der Gruppe der generativen Verfahren. Generative Verfahren erzeugen Bauteile durch das Aufeinanderfügen von Materialschichten mit konstanter Dicke. Dadurch sind sie hinsichtlich Zeit- und Kostenaufwand weitgehend unabhängig von der Komplexität der zu fertigenden Geometrie.

Diese Vorteile können im Werkzeug- und Formenbau genutzt werden, der sich einer zunehmenden Forderung nach immer kürzeren Fertigungszeiten für Werkzeuge gegenüber sieht. Der Einsatz generativer Verfahren ist vor allem bei der Herstellung von sehr komplexen Formeinsätzen sinnvoll, wie sie vor allem bei Spritz- und Druckgießwerkzeugen auftreten.

Während generativ hergestellte Formeinsätze im Spritzguss bereits mit Erfolg eingesetzt werden, gibt es hinsichtlich der Anwendung im Druckguss noch eine große Diskrepanz zwischen dem hohen Potential hinsichtlich Einsparung von Zeit und Kosten einerseits und der tatsächlichen industriellen Anwendung andererseits. Dies ist auf die hohen thermo-mechanischen Beanspruchungen zurückzuführen, denen Formeinsätze im Druckguss ausgesetzt sind. Da die meisten generativen Verfahren ausschließlich Kunststoffe verarbeiten, sind sie für dieses Einsatzgebiet ungeeignet. Hingegen ist es mit dem indirekten Metall-Lasersinterprozess möglich, Formeinsätze zu erzeugen, die den beim Druckguss auftretenden Belastungen standhalten. Jedoch verhindern Qualitätsmängel eine nachhaltige Nutzung der Vorteile dieses Prozesses für den Werkzeug- und Formenbau.

Da der indirekte Metall-Lasersinterprozess erst seit 1996 verfügbar ist, gibt es bisher nur wenige Ansätze für eine Verbesserung. Die vorhandenen Ansätze beschränken sich auf Verbesserungen innerhalb des Rahmens, der durch die kommerziell erhältliche Variante des indirekten Metall-Lasersinterprozesses vorgegeben ist.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Verbesserungsmöglichkeiten erarbeitet werden, bei denen auch Eingriffe in das vorhandene System des indirekten Metall-

Lasersinterprozesses berücksichtigt werden, um so nachhaltigere Verbesserungen zu erzielen.

Die aus dem Qualitätsmanagement bekannten Methoden wie beispielsweise die statistische Versuchsmethodik sind hierfür ungeeignet, da nur die Entwicklung von Verbesserungen innerhalb bestehender Systemstrukturen des zu optimierenden Prozesses unterstützt wird, wie beispielsweise das Finden eines geeigneten Parametersatzes.

Daher wird ein auf der Problemlösungs- und Systemtheorie basierender Ansatz gewählt, der auch die Entwicklung von Verbesserungen durch Eingriffe in das bestehende System unterstützt. Dieser Ansatz besteht aus den Schritten Situationsanalyse mit der Analyse der Prozesskette als wesentlichem Inhalt, Modellierung, Festlegung der Optimierungsschwerpunkte und der abschließenden Lösung des Optimierungsproblems.

Im ersten Schritt werden zum einen die Anforderungen an eine Lösung erarbeitet. Diese ergeben sich aus dem Anwendungsgebiet Druckgießen. Zum anderen wird das Problemfeld, in diesem Fall der indirekte Metall-Lasersinterprozess, strukturiert. Es zeigt sich, dass der indirekte Metall-Lasersinterprozess, weitgehend unabhängig vom Verfahrensablauf, in die Prozessschritte selektiver Lasersinterprozess, Ausbrennen des Binders, Versintern und Infiltrieren unterteilt werden kann. Für jeden dieser Prozessschritte werden in der differenzierten Analyse die prozessinternen Zusammenhänge erarbeitet.

