

**Herstellung hochgenauer Prototypen  
mittels Fräsen als  
quasi-generativem Rapid-Prototyping-Verfahren**

**Dissertation**

**zur Erlangung  
des Grades Doktor-Ingenieur  
- Dr.-Ing. -  
des Fachbereiches Maschinenwesen  
der Universität Duisburg-Essen**

**vorgelegt von  
Diplom-Ingenieur  
Björn Olaf Assmann  
aus Haltern**

**Tag der Einreichung: 26. März 2003**

**Tag der mündlichen Prüfung: 5. Juni 2003**

**Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. F. Peters  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. D. Bergers  
Prof. Dr.-Ing. H.-J. Stracke**

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Produktionstechnologie und Produktentwicklung der Universität Duisburg-Essen.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Diethard Bergers für die gute Betreuung sowie die fachliche Unterstützung meiner Arbeit. Für die Übernahme des Co-Referates der Arbeit bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Stracke.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden am Institut für Produkt Engineering eine Reihe von Prototypen gefertigt. Für die uneingeschränkte Unterstützung bei der Fertigung und den fachlichen Diskussionen gilt Herrn Reinhard Giese mein besonderer Dank.

Für die regelmäßigen wissenschaftlichen Diskussionen sowie für die Korrektur des Manuskriptes bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Frank Beneke vom Institut für Produkt Engineering der Universität Duisburg-Essen.

Ferner möchte ich mich bei Markus Hastrich, Jens Standke und Klaus-Dieter Werner für die Unterstützung und Diskussionsbereitschaft während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut bedanken.

Ich möchte mich insbesondere bei meiner Frau Christiane bedanken, die mich während der ganzen Zeit auf bemerkenswerte Weise unterstützt hat.

Haltern, im Juni 2003

Björn Olaf Assmann

Für Carl Magnus und Christiane.

---

# Herstellung hochgenauer Prototypen mittels Fräsen als quasi-generativem Rapid-Prototyping-Verfahren

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b> .....	<b>IV</b>
Formelzeichen.....	IV
Abkürzungen .....	V
<b>1 Einleitung und Aufgabenstellung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Rapid Prototyping als Werkzeug der Produktentwicklung .....	1
1.2 Fräsen als Rapid-Prototyping-Verfahren.....	3
1.3 Aufgabenstellung .....	4
<b>2 Theoretische Grundlagen und Stand des Wissens</b> .....	<b>5</b>
2.1 Modelle im Rapid Prototyping .....	5
2.1.1 Informationskette im Rapid Prototyping .....	7
2.1.2 3D-CAD.....	8
2.1.3 Reverse Engineering .....	9
2.1.4 Schnittstellen und Datenformate .....	10
2.1.4.1 STL-Format.....	12
2.1.4.2 IGES-Format.....	13
2.1.4.3 SLC-Format.....	14
2.1.4.4 STEP-Format.....	14
2.2 Überblick industriell eingesetzter generativer RP-Verfahren.....	15
2.2.1 Stereolithographie .....	18
2.2.2 Selektives Lasersintern .....	19
2.2.3 Fused Deposition Modelling .....	21
2.2.4 Layer Laminate Manufacturing .....	22
2.2.5 Controlled Metal Build-Up .....	23
2.3 Klassifizierung nach funktionalen Gesichtspunkten.....	24
2.4 Einteilung von Rapid Prototyping nach konventionellen Fertigungsverfahren.....	25

---

2.5	Fräsen als quasi-generatives Rapid-Prototyping-Verfahren .....	27
2.5.1	Fertigung mittels integrierter CAD/CAM-Systeme .....	28
2.5.2	Kommerzielle Softwareprodukte zum RP durch Fräsen.....	29
2.5.2.1	STRATOCONCEPTION (CIRTES/CHARLYROBOT).....	29
2.5.2.2	MILLIT (COSCOM) .....	31
2.5.2.3	Stratified Object Manufacturing nach ERATZ.....	34
2.5.3	Problematik beim Rapid Prototyping mittels Fräsen.....	34
2.6	Fügeprozesse im Rapid Prototyping durch Fräsen.....	35
2.6.1	Stoffschlüssige Fügeprozesse .....	35
2.6.2	Kraftschlüssige Fügeprozesse .....	37
2.7	Zusammenfassung .....	38
<b>3</b>	<b>Anforderungen an ein optimales Prototyping .....</b>	<b>39</b>
3.1	Schicht erzeugen.....	40
3.1.1	STL-unabhängiger Austausch der Geometriedaten zwischen CAD-System/CAM-System .....	40
3.1.2	Bauteilzerlegung zur Bearbeitung von Hinterschneidungen.....	42
3.2	Kontur erzeugen .....	43
3.2.1	NC-Programmierung .....	43
3.2.2	Zweiseitige Bauteilbearbeitung .....	44
3.3	Schichten fügen.....	45
3.3.1	Positionierung der Körperschichten .....	45
3.3.2	Verbindung durch reversible Fügeprozesse .....	46
3.4	Wirtschaftliche Aspekte .....	47
<b>4</b>	<b>Ansätze für ein optimiertes Prototyping .....</b>	<b>50</b>
4.1	Schicht erzeugen.....	50
4.2	Kontur erzeugen .....	52
4.2.1	Entwicklung von Hilfsgeometrien zur zweiseitigen Werkstückbearbeitung .....	52
4.2.1.1	Innere Hilfsgeometrien als Mittel zur Bauteilfixierung.....	53
4.2.1.2	Genauigkeitseinflüsse durch elastische Verformungen der Hilfsgeometrien .....	55
4.2.1.3	Optimierte Gestaltung der inneren Hilfsgeometrien .....	59
4.2.2	Bearbeitungsvorgang mit inneren Hilfsgeometrien.....	60

---

4.3	Schichten Fügen.....	62
4.3.1	Positionieren der Schichten zum Fügen mittels klassischer Fügeverfahren.....	62
4.3.2	Fügeprozesse durch angepasste Pressverbindung .....	63
4.3.2.1	Bohrung-Zapfen-Kombination als Pressverbindung.....	66
4.3.2.2	Hilfsgeometrie als Basis für Pressverbindungen .....	67
4.3.2.3	Ideale Pressverbindung mit höchsten Festigkeiten.....	69
4.3.2.4	Ermittlung wirksamer Pressverbindungen mittels FEM.....	71
<b>6</b>	<b>Beispielstudie Miniaturturbine .....</b>	<b>82</b>
6.1	Geometrieanalyse zur Aufteilung in Körperschichten.....	83
6.2	Fertigung der Körperschichten .....	85
6.2.1	Fertigung mittels Fräsen .....	85
6.2.2	Fertigung mittels äußerer Hilfsgeometrien .....	86
6.2.3	Fertigung mittels innerer Hilfsgeometrien.....	88
6.3	Vergleich der RP-Verfahren Lasersintern und Fräsen.....	89
6.3.1	Fertigung mittels Lasersintern (SLS).....	89
6.3.2	Vergleich der Fertigungszeiten und visuellen Eindrücke .....	90
6.4	Struktur- und Genauigkeitsanalyse der Prototypen.....	93
<b>7</b>	<b>Ausblick und Tendenzen.....</b>	<b>97</b>
7.1	Implementierung von Schnitt-Algorithmen in 3D-CAD-Systeme .....	97
7.2	Automatisierte Konstruktion von inneren Hilfsgeometrien.....	98
7.3	Bauteilschnitte in unterschiedlichen Ausrichtungen.....	99
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>101</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Skizzen und Zeichnungen.....</b>	<b>103</b>
<b>Anhang B</b>	<b>Abbildungen.....</b>	<b>107</b>
<b>Anhang C</b>	<b>Werkstoffkennwerte.....</b>	<b>110</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>112</b>

## Nomenklatur

### Formelzeichen

$A_F$	$[m^2]$	Fugenoberfläche
$A_S$	$[m^2]$	Spannfläche
$d_F$	$[m]$	Fugendurchmesser
$F_{Rl}$	$[N]$	Kraft in Längsrichtung
$F_{Rt}$	$[N]$	Kraft in Umfangsrichtung
$F_S$	$[N]$	Spannkraft
$F_{Zapfen}$	$[N]$	Maximale Festigkeit des Zapfens
$l_E$	$[m]$	Erforderliche Fasenlänge
$l_F$	$[m]$	Fugenumfangslänge
$p$	$[N/m^2]$	Flächenpressung
$p_G$	$[N/m^2]$	Grenzflächenpressung
$p_F$	$[N/m^2]$	Fugendruck
$R_E$	$[N/m^2]$	Streckgrenze
$t_F$	$[m]$	Fugentiefe/Zapfenlänge

---

$\mu$	[-]	Reibungskoeffizient
$\sigma_r$	[N/m <sup>2</sup> ]	radiale Spannung
$\sigma_t$	[N/m <sup>2</sup> ]	tangentiale Spannung
$\sigma_v$	[N/m <sup>2</sup> ]	Vergleichsspannung

## Abkürzungen

ANSI	<u>A</u> merican <u>N</u> ational <u>S</u> tandards <u>I</u> nstitute
API	<u>A</u> pplication <u>P</u> rogramming <u>I</u> nterface
BV	<u>B</u> ild <u>v</u> erarbeitung
CAD	<u>C</u> omputer <u>A</u> ided <u>D</u> esign
CAM	<u>C</u> omputer <u>A</u> ided <u>M</u> anufacturing
CFD	<u>C</u> omputational <u>F</u> luid <u>D</u> ynamics
CMB	<u>C</u> ontrolled <u>M</u> etal <u>B</u> uild-Up
CNC	<u>C</u> omputerized <u>N</u> umerical <u>C</u> ontrol
CSS	<u>C</u> ross <u>S</u> ectional <u>S</u> canning
DIN	<u>D</u> eutsches <u>I</u> nstitut für <u>N</u> ormung e.V.
E-Modul	<u>E</u> lastizitäts <u>m</u> odul
FDM	<u>F</u> used <u>D</u> eposition <u>M</u> odelling
FEM	<u>F</u> inite- <u>E</u> lemente- <u>M</u> ethode
FLM	<u>F</u> used- <u>L</u> ayer- <u>M</u> odelling
HSC	<u>H</u> igh <u>S</u> peed <u>C</u> utting



---

IFU	<u>I</u> nstitut für <u>U</u> mformtechnik
IGES	<u>I</u> nitial <u>G</u> raphics <u>E</u> xchange <u>S</u> pecification
IPT	<u>I</u> nstitut für <u>P</u> roduktionstechnologie
LLM	<u>L</u> ayer <u>L</u> aminate <u>M</u> anufacturing
LOM	<u>L</u> aminated <u>O</u> bject <u>M</u> anufacturing
MJM	<u>M</u> ultiJet <u>M</u> odelling
NC	<u>N</u> umerical <u>C</u> ontrol
NCG	<u>N</u> C- <u>G</u> esellschaft
NURBS	<u>N</u> on- <u>U</u> niform- <u>R</u> ational- <u>B</u> - <u>S</u> pline
PVC	<u>P</u> olyvinylchlorid
RE	<u>R</u> everse <u>E</u> ngineering
RP	<u>R</u> apid <u>P</u> rototyping
SDAI	<u>S</u> tandard <u>D</u> ata <u>A</u> ccess <u>I</u> nterface
SLC	<u>S</u> lice <u>L</u> ayer <u>C</u> ontour
SLS	<u>S</u> elektives <u>L</u> asersintern
SOM	<u>S</u> tratifed <u>O</u> bject <u>M</u> anufacturing
STEP	<u>S</u> tandard for the <u>E</u> xchange of <u>P</u> roduct Model Data
STL	<u>S</u> tereolithographie
TERAP	<u>T</u> Echnological Planning System for <u>R</u> APid Prototyping Processes
UV	<u>U</u> ltraviolett
VDID	<u>V</u> erband der <u>D</u> eutschen <u>I</u> ndustrie <u>D</u> esigner
VP	<u>V</u> irtual <u>P</u> rototyping

# **1 Einleitung und Aufgabenstellung**

Die Tendenz zu immer kürzeren Produktlebenszyklen wird durch verschiedenartige Entwicklungen (z.B. Produktindividualisierung, globaler Wettbewerb) verursacht. Nach Angaben in der Literatur haben sich die Zeiträume, in denen ein Produkt gewinnbringend am Markt platziert werden kann, in den letzten 20 Jahren in etwa halbiert [GEBHARDT 2000, SPUR 1997]. Gleichzeitig hat sich der Preis von Produkten zu einem wesentlichen Kaufkriterium entwickelt [BERGERS 2002C]. Die Entwicklung neuer Produkte ist daher für den Unternehmenserfolg von enormer Bedeutung. Untersuchungen haben gezeigt, dass vor allem der Zeitpunkt der Einführung neuer Produkte den Produkterfolg wesentlich beeinflusst. Im Vergleich zu einem Überschreiten der Entwicklungskosten um 50% führt eine Verzögerung der Produkteinführung um 6 Monate zu erheblich größeren Gewinneinbußen [GEBHARDT 2000].

Die Entwicklung neuer Produkte in möglichst kurzen Zeiträumen verlangt nach Werkzeugen, die den Entwicklungsprozess beschleunigen. In der Praxis etablieren sich dabei das Rapid und das Virtual Prototyping als zwei Methoden, die grundsätzlich eine Verkürzung der Produktentwicklungsprozesse ermöglichen. Während sich das Virtual Prototyping mit der Entwicklung von digitalen Prototypen auseinandersetzt, steht beim Rapid Prototyping das schnelle Erstellen von physischen Prototypen im Fokus.

## **1.1 Rapid Prototyping als Werkzeug der Produktentwicklung**

Der Einsatzzweck von Prototypen ist es, erste Entwürfe neuer Produkte hinsichtlich ihrer Eignung und Wirkung zu analysieren. So lassen sich beispielsweise erste Analysen in Bezug auf die Festigkeit von Bauteilen bereits während der Konstruktion mittels der Finite Element Methode (FEM) durchführen. Auch die strömungsmechanischen Untersuchungen mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) werden auf Basis rechnergenerierter Modelle durchgeführt. Diese Formen der Funktionssimulation stützt sich auf das Vorhandensein von rechnergestützten Modellen.

Das Verhalten von Bauteilen wird unter definierten Randbedingungen simuliert. Die Aussagekraft der Simulationsergebnisse ist abhängig von der Art der Modelle und deren Abbildungsgenauigkeit. Alle Verfahren, die in diesem Zusammenhang eingesetzt werden, sind unter dem Begriff Virtual Prototyping (VP) zusammengefasst.

Aufgrund der Komplexität von Bauteilen lassen sich Eigenschaften nur eingeschränkt mittels rechnergestützter Modelle simulieren. Auch die Überprüfung der Handhabungseigenschaften von Objekten (Haptik, Ergonomie) lassen sich mit Hilfe von Computerprogrammen heute nur unzureichend durchführen. Ausgeglichen dieser Mangel wird durch den Einsatz von physischen Prototypen. Diese Form von Prototyping setzt die Fertigung von Bauteilen voraus und ist dadurch

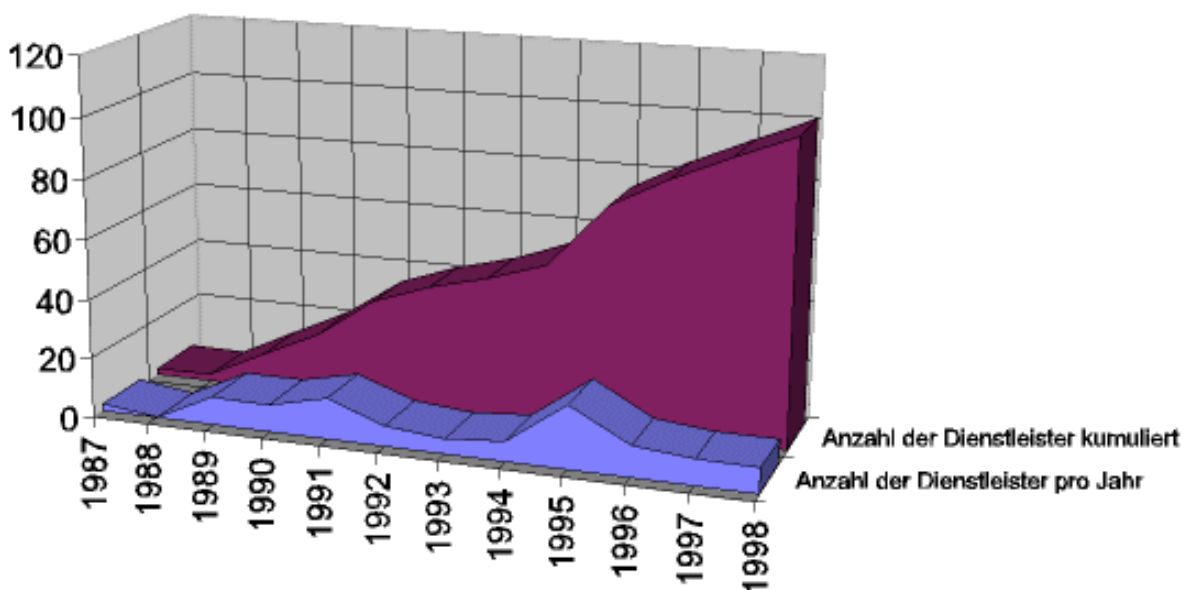


Abbildung 1-1 Entwicklung des RP-Marktes auf Dienstleistungssebene [RP-NET 2000]

mit einem höheren Aufwand verbunden. Die Fertigung und der Einsatz von physischen Prototypen in einem frühen Stadium der Produktentwicklung verlangt nach Möglichkeiten einer direkten Implementierung von Fertigungsverfahren in den Entwicklungsprozess. In den letzten 10 Jahren sind eine Reihe von unterschiedlichen Fertigungsverfahren zur Marktreife entwickelt worden, die in der Literatur unter dem Begriff Rapid Prototyping (RP) zusammengefasst werden. Die rasante Entwicklung des Marktes für RP wird in Abbildung 1-1 deutlich. Dort ist die Anzahl der RP-Dienstleister zwischen 1987 und 1998 dargestellt, die sich ausschließlich auf die Technologie Rapid Prototyping spezialisiert haben [RP-NET 2000].

Die Rapid-Prototyping-Verfahren werden häufig durch die Art des verarbeiteten Werkstoffs klassifiziert. Im Bereich des RP werden Bauteile in einem automatisierten Verfahren entweder direkt gefertigt, oder mittels geeigneter Urformverfahren in mehreren Stufen erzeugt. Die Fertigung in zwei Stufen beinhaltet im ersten Schritt die Fertigung einer Negativform des Bauteils und im

zweiten Schritt einen Gießprozess, der zu einem Positivmodell des Bauteils führt. Die Fertigung einer Form zur Erzeugung von Positivmodellen wird als Rapid Tooling bezeichnet.

Im Zusammenhang mit Rapid Prototyping werden in der Literatur häufig die sogenannten generative Fertigungsverfahren erwähnt [SPUR 1997, REINHART 2000]. Unter der Bezeichnung „generativ“ wird im allgemeinen die Fertigung von Bauteilen durch Materialaufbau verstanden. Erreicht wird der Materialaufbau durch eine Veränderung des Rohmaterialzusammenhaltes. In der Praxis werden dazu flüssige Monomere zu einem festen Körper polymerisiert oder pulverförmige Ausgangsmaterialien zu festen Körpern verschmolzen. Ferner lassen sich Körper mittels Auftragen von Thermoplasten oder auch durch das Laminieren von Papierbahnen herstellen. Die Möglichkeit der Fertigung von Innenstrukturen, die von außen nicht zugänglich sind, setzt voraus, dass die Körper und Bauteile durch einen schichtartigen Aufbau erzeugt werden. Gleichzeitig müssen die zur Fertigung notwendigen Ausgangsdaten die komplette Bauteilgeometrie abbilden. Dazu bieten sich in der Praxis verschiedenartige Datenformate an. Charakteristisch für die Fertigung mittels generativer Verfahren ist die begrenzte Materialvielfalt. Mit Ausnahme des Lasersinterns sind die Fertigungsverfahren auf grundsätzlich nur eine Materialart beschränkt, die im wesentlichen von speziellen Produkten durch den Maschinenhersteller angeboten werden.

## 1.2 Fräsen als Rapid-Prototyping-Verfahren

Den generativen RP-Verfahren stehen die konventionellen Fertigungsverfahren, die eine Bauteilfertigung durch Abtrennen von Material erreichen, gegenüber. Fräsen und Drehen gehören zu den weit verbreiteten konventionellen Fertigungsverfahren und spielen im Zusammenhang mit Rapid Prototyping gegenwärtig eine eher untergeordnete Rolle. Die Gründe dafür liegen sowohl in der Komplexität der Bauteile, die eine Fertigung in einem einzigen Verfahren nicht zulässt, als auch in einer noch nicht optimalen Ausnutzung zur rechnergestützten Erzeugung von Bearbeitungsprogrammen. Im Gegensatz zu den generativen Fertigungsverfahren ist die Fertigung mittels konventioneller Verfahren sehr viel länger (seit mehreren Jahrzehnten) Gegenstand von wissenschaftlichen Untersuchungen [BEUKE 1999]. Dadurch konnten bedeutende Fortschritte in bezug auf die Arbeitsgenauigkeit und Wirtschaftlichkeit erzielt werden. Zusätzlich ist diese Form der Fertigungstechnik stetig weiterentwickelt worden, so dass mittlerweile mit 5-Achs-Fräsmaschinen Bearbeitungsvorgänge realisiert werden können, die im Hinblick auf Formgestaltung und Qualität von Bauteiloberflächen neue Maßstäbe setzen.

Die Materialvielfalt ist bei den konventionellen Fertigungsverfahren relativ groß und umfasst alle trennend bzw. spanend zu bearbeitenden Materialien, während die generativen Fertigungsverfah-

ren in der Regel auf die Verarbeitung von speziellen Werkstoffen beschränkt sind [GEBHARDT 2000]. Dieser Umstand ist insbesondere im Hinblick auf die Fertigung von Prototypen von Bedeutung, die zur Überprüfung von Funktionen oder seriennah eingesetzt werden.

### 1.3 Aufgabenstellung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Verifizierung eines Konzeptes zu einer verbesserten Implementierung des konventionellen Fertigungsverfahrens Fräsen zur Herstellung von Prototypen. Im Hinblick auf eine breite Anwendbarkeit der Ergebnisse beziehen sich die zu entwickelnden Ansätze auf den Einsatz von 3-Achs-Fräsmaschinen. Eine erweiterte Anwendung der Ansätze auf 5-Achs-Maschinen ist dabei grundsätzlich gegeben und beabsichtigt.

Dazu werden zunächst alle industriell bedeutenden Verfahren zur Herstellung von Prototypen beleuchtet und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile untersucht. In einem weiteren Schritt werden die für eine optimierte Fertigung mittels Fräsen wichtigen Problemstellungen herausgearbeitet und entsprechende Lösungsansätze entwickelt. Neben den rein fertigungstechnischen Gesichtspunkten steht die Einbeziehung der datentechnischen Zusammenhänge zwischen 3D-CAD und der Fertigung im Fokus der Untersuchungen. Die Wirksamkeit der entwickelten Ansätze wird anhand eines Praxisbeispiels dargestellt. Ein direkter Vergleich zwischen den RP-Verfahren Lasersintern und Fräsen soll die prinzipiellen Möglichkeiten einer genauen Fertigung von Prototypen mittels Fräsen demonstrieren.

## 2 Theoretische Grundlagen und Stand des Wissens

Ein Produktentwicklungsprozess ist durch die Anwendung einer Reihe von methodischen Werkzeugen gekennzeichnet. Das Rapid Prototyping ist in dieser Reihe ein methodisches Werkzeug, das zur Entwicklung von Produkten herangezogen werden kann. Die Definition des Begriffes Rapid Prototyping ist in der Literatur nicht eindeutig festgelegt. Nach [LORENZEN 1997] basiert der Grundgedanke des Rapid Prototyping auf der Reduzierung eines komplexen dreidimensionalen Fertigungsproblems auf eine große Anzahl einfacher zweidimensionaler Fertigungsschritte. Eine Angabe über die einzusetzenden Fertigungsverfahren wird hier nicht getroffen. In [GEBHARDT 2000] bezeichnet der Begriff Rapid Prototyping die Lehre von den generativen Fertigungsverfahren. Als generativ werden Fertigungsverfahren bezeichnet, die ohne Einsatz von formgebenden Werkzeugen durch Hinzufügen von Material<sup>1</sup> eine Werkstückformgebung hervorgerufen. Nach [SPUR 1997] ist Rapid Prototyping die organisatorische und informationstechnische Verknüpfung aller Prozesse zur Herstellung physischer Prototypen. Eine Einschränkung des Begriffes Rapid Prototyping auf bestimmte Arten von Fertigungsverfahren ist hier ausdrücklich aufgehoben. Die Herstellung physischer Prototypen kann daher neben generativen auch durch trennende Fertigungsverfahren, Umformen sowie Urformen erreicht werden.

### 2.1 Modelle im Rapid Prototyping

Zur Beschreibung von Modellen haben sich in der Praxis zwei Gruppen durchgesetzt. Der Verband der Deutschen Industrie Designer (VDID) hat die unterschiedlichen Modelltypen in sechs Klassen unterteilt:

---

<sup>1</sup> Das Hinzufügen von Material kann durch einen Phasenübergang eines Materials von einem flüssigen oder pulverförmigen Zustand in den festen Zustand erfolgen.

- Proportionsmodell
- Ergonomiemodell
- Designmodell
- Funktionsmodell
- Prototyp
- Muster

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Modelltypen sind teilweise sehr gering, so dass nach einem Vorschlag der NC-Gesellschaft [vgl. NCG 2003] die Modelltypen in vier Modellarten zusammengefasst worden sind [nach GEBHARDT 2000]:

- Konzeptmodelle
- Geometrieprototypen
- Funktionsprototypen
- Technische Prototypen

### **Konzeptmodelle**

Diese Art von Modellen dient zur Darstellung des grundsätzlichen Erscheinungsbildes und der Modellproportionen.

### **Geometrieprototypen**

Ziel ist die Abbildung der exakten Form des Modells/Bauteils einschließlich der erforderlichen Oberflächenqualitäten. Diese Modellart ermöglicht eine Überprüfung der Handhabung, Bedienung und Benutzung.

### **Funktionsprototypen**

Diese Art von Modellen dient zur Überprüfung von (einzelnen) Funktionalitäten.

### **Technische Prototypen**

Es besteht die Forderung nach einer weitestgehenden Übereinstimmung zwischen dem Prototyp und dem späteren Serienbauteil. Die Funktionalität des Modells ist vollständig. Hinsichtlich der Werkstoffwahl und geometrischer Vereinfachungen können Abweichungen zum Serienbauteil auftreten.

Die Wichtigkeit des Einsatzes von Modellen im Produktentwicklungsprozess wird anhand der Beurteilungsfähigkeit der Kosten deutlich. Eine grundsätzliche Problematik in der Produktentwicklung liegt darin, dass in der Frühphase der Entwicklung die Möglichkeit einer Kostenbeeinflussung noch hoch ist, während die Beurteilungsmöglichkeit der anfallenden Kosten noch verhältnismäßig gering ist. Im weiteren Verlauf der Produktentwicklung nimmt die Möglichkeit der

Kostenbeurteilung zu - in Verbindung mit einer abnehmenden Möglichkeit der Kostenbeeinflussung. Der Einfluss eines frühzeitigen Einsatzes von Modellen lässt sich aus Abbildung 2-1 ableiten. Auch wenn sich zum Zeitpunkt der Serienproduktion keine Unterschiede in der Kostenbeur-

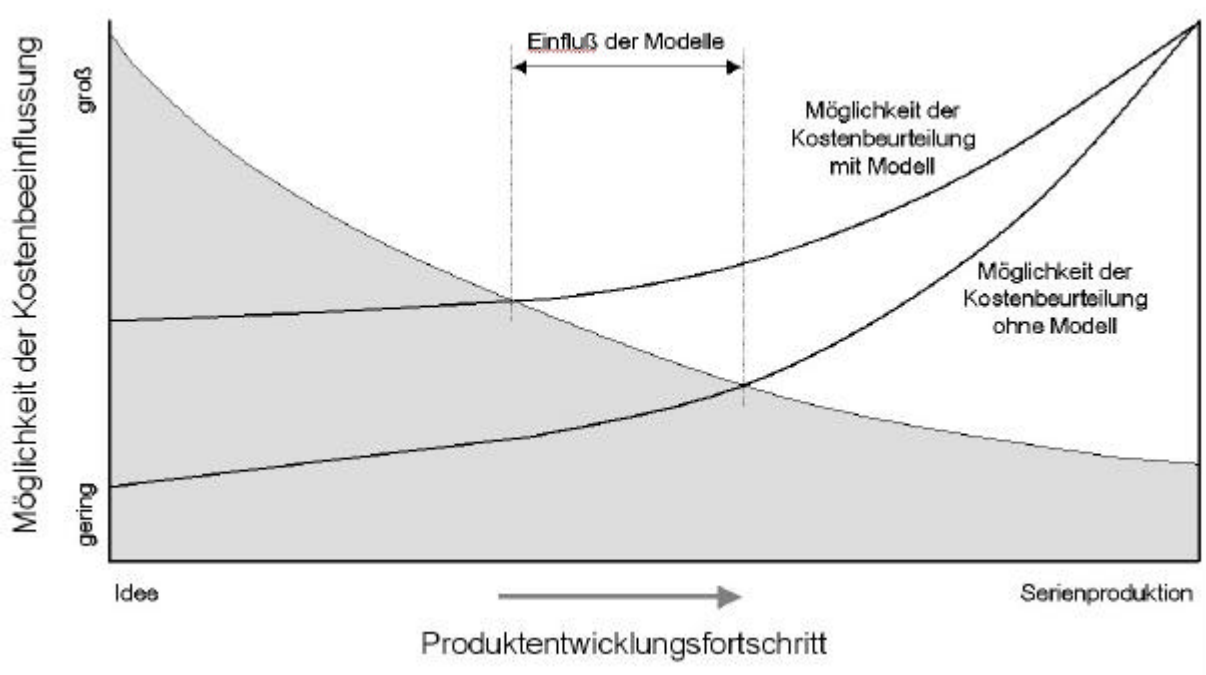


Abbildung 2-1 Kostenbeurteilung und Kostenbeeinflussung als Funktion des Produktentwicklungsfortschritts [GEBHARDT 2000]

teilung ergeben, sind bei einem frühzeitigen Einsatz von Modellen Potenziale zu einer größeren Beeinflussung der Kosten zu verzeichnen. Dies resultiert aus den Rückkopplungen (z.B. durch Einbautests), die ein Modell auf den Entwicklungsprozess hat.

Auch hinsichtlich einer reibungslosen Kommunikation zwischen den unterschiedlichen fachlichen Disziplinen im Entwicklungsteam ist der Einsatz von Modellen notwendig. Der jeweilige Entwicklungsstand kann durch Modelle veranschaulicht werden und gibt den einzelnen Gruppen die Möglichkeit, das Produkt unter fachspezifischen Aspekten zu betrachten und gegebenenfalls Änderungen herbeizuführen. In [GEBHARDT 2000] wird in Verbindung mit dem Einsatz von Modellen auch von einer Steigerung der Motivation gesprochen.

### 2.1.1 Informationskette im Rapid Prototyping

Die notwendigen Informationen für die Fertigung von Modellen und Prototypen können in unterschiedlichen Formen vorliegen. In Abbildung 2-2 sind die Informationszusammenhänge vereinfacht dargestellt. Voraussetzung ist die Vorlage von Daten, die ein dreidimensionales Beschreiben des Modells erlauben. Während die Daten aus den 3D-CAD-Systemen verhältnismäßig einfach zu erzeugen sind, ist die Erzeugung von Geometriedaten durch Reverse Engineering (s. Kap. 2.1.3) technologisch bedingt aufwändig und teilweise mit erheblichen Fehlern behaftet. Die



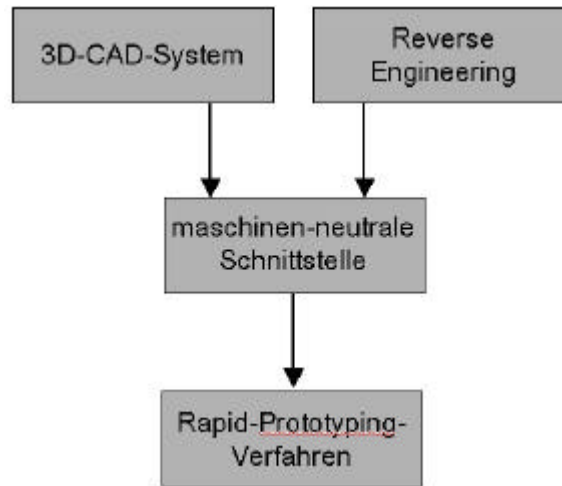


Abbildung 2-2 Informationskette im Rapid Prototyping (vereinfacht)

aufbereiteten Daten werden im Anschluss über eine Schnittstelle in ein maschinenneutrales Format konvertiert. Die Neutralität der Geometriedaten ist mit der Forderung verbunden, die Daten systemunabhängig zu nutzen. Die Geometriedaten sollen so aufbereitet sein, dass die Nutzung unterschiedlicher RP-Verfahren möglich ist. Diese „Unabhängigkeit“ ist in der Regel mit der Erzeugung ungenauer Geometriedaten verbunden. Der Grad der Ungenauigkeit ist steuerbar, verlangt jedoch in der Praxis einen Kompromiss zwischen Ungenauigkeit und Handhabbarkeit der Daten. Die Ursachen und Hintergründe hierzu werden eingehend in Kapitel 2.1.4 erläutert.

### 2.1.2 3D-CAD

Eine Grundvoraussetzung für die Nutzung von Rapid-Prototyping-Verfahren ist die Modellierung der zu fertigenden Körper mittels CAD. Wesentlich ist dabei die Art der Geometriebeschreibung. Der Einsatz von Rapid Prototyping setzt eine dreidimensionale Beschreibung des zu fertigenden Bauteils voraus. Diese Beschreibung kann über drei verschiedene CAD-Modelltypen erreicht werden [SPUR 1997]:

#### **Drahtmodell**

Bei dieser Art der Modellierung werden die Bauteile durch Beziehungen zwischen Punkt- und Kantenelementen beschrieben. Während mit dieser Modellierung aufgrund fehlender Flächeninformationen eine Darstellung verdeckter Kanten möglich ist, sind virtuelle Kanten (z.B. Krümmungen) nicht sichtbar. Körper ohne Kanten (z.B. eine Kugel) sind als Drahtmodell nicht darstellbar.

#### **Flächenmodell**

Bei der Flächenmodellierung werden die Bauteile über die Außenflächen in Form von Punkten, Kurven und Flächen beschrieben. Bei der Beschreibung eines Körpers über Außenflächen ist zu

beachten, dass eine Zuordnung von Bauteilinnen- und Bauteilaußenseite erfolgt. Mit Hilfe eines Normalenvektors, der vom Inneren des Bauteils wegzeigt, wird diese Zuordnung realisiert. Aufgrund der unzureichenden Nachbarschaftsbeziehungen der einzelnen Flächen lässt sich das Volumen mathematisch nicht exakt definieren.

### **Volumenmodell**

Das Modellieren mittels Volumenmodellen eignet sich als Basis für das Rapid-Prototyping in besonderem Maße. Im Gegensatz zum Flächenmodell wird bei dem Volumenmodell die Ausrichtung des Volumens exakt definiert. Eine Zuordnung von Bauteilinnerem und -äußerem muss nicht erfolgen. Bei einer Volumenmodellierung durch das Grundkörpermodell werden die Bauteile mittels Verknüpfung verschiedener regelgeometrischer Körper (z.B. Kugeln, Zylinder, Quader) erzeugt. Diese Verknüpfungen können sowohl additiv als auch subtraktiv angewandt werden. Neben den regelgeometrischen Körpern können auch frei skalierbare Konturen, die um eine Achse rotieren, als rotationssymmetrische Grundkörper in die Verknüpfung einbezogen werden.

In der Praxis greifen alle etablierten 3D-CAD-Systeme auf eine Mischform beider Arten, einem sogenannten **Hybridmodell**, zurück. Dadurch lassen sich die jeweiligen Vorteile der unterschiedlichen Volumenmodelle vereinen [vgl. GEBHARDT 2000].

### **2.1.3 Reverse Engineering**

Das Fertigen von Bauteilen ohne ein Vorliegen digitaler 3D-Daten wird durch den Prozessschritt Reverse Engineering ermöglicht. Dies betrifft insbesondere die Frühphase der Produktentwicklung, die zum Teil von handgestalteten Modellen (z.B. Tonmodelle) aus dem Design gekennzeichnet ist. Eine Rückführung dieser nur physisch vorliegenden Bauteile in eine digitale Form wird mittels Reverse Engineering (RE) erreicht.

Neben klassischen physischen Bauteilen lassen sich auch Objekte aus medizinischen Daten rekonstruieren. Die bildgebenden Verfahren der Medizin (z.B. Computertomographie) bieten die Möglichkeit des Austausches von Daten, die mittels geeigneter Software-Systeme zu 3D-Daten aufbereitet werden können.

Als Hilfsmittel werden sogenannte 3D-Digitalisierer eingesetzt, die sich grundsätzlich in zwei Verfahrensgruppen unterteilen lassen [BERGERS 2002A]:

- berührende (takile) Messverfahren
- berührungslose (nicht-taktile) Messverfahren

Zu den berührenden Messverfahren zählt die Koordinatenmesstechnik, die mittels eines Tastsystems Kontakt zur Oberfläche des zu digitalisierenden Objektes herstellt. In der Praxis werden

dazu messende Tastsysteme eingesetzt, die mittels CNC-gesteuerter Koordinatenmessmaschinen ein automatisches Anfahren und Abfahren der Oberflächen ermöglichen. Jede Kontaktposition wird als ein Oberflächenpunkt gespeichert. Für das Erfassen von Bauteilen mit Freiformgeometrien ist eine Vielzahl von Oberflächenpunkten aufzunehmen, was jedoch mit einem erheblichen Aufwand verbunden sein kann [BERGERS 2002A].

Dem gegenüber stehen die berührungslosen Messverfahren, die eine Vielzahl von Messpunkten innerhalb einer kurzen Zeitspanne aufnehmen können [SPUR 1997]. In der Literatur werden diese Geräte als 3D-Laserscanner bezeichnet. Anwendungsbereiche sind unter anderem das Digitalisieren von Automobilkarosserien oder Haushaltsgeräten. Weitere Ansätze zur berührungslosen Vermessung von Objekten kommen aus der Bildverarbeitung (BV). Mittels geeigneter Beleuchtungseinrichtungen (z.B. Streifenmuster) sind BV-Systeme in der Lage, die Geometrie der Objektoberflächen zu beschreiben [GOM 2003]. Schwieriger ist dagegen die Ermittlung von Objektinformationen, die im Inneren des Bauteils liegen und durch die beschriebenen optischen und berührenden Messverfahren nicht erfasst werden können. Hier bieten sich Lösungen in Form der Röntgentomographie als zerstörungsfreies Messverfahren und das Cross Sectional Scanning (CSS) als zerstörendes Messverfahren an [BERGERS 2002A].

Die gewonnenen Objektinformationen in Form von Punktwolken werden mittels geeigneter Algorithmen in Flächen überführt (Flächenrückführung) und anschließend in standardisierte Datenformate konvertiert [vgl. FICHTNER o.J.]. Diese Datenformate lassen eine Weiterverarbeitung im Sinne der RP-Informationskette zu und werden im folgenden Abschnitt näher betrachtet.

#### **2.1.4 Schnittstellen und Datenformate**

Bei den Schnittstellen wird prinzipiell zwischen Schnittstellen zur Verbindung verschiedener Geräte (Hardwareschnittstellen) und denen zur Informationsübermittlung zwischen Programmen (Softwareschnittstellen) unterschieden. Die Ausführung von Hardwareschnittstellen orientiert sich an einer Datenübermittlung, die in der Regel keine Datenkonvertierung erforderlich macht. In der vereinfachten Darstellung der Informationskette nach Abbildung 2-2 spielt daher der Einfluss von Hardwareschnittstellen eine eher untergeordnete Rolle [BEUKE 1999].

Im Gegensatz dazu ist die Bedeutung der Softwareschnittstellen innerhalb der Informationskette des Rapid Prototyping besonders wichtig. Es wird dabei zwischen internen und externen Schnittstellen unterschieden. Während interne Softwareschnittstellen den Datenaustausch zwischen verschiedenen Modulen eines Programms (z.B. im CAD-System) ermöglichen, stellen die externen Softwareschnittstellen die Verbindung zwischen den Geometriedaten aus dem 3D-CAD-

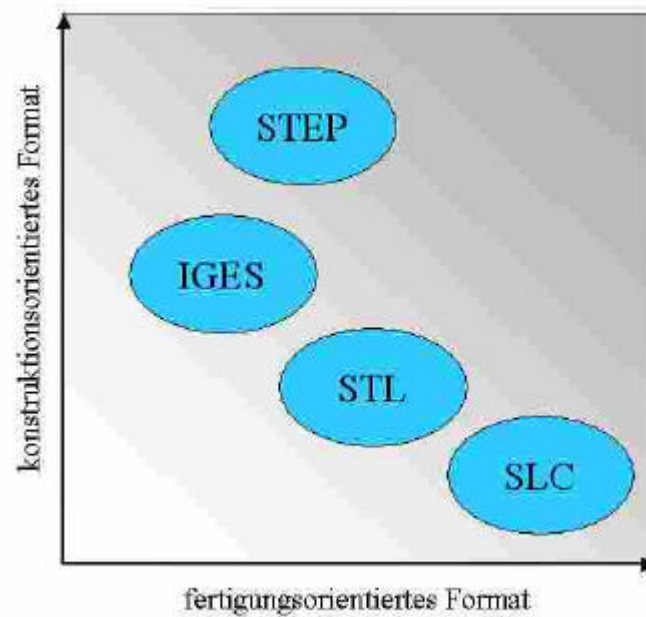


Abbildung 2-3 Einteilung: Datenformate im Rapid Prototyping

System oder dem Reverse Engineering und dem Rapid-Prototyping-Verfahren sicher. Hierzu ist eine Konvertierung der Daten in unterschiedliche Datenformate erforderlich. Nach [SPUR 1997] werden in einer erweiterten Form dieser Art, den Produktdatenschnittstellen, werden zusätzlich zu den reinen Geometriedaten Informationen zu organisatorischen und technologischen Abläufen ausgetauscht. Aus Sicht des Anwenders muss für einen erfolgreichen Fertigungsprozess ein Datenformat folgende Anforderungen erfüllen:

- Universelle Einsetzbarkeit,
- Keine geometrische Abweichungen,
- Minimum an Speicherbedarf,
- Informationen zu gestaltbezogenen Technologieparametern (z.B. Oberflächenqualität).

In der Vergangenheit haben sich eine Reihe von Datenschnittstellen etabliert, die mit ihren Eigenschaften jeweils nur einen Teil der Anforderungen an ein optimales Datenformat erfüllen können. Dazu zählen sowohl genormte als auch nicht genormte Formate, die je nach RP-Verfahren und Branche unterschiedlich eingesetzt werden [vgl. BEUKE 1999]. Zusätzlich lassen sich die Formate hinsichtlich des Anwendungsschwerpunktes unterteilen (vgl. Abbildung 2-3). Zu den wesentlichen Datenformaten im Bereich des Rapid Prototyping zählen:

- STL
- IGES

- SLC
- STEP

#### 2.1.4.1 STL-Format

Diese Datenschnittstelle steht im Zusammenhang mit der Entwicklung von Stereolithographieanlagen und hat sich in der Vergangenheit als eine Art Industriestandard etabliert. Das STL-Format gehört zwar zu der Gruppe der nicht-genormten Schnittstellen, ist aber aufgrund der frühzeitigen Veröffentlichung dieses Formates sehr weit verbreitet. In der Praxis lässt sich auf diese Weise eine herstellerunabhängige Datenübermittlung zwischen dem CAD-Bereich und den unterschiedlichen RP-Verfahren erreichen.

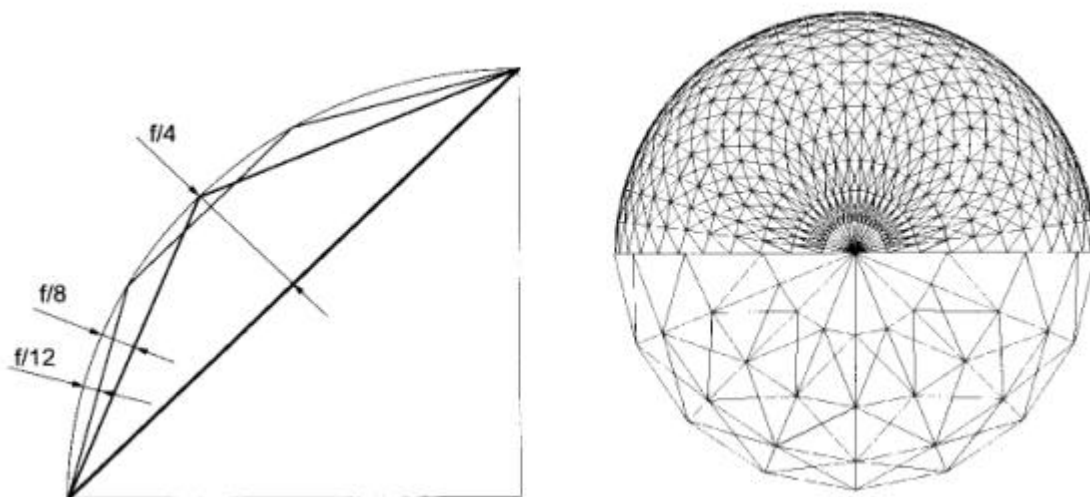


Abbildung 2-4 Fehlerbehaftete Formulierung eines Kreises durch STL-Format [GEBHARDT 2000]

Die Beschreibung der Bauteiloberfläche erfolgt mit Hilfe von Dreiecken (Triangulation). Die exakte Bauteiloberfläche kann bei gekrümmten Oberflächen mit Hilfe der Triangulation nur angenähert werden. Anhand von zwei Parametern kann die Genauigkeit des modellierten Bauteils beeinflusst werden. Zum einen kann die Gesamtqualität der erzeugten STL-Datei eingestellt werden, die mit einer möglichst großen Anzahl von Dreiecken erreicht wird (vgl. Abbildung 2-4). Die zweite Einstellmöglichkeit ist die Winkeltoleranz, die einen Einfluss auf die Erfassung und Darstellung von Details des Bauteils hat. Bei der Modellierung eines Kreises durch Triangulation ist die Abweichung durch den Sekantenfehler darstellbar. So führt beispielsweise eine Modellierung eines Kreises durch 4 Sekanten ( $f/4$ ) zu erheblichen Abweichungen, während bei einer Beschreibung durch 8 ( $f/8$ ) und 12 ( $f/12$ ) Sekanten eine wesentlich höhere Genauigkeit zu erzielen ist.

