

Konstruktionsregeln für eine Rapid Tooling gerechte Gestaltung von Werkzeugen und Prototypen

Trenke, D.

Die Qualität von lasergesinterten Metallteilen hängt im wesentlichen von der Rapid Tooling gerechten Konstruktion ab. Zwar haben auch die Genauigkeit der Anlage, die Wahl der Belichtungsparameter und Belichtungsstrategie, als auch das verwendete Metallpulver einen Einfluss auf das Prozessergebnis, jedoch variieren diese Faktoren nur in seltenen Fällen.

The quality of lasersintering metalparts depends essentially on the regular Rapid Tooling design. Admittedly has also the precision of the installation, the election of the exposureparameter and exposurestrategy, also as the used metalpowder an influence on the procesresult, but however these factors vary only in rare cases.

1 Grundlegende Konstruktionsregeln

Bei der Herstellung von Werkzeugen, Funktionsteilen und Prototypen durch Rapid Tooling sind verfahrensbedingt einige konstruktive Besonderheiten zu beachten. Die Einhaltung dieser Kriterien ist unbedingt erforderlich, um die Vorteile des Bauprozesses in seiner Gesamtheit nutzen zu können und eine möglichst hohe Prozessqualität zu erreichen.

1.1 Geometrien

Wie bei den meisten generativen, schichtweisen Herstellverfahren ist auch beim direkten Metall Lasersintern (DMLS) nicht die Komplexität der Geometrie ausschlaggebend für die Herstellzeit, sondern das aufgebaute Volumen. Die Bauteile sollten daher sowohl in x-y-Richtung, als auch in z-Richtung, so klein wie möglich sein, um den Bauprozess kurz und damit kostengünstig zu gestalten. Um dies zu erreichen muss bei der Konstruktion berücksichtigt werden, dass die Bauplattform als Teil des Werkstücks verwendet werden kann (siehe **Bild 1**). Der Lasersinterkörper wird dabei mit der Stahlplatte fest verbunden aufgebaut. Anschließend wird die Platte um den Körper herum zersägt und gefräst. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass die stabile Stahlplatte als Befestigung im Stammwerkzeug verwendet werden kann. Zudem wird

Bauzeit gespart, da das entsprechende Werkstückvolumen nicht mehr aufgebaut werden muss.

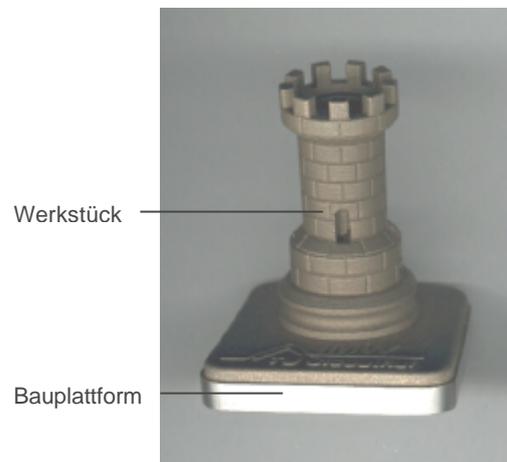


Bild 1: Bauplattform mit aufgesinterten Bauteil

Ebenfalls ist es möglich, die Werkstücke auf Stützstrukturen (Supports) aufzubauen, die mit der Grundplatte verbunden sind. Nach dem Bauprozess kann an diesen Stellen das Werkstück von der Bauplattform abgesägt werden.

1.2 Bohrungen

Beim DMLS-Prozess werden die Werkzeuge in einer sogenannten Hülle-Kern-Struktur aufgebaut. Dies bedeutet, dass das Bauteilvolumen in einen Hüllbereich (Skin) und einen Kernbereich (Core) aufgeteilt wird, die mit unterschiedlichen Belichtungsparametern - und sogar mit unterschiedlichen Schichtdicken - aufgebaut werden (siehe **Bild 2**). Sinn dieser Unterscheidung ist es, eine harte Oberfläche, bei gleichzeitig weichen Bauteilinneren, zu erreichen. Typischerweise besitzt der Hüllbereich eine Schichtdicke von 0,05 mm. Die Schichtdicke des Kernbereichs beträgt 0,1 mm, wodurch sich die Bauzeit, ohne Qualitätsverlust an der Oberfläche, wesentlich verkürzt.