Durch die Modellierung sollen die Zusammenhänge innerhalb der einzelnen Prozessschritte des indirekten Metall-Lasersinterprozesses abgebildet werden. Als geeignete Modellierungsmethode erweist sich für die Zielsetzung dieser Arbeit die primärfunktionsorientierte Ursache-Wirkungsmodellierung. Durch die Darstellung der einzelnen Prozessschritte mit Hilfe der entsprechenden Diagramme soll eine Identifizierung der wirksamen Stellhebel des Gesamtprozesses ermöglicht werden.

Um die primär zu lösenden Mängel zu identifizieren, wird im Schritt „Festlegung der Optimierungsschwerpunkte“ der momentane Erfüllungsgrad der einzelnen Zielgrößen erfasst. Als wichtigste zu verbessernde Zielgröße zeigt sich hierbei die Genauigkeit. Anschließend werden die primärfunktionsorientierten Ursache-Wirkungsdiagramme analysiert und in geeignete Wirkungsketten zerlegt. Ziel ist es, die Zusammenhänge zwischen dem zu behebbenden Mangel, in diesem Fall der schlechten Genauigkeit, und den zugehörigen Ursachen aufzuzeigen. Jede



Wirkungskette stellt dann ein Teilproblem dar, das es im nächsten Schritt zu lösen gilt.

Im letzten Schritt, der Lösung des Optimierungsproblems, werden für die einzelnen Prozessschritte unterschiedliche Möglichkeiten zur Verbesserung der Genauigkeit aufgezeigt.

Für den Prozessschritt „selektives Lasersintern“ kann auf eine Reihe von Lösungen zurückgegriffen werden, die zur Verbesserung der Genauigkeit beim Lasersintern von Kunststoff entwickelt wurden. Auch beim Ausbrennen des Binders ermöglicht die genaue Problemdefinition einen Rückgriff auf vorhandene Lösungen.

Für die Prozessschritte „Sintern“ und „Infiltrieren“ werden Möglichkeiten für neue Lösungsansätze erarbeitet, wobei die Verminderung der Schwindung schließlich als ein möglicher Ansatz weiterverfolgt wird. Für das Sintern wird eine Verminderung der Schwindung durch Verkürzung der Haltezeit erreicht. Eine Verbesserung der Genauigkeit kann nachgewiesen werden.

Hingegen erweist sich beim Prozessschritt Infiltrieren eine einfache Parameteränderung zur Verminderung der Schwindung als nicht möglich. Hier kann durch die Verwendung eines niedriger schmelzenden Infiltrats eine Verminderung der Schwindung durch die Verminderung der Temperatur beim Infiltrieren erreicht werden, um so ein Nachversintern und damit Schwinden zu verhindern. Es wird gezeigt, dass bei Verwendung des niedriger schmelzenden Infiltrats eine Beibehaltung des bisherigen Prozessablaufs, bei dem die drei Prozessschritte „Ausbrennen des Binders“, „Sintern“ und „Infiltrieren“ in einem einzigen Ofenprozess durchgeführt werden, nicht zielführend ist. Durch eine Aufspaltung des Ofenprozesses werden die Prozessschritte „Sintern“ und „Infiltrieren“ entkoppelt, was die Verwendung niedrig schmelzender Infiltrate erst möglich macht. Durch diese Prozessänderung können nachhaltige Verbesserungen bei der Genauigkeit erreicht werden. Eine Überprüfung der Auswirkungen der Prozessänderungen auf die anderen Ausgangsgrößen zeigt keine negativen Ergebnisse.

Anhand der Fertigung eines Formeinsatzes für den Magnesium-Druckguss wird der modifizierte Prozess hinsichtlich wirtschaftlicher Kriterien bewertet und teilweise mit einer konventionellen Fertigung verglichen. Es zeigt sich, dass der indirekte Metall-Lasersinterprozess durchaus konkurrenzfähig zu den konventionellen Fertigungsverfahren ist, ein Einsatz jedoch erst bei sehr komplexen Formeinsatzten Vorteile bringt.