Eine möglichst genaue Formulierung der Geometrie von Körpern kann bei Bauteilen mit Freiformflächen zu sehr großen Datenmengen führen, die von den einzelnen RP-Systemen verarbeitet werden müssen. Gleichzeitig ist die Formulierung mittels STL-Format nur unidirektional anwendbar. Das bedeutet, dass Änderungen am Bauteil nicht vom STL-Format abgeleitet werden können, sondern nur am „Original“-Modell des verwendeten CAD-Systems vorgenommen werden können. Letztlich lässt sich mit Hilfe des STL-Formates nur eine Geometriebeschreibung des Bauteils erreichen. Zusätzliche gestaltbezogene Technologieparameter (z.B. Oberflächenqualität, Werkstoffe) können in diesem Zusammenhang nicht weitergegeben werden.

#### 2.1.4.2 IGES-Format

Die IGES-Schnittstelle (**I**nitial **G**raphics **E**xchange **S**pecification) ist eine nach ANSI-Norm (Y14.26M) standardisierte Geometrieschnittstelle. Ursprünglich ist diese Schnittstelle zum Austausch von Bauteilinformationen zwischen unterschiedlichen CAD-Systemen entwickelt worden. Daraus resultiert eine spezielle Schnittstellenstruktur, die durch ein IGES-Preprocessing und einem IGES-Postprocessing gekennzeichnet ist. Der Zweck des IGES-Preprocessing ist die Vorverarbeitung der Geometriedaten in ein übergeordnetes, allgemeines Format, welches mittels des IGES-Postprocessing wieder in ein systemspezifisches Format übersetzt wird. Im Rahmen der IGES-Spezifikation lassen sich die beschreibenden Elemente in drei Hauptgruppen einteilen [SPUR 1997]:

- Objektbeschreibung
- Strukturelemente
- vordefinierte Assoziationen

Neben den Elementen zur reinen Geometriebeschreibung werden in der Objektbeschreibung auch Informationen zur Modellierung angegeben. Dazu zählen sowohl Angaben zur Konstruktionshistorie als auch Informationen zu FEM-Modellen (Finite-Elemente-Methode). Zu den Strukturelementen gehören alle Informationen zum Aufbau der Konstruktionszeichnungen (z.B. Schriftarten, Farben). Vordefinierte Assoziationen dienen dazu, die externen Beziehungen der Zeichnungen in dem Datenformat zu hinterlegen. Mittels dieser Beziehungen lassen sich Technologieparameter zu den jeweiligen Bauteilen einbinden. Diese Eigenschaft kann jedoch zu umfangreichen Datensätzen führen, die in ihrer Gesamtheit häufig nicht erforderlich ist. Eine Einschränkung des Funktionsumfangs auf bestimmte Merkmale ist nicht möglich, so dass die Verarbeitung dieser Datensätze mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist.

Das IGES-Format zählt zu den weitverbreiteten Schnittstellenformaten, ist aber aufgrund häufiger Versionswechsel mit dem Auftreten von Inkompatibilitäten verbunden. Von einer universel-

len Einsetzbarkeit kann daher nur eingeschränkt ausgegangen werden. Hinsichtlich der geringen geometrischen Abweichungen dieses Datenformates ist IGES als vorteilhaft einzustufen [vgl. GEBHARDT 2000, SPUR 1997].

#### 2.1.4.3 SLC-Format

Das SLC-Format (**S**lice **L**ayer **C**ontour) ist ein verhältnismäßig junges Schnittstellenformat und sehr nahe am eigentlichen Fertigungsprozess ausgerichtet. Dabei wird das Bauteil in parallele Schichten zerlegt, welche jeweils ein zweidimensionales Schnittbild des Bauteils beinhalten. Die Schnittbilder der Bauteile werden auf verschiedene Inhalte/Informationen analysiert (vgl. Abbildung 2-5). Die geometriebeschreibenden Konturen (äußere und innere Berandung) werden bei gekrümmten Konturen approximiert, so dass auch bei diesem Datenformat mit Genauigkeitsverlusten zu rechnen ist. Das Zerlegen des Körpers in parallele Schichten bedeutet gleichzeitig, dass im Vorfeld einer Anwendung des SLC-Formates die Baustrategie des Bauteils festgelegt werden muss. Dazu sind bereits bei der Erstellung von SLC-Dateien Kenntnisse über das einzusetzende RP-Verfahren notwendig. Eine Änderung der Baustrategie in Form einer anderen Aufbau- und Anbaurichtung des Modells verlangt eine komplette Neuerstellung der SLC-Datei. Da die Schichtinformationen nur zweidimensional sind, muss für eine dreidimensionale Beschreibung des Bauteils der Abstand zwischen den benachbarten Schichten bekannt sein. Je nach Auflösung machen sich diese Abstände bei Körpern mit unterschiedlichen äußeren Berandungen als Treppenstufeneffekt negativ bemerkbar. Analog zum STL-Format ist auch diese Schnittstelle als unidirektional anzusehen. Auch Informationen hinsichtlich zusätzlicher technologischer Eigenschaften sind mit diesem Format nicht zu übertragen [vgl. SPUR 1997].

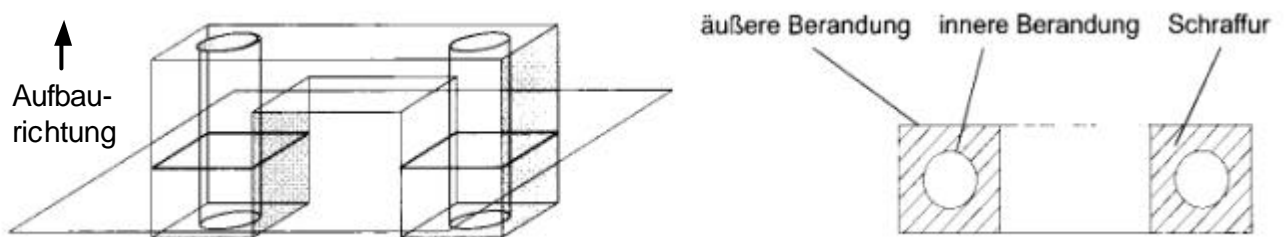


Abbildung 2-5 Konturinformationen im SLC-Format [GEBHARDT 2000]

#### 2.1.4.4 STEP-Format

Das STEP-Format (**S**tandard for the **E**xchange of **P**roduct Model **D**ata) gehört zu der Gruppe der Produktdatenschnittstellen. Hier liegt der Fokus auf dem Austausch von Produktdaten, die über den gesamten Produktlebenszyklus von der Entwicklung bis zur Entsorgung eines Produktes erfasst werden. Das Format ist nach ISO 10303 international genormt. Aufgrund der Kom-

plexität und der Tatsache, dass es sich um eine relativ junge Schnittstelle handelt, ist die Verbreitung im Rapid-Prototyping-Bereich verhältnismäßig gering.

Erste Ansätze einer Realisierung einer optimalen RP-Prozessschnittstelle werden in [SPUR 1997] beschrieben: Mit Hilfe des vom IPK Berlin entwickelten Planungsbausteins TERAP (**TE**chnological Planning System for **RAP**id Prototyping Processes) soll durch Integration in eine CAD-Systemumgebung eine Steigerung der Bauteilgenauigkeit und eine Beschleunigung der Prototypenfertigung erreicht werden. Dieser Baustein geht über die Funktion einer reinen Schnittstelle weit hinaus und stellt praktisch eine eigene Planungsumgebung dar. Durch die Implementierung weiterer Schnittstellen in TERAP werden einerseits die geometriebeschreibenden Daten eingebunden, zum anderen werden über Standardschnittstellen (SDAI – **S**tandard **D**ata **A**ccess **I**nterface) die notwendigen Technologieparameter einbezogen [vgl. SPUR 1997].

## 2.2 Überblick industriell eingesetzter generativer RP-Verfahren

In den letzten Jahren ist eine Vielzahl unterschiedlicher Anbieter mit teilweise ähnlichen generativen Fertigungsverfahren in den RP-Markt eingetreten. Der Begriff „generativ“ wird in der Literatur für die Art der Formgebung benutzt. Im Gegensatz zu den klassischen trennenden Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (z.B. Drehen, Fräsen, Erodieren) erfolgt die Formgebung durch einen gezielten Materialaufbau in definierter Größe. Die Idee einer Formgebung durch Materialaufbau ist nicht neu, sondern wurde in der Vergangenheit unter anderen Gesichtspunkten angewandt (z.B. Auftragsschweißen zur Reparatur von Wellen oder Formen). Teilweise sind die Funktionsprinzipien einzelner generative Verfahren sehr ähnlich und unterscheiden sich nur durch die Art der Ausgangsmaterialien.



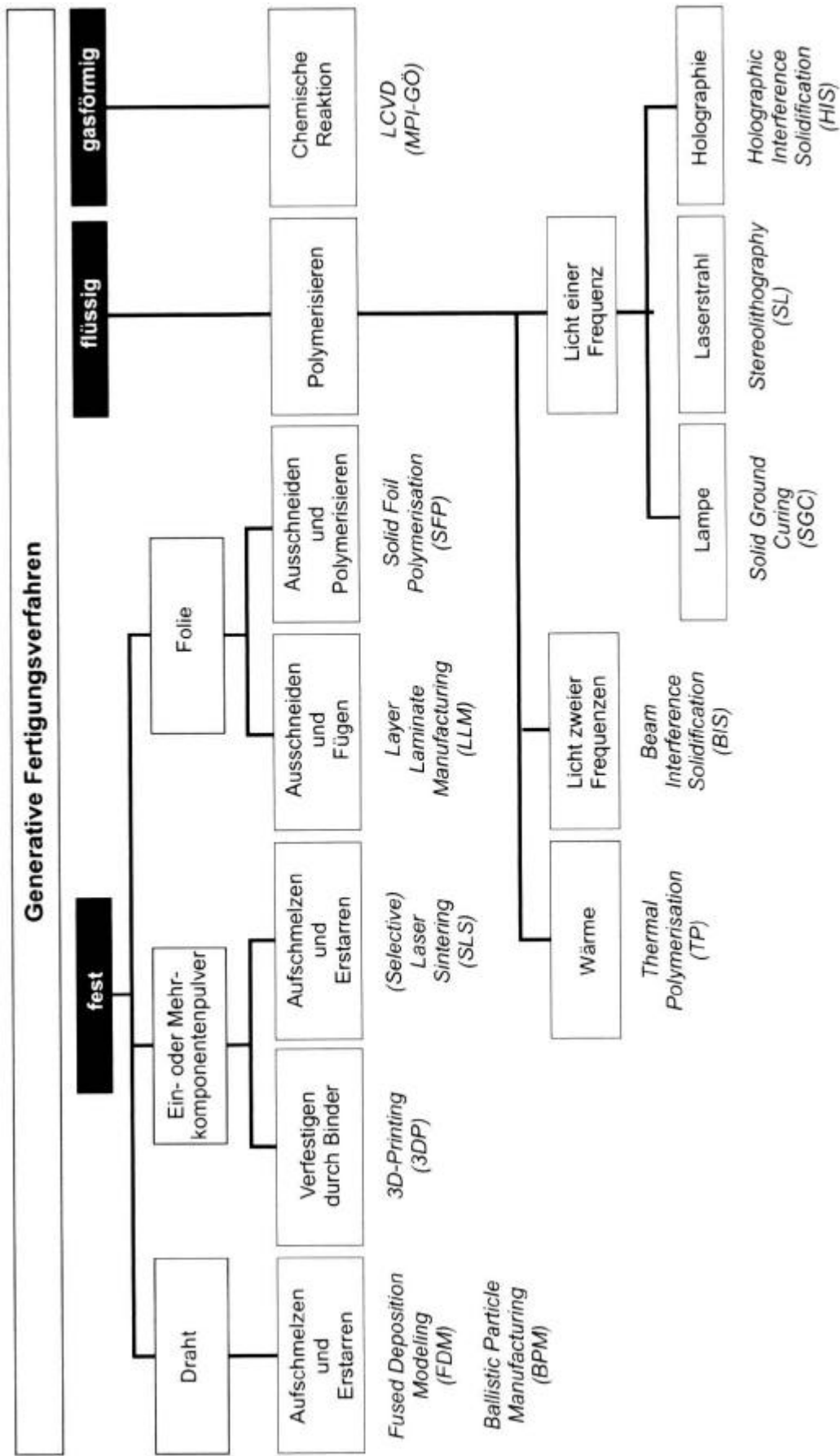


Abbildung 2-6

Klassifizierung generativer RP-Verfahren nach dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials [GEBHARDT 2000]

Zusätzlich haben sich Namen für einzelne Verfahren etabliert, die sich aus den Produktbezeichnungen der RP-Maschinenhersteller ableiten. Auf den ersten Blick ist daher eine Einteilung der

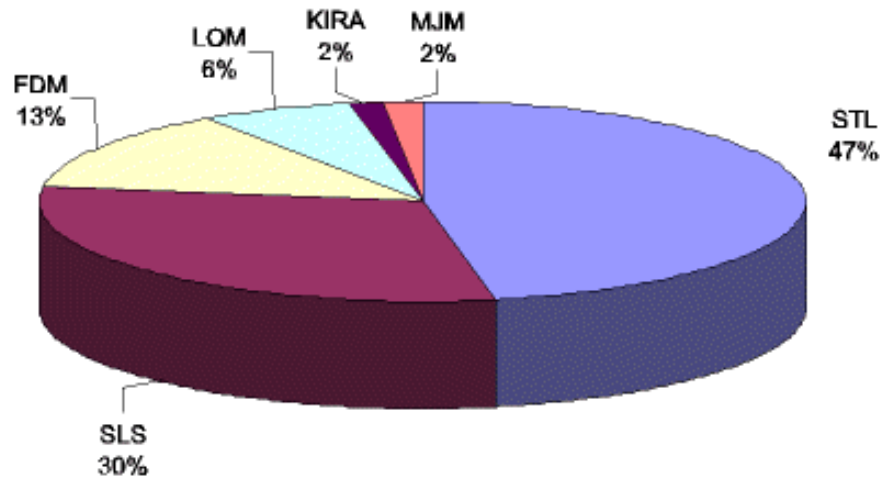


Abbildung 2-7 Marktanteile generativer RP-Verfahren bei Dienstleistern, in Prozent [RP-NET 2002]

RP-Verfahren nicht trivial. Die Einteilung von Rapid-Prototyping-Verfahren wird in der Literatur unterschiedlich dargestellt. Während stark anwendungsbezogene Einteilungen die Verfahren in der Regel nach Zielwerkstoffen klassifizieren, wird in [GEBHARDT 2000] eine Klassifizierung von Rapid-Prototyping-Verfahren nach dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials vorgenommen (vgl. Abbildung 2-6).

Unter den generativen Verfahren haben sich in der industriellen Praxis folgende RP-Verfahren etabliert:

- Stereolithographie (STL)
- Selektives Lasersintern (SLS)
- Fused Deposition Modelling (FDM)
- Layer Laminate Manufacturing (LLM)

Diese Auswahl enthält nach [RP-NET 2002] die meistverkauften Rapid-Prototyping-Verfahren. Allein die drei RP-Verfahren STL, SLS und FDM besitzen einen Marktanteil im Bereich der dienstleistenden RP-Anbieter von 90 % (vgl. Abbildung 2-7). Die Verfahren Laminated Object Manufacturing (LOM) und KIRA<sup>2</sup> zählen zu der Gruppe der Layer Laminate Manufacturing-Verfahren, während das MultiJet Modelling (MJM) der Gruppe der FDM-Verfahren zugeordnet werden kann.

<sup>2</sup> ein mit LOM verwandtes Rapid-Prototyping-Verfahren

Eine Vielzahl weiterer RP-Verfahren sind zwar technologisch gesehen aus dem Stadium Labormaßstab heraus, eine bemerkenswerte Verbreitung dieser Verfahren ist jedoch nicht zu verzeichnen. In [GEBHARDT 2000] und in [WOHLERS 1999] sind nahezu alle bekannten Verfahren genannt. Im folgenden werden die etablierten generativen RP-Verfahren genauer diskutiert und abschließend miteinander verglichen.

### 2.2.1 Stereolithographie

Das RP-Verfahren Stereolithographie (STL) ist als erstes kommerziell erhältliches Rapid-Prototyping-Verfahren im Jahr 1987 von dem Unternehmen 3D Systems angeboten worden. Nahezu die Hälfte aller installierten RP-Maschinen arbeitet nach dem Prinzip der Stereolithographie (vgl. Abbildung 2-8).

Das Funktionsprinzip der Stereolithographie beruht auf der Verfestigung flüssiger Monomere/Harze durch Polymerisation. Der Vorgang Polymerisation wird mittels einer Belichtung durch einen Laser ausgelöst. Trifft der Laserstrahl auf flüssiges Monomer tritt eine Verfestigung im unmittelbaren Bereich des Laserstrahls ein. Aufgrund der direkten lokalen Verfestigung ist mit diesem Verfahren nur eine Polymerisation an der Monomeroberfläche zu erzielen. Im Ergebnis werden zweidimensionale Schichten erzeugt, die eine Verbindung zur ersten Schicht unterhalb der Monomeroberfläche aufweisen. Für eine erfolgreiche Anwendung dieses Verfahrens sind eine

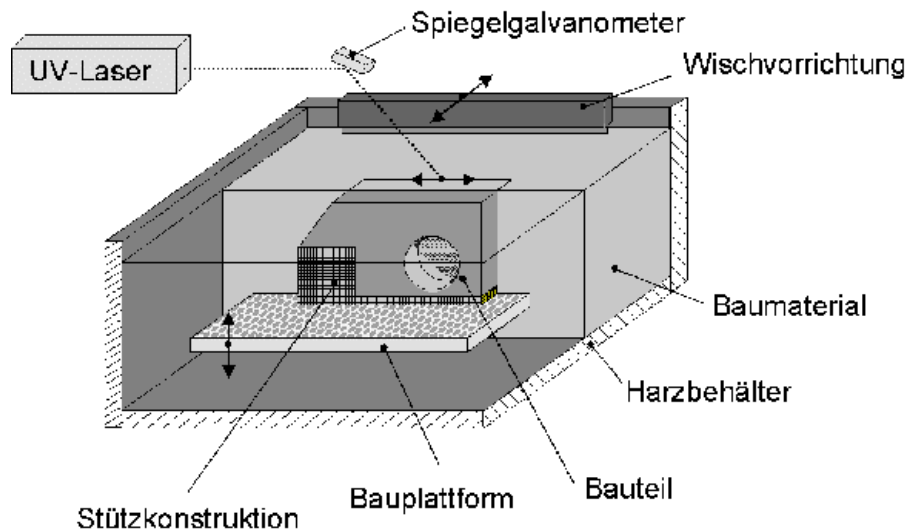


Abbildung 2-8 Prinzipieller Aufbau einer STL-Maschine [RP-NET 2002]

Reihe von Prozessparametern einzuhalten. Dazu gehören neben der Leistung des Lasers auch die Geometrie des Laserstrahls, die Belichtungsdauer und die Empfindlichkeit des Monomers. Stereolithographie-ähnliche Verfahren basieren zum Teil auf anderen Lichtquellen, die eine Polymerisationsreaktion hervorrufen (z.B. UV-Lampen). In der Praxis spielen jedoch diese abgewandel-

ten Verfahren eine untergeordnete Rolle. In Abbildung 2-8 ist der prinzipielle Aufbau einer STL-Maschine dargestellt.

Technologisch bedingt werden die Bauteile beim STL-Verfahren mittels angepasster Stützen auf der Bauplattform fixiert. Diese Elemente werden außerdem zur Abstützung von Bauteilabschnitten eingesetzt, um ein Absinken polymerisierter Schichten<sup>3</sup> zu vermeiden. Das Entfernen dieser Stützen wird in einem sogenannten Postprocessing weitestgehend manuell durchgeführt. Je nach Komplexität der Bauteile und der damit verbundenen Anzahl und Art von Stützkonstruktionen kann das Entfernen mit einem erheblichen Aufwand verbunden sein. Gleichzeitig birgt das manuelle Entfernen die Gefahr einer Verletzung der Bauteiloberfläche. Ferner wird der innere Zusammenhalt der Bauteile nach der Prozesspolymerisation in der Regel nicht vollständig erreicht. Eine nachträgliche Vernetzung der Bauteilstruktur wird durch Aushärtung der Bauteile in speziellen UV-Öfen sichergestellt [vgl. GEBHARDT 2000].

Je nach Anbieter liegen die erreichbaren Genauigkeiten des Verfahrens zwischen 0,05 und 0,25 mm. Die im Postprocessing durchgeführten Schritte können jedoch zu einer nachträglichen Änderung der Bauteilgeometrie (z.B. Verzug aufgrund der Nachvernetzung) und damit zu Ungenauigkeiten führen.

### 2.2.2 Selektives Lasersintern

Das Funktionsprinzip des selektiven Lasersinterns (SLS) ist ähnlich dem STL-Verfahren. Der Aufbau der SLS-Maschine ist in Abbildung 2-9 dargestellt. Ein Laserstrahl führt dem Ausgangsmaterial zeitlich und örtlich beschränkt Energie zu. Dieser Energieeintrag führt zu einer Versinterung der Materialien. Voraussetzung für den Sinterprozess ist das Vorhandensein von Material in Pulverform. Der Unterschied zum STL-Verfahren besteht jedoch in der Anwendung anderer Ausgangsmaterialien. Während sich das STL-Verfahren auf die Verfestigung von flüssigem Monomer (auf Kunststoffbasis) beschränkt, lassen sich mittels des SLS-Verfahrens neben Kunststoffen auch Metalle oder Sande verarbeiten. Ein wesentlicher Unterschied besteht in der Fertigung von Bauteilen mit auskragenden Bereichen, die beim SLS nicht gestützt werden müssen, da bereits das Pulverbett eine Stützwirkung beinhaltet.

In der Praxis finden zwei verschiedenen Verfahrensarten des Lasersinterns Anwendung:

---

<sup>3</sup> Die Dichte nimmt aufgrund der Polymerisation zu, so dass ungestützte polymersierte Elemente im Harz absinken würden.

- Direktes Lasersintern
- Indirektes Lasersintern

Für Kunststoffe und Metalle ist ein direkter Sinterprozess möglich. Die Partikel werden aufgrund der Belichtung durch den Laserstrahl an- oder aufgeschmolzen. Benachbarte aufgeschmolzene Bereiche werden auf diese Weise miteinander verbunden. Der Sinterprozess erfolgt ohne Druck, so dass mit einer Porosität bei den Bauteilen gerechnet werden muss. Das indirekte Lasersintern wird hauptsächlich für die Materialien Metall und Sand angewandt. Es handelt sich hier um ein zweistufiges Verfahren, das im ersten Schritt eine geometrische Struktur erzeugt und im zweiten Schritt das Material versintert. Grundlage ist präpariertes Ausgangsmaterial in Form von Metall-

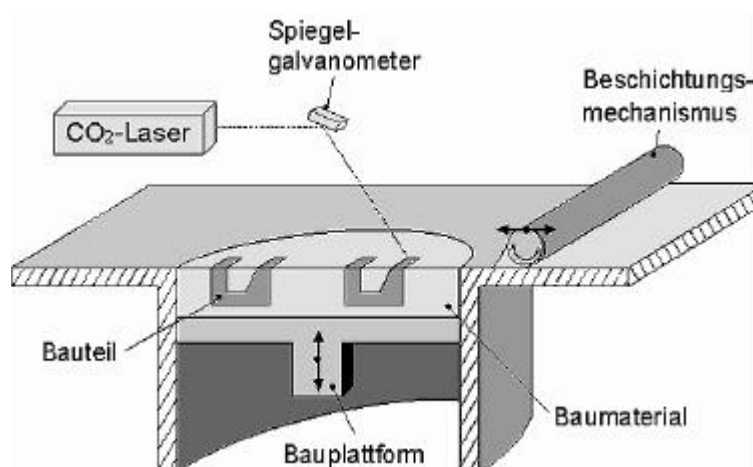


Abbildung 2-9 Prinzipieller Aufbau SLS-Maschine [RP-NET 2002]

pulver oder Sand, das mit einer Kunststoffschicht umhüllt ist (Polymercoating). Die Kunststoffschicht der Partikeln wird vom Laserstrahl angeschmolzen. Der Zusammenhalt der Bauteile resultiert im ersten Schritt aus den Verbindungen der Kunststoffoberflächen. Das Ergebnis ist ein hochporöses Bauteil mit geringen mechanischen Festigkeiten, dem sogenannten Grünling. Im zweiten Schritt wird dem entstandenen Grünling in einem Ofen die Kunststoffummantelung ausgetrieben und das freigelegte Grundmaterial bei hohen Temperaturen versintert. Dieser zweite Sinterprozess führt zu Schwindungen und damit zu ungenauen Bauteilen [vgl. LORENZEN 1997, GEBHARDT 2000]

Zur Reduzierung der auftretenden Porositäten und zur Steigerung der mechanischen Festigkeiten werden beiden Arten des Lasersinterns sogenannte Infiltrationen nachgeschaltet. Je nach gewünschten Werkstoffeigenschaften kommen zur Infiltration verschiedene Materialien zum Einsatz. Das Spektrum der Infiltrationswerkstoffe reicht von Epoxidharz bis hin zu Kupfer- und Bronzelegierungen [vgl. LORENZEN 1997]

Trotz des Umstands, dass beim SLS auf Stützkonstruktionen verzichtet werden kann, ist das

Postprocessing der Bauteile nicht ganz unproblematisch. Aufgrund der Anschmelzvorgänge beim Sintern wird freies Pulver leicht angesintert und führt zu „Anbackungen“ am Bauteil. Das Entfernen der angesinterten Bereiche ist manuell durchzuführen und kann zu Ungenauigkeiten des Bauteils führen. Die erreichbaren Fertigungsgenauigkeiten werden für das Lasersintern in der Literatur mit ungefähr 0,1 mm angegeben [vgl. BERGERS 2002B]. Auch das Problem der Schwindung beim Sinterprozess ist noch nicht gelöst. Teilweise ist eine Minimierung des Effektes der Schwindung durch Berücksichtigung sogenannter Schwindungs-Faktoren möglich, eine Vermeidung geometrischer Abweichungen durch Schwindung ist in der Praxis noch nicht erreicht<sup>4</sup>.

### 2.2.3 Fused Deposition Modelling<sup>5</sup>

Das Fused Deposition Modelling kann vereinfacht als spezielles Extrusionsverfahren angesehen werden. In einer beheizten Düse wird das Baumaterial als drahtförmiger Kunststoff aufgeschmolzen und mittels eines Plottermechanismus an definierten Koordinaten aufgetragen. Der prinzipielle Aufbau einer FDM-Maschine ist in Abbildung 2-10 dargestellt. Analog zum STL-

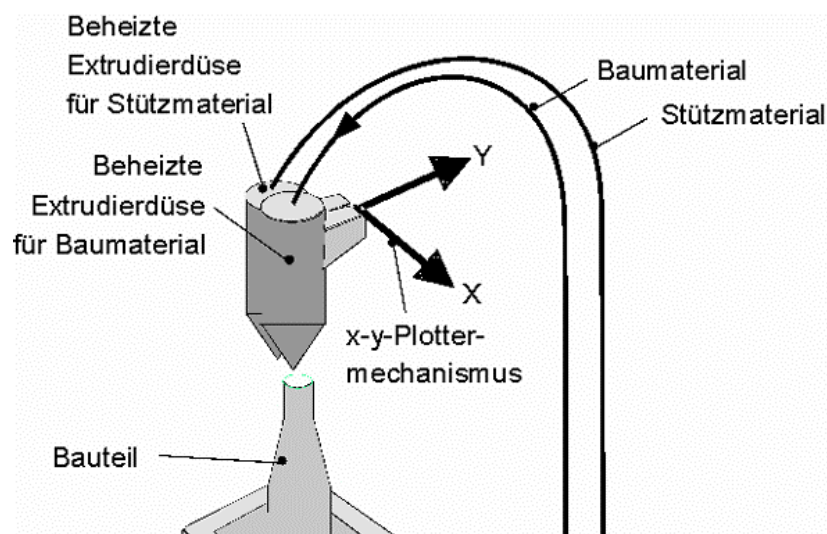


Abbildung 2-10 Prinzipieller Aufbau einer FDM-Maschine [RP-NET 2002]

Verfahren müssen auskragende Bauteilbereiche abgestützt werden. Dazu wird beim FDM-Verfahren ein spezielles Stützmaterial verarbeitet, das in der gleichen Weise wie das Baumaterial

<sup>4</sup> Briem, T.: persönliche Auskunft, Duisburg 10.12.2002

<sup>5</sup> Das Fused Deposition Modelling ist ein Herstellungsverfahren der Firma STRATASYS und zählt zu der Gruppe der Fused-Layer-Modelling-Verfahren (FLM) und wird an dieser Stelle stellvertretend für die FLM-Verfahren angegeben.

mittels einer zusätzlichen Extrusionsdüse verteilt wird. Die einsetzbaren Baumaterialien reichen vom Feingusswachs bis zum ABS-Kunststoff. Als Stützmaterial wird ein sprödbrechender Kunststoff verwendet.

Geometrische Abweichungen ergeben sich aufgrund der minimalen Strangbreite und der minimalen Schichtdicke. Die Strangbreite in  $xy$ -Richtung ist abhängig vom Abstand zwischen dem Extrudierkopf und der vorangegangenen Schicht und dem Volumenstrom des zugeführten Baumaterials. Für Schichtabstände zwischen 0,05 und 0,762 mm werden Strangbreiten von 0,254 bis 2,54 mm angegeben [GEBHARDT 2000]. Damit treten bei der Fertigung von Bauteilen mit filigranen Bereichen Schwierigkeiten auf. Auch die Festigkeit der Bauteile hängt in erster Linie von der Verbindung zwischen den einzelnen Bauteilschichten ab. Die erreichbaren Festigkeiten des Bauteils können von der Festigkeit des Baumaterials teilweise erheblich abweichen.

#### 2.2.4 Layer Laminate Manufacturing

Als Layer-Laminate-Manufacturing-Verfahren werden diejenigen Verfahren bezeichnet, welche die jeweiligen Schichtinformationen des Bauteils auf sehr dünne Schichten nachbilden und diese Schichten miteinander verbinden. Die Nachbildung der Schichtinformationen bezieht sich in der Regel auf die äußere Berandung der Bauteile und kann sowohl über Laser oder mittels formgebender Werkzeuge erzeugt werden. In der Industrie hat sich das Laminated Object Manufacturing (LOM) der Firma Helisys als Synonym für das LLM durchgesetzt. Das Verfahrensprinzip wird anhand des LOM-Verfahrens in Abbildung 2-11 dargestellt. Der Laser unterteilt das Fo-

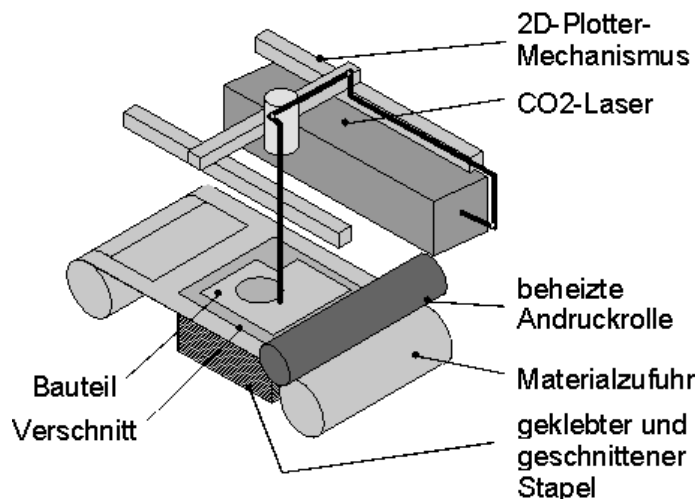


Abbildung 2-11 Prinzipieller Aufbau LOM-Maschine [RP-NET 2002]

lienmaterial in Strukturen, die zum Bauteil gehören und den sogenannten Verschnitt. Die dem Verschnitt zugeordneten Bereiche müssen in Anschluss an den Fertigungsprozess entfernt werden. Dazu werden diese Bereiche in kleine Quadrate geschnitten, um eine einfachere Entnahme

des Modells zu ermöglichen. Nach dem Ausarbeiten der Strukturen wird die aktuelle Folie mit dem darunterliegenden Folienstapel verbunden. Beim LOM-Verfahren wird dazu eine beheizte Rolle eingesetzt, die einen Kleber in der präparierten Folie aktiviert und auf den Folienstapel presst. Als Materialien kommen grundsätzlich alle als Folie verfügbaren Materialien in Betracht, die sich formgebend bearbeiten und fügen lassen. In der Literatur sind daher neben Papier und Kunststoff auch Keramik-Composites und auch Metalle erwähnt [GEBHARDT 2000].

Technologisch bedingt sind mittels der LLM-Verfahren hohle Bauteilstrukturen nur bedingt realisierbar. Theoretisch sind innere Stützelemente in Form von Verschnitt denkbar, jedoch lassen sich diese nachträglich nicht mehr entfernen. Hinsichtlich des Postprocessing ist das Entfernen des äußeren Verschnitts je nach Material als durchaus aufwändig zu bezeichnen. Insbesondere ist bei dem LOM-Verfahren zu beachten, dass die stark wasseranziehenden Papiermodelle an den Kanten und Ecken nicht auffächern [GEBHARDT 2000]. Die erreichbaren Genauigkeiten des Verfahrens sind abhängig von der Dicke der Folien (z-Richtung) und der Präzision der Einrichtung für die x-y-Richtung. In der Literatur wird für das LLM eine Bauteilgenauigkeit von ungefähr 0,25 mm angegeben.

### **2.2.5 Controlled Metal Build-Up**

Im Zusammenhang mit generativen RP-Verfahren wird auch zunehmend das Controlled Metal Build-Up (CMB) genannt [vgl. GEBHARDT 2000]. Dieses Verfahren wurde am Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie (IPT) entwickelt und ermöglicht durch die integrierte Verwendung von Laserauftragsschweißen und Hochgeschwindigkeitsfräsen (HSC) den schichtweisen Aufbau von Stahl. Vorwiegend findet dieses Verfahren Anwendung in der Änderung oder Reparatur von Werkzeugen oder Gesenken.

Im Gegensatz zum Lasersintern werden hier Schichten mit einer Materialdichte von 100 % erzeugt. Der Verfahrensablauf erfolgt in zwei Schritten:

1. Auftragsschweißen von Material auf einem definierten Querschnitt.
2. Plan- und Konturfräsen der aufgeschweißten Schicht.

Im Hinblick auf die erreichbare Genauigkeit und Oberflächenqualität wird dieses Verfahren als vorteilhaft eingestuft [vgl. ECKSTEIN 2002]. Eine Begründung hierfür ist in der Anwendung des Fräsens als formgebendes Element zu finden.

Ähnlich zu den vorangegangenen RP-Verfahren kann jedoch auch bei diesem Verfahren bei der Fertigung von Bauteilen mit Hinterschneidungen auf geeignete Stützkonstruktionen nicht verzichtet werden.



## 2.3 Klassifizierung nach funktionalen Gesichtspunkten

In der vorliegenden Arbeit wird als eine andere Art der Klassifizierung von Verfahren zur Fertigung von Prototypen die Einteilung nach funktionalen Gesichtspunkten vorgeschlagen (vgl. Abbildung 2-12). So lassen sich anhand einer Funktionsanalyse drei grundlegende Funktionen bei der Fertigung von Prototypen ableiten. Diese grundlegenden Funktionen können - je nach Verfahrensprinzip – sowohl in unterschiedlicher chronologischer Reihenfolge als auch in einem simultanen Ablauf einzelner Schritte auftreten. Die Anzahl an Fertigungsschritten kann als Maß

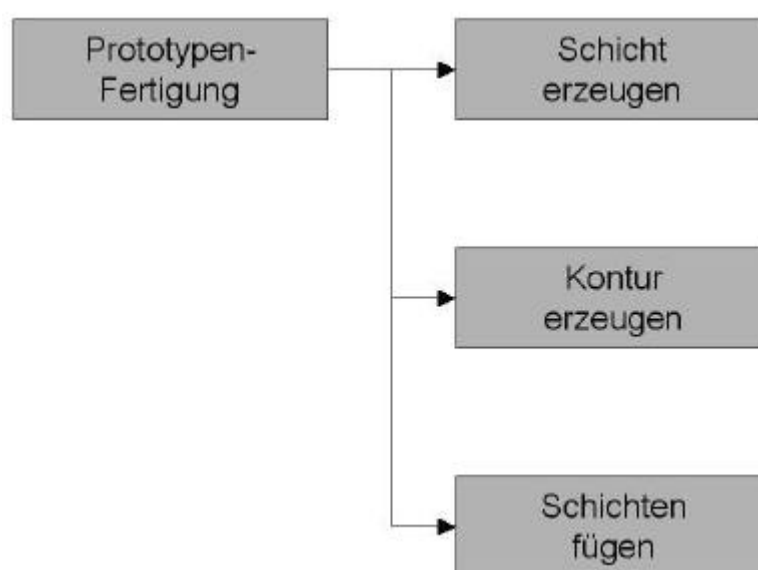


Abbildung 2-12 Funktionsanalyse Prototypen-Fertigung

für die Generativität von Fertigungs- und damit auch RP-Verfahren herangezogen werden. Bei den einschrittigen Verfahren sind alle Anforderungen an rein generative Fertigungsverfahren erfüllt. Ein klassisches Beispiel für ein einschrittiges RP-Verfahren ist die Stereolithographie.

Bei zwei- und dreischrittigen Verfahren sind einzelne Schritte während der Fertigung zeitlich versetzt und auch technologisch verschieden. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades dieser Verfahren ist jedoch häufig kein Eingriff seitens der Anwender notwendig. Oberflächlich betrachtet sind im Ergebnis für den Anwender bei diesen RP-Verfahren keine Unterschiede zu den einschrittigen Verfahren feststellbar, so dass diese Fertigungsverfahren auch als quasi-generativ bezeichnet werden. Zu den zweischrittigen Verfahren zählt beispielsweise der Controlled Metal Build-Up (CMB). Unter den oben getroffenen Aussagen zur Generativität von RP-Verfahren lässt sich das Layer Laminate Manufacturing (LLM) als dreischrittiges Verfahren den quasi-generativen RP-Verfahren zuordnen. Nach [IFU 2001] zählt dieses Verfahren jedoch zu den generativen RP-Verfahren, was letztlich die uneinheitliche Klassifizierung der RP-Verfahren

unterstreicht. Unter der Voraussetzung eines schichtweise aufgebauten Bauteils kann die Fertigung von Bauteilen mittels Fräsen auch als quasi-generativ gezeichnet werden.

Eine Klassifizierung der bedeutenden RP-Verfahren ist in Tabelle 2-1 dargestellt:

<b>RP-Verfahren</b>	<b>1-Schritt-Verfahren</b>	<b>2-Schritt-Verfahren</b>	<b>3-Schritt-Verfahren</b>	<b>Art des RP-Verfahrens</b>
Stereolithographie				<b>generativ</b>
Selektives Lasersintern				
Fused Deposition Modelling				
Controlled Metal Build-Up				<b>quasi-generativ</b>
Layer Laminate Manufacturing				
Fräsen				

Tabelle 2-1 Klassifizierung der RP-Verfahren nach der Anzahl an Prozessschritten

## 2.4 Einteilung von Rapid Prototyping nach konventionellen Fertigungsverfahren

Die generativen und quasi-generativen Rapid-Prototyping-Verfahren (vgl. Kapitel 2.2) setzen sich grundsätzlich aus konventionellen Fertigungsverfahren zusammen. Die grundlegenden Fertigungsverfahren sind nach DIN 8580 in sechs verschiedene Fertigungshauptgruppen unterteilt (siehe Abbildung 2-13).

Während die rein generativen RP-Verfahren eine Kombination der Hauptgruppen **Fügen** und **Stoffeigenschaften ändern** darstellen, kennzeichnet die quasi-generativen RP-Verfahren die Kombination aus **Trennen** und **Fügen**. Als ein Beispiel für ein quasi-generatives Verfahren kann hier das LOM-Verfahren angegeben werden, das die Hauptfunktion „Kontur erzeugen“ mittels unterschiedlicher trennender Verfahren (z.B. Laserschneiden, Wasserstrahlschneiden) erfüllt.

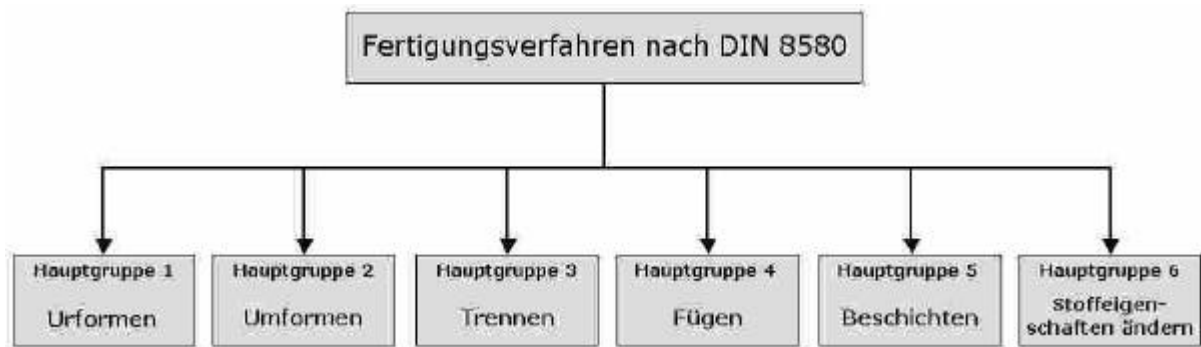


Abbildung 2-13 Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580

Die Hauptgruppe der trennenden Fertigungsverfahren lässt sich in sechs Untergruppen unterteilen:

- Zerteilen
- Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide
- Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide
- Abtragen
- Zerlegen
- Reinigen

Von diesen sechs Untergruppen haben sich für die hauptsächliche Formgebung in der industriellen Praxis zwei Gruppen als geeignet erwiesen. Das Erodieren aus der Untergruppe der abtragenden Fertigungsverfahren ist ein häufig eingesetztes Fertigungsverfahren im Formenbau [vgl. WZL 2001]. Diese Eigenschaft wird im Bereich des Rapid Tooling genutzt, um Formen mit komplexen Geometrien zu fertigen. Des weiteren werden Erodierverfahren auch für die Fertigung feiner Oberflächenstrukturen (z.B. Kühlstrukturen von Turbinenschaufeln) eingesetzt, die mittels spanender Fertigungsverfahren nicht zu erzeugen sind.

Den größeren Anteil an der Fertigung von Prototypen mittels trennender Fertigungsverfahren hat das Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide. Für die hauptsächliche Formgebung haben sich folgende Verfahren durchgesetzt:

- Bohren
- Drehen
- Fräsen

Während eine Fertigung von Prototypen durch Bohren aufgrund der erforderlichen Formenvielfalt ausgeschlossen werden kann, ist eine Fertigung von Prototypen durch Drehen (bei rotations-symmetrischen Bauteilen) und Fräsen denkbar. Insbesondere das Fertigungsverfahren Fräsen ist zur Herstellung von Prototypen grundsätzlich geeignet, da im Vergleich zum Drehen und Erodieren die erreichbare Formenvielfalt signifikant höher ist. Im folgenden beschränkt sich daher die Betrachtung von konventionellen Fertigungsverfahren auf das Fräsen. Grundsätzlich ist das Fertigen von Prototypen durch Fräsen in drei Schritte unterteilt:

1. Erzeugung und Vorbereitung der Bauteilschichten.
2. Erzeugung der Kontur der einzelnen Bauteilschichten.
3. Fügen der Bauteilschichten.

Diese Verfahrensschritte sind getrennt voneinander zu betrachten und orientieren sich technologisch gesehen am eingesetzten Werkstoff.

## 2.5 Fräsen als quasi-generatives Rapid-Prototyping-Verfahren

Die Fertigung von Bauteilen mit komplexen Geometrien ist jedoch mit einigen Hindernissen verbunden, die im Verlauf dieses Kapitels eingehend diskutiert werden. Dazu gehören neben den rein fertigungstechnischen Aspekten auch die Aufbereitung der Konstruktionsdaten, die erst eine entsprechende Fertigung durch Fräsen ermöglichen.

Aufgrund der umfassenden Erfahrung ist die Prozessbeherrschung bei den konventionellen Fertigungsverfahren sicherer als bei den generativen Verfahren, die sich auf eine Erfahrungsbasis von „nur“ 15 Jahren stützen können. Als Werkstoffe kommen beim Fräsen alle spanend zu bearbeitenden Werkstoffe in Betracht, während sich die Werkstoffvielfalt der generativen RP-Verfahren auf einzelne spezielle Materialien reduziert. Dadurch sind beim Fräsen Möglichkeiten gegeben, Werkstoffe mit definierten Materialeigenschaften zu bearbeiten, die sich für den angestrebten Verwendungszweck eignen.

Die zweiseitige Bearbeitung von Körpern mit Regelgeometriecharakter stellt im Prinzip keine Schwierigkeit dar. So können beispielsweise Körper mit parallelen Flächen in NC-Spanntischen und zylindrische Körper in Prismen fixiert und bearbeitet werden. Zusätzlich existieren eine Reihe verschiedener Spanntechniken, die eine umfassende Bearbeitung erlauben:

- Vakuumspanntische
- Magnetische Spannvorrichtungen
- Fixierung durch Vereisung

Schwieriger gestaltet sich das Bearbeiten von Körpern mit Freiformflächen, die nicht mit klassischen Hilfsmitteln gespannt werden können. Hier werden sogenannte Hilfsgeometrien eingesetzt, die einerseits den Körper möglichst reproduzierbar ausrichten und andererseits Kräfte und Momente während der Bearbeitung an die Spannvorrichtung weiterleiten.

Während der eigentliche Formgebungsprozess durch Fräsen keine direkten Schwierigkeiten beinhaltet, erweist sich der anschließende Fügeprozess als problematisch. Neben der Anforderung einer exakten Positionierung der einzelnen Schichten untereinander muss das Fügeverfahren auf die eingesetzten Materialien und die zu erreichenden Festigkeiten abgestimmt sein.

### 2.5.1 Fertigung mittels integrierter CAD/CAM-Systeme

Während in der Vergangenheit die Programmierung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen (CNC-Maschinen) anhand von Zeichnungen erfolgte, wird die Programmierung seit Anfang 1990 durch die Einführung sogenannter offener Steuerungen ermöglicht [BEUKE 1999]. Damit ist die Möglichkeit einer externen Programmierung der Werkzeugmaschinen gegeben und lässt eine Kopplung zwischen CAD und NC-Programmierung zu, dem sogenannten Computer Aided Manufacturing (CAM). Dies ist im Besonderen für die Fertigung komplexer Bauteile mit Freiformflächen von Bedeutung, da hier eine manuelle NC-Programmierung mit einem enormen

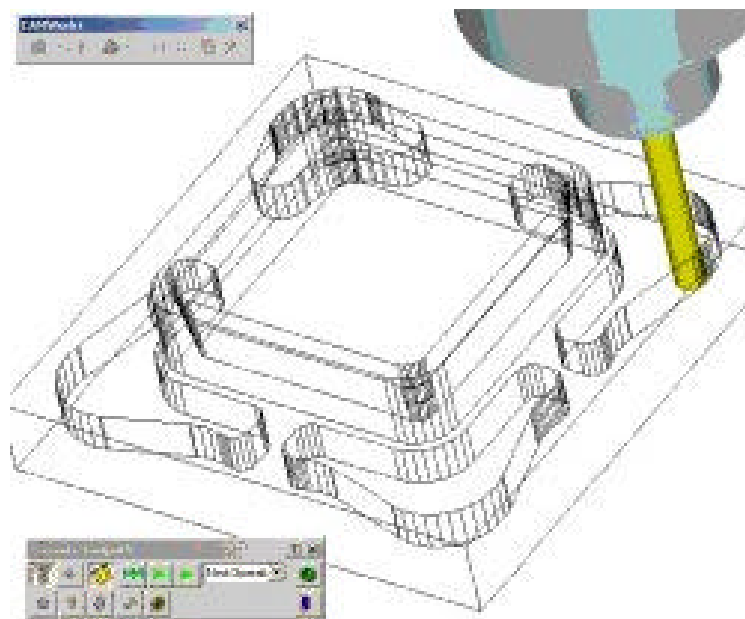


Abbildung 2-14 Simulation Bearbeitungsvorgang Fräsen [TEKSOFT 2003]

Aufwand verbunden wäre und praktisch nicht zu realisieren ist.

In modernen 3D-CAD-Systemen lassen sich bereits CAM-Module zur NC-Programmierung direkt implementieren. Diese Systeme nutzen die grafischen Elemente des CAD-Systems und erlauben eine Zuordnung von Bearbeitungsvorgängen zu einzelnen Bauteilflächen. Ohne die Überführung in andere Datenformate wird die Geometrie der Bauteile der NC-Programmierung in der höchstmöglichen Genauigkeit übermittelt. In der Regel ermöglichen die CAM-Module auch eine Simulation der Bearbeitung mit Berücksichtigung der Werkzeuggeometrie, die im Vorfeld der Fertigung beispielsweise eine Kontrolle hinsichtlich Restmaterial und Fertigungsdauer erlauben (siehe Abbildung 2-14) [vgl. TEKSOFT 2003].

## **2.5.2 Kommerzielle Softwareprodukte zum RP durch Fräsen**

In der Vergangenheit sind eine Reihe von Programmen entwickelt worden, die eine Fertigung von Prototypen durch Fräsen ermöglichen. Diese Systeme unterscheiden sich in der Art der Datenaufbereitung, den vorhandenen Schnittstellen und in der Möglichkeit der Anwendung unterschiedlicher Fertigungsparameter (z.B. verschiedene Frässtrategien). Die Steuerung der Fräsmaschine basiert auf herkömmlicher CNC-Technik (Computerized Numerical Control) und stützt sich auf den Standard-Code nach DIN 66025. Die Einsatzmöglichkeiten reichen von 3-Achs-Fräsmaschinen bis hin zu 5-Achs-Fräsmaschinen. Kommerzielle Software-Systeme berücksichtigen jedoch nur 3-Achs-Bewegungen, so dass die Vorteile von 4- bzw. 5-Achsmaschinen (z.B. optimaler Werkzeug-Werkstück-Eingriff) effektiv nicht genutzt werden können. Im folgenden werden die einzelnen Software-Produkte zur Fertigung von Bauteilen durch Fräsen vorgestellt und auf Einschränkungen untersucht.

### *2.5.2.1 STRATOCONCEPTION (CIRTES/CHARLYROBOT)*

Bei dem Verfahren STRATOCONCEPTION handelt es sich um ein software-basiertes Verfahren zur Herstellung von Modellen und Prototypen. Die Software zur datentechnischen Verarbeitung der Bauteile und Vorbereitung der Fertigung ist grundsätzlich maschinenunabhängig, wird jedoch in der Regel als Komplettanlage mit einer Fräsmaschine der Firma CHARLYROBOT vertrieben.

Das Verfahren beruht auf dem Prinzip der Schichtzerlegung. Die anschließende Fertigung erfolgt mittels Fräsen, das Baumaterial wird in Form von Platten bereitgestellt. Eine Übersicht des Verfahrensprinzips ist in Abbildung 2-15 dargestellt. Zur Erzeugung von physikalischen Bauteilen wird vom Anwender zuerst die Orientierung des Bauteils und damit die Ausrichtung der parallelen Schichten festgelegt. Die maximale Schichtdicke ist ein Maß für die geometrische Qualität des physischen Bauteils und gleichzeitig das Maß für die Plattenstärke. Anschließend wird das digitale Bauteil in einem automatischen Prozess in die einzelnen Schichten zerlegt. Zur Vorbereitung der

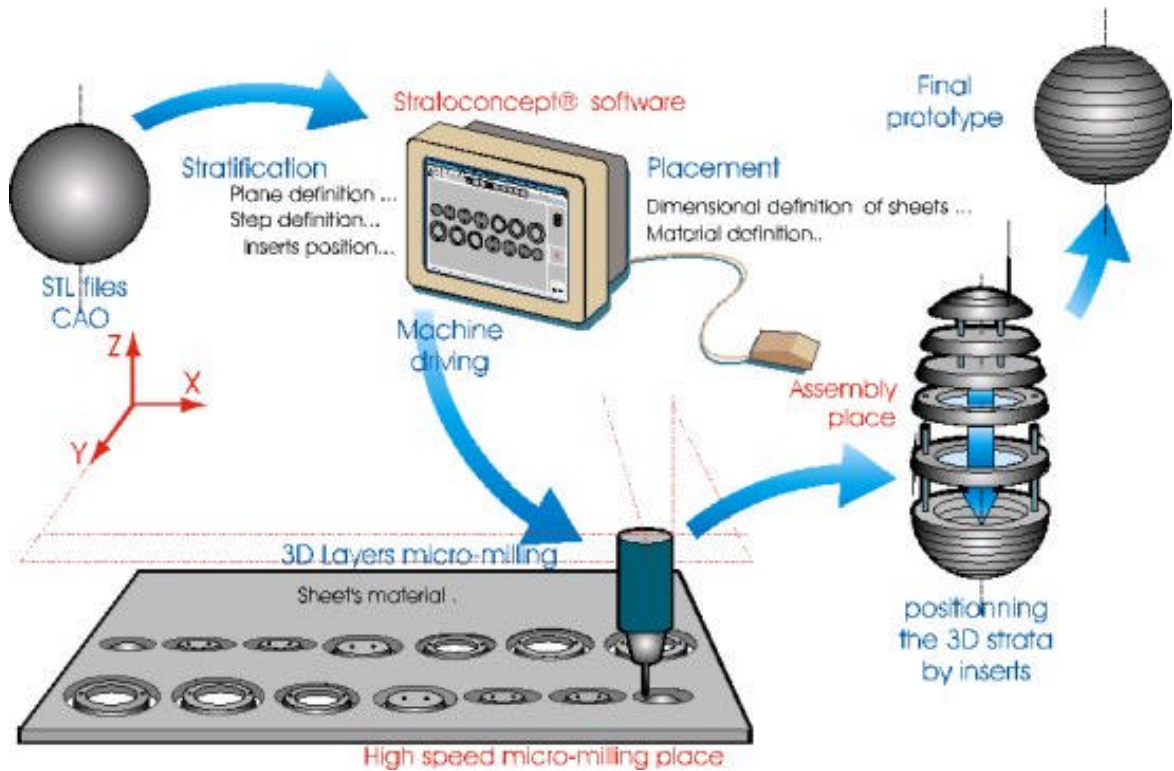


Abbildung 2-15 Verfahrensprinzip STRATOCONCEPTION [CIRTES 2002]

Fertigung werden die Plattenabmessungen des Rohmaterials angegeben. Die Berechnung der erforderlichen Anzahl an Platten und die Verteilung der Bauteilschichten auf den Platten erfolgt automatisch. Zur Fertigung der einzelnen Schichten werden die erzeugten Daten direkt an die Steuerung der Fräsmaschine übertragen. Zur Unterstützung der Montage der Bauteilschichten werden diese mit Bohrungen versehen, die in Verbindung mit Führungsstangen das Positionieren der Bauteilsschichten ermöglichen. Das Verfahren ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Die Software erkennt Hinterschnitte und dreht gegebenenfalls einzelne Schichten für eine Bearbeitung um, da eine zweiseitige Bearbeitung der Schichten nicht möglich ist. Bauteilschichten mit gegenläufigen Hinterschnitten können daher nicht gefertigt werden oder müssen auf mehrere kleinere Schichten verteilt werden. Bei der Fertigung muss deshalb die Kontur auf der nichtbearbeiteten Seite angenähert werden (vgl. Abbildung 2-16). Im Ergebnis würde ein Modell mit ausgeprägtem Treppenstufeneffekt entstehen. Eine möglichst

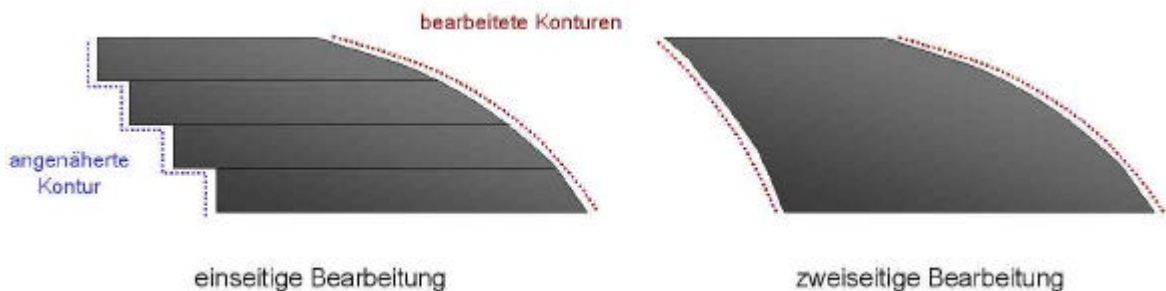


Abbildung 2-16 Treppenstufeneffekt bei einseitiger Bearbeitung

genaue Annäherung der Kontur kann nur mit einer möglichst großen Anzahl Schichten mit geringer Schichtstärke erreicht werden. Neben einem erhöhten Bedarf an Material steigt der Aufwand für das Fügen der Schichten.

- Die Bearbeitung der Platten erfolgt ausschließlich über Stirnfräser. Hierbei treten auch insbesondere bei Geometrien mit flachen Krümmungen Treppenstufeneffekte auf. Auch hinsichtlich des Postprocessing ist die Anwendung von Stirnfräsern als nachteilig einzustufen, da technologisch bedingt die Oberflächen durch ein „Ausfransen“ der Kanten gekennzeichnet sind. Das Entfernen dieser Fransen ist mit einem erheblichen manuellen Aufwand verbunden. Dies hat zur Folge, dass die Bauteilgeometrie und die Oberflächenqualität nicht reproduzierbar gefertigt werden kann.
- In Abhängigkeit von den Materialien werden die einzelnen Bauteilschichten teilweise mittels kleiner Stege mit der Platte verbunden. Dadurch werden die Bauteilschichten besser fixiert und können mit höheren Zerspanungskräften bearbeitet werden. Das Setzen dieser Stege erfolgt in der Software, das Entfernen der Stege ist ein manueller Vorgang und wird meist im zusammengebauten Zustand durchgeführt. Ähnlich zu dem Vorgang bei der Entfernung der Kantenausfransung ist auch bei der Entfernung der Stege mit Schwierigkeiten hinsichtlich einer reproduzierbaren Fertigung zu rechnen.

Das Fixieren der Platten erfolgt mittels doppelseitigem Klebeband<sup>6</sup>. Je nach zu bearbeitenden Material sind die Haftkräfte unterschiedlich und erfordern aufgrund der auftretenden Kräfte eine Anpassung der Schnittwerte. Ferner ist das Entfernen der bearbeiteten Bauteilschichten vom Maschinentisch nicht trivial und mit Kraftaufwand verbunden. Aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit der Bauteilunterseite ist eine Zerstörung einzelner Schichten beim Entfernen vom Maschinentisch nicht ausgeschlossen.

#### 2.5.2.2 MILLIT (COSCOM)

Das System MILLIT ist ein rein softwaregestütztes Werkzeug zur Herstellung von Modellen und Prototypen. Eine entsprechende Einrichtung zur Anpassung an unterschiedliche Maschinensteuerungen ist in dem Programm enthalten. Analog zum System STRATOCONCEPTION werden die Bauteilgeometrien über das Datenformat STL importiert. Auch die Ausrichtung des Bauteils und die Einstellung der maximalen Schichtdicke ist im Vorfeld durchzuführen. Ein wesentlicher Unterschied besteht in der Möglichkeit einer beidseitigen Bearbeitung der Bauteilschichten.

---

<sup>6</sup> Modifizierte Maschinen sind mit Vakuumspanntischen ausgerüstet. Jedoch müssen die Bauteilschichten einen Mindestdurchmesser von ca. 50 mm aufweisen, da sonst eine Spannwirkung nicht gewährleistet ist.



Damit sind im Gegensatz zu STRATOCONCEPTION prinzipiell Bauteile mit gegenläufigen Hinterschnidungen zu fertigen. Zur Vermeidung einer Freilegung des Bauteils werden Stege gesetzt, welche die Bauteilschicht in einer Art Rahmen fixiert (siehe Abbildung 2-17).

### Äußere Hilfsgeometrien

Äußere Hilfsgeometrien sind dadurch gekennzeichnet, dass die Bauteiloberfläche mit einer stützenden Geometrie verbunden ist. Die Form der Hilfsgeometrie kann vielfältig ausgeführt sein, in der Praxis haben sich quaderförmige Stege etabliert (vgl. Abbildung 2-17). Der wesentliche Vorteil äußerer Hilfsgeometrien liegt in der Fertigung von massiven Bauteilen ohne Schnittebenen. Im Anschluss an die Fertigung müssen die Verbindungen zwischen den Hilfsgeometrien und der Bauteiloberfläche manuell entfernt werden. Hinsichtlich der Qualität der Oberflächen führt das

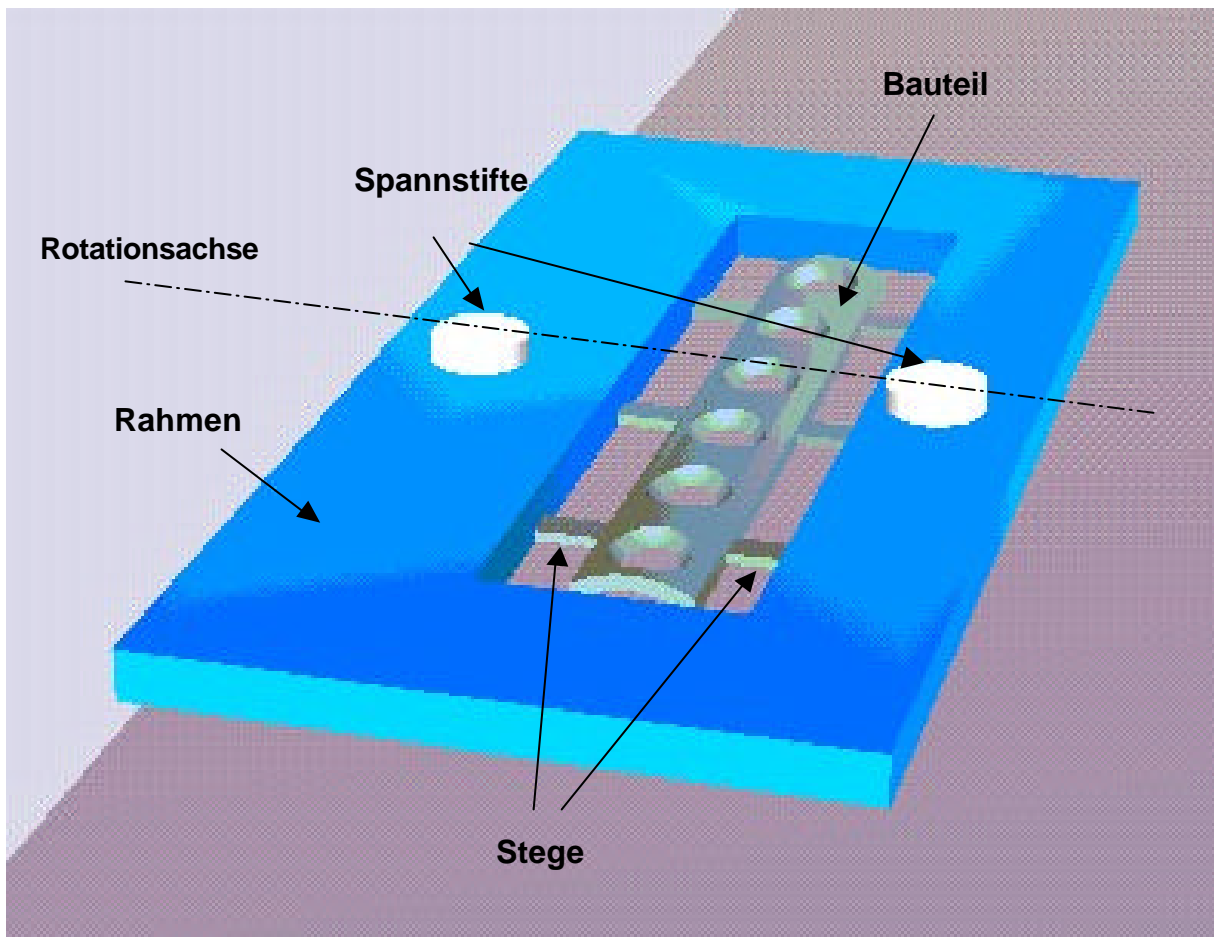


Abbildung 2-17 Stege als Hilfsgeometrie

manuelle Entfernen in der Regel zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen. Dies resultiert aus der uneinheitlichen Bearbeitung durch manuelle Vorgänge (z.B. durch Feilen). Ein automatisches Entfernen von Hilfsgeometrien ist aus Sicherheitsgründen bedenklich, da im Extremfall eine Spannwirkung des Bauteils nicht mehr gewährleistet ist. Äußere Hilfsgeometrien kommen häufig zum Einsatz, wenn die Ansprüche an die Oberflächenqualität des Bauteils gering sind. Gerade Bauteiloberflächen ermöglichen ein verhältnismäßig einfaches Entfernen der Hilfsgeometrien.

Die Hilfsgeometrien werden während der Bearbeitung zusammen mit dem Bauteil aus dem Rohmaterial herausgearbeitet. Das Bauteil wird demnach mit den Hilfsgeometrien in einer Art Rahmen gehalten. Je nach Gestalt und Abmessungen der Hilfsgeometrien kann die Größe des einzusetzenden Rohmaterials erheblich zunehmen. Des weiteren ist das Zerspanungsvolumen verhältnismäßig groß und die eingeschränkte Abführung der Späne aufgrund der Wannenform führt zu einer stärkeren Werkzeugbelastung und damit zu kürzeren Standzeiten. Nicht zuletzt führen die nicht abgeführten Späne zu einer unkontrollierten Schleifwirkung der Bauteiloberfläche und kann dadurch Ungenauigkeiten am Bauteil hervorrufen.

Werden Bauteile aus mehreren Schichten zusammengesetzt, so müssen die Einzelbauteile zueinander ausgerichtet und für den Fügevorgang fixiert werden. Äußere Hilfsgeometrien sind für diese Aufgabe nur bedingt geeignet, da diese Geometrien wegen der besseren Zugänglichkeit vor dem Fügen entfernt werden. In der Praxis wird deshalb auf andere Arten von Hilfsgeometrien zurückgegriffen, die im folgenden näher beschrieben werden.

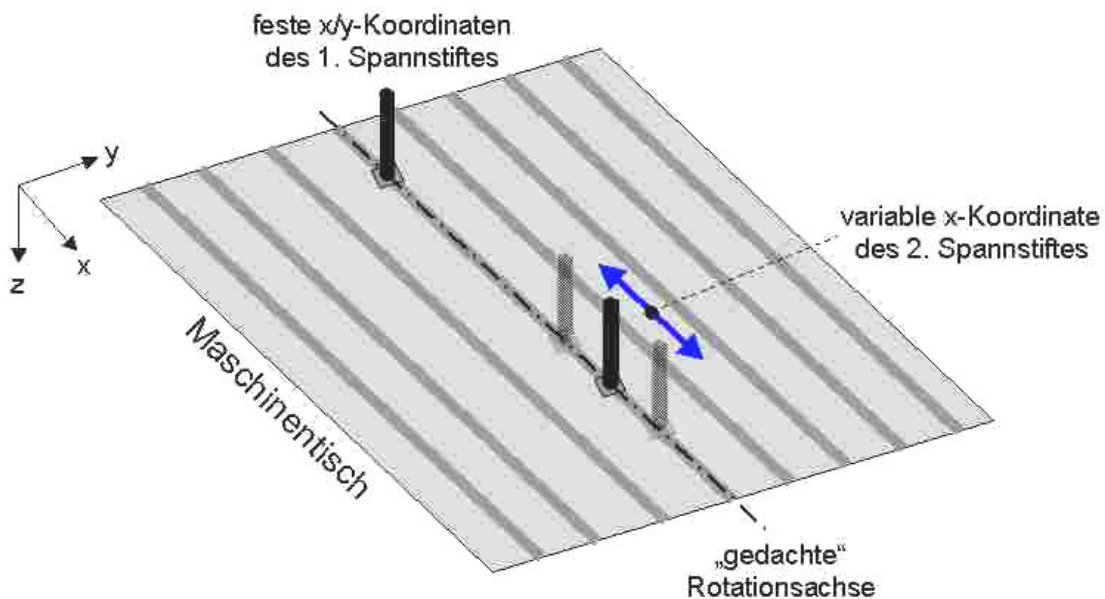


Abbildung 2-18 spanntechnische Vorbereitung des Maschinentisches

Ähnlich wie beim System STRATOCONCEPTION können für den anschließenden Fügevorgang Bohrungen innerhalb der Bauteilschichten vorgesehen werden, die mittels anzufertigender Stifte die Ausrichtung der benachbarten Schichten zueinander sicherstellen. Die Möglichkeit der beidseitigen Bearbeitung verlangt nach einer präzisen und reproduzierbaren Spanntechnik. Der Maschinentisch muss für eine beidseitige Bearbeitung vorbereitet werden, indem dort spezielle Passstifte fixiert werden, die eine Art Mittelachse darstellen (siehe Abbildung 2-18). Die Platte wird an die Abmessungen und Positionen der Passstifte angepasst und auf die Maschine ge-

spannt. Aufgrund der festen Position der Passstifte ist ein präzises Umdrehen der Platten möglich. Dabei muss sichergestellt sein, dass die Ober- und Unterseite der Schichten richtig zueinander ausgerichtet sind.

Im Vergleich zum System STRATOCONCEPTION bietet das System MILLIT eine Reihe von verschiedenen Frässtrategien. Dazu gehört auch die Unterstützung unterschiedlicher Werkzeuggeometrien (z.B. Radienfräser), die im Hinblick auf die erreichbaren Oberflächenqualitäten und damit für den Postprocessing-Aufwand eine wesentliche Rolle spielen. Das Fixieren der Bauteile mittels Stege gestaltet sich auch beim System MILLIT als problematisch. Das manuelle Entfernen der Stege nach der Bearbeitung führt zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen in der Bauteilgeometrie und der Oberflächenqualität.

### 2.5.2.3 *Stratified Object Manufacturing nach ERATZ*

Ein zum System MILLIT ähnliches Verfahren stellt das **Stratified Object Manufacturing (SOM)** dar. Das Verfahren beinhaltet als Funktionalität neben der beidseitigen Bearbeitung von Bauteilschichten auch die Möglichkeit der Bearbeitung in unterschiedlichen Aufspannungen. Dadurch sind Bearbeitungen in verschiedenen Winkeln denkbar, die im Vergleich zu den klassischen 3-Achs-Verfahren wie STRATOCONCEPTION und MILLIT höhere Anforderungen hinsichtlich der Bauteiloberflächenqualität erfüllen können. Die Nutzung dieser Möglichkeit ist jedoch mit einem erheblichen Aufwand an Umspannvorgängen und Ausrichtungen verbunden und erfordert eine präzise (Wieder-) Ausrichtung beim Umspannen.

Das SOM ist in der Vergangenheit mehrmals von verschiedenen Partnern betreut und entwickelt worden, jedoch in den letzten Jahren auf dem RP-Markt nicht besonders in Erscheinung getreten. Gegenwärtig ist dieses System nicht kommerziell erhältlich und sei deshalb an dieser Stelle nur kurz erwähnt.

## 2.5.3 **Problematik beim Rapid Prototyping mittels Fräsen**

Auffällig bei der Analyse der einzelnen RP-Systeme durch Fräsen sind noch ungelöste Spanprobleme. Je nach Material werden die Bauteile bei einer beidseitigen Bearbeitung durch sogenannte Stege fixiert. Eine beidseitige Bearbeitung von Bauteilen ohne den Einsatz von Stegen ist zur Zeit nicht im Rahmen der erwähnten Systeme nicht möglich. Bei der Betrachtung der genannten Software-Systeme zur Fertigung von Prototypen durch Fräsen wird deutlich, dass im Vergleich zu den generativen RP-Verfahren die Funktionen Schicht erzeugen, Kontur erzeugen und Fügen getrennt voneinander betrachtet werden. Dies resultiert einerseits aus der Vielfalt der zu bearbeitenden Materialien und aus technologischen Gründen, da der Fertigungsprozess und der Fügeprozess vollkommen unabhängig voneinander sind. Zu jedem Material ist eine entspre-

chende Füge­technik auszuwählen, die ein Fügen der Bauteilschichten zu einem Komplettbauteil erlauben.

## 2.6 Fügeprozesse im Rapid Prototyping durch Fräsen

Das Fügen der Bauteilschichten spielt bei der Fertigung von Prototypen mittels Fräsen eine wichtige Rolle. Nach [ALUKURIER 2002] hat neben der Wahl der eingesetzten Werkstoffe auch die angewandte Füge­technik einen großen Einfluss auf die Funktionseigenschaften der betrachteten Bauteile. Im Unterschied zu den generativen RP-Verfahren, die sich meist auf einen Werkstoff beschränken, ist die Werkstoffvielfalt und damit die Anzahl an Fügeverfahren weitaus größer. Die Fügeprozesse sind durch zwei wesentliche Eigenschaften geprägt:

- Festigkeit der Verbindung
- Reversibilität der Verbindung

Die in der Praxis angewandten Fügeprozesse zur Verbindung von Bauteilschichten beschränken sich auf das stoffschlüssige Verbinden, sowie auf das kraftschlüssige Verbinden von Bauteilen. Das Fügen mittels formschlüssiger Verbindungen tritt in der Regel in Kombination mit kraftschlüssigen Verbindungen (z.B. Verbindungen mittels Nieten) auf und wird deshalb in diesem Zusammenhang mit den kraftschlüssigen Verbindungen diskutiert. Die stoffschlüssigen Fügeverfahren sind Verbindungen, die durch die Wirkung von Adhäsions- und Kohäsionskräften zwischen Füge­teilen entstehen. Alle Schweiß- und Lötverbindungen zählen zu dieser Gruppe und sind durch die Irreversibilität der Verbindung gekennzeichnet.

Die kraftschlüssigen Fügeverfahren sind Verbindungen, die nur durch den Ansatz mechanischer Kräfte entstehen. Die Niet- und Schraubverbindungen zählen zu kraftschlüssigen Fügeverfahren und zeichnen sich durch die Reversibilität der Verbindung aus.

### 2.6.1 Stoffschlüssige Fügeprozesse

Zu den klassischen stoffschlüssigen Fügeprozessen zählt das Schweißen, das in der Praxis zu den wichtigsten Fügeverfahren zählt. In bezug auf das Fügen von Bauteilschichten ist jedoch das klassische Schweißen als nachteilig zu betrachten. Aufgrund des lokal begrenzten hohen Energie­eintrags in Form von Wärme ist mit einem Bauteilverzug zu rechnen, der im Ergebnis zu ungenauen Bauteilen führen kann. Dieser Effekt verstärkt sich mit abnehmender Größe der Bauteilschicht und kann nur teilweise mittels nachgeschalteter thermischer oder mechanischer Richtprozesse ausgeglichen werden.

Ferner ist für die Anwendung klassischer Schweißverfahren die Zugänglichkeit der Schweißzone erforderlich. Insbesondere bei Bauteilen mit komplexen Geometrien oder sehr kleinen Abmessungen ist die Forderung nicht immer erfüllbar.

### **Diffusionsschweißen**

Eine Ausnahme in bezug auf die eingeschränkte Zugänglichkeit stellt das Diffusionsschweißen dar, die im Gegensatz zu den klassischen Schweißverfahren alle Kontaktflächen simultan fügt. Dazu werden die Werkstücke mit metallisch sauberen Oberflächen unter Einwirkung hoher Temperaturen bei einem hohen Druck zusammengepresst. Der Fügeprozess erfolgt in einer Schutzgasatmosphäre oder im Vakuum. Aufgrund von Diffusionsvorgängen sintern die Schichten zu einem unlösbaren Bauteil zusammen.

Anwendung findet das Diffusionsschweißen vornehmlich bei Bauteilelementen mit filigranen Strukturen, die zu einer Einheit verbunden werden (z.B. Mikrowärmeübertrager aus Aluminium) [vgl. FZK o.J.].

### **Löten**

Analog zu den Schweißverfahren zählt auch das Löten zu den stoffschlüssigen Fügeverfahren. Im Gegensatz zum Verbinden mittels Schweißen ist beim Löten mit geringeren Festigkeiten der Verbindung zu rechnen [MÜLLER 2000]. Die Oberflächen der zu fügenden Werkstoffe werden durch ein geschmolzenes Lot verbunden. Im Gegensatz zu den Schweißverfahren wird die Schmelztemperatur der Grundwerkstoffe nicht erreicht und weist dadurch eine geringere thermische Beeinflussung der zu fügenden Teile auf. Insbesondere bei Bauteilen mit dünnwandigen Elementen ist diese Eigenschaft der Lötverbindung im Vergleich zu einer Schweißverbindung im Vorteil. Die zur Verfügung stehenden Lote sind praktisch werkstoffunabhängig, da metallurgische Reaktionen nur in einem vernachlässigbaren Umfang auftreten. Aufgrund dieser Eigenschaft lassen sich nach [BARGEL 1999] auch „unverträgliche“ Verbindungen erzeugen, die mittels Schweißen nicht zu realisieren sind (z.B. Verbindung von Schnellarbeitsstahl mit unlegiertem Stahl).

Hinsicht der Zugänglichkeit bietet das Verbinden mittels Löten Vorteile, da die flächige Benetzung der zu fügenden Flächen aufgrund des Kapillareffektes realisiert wird. Dies erfordert jedoch definierte Spalte zwischen den zu fügenden Bauteilschichten. Nach [FRITZ 1998] liegen die optimalen Spaltbreiten für das Löten zwischen 0,05 bis 0,5 mm. Mit Rücksicht auf die Genauigkeit der gefügten Bauteile müssen die Spaltbreiten und die Anzahl an Lötsschichten bei der Konstruktion berücksichtigt werden.

## **Kleben**

Das Kleben von Bauteilschichten ist ein in der Praxis verbreitetes Fügeverfahren. Die Festigkeit der Verbindung wird durch die Eigenfestigkeit des Klebstoffes (Kohäsion) sowie durch die Bindekräfte zwischen der Klebstoffschicht und den Fügeiloberflächen (Adhäsion). Analog zum Verbinden mittels Löten müssen auch hier Spalte vorgesehen werden, in welche der Klebstoff eingefüllt werden muss. Im Gegensatz zum Löten wird der Klebstoff nicht mittels Kapillarkräften zugeführt, sondern es wird der Klebstoff auf jede Bauteiloberfläche einzeln aufgetragen. Die beim Fügen verbleibenden Spalte/Fugen müssen vollständig mit Klebstoff gefüllt sein. Die für eine optimale Klebverbindung erforderliche Spaltbreite ist klebstoffabhängig und variiert in der Praxis zwischen 0,1 und 0,5 mm (für eine starre Klebverbindung) [BURCHARDT 1998].

Klebverbindungen existieren sowohl für den Bereich der Kunststoffe als auch für die metallischen Werkstoffe. Unabhängig vom Werkstoff sollten die Klebverbindungen konstruktiv so ausgelegt werden, dass diese möglichst nur auf Scherkräfte beansprucht werden. Grundsätzlich sind die Verbindungen mittels Kleben für die Aufnahme von Biege- und Schälkräften weniger geeignet [FRITZ 1998].

Die verhältnismäßig geringen Festigkeiten von Klebverbindungen lassen bei diesem Fügeverfahren sowohl reversible als auch irreversible Verbindungen (z.B. durch chemisches Lösen) zu. Das Lösen einer Klebverbindung führt zu einer Zerstörung der Klebschicht, in der Regel werden die Bauteile jedoch nicht beschädigt. Vor einem erneuten Fügevorgang müssen alle Oberflächen von Klebstoffresten befreit und gereinigt werden. Dieser Vorgang ist mit einem erheblichen manuellen Aufwand verbunden und bedarf einer wirtschaftlichen Überprüfung.

### **2.6.2 Kraftschlüssige Fügeprozesse**

Im Gegensatz zu den stoffschlüssigen Verbindungen gehören die kraftschlüssigen Verbindungen zu den reversiblen Verbindungstechniken. In der Praxis haben sich bei den kraftschlüssigen Verbindungen die Schraubenverbindungen etabliert. Das Verbinden mittels Nieten ist in den Hintergrund getreten und wird daher hier nicht weiter betrachtet.

#### **Schraubenverbindungen**

Je nach Art der Verwendung existieren zahlreiche Ausführungen von Schrauben, die in einer Reihe von Normen [vgl. KLEIN 1989, MATEK 1987] hinterlegt sind. Kernelement von Schraubverbindungen ist das Gewinde, welches als profilierte Einkerbung längs einer um einen Zylinder gewundenen Schraubenlinie verläuft. Diese Einkerbung ist in der Lage, an den Flanken Kräfte aufzunehmen. Die Verbindung erfolgt, indem die Schraube gegen ein passendes Element (z.B. Mutter, Sacklochbohrung mit Innengewinde) verspannt wird.

Hinsichtlich einer Verbindung von Bauteilschichten muss die Zugänglichkeit der Schraubenverbindung sicherstellt sein. Dies erfordert die Eignung der Bauteile und deren Oberflächen, die durch die Sichtbarkeit der Schraubverbindung gekennzeichnet sind. Zusätzlich muss für eine entsprechende Festigkeit der Verbindung ausreichend Material für die Verschraubung vorhanden sein.

## 2.7 Zusammenfassung

Grundsätzlich ist das Herstellen von Prototypen sowohl bei den generativen als auch bei den konventionellen Fertigungsverfahren mit Problemen und Unzulänglichkeiten verbunden. Auch die Form und Gestalt der Prototypen sind wichtige Faktoren bei der Auswahl infragekommender Fertigungsverfahren.

Im folgenden werden noch einmal die wesentlichen Kritikpunkte zusammengefasst:

- technologisch bedingte höhere Ungenauigkeiten der generativen RP-Verfahren
- geringe Materialauswahl bei den generativen RP-Verfahren
- komplizierte und nicht-fertigungsorientierte Zerlegung der Bauteile in Schichten für eine konventionelle Fertigung mittels Fräsen
- Spannproblematik für eine beidseitige Bearbeitung mittels Fräsen
- aufwändige Fügeverfahren zur Verbindung gefräster Bauteilschichten

Eine Analyse der aufgeführten Probleme zeigt, dass der Vorgang für das Fertigen von Prototypen mittels Fräsen noch erhebliches Verbesserungspotential beinhaltet. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Schwachstellen der Fertigung von Prototypen mittels Fräsen näher betrachtet und entsprechende Lösungsansätze formuliert.

### 3 Anforderungen an ein optimales Prototyping

Die Konkurrenzfähigkeit von RP-Verfahren hängt in erster Linie vom geplanten Einsatzzweck der Prototypen ab. Es existiert kein RP-Verfahren, das als grundsätzlich besser anzusehen ist als andere Verfahren. Für die Auswahl eines optimalen RP-Verfahrens müssen neben den reinen fertigungstechnischen Gesichtspunkten auch wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden.

Im Hinblick auf die Fertigung von Prototypen durch Fräsen sind Anforderungen und Aufgaben zu definieren, die an eine möglichst genaue und schnelle Herstellung von Prototypen gestellt werden. Im folgenden wird auf die Problematiken bei der Fertigung von Prototypen durch Frä-

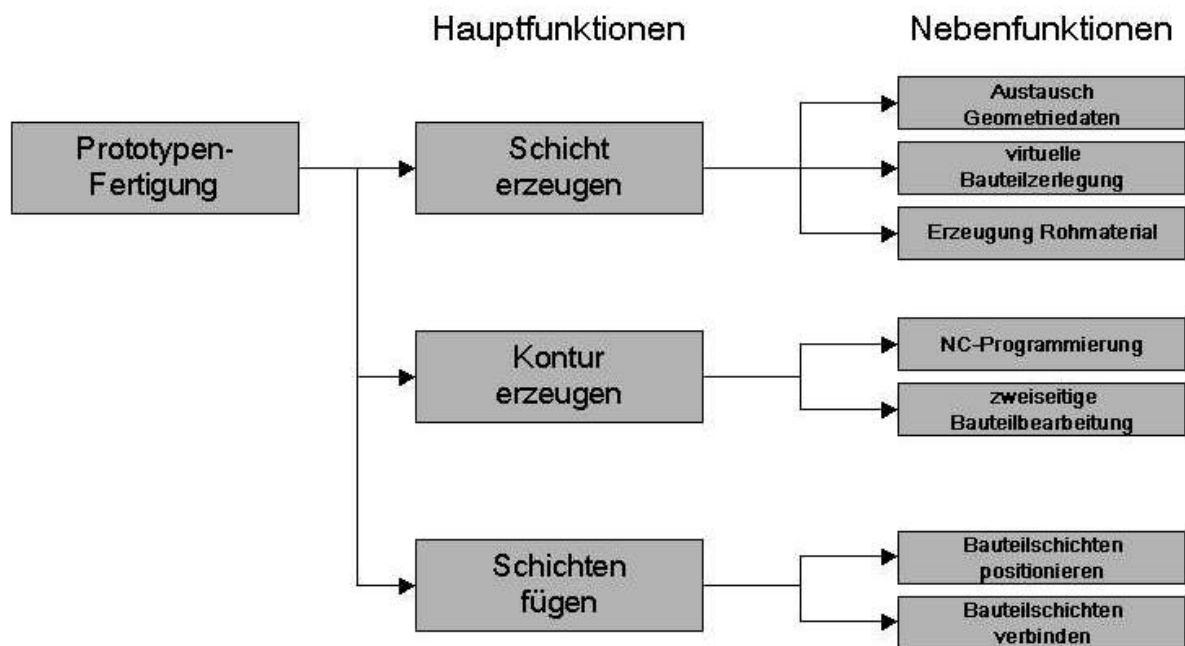


Abbildung 3-1 Haupt- und Nebenfunktionen der Fertigung von Prototypen mittels Fräsen

sen eingegangen und daraus entsprechende Anforderungen formuliert. Die in Kapitel 2 diskutierte Funktionsanalyse zur Einteilung von RP-Verfahren soll eine Klassifizierung der Anforderungen unterstützen. Dabei werden die Nebenfunktionen der drei Hauptfunktionen zur Fertigung von Prototypen hinsichtlich einer Eignung zur Fertigung hochgenauer Prototypen herangezogen



(vgl. Abbildung 3-1).

### 3.1 Schicht erzeugen

Das Erzeugen von Bauteilschichten setzt aus datentechnischer Sicht eine möglichst genaue Umschreibung der Geometriedaten voraus. Das eingesetzte Datenformat spielt daher beim Austausch von geometriebeschreibenden Informationen eine große Rolle. Die Schnittstrategie zur Bauteilzerlegung sollte sich grundsätzlich an den einzusetzenden Werkzeugen orientieren. Mittels der ermittelten Bauteilschichten können letztlich Angaben zu den benötigten Rohmaterialien gemacht werden. Die Problematik und die daraus resultierenden Anforderungen werden im folgenden eingehend diskutiert.

#### 3.1.1 STL-unabhängiger Austausch der Geometriedaten zwischen CAD-System/CAM-System

Die hochgenaue Fertigung von Bauteilen durch Fräsen basiert grundsätzlich auf möglichst präzisen Geometriedaten. Die Verbindung zwischen der Konstruktion (3D-CAD) und der Fertigung (CAM) wird über die vorhandenen Schnittstellen hergestellt. Ziel ist eine Datenumwandlung

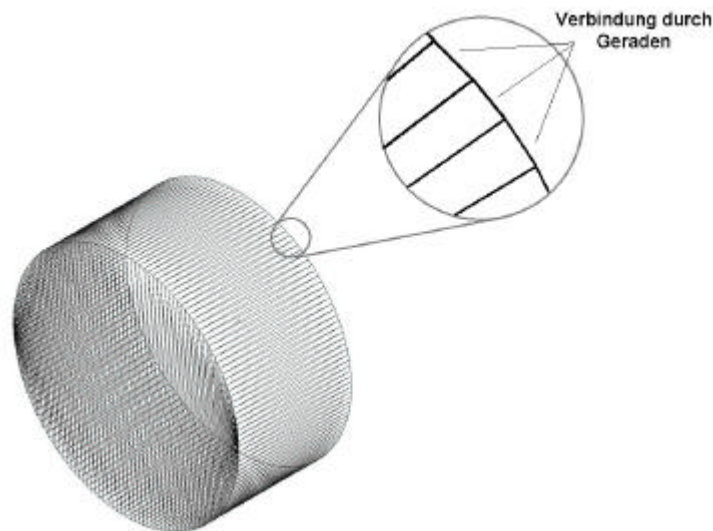


Abbildung 3-2 Beschreibung eines Zylinders im STL-Format: Dreieckszerlegung

(Konvertierung), die eine Manipulation der Bauteilflächen vermeidet. Daraus lässt sich die Forderung ableiten, dass eine Anwendung von Daten im STL-Format umgangen werden sollte. Neben einer ausgeprägten Facettierung der gekrümmten Oberflächen ist der Speicherbedarf von Geometrien auf STL-Basis verhältnismäßig groß. Hinsichtlich einer hochgenauen Fertigung von Prototypen sollte sich die Ausprägung der Facetten an der erzielbaren Genauigkeit des eingesetzten Fertigungsmittels orientieren. Bezogen auf das Beispiel eines einfachen zylindrischen Körpers

in Abbildung 3-2 (Durchmesser = 10 mm, Höhe = 5 mm) führt die Fertigung auf Basis von Daten im STL-Format zu einem Speicherbedarf von über 30 kByte. Der Körper wird insgesamt durch 636 Dreiecke beschrieben, die letztlich zu einer makroskopischen Facettierung führen. Eine Fertigung des gleichen Körpers durch eine maschinennahe Programmierung (NC-Programmierung) reduziert den Speicherbedarf erheblich, da der zu fertigende Körper nur über die Außenmaße und die Position zu definieren ist. Der Speicherbedarf für ein maschinennahes Programm liegt im vorliegenden Fall mit 0,03 kByte ungefähr drei Größenordnungen unter dem des STL-Formates. Die für die Fertigung notwendigen Stützpunkte werden maschinenintern interpoliert und angefahren. Damit wird neben einer geringen Speicherbelastung auch die steuerungabhängige, höchste Positioniergenauigkeit erreicht.