## 10 Literatur

### 3D-SYSTEMS 2000

3D-Systems (Hrsg.): Neue Horizonte im schnellen Werkzeugbau. Darmstadt: April 2000.

### ABAY 1999

Abay, C.: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik. München: Herbert Utz 1999.

### ALMOND 1996

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

### ALTSCHULLER 1984

Erfinden – Wege zur Lösung technischer Probleme. Berlin: VEB 1984.

### BADRINARAYAN & BARLOW 1995

Badrinarayan, B.; Barlow, J. W.: Effect of Processing Parameters in SLS of Metal-Polymer Powders. In: Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings. Texas: 1995, S. 55-63.

### BARGEL & SCHULZE 1988

Bargel, H.-J.; Schulze, G.: Werkstoffkunde. Düsseldorf: VDI-Verlag 1988.

### BEAMAN U. A. 1997

Beaman, J.; Barlow, J., W.; Bourell, D.; Crawford, R.: Solid Freeform Fabrication. A New Direction in Rapid Manufacturing. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers 1997.

### BREITINGER & LORENZEN 1997

Breitinger, F.; Lorenzen, J.: Rapid Tooling – ein neuer Ansatz zur integrierten Produkt- und Prozeßentwicklung. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Tooling, Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt. München: Herbert Utz 1997.

BREITINGER 1997

Breitinger, F.: Indirektes Metall-Lasersintern. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Tooling – Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt. München: Herbert Utz 1997.

BREITINGER 2001

Breitinger, F.: Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns beim Druckgießen. München: Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften 2001. Vorabdruck zur Dissertation.

CARTER & JONES 1993

Carter, W.; Jones, M.: Direct Laser Sintering of Metals. In: Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings. Texas: 1993, S. 51-59.

CHOUIKHA U.A. 1998

Chouikha, M.; Janhsen, A.; Schnieder, E.: Klassifikation und Bewertung von Beschreibungsmitteln für die Automatisierungstechnik. Automatisierungstechnik 46 (1998) 12.

COREMANS 1998

Coremans, A.: Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozessmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper. Bamberg: Meisenbach Verlag 1998.

DAAS 2000

Daas, M.: Rapid Prototyping & Rapid Tooling für elektrotechnische Teile – Verfahren im Vergleich. In: Meyer, R.; Kühnle, H.: uRapid 2000, Berlin. Berlin: Fraunhofer Allianz Rapid Prototyping 2000, S. 79-87.

DAENZER 1983

Daenzer, W. F.: Systems Engineering – Leitfaden zur Durchführung umfangreicher methodischer Planungsvorhaben. Zürich: Verlag Industrielle Produktion 1983.

DEINZER 1998

Deinzer, G.: Magnesium – A Strategic Material for Lightweight Applications in the Automotive Industry. Automotive Sourcing (1998) V1.

DEMERS 2000

Demers, M.: Methoden zu dynamischen Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen. München: Dr. Hut 2000.

DÜRR & KASCHKA 1998

Dürr, H.; Kaschka, U.: An Approach for Selection and Comparative Evaluation of Conventional and Rapid Tooling Process Chains. In: Dr. Campbell, R.: Proceedings of the 7<sup>th</sup> European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing. Aachen: 1998, S. 729-738.

DTM 1998

DTM Corporation (Hrsg.): Rapid Steel Mold Inserts for Plastic Injection Molding. Austin, Texas 1998.

EHRENSPIEL 1995

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung: Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion. München: Carl Hanser 1995.

ESTER 1987

Ester, J.: Systemanalyse und mehrkriterielle Entscheidung. Berlin: VEB Verlag Technik 1987.

EVERSHEIM & KLOCKE 1998

Eversheim, W.; Klocke, F.: Werkzeugbau mit Zukunft, Strategien und Technologie. Berlin: Springer 1998.

EXNER 1978

Exner, H.: Grundlagen von Sintervorgängen. Stuttgart: Gebrüder Borntraeger 1978.