Die hohe Fertigungsgenauigkeit wird somit nur durch die Eigenschaften der eingesetzten Fräsmaschine erreicht und nicht von dem vorgegebenen Datenformat eingeschränkt. Für Körper mit Freiformflächen lässt sich eine Reduzierung des Speicherbedarfs durch den Einsatz von Splines erreichen. Sie beschreiben eine stetige Kontur mit sich stets verändernden Krümmungsradien. Im Hinblick auf die Fertigung von Prototypen, die durch Reverse Engineering erzeugt worden sind, werden die Konturen häufig in Form von NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) beschrieben. Mit dieser erweiterten Art einer Spline-Funktion lassen sich Freiformkurven, Kreise, Geraden usw. einheitlich beschreiben. In Bezug auf die Fertigung von Körpern, die mit Hilfe von Splines beschrieben werden, müssen die Maschinen-Steuerungen in der Lage sein, Splines zu verarbeiten und die entsprechenden Stützpunkte zu interpolieren. In der Praxis haben sich diese Steuerungen erst im Ansatz etabliert. Im Vergleich zu den generativen Verfahren beschränkt sich bei der Fertigung durch Fräsen die Verarbeitung von Splines nicht auf eine Arbeitsebene (x-y-Ebene). Vielmehr ist eine simultane 3D-Verarbeitung von Splines durch Fräsen realisierbar [BEUKE 1999].

Mittlerweile bietet eine Vielzahl von 3D-CAD-Systemen eine direkte Implementierung von CAM-Modulen an. Hierbei kann auf eine Konvertierung der Geometriedaten zur Verarbeitung in ein plattform-unabhängiges CAM-System verzichtet werden. Prinzipiell böte diese Lösung das geringste Fehlerpotenzial hinsichtlich der Datenverarbeitung. An dieser Stelle muss allerdings angemerkt werden, dass die Mehrzahl der eingesetzten CAM-Systeme nichtlineare, gekrümmte Oberflächen auch durch eine Triangulation annähert. Im Vergleich zu der reinen Spline-Verarbeitung ist bei der Verarbeitung triangulierter Flächen, je nach Feinheit der Auflösung, mit Abweichungen von der Originalfläche zu rechnen. Hierzu werden die Teilabweichungen und die Spline-Abweichung als steuernde Größen einer Oberflächenannäherung eingesetzt. Im Unterschied zum STL-Format sind die Eigenschaften der Triangulation bei den meisten CAM-

Systemen nicht bauteilabhängig, sondern sie beziehen sich auf einen konkreten Bearbeitungsvorgang. Dadurch lassen sich für Bearbeitungsschritte mit hohen Anforderungen an die Detailtreue die Flächen hinreichend genau annähern, während für die Bearbeitung von Oberflächen mit geringeren Anforderungen die Detailqualität nur grob angenähert wird. Im Ergebnis wird durch eine bearbeitungsorientierte Qualität der Triangulation ein Optimum zwischen den konträren Forderungen einer genauen Bauteilbeschreibung und dem Speicherbedarf erreicht.

### 3.1.2 Bauteilzerlegung zur Bearbeitung von Hinterschnidungen

Zur Nutzung der Vorteile des Rapid Prototyping sollten die zu fertigenden Bauteile eine gewisse Komplexität aufweisen. Dazu zählen beispielsweise Körper, deren Gestalt nicht durch einfache geometrische Beziehungen (z.B. konstante Radien, Winkel) beschrieben werden kann. Diese Körper werden häufig durch Freiformflächen beschrieben und sind in bezug auf eine einfache, schnelle Programmierung und hinsichtlich des Einspannens als problematisch einzustufen. Auch

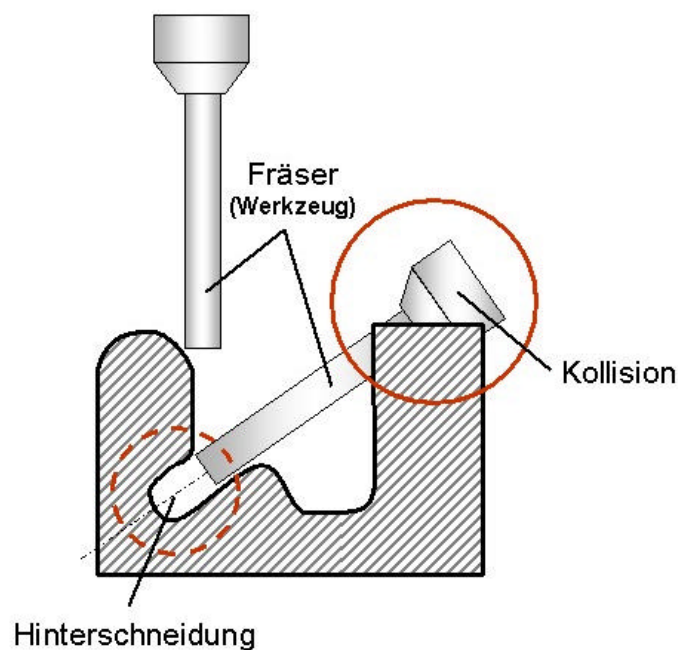


Abbildung 3-3 Lokalisierung von Hinterschnidungen

das Vorhandensein von Hinterschnidungen kann dazu führen, dass eine umfassende Bearbeitung des Bauteils nicht möglich ist. Eine entsprechende Orientierung des Bauteils kann die Komplexität der Hinterschnidung minimieren, aber nicht immer verhindern. Die in Abbildung 3-3 dargestellte Form kann auch mit einer 5-Achs-Fräsmaschine nicht bearbeitet werden, da die Zugänglichkeit der Hinterschnidung infolge der Bauteilgeometrie nicht gegeben ist. Eine Fertigung des Bauteils ist somit nur über eine Aufteilung in mehrere Teilkörper möglich. Die geomet-

rische Aufteilung ist prinzipiell frei wählbar, sofern der Bereich der Hinterschneidung mit dem Werkzeug erreicht werden kann. Je nach Einsatz sollte bei einer Aufteilung in Teilkörper darauf geachtet werden, dass das Bauteil im gefügten Zustand den auftretenden Belastungen standhält. Die Aufteilung des Bauteils in Teilkörper sowie Art und Ort der Belastung des gefügten Bauteils stehen damit in einem engen Zusammenhang. Insbesondere im Hinblick auf die Fertigung von Funktionsprototypen ist dieser Zusammenhang von besonderer Bedeutung. Für die Fertigung muss das Bauteil datentechnisch in die einzelnen Teilkörper zerlegt werden. Jeder Teilkörper wird für den Fertigungsprozess als eigenständiges Bauteil betrachtet. In diesem Zusammenhang kommt dem Fügen als abschließenden Herstellungsschritt eine wichtige Bedeutung zu. Bei der Entwicklung von Bauteilen sollte daher bereits in der Frühphase das eingesetzte Prototyping-Verfahren festgelegt und das Bauteil für die anschließende Fertigung vorbereitet werden.

## 3.2 Kontur erzeugen

Das Fertigungsverfahren **Fräsen** ist wesentlich geprägt durch die Beziehung zwischen Werkzeug, Werkstück und Spanneinrichtung. Das bearbeitende Werkzeug muss mit der Maschine so verbunden werden, dass ein definierter Eingriffspunkt sichergestellt ist. Zusätzlich muss das zu bearbeitende Werkstück fixiert werden und in einer definierten Beziehung zur Maschine und damit zum Werkzeug stehen. Die Fixierung des zu bearbeitenden Werkstückes wird durch eine Spanneinrichtung realisiert. Unter diesen Voraussetzungen erweist sich die Fertigung von Prototypen durch Fräsen als problematisch.

Wesentliche Probleme treten auf in der Bearbeitung von Hinterschneidungen und in einer mehrseitigen Bauteilbearbeitung in Form von Spannvorgängen in unterschiedlichen Richtungen.

### 3.2.1 NC-Programmierung

Der Einsatz kommerzieller NC-Programme ist die Grundlage zur Steuerung der CNC-Fräsmaschine. Eine Implementierung der NC-Programmierung in das jeweilige 3D-CAD-System vermeidet den Austausch von Geometriedaten über Datenformate, die zu Einbußen hinsichtlich der Genauigkeit der Bauteilbeschreibung führen können. In der Vergangenheit haben sich die kommerziellen NC-Programme im Hinblick auf die erreichte Bearbeitungsqualität und Benutzerfreundlichkeit positiv entwickelt. Mit Hilfe spezieller Algorithmen lassen sich auch komplexe Formen sehr genau fertigen. Ferner lassen sich mittels Datenbanken auch Werkzeugbibliotheken anlegen, in der alle relevanten Werkzeugdaten gespeichert sind.

### 3.2.2 Zweiseitige Bauteilbearbeitung

Technologische Gegebenheiten machen eine umfassende Bearbeitung von Bauteilen durch Fräsen ohne Umspannvorgänge teilweise unmöglich. Aufgrund der notwendigen Spanneinrichtung ist an den Kontaktstellen zwischen Bauteil und Spanneinrichtung keine Bearbeitung durch das Werkzeug möglich. Für eine komplette Bearbeitung eines Bauteils muss das Bauteil in mindestens zwei unterschiedlichen Aufspannungen bearbeitet werden.

Daraus ergeben sich folgende Anforderungen:

- Rohteilform mit definierten Abmessungen und Merkmalen zur Festlegung der Nullpunktreferenzpunkte
- Vorbereitung der Teilkörper für weitere Spannvorgänge

Jeder Umspannvorgang ist mit einer neuen Definition des Werkstück-Nullpunktes verbunden. Die Festlegung der Werkstück-Nullpunkte sollten sich in der Regel an der Geometrie des Rohmaterials orientieren. So bietet sich bei rechteckigen Werkstücken eine Ecke, bei zylindrischen Werkstücken das Zentrum (Rotationsachse) auf einer Stirnfläche als Nullpunkt an (vgl. Abbildung 3-4). Grundsätzlich müssen die Werkstück-Nullpunkte so gewählt werden, dass diese

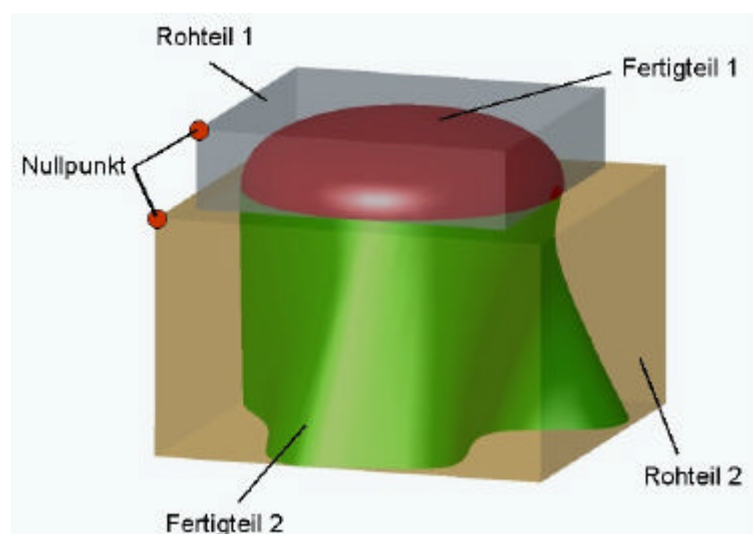


Abbildung 3-4 Festlegung der Rohteilform und der Werkstück-Nullpunkte

für die Erstbearbeitung als auch für weitere Bearbeitungsschritte nach Umspannvorgängen mit messtechnischen Hilfsmitteln zu erfassen sind. Der Einsatz von Spanneinrichtungen führt zu dem Ergebnis, dass die Flächen, die in Kontakt mit der Spanneinrichtung stehen, von einer Bearbeitung ausgeschlossen sind. Auch sind in der Regel die Bauteilunterseiten von einer ersten Bearbeitung ausgeschlossen. Diese Gegebenheit resultiert aus der eingeschränkten Zugänglichkeit der werkzeugabgewandten Seite des Bauteils. Entsprechend der Forderung einer umfassenden Bearbeitung der Bauteiloberfläche sind weitere Bearbeitungsschritte in einer anderen Aufspan-

nung notwendig. Das Spannen des Bauteils auf der bereits bearbeiteten Seite ist in einem zweiten Schritt durchaus problematisch. Einerseits kann das Einwirken der Spannkkräfte zu einer Beschädigung der bereits bearbeiteten Oberflächen führen. Andererseits ist ein zuverlässiges Spannen auf Freiformflächen mit konvexer Ausprägung mit Schwierigkeiten verbunden. Die beabsichtigte Klemmwirkung ist bei gekrümmten Flächen ohne eine orthogonale Krafteinleitung auf die Bauteiloberfläche nicht zu erzielen, da die angreifenden Spannkkräfte nur zu einem Weggleiten des Körpers führen.

### 3.3 Schichten fügen

Der für die Realisierung von Prototypen erforderliche Fügevorgang ist von der Fertigung der Körperschichten unabhängig und daher als eigenständiger Verfahrensschritt anzusehen. Die Art des Fügeverfahrens wird prinzipiell durch das eingesetzte Fertigungsmaterial und die spätere Beanspruchung des Bauteils bestimmt. Unter der Voraussetzung eines isotropen Ausgangsmaterials würde der ideale Fügeprozess zu einem Körper mit quasi-isotropischen Werkstoffeigenschaften führen. In der Praxis existieren jedoch nur wenige Fügeverfahren, die eine flächige Verbindung mit vergleichbaren Festigkeiten erzeugen. Für einen erfolgreichen Fügevorgang sind folgende Bedingungen zu erfüllen:

- Präzise Positionierung der zu fügenden Körper zueinander
- Zugänglichkeit der zu fügenden Flächen
- Einsetzen eines werkstofforientierten Fügeverfahrens

Hinsichtlich der geringen Stückzahl von Prototypen durch Fräsen werden Möglichkeiten einer Automatisierung von Fügeprozessen an dieser Stelle nicht näher betrachtet.

#### 3.3.1 Positionierung der Körperschichten

Die Form der Prototypen wird nur dann präzise wiedergegeben, wenn die Positionen der Körperschichten untereinander exakt ausgerichtet sind. Selbst sehr geringe Abweichungen von der vorgesehenen Position führen zu Unstetigkeiten im Konturverlauf der Oberflächen des Prototypen. Dabei ist es unerheblich, ob die zu fügenden Flächen translatorisch und/oder rotatorisch zueinander verschoben sind. Auch muss vorausgesetzt werden, dass die zu fügenden Oberflächen planparallel zueinander verlaufen. Abweichungen von einer Planparallelität der Oberflächen führen zu makroskopischen Spaltmaßen, die sich sowohl für Maßhaltigkeit als auch für den Einsatz eines späteren Fügeprozesses negativ auswirken können. Mit steigender Anzahl von Körperschichten ist hier prinzipiell mit einer zunehmenden Fehleranfälligkeit des Positionierens

zu rechnen. Aufgrund dieses Zusammenhangs und des Aufwands für den Fügeprozess sollte stets eine Fertigung mit einer minimalen Anzahl an Bauteilschichten angestrebt werden.

Im Hinblick auf die Fertigung von Prototypen mit Regelgeometriecharakter ist ein präzises Positionieren durch externe Referenzflächen verhältnismäßig einfach zu realisieren. So können beispielsweise zylindrische Körperschichten mit Hilfe prismatischer Geometrien konzentrisch zueinander ausgerichtet werden. Es ist jedoch stets zu beachten, dass je nach eingesetztem Fügeverfahren die Zugänglichkeit der zu fügenden Oberflächen gewährleistet ist. Für Prototypen mit ausgeprägten Freiformflächen ist eine präzise Positionierung mit externen Referenzobjekten dagegen sehr aufwändig. Am Beispiel **Schweißen** wird deutlich, dass neben einer exakten Positionierung auch eine - möglichst über den Umfang der Fügeebene - durchgängige Zugänglichkeit sichergestellt sein muss. Das Beispiel **Kleben** weist auf eine andere Problematik hin: Nach der Präparation der Fügeflächen ist eine äußere Zugänglichkeit nicht zwingend erforderlich. Jedoch müssen verhältnismäßig hohe Kräfte normal zur Fügeebene aufgebracht werden. Das Einleiten von Kräften und die Forderung nach einer exakten Positionierung verlangt nach einer Art geometrischer Führung, damit ein „Weggleiten“ der Schichten unterbunden wird.

### 3.3.2 Verbindung durch reversible Fügeprozesse

Während die Mehrzahl der generativen Fertigungsverfahren einen simultanen Formgebungs- und Fügeprozess beinhaltet, ist die Fertigung von Prototypen aus gefrästen Bauteilschichten von dem Fügeprozess entkoppelt. Der Fügeprozess ist damit ein eigenständiger Verfahrensschritt und orientiert sich an den zu fügenden Werkstoffen. Die Forderung nach Prototypen mit quasi-isotropen Materialeigenschaften verlangt nach irreversiblen Verbindungen zwischen den Körperschichten. Dazu werden grundsätzlich die vorhandenen Fügeverfahren (z.B. Schweißen, Löten) angewandt, die letztlich ein Lösen der Verbindung nur durch eine Bauteilzerstörung ermöglichen.

Im Hinblick auf den Einsatz von Prototypen in Testreihen wird eine schnelle Modifikation der Bauteile gefordert. Für verschiedene Tests werden die Bauteile unterschiedlichen Messverfahren und Messsystemen ausgesetzt, bzw. für die entsprechenden Untersuchungen messtechnisch präpariert. Die Modularisierung von Bauteilen erlaubt den Austausch nur einzelner Bauteilbereiche. Eine Modifikation einzelner Bereiche erfordert dagegen in der Regel die komplette Neuerstellung des Bauteils. Je nach Fertigungsverfahren ist dieser Vorgang sowohl zeitlich als auch wirtschaftlich aufwändig. Eine Modifikation der bestehenden Bauteilgeometrie kann deshalb nur in zwei Arten erfolgen:

- Trennende Bearbeitung des bestehenden Bauteils<sup>1</sup>
- Austausch einzelner Bauteilbereiche (Modularisierung)

Eine abtragende Bearbeitung ist stets mit einer Verringerung des Bauteilvolumens verbunden und daher unidirektional. Eine Erweiterung von Bauteilen mit Strukturen im Zusammenhang mit einer Zunahme des Bauteilvolumens ist aus fertigungstechnischer Sicht mit trennenden Verfahren nicht realisierbar. Der Austausch einzelner Bauteilbereiche dagegen ermöglicht sowohl Veränderungen in Richtung einer Verringerung, als auch in Richtung einer Erhöhung des Bauteilvolumens. Diese bidirektionale Art der Modifikation von Bauteilen stellt jedoch spezielle Anforderungen an den eingesetzten Fügeprozess. Je nach Einsatzzweck ist die Festigkeit der Verbindung zwischen den Bauteilschichten sicherzustellen. Darüber hinaus muss die Verbindung so ausgelegt sein, dass ein späteres Lösen der Verbindung ohne Bauteilzerstörung möglich ist. Die Konstruktionstechnik bietet eine Reihe von Möglichkeiten, wie eine reversible Verbindung von Bauteilen gestaltet werden kann [vgl. NIEMANN 1981 und MATEK 1987].

Im Zusammenhang mit einer schnellen Erzeugung von modifizierten Prototypen ist, insbesondere bei Körpern mit hochkomplexen Strukturen, die Entwicklung von reversiblen Fügeprozessen von besonderer Bedeutung. Gerade im Vergleich zur Fertigung von Prototypen durch mehrstufige Verfahren (z.B. Positivmodell und Gießform) könnten gefräste Bauteilschichten mit Hilfe einer intelligenten Fügetechnik eine Alternative darstellen.

### 3.4 Wirtschaftliche Aspekte

Im Vorfeld der Fertigung von Prototypen muss der Verwendungszweck formuliert werden. Je nach Funktion unterscheiden sich die Modelle und die daraus resultierenden Anforderungen im erheblichen Maße (vgl. Kapitel 2). Die Anforderungen geben Auskunft über die Eigenschaften des zu fertigenden Prototypen. Dazu zählen in erster Linie:

- Material (Werkstoffeigenschaften)
- Genauigkeit (Auflösung)
- Oberflächengüte (Rauheiten)

Die geforderten Eigenschaften führen zu einer Einschränkung der Auswahl an einsetzbaren

---

<sup>1</sup> Ein kombiniertes Verfahren wie das Controlled Metal Build-Up (CMB) ist in Ausnahmen als weitere Alternative denkbar (z.B. bei der Reparatur von Formen). Es wird jedoch aus Gründen der eingeschränkten Spannmöglichkeiten an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt.



Prototyping-Verfahren. Die weiterhin möglichen Fertigungsverfahren werden im weiteren Verlauf der Auswahl hinsichtlich der Entstehungsdauer und der Fertigungskosten überprüft.

Im Hinblick auf die zu erwartende Entstehungsdauer der Prototypen ist auch die Frage der Verfügbarkeit der eingesetzten Verfahren zu beantworten. Eine im Sinne von Rapid Prototyping schnelle Fertigung von Prototypen ist nur möglich, wenn der Zugriff auf das ausgewählte Fertigungsverfahren gegeben ist. Während eine umfassende Auswahl von generativen RP-Verfahren eher bei Großkonzernen zu finden ist, greifen mittelständische Unternehmen vorwiegend auf RP-Dienstleistungsunternehmen zurück. Die Ursachen hierfür liegen zum einen in den hohen Investitionskosten, die eine wirtschaftliche Fertigung von Bauteilen nur bei einer entsprechend hohen Auslastung der Maschinen gewährleisten. Des Weiteren sind die Betriebskosten von generativen RP-Verfahren verhältnismäßig hoch [HOFFMANN 1998]. Insbesondere das Monomerharz für die Stereolithographie sowie das Pulver mit Kunststoffcoating für das selektive Lasersintern sind als hochpreisige Rohmaterialien anzusehen. Ferner sind für die einzelnen RP-Verfahren zusätzliche Elemente als Prozessperipherie (z.B. UV-Öfen für die Nachvernetzung von Stereolithographie-Bauteilen) einzusetzen, deren Anschaffung mit weiterem Aufwand verbunden ist. Auch hinsichtlich der Personalkosten zur Bedienung der Maschinen sind die generativen RP-Verfahren eher als nachteilig zu beurteilen. Der Fertigungsprozess setzt neben einem handwerklichen Geschick (z.B. zur Entfernung von Stützgeometrien) auch spezielle Erfahrung mit den komplexen Fertigungsprozessen voraus. Dies ist im Hinblick auf die mehrstufigen Fertigungsprozesse von besonderer Bedeutung. Ferner ist ein entsprechendes Prozesswissen des Anwenders erforderlich, der die zur Verfügung stehenden Verfahren hinsichtlich der Eignung für eine Fertigungsaufgabe beurteilen muss.

Die Fertigung von Prototypen mittels Fräsen setzt prinzipiell eine 3-Achs-Fräsmaschine voraus. Im Gegensatz zu den generativen Verfahren sind diese Art von Fräsmaschinen industriell weit verbreitet und werden vielseitig eingesetzt. Geringere Investitionskosten in Verbindung mit einer hohen Auslastung lassen die Fertigung von Prototypen mittels Fräsen durchaus sinnvoll erscheinen. Da bei der Auswahl des Rohmaterials auf grundsätzlich alle handelsüblichen zerspanbaren Werkstoffe zurückgegriffen werden kann, sind die Betriebskosten für das Fräsen eher gering. Das Fertigungsverfahren Fräsen gehört zu der Gruppe der Standard-Fertigungsverfahren und ist aufgrund der geringen Komplexität einfach zu beherrschen. Dieses Verfahren setzt maschinentechnische Kenntnisse voraus, jedoch sind keine zusätzlichen Spezialkenntnisse für die Fertigung notwendig. Im Vergleich zu den generativen RP-Verfahren muss das Bauteil jedoch datentechnisch auf die Fertigung vorbereitet werden. Diese Maßnahmen geschehen im Zusammenhang mit der Konstruktion und haben auf den eigentlichen Fertigungsprozess keinen Einfluss.

Vergleiche zu Bauzeiten und Fertigungskosten zwischen den einzelnen RP-Verfahren sind in der Literatur häufig zu finden [vgl. ECKSTEIN 2002, GEBHARDT 2000]. Die dort diskutierten Ergebnisse sind jedoch nur bedingt aussagekräftig, da die gemachten Angaben einen Teil der Marketing-Strategie der Hersteller darstellt. Aufgrund der geringen Informationsbasis ist eine objektive Bewertung der Ergebnisse kaum möglich [GEBHARDT 2000]. Für einen seriösen Vergleich unterschiedlicher RP-Verfahren sind eine Reihe von Informationen zu berücksichtigen:

- Investitionskosten
- Kosten für Zusatzausrüstung
- Höhe der Abschreibungen
- Kosten für Rohmaterial
- Kosten für Instandhaltung/Wartung
- Personalkosten (Schulungen)

Ferner beziehen sich die Vergleiche in der Regel nur auf einzelne Bauteile. Die Geometrie dieser Teile ist häufig auf die Art des Fertigungsverfahrens abgestimmt, so dass ein Vergleich mit anderen Bauteilen zu völlig anderen Ergebnissen käme. Diese Intransparenz macht eine Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von RP-Verfahren fast unmöglich.

## 4 Ansätze für ein optimiertes Prototyping

Je nach Einsatzzweck müssen die gefertigten Bauteile bereits in einem frühen Entwicklungsstadium Funktionen erfüllen. Daraus lassen sich direkt die Anforderungen an den einzusetzenden Werkstoff ableiten. Die Vielfalt einzusetzender Werkstoffe des Fertigungsverfahrens Fräsen lässt die Anwendung dieses Verfahrens grundsätzlich sinnvoll erscheinen. Im Rahmen dieses Kapitels werden Lösungsansätze aufgezeigt und entwickelt, die das Potenzial des Prototyping-Verfahrens Fräsen weiter ausnutzen.

In der Praxis haben sich für gefräste Prototypen zwei verschiedene Prototyping-Arten etabliert:

- **Direktes Prototyping**  
Fräsen von direkt einsetzbaren Prototypen in einem einstufigen Prozess
- **Rapid Tooling**  
Fräsen von Positivmodellen für anschließende Abformtechniken zur Gießformherstellung in einem mehrstufigen Prozess

Zur Lösung der in den vorangegangenen Kapiteln angesprochenen Probleme werden zu den einzelnen Funktionen folgende Ansätze vorgeschlagen. Unabhängig von der Anzahl der Stufen des Prozesses gelten die im folgenden entwickelten Ansätze gleichermaßen.

### 4.1 Schicht erzeugen

Grundlage einer Bauteilschicht ist das Rohmaterial mit den erforderlichen Mindestabmessungen. Die Mindestabmessungen resultieren aus der minimal umschreibenden Geometrie, die den Körper komplett umschließt. In bezug auf die Möglichkeiten einer einfachen Fixierung des Werkstückes im Rohzustand und hinsichtlich einer einfachen Bestimmung der Referenzpunkte sollte bei der Wahl des Rohmaterials auf Geometrien mit quaderförmigen oder zylindrischen Grundfor-

men zurückgegriffen werden.

Die Abmessungen des Rohmaterials werden durch die Bauteilhöhe vorgegeben, die durch die datentechnische Bauteilzerlegung in Schichten festgelegt wird. Hinsichtlich eines optimalen Fertigungsergebnisses sollte die Zerlegung der Bauteile in Schichten nicht über die maximale Plattenstärke und die Mindesthöhe der Bauteilschicht ermittelt werden, sondern unter Berücksichtigung des kleinsten notwendigen Werkzeugs. Folgende Größen sind bei der Auslegung der Bauteilschichten von Bedeutung:

- Fräserradien
- Schneidenlänge
- Freischnittlänge

Während die Fräserradien die Größenordnung des am Bauteil verbleibenden Restmaterials vorgeben, können mittels der Größen Schneiden- und Freischnittlänge Angaben zu der maximalen Bearbeitungstiefe und damit zur maximalen Bauteilhöhe gemacht werden. Im Ergebnis lassen sich die Bauteile in eine möglichst geringe Anzahl an Schichten zerlegen. In der praktischen

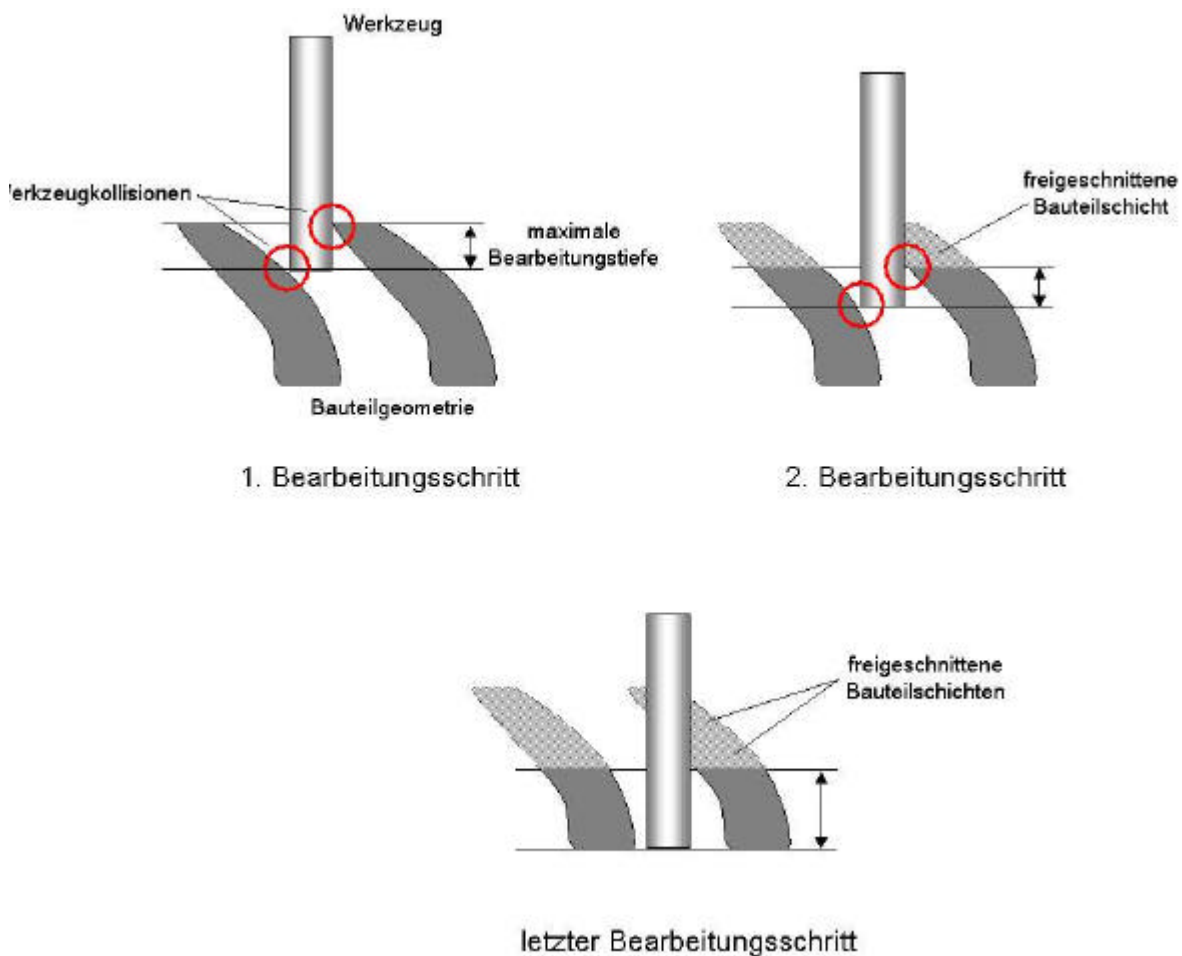


Abbildung 4-1 Arbeitsschritte der virtuellen Bearbeitung

Anwendung geschieht diese fertigungsgerechte Analyse in Form einer virtuellen Bearbeitung. Dabei wird das komplette Bauteil bereits im 3D-CAD-System auf fertigungstechnisch problematische Stellen analysiert und diese mit einem fräseridentischen Körper auf mögliche Kollisionen überprüft (vgl. Abbildung 4-1). Ist eine maximale Bearbeitungstiefe ermittelt worden, wird das Bauteil in dieser Tiefe geschnitten und in eine Bauteilschicht und in den verbleibenden Abschnitt des Bauteils unterteilt. Im weiteren Verlauf dieser virtuellen Bearbeitung wird der verbleibende Abschnitt des Bauteils in gleicher Weise analysiert und in entsprechende Bauteilschichten zerlegt. Die Abmessungen des fräseridentischen Körpers orientieren sich dabei an den tolerierbaren Größen für das Restmaterial. Das ausgewählte Werkzeug sollte grundsätzlich so klein wie nötig und so groß wie möglich sein, damit die Anzahl an Körperschichten minimal gehalten werden kann.

## 4.2 Kontur erzeugen

Die Funktion Kontur erzeugen beinhaltet neben dem reinen Bearbeitungsvorgang auch die Entwicklung der NC-Dateien zur Steuerung der Fräsmaschine und die Lösung spanntechnischer Problemstellungen.

Das Generieren von NC-Programmen stellt grundsätzlich keine Schwierigkeit dar. Es existieren für alle gängigen 3D-CAD-Systeme kommerzielle NC-Programme. Diese bieten, im Vergleich zu den Softwareprodukten zur Herstellung gefräster Prototypen, eine Vielfalt verschiedener Bearbeitungsstrategien. Auch im Hinblick auf die Nutzung von 5-Achs-Fräsmaschinen ist der Einsatz von kommerziellen NC-Programmen in Verbindung mit 3D-CAD-Systemen als vorteilhaft einzuschätzen.

Die Bauteilbearbeitung von zwei Seiten verlangt nach einer geeigneten Fixierungsmöglichkeit der Bauteile auf einer bearbeiteten Seite.

### 4.2.1 Entwicklung von Hilfsgeometrien zur zweiseitigen Werkstückbearbeitung

Bei dem Bearbeiten von Bauteilen mit Hilfsgeometrien treten verschiedene Aspekte (z.B. Einfluss auf die Gestalt der Bauteiloberfläche) in den Vordergrund. Zum einen muss sichergestellt sein, dass die beim Spannen und Bearbeiten auftretenden Kräfte und Momente zu keiner genauigkeitsbeeinflussenden Verformung des Bauteils führen. Zum anderen müssen die Hilfsgeometrien so ausgelegt sein, dass eine Bearbeitung der Bauteile von beiden Seiten möglich ist.

#### 4.2.1.1 Innere Hilfsgeometrien als Mittel zur Bauteilfixierung

Während äußere Hilfsgeometrien (vgl. Kap. 3) mit der sichtbaren Bauteiloberfläche verbunden sind, treten innere Hilfsgeometrien nur im Bauteilinneren in Erscheinung. Im Gegensatz zu den äußeren Hilfsgeometrien muss daher für einen Einsatz von inneren Hilfsgeometrien eine Schnittebene vorliegen.

Bei der Auslegung der inneren Hilfsgeometrien ist darauf zu achten, dass der anschließende Fügevorgang mit der benachbarten Bauteilschicht nicht behindert wird. Prinzipiell sind zwei Formen von inneren Hilfsgeometrien denkbar. Normal zur Schnittebene wird je nach Richtung der Ausprägung zwischen negativ oder positiv ausgeprägten inneren Hilfsgeometrien unterschieden. Für die Orientierung und Fixierung werden Verbindungselemente (z.B. Passstifte bei Bohrungen) benötigt, die auf die Form der Hilfsgeometrien abgestimmt sind.

In der vorliegenden Arbeit sollen Hilfsgeometrien entwickelt werden, die auf den Einsatz zusätzlicher Verbindungselemente verzichten. Dazu müssen die Ausprägungen der Hilfsgeometrien benachbarter Schichten aufeinander abgestimmt werden. Einer negativ ausgeprägten Hilfsgeo-

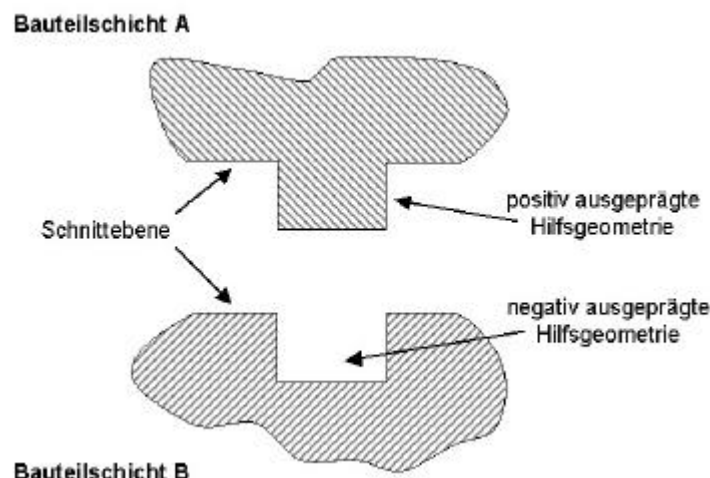


Abbildung 4-2 Zusammenhang: innere Hilfsgeometrie

metrie muss einer positiv ausgeprägten Hilfsgeometrie gegenüber stehen (vgl. Abbildung 4-2). Grundvoraussetzung für ein Hilfsgeometriepaar sind deckungsgleiche Schnittflächen benachbarter Schichten, die durch die jeweilige Schnittebene festgelegt werden. Grundsätzlich sind bei der konstruktiven Gestaltung der Hilfsgeometriepaare die möglichen Formen vielfältig. Während eine rechteckige Variante sowohl translatorische als auch rotatorische Bewegungen unterbindet, vermeidet die kreisförmige Variante nur translatorische Verschiebungen. Zur Vermeidung von rotatorischen Bewegungen muss hier mindestens ein weiteres Hilfsgeometriepaar vorgesehen werden. Bei der konstruktiven Gestaltung müssen jedoch fertigungstechnische Aspekte berücksichtigt werden. Das Fertigungsverfahren Fräsen erlaubt zwar die Fertigung einer rechteckigen

Geometrie für die positiv ausgeprägte Form, nicht aber für die negativ ausgeprägte Form. Werkzeugbedingt ist ein verbleibender Eckradius nicht zu vermeiden.

Neben den fertigungstechnischen Aspekten schränken auch spanntechnische Gegebenheiten die Vielfalt an Gestaltungsvarianten ein. Das Spannen von Werkstücken erfolgt auf Flächen, die möglichst direkt mit dem zu bearbeitenden Körper verbunden sind. In der Regel werden die

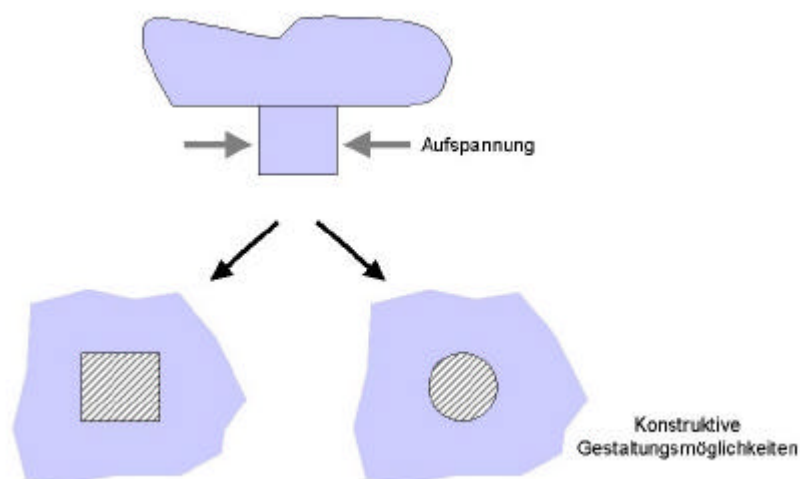


Abbildung 4-3 Grundsätzliche konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten innerer Hilfsgeometrien

Bauteile durch einen Klemmvorgang fixiert und gehalten. Dabei ist es unerheblich, ob die Klemmwirkung durch mechanische Krafteinwirkung (klassische Spanntechnik) oder beispielsweise durch Druckunterschiede zwischen der Umgebung und den Spannflächen ausgeübt wird (Vakuumspanntechnik). Der direkte Kontakt zwischen der Spannvorrichtung und der Spannfläche des Werkstückes lässt eine Bearbeitung der Spannoberflächen nicht zu. Bei Einsatz von positiv ausgeprägten Hilfsgeometrien ist eine gute Zugänglichkeit der Spannflächen der Hilfsgeometrien gegeben. Die konstruktive Gestalt spielt bei positiv ausgeprägten Hilfsgeometrien eine untergeordnete Rolle, da sich prinzipiell eine Vielzahl unterschiedlicher Formen für das Spannen durch Klemmen eignet.

Schwieriger gestaltet sich das Spannen von Körpern mit negativ ausgeprägten Hilfsgeometrien. Das Klemmen an innenliegenden Flächen ist mit einem erheblichen mechanischen Aufwand verbunden. Es sind Vorrichtungen notwendig, die auf die jeweilige Aufgabe abgestimmt werden müssen. Eine Alternative stellt das Spannen über einen sogenannten Opferblock dar. Dieser Opferblock ist eine Art „verlorene Spannhilfe“, die speziell für die zu spannenden Körper gefertigt wird. Je nach Ausführung oder Standardisierung der Bohrung-Zapfen-Kombination wäre eine Wiederverwendbarkeit prinzipiell möglich. Ein Maschinentisch könnte mit einem Grundraster von Zapfen und Bohrungen versehen werden.

Die Form der positiv ausgeprägten Hilfsgeometrien des Opferblockes entspricht den negativ ausgeprägten Hilfsgeometrien des zu spannenden Körpers (vgl. Abbildung 4-4). Aufgrund des Zusammenhangs zwischen der Gestalt und Anordnung der Hilfsgeometrien auf dem Werkstück und des Opferblocks ist eine automatisierte Fertigung der Spannhilfe möglich. Es werden unter anderem folgende Anforderungen an den Opferblock gestellt:

Das eingesetzte Material sollte eine gute Zerspanbarkeit aufweisen, um den frästechnischen Aufwand möglichst gering zu halten. Des weiteren sollte das Material in der Lage sein, bei geeigneten Randbedingungen eine ausreichende Klemmwirkung auf die innenliegenden Flächen aus-

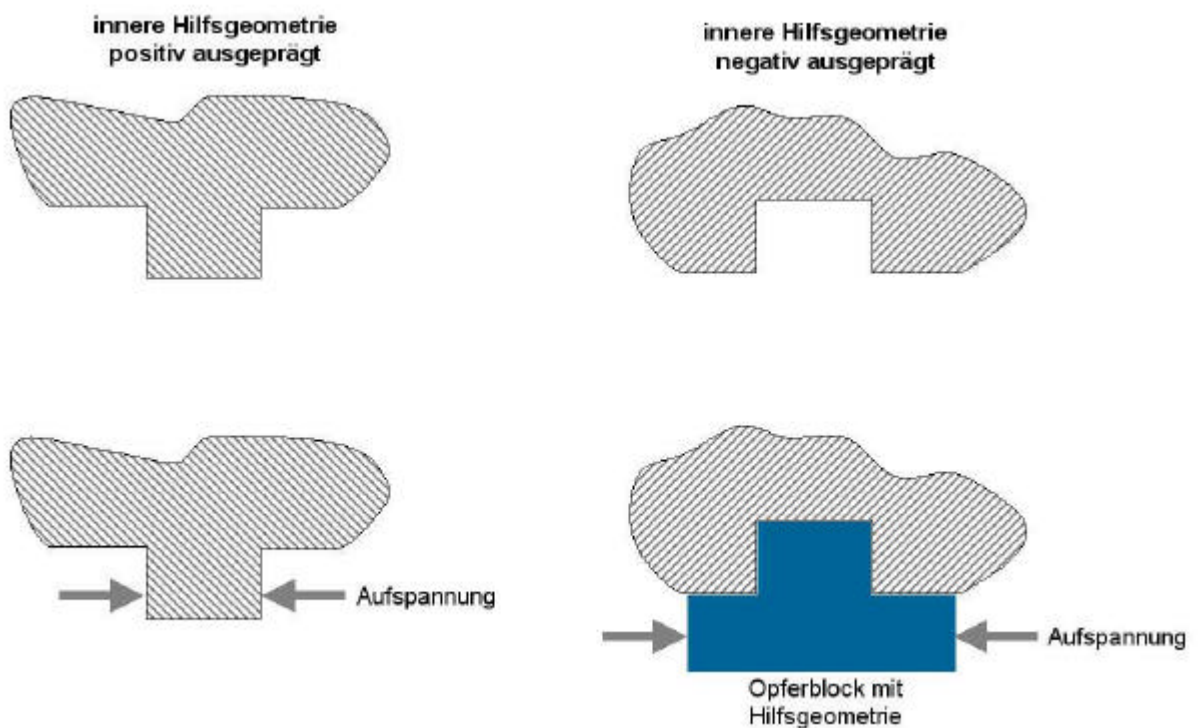


Abbildung 4-4 Aufspannvarianten unterschiedlicher innerer Hilfsgeometrien

zuüben. Diese Klemmwirkung muss einerseits so groß sein, dass eine Verschiebung des Werkstückes unterbunden wird und zum anderen entsprechend begrenzt sein, damit ein Lösen dieser Verbindung ohne Beschädigung des Bauteils möglich ist. Erreicht wird diese Art von Verbindung mit Hilfe von Pressverbänden. Die Auslegung von Pressverbindungen und deren beeinflussende Faktoren werden in Kapitel 4.3.2 eingehend diskutiert.