FÄHRER & MEINDL 2000

Fährer, J.; Meindl, M.: Schichtweise zum Einsatz. Die Neue Fabrik (2000) März, S. 26-27.

FISCHER U. A. 1990

Fischer, U. (Hrsg.): Fachkunde Metall. Berlin: Europa-Lehrmittel 1990.

FORDERHASE & CORDEN 1993

Forderhase, P.; Corden, R.: Reducing or Eliminating Curl on Wax Parts Produced in the Sinterstation 2000 System. In: Solid Freeform Fabrication Symposium, Proceedings. Austin, Texas: 1993, S. 94-101.

FRENKEL 1945

Frenkel, J.: Viscous Flow of Crystalline Bodies Under the Action of Surface Tension. Journal of Physics 9 (1945) 5, S. 385-391.

GAUSEMEIER & FINK 1999

Gausemeier, J.; Fink, A.: Führung im Wandel. München: Carl Hanser 1999.

GEBHARDT 1996

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

GEBHARDT 1998

Gebhardt, A.: Rapid Tooling; Der schnelle Weg zum Spritzgießwerkzeug. Kunststoffe 88 (1998) 11, S. 1992-2000.

GEBHARDT 2000

Gebhardt, A.: Rapid Prototyping; Dienstleistung zwischen Wunsch und Realität. In: Meyer, R.; Kühnle, H.: uRapid 2000, Berlin. Berlin: Fraunhofer Allianz Rapid Prototyping 2000, S. 89-110.

GEIGER & COREMANS 1997

Geiger, M.; Coremans, A.: Lasergestütztes Rapid Tooling – Vorse rienwerkzeuge zur Herstellung funktionsfähiger Bauteile mit Endprodukteigenschaften. In: Tagungsband des 6. Umformtechnischen Kolloquiums Darmstadt, Darmstadt. 1997, S. 175-193

GERMAN 1996

German, R.: Sintering Theory and Practice. New York: John Wiley & Sons 1996.

GERMAN 1984

German, R.: Powder Metallurgy Science. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1984.

GEUER 1996

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

GOLM 1996

Golm, F.: Gestaltung von Entscheidungsstrukturen zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen. München: Carl Hanser 1996.

GROBE 1996

Große, M.: Modellbasierte Planungsmethode für die Produktionslogistik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.

HABERFELLNER U. A. 1999

Haberfellner, R.; Nagel, P.; Becker, M.; Büchel, A.; von Massow, H.: Systems Engineering – Methodik und Praxis. Zürich: Verlag Industrielle Organisation 1999.

HE U. A. 1999

He, Z.; Kim, Y.; Kokkengada, M.; Zhou, J.: Rapid Pattern Based Powder Sintering with Room Temperature Polymer Infiltration. In: Solid Freeform Fabrication Symposium, Proceedings, Austin, Texas, 1999, S. 461-469.

HEJMADI & MCALEA 1996

Hejmadi, U.; McAlea, K.: Selective Laser Sintering of Metal Molds: The RapidTool™ Process. In: Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings. Texas: 1996, S. 97-104.

HOCK 1996

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

JUNIOR & SHELLABEAR 2000

Junior, V.; Shellabear, M.: Lasersintern in neuen Dimensionen – Ausdehnung der Anwendungsfelder für Kunststoff und Metallbauteile. In: Meyer, R.; Kühnle, H.: uRapid 2000, Berlin. Berlin: Fraunhofer Allianz Rapid Prototyping 2000, S. 429 – 442.

KAMISKE & BRAUER 1999

Kamiske, G.; Brauer, J.-P.: Qualitätsmanagement von A bis Z. München: Carl Hanser 1999.

KASCHKA 1999

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

KEENE 1993

Keene, B.: Review of Data for the surface tension of pure materials. International Material Reviews (1993) 4, S. 157-192.

KLEIN & WÜST 1990

Klein, F.; Wüst, J.: Klebneigung der Legierung GD – AlSi9Cu3 beim Gießen von Druckgussteilen. Giesserei (1990) 10, S. 344-351.