#### 4.2.1.2 Genauigkeitseinflüsse durch elastische Verformungen der Hilfsgeometrien

Durch die fertigungstechnische Bearbeitung der Bauteilschichten treten Kräfte und Momente auf, die zu temporären Verformungen führen. Bedingt durch den Zerspanungsvorgang treten Kräfte sowohl in Bearbeitungsrichtung als auch in Richtung der Werkzeugachse auf. In Verbindung zu den fixierenden Spannkraften an den Hilfsgeometrieoberflächen resultieren daraus



Momente in unterschiedlichen Richtungen.

Ausgehend von einem quaderförmigen Rohteil treten die größten Momente am entferntesten Punkt von der Spannfläche auf.

Die Schwierigkeit liegt in der Bestimmung der angreifenden Kräfte. Die Größe dieser Kräfte ist von verschiedenen Faktoren abhängig:

- Drehzahl des Werkzeugs
- Spantiefe
- Vorschubgeschwindigkeit des Werkzeugs
- Art und Beschaffenheit des Werkzeugs
- Zähigkeit des zu bearbeitenden Materials/Werkstück

Hinsichtlich der Bestimmung von Zerspankräften sind in der Vergangenheit umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden. In diesem Zusammenhang wurden sogenannte Schnittwerttabellen [GARANT 2002] entwickelt, die für die unterschiedlichen Randbedingungen Anhaltswerte für die gewünschten Größen liefern.

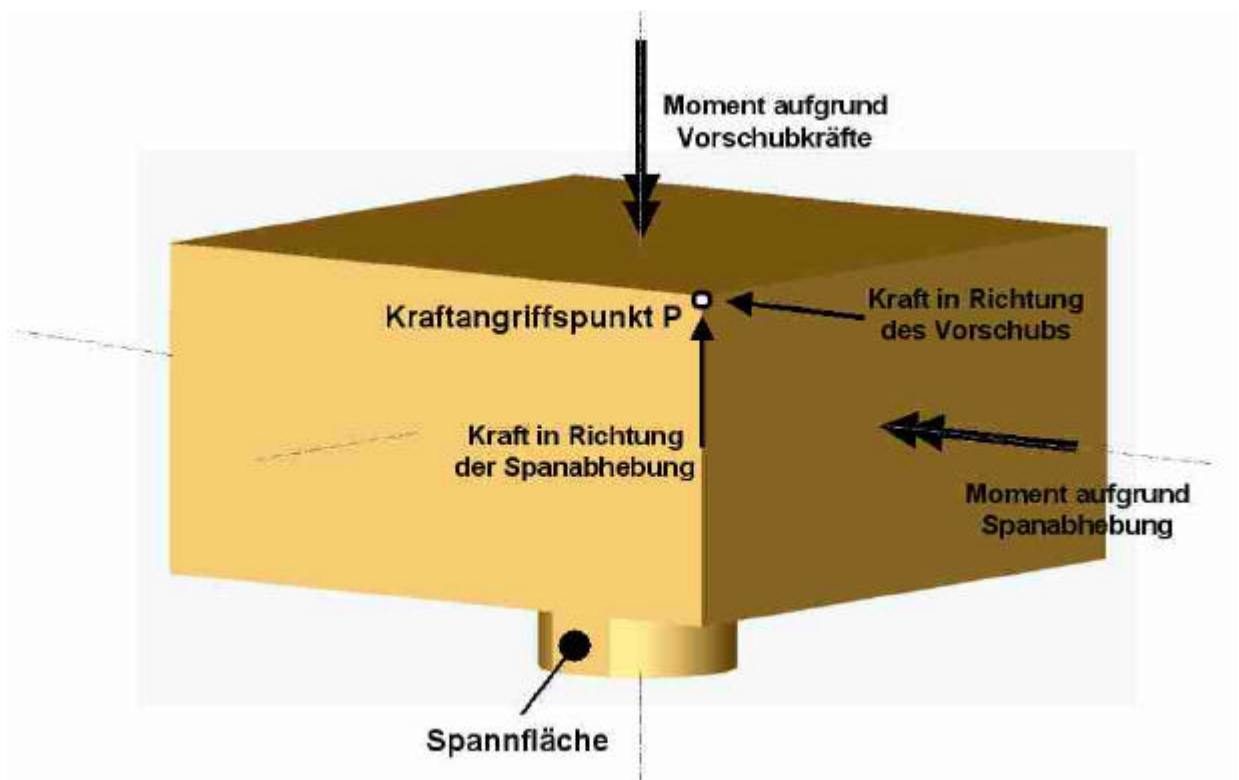


Abbildung 4-5 Kräfte durch den Bearbeitungsvorgang bei Werkzeugeingriff in Punkt P

Ausgehend vom Fall der maximalen Belastung auf das Werkstück aufgrund ungünstiger Zerspanungsbedingungen lässt sich das Verhalten während der Bearbeitung simulieren. Zunächst muss sichergestellt werden, dass sich die auftretenden Verformungen ausschließlich auf den elastischen

Bereich beschränken. Plastische Verformungen in Form einer translatorischen Bewegung würden zu einer Verschiebung des Nullpunktes führen. Aus einer Verformung mit dem Ergebnis einer rotatorischen Bewegung resultiert ein Verdrehen der (Referenz-)Nullpunkzebene. Zur Sicherstellung einer hochgenauen Fertigung durch Fräsen müssen die unterschiedlichen Größen und Angriffspunkte der Zerspankräfte bei der Auslegung der Hilfsgeometrien berücksichtigt werden. Im Zusammenhang mit den Festigkeitseigenschaften der eingesetzten Werkstoffe werden im Vorfeld Untersuchungen über mögliche Verschiebungen des Bauteils durchgeführt. Bereits während der Konstruktionsphase können durch Einsatz von FEM-Analysen Aussagen zu auftretenden Verformungen und Verschiebungen getroffen werden. Dadurch ist eine Abstimmung der Zapfengeometrie auf die jeweilige Bearbeitungsaufgabe möglich. Analog lassen sich auch Ergebnisse mittels FEM-Analysen für äußere Hilfsgeometrien ermitteln (vgl. Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7). Hierzu wurde zum Vergleich zweier identischer Grundkörper mit äußeren und inneren Hilfsgeometrien von Hilfsgeometrien FEM-Rechnungen durchgeführt (Programm: COSMOS für SolidWorksVersion 6.0):

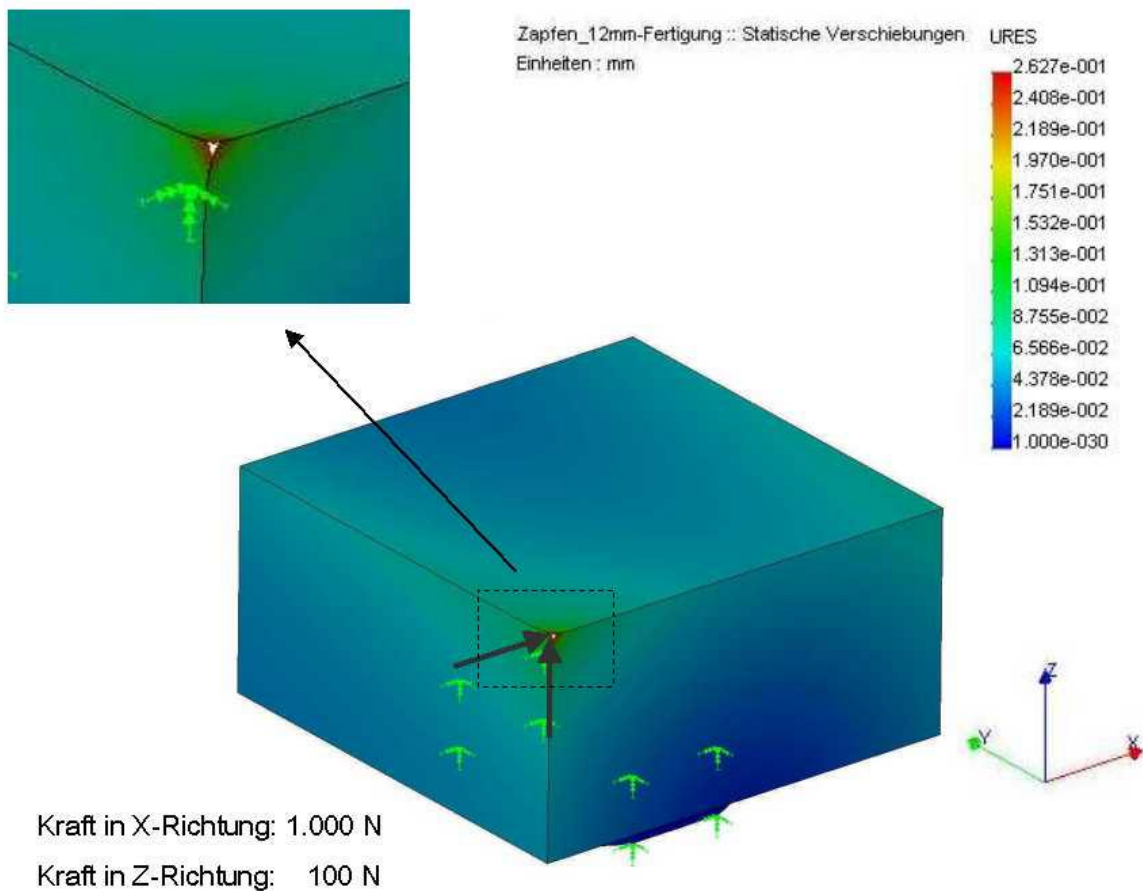


Abbildung 4-6 FEM-Simulation: Fertigungsverfahren mit Zapfen (Durchmesser 12 mm) als Hilfsgeometrie; Darstellung der Verschiebungen für Aluminium 6061

Während sich die auftretenden Verschiebungen bei dem Fertigungsvorgang mit Zapfen als Hilfsgeometrie nur auf den Bereich um den Kraftangriffspunkt herum beschränken, führt, wie die Berechnungen zeigen, die Belastung des Körpers mit Stegen als äußeren Hilfsgeometrien zu einer Verschiebung der Flächen in Bearbeitungsrichtung (X-Richtung). Mit längeren und dünneren Stegen verstärkt sich dieser Effekt, da die auftretenden Kräfte und Momente zu größeren Spannungen und damit zu einer größeren Verformung in den Stegen führt. Nicht zuletzt lassen bei identischen Belastungen die höheren Verformungsspitzen (Maximalwerte im Kraftangriffspunkt) bei dem Fertigungsvorgang mit Zapfen auf eine grundsätzlich steifere Struktur schließen.

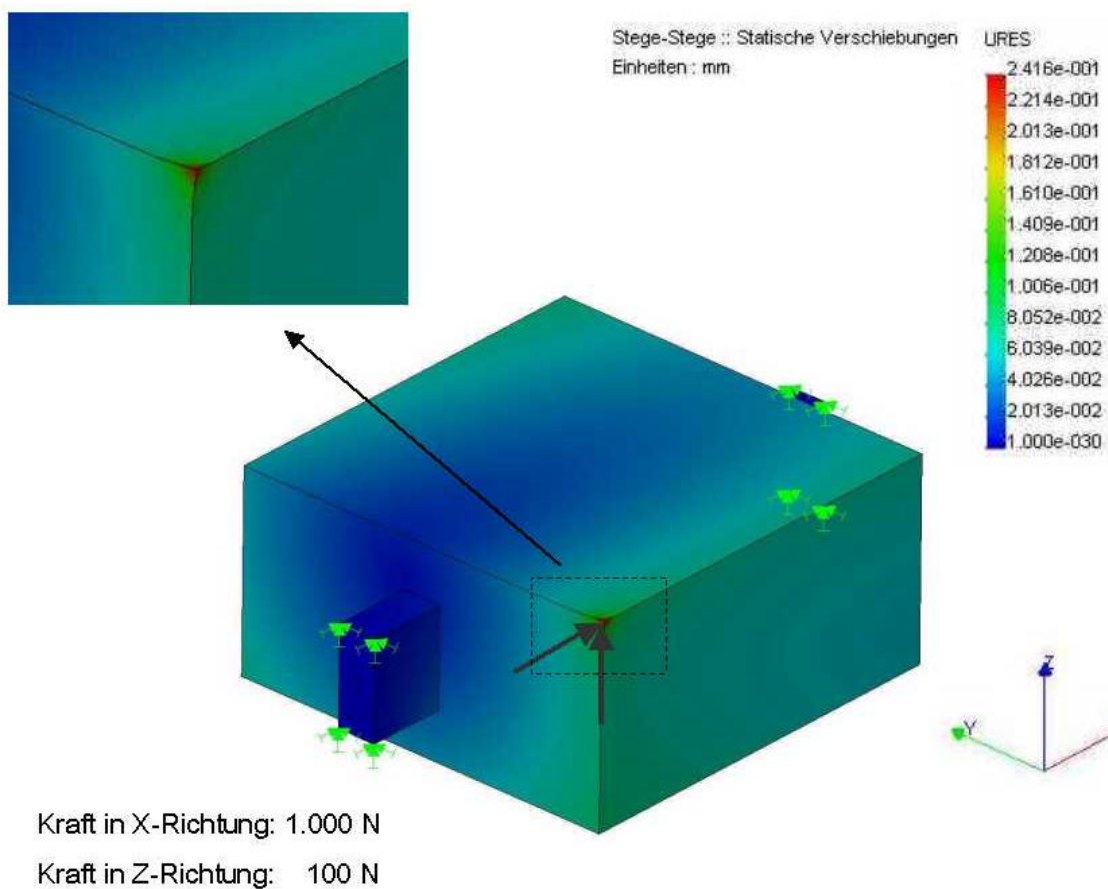


Abbildung 4-7 FEM-Simulation: Fertigungsvorgang mit Stegen (Breite 2mm Höhe 5mm) als Hilfsgeometrie; Darstellung der Verschiebungen für Aluminium 6061

Die Bauteilgeometrien der FEM-Analysen orientieren sich an der Gestalt des Rohmaterials. Ausgehend vom Rohmaterial treten die größten Kräfte und Momente bei der Grobzerspannung, dem sogenannten Schruppen, auf. Bei der Feinzerspannung, dem sogenannten Schlichten treten dagegen aufgrund höherer Drehzahlen mit kleineren Werkzeugen auch geringere Zerspanungskräfte auf. Untersuchungen zur Bestimmung von Verformungen durch die spanende Bearbeitung beschränken sich hier somit nur auf das Schruppen.

4.2.1.3 Optimierte Gestaltung der inneren Hilfsgeometrien

Während die auftretenden Kräfte durch den Bearbeitungsvorgang zu Bauteilabweichungen führen können, ist darauf zu achten, dass die Spannkkräfte keine Formabweichungen der äußeren Hilfsgeometrien verursachen. Zum Abfangen der Bearbeitung sind hinreichend große Spannkkräfte erforderlich. Formabweichungen entstehen durch eine zu große Flächenpressung auf den Spannflächen.

$$p = \frac{F_S}{A_S} \leq p_G \text{ in N/m}^2 \tag{Gl. 4-1}$$

$A_S$	Spannfläche	[m <sup>2</sup> ]
$F_S$	Spannkraft	[N]
$p$	Flächenpressung	[N/m <sup>2</sup> ]
$p_G$	Grenzflächenpressung (materialabhängig)	[N/m <sup>2</sup> ]

Zur Vermeidung von irreversiblen Fließvorgängen sollte die errechnete Flächenpressung kleiner sein als die materialabhängige Grenzflächenpressung.

Eine möglichst große Spannfläche ist mit rechteckigen Querschnitten zu realisieren, deren Seitenflächen parallel zu den Spannelementen ausgerichtet sind. Aus fertigungstechnischen Gründen ist

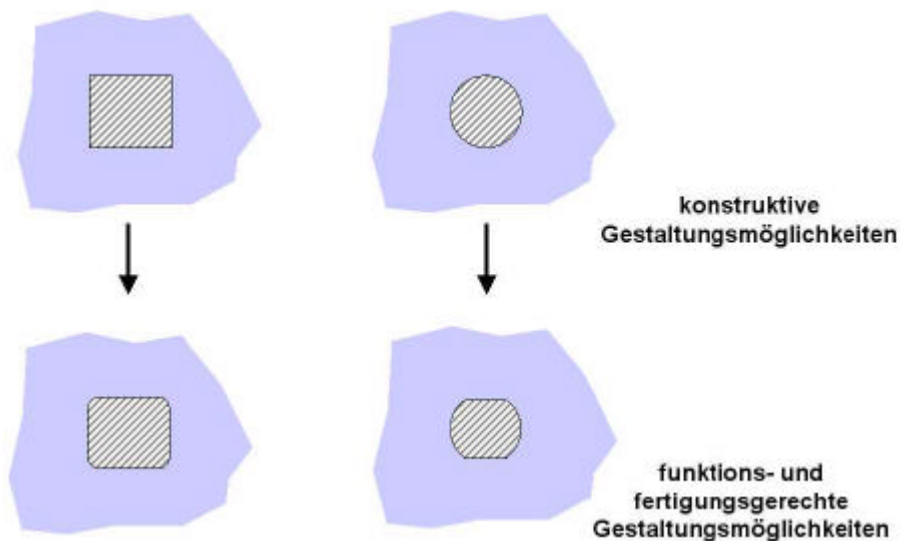


Abbildung 4-8 Funktions- und fertigungsgerechte Gestaltungsmöglichkeiten innerer Hilfsgeometrien

diese Form als negativ ausgeprägte Geometrie nicht zu realisieren. Eine Ausnahme stellen Rechteckformen mit definierten Eckradien dar, die als negativ ausgeprägte Geometrie zu fertigen sind (vgl. Abbildung 4-8). Die Fertigung kreisrunder Querschnitte ist dagegen für beide Formen

möglich. Die Spannkontaktfläche für kreisrunde Querschnitte ist jedoch entsprechend gering, so dass bei der Flächenpressung mit sehr großen Werten gerechnet werden muss. Es ist außerdem davon auszugehen, dass bei kreisrunden Querschnitten die Gefahr eines Bauteilverdrehens in der Aufspannung besteht. Die Vorteile beider Varianten sind in einer Mischform verbunden. Durch das konstruktive Merkmal einer Abflachung lassen sich signifikant größere Spannkontaktflächen erzielen, die gleichzeitig ein Verdrehen in der Aufspannung unterbinden. Das konstruktive Gegenstück zu dieser Hilfsgeometrie ist eine Bohrung, wodurch die Fügekontaktflächen nur durch die Kreisabschnittsflächen vorgegeben sind.

#### 4.2.2 Bearbeitungsvorgang mit inneren Hilfsgeometrien

Die Fertigung mit inneren Hilfsgeometrien teilt sich in zwei grundlegende Bereiche auf. Im datentechnischen Bereich werden die Konstruktionsdaten für die anschließende Fertigung vorbereitet. Der fertigungstechnische Bereich konzentriert sich auf die eigentliche Bearbeitung mittels CNC-Technik. Dieser Bereich gliedert sich in zwei Schritte:

- 1. Fertigungsschritt:** Bearbeitung aus Richtung der Unterseite
- 2. Fertigungsschritt:** Bearbeitung aus Richtung der Oberseite

Die Schnittstelle zwischen dem datentechnischen und fertigungstechnischen Bereich stellt die eingesetzte NC-Software dar. Sie wandelt die Daten aus der Konstruktion in maschinenlesbare Daten um. Gleichzeitig werden die fertigungstechnischen Parameter mit Hilfe der NC-Software festgelegt.

Das Fertigungsprinzip mit inneren Hilfsgeometrien wird im folgenden am Beispiel einer massiven Kugel dargestellt (Abbildung 4-9).

##### 1. Körpertrennung durch Einfügen einer Trennebene

Zunächst wird der zu fertigende Körper durch Einfügen von Trennebenen in die einzelnen Körperschichten unterteilt. Es ist bei der Aufteilung des Bauteils in die Körperelemente zu beachten, dass die trennende Schnittebene jeweils zwei deckungsgleiche Schnittflächen erzeugt. Nur so ist ein stetiger Übergang der Konturen zwischen zwei Körperschichten zu erreichen.

##### 2. Erweiterung mit Inneren Hilfsgeometrien

Die entstandenen Körperelemente werden im weiteren Verlauf als eigenständige Bauteile betrachtet. Die Schnittflächen benachbarter Körperschichten werden mit Hilfsgeometrien erweitert. Zur Vermeidung von Hindernissen beim Fügevorgang, müssen die Position und Gestalt der Hilfsgeometrien aufeinander abgestimmt werden.

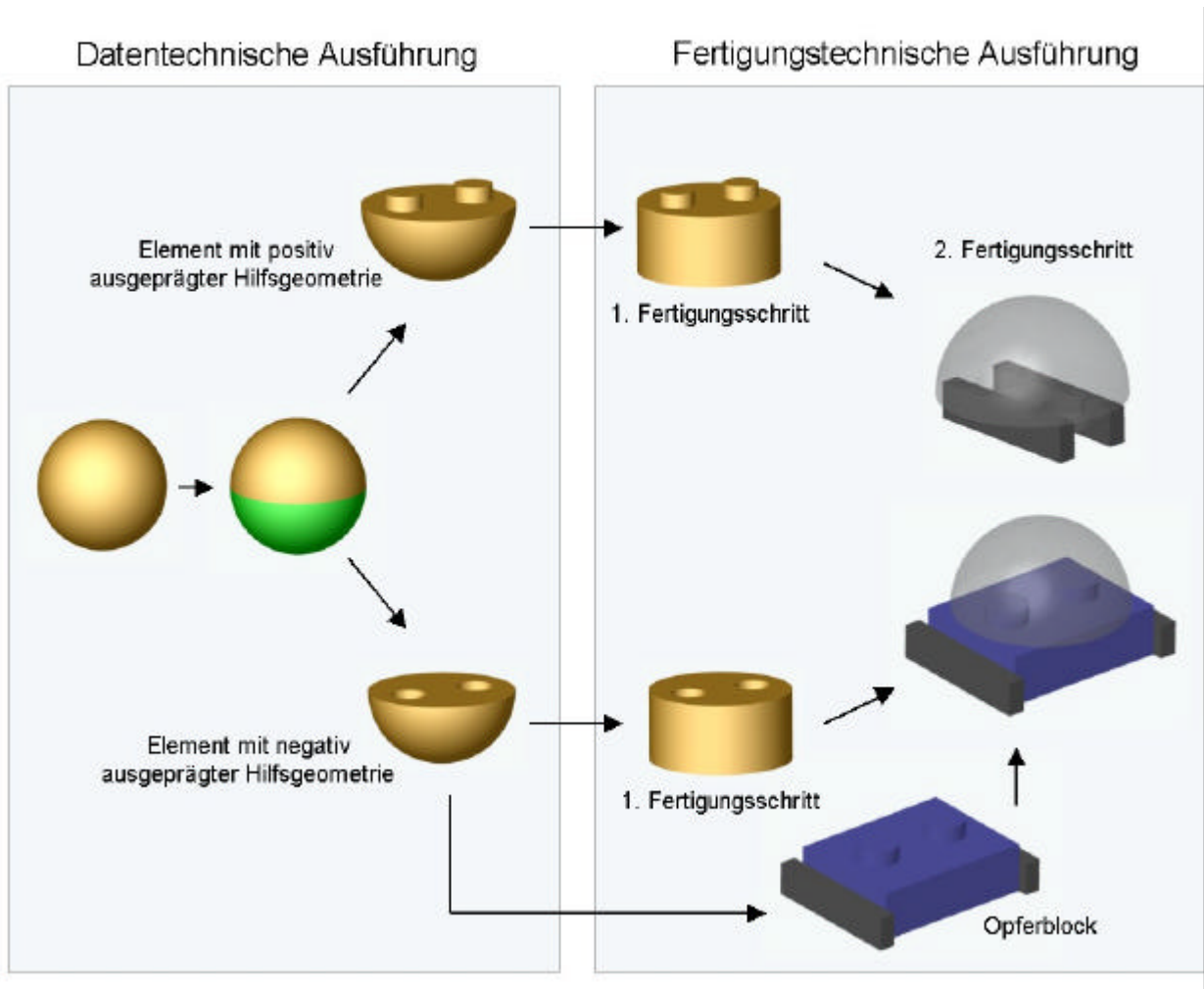


Abbildung 4-9 Fertigungsprinzip am Beispiel einer Kugel

### 3. Bearbeitung von Bauteilen mit positiv ausgeprägter Hilfsgeometrie

Im ersten Schritt wird das Rohteil normal eingerichtet und fixiert. Anschließend wird die Hilfsgeometrie gefertigt und der Körper aus Richtung der Unterseite bearbeitet. Zur Bearbeitung aus Richtung der Oberseite muss das Bauteil umgedreht und durch die Hilfsgeometrien gespannt werden.

### 4. Bearbeitung von Bauteilen mit negativ ausgeprägter Hilfsgeometrie

Analog zur Fertigung von Bauteilen mit inneren Hilfsgeometrien wird auch hier zunächst das Rohteil mit Hilfsgeometrien versehen und aus Richtung der Unterseite bearbeitet. Im Gegensatz zur Bearbeitung mit positiv ausgeprägter Hilfsgeometrie muss für die Bearbeitung von Bauteilen mit negativ ausgeprägter Hilfsgeometrie aus Richtung der Oberseite ein zusätzliches Hilfsmittel, der sogenannte „Opferblock“ erzeugt werden. Dieser Block stellt eine temporäre Spannhilfe dar, die auf die zu spannende Hilfsgeometrie angepasst werden muss. Die Verbindung zwischen der temporären Spannhilfe und dem zu spannenden Bauteil muss so dimensioniert sein, dass eine Ver-

schiebung zwischen Bauteil und Spannhilfe durch den Bearbeitungsvorgang vermieden wird. Da das Bauteil nach der Bearbeitung wieder von der Spannhilfe getrennt werden muss, ist die Verbindung als reversibler Fügevorgang auszulegen.

### 4.3 Schichten Fügen

Das Fügen der Bauteilschichten stellt den letzten Schritt der Herstellung von Prototypen dar. Aufgrund der Vielfalt an einzusetzenden Materialien müssen die infrage kommenden Fügeverfahren auf die einzelnen Werkstoffe abgestimmt sein. Bei dem Fügeverfahren Kleben werden beispielsweise die zu fügenden Flächen vor dem Zusammenführen der Bauteile präpariert, während beim Verbinden mittels Löten die Verbindung in einem bereits zusammengeführten Zustand erfolgt. Die geringe Stückzahl der Prototypen und die eingeschränkten Möglichkeiten zur Fixierung von Schichten mit gekrümmten Oberflächen lassen prinzipiell nur einen manuellen Arbeitsvorgang sinnvoll erscheinen.

#### 4.3.1 Positionieren der Schichten zum Fügen mittels klassischer Fügeverfahren

Zum Fügen mittels klassischer Fügeverfahren (z.B. Kleben, Löten) ist eine zuverlässige Positionierung der Bauteile erforderlich. Die Mehrzahl aller Fügeprozesse benötigen eine definierte Zeit zum Aufbau einer Fügeverbindungen (z.B. Trocknen, Abkühlen). In dieser Zeit müssen die zu fügenden Teile exakt zueinander positioniert sein und stehen teilweise zusätzlich unter Druckspannung. Auch das Verbinden mittels Schrauben setzt eine reproduzierbare Positionierung der zu fügenden Bauteile voraus. In diesem Zusammenhang sind die entsprechenden Fertigungstoleranzen zu berücksichtigen. Die in Kapitel 2 erwähnten Möglichkeiten zur Positionierung von Bauteilen beschränken sich auf Bohrungen, die mittels angepasster Stifte oder Stangen ausgerichtet werden. Eine exakte Ausrichtung anhand von Referenzkanten oder -ebenen ist bei Bauteilen mit einer komplexen Geometrie unter Umständen nicht möglich. Die diskutierten kommerziellen Systeme zur Fertigung gefräster Prototypen bieten nicht die Möglichkeit der Anwendung von Präzisionswerkzeugen (z.B. Reiben) zur Fertigung exakter Bohrungen. Ferner setzt das Anfertigen der Passstifte und Stangen einen zusätzlichen Arbeitsprozess voraus.

#### Positionierung mittels innerer Hilfsgeometrien

Als neuer Ansatz zum Positionieren der Bauteilschichten wird die Anwendung von Bohrung-Zapfen-Kombinationen vorgeschlagen (siehe Abbildung 4-10). Durch die Auslegung dieser

Geometriekombination als eine H7/h6-Passung (Spielpassung) lassen sich die Teile mit geringstem Spiel zusammenführen. Nach DIN 7154, DIN 7155 und DIN 7157 gilt für das Nennmaß 50 mm ein minimales Untermaß von 0  $\mu\text{m}$  und ein maximales Untermaß von 41  $\mu\text{m}$ . Für einen vereinfachenden Umgang in der Praxis ist eine direkte Angabe der Maßtoleranzen zulässig und zweckmäßig.

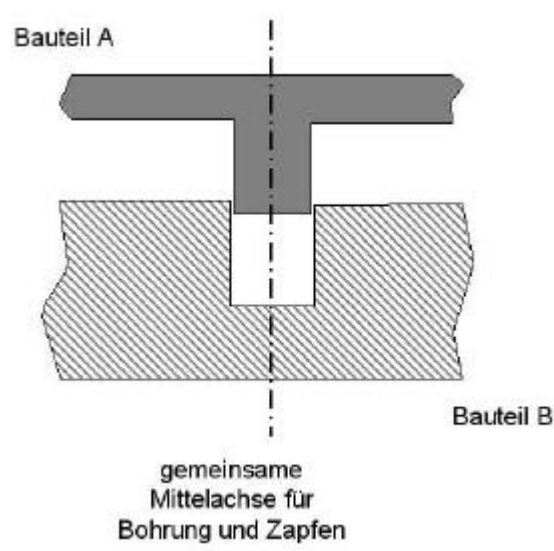


Abbildung 4-10 Positionierung mittels Bohrung-Zapfen-Pressverbindung

Dadurch wird ein translatorisches Verschieben der Bauteilschichten gegeneinander unterbunden. Eine Absicherung gegen ein rotatorisches Verdrehen der Bauteilschichten wird durch die Anwendung zweier Bohrung-Zapfen-Kombinationen erreicht.

### 4.3.2 Fügeprozesse durch angepasste Pressverbindung

Der Fügeprozess kann auch mittels angepasster Pressverbindungen erfolgen. Als Grundlage solcher Verbindungen können die bereits angesprochenen Bohrung-Zapfen-Kombinationen dienen, die bei entsprechender Auswahl die Anforderungen an Pressverbindungen erfüllen.

In der Konstruktionstechnik sind Pressverbindungen als Ausführung reibschlüssiger Verbindungen fest etabliert. Entsprechend der Ausführung wird zwischen folgenden Pressverbindungsarten unterschieden:

- Klemmverbindungen
- Spannelementverbindungen
- Kegelverbindungen
- Zylindrische Pressverbände



Klemmverbindungen sowie Spannelementverbindungen bedienen sich in der Anwendung vielfach zusätzlicher Hilfselemente, die eine umfassende Zugänglichkeit der Verbindungsart voraussetzen. Die Forderung nach einer Verbindungsart, die ausschließlich im Inneren des Körpers ausgeführt wird und daher von außen nicht zugänglich ist, lässt die Arten Klemm- und Spannelementverbindung als ungeeignet erscheinen [NIEMANN 1981, MATEK 1987].

### **Kegelverbindungen**

Kegelverbindungen werden aufgrund des hochgenauen zentrischen Sitzes hauptsächlich für Welle-Nabe-Verbindungen eingesetzt, die sich durch eine große Laufruhe und Laufgenauigkeit auszeichnen. Als klassisches Beispiel kann hier die Arbeitsspindel von Bohr- oder Fräsmaschinen angeführt werden. Die Kegelform verhindert jedoch ein axiales Verschieben oder Ausrichten dieser Verbindungsart, so dass die Einsatzmöglichkeiten im RP-Bereich stark eingeschränkt sind. [vgl. NIEMANN 1981]

### **Zylindrische Pressverbände**

Eine einfache und wirtschaftlich günstige Art der Verbindung zwischen Welle und Nabe sind zylindrische Pressverbände. Bei entsprechender Auslegung sind diese Verbindungen in der Regel nicht mehr zu verschieben oder zu lösen. Grundsätzlich resultieren Pressverbände durch das Fügen von Bauteilen, die vor dem Fügevorgang ein Übermaß aufweisen. In der Literatur werden diese Pressverbände nach der Art der Zusammenfügung unterschieden [NIEMANN 1981]:

- **Längspressverbände**

Verbindung der Teile im „kalten“<sup>1</sup> Zustand – Pressvorgang in Längsrichtung

- **Schrumpfpresverbände/Dehnpresverbände**

Erwärmung der Außenteile oder Kühlung der Innenteile – Pressvorgang in Querrichtung

- **Ölpresverbände**

Hydraulisches Weiten des Außenteils – Pressvorgang in Querrichtung

des Innenteils Spannungen in radialer und tangentialer Richtung hervorruft. Dadurch entsteht am Übergang zwischen Innen- und Außenteil, der sogenannten Fuge, eine Fugenpressung. Bei Ausführung des Innenteils als Vollwelle ( $D_{i1}=0$ ) besteht zwischen der tangentialen Spannung des Innenteils und des Fugendruckes folgende Beziehung:

$$-s_{i1a} = p_F \quad \text{in [N/m}^2\text{]} \quad (\text{Gl. 4-2})$$

---

<sup>1</sup> als „kalt“ wird an dieser Stelle der Fügevorgang unter Raumbedingungen bezeichnet

$p_F$	Fugendruck	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{tIa}$	Tangente Spannung (Innenteil)	[N/m <sup>2</sup> ]

Die tangentialen und radialen Spannungen treten sowohl im Innen- als auch im Außenteil des Pressverbandes auf.

Für eine optimale Auslegung eines zylindrischen Längspressverbandes müssen die Übermaße des Innenteils auf das eingesetzte Material abgestimmt sein. Bei einem gleichzeitigen Auftreten radialer und tangentialer Spannungen wird für Festigkeitsberechnungen die Vergleichsspannung nach von Mises berechnet:

$$s_v = \sqrt{s_t^2 + s_r^2 - s_t s_r} \quad \text{in [N/m}^2\text{]} \quad \text{(Gl. 4-3)}$$

$\sigma_r$	Radiale Spannung	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_t$	Tangente Spannung	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_v$	Vergleichsspannung nach von Mises	[N/m <sup>2</sup> ]

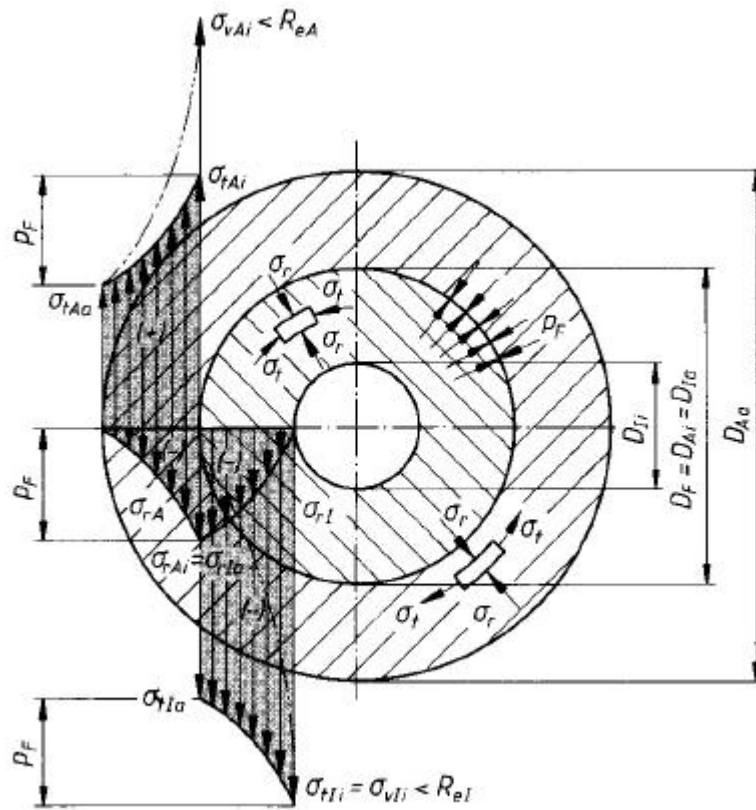


Abbildung 4-11 Spannungsverlauf im zylindrischen Pressverband [MATEK 1987]

Bezeichnungen			Indices	
$p_F$	Fugendruck	$[N/m^2]$	A	Außenteil
$\sigma_r$	Radiale Spannung	$[N/m^2]$	I	Innenteil
$\sigma_t$	Tangentiale Spannung	$[N/m^2]$	a	außen
$R_E$	Streckgrenze	$[N/m^2]$	i	innen
			t	tangential
			r	radial

Für rein elastische Pressverbände darf die maximale Vergleichsspannung die Streckgrenzen oder die 0,2-Dehngrenzen der eingesetzten Materialien nicht überschreiten.

4.3.2.1 Bohrung-Zapfen-Kombination als Pressverbindung

Der Zusammenbau von Körperschichten ist prinzipiell durch einen Pressverband möglich. Während eine Bohrung im massiven Bereich der Körperschicht an die Stelle der Nabe tritt, so wird die Welle durch einen entsprechenden Zapfen der benachbarten Körperschicht ersetzt (vgl. Abbildung 4-12).

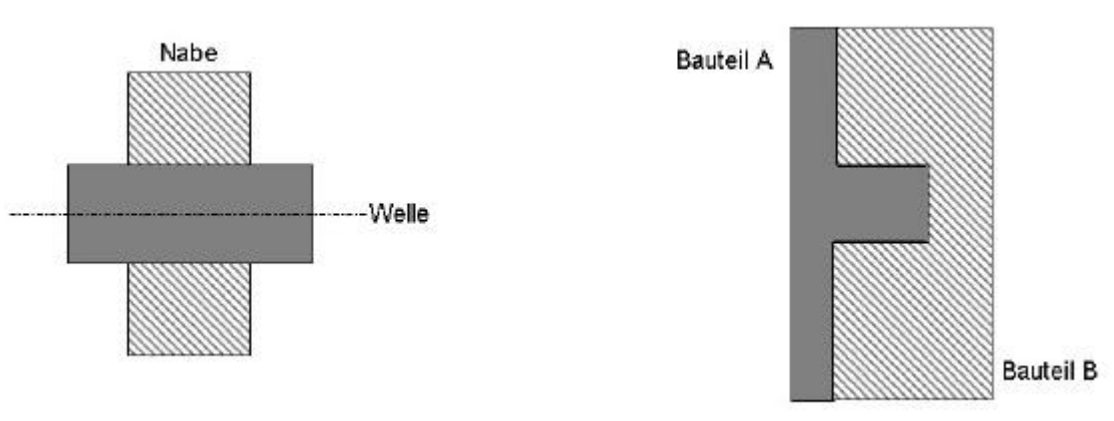


Abbildung 4-12 Analogie Welle-Nabe-Verbindung zu Bohrung-Zapfen-Verbindung

Welle-Zapfen-Verbindungen sind in der Lage, Kräfte in Längsrichtung und/oder in Umfangsrichtung zu übertragen. Verantwortlich dafür sind Fugendruck, Fugenabmessungen (Fugenoberfläche und Fugenumfang) und der Reibungskoeffizient der in Kontakt stehenden Flächen. Aussagen über die zu erreichenden Kräfte lassen sich aus folgenden Gleichungen ableiten:

$$F_{RI} = p_F \cdot A_F \cdot m \text{ in [N]} \tag{Gl. 4-4}$$

$A_F$	Fugenoberfläche	$[m^2]$
$F_{Rl}$	Kraft in Längsrichtung	$[N]$
$p_F$	Fugendruck	$[N/m^2]$
$\mu$	Reibungskoeffizient	-
$F_{Rt} = p_F \cdot l_F \cdot t_F \cdot \mu$ in $[N]$		(Gl. 4-5)
$F_{Rt}$	Kraft in Umfangsrichtung	$[N]$
$l_F$	Fugenumfangslänge	$[m]$
$t_F$	Fugentiefe/Zapfenlänge	$[m]$
$\mu$	Reibungskoeffizient	-

Die Schwierigkeit bei der Berechnung der Kräfte aus den obigen Gleichungen besteht in der Ermittlung des Reibungskoeffizienten. Nach Niemann werden die Rauhtiefen der Oberflächen vor dem Fügevorgang durch elastische und plastische Verformungen reduziert [NIEMANN 1981]. Im Ergebnis muss daher bei Pressverbänden von geringeren Reibungskoeffizienten ausgegangen werden. Alle beeinflussenden Eigenschaften und Vorgänge müssen für eine optimale Auslegung von Pressverbänden berücksichtigt werden.

#### 4.3.2.2 Hilfsgeometrie als Basis für Pressverbindungen

Grundsätzlich eignen sich für das Fügen zweier Bauteile nur die zylindrischen Längspressverbindungen und die Querpressverbände mittels Schrumpfen oder Dehnen. Ölpressverbände setzen eine Zugänglichkeit von Außen voraus, die im RP-Bereich sehr selten gegeben ist. Dieses Fügeverfahren wird deshalb bei den folgenden Betrachtungen nicht weiter berücksichtigt.

Das Fügen mittels Schrumpfpresverbänden sollte so ausgelegt sein, dass die Bohrungen durch Erwärmung so erweitert werden, dass die Zapfen des benachbarten Teilkörpers hineinpassen. Durch die Abkühlung zieht sich das Material um die Bohrung zusammen und presst somit das Material quer zur Rotationsachse des Zapfens. Analog führt eine Abkühlung zu einer Verringerung des Zapfendurchmessers, was bei einer Erwärmung auf Normaltemperatur zu einem Pressvorgang quer zur Rotationsachse von Bohrung und Zapfen führt.

Im Gegensatz dazu müssen beim Fügen durch zylindrische Längspressverbände konstruktive Anpassungen vorgenommen werden. Von besonderer Bedeutung ist eine Abfasung am Zapfen, die eine Schabewirkung an der Zapfenstirnkante vermeidet. Nach [NIEMANN 1981] sollte der Fasenwinkel maximal  $5^\circ$  betragen, die erforderliche Fasenlänge ist abhängig vom Fugendurch-

messer und errechnet sich nach folgender Gleichung:

$$l_e \approx \sqrt[3]{d_F} \text{ in [m]} \quad (\text{Gl. 4-6})$$

$d_F$       Fugendurchmesser      [m]

$l_e$       Erforderliche Fasenlänge      [m]

Grundsätzlich ist bei der Auslegung von Pressverbänden zu beachten, welche Eigenschaften die eingesetzten Materialien besitzen. So ist zu prüfen, ob bei den Materialien

- elastische oder
- viskoelastische

Werkstoffeigenschaften vorliegen.

### **Elastische Werkstoffeigenschaften**

Aufgrund schleichender Gefügeveränderungen erreichen Längspressverbände erst nach einer sogenannten „Sitzzeit“ von 48 Stunden die volle Haftkraft. Direkt nach dem Pressvorgang muss von einer reduzierten Haftkraft von 70 % der Endhaftkraft gerechnet werden [NIEMANN 1981].

### **Viskoelastische Werkstoffeigenschaften**

Die meisten Kunststoffe zählen zu den viskoelastischen Werkstoffen, die bei statischen Belastungen durch „Fließen“ in einen spannungsärmeren Zustand wechseln. Hierdurch nimmt die Haftkraft nach dem Pressvorgang wieder ab. Bei zylindrischen Längspressverbindungen führen elastische und plastische Verformungen zu einer Glättung der Rauheiten der Fügeflächen und damit, im Vergleich zu Querpressverbindungen, zu geringeren erreichbaren Haftkräften.

Einen interessanten Lösungsansatz bietet die Auslegung der inneren Hilfsgeometrien als Pressverbindung. Ein entsprechendes Zapfenübermaß (Bohrungsuntermaß) lässt beim Zusammenführen der Geometrien aufgrund von Verformungen Druckkräfte entstehen. Diese Druckkräfte führen, in Verbindung mit dem Reibungskoeffizienten und einer Kontaktfläche, zu einer reibschlüssigen Verbindung (vgl. Abbildung 4-13).

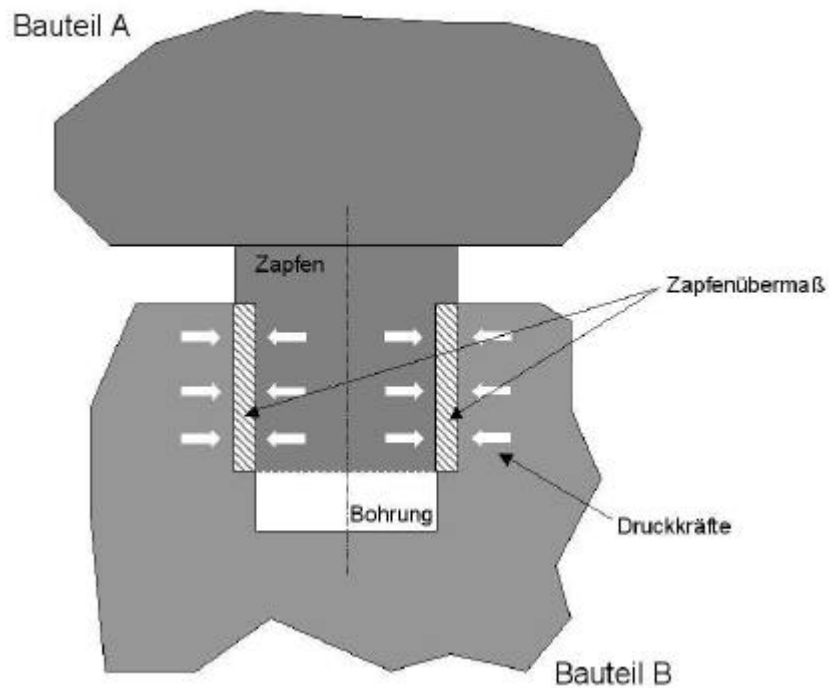


Abbildung 4-13 Bohrung-Zapfen-Kombination als Pressverbindung: prinzipielle Darstellung

Da die Bohrungen in der Regel als Sacklöcher ausgeführt werden, muss neben einer erforderlichen Abfasung der eingesetzten Zapfen auch eine Entlüftung vorgesehen werden. In Abhängigkeit vom Durchmesser der Bohrung, der Tiefe des eindringenden Zapfens und der Tiefe der Bohrung kann der Druck des eingeschlossenen Volumens errechnet werden. Dieser Verdichtungsprozess führt zwar zu einer adiabaten Zustandsänderung, die aufgrund der Wärmeabgabe an das umgebende Material als quasi-isotherm anzusehen ist. Im Einzelfall kann die Druckkraft Werte annehmen, die größer sind, als die Haftkraft. Daraus resultiert ein selbstablaufender Auspressvorgang, der so lange anhält, bis die Haftkraft (Gleitreibung) gleich der Druckkraft des eingeschlossenen Volumens ist. Ein Lösungsansatz ist in der Abflachung des teilzylindrischen Zapfens zu finden.

#### 4.3.2.3 Ideale Pressverbindung mit höchsten Festigkeiten

Die Wirksamkeit von Pressverbindungen in axialer Richtung hängt grundsätzlich von mehreren Faktoren ab:

- Fugendurchmesser
- Fugentiefe
- Größe der Fügefläche
- Übermaß des Zapfens/Toleranzfeld
- Anzahl der Zapfen

- Rauheiten der Fügeoberflächen
- E-Modul und Streckgrenze der Werkstoffe

Die maximale Belastbarkeit von Pressverbindungen wird durch die Festigkeit des Zapfens vorgegeben. Die maximale Festigkeit des Zapfens (kreisrunde Form) wird nach folgender Beziehung ermittelt:

$$F_{Zapfen} = \frac{d_F^2 \cdot p}{4} \cdot R_E \quad \text{in [N]} \quad \text{(Gl. 4-7)}$$

$F_{Zapfen}$	Maximale Festigkeit des Zapfens	[N]
$d_F$	Zapfendurchmesser	[m]
$R_E$	Streckgrenze des Zapfenmaterials	[N/m <sup>2</sup> ]

Die Bohrung-Zapfen-Verbindung ist als optimal anzusehen, wenn die Längskraft der Verbindung gleich der Festigkeit des Zapfens ist:

$$F_{Zapfen} = F_{Rl}$$

$$\frac{d_F^2 \cdot p}{4} \cdot R_E = m \cdot d_F \cdot p \cdot t_F \cdot R_E \quad \text{(Gl. 4-8)}$$

$$d_F = 4 \cdot m \cdot t_F$$

Eine optimale Auslegung einer Bohrung-Zapfen-Verbindung orientiert sich daher am werkstoffabhängigen Haftbeiwert und der Länge des gefügten Zapfens. In der Literatur finden sich für die Längspresspassungen folgende Richtwerte [NIEMANN 1981].

Innenteil Stahl		Haftbeiwert (trocken)
Außenteil	Stahl/Stahlguss	<b>0,2</b>
Außenteil	Grauguss	<b>0,12-0,14</b>
Außenteil	Al-Legierung	<b>0,07</b>
Außenteil	Polyamid	<b>0,3</b>
Außenteil	Reibbelag	<b>0,6</b>
Innenteil Kunststoff		Haftbeiwert (trocken)
Außenteil	Kunststoff	<b>0,1</b>

Tabelle 4-1 Haftbeiwerte für verschiedene Werkstoffe [NIEMANN 1981, TABELLENBUCH 1990]

Ausgehend von den Daten aus Tabelle 4-1 lässt sich ableiten, dass für eine optimale Bohrung-Zapfen-Verbindung das Fugenlänge zu Zapfendurchmesser-Verhältnis den Faktor 2,5 annehmen muss. Eine Beeinflussung der Haftbeiwerte durch höhere Rauheiten der Fügeoberflächen ist bei

Längspressverbänden nur eingeschränkt möglich. Aufgrund der Längspressvorgangs kommt es zu Glättungen der Fügeoberflächen, die durch elastische und auch plastische Verformungen der Rauigkeiten entstehen. Diese Glättungen führen wiederum zu einer Verringerung des Haftbeiwertes.

#### 4.3.2.4 Ermittlung wirksamer Pressverbindungen mittels FEM

Der für die Verbindung notwendige Fugendruck wird über ein entsprechendes Übermaß des Zapfens gegenüber der Bohrung erreicht. Ausgehend von einem Werkstoff mit elastischen Werkstoffeigenschaften lassen sich die erforderlichen Übermaße der Pressverbindungen durch klassische Berechnungsverfahren aus der Konstruktionstechnik oder mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) ermitteln. Die Abflachungen an den Seiten der Zapfen führen dazu, dass der Fugendruck nicht auf den kompletten Bohrungsumfang wirkt. Es ist davon auszugehen, dass der definierte Fugendruck nur partiell an den gekrümmten Kontaktflächen der Zapfen auftritt.

Die klassischen Berechnungsverfahren gelten dagegen nur bei Fugendrücken auf den gesamten Kreisumfang. Je nach eingesetzter FEM-Software lassen sich sowohl Vorgänge im elastischen als auch im elastisch-plastischen Bereich berechnen. Aufgrund des geringeren numerischen Aufwands werden im folgenden alle Berechnungen für den rein elastischen Bereich betrachtet. Bei den FEM-Simulationen sind die zu erwartenden Spannungen und Verschiebungen von besonderem Interesse. So sind Informationen zu den maximal auftretenden Spannungen notwendig, damit Rückschlüsse auf die Art der Verformung (elastisch/plastisch) des Bauteils gezogen werden können. Damit sind bereits im Vorfeld Aussagen möglich, ob mit einem Bauteilversagen zu rechnen ist. Durch die Kopplung des CAD-Systems mit einem FEM-Programm können direkt Aussagen zu Belastungen und Verschiebungen unter definierten Bedingungen getroffen werden. Dazu bieten die in der Praxis etablierten CAD-Systeme eine unmittelbare Anbindung an FEM-Systeme.

### **Fazit und Schlussfolgerung**

Die hier vorgeschlagenen Ansätze führen zu einer verbesserten Nutzung des Fräsens als Rapid-Prototyping-Verfahren:

- Mit einer werkzeugorientierten Schnittstrategie zur Aufteilung der Bauteile in einzelne Schichten lassen sich die Schnittebenen minimieren. In diesem Zusammenhang werden die technologischen Parameter der Werkzeuge berücksichtigt. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die Minimierung von Restmaterial von Bedeutung.



- Zur Vermeidung von äußeren Hilfsgeometrien werden für die zweiseitige Bauteilbearbeitung innere Hilfsgeometrien vorgeschlagen. Unter Einsatz konventioneller Spanntechnologien lassen sich mit dieser Art von Hilfsgeometrie Bauteilschichten ohne Stützen fertigen, die auf die äußere Oberfläche der Bauteilschichten ausgerichtet sind.
- Bei einer entsprechenden Auslegung der inneren Hilfsgeometrien als Pressverbindung lassen sich Verbindungen zwischen den Bauteilschichten erzeugen. Die zu übertragenen Kräfte dieser Verbindung hängt von dem Übermaß der Pressverbindung ab. Bei einem sehr geringen Übermaß stellt die Verbindung eine Positionierungshilfe der Bauteilschichten dar. Größere Übermaße führen zu Verbindungen, die sich durch höhere Festigkeiten auszeichnen aber gleichzeitig reversibel sind.

In den folgenden Kapiteln dieser Arbeit werden die erreichbaren Festigkeiten dieser Pressverbindungen mittels innerer Hilfsgeometrien untersucht. Ferner wird anhand eines Industriebeispiels die Anwendbarkeit der entwickelten Lösungsvorschläge überprüft.

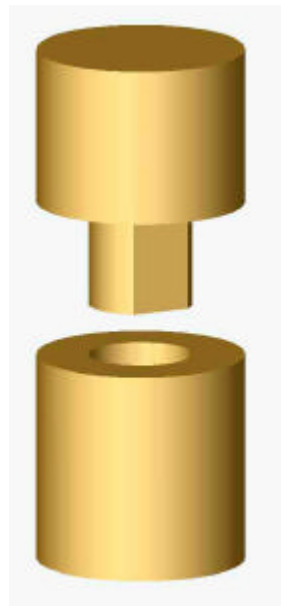
## **5 Experimentelle Untersuchungen zylindrischer Längspressverbände**

Für die Sicherstellung der Wirksamkeit von Pressverbindungen mittels innerer Hilfsgeometrien sind experimentelle Untersuchungen durchgeführt worden. Auf Basis genormter Zugversuche wurden die gefertigten Pressverbindungen auf ihre Festigkeit in axialer Richtung geprüft.

Als Grundlage wurden Probekörper in Anlehnung an DIN EN 10002 (früher DIN 50145) herangezogen, die jeweils mit einem Zapfen und einer Bohrung versehen sind. Die Bohrung ist mittels einer Reibahle auf ein H7-Passmaß gefertigt worden. Die Kontur des Zapfens wurde CNC-gefertigt. Bereits in der Aufspannung der Fräsmaschine wurde das entsprechende Übermaß durch eine Mikrometerschraube kontrolliert. Für das Fügen beider Teile ist das Gestell einer Drehmaschine genutzt worden. So wurde sichergestellt, dass die Kräfte für den Fügevorgang momentfrei auf der Rotationsachse der Körper angreifen. Mit Hilfe der FEM-Simulation wurden die erforderlichen Übermaße ermittelt. Dazu mussten im Vorfeld die geometrischen Größen (z.B. Bohrungsdurchmesser) und die fügetechnischen Parameter (z.B. Fugendruck) für unterschiedliche Materialien festgelegt werden.

### **5.1 Ermittlung von geometrischen Veränderungen**

Für Untersuchungen hinsichtlich des Verformungsprozesses wurde ein Pressverband mit viskoelastischen Materialeigenschaften verwendet. Aufgrund hoher Kräfte setzte ein Fließvorgang ein, der zu einem spannungsärmeren Zustand und damit zu einem geringeren Fugendruck führt. Aus diesem Fließvorgang resultieren bleibende Verformungen sowohl an der Bohrung als auch am Zapfen des gefügten Pressverbandes. Die Art und die Größe der Verformung ließ Rückschlüsse auf die Vorgänge bei einem Pressverband mit modifizierten Zapfen zu.



Werkstoff	Polyvinylchlorid (PVC)
E-Modul	3.000 N/mm <sup>2</sup>
Zugfestigkeit	58 N/mm <sup>2</sup>
Fugendruck	7 N/mm <sup>2</sup>
Durchmesser	20 mm
ermitteltes Übermaß	<b>0,16 mm</b>

Abbildung 5-1 Beispiel Pressverbindung

Ein Versuch mit einem Pressverband aus dem viskoelastischen Werkstoff **PVC** (Trovidur) sollte Aussagen über das Verhalten dieser Verbindungen ermöglichen (siehe Abbildung 5-1).

Ausgehend von einem Fugendruck von 7 N/mm<sup>2</sup> traten bei den einzelnen Bauteilen unterschiedliche Verformungen auf. Der Fugendruck entstand nur an den Kontaktflächen der Bauteile, so dass bei dem Bauteil mit Zapfen nur die Bereiche des Zapfens mit den Kreisabschnitten unter

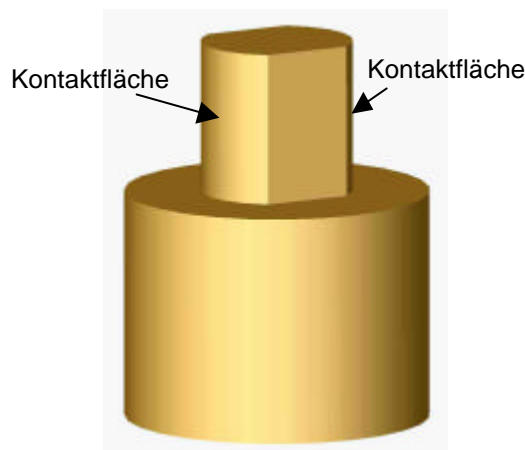


Abbildung 5-2 Kontaktflächen am Bauteil mit Zapfen

Belastung standen (siehe Abbildung 5-2). Analog wurde die Bohrung des anderen Bauteils nur auf den entsprechenden Kreisabschnitten belastet. Diese Randbedingungen sind bei den FEM-Analysen berücksichtigt worden. Während der Zapfen an jeder Kreisabschnittfläche um ca. 0,03 mm gestaucht wurde, weitete sich die Bohrung in den entsprechenden Bereichen um etwa 0,05

mm. Ein Fugendruck von  $7 \text{ N/mm}^2$  führte also zu einem Abstand der in Kontakt stehenden Flächen von  $0,08 \text{ mm}$  pro Kontaktseite. In der Summe beider Kontaktseiten musste der Abstand der Kontaktflächen mit einem Übermaß von  $0,16 \text{ mm}$  ausgeglichen werden. Die geometrischen Veränderungen aufgrund der Spannungen sind nicht geometrisch gleich verteilt. Vielmehr ist, analog zur Verteilung der Spannungen, von örtlich unterschiedlichen Verschiebungen auszugehen. Die qualitative Verteilung der Verschiebungen am Bauteil mit Zapfen ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Zur Bestimmung der geometrischen Veränderungen in Form von Verschiebungen wurden gemittelte Werte herangezogen.

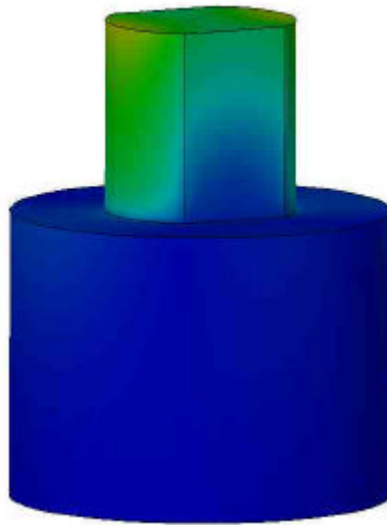


Abbildung 5-3 qualitative Darstellung der Verschiebungen unter Belastung  
(dunkelblau = keine Verschiebungen, grün = größere Verschiebungen)

Der in Abbildung 5-1 angegebene Pressverband mit  $0,16 \text{ mm}$  Zapfenübermaß und einer Zapfenlänge von  $20,00 \text{ mm}$  wurde nach 14 Tagen wieder gelöst. Es ist davon auszugehen, dass innerhalb dieser Zeitspanne Kriechvorgänge, die durch die Spannung im Pressverband induziert wurden, zu geometrischen Veränderungen der Bauteile geführt haben. Eine nachträgliche Vermessung der Bauteile liefert Rückschlüsse auf das Verformungsverhalten.

Die erreichte Festigkeit des viskoelastischen Pressverbandes ist mittels eines Zugversuches auf der Zugprüfmaschine der Firma SCHENCK-TREBEL (Typ RM100) untersucht worden. Der Pressverband wurde mit einer Geschwindigkeit von  $3 \text{ mm/min}$  gestreckt und dieser Prozess bis zu einer Länge von  $8 \text{ mm}$  aufgezeichnet.

Der maximale Wert für die Zugkraft wurde mit  $0,97 \text{ kN}$  gemessen. Dieser Wert stellt die maximale Widerstandskraft dar, die aus dem Fugendruck und dem Reibungskoeffizienten resultiert. Ausgehend von einer Kontaktfläche von  $630 \text{ mm}^2$  und einem angenommenen Reibungskoeffizienten von  $\mu=0,15$  errechnete sich ein Fugendruck von  $10,8 \text{ N/mm}^2$ . Dieser Wert ist im Ver-

gleich zur Festigkeit des Werkstoffes ( $p_G=58 \text{ N/mm}^2$ ) klein, so dass für Pressverbände mit höheren Widerstandskräften ein größeres Übermaß gewählt werden könnte. Die Bestimmung des Fugendrucks aus experimentellen Untersuchungen ist allerdings mit einer gewissen Unsicherheit verbunden. Während die geometrischen Größen (z.B. Kontaktflächen) einfach und genau zu ermitteln worden sind, war die Festlegung des Haftreibungskoeffizienten mit Schwierigkeiten verbunden. Die entsprechenden Angaben in Fachtabellen sind sehr allgemein und berücksichtigen in der Regel keine Rauheiten der Kontaktflächen. Diese sind jedoch in der Praxis von erheblicher Bedeutung, da der Haftungsmechanismus von in kontaktstehenden Oberflächen im wesentlichen von den Oberflächenrauheiten bestimmt werden. Eine Veränderung des Reibungskoeffizienten von 0,1 auf 0,2 führt beispielsweise zu einer Verdopplung des errechneten Fugendrucks.

Einen Eindruck über das Verhalten von Pressverbänden unter Zugbelastung erlaubt Abbildung 5-4. Nach Erreichen der Maximalkraft ist ein periodischer Verlauf der Zugkraft mit abnehmender Tendenz zu erkennen. Dieser Vorgang resultiert aus einer elastischen Dehnung des Zapfens während des Versuches, die bis zur Überschreitung der Haftkraft anhält. Der anschließende

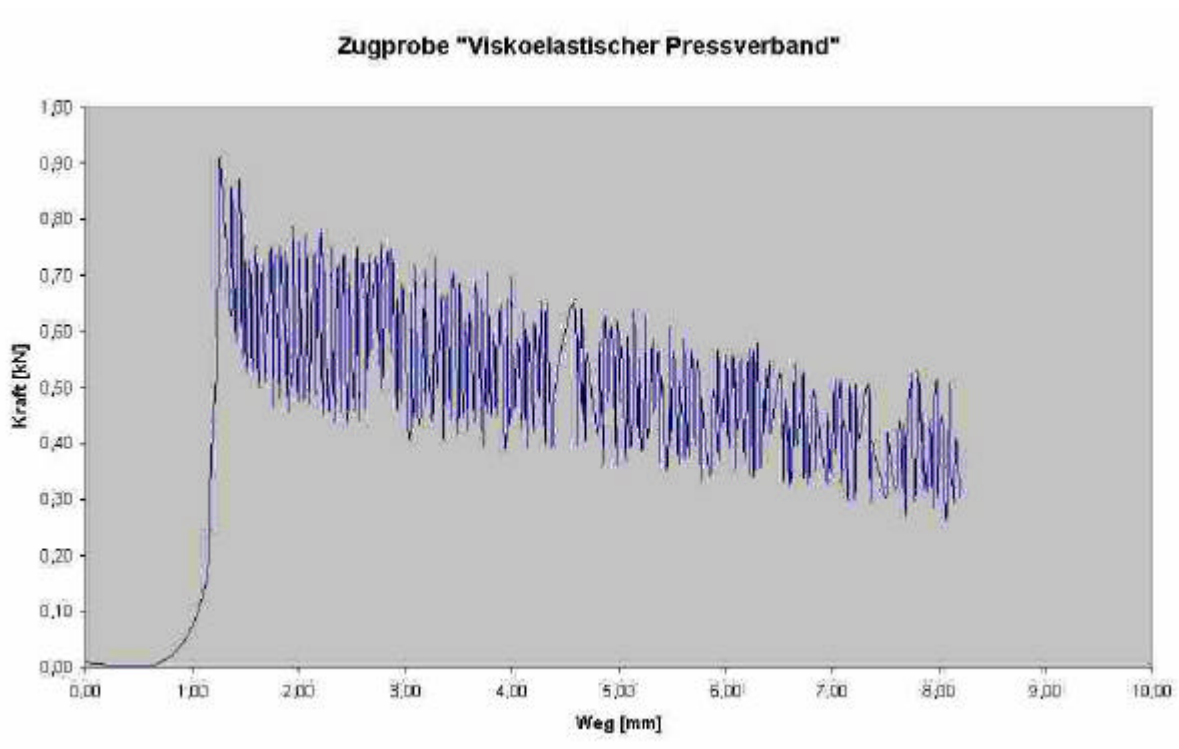


Abbildung 5-4 Kraft-Weg-Diagramm „Viskoelastischer Pressverband“, 14 Tage Sitzzeit

Gleitvorgang führt wiederum zu einem spannungsärmeren Zustand, so dass der Gleitvorgang stoppt und wieder in einen elastischen Dehnvorgang übergeht. Dieser Vorgang wird in der Literatur als Stick-Slip-Effekt bezeichnet und ist je nach Werkstoffeigenschaften mehr oder weniger

stark ausgeprägt. Die absteigende Tendenz des periodischen Vorgangs ist dadurch erklärbar, dass während des Dehnvorganges eine immer kleiner werdende Kontaktfläche des Pressverbandes wirksam ist. Bei einem konstanten Fugendruck besteht zwischen der Abnahme der Kontaktfläche und der Verringerung der Widerstandskraft ein linearer Zusammenhang.

Die Zapfen und Bohrungen wurden mittels eines Koordinatenmessgerätes vor und nach dem Pressvorgang vermessen (siehe Tabelle 5-1). Neben einer Überprüfung auf Maßhaltigkeit war für die zylindrischen Bereiche eine Untersuchung auf Rundheit vorgesehen. Die erreichbare Genauigkeit des Messgerätes (Olivetti Inspector Mini 23V, Software mitho 2000) kann mit  $\pm 3 \mu\text{m}$  angegeben werden und liegt damit etwa eine Größenordnung über den zu messenden Werten.

Maße Bauteile		vor Fügeprozess	nach 14 Tg. Sitzzeit	Abweichung
<b>Zapfen</b>	Durchmesser	20,16 mm	20,14 mm	- 0,02 mm
	Abflachung	16,17 mm	16,19 mm	+ 0,02 mm
<b>Bohrung</b>	Durchmesser	20,00 mm	20,02 mm	+ 0,02 mm
	Abflachung	20,00 mm	20,02 mm	+ 0,02 mm

Tabelle 5-1 Messergebnisse des viskoelastischen Pressverbandes

Das Fließen des Werkstoffes wird in einer Veränderung der Geometrien von Zapfen und Bohrung deutlich. So wurde beispielsweise der Zapfen an den Kontaktflächen mit der Bohrung gestaucht, so dass sich der Zapfendurchmesser reduzierte. Mit abnehmendem Durchmesser des Zapfens trat eine Größenänderung des Abstandes der abgeflachten Seiten ein. Auch die Bohrung weitete sich aufgrund der Spannung an den Kontaktflächen auf. Diese Fließvorgänge führten zu

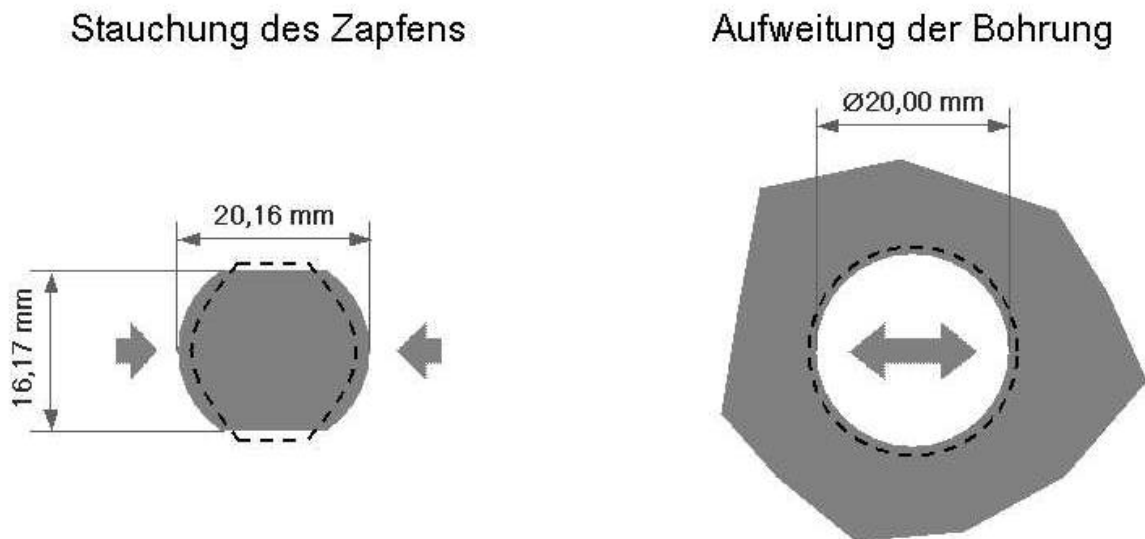


Abbildung 5-5 Geometrische Veränderungen „Viskoelastischer Pressverband“ (vereinfachte und überhöhte Darstellung)

bleibenden Geometrieänderungen und damit zu abnehmenden Festigkeiten. Die Aufweitung der Bohrung führten in einem wesentlich kleineren Umfang auch zu einer Aufweitung des gesamten Bohrungsbauteils. Diese Vorgänge müssen in der praktischen Anwendung dieser Füge-technik möglichst vermieden werden, da sonst die erforderliche Maßhaltigkeit der Bauteile nicht eingehalten werden kann.

## 5.2 Festigkeitsuntersuchungen zylindrischer Längspressverbindungen

Im Gegensatz zu viskoelastischen Werkstoffen werden in der Praxis häufig Materialien eingesetzt, die sich bei einem Pressverband sowohl elastisch, als auch plastisch verformen. Im Gegensatz zu den viskoelastischen Werkstoffen treten die Veränderungen nur während des Pressvor-

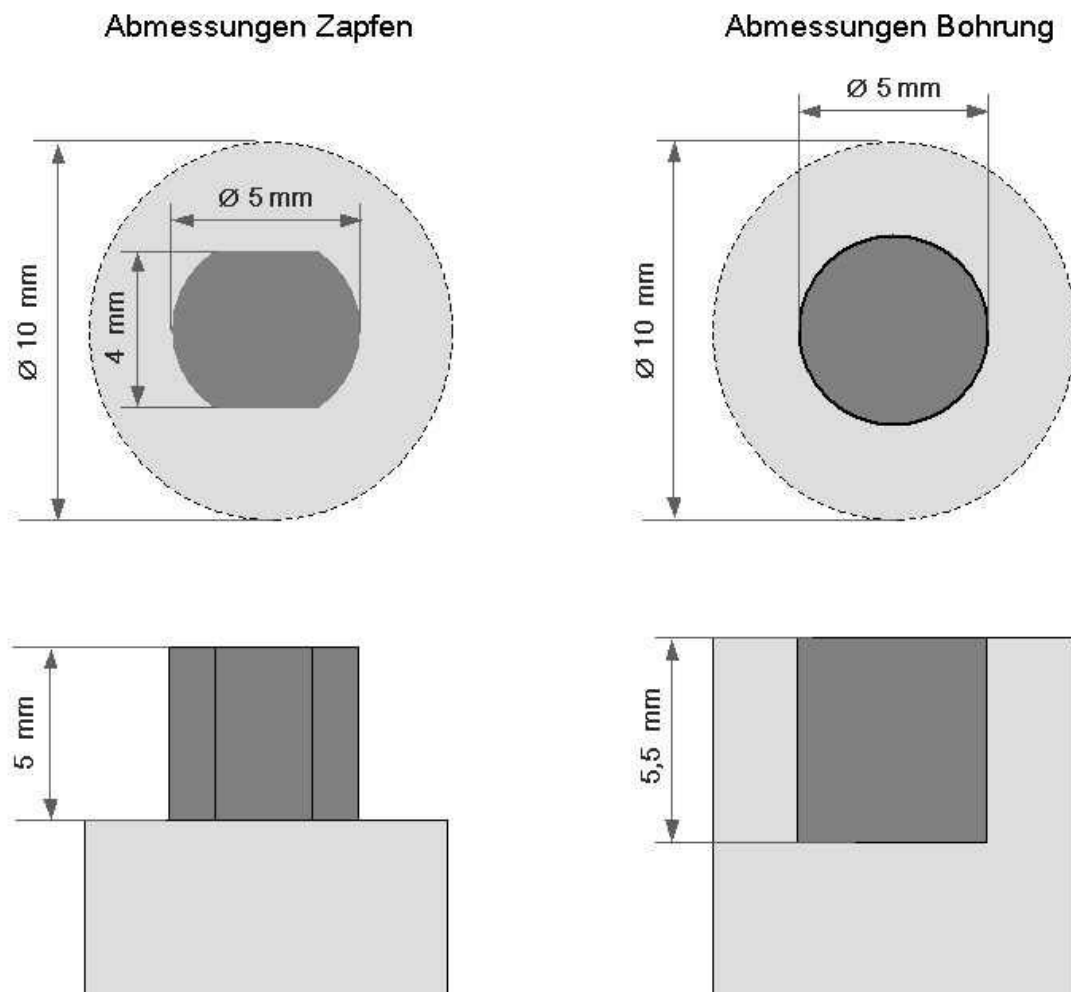


Abbildung 5-6 Grundgeometrie der untersuchten Bohrung-Zapfen-Kombinationen

ganges auf. Am Beispiel einer Aluminiumlegierung wurden Pressverbindungen durch Bohrung-Zapfen-Kombinationen mit unterschiedlichen Übermaßen untersucht (vgl. Abbildung 5-6).

### 5.2.1 Ermittlung der erwarteten Fugendrucke

Im Vorfeld der Versuchsreihe wurde das Verformungsverhalten der Bohrung-Zapfen-Verbindung mittels der FEM-Analyse untersucht. Dazu wurden Spannungszustände in Form eines definierten Fugendrucks auf die Kontaktflächen vorgegeben. Aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung der angreifenden Kräfte war die Anwendung klassischer Berechnungsformeln aus der Konstruktionstechnik nicht zulässig. Zur Bestimmung der Verformungen der Geometrien wurden daher FEM-Analysen durchgeführt. Die durch den vorgegebenen Fugendruck hervorgerufenen Geometrie-Verformungen wurden aufgezeichnet und dokumentiert (vgl. Abbildung 5-7).

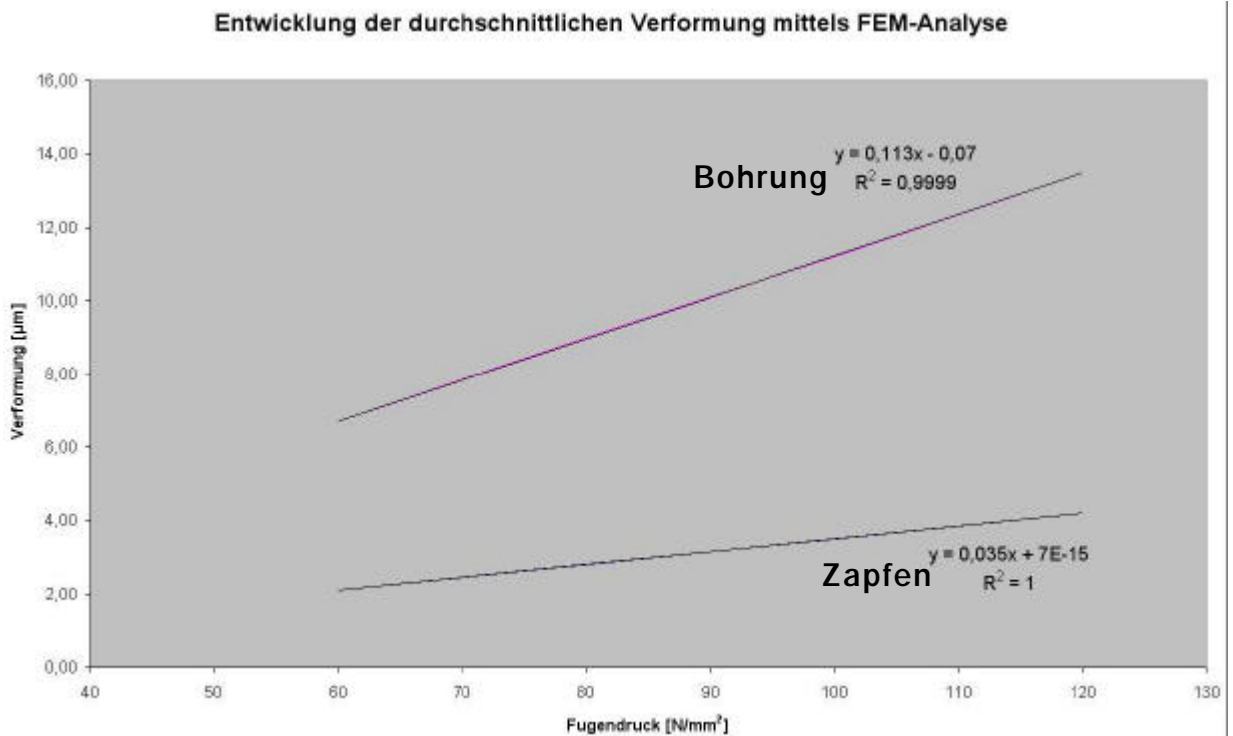


Abbildung 5-7 Entwicklung der Verformungen für Pressverbindungen aus AlMgSi1 in Abhängigkeit vom Fugendruck

Entsprechend dem Hook'schen Gesetz entwickelten sich die Verformungen linear zum angesetzten Fugendruck. Mit Hilfe der Regressionsrechnung ließen sich für beide Geometrien für vorgegebene Verformungen die korrespondierenden Fugendrucke bestimmen. Für die in Abbildung 5-6 dargestellte Grundgeometrie errechnet sich der Fugendruck für unterschiedliche Übermaße nach folgender Beziehung:

$$p_F = \frac{d_{\ddot{v}} + 0,07}{0,148} \cdot 10^6 \text{ in [N/m}^2\text{]} \quad (\text{Gl. 5-1})$$



$d_{\ddot{u}}$	Gesamtübermaß (Zapfen und Bohrung)	[ $\mu\text{m}$ ]
$p_F$	Fugendruck	[ $\text{N}/\text{m}^2$ ]

Mit Hilfe von Gleichung 5-1 lassen sich die Fugendrucke für die gemessenen Übermaße der Probekörper bestimmen. Aussagen zur theoretischen Zugfestigkeit der Pressverbindungen können nur unter Festlegung des Haftreibungskoeffizienten getroffen werden.

### 5.2.2 Ermittlung der Festigkeit der Pressverbindung

Ausgehend von konventionellen Zugprüfstäben aus AlMgSi1 wurden die Probekörper in der Mitte getrennt. Beide Stirnseiten wurden anschließend plan gedreht. Eine Spannvorrichtung diente zur Aufnahme der Probekörper in der Fräsmaschine. Das Nennmaß der Bohrungen und der zylindrischen Bereiche der Zapfen ist mit 5,00 mm festgelegt. Für die Versuchsreihe wurden die Maße der Zapfen mit einem Übermaße von 5  $\mu\text{m}$  bis 50  $\mu\text{m}$  versehen. Analog zu Kapitel 5.1 werden auch hier die Probekörper vor dem Fügen vermessen. Die Gründe hierfür liegen in den Fertigungstoleranzen des Verfahrens Fräsen. Für ein definiertes Übermaß wurden vermessene Zapfen mit vermessenen Bohrungen zusammengestellt und anschließend gefügt.

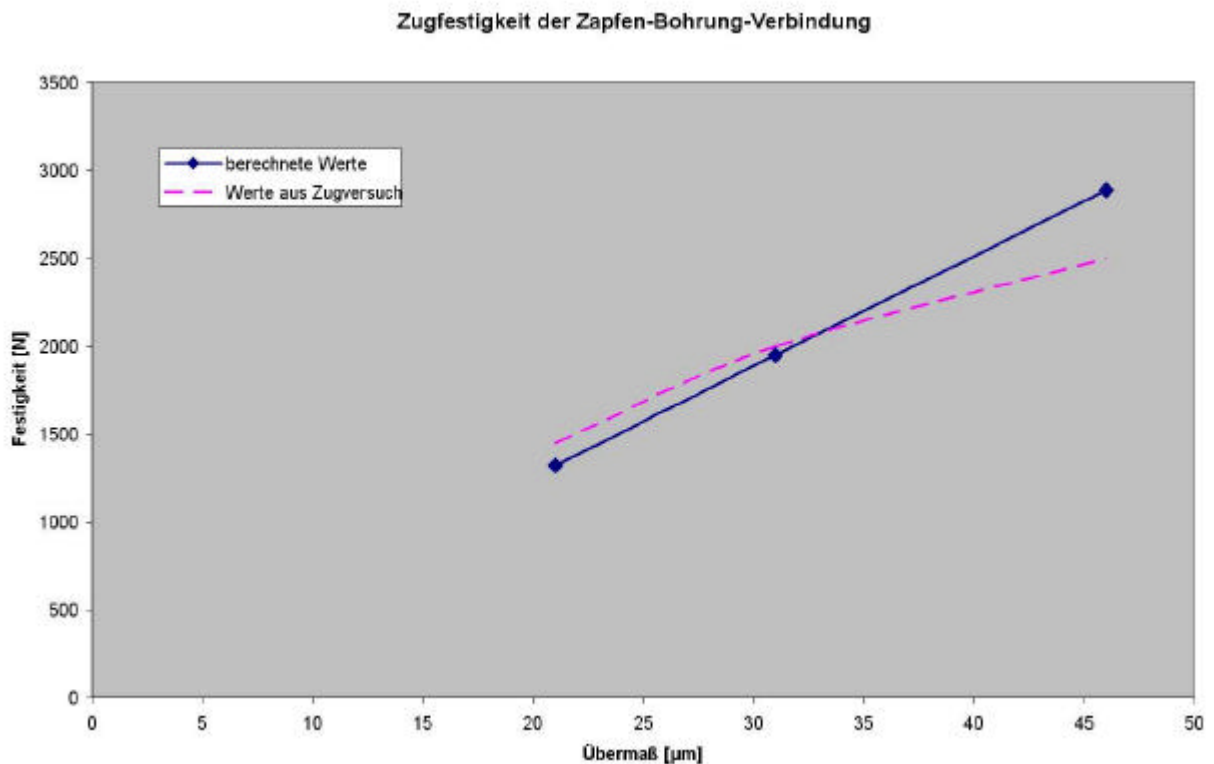


Abbildung 5-8 Kraft-Weg-Diagramm der Versuchsreihe mit Pressverbindungen aus AlMgSi1

Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Abbildung 5-8 dargestellt. Unter der Annahme eines Haftreibungskoeffizienten von  $\mu=0,40$  lassen sich die Ergebnisse wie folgt interpretieren:

---

Während die theoretischen Zugfestigkeiten einen linearen Zusammenhang zeigen, ergaben die experimentellen Untersuchungen einen ähnlichen Verlauf mit einer, für zunehmende Übermaße, abnehmenden Tendenz. Die Gründe für diese Entwicklung könnten in einer zunehmend plastischen Verformung der Probekörper liegen. Dabei erreichen die Bereiche der Geometrien aufgrund der bleibenden Verformung konstante Fugendrucke. Mit einer Vergrößerung der Übermaße in diesen Bereichen tritt eine stärkere Verformung auf, die jedoch nicht mit einer Steigerung des Fugendrucks verbunden ist. Da die stärkere Verformung nicht mit einer signifikanten Erhöhung der Kontaktfläche verbunden ist, steigt die Festigkeit nur noch geringfügig an.

## 6 Beispielstudie Miniaturturbine

Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Rapid-Prototyping-Konzept wurde am Beispiel einer Miniaturturbine überprüft und erprobt. Die geometrische Gestalt dieser Turbine ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Einer Fertigung des Gesamtbauteils durch Fräsen steht zunächst die Zugänglichkeit der Hinterschneidungen entgegen. Auch bei einer 5-Achs-Bearbeitung ist eine hinreichende Zugänglichkeit der Hinterschneidungen nicht sichergestellt. Insbesondere die innenliegenden Übergänge der Flügel auf die zylindrische Struktur der Turbine lassen sich bei einer Werkzeug-Zustellung in radialer Richtung nicht zufriedenstellend herausarbeiten. Im Ergebnis entstünden Bauteilbereiche ohne Bearbeitungsmöglichkeit. Dadurch verbleibt Restmaterial entweder am Bauteil oder muss mittels manueller Arbeitsgänge mechanisch entfernt werden.



Abbildung 6-1 Rotor einer Miniaturturbine

Die Aufteilung des Rotors in mehrere Einzelteile ermöglicht die Bearbeitung der komplexen Geometrie sowohl bei 3-Achs- als auch bei 5-Achs-Fräsmaschinen. Dazu müssen die komplexen Geometrien auf konkrete Abmessungen (z.B. minimale Radien, Abstände) analysiert werden. Eine Aufteilung der Bauteile erfolgt hinsichtlich dieser Abmessungen und den zur Verfügung stehenden Werkzeugen, deren Einsatz eine umfassende Bearbeitung der zu fertigenden Geometrie

rien ermöglicht. Dazu sind insbesondere die technologischen Eigenschaften der Werkzeuge (z.B. Durchmesser, Schneidlänge) zu berücksichtigen. Im Verlauf dieses Kapitels wird anhand des Beispiels Miniaturturbine die Datenaufbereitung von der Konstruktion bis zur Fertigung und Montage exemplarisch durchgeführt. Zusätzlich werden bei der Herstellung der Miniaturturbine die in den vorangegangenen Kapiteln entwickelte neue Spann- und Fügechnik berücksichtigt.

## 6.1 Geometrieanalyse zur Aufteilung in Körperschichten

Während kommerzielle Software-Systeme zur Fertigung von Prototypen mittels Fräsen bei einer Aufteilung der Bauteile in Körperschichten nur die zur Verfügung stehenden Materialstärken berücksichtigen, müssen für eine optimale Schnittstrategie die zur Verfügung stehenden Fräs-werkzeuge berücksichtigt werden. Dadurch kann eine - auf die Aufgabe abgestimmte - optimale Schnittstrategie entwickelt werden.

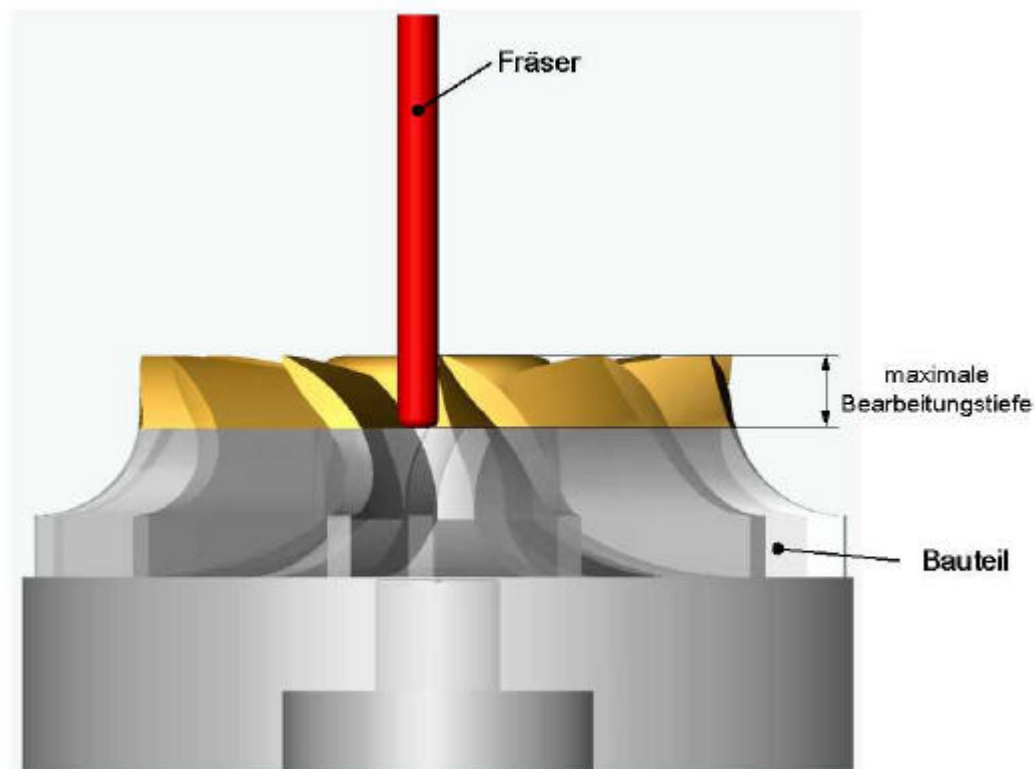


Abbildung 6-2 Simulation: Virtuelle Bearbeitung

Das im 3D-CAD-System erzeugte Bauteil wurde mit einem virtuellen Werkzeug an den kritischen Geometrien abgetastet. Dieser Vorgang wurde in der vorliegenden Arbeit im Rahmen einer manuellen Kollisionsprüfung im 3D-CAD-System durchgeführt.