KLOCKE U. A. 1996

Klocke, F.: Direct Manufacturing of Metal Prototypes and Prototype Tools. In: Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings. Texas: 1996; S. 141-148.

KLOCKE U. A. 2000

Klocke, F.; Bilsing, A.; Wagner, C.: Perspektiven für den deutschen Werkzeug- und Formenbau. Werkstatt und Betrieb 133 (2000) 5, S. 18-21.

KREBS 1989

Krebs, W.: Druckgießformen – Beanspruchungsanalyse typischer Schadensfälle. Giesserei (1989) 24, S. 850-858.

KÜHNLE & STETTIN 1999

Kühnel, H.; Stettin, A.: Stand und Potential lasergesinterter Druckgusswerkzeuge. Giesserei-Erfahrungsaustausch (1999) 7/8, S. 433-437.

KÜHNLE U. A. 1999

Kühnle, H.; Stettin, A.; Hartmann, A.: Generative Fertigungsverfahren - eine Alternative für den Formenbau?. Giesserei-Praxis (1999) 10, S. 491-495.



---

LAKSHMINARAYAN 1992

Lakshminarayan, U.: Selective Laser Sintering of Ceramic Materials. Dissertation, University of Texas at Austin, 1992.

LEIBELT U. A. 1997

Leibel, R.; Coremans, A.; Hoffmann, P.: Direktes Metall-Laserstrahlsintern und Laserstrahlabtragen – Zwei Verfahren zum Rapid Tooling. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Rapid Tooling, Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt. München: Herbert Utz 1997.

LIEBY 1965

Lieby, G.: Druckgießtechnik. Handbuch für die Verarbeitung von Metall-Legierungen. Berlin: Springer 1965.

LINDE & HILL 1993

Linde, H.; Hill, B.: Erfolgreich erfinden: Widerspruchsorientierte Innovationsstrategie für Entwickler und Konstrukteure. Darmstadt: Hoppenstedt Technik Tabellen Verlag 1993.

LINDEMANN U. A. 1998

Lindemann, U.; Amft, M.; Abmann, G.; Wulf, J.; Birkhofer, H.; Wallmeier, S.: Rechnerunterstützung für frühe Phasen der Entwicklung. F & M, 106 (1998) 3, S. 123–127.

LINDEMANN & REICHWALD 1998

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

LORENZEN & BREITINGER 1996

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

LORENZEN & BREITINGER 1996

Lorenzen, J.; Breitingen, F.: Rapid Tooling – Verfahren zur schnellen Herstellung von Prototypenwerkzeugen. In: Euroforum: Rapid Prototyping, Köln. Eigenverlag 1996.

LORENZEN U. A. 1997

Lorenzen, J.; Breiting, F.; Pieverling, H.: In drei Wochen zum Serienwerkzeug. Produktion 48 (1997); S. 7.

MACHT 1999

Macht, M.: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping. München: Herbert Utz 1999. (iwb Forschungsberichte 131).

MARQUART 1994

Marquart, W.: Modellbildung als Grundlage der Prozesssimulation. Technical Report (1994) 2, Lehrstuhl für Prozesstechnik, RWTH Aachen 1994.

MASING 1999

Masing, W.: Handbuch Qualitätsmanagement. München: Carl Hanser 1999.

MAYERS 1997

Mayers, B.: Prozess- und Produktoptimierung mit Hilfe der statistischen Versuchsmethodik. Aachen: Shaker 1997.

MCGEARY 1961

McGeary, R.: Mechanical Packing of Spherical Particles. Journal of The American Ceramic Society. (1961) 44, S.513.

MEINERS 1999

Meiners, W.: Direktes Selektives Laser Sintern einkomponentiger Werkstoffe. Aachen: Shaker 1999.

MEINERS & WISSENBACH 1997

Meiners, W.; Wissenbach, K.: Selektives Laser Sintern metallischer Bauteile. VDI Seminar „Rapid Prototyping“; Aachen 1997.

MEINERS U. A. 1997

Meiners, W.; Wissenbach, K.; Poprawe, R.: Direct Selective Laser Sintering of Steel Powder. In: Proceedings of LANE'97, Meisenbach, Bamberg 1997.

MENGES & MOHREN 1991

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

MERTZ 1997

Mertz, A.: Wirtschaftliche Druckguss-Prototypenherstellung. VDG-Seminar Nr. 842: Einführung in die Magnesium-Druckgießtechnik, 26.-27.11.1997. Aalen 1997.

MERTZ U. A. 1999

Mertz, A.; Siedersleben, M.; Brungs, D.: Neue Entwicklungen im Karosseriebau mit Leichtmetallen. 8. Aachener Kolloquium „Fahrzeug- und Motorentchnik“. Aachen 1999.

MILBERG 1997

Milberg, J.: Produktion – Eine treibende Kraft für unsere Volkswirtschaft. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Münchner Kolloquium '97: Mit Schwung zum Aufschwung, München. Landsberg/Lech: Moderne Industrie 1997, S.17 – 40.

NELSON 1993

Nelson, J.: Selective Laser Sintering, A Definition of the Process and an Empirical Sintering Model. Dissertation, University of Texas at Austin, 1993.

NIEBLING U. A. 2000

Niebling, F.; Otto, A.; Geiger, M.: FE-Simulation des selektiven Laserstrahlsinterns von Metall-Pulver. Laseropt 32 (2000) 6.

NÖKEN 1997

Nöken, S.: Technologie des selektiven Lasersinterns von Thermoplasten. Aachen: Shaker 1997.

NOWAK 1998

Nowak, D.: Neue Lebenswelten zwischen Brauchtum und Internet. Absatzwirtschaft (1998) 10, S.18-22.

OSTERMANN & WEIB 1997

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

PFEIFER U. A. 1998

Pfeifer, T.; Dahmen, J.; Gaida, W.: Qualitätsmanagement in der Produktionstechnik – Handlungsschwerpunkte und Perspektiven. wt 88 (1998) 5, S. 201–207.

PRANG 1998

Prang, Pierre: Fertigungsintegrierte Qualitätssteuerung am Beispiel des Pkw-Getriebegeräusches. Aachen: Shaker 1998.

REFA 1990

REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V.: Methodenlehre der Betriebsorganisation – Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. München: Carl Hanser 1990.

REIMER 1968

Reimer, V.: Druckguß. München: Carl Hanser 1968.

REINHART 2000

Reinhart, G.: Mit dem Kopf durch die Wende? Produktionstechnische Konzepte für reaktionsfähige Unternehmen. In: Reinhart, G.; Hoffmann, H.: Münchener Kolloquium 2000: ... nur der Wandel bleibt., München. Landsberg/Lech: moderne industrie 2000, S. 175-202.

REINHART U. A. 1996

Reinhart, G.; Lindemann, U.; Heinzl, J.: Qualitätsmanagement: ein Kurs für Studium und Praxis. Berlin: Springer 1996.

REINHART U. A. 1997

Reinhart, G.; Macht, M.; Fährer, J.: Effizienter Einsatz von Rapid Prototyping in der Produktentwicklung. In: VDI-Gesellschaft: Neue Generation von CAD/CAM-Systemen, München. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997, S. 301-323. (VDI-Berichte 1357).

REINHART U. A. 1998

Reinhart, G.; Fährer, J.; Breitinge, F.: Rapid Tooling Process Chains Based on SLS. In: Campbell, R., I.: Proceedings of the 7th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Aachen. Nottingham: Birch Print 1998, S.351-360.

REINHART U. A. 1999

Reinhart, G.; Fährer, J.; Breitinge, F.: Rapid Tooling für den Magnesiumdruckguss; Seminarband: 7. Magnesiumguss Abnehmerseminar & Automotive Seminar 1999.