Über sogenannte API<sup>1</sup>-Schnittstellen zum 3D-CAD-System ist mit entsprechenden Algorithmen eine Automatisierung dieses Ansatzes denkbar. Entsprechend den Werkzeug-Eigenschaften (z.B. Durchmesser, Radien, Schneiden und Freischnitlänge) konnte ermittelt werden, wie tief eine mögliche Bearbeitung erfolgen kann, ohne dass die Gestalt des Bauteils verändert wird. Die maximale Eintauchtiefe des Werkzeugs definiert eine Ebene, die für den Teilungsvorgang als Schnittebene fungiert, und ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Diese Schnittebene trennt also das erste Körperelement vom Gesamtbauteil, und wird nach einer Separation als eigenständiges Einzelteil betrachtet. Das verbleibende Bauteil wird wiederum mit einem virtuellen Werkzeug abgetastet und legt im Ergebnis eine weitere Schnittebene fest. Diese Prozedur wiederholt sich solange, bis das komplette Bauteil mit den virtuellen Werkzeugen abgetastet worden ist und die Körperelemente entsprechend ermittelt worden sind. Jeder Fügevorgang erhöht die Fehleranfälligkeit des Gesamtbauteils, die Anzahl der ermittelten Schichten sollte deshalb möglichst gering sein. Im Hinblick auf die einzusetzenden Werkzeuge muss eine Abstimmung zwischen dem einzusetzenden Werkzeug und dem Bauteil erfolgen. Eine Verringerung der Anzahl an Bauteilschichten führt zu entsprechenden Einzelbauteilen mit größeren Höhenabmessungen. Die Bearbeitung von Einzelteilen mit großen Höhenabmessungen erfordert in der Regel Werkzeuge mit großen Freischnitlängen bei gleichzeitig geringem Werkzeugdurchmesser. In der Praxis stehen diese Forderungen gegensätzlich zueinander, Werkzeuge mit kleinem Durchmesser besitzen technologisch bedingt vergleichsweise geringe Freischnitlängen. Ziel ist daher die Auswahl von Werkzeugen mit hinreichend kleinen Abmessungen bei gleichzeitig maximaler Freischnitlänge zur Minimierung der Anzahl an Schichten.

Die hier diskutierte Turbine wurde mittels eines Eckenradiusfräasers mit einem Durchmesser von 2 mm, bei einem Eckenradius von 0,5 mm virtuell bearbeitet. Die Freischnitlänge ist mit 10 mm verhältnismäßig groß, setzt allerdings aus Festigkeitsgründen einen vorgeschalteten Schruppvorgang voraus. Die Analyse der Geometrie des Rotors der Miniaturturbine führt zu drei Schnittebenen mit insgesamt vier Einzelbauteilen (vgl. Abbildung 6-3). Ausgehend von der Bauteilspitze liegt die erste Schnittebene in einer Tiefe von 3,5 mm. Dies ist gleichzeitig die Höhe des ersten Einzelbauteils, das aufgrund der Hinterschneidungen von zwei Seiten zu bearbeiten ist. Die zweite Schnittebene liegt bei einer absoluten Bauteiltiefe von 5,5 mm, so dass im Verhältnis zum ersten Einzelbauteil das zweite Einzelbauteil eine Höhe von 2 mm aufweist. Auch dieses Einzelbauteil ist von zwei Seiten zu bearbeiten. Die dritte Schnittebene liegt bei einer absoluten Bauteil-

---

<sup>1</sup> API: Application Programming Interface, Schnittstelle zur Einbindung von Programmen/Programmteilen z.B. in CAD-Systemen

tiefe von 7,9 mm. Es errechnet sich damit eine Bauteilhöhe von 2,4 mm. Analog zu den vorangegangenen Bauteilen muss auch dieses Teil von zwei Seiten bearbeitet werden. Das aus dem letzten Schnittvorgang verbliebende Bauteil ist nur von einer Seite frästechnisch zu bearbeiten und weist eine Höhe von 12,27 mm auf.

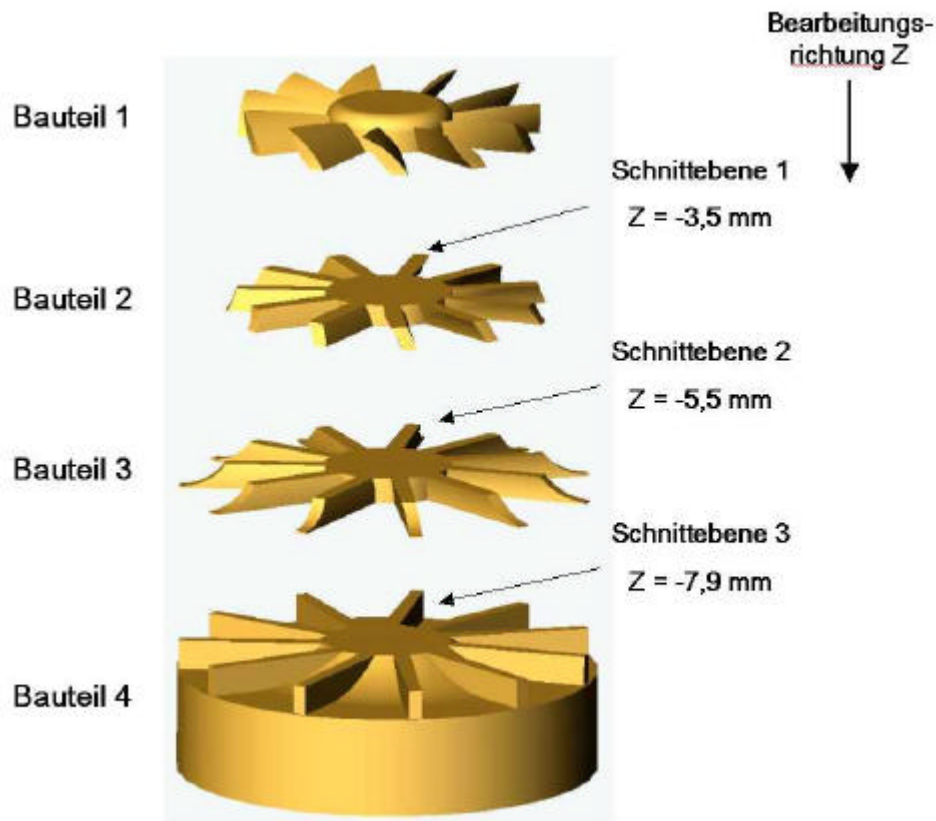


Abbildung 6-3 Explosionszeichnung: aus Fertigungssicht erforderliche Einzelteile

## 6.2 Fertigung der Körperschichten

Die Fertigungsparameter der Einzelteile orientieren sich in erster Linie an einer konventionellen Bearbeitung von Aluminium. Dazu gehören die entsprechenden Drehzahlen und Vorschübe, die für die eingesetzten Werkzeuge den einschlägigen Schnittwerttabellen [vgl. GARANT 2002] entnommen werden. Die in der vorliegenden Arbeit erzielten Fertigungsergebnisse bei Einsatz äußerer oder innerer Hilfsgeometrien werden im folgenden vorgestellt.

### 6.2.1 Fertigung mittels Fräsen

Für die Fertigung mittels Fräsen wurde ein konventionelles 3-Achs-Bearbeitungszentrum eingesetzt. Als Werkstoff für das Bauteil wurde die Aluminiumlegierung AlMg3 verwendet. Als Materi-

al für den Opferblock wurde PVC (Trovidur) eingesetzt. Alle vier Einzelemente wurden unabhängig voneinander gefertigt und liegen als eigenständige Bauteile vor. Das Fügen der vier einzelnen Bauteilelemente durch Pressverbindungen erfolgte manuell und ohne zusätzliche Fügeprozesse. Als Baumaterial kommen grundsätzlich alle spanend bearbeitbaren Werkstoffe in Betracht. Einschränkungen bestehen im Hinblick auf entsprechende Fügeverfahren, die bestimmte Materialienarten voraussetzen (z.B. Fügen von Kunststoffen durch Kleben).

Die beim Fertigungsverfahren Fräsen erreichbaren Genauigkeiten sind mit 0,01 mm in etwa eine Größenordnung höher als beim Lasersinterprozess. Voraussetzung für die hochgenaue Fertigung ist, dass die Ausgangsdaten in einer entsprechenden Detailauflösung vorliegen. Die Genauigkeit der Fertigung lässt sich durch entsprechende Einstellungen im CAM-Modul an die jeweiligen Anforderungen anpassen.

### 6.2.2 Fertigung mittels äußerer Hilfsgeometrien

Systeme mit äußeren Hilfsgeometrien bedienen sich in der Regel einer Rahmenstruktur. Stege werden das Bauteil mit dem Rahmen verbunden (vgl. Abbildung 6-4). In Abhängigkeit von der Steglänge werden die Abmessungen des benötigten Rohmaterials die Abmessungen des zu erzeugenden Bauteils übertreffen. Im Gegensatz dazu führt der Einsatz einer inneren Hilfsgeometrie in Form von Zapfen nur zu einer Zunahme der Bauteilhöhe. Im Vergleich beider Hilfsgeometriearten fällt auf, dass der Materialaufwand bei einer Fertigung in einem Rahmen wesentlich größer ist, da das Bauteil komplett, d.h. auch seitlich, freigelegt werden muss. Das erforderliche Rohma-

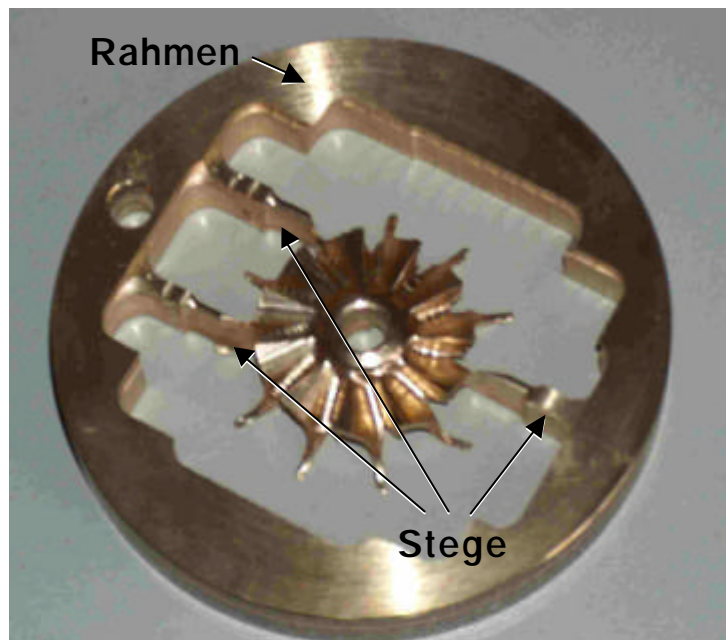


Abbildung 6-4 Fertigung eines Turbinenbauteils mit äußeren Hilfsgeometrien

genden Bauteils übertreffen. Im Gegensatz dazu führt der Einsatz einer inneren Hilfsgeometrie in Form von Zapfen nur zu einer Zunahme der Bauteilhöhe. Im Vergleich beider Hilfsgeometriearten fällt auf, dass der Materialaufwand bei einer Fertigung in einem Rahmen wesentlich größer ist, da das Bauteil komplett, d.h. auch seitlich, freigelegt werden muss. Das erforderliche Rohma-



terial für eine Fertigung mit inneren Hilfsgeometrien wird im vorliegenden Fall durch einen minimal umschreibenden Zylinder festgelegt. In beiden Fällen wird im ersten Schritt mit einem Schrappvorgang die Struktur des Bauteils grob herausgearbeitet. Während das Bauteil bei einer Fertigung mit innerer Hilfsgeometrie von außen frei zugänglich ist, muss das Bauteil mit äußeren Hilfsgeometrien für die folgenden Bearbeitungsgänge freigelegt werden. Je nach erforderlicher Steglänge kann dies mit einem höheren Zerspanungsvolumen verbunden sein. Auch aus technologischer Sicht kann die Fertigung innerhalb eines Rahmens als nachteilig betrachtet werden. Bei einer Bearbeitung ohne Auslass nach unten kann aufgrund der Trogwirkung die Abführung der Späne beeinträchtigt sein. Insbesondere in Wandnähe des Rahmens kann dies zu Spanansammlungen führen, die sich zwischen Wand und Werkzeug bilden. Daraus resultieren größere zusätzliche Krafteinwirkungen, die im Extremfall zu einem Bruch des Werkzeuges führen.

Bei Einsatz äußerer Hilfsgeometrien führt der Übergang zwischen Steg und Bauteiloberfläche zu einem Zusammenwachsen beider Geometrien. Hinsichtlich des Entfernens dieser Steganschlüsse kann dies zu erheblichen Problemen führen. Während bei ebenen Oberflächen eine Unterscheidung zwischen Bauteil- und Steggeometrie verhältnismäßig einfach und damit die komplette Entfernung der Steggeometrie möglich ist, gestaltet sich die Separation von Bauteil- und Steggeometrie bei Freiformflächen als äußerst kompliziert. Am Beispiel der Turbinenschaufeln ist ersichtlich, dass Steg- und Bauteilgeometrie derart zusammengewachsen sind, dass eine nachträgliche Zuordnung unmöglich erscheint (siehe Abbildung 6-5).

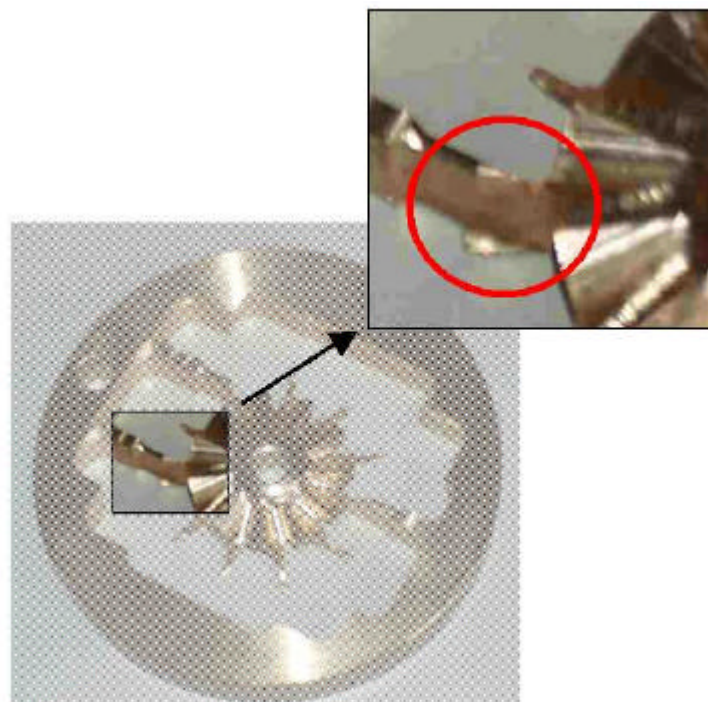


Abbildung 6-5 Zusammenwachsen von äußeren Hilfs- und Bauteilgeometrien



Das Entfernen der Stege ist bei komplexen Bauteiloberflächen häufig mit einem erheblichen manuellen Aufwand verbunden. Aufgrund der manuellen Eingriffe und der extrem schwierigen Differenzierung zwischen Steg- und Bauteilgeometrie ist zusätzlich mit Maßabweichungen zu rechnen. Am Beispiel der Turbine kann dies bei hohen Drehzahlen zu zusätzlichen Belastungen aufgrund von ungleich verteilten Fliehkräften führen.

### 6.2.3 Fertigung mittels innerer Hilfsgeometrien

Die Forderung nach einer reversiblen Fügetechnik verbot im vorliegenden Beispiel neben den irreversiblen Fügetechnologien wie Schweißen oder Kleben auch den Einsatz einer festen Pressverbindung. Vielmehr muss die Verbindungsart so dimensioniert sein, dass ein einfaches Zusammenführen der Einzelteile und eine Übertragung von auftretenden Drehmomenten möglich ist. Zur Vermeidung einer Verdrehung der Teile untereinander sollten die Hilfsgeometrien aus mindestens zwei Merkmalen bestehen. Zur Erfüllung der beschriebenen Forderungen besitzt jede Schnittfläche eines Einzelteiles zwei Bohrungen oder zwei Zapfen, die aus rotationssymmetrischen Gründen im gleichen Abstand und auf einer Linie um die Rotationsachse angeordnet sind (vgl. Abbildung 6-6). Aus geometrischen Gründen können die Bohrungen und Zapfen nur auf der zylindrischen Teilfläche im Zentrum der Einzelkörper platziert werden. Die Tiefe der Bohrungen und damit die Höhe der kombinierten Zapfen hängen in ihren Abmessungen von der Bauhöhe der Einzelteile ab. Verhältnismäßig dünne Bauteilschichten ( $h < 2-3 \text{ mm}$ ) bieten für entsprechende Bohrung-Zapfen-Kombinationen keinen ausreichenden Platz. In diesen Fällen muss auf die Fertigung von Zapfen verzichtet werden. Vielmehr werden diese Bauteile dann mit Durchgangsbohrungen versehen. Die Führung und Ausrichtung der Teile wird dann über längere Zapfen des benachbarten Bauteils übernommen.

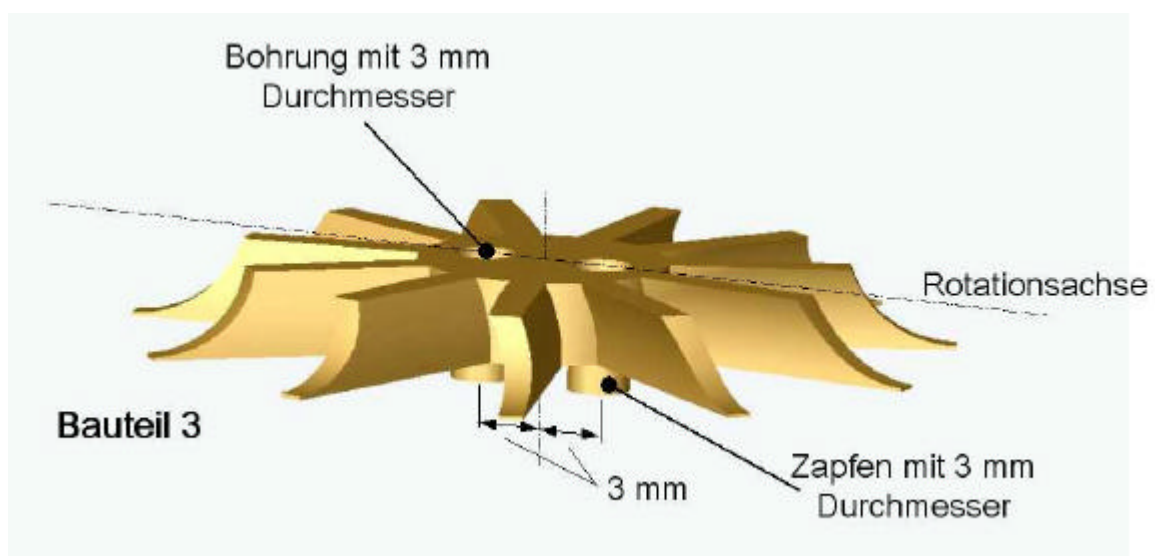


Abbildung 6-6 Turbinenmittelteil mit Bohrungs- und Zapfenelementen

Vor einer Fertigung müssen die entwickelten Hilfsgeometrien mit den jeweiligen Einzelbauteilen datentechnisch verschmolzen werden. Das kann einerseits manuell erfolgen oder über einen Algorithmus automatisch generiert werden. Diese erweiterten Einzelbauteile dienen als Grundlage für den anschließenden Prozess der Datenaufbereitung für die NC-Fertigung. Mit Hilfe kommerzieller NC-Programme werden die erweiterten Einzelbauteile für die Fertigung vorbereitet. Im Vergleich zu den kommerziellen RP-Software-Produkten zur Fertigung gefräster Prototypen bieten die plattformunabhängigen NC-Programme ein bedeutend breiteres Spektrum an Bearbeitungsstrategien. Dies hat nicht nur Vorteile in Bezug auf die Fertigungszeit, auch die erreichbare Oberflächenqualitäten sind durch speziell anpassbare Schlichteigenschaften höher einzuordnen.

### **6.3 Vergleich der RP-Verfahren Lasersintern und Fräsen**

Im Hinblick auf die Fertigung von Funktionsprototypen aus Metall kommen grundsätzlich die RP-Verfahren Lasersintern und Fräsen als direkte Prototyping-Verfahren in Betracht. Die prinzipiell mögliche Fertigung durch ein Urform-Verfahren soll bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt werden. Die hier betrachtete Turbine wurde mittels beider Verfahren gefertigt und die Unterschiede werden im folgenden eingehend diskutiert.

#### **6.3.1 Fertigung mittels Lasersintern (SLS)**

Das hier angewandte Lasersinter-Verfahren ist ein zweistufiger Prozess. Als Ausgangsmaterial wurde ein kunststoffummanteltes Metallpulver (Laserform ST-100, Hersteller 3D-Systems Corp.) eingesetzt. Im ersten Schritt wurde das Kunststoffcoating mittels des Lasersinterprozesses angeschmolzen und zu einem porösen Bauteil, dem sogenannten Grünling vernetzt. Dieser Grünling wurde danach in einem zweiten Schritt mit einer Bronzelegierung infiltriert. Dieser Infiltrationsvorgang gibt dem Bauteil die Festigkeit und reduziert gleichzeitig die Porosität. Der Fertigungsprozess ist durch zwei wesentliche Eigenschaften gekennzeichnet:

Der im ersten Schritt erzeugte Grünling besitzt nur eine geringe Festigkeit und ist gegenüber mechanischen Belastungen extrem empfindlich. Bereits die Entnahme aus dem Pulverbett kann zu Bauteilbeschädigungen führen. Dieser Vorgang verlangt Erfahrung im Umgang mit den eingesetzten Materialien. Des Weiteren ist die Auswahl des Baumaterials auf die Gruppe der infiltrierbaren Werkstoffe beschränkt.

Die erreichbare Fertigungsgenauigkeit liegt beim beschriebenen Verfahren in einer Größenordnung von 0,1 mm. Diese Genauigkeit bezieht sich auf den reinen Sintervorgang im ersten Prozessschritt und wird im folgenden Infiltrationsprozess weiter reduziert. Die Gründe hierfür liegen

in der auftretenden Schwindung während der Infiltration.

### 6.3.2 Vergleich der Fertigungszeiten und visuellen Eindrücke

Zunächst wurden die prozessabhängigen Fertigungszeiten ermittelt. Entsprechend des Fertigungsprozesses wurden alle Informationen von der Aufbereitung der Daten bis zur Entnahme des fertigen Bauteils (ohne Nachbearbeitung) aufgezeichnet. Eine Übersicht der Fertigungszeiten für das komplette Bauteil Turbinenrotor ist in Tabelle 6-1 dargestellt.

	SLS	Fräsen
Datenvorbereitung	2 h	4 x 1 h
Fertigungsvorbereitung	1 h	4 x 0,5 h
Fertigung	4 h	4 x 3 h
Vorbereitung Infiltration	1 h	-
Infiltration	20 h	-
Fügen	-	1 h
Summe Fertigungszeit	28 h	20 h
Fertigungszeit in Arbeitstagen	2 d	3 d

Tabelle 6-1 Vergleich der Fertigungszeiten (angenäherte Zeitangaben)

Der generative Fertigungsprozess SLS ist zeitlich durch die Fertigungsstrukturen in z-Ebene gekennzeichnet. Bei einem ausreichenden Bauraum lassen sich mehrere Bauteile in einer Ebene verteilen, wobei sich die Zeit aufgrund der simultanen Fertigung nicht wesentlich erhöht. Auch die Zeit für die Infiltration ist bei ausreichenden Raum für alle Bauteile gleichermaßen gültig. Zu einer Erhöhung der Zeiten käme es daher nur in den Bereichen der Fertigungsvorbereitung und der Vorbereitung der Infiltration.

Dem gegenüber steht die Fertigung mittels Fräsen, die im Hinblick auf die simultane Fertigung von mehreren Bauteilen keine wesentlichen Zeitersparnisse mit sich bringt. Mit einem Anteil von 16 h ist in etwa 2/3 der Gesamtfertigungszeit der Anteil der Fertigungszeit verhältnismäßig groß. Obwohl die Gesamtfertigungszeit beim Lasersintern mit 28 h in etwa 8 h über der Zeit für das Fertigen mittels Fräsen liegt, ist aufgrund der weitestgehend vollautomatischen Fertigungsschritte eine 24 h-Nutzung der Maschinen möglich. Dadurch verringert sich die Fertigungszeit auf 2 Arbeitstage. Der höhere manuelle Aufwand bei der Fertigung mittels Fräsen lässt grundsätzlich keine 24 h-Nutzung der Maschinen zu. Die Fertigung verteilt sich in diesem Fall auf drei Arbeitstage.

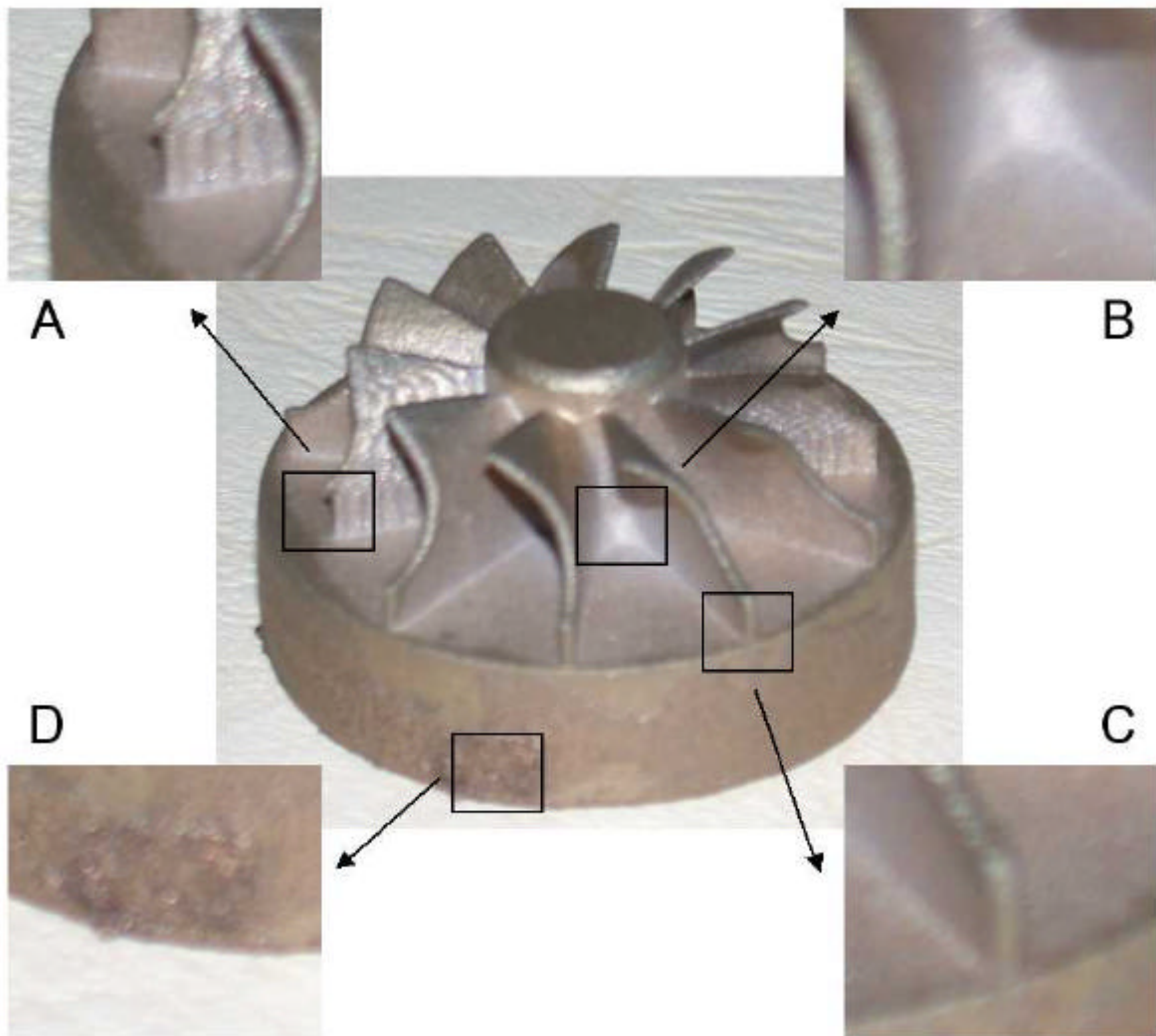


Abbildung 6-7 Turbinenrotor: Fertigung durch Selektives Lasersintern (Metallpulver)

Ein erster visueller Vergleich der Bauteile zeigte, dass die Oberflächenqualität des Lasersinterbauteils nicht an die der Fertigung mittels Fräsen herankommt. Zum einen ist Oberflächenstruktur des gesinterten Bauteils durch eine höhere Rauheit gekennzeichnet, zusätzlich ist der technologisch bedingte Anschluss für den Infiltrationsvorgang sichtbar (vgl. Abbildung 6-7D). Der Einsatz dieses Bauteils zu Funktionszwecken macht eine nachträgliche Bearbeitung des zylindrischen Grundkörpers notwendig. Die Bestimmung eines Bezugspunktes für die nachträgliche Bearbeitung ist aufgrund der Ungenauigkeiten der Oberfläche problembehaftet. Im Rahmen der Vorbereitung zur Infiltration muss das Bauteil von allen Pulveranbackungen des Lasersinterprozesses befreit werden. Dieser Vorgang muss sehr vorsichtig ausgeführt werden, da der Grünling extrem empfindlich gegenüber mechanischen Belastungen ist. Die mechanische Festigkeit des Grünlings ist mit der von Kreide vergleichbar. Verbleibende Pulverreste am Bauteil (z.B. Anbackungen) werden beim Infiltrieren mit Bronzelegierung gefüllt und sind fest mit dem Bauteil

verbunden (vgl. Abbildung 6-7B). Diese Bereiche infiltrierter Pulverreste führt zu Ungenauigkeiten der Bauteile, deren Beseitigung nur teilweise möglich sind. Als problematisch erweist sich auch die Fertigung von filigranen Strukturen. Die Laserstrahlweite von etwa 0,3 mm führt im Zusammenhang mit einer Aufschmelzzone von 0,15 mm um den Laserstrahl herum zu einer minimalen zu fertigenden Abmessung von ca. 0,6 mm. Im vorliegenden Fall werden die Schaufelstrukturen der Turbine (Breite 1,0 mm) mit einer Breite von 0,6 mm nur unzureichend genau gefertigt (vgl. Abbildung 6-7C). Teilweise werden diese Strukturen nicht komplett ausgeführt (vgl. Abbildung 6-7A).

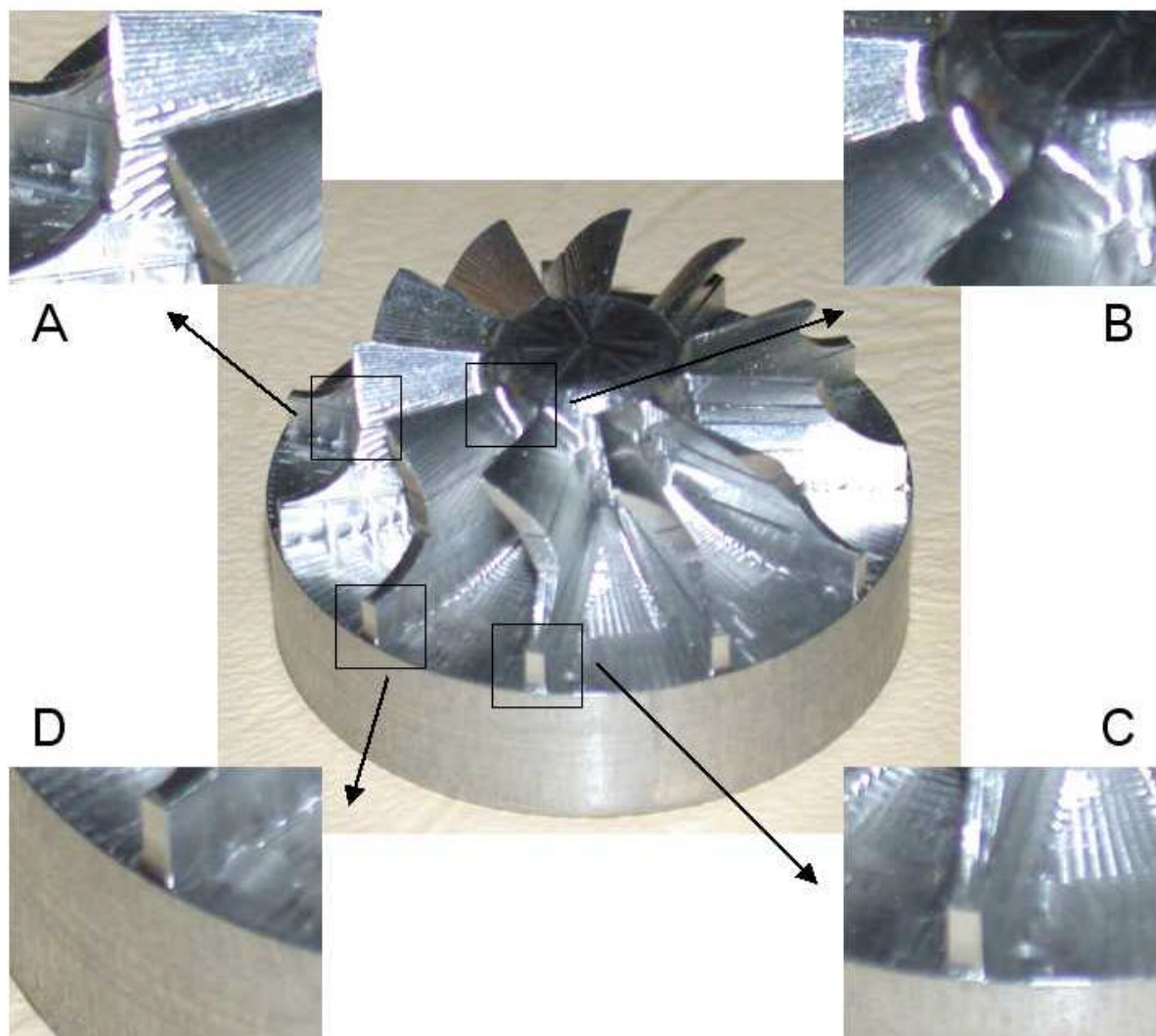


Abbildung 6-8 Turbinenrotor: Fertigung durch Fräsen (AlMg3)

Der mittels Fräsen gefertigte Turbinenrotor erreichte eine deutlich bessere Oberflächenqualität (vgl. Abbildung 6-8D). Für die Fertigung wurde eine radiale Frässtrategie angewandt, die eine gleichmäßige und genaue Bearbeitung der Flügelflächen erlaubt (vgl. Abbildung 6-8C). Der Rotor wurde in vier Teilen gefertigt und für jedes Bauteil wurden die vorbereiteten Maßnahmen zur Datenaufbereitung und zur Fertigung einzeln ausgeführt. Der abschließende Fügevorgang mittels

Bohrung-Zapfen-Kombinationen führte zu dem in Abbildung 6-8 gezeigten Bauteil. Im Unterschied zur Fertigung mittels Lasersintern sind die eckigen Übergänge der Flügel zur Turbinenachse technologisch bedingt mit einem Radius behaftet. Als Werkzeug für die Endformgebung wurde ein Eckenradiusfräser mit einem Durchmesser von 2 mm eingesetzt. Fertigungsbedingt verbleibt daher Restmaterial in Form eines Radienübergangs von 1 mm am Bauteil (vgl. Abbildung 6-8B).

Die durch das Fräswerkzeug auf der Bauteiloberfläche erzeugte Struktur lässt Rückschlüsse auf ein Verdrehen der einzelnen Bauteilschichten zueinander zu. Das vom Fräser erzeugte Muster ist auf den oberen drei Bauteilen durchgängig zu erkennen (vgl. Abbildung 6-8A). Die Stetigkeit der Muster an den Übergangsstellen führt zu der Schlussfolgerung, dass die Schichten zueinander nicht auffällig verdreht oder verschoben sind. Eine umfassende Struktur- und Genauigkeitsanalyse soll diese These untermauern.

## 6.4 Struktur- und Genauigkeitsanalyse der Prototypen

Hinsichtlich der Einsetzbarkeit von Prototypen wurden Struktur- und Genauigkeitsanalysen durchgeführt. Dazu waren für jede Analyse Merkmale festzulegen, die auf Maßhaltigkeit untersucht werden müssen. Während diese Merkmale für Körper mit Regelgeometriecharakter verhältnismäßig einfach zu definieren sind, ist das Festlegen von Merkmalen bei Körpern mit Freiformflächen problematisch. In der Praxis werden für die Vermessung von Freiformflächen Stützpunkte ausgewählt, die in einem definierten Abstand zu einem bestimmten Referenzpunkt angeordnet sind. Diese Stützpunkte werden anhand der Konstruktionszeichnung ausgewählt und in Verbindung mit dem definierten Referenzpunkt in Form von Abständen angegeben. In der Regel werden dafür Messpunkte in allen drei Raumrichtungen angegeben.

### Untersuchung der Prototypenmaßhaltigkeit

Die rotationssymmetrische Form der Miniaturturbine erlaubt die Durchführung einer Struktur- und Genauigkeitsanalyse unter Einsatz einer manuellen Koordinatenmessmaschine. Eine Prüfung auf Formabweichungen der einzelnen Turbinenschaufeln erfolgte mittels einer Vermessung sowohl in axialer als auch in radialer Richtung. Für die Messungen musste das Bauteil in eine Vorrichtung gespannt werden. Als Referenzebene wurde die Grundebene der Turbine festgelegt. Der Referenzpunkt für die Vermessung ist der Schnittpunkt der Rotationsachse des kreisförmigen Absatzes der Turbine mit der Referenzebene. Die Lage der einzelnen Referenzen und Mess Ebenen ist in Abbildung 6-9 dargestellt.

Die Überprüfung der Prototypenmaßhaltigkeit erfolgte im montierten Zustand. Die Gründe hierfür liegen zu einen in einer aufwändigen Vermessung der Einzelteile und zum anderen müssen für eine fehlerminimale Fertigung die potenziellen Fehlerquellen eines Montageprozesses berücksichtigt werden.

Die Überprüfung auf Maßhaltigkeit der Turbine erfolgte in mehreren Schritten. Zunächst wurde die Referenzebene und die Position der Referenzachse in x-y-Richtung ermittelt. In axialer Richtung der Turbine wurde die Bauhöhe kontrolliert. Im Anschluss daran wurden in definierten

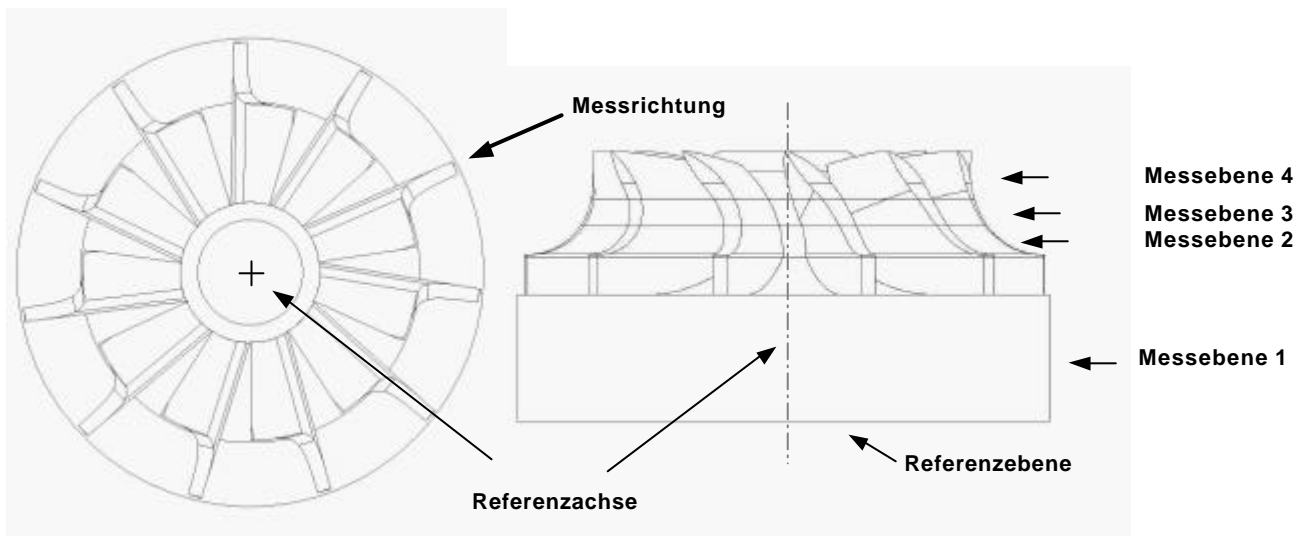


Abbildung 6-9 Messpunkte und Messrichtungen zur Überprüfung der Prototypenmaßhaltigkeit

Höhen die einzelnen Bauteile vermessen. Die Messrichtung ist radial zur Bauteilrotationsachse, es wurde jeder der elf Flügel der Turbine angetastet. Im Ergebnis wurde für jedes der vier Bauteilelemente ein Kreis ermittelt. Die Konzentrität der vier Kreise zueinander sowie die Form der Kreise ist als Genauigkeitsmaß des Prototypen heranzuziehen. Die Angabe der Formabweichung der Kreise basiert auf der Ausgleichsrechnung nach Gauss.

Im folgenden wurden drei Prototypen des Bauteils Miniaturturbine hinsichtlich der Fertigungsge- nauigkeit und der prozessbedingten Formabweichungen untersucht. Die Ergebnisse der Vermes- sung sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst.

Bauteil	Fertigungsverfahren	Durchmesser	Abweichungen Ebenenparallelität	Abweichungen Flügelkonzentrität	Abweichungen Rundheit der Flügel
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Solwert	Konstruktion	40,000	0,000	0,000	0,000
Kunststoff	Lasersintern	39,859	0,007	0,026 - 0,151	0,157 - 0,289
Metall	Lasersintern+Infiltration	40,613	0,033	0,104 - 0,696	0,277 - 1,558
Aluminium	Fräsen	40,140	0,018	0,101- 0,279	0,032 - 0,058

Tabelle 6-2

Ergebnisse der Vermessung der Prototypen



Es ist direkt erkennbar, dass eine hinreichend genaue Maßhaltigkeit des zylindrischen Grundkörpers (Durchmesser 40,000 mm) nur durch die Fertigung mittels Fräsen sowie durch den einstufigen Lasersintervorgang des Kunststoff-Bauteils zu erreichen ist. Bei der zweistufigen Fertigung des Metallbauteils mittels Lasersintern und anschließendem Infiltrationsvorgang sind erhebliche Maßabweichungen von mehr als 0,6 mm festzustellen. Die Gründe hierfür liegen einerseits in dem bereits erwähnten Schwindungsvorgang sowie durch Unregelmäßigkeiten der Bauteiloberfläche aufgrund der Infiltrationsanschlüsse.

Die Abweichungen der Ebenenparallelität (Referenzebene zu planparalleler Bauteilebene) liegen für alle Prototypen bewegen sich mit 0,007 bis 0,033 mm auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Ablesbar ist hier insbesondere für das generative RP-Verfahren Lasersintern, dass das verfahrensbedingte Bewegen der z-Ebene, sowie die Verteilung der Pulverschicht keine technologischen Nachteile beinhaltet.

Die Abweichungen der Flügelkonzentrität wurde aus den Flügelenden umschreibenden Kreisen ermittelt. Dazu wurden alle Flügel der Prototypen in vier unterschiedlichen Höhen angetastet. Zu jeder Höhe wurde mit den Messwerten ein Kreis umschrieben. Der Mittelpunkt jedes umschreibenden Kreises sollte auf der Rotationsachse der Turbine liegen. Auftretende Abweichungen verursachen einen exzentrischen Lauf des Bauteils. Die vier Messebenen wurden so ausgewählt, dass alle vier Bauteilschichten des gefrästen Prototypen auf Konzentrität überprüft werden können. Die jeweiligen Abweichungen werden in Form eines Radius von der Referenzachse

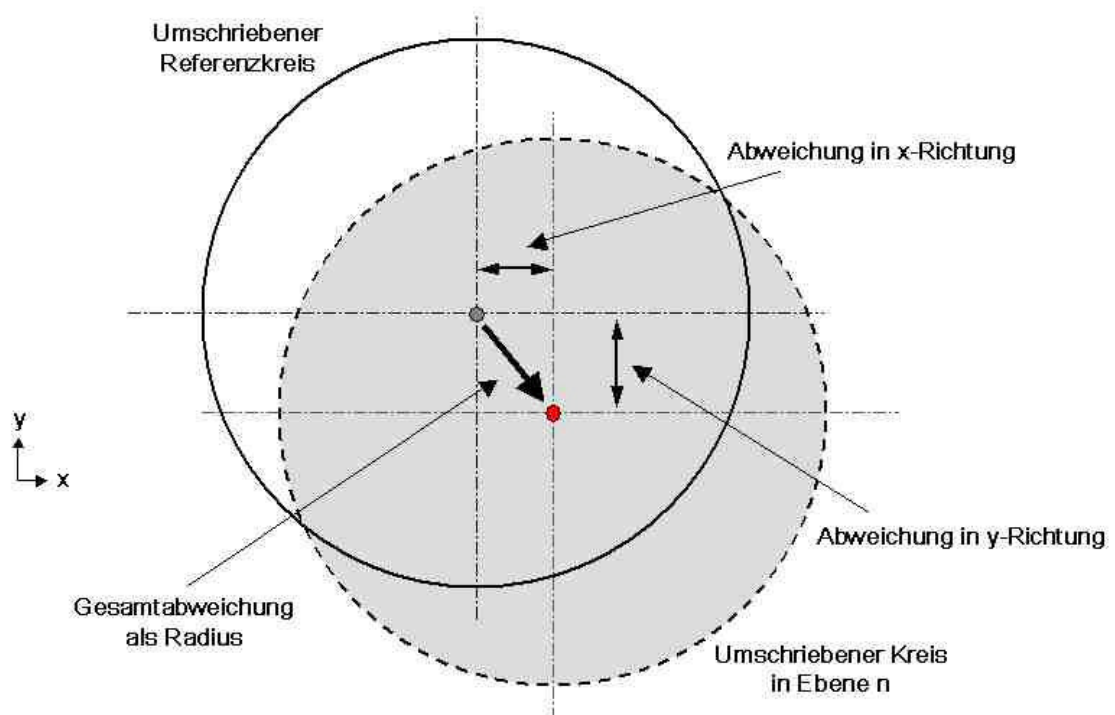


Abbildung 6-10 Ermittlung der Flügelkonzentrität als Gesamtabweichung



angegeben (vgl. Abbildung 6-10). Die im Vergleich zum lasergesinterten Bauteils aus Kunststoff ist die Abweichung der Flügelkonzentrität beim gefrästen Bauteil höher. Eine Begründung für diese Auffälligkeit ist im nachträglichen Fügen des Bauteils zu suchen. Die vier Bauteile wurden über die bereits erwähnte Bohrung-Zapfen-Kombination gefügt. Die dafür erforderlichen Geometrien wurden für jedes Bauteil einzeln gefertigt und führen bei Abweichungen zu Bauteilungenauigkeiten. Die Analyse der Messwerte führte zu dem Ergebnis, dass die Abweichungen der Konzentrität der umschreibenden Kreise in Abhängigkeit von der Bauteilhöhe in eine bestimmte Richtung tendieren. Ursachen hierfür könnten in einer Nullpunktverschiebung liegen, die durch eine ungenaue Bestimmung des Rohmaterialreferenzpunktes hervorgerufen wird.