REINHART & FÄHRER 2000

Reinhart, G.; Fährer, J.: Schneller zum Formeinsatz mit Rapid Prototyping. Werkstatt und Betrieb 133 (2000) 5.

ROZSNOKI 1999

Rozsnoki, L.: Anwendungsorientierte Charakterisierung laserbehandelter Randschichten für den Einsatz in der Druckgießtechnik. Aachen: Shaker 1999.

SCHATT 1992

Schatt, W.: Sintervorgänge. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992.

SCHEFFLER 1986

Scheffler, E.: Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1986.

SCHLIFFENBACHER 2000

Schliffenbacher, K.: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken. München: Herbert Utz 2000.

SCHREINER 1964

Schreiner, H.: Pulvermetallurgie elektrischer Kontakte. Berlin: Springer 1964.

SCHUMACHER 1997

Schumacher, B.: SLS eröffnet Möglichkeiten zu innovativer Prozesskettengestaltung. In: 1. Europäisches DTM User Group Meeting, IHK Augsburg 1997.

SEITZ 1997

Seitz, S.: Neue Werkstoffe und Anwendungen. In: 1. Europäisches DTM User Group Meeting, IHK Augsburg 1997.

SEITZ 2000

Seitz, S.: Vom Rapid Prototyping zum Rapid Manufacturing. In: Meyer, R.; Kühnle, H.: uRapid 2000, Berlin. Berlin: Fraunhofer Allianz Rapid Prototyping 2000, S. 357-368.

SHELLABEAR & WEILHAMMER 1999

Shellabear, M.; Weilhammer, J.: Direktes Metall-Lasersintern (DMLS) – Industrielle Anwendung für Rapid Tooling und Manufacturing. In: Reinhart, G.: Rapid Manufacturing – Methoden für die reaktionsfähige Produktion. München: Herbert Utz 1999.

SONG 1996

Song Yong-Ak: Selektives Lasersintern metallischer Prototypen. Aachen: Shaker, 1996.

SPUR & STÖFFERLE 1981

Spur, G.; Stöfflerle, T.: Handbuch der Fertigungstechnik. Band 1-2. München: Carl Hanser, 1981.

STACHOWIAK 1993

Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer 1993.

STEINBERGER 2000

Steinberger, J.: Optimierung des Selektiven-Laser-Sinterns zur Herstellung von Feingussteilen für die Luftfahrtindustrie. München: Technische Universität, Dissertation, 2000.

STEINS 2000

Steins, D.: Entwicklung einer Systematik zur qualitätsgerechten Optimierung komplexer Produktionssysteme. Aachen: Shaker 2000.

STETTIN 2000

Stettin, A.: Generativ hergestellte Werkzeuge. In: 8. Magnesium Abnehmerseminar & 8. Magnesium Automotive Seminar, Aalen: Europäische Forschungsgemeinschaft Magnesiumguss e. V. 2000.

## SUN &amp; BEAMAN 1991

Sun, M. ; Beaman, J.: A Three Dimensional Model for Selective Laser Sintering. Solid Freeform Fabrication Symposium, Proceedings, Austin, Texas, 1991, S. 102-109.

## TERNINKO U. A. 1998

Terninko, J.; Zusaman, A.; Zlotin, B.: TRIZ, Der Weg zum konkurrenzlosen Erfolgsprodukt. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie 1998.

## TEUFELSDORFER &amp; CONRAD 1998

Teufelsdorfer, H.; Conrad, A.: Kreatives Entwickeln und innovatives Problemlösen mit TRIZ/TIPS. Erlangen: Publicis MCD 1998.

## TRAPP 2000

Trapp, W.: Wegbereiter filigraner Kavitäten. Schneller zum Prototypen und Formwerkzeug durch 3D-Keltool Rapid Tooling. Werkzeug & Formenbau (2000) 1, S. 16-21.

## TROSSIN 1999

Trossin, H.-J.: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik. München: Herbert Utz 1999.

## VAIL &amp; BARLOW 1991

Vail, N.; Barlow, J.: Effect of Polymer Coatings as Intermediate Binders on Sintering of Ceramic Parts. In: Solid Freeform Fabrication Proceedings, The University of Texas. Austin: Texas, 1991, S. 195-204.

## VAIL 1994

Vail Neal Kent: Preparation and Characterization of Microencapsulated, Finely Divided Ceramic Materials for Selective Laser Sintering. Dissertation University of Texas at Austin 1994.

## VDI 1992

VDI-Berichte 989: Simulation von Systemen in Logistik, Materialfluss und Produktion. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992.

VDI-RICHTLINIE 3633 1996

VDI-Richtlinie 3633 (Entwurf): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Begriffsdefinitionen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.

WARNECKE & WESTKÄMPER 1998

Warnecke, H.-J.; Westkämper, E.: Einführung in die Fertigungstechnik. Stuttgart: Teubner Verlag 1998.

WEISMANN & HSU 1991

Weissman, E.; Hsu, M.: A Finite Element Model of Multi-Layered Laser Sintered Parts. In: Solid Freeform Fabrication Symposium, Proceedings, Austin, Texas, 1991, S. 86-94.

WOLTER 1999

Wolter, H.-J. (Hrsg.): MaDiCa – Magnesium Die Casting. Abschlussbericht des BMBF-Projekts Madica. Aalen: 2000.

WORBY 1987

Worby, J.: Hinweis zur Erzielung längerer Standmengen von Druckgießformen. Giesserei-Praxis (1987) 1/2, S. 717.



## 11 Verwendete Abkürzungen

CAD	Computer Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
D. h.	Das heißt
DMLS	Direkter Metall-Lasersinterprozess
FE-Modell	Finite Elemente Modell
HIP	Heißisostatisches Pressen
HSC	High Speed Cutting
IMLS	Indirekter Metall-Lasersinterprozess
NC	Numerical Control
SADT	Structured Analysis and Design Technique
SLS	Selektives Lasersintern
STL	Standard Transformation Language
TRIZ	Theorie der Lösung von Erfindungsproblemen
VDG	Verein Deutscher Gießerei-Fachleute
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
z. B.	Zum Beispiel
z. T.	Zum Teil



# iwb Forschungsberichte Band 1–121

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

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

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

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

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

- 92 *Hechl, Chr.*  
**Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte**  
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*  
**Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen · Gestellstrukturen**  
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*  
**Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren**  
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*  
**Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme**  
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*  
**Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen**  
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*  
**Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme**  
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*  
**Autonome Fertigungszellen · Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung**  
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*  
**Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie**  
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*  
**Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung**  
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*  
**Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten**  
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischelsrieder, K.*  
**Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion**  
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*  
**Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten**  
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*  
**Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung**  
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*  
**Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem**  
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*  
**Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe**  
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*  
**Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen**  
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krämer, U.*  
**Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche 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 3-540-64668-8
- 116 *Koehrer, 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 herstellungorientierten 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 *Plöb, E.*  
**Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen**  
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*  
**Erfahrungsgleitete Planung von Laseranlagen**  
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

# Seminarberichte iwb

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

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, utz@utzverlag.com

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**  
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**  
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**  
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**  
86 Seiten · ISBN 3-931327-76-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**  
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**  
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**  
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 15 **Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe · Dosierung und Prozeßgestaltung**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**  
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**  
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**  
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**  
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**  
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**  
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 31 **Engineering Data Management (EDM) · Erfahrungsberichte und Trends**  
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**  
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**  
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**  
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung · Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit · Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping · Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**  
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie · Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**  
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**  
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**  
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit · ...durch Kooperation steigern**  
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage · Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen**  
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken · Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**  
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion · Ablaufsimulation**  
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1
- 47 **Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation**  
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**  
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 **Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6

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



# Forschungsberichte iwB

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, 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, utz@utzverlag.com

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

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

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