Die Formabweichungen der umschreibenden Kreise ist als ein Maß für die reproduzierbare Genauigkeit der Verfahren in der Bauteilebene zu interpretieren. Eine ungleichmäßige Ausführung der Flügel führt zu höheren Abweichungen der Rundheit der umschreibenden Kreise. Hier zeigt sich deutlich, dass beim Fertigen mittels Fräsen mit wesentlich niedrigeren Formabweichungen zu rechnen ist. Der Vergleich zeigt, dass die Rundheitsabweichungen des gefrästen Prototypen wesentlich geringer sind, als die der gesinterten Bauteile. Eine Begründung hierfür liegt in dem festen x-y-Raster der Fertigung mittels Lasersintern. Die erreichbare Auflösung dieses Rasters liegt bei 0,1 mm. Im Zusammenhang dieser Rasterung und der Laserstrahlweite von etwa 0,3 mm werden die feinen Enden der Flügel nicht vollständig gefertigt. Dem gegenüber ist die Fertigung mittels Fräsen wesentlich genauer. Die Fertigungsstrategie lässt sich den Anforderungen in bezug auf die Genauigkeit und der Oberflächengüte anpassen.

## 7 Ausblick und Tendenzen

Das Potenzial der Fertigung von Prototypen mittels Fräsen wird in weiten Teilen nicht genutzt. Das liegt unter anderem in der noch geringen Zusammenarbeit zwischen den Bereichen Konstruktion und Fertigung. In der Vergangenheit haben sich neue Entwicklungen der konventionellen Fertigungsverfahren wie beim Fräsen meist auf den Bereich einer verbesserten Auslastung und damit wirtschaftlicheren Fertigung beschränkt. Die Möglichkeiten zur Fertigung von komplexen Prototypen wurden dabei nicht hinreichend genug herausgearbeitet. Der Trend zur Verschmelzung von Konstruktion und Arbeitsvorbereitung in Form von CAD/CAM-Systemen bietet nun die Chance zu Fertigung von komplexen Prototypen mittels Fräsen.

Eine weitreichende Nutzung der vorgestellten Ansätze zur Fertigung von genauen Prototypen mittels Fräsen wird durch einen möglichst automatisierten Vorgang unterstützt. Möglichkeiten dazu sind in folgenden Bereichen denkbar:

- Entwicklung einer automatisierten optimalen Schnittstrategie
- Automatisierte Auslegung der inneren Hilfsgeometrien
- Schnittebenen in unterschiedlichen Ausrichtungen

### 7.1 Implementierung von Schnitt-Algorithmen in 3D-CAD-Systeme

Die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellte Möglichkeit zur Fertigung von Prototypen mittels Fräsen könnte mit zusätzlichen Hilfsmitteln stark vereinfacht werden. Dazu zählt insbesondere die Entwicklung von Algorithmen, die das zu fertigende Bauteil unter Berücksichtigung der verwendeten Werkzeuge automatisch in die entsprechenden Schichten zerlegt. Alle industriell eingesetzten 3D-CAD-Systeme bieten mittels API-Schnittstellen die Möglichkeit, spezielle Schnitt-Algorithmen zu implementieren. Auf Basis der Geometriedaten (z.B. Abmessungen, Form) aus der Konstruktion und den Technologiedaten (z.B. Fräserdurchmesser, Schneidenlän-

ge) der Fertigung ließe sich eine Aufteilung des Bauteils in Form einer optimalen Schnittstrategie erreichen (vgl. Abbildung 7-1). Damit eine möglichst breite Anwendbarkeit gewährleistet wird, sollten die Algorithmen sowohl 3-Achs-, als auch 5-Achs-Werkzeugbewegungen berücksichtigen.

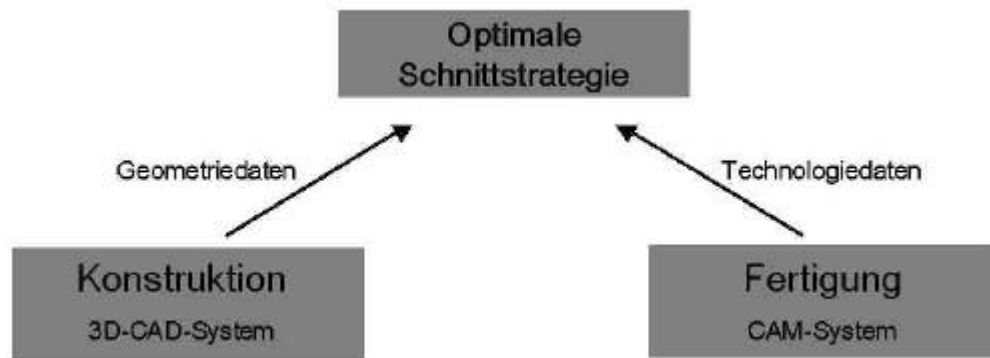


Abbildung 7-1 Informationsfluss: optimale Schnittstrategie

## 7.2 Automatisierte Konstruktion von inneren Hilfsgeometrien

Für eine vereinfachte Anwendung müssten im Rahmen der Zerlegung in Schichten Vorschläge zur Auswahl und Positionierung der Bohrung-Zapfen-Kombinationen ausgearbeitet werden. Für die Auslegung von optimalen Verbindungen müssen folgende Größen bestimmt werden:

- Zapfendurchmesser
- Zapfenhöhe
- erforderliches Übermaß für die Pressverbindung

Diese Auswahl geschieht unter Berücksichtigung der für die Verbindung zur Verfügung stehenden Schnittebenegeometrie. In diesem Zusammenhang erfolgt auch die Positionierung der Bohrung-Zapfen-Kombinationen auf den einzelnen Bauteilschichten. Die für die zweiseitige Bauteilbearbeitung notwendige Rotationsachse ergibt sich aus der Verbindungslinie zwischen den Mittelpunkten der Zapfen (Abbildung 7-2).

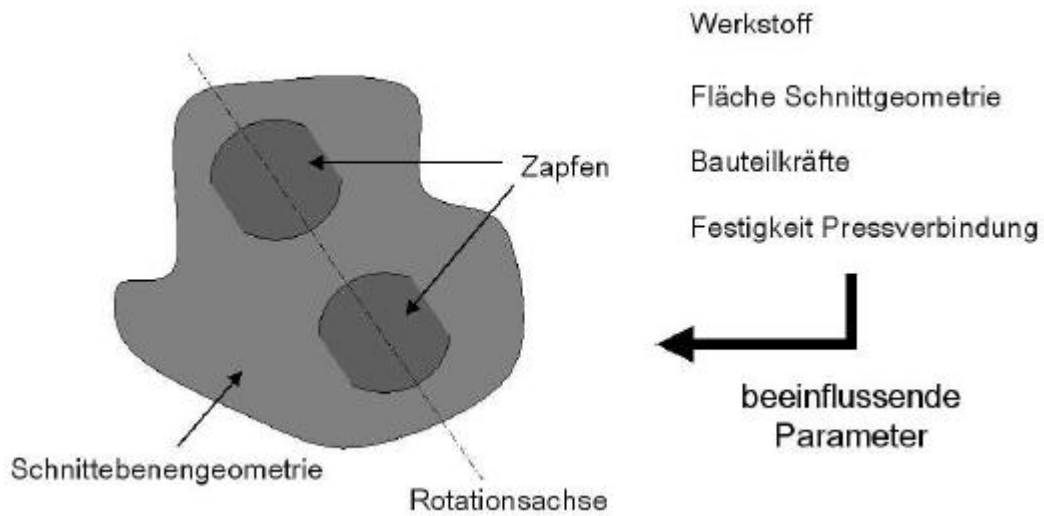


Abbildung 7-2 Beeinflussende Parameter zur Zapfen- und Bohrungsauslegung

### 7.3 Bauteilschnitte in unterschiedlichen Ausrichtungen

Die in der Literatur bekannten sowie die hier diskutierten Ansätze zur Bauteilerlegung beschränken sich für das 3-Achs-Fräsen auf das Zerlegen in einer Ausrichtung. Die Fertigung von Zapfen oder Bohrungen in einem Winkel zwischen 0 und 180° ist mit 3-Achs-Fräsmaschinen unter den gegebenen Umständen nicht möglich (Abbildung 7-3). Der Einsatz von 5-Achs-

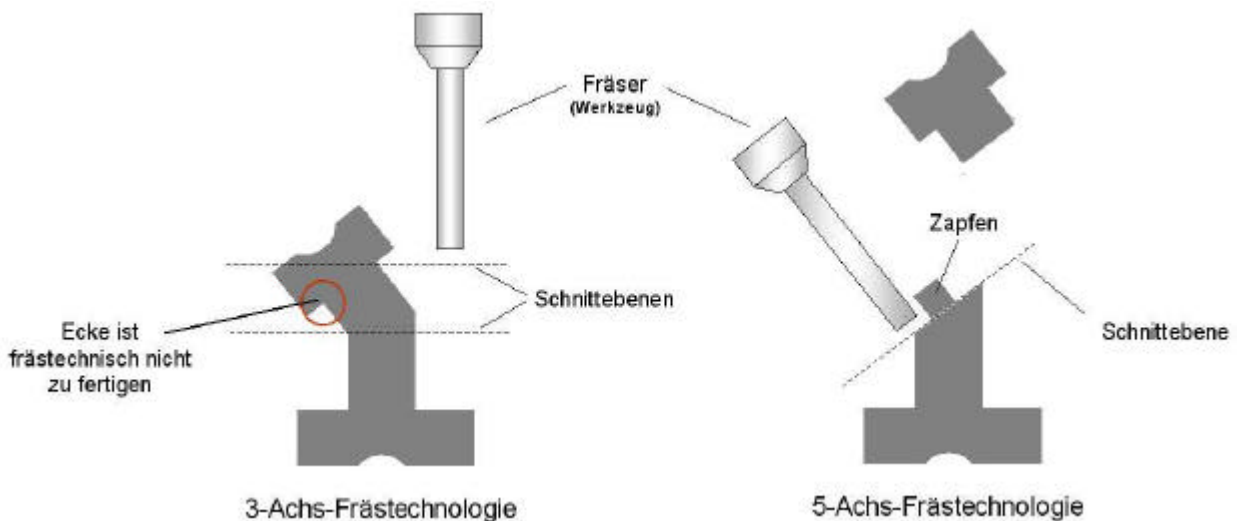


Abbildung 7-3 Schnittebenenreduzierung aufgrund veränderlicher Ausrichtungen

Fräsmaschinen ermöglicht jedoch auch die Fertigung von Zapfen und Bohrungen für Winkel zwischen 0 und 180° zur Bauteilebene. Damit sind auch Bauteilerlegungen in unterschiedlichen Ausrichtungen denkbar. Dies könnte hilfreich im Hinblick auf die Fertigung mit Bauteilen mög-

---

lichst wenigen Schnittebenen sein, da die erhöhten Werkzeugfreiheitsgrade eine bessere Zugänglichkeit im Hinblick auf Hinterschneidungen erlauben.

## 8 Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist es, das Fertigungsverfahren Fräsen in bezug auf die Herstellung von hochgenauen Prototypen zu analysieren und entsprechende Ansätze für eine Optimierung des Verfahrens zu entwickeln. Unter Einbeziehung der generativen Fertigungsverfahren wurden die gegenwärtigen Möglichkeiten zur Fertigung von Prototypen hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit und die Anwendung verschiedener Werkstoffe erarbeitet. Mit einer Funktionsanalyse wurde ein Vergleich zwischen generativen Rapid-Prototyping-Verfahren und dem Fertigen mittels Fräsen unter datentechnischen, fertigungstechnischen und fügetechnischen Gesichtspunkten untersucht.

Die Überprüfung der gegenwärtigen Situation zeigt, dass sowohl im Bereich des Datenaustausches zwischen Konstruktion und Fertigung, sowie der eigentlichen Herstellung von Prototypen noch Probleme auftreten. Diese Schwierigkeiten betreffen zum einen die erreichbare Genauigkeit von Prototypen, zum anderen ist die vom Anwender gewünschte Materialvielfalt für die Fertigung noch nicht realisiert. Eine Lösung dieser Probleme kann in der Anwendung von Fräsen als Fertigungsverfahren gefunden werden, jedoch tritt die Fertigung von Prototypen mittels Fräsen aufgrund von nicht gelösten Schwierigkeiten des Verfahrensablaufs im Rahmen des Rapid Prototyping nur als Randerscheinung auf.

Im Rahmen einer Untersuchung haben sich als gegenwärtige Schwierigkeiten in der Fertigung von Prototypen mittels Fräsen herauskristallisiert:

- Probleme in der Aufbereitung der Fertigungsdaten,
- in der Spanntechnik sowie
- im Fügen der Bauteile.

Im Hinblick auf eine verbesserte Nutzung des Potenzials für das Fertigungsverfahren Fräsen werden Ansätze für einen verbesserten Verfahrensablauf entwickelt und formuliert.

Analog zu den generativen Fertigungsverfahren werden die Bauteile in Schichten zerlegt. Diese Zerlegung erfolgt für das Fräsen in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie in unterschiedlichen Schrittweiten. Für ein ideales Fertigungsergebnis wird eine optimale Schnittstrategie entwickelt, die sich im Gegensatz zu den vorhandenen Strategien an der Bauteilgeometrie und an den einsetzbaren Werkzeugen orientiert.

Eine hochgenaue Fertigung von Prototypen setzt in der Regel für das Fräsen eine zweiseitige Bauteilbearbeitung voraus, die wiederum die Lösung spanntechnischer Probleme erfordert. Die Entwicklung spezieller Hilfsgeometrien, die im Zusammenhang mit der datentechnischen Aufbereitung der Konstruktion entstehen, stellt eine Lösung dieser Problematik dar. Diese speziellen Hilfsgeometrien sind konstruktiv so ausgelegt, dass der spätere Fügevorgang nicht behindert ist.

Die fügetechnischen Schwierigkeiten bei der Herstellung gefräster Prototypen können auch mit Hilfe der entwickelten Hilfsgeometrien zum Spannen der Bauteilkörper gelöst werden. Durch die entsprechende Auslegung der speziellen Hilfsgeometrie als Pressverbindung lässt sich diese Fügetechnik als eine reversible Verbindung einsetzen. Durch die Anwendung von FEM-Analysen sowie durch experimentelle Untersuchungen wird die Wirksamkeit solcher Verbindungen unterstrichen.

Am Beispiel einer Miniaturturbine wird das Potenzial der entwickelten Ansätze verdeutlicht. In einem direkten Vergleich der Verfahren Lasersintern und Fräsen werden die Fertigungsprozesse und auch die Fertigungsergebnisse im Rahmen einer Struktur- und Genauigkeitsanalyse untersucht. Mittels der Koordinatenmesstechnik werden Form- und Lageabweichungen der Prototypen ermittelt und miteinander verglichen.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass das Fertigungsverfahren Fräsen im Hinblick auf die Herstellung von komplexen Prototypen noch ungenutztes Potenzial besitzt. Unter Berücksichtigung der in dieser Arbeit entwickelten Ansätze lassen sich die Möglichkeiten der Herstellung von genauen Prototypen mittels Fräsen deutlich verbessern. Im Ergebnis lassen sich Prototypen mit einer wesentlich besseren Oberflächenqualität erzeugen. Gleichzeitig stellen die entwickelten Hilfsgeometrien eine eigene Fügetechnik dar. Die vielseitige Nutzung von Fräsmaschinen im Rahmen der klassischen Fertigungstechnik lassen die Möglichkeit einer Fertigung von komplexen Prototypen mittels Fräsen auch wirtschaftlich erscheinen. Vor diesem Hintergrund kann sich das Fertigen mittels Fräsen durchaus zu einem konkurrenzfähigen Fertigungsverfahren zu den generativen Rapid-Prototyping-Verfahren entwickeln.

## Anhang A    Skizzen und Zeichnungen

### Geometrie der Miniaturturbine



Abbildung A-1    Darstellung Miniaturturbine (schattiert)



### Konstruktionszeichnung Miniaturturbine

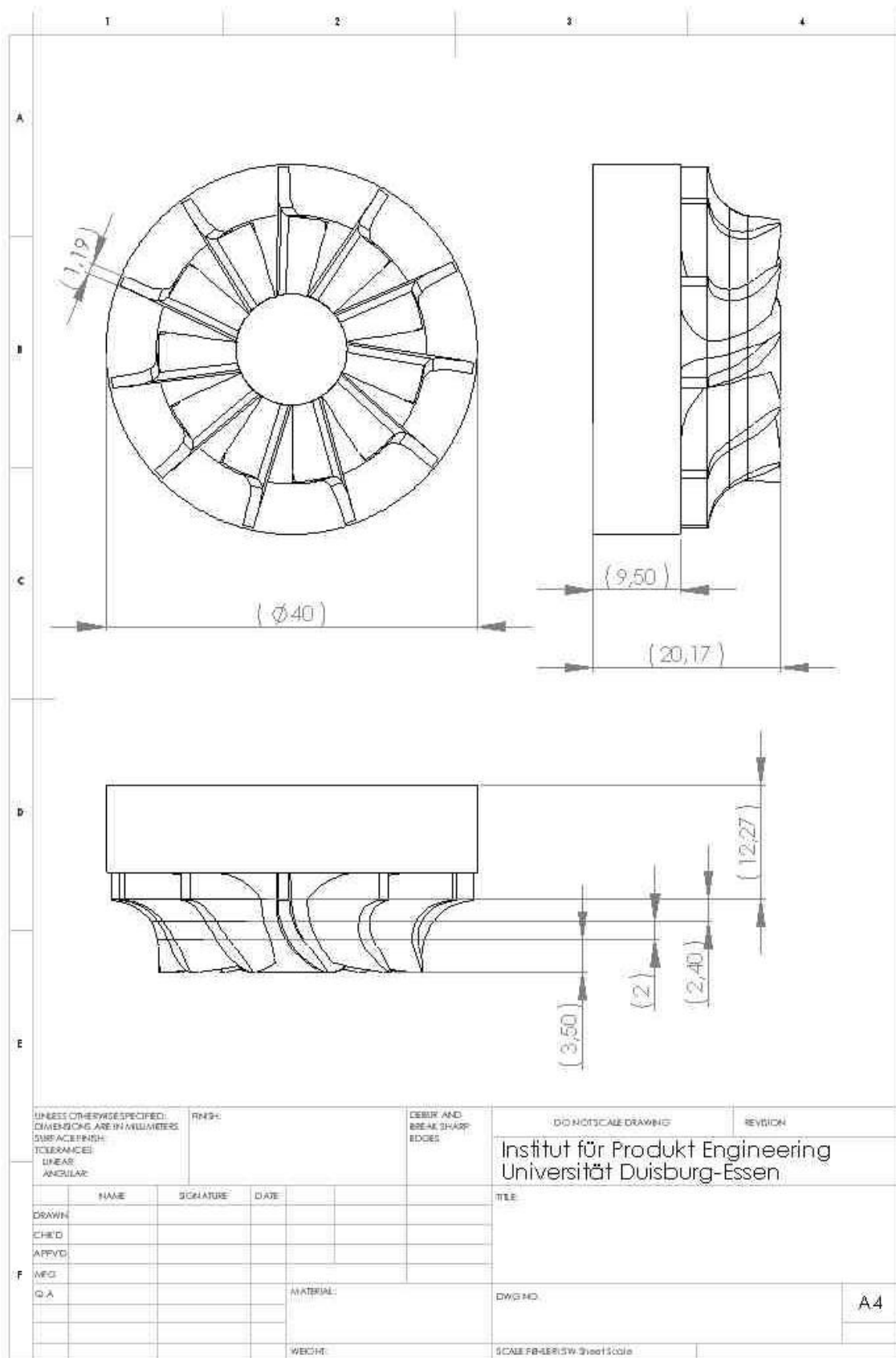


Abbildung A-2 Konstruktionszeichnung Miniaturturbine

**Zeichnung Bauteil (mit Zapfen) für experimentelle Zugversuche**

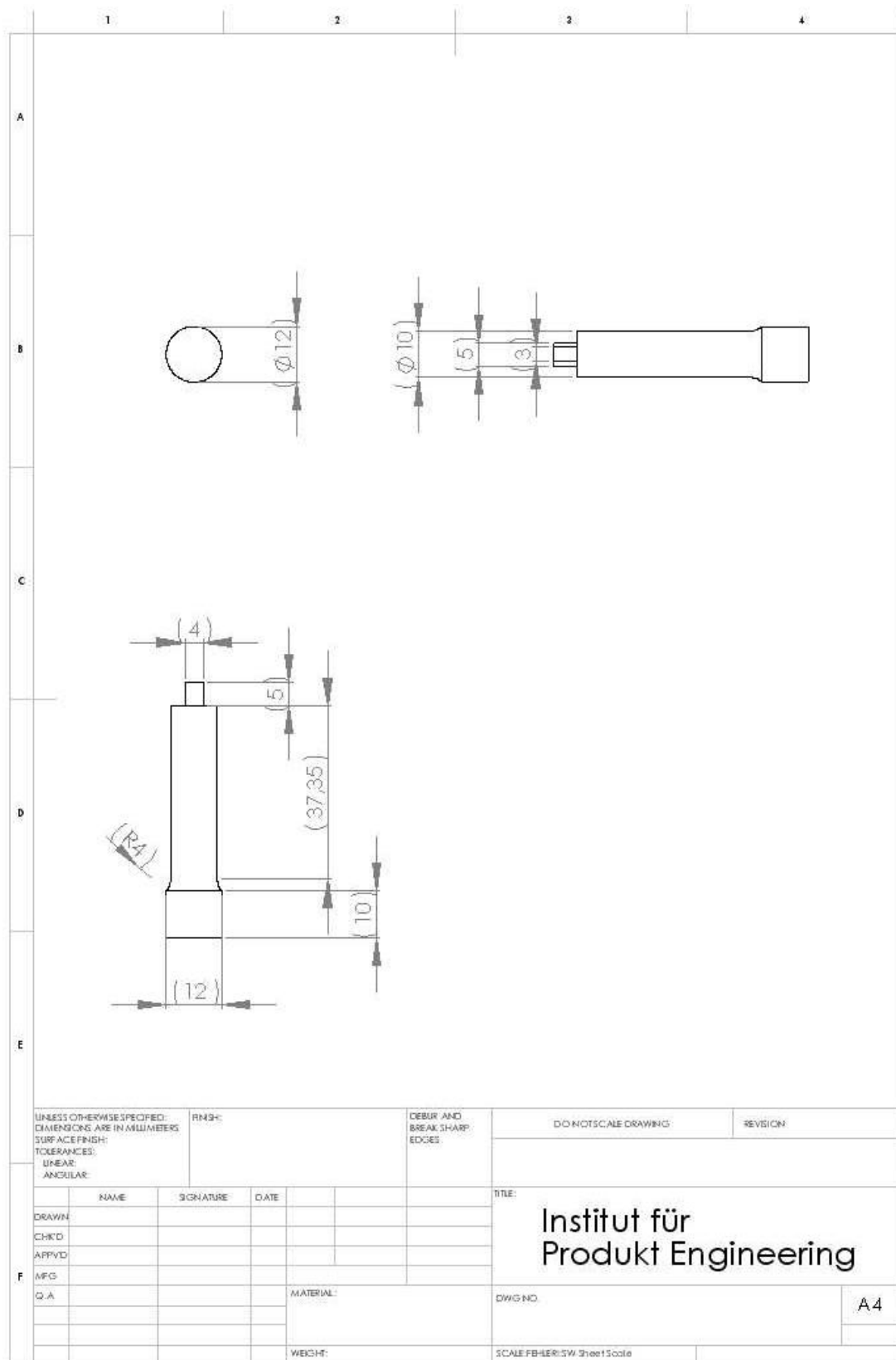


Abbildung A-3 Zeichnung Bauteil Zapfen für experimentelle Zugversuche

**Zeichnung Bauteil (mit Bohrung) für experimentelle Zugversuche**

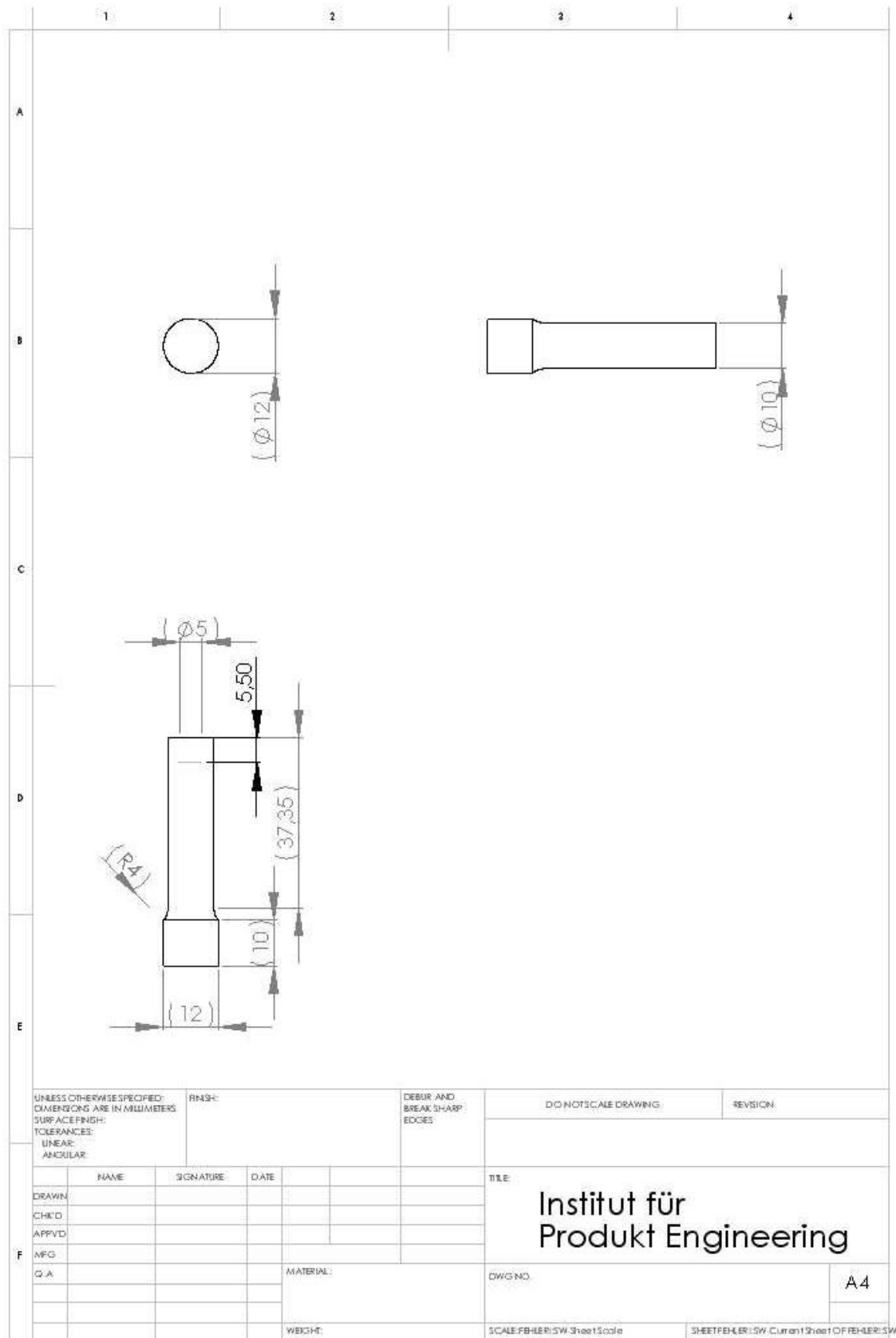


Abbildung A-4 Zeichnung Bauteil Bohrung für experimentelle Zugversuche

## Anhang B    Abbildungen

### Fotos zur experimentellen Untersuchung der Zugproben



Abbildung B-1    Zugprobekörper aus AlMgSi1 (ungefügter Zustand)

## Fotos zur Beispielstudie Miniaturturbine

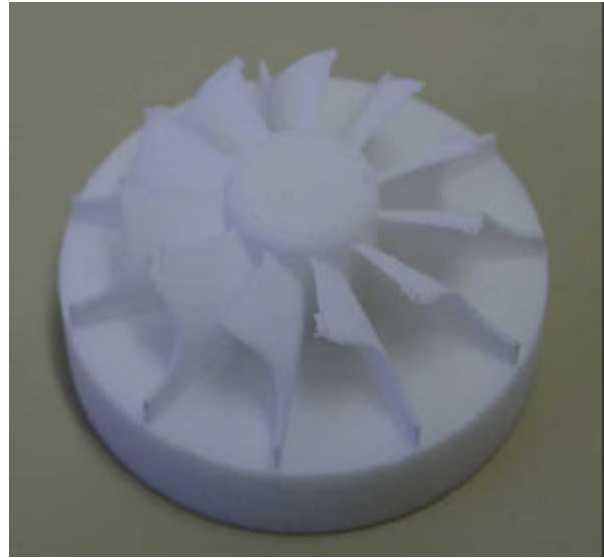
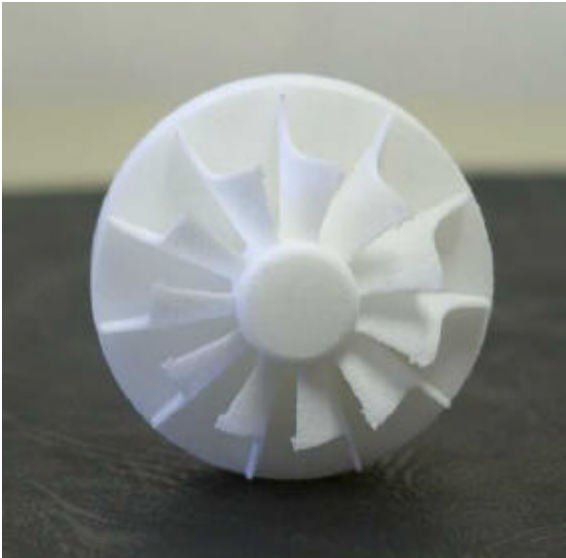


Abbildung B-2 Miniaturturbine gefertigt mittels Lasersintern (Kunststoffpulver)



Abbildung B-3 Miniaturturbine gefertigt mittels Lasersintern (Metallpulver)

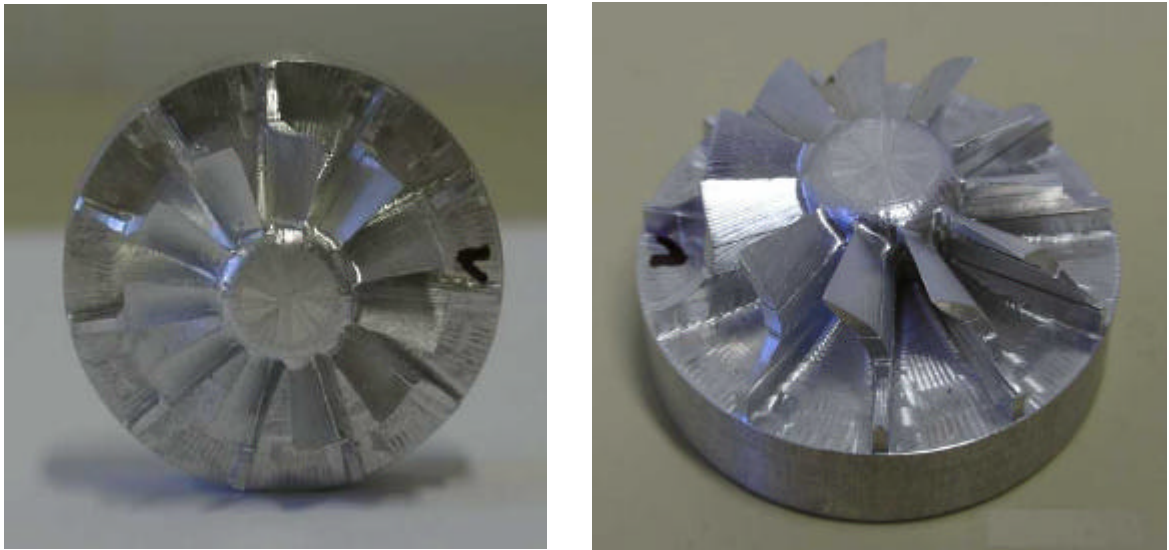


Abbildung B-4 Miniaturturbine gefertigt mittels Fräsen (Aluminium AlMg3)

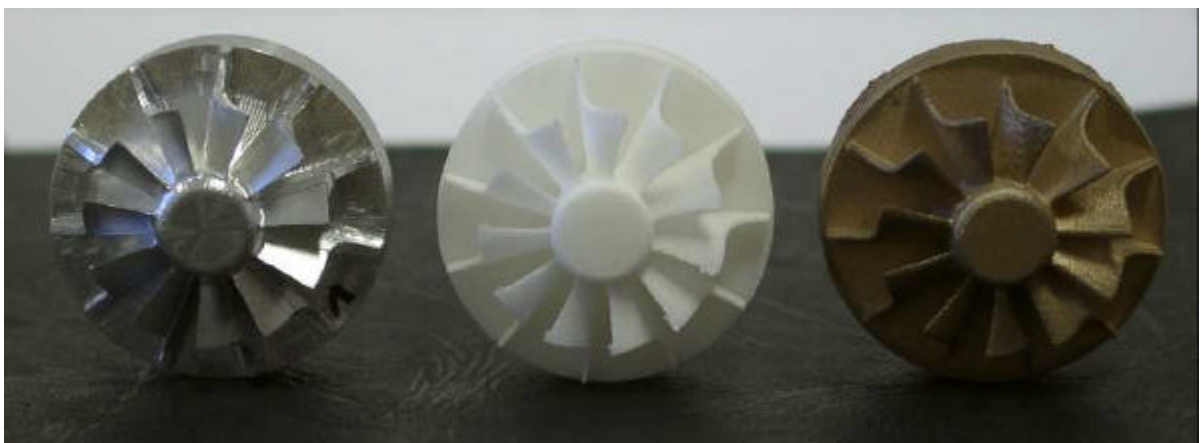


Abbildung B-5 Vergleich der unterschiedlichen Prototypen der Miniaturturbine

## Anhang C      Werkstoffkennwerte

### Ausgangsmaterial Lasersinterpulver (gesinterter Zustand)

Werkstoff	Zugfestigkeit	E-Modul	Dehngrenze	Bruchdehnung	Härte
	$R_m$		$R_{p0,2}$	A5	B
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	%	
<b>Laserform ST-100</b> (3D-Systems Corp.)	<b>500</b>	<b>137.000</b>	<b>305</b>	<b>10</b>	<b>80</b>
<b>Duraform PA</b> (3D-Systems Corp.)	<b>44</b>	<b>1.600</b>	<b>250</b>	<b>9</b>	<b>-</b>

### Ausgangsmaterial Fräsen (Rohmaterialzustand)

Werkstoff	Zugfestigkeit	E-Modul	Dehngrenze	Bruchdehnung	Härte
	$R_m$		$R_{p0,2}$	A5	HB
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	%	
<b>AlMg3</b>	<b>180</b>	<b>73.000</b>	<b>80</b>	<b>14</b>	<b>45</b>
<b>CuZn40</b> (Messing)	<b>340-410</b>	<b>90.000</b>	<b>250</b>	<b>20-35</b>	<b>-</b>

**Ausgangsmaterial Zugproben (Rohmaterialzustand)**

Werkstoff	Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung A5 %	Shore-Härte D
<b>PVC (Trovidur)</b>	<b>55</b>	<b>3.000</b>	<b>80</b>	<b>15</b>	<b>100</b>
<b>AlMgSi1</b>	<b>205</b>	<b>73.000</b>	<b>110</b>	<b>14</b>	<b>65</b>



## Literaturverzeichnis

- [ALUKURIER 2002] Aluminium-Kurier-News:  
"Aluminiumbleche rationell fügen."  
<http://www.alu-news.de/artikel/art0133.htm>  
02.10.2002
- [ANDERL 1996] Anderl, R.:  
"Produktdatentechnologie I."  
Skriptum, Technische Universität Darmstadt, 1996
- [BARGEL 1999] Bargel, H.-J.; Schulze G.:  
„Werkstoffkunde.“  
Springer-Verlag, Berlin, 6. Auflage 1999
- [BERGERS 2002A] Bergers, D.:  
„Mess- und Prüftechnik.“  
Vorlesungsskript, Universität Duisburg, 2002
- [BERGERS 2002B] Bergers, D.:  
„Rapid und Virtual Prototyping.“  
Vorlesungsskript, Universität Duisburg, 2002
- [BERGERS 2002C] Bergers, D.:  
„Produktentwicklung I.“  
Vorlesungsskript, Universität Duisburg, 2002
- [BEUKE 1999] Beuke, D.; Conrad, K.-J.:  
"CNC-Technik und Qualitätsprüfung – Grundlagen und  
Anwendungen."  
Hanser Verlag, München, 1999
- [BURCHARDT 1998] Burchardt, B.:  
"Elastisches Kleben: technologische Grundlagen und Leitfaden für  
die wirtschaftliche Anwendung."  
Verlag Moderne Industrie, Bd. 166, 1998

- [CIRTES 2000] CIRTES:  
"Stratoconception."  
<http://www.cirtes.fr>  
12.01.2003
- [ECKSTEIN 2002] Eckstein, H.:  
"Informationssysteme in der Produktentwicklung – Rapid Prototyping."  
Vorlesungsskript, IAO, IAT, Universität Stuttgart, 2002
- [EHRENSPIEL 1995] Ehrlenspiel, K.:  
"Integrierte Produktentwicklung: Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion."  
Hanser Verlag, München, 1995
- [FICHTNER o.J.] Fichtner, D.; Schöne, C.:  
"Digitalisierdaten für die 3D-Modellrekonstruktion unterschiedlicher Anwendungsbereiche nutzen – Reverse Engineering."  
TU Dresden, Institut für Produktionstechnik, ohne Jahresangabe
- [FRITZ 1998] Fritz, A. H.; Schulze, C.:  
"Fertigungstechnik."  
Springer-Verlag, Berlin, 4. Auflage 1998
- [FRÖHLICH 1995] Fröhlich, P.:  
"FEM-Leitfaden: Einführung und praktischer Einsatz von Finite-Element-Programmen."  
Springer-Verlag, Berlin, 1995
- [FZK o.J.] Forschungszentrum Karlsruhe:  
"Standardisierte Mikrostrukturapparate für die chemische und thermische Industrie."  
Unternehmensbroschüre, Karlsruhe, ohne Jahresangabe
- [GARANT 2002] GARANT Handbuch:  
"Zerspanungs-Handbuch."  
Hoffmann-Gruppe, 2002
- [GEBHARDT 2000] Gebhardt, A.:  
"Rapid Prototyping – Werkzeuge für die schnelle Produktentwicklung."  
Hanser Verlag, München, 2. Auflage 2000
- [GOM 2003] Gesellschaft für optische Messtechnik:  
<http://www.gom.com>  
Produktbeschreibung, GOM mbH, Braunschweig, 2003

- [HOFFMANN 1998] Hoffmann, J.:  
"Verfahren des Rapid Prototyping – Möglichkeiten und Grenzen."  
[http://mciron.mw.tu-dresden.de/pas/pazat\\_lit/lit-98/hoff-983.pdf](http://mciron.mw.tu-dresden.de/pas/pazat_lit/lit-98/hoff-983.pdf)  
TU Dresden, 15.12.2002
- [IFU 2001] Institut für Umformtechnik:  
"Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte – Rapid Prototyping."  
Broschüre zum Sonderforschungsbereich 374, Universität Stuttgart, 2001
- [KLEIN 1989] Klein, M.:  
"Einführung in die DIN-Normen."  
B.G. Teubner, Stuttgart, 10. Auflage, 1989
- [LORENZEN 1997] Lorenzen, J.; Breiting, F.:  
"Rapid Tooling – Verfahren zur schnellen Herstellung von Prototypenwerkzeugen."  
<http://www.appex.com/de/knowhow/artikel3.htm>  
Euroforum Konferenz, Rapid Prototyping, Bad Homburg 1997
- [MATEK 1987] Matek, W.; Muhs, D.; Wittel, H.:  
"Roloff/Matek – Maschinenelemente."  
Vieweg, Braunschweig, 11. Auflage 1987
- [MÜLLER 2000] Müller, D. H.:  
"Konstruktionslehre/CAD: Löt- und Klebverbindungen."  
BIK, Universität Bremen, März 2000
- [MÜLLER 2002] Müller, D. H.; Müller, H.:  
"Rapid Prototyping Verfahren – Eigenschaften, Anwendung und Verbreitung."  
BIBA, Universität Bremen, April 2002
- [NCG 2003] NC-Gesellschaft (NCG)  
<http://www.ncg.de>  
22.02.2003
- [NIEMANN 1981] Niemann, G.:  
"Maschinenelemente – Band I: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen."  
Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage 1981
- [PAUCKSCH 1996] Paucksch, E.:  
"Zerspantechnik."  
Vieweg, Braunschweig, 11. Auflage 1996

- [REINHART 2001] Reinhart, G.; Meindl, M.; Sigl, M.:  
"Methoden für die reaktionsfähige Produktion – Schnelle  
Herstellung durch innovative Fertigungsverfahren."  
wt Werkstattstechnik 91 (2001) H.7
- [RP-NET 2000] Rapid-Prototyping-Netzwerk;  
<http://www.rp-net.de/>  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften  
TU München, 2000
- [SPUR 1997] Spur, G.; Krause, F.-L.:  
"Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik."  
Hanser Verlag, München, 1997
- [STEINBUCH 1998] Steinbuch, R.:  
"Finite Elemente – Ein Einstieg."  
Springer-Verlag, Berlin, 1998
- [TABELLENBUCH  
1990] EUROPA-FACHBUCHREIHE:  
"Tabellenbuch Metall."  
Verlag EUROPA-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 1990
- [TEKSOFT 2003] Datenblatt zu „CAMWorks 2001“  
<http://www.teksoft.com>  
Druckdatum: 10.01.2003
- [VDI-Z 2003a] Etmanski, B.; Grundler, E.:  
"EuroMold 2002 – aufwärts gegen den Trend."  
VDI-Z 3/2003  
Springer VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003
- [WESTKÄMPER  
2002] Westkämper, E.; Warnecke, H.-J.:  
"Einführung in die Fertigungstechnik."  
B.G. Teubner, Stuttgart, 5. Auflage, 2002
- [WOHLERS 1999] Wohlers, T.:  
"Rapid prototyping & tooling."  
Wohlers Associates, 1. dt. Ausgabe, 1999
- [WZL 2001] WZL Aachen:  
„Werkzeug- und Formenbau: Schneller zur fertigen Form –  
Leistungsfähige Prozess im Werkzeugbau.“  
Tools 1/2001, 8. Jahrgang, Aachen, 2001
- [ZEISS 2003] Carl Zeiss Gruppe  
"Industrielle Messtechnik."  
<http://www.zeiss.de>  
Oberkochen, 2003

## Normen

### DIN-Normen

DIN 7154 T1	ISO-Passungen für Einheitsbohrung; Toleranzfelder, Abmaße in $\mu\text{m}$
DIN 7155	ISO-Passungen für Einheitswelle; Toleranzfelder, Abmaße in $\mu\text{m}$
DIN 7157	Passungsauswahl, Toleranzfelder, Abmaße, Passtoleranzen
DIN 8580	Fertigungsverfahren, Einteilung
DIN 66025	Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen; Allgemeines

### DIN EN-Normen

DIN EN 10002	Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Prüfverfahren bei Raumtemperatur
--------------	---------------------------------------------------------------------------

### ANSI-Normen

Y14.26M	Digital representation for communication of product definition data
---------	---------------------------------------------------------------------

### ISO-Normen

ISO 10303	Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - Produktdatendarstellung und -austausch
-----------	--------------------------------------------------------------------------------------------------