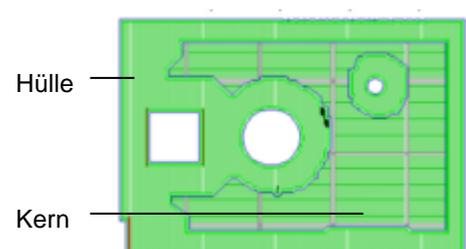


Bild 2: Bauteilschicht mit Hülle-Kern-Struktur

Aufgrund dieses Hülle-Kern-Aufbaus sollten Kühlkanäle, Bohrungen für Auswerfer, Stifte und Befestigungsschrauben, usw. bereits in der CAD-Konstruktion berücksichtigt werden. Werden diese Bohrungen im CAD-File nicht vorgesehen und erst nachträglich eingebracht, verläuft die Materialausparung durch den mechanisch wesentlich instabileren Kernbereich. Dies kann zur Folge haben, dass z.B. nachträglich geschnittene Gewinde ausbrechen.

Zudem wird der Randbereich der einzelnen Schichten, also die Kontur, mit sehr hoher Laserleistung belichtet, was zu einer höheren Festigkeit führt. Dieser Bereich ist ausgehend von Rand etwa 1mm tief. Wird eine mechanische Nachbearbeitung innerhalb dieser Tiefe durchgeführt, werden die besten Ergebnisse hinsichtlich Oberflächenqualität und Bauteilhärte erreicht. Bei der Konstruktion sollten deshalb die Durchmesser der gewünschten Bohrungen ca. 0,6 mm kleiner sein und anschließend aufgebohrt werden. Die Seitenwände befinden sich dann im höchsten Festigkeitsbereich der Kontur.

1.3 Genauigkeit

Da beim DMLS-Prozess die Werkstücke aus Metallpulver generiert werden, liegt die Rauigkeit der Oberflächen und die Maßhaltigkeit im Bereich der Pulverkorngroße. So sind mit dem Metallpulver DirectMetal 50-V2 (Korngroße 50 µm) Genauigkeiten von $\pm (0,07 \% + 50 \mu\text{m})$ zu erreichen. Senkrecht zu den einzelnen Schichten wird die Auflösung durch die Schichtdicke bestimmt. Diese beträgt bei DirectMetal 50-V2 0,05mm.

1.4 Minimale Strukturen

Beim DMLS-Prozess ist der fokussierte Laserstrahl, mit einem Durchmesser von ca. 0,3 mm, das Werkzeug zum Aufbau der Geometrien. Durch Wärmeleitungseffekte beträgt die Aushärtebreite (Aushärtezone) etwas mehr als der Fokussdurchmesser. Die minimale Aushärtebreite liegt bei DirectMetal 50-V2 zwischen 0,6 mm und 0,7 mm. Strukturen die kleiner sind können deshalb nicht hergestellt werden. Dies ist besonders bei spitzen Ecken und Kanten oder dünnen Stegen zu beachten.

1.5 Nuten und Entformungsschrägen

Befinden sich in lasergesinterten Formen tiefe Nuten, so müssen diese mit Entformungsschrägen versehen werden. Ist die Nut in Entformungsrichtung polierbar, genügen Entformungswinkel von 0,5° bis 1,0°. Ist sie nicht zugänglich, muss dieser Wert erhöht werden. Falls dieses aus geometrisch-

konstruktiven Gründen nicht möglich ist, sollte an dieser Stelle eine Trennebene vorgesehen werden, um dann die Flächen einzeln nachbehandeln zu können.

1.6 Rippen

Beim Lasersinterprozess mit DirectMetal 50-V2 entstehen poröse Metallteile, die nach dem Bauprozess mit Epoxid-Harz infiltriert werden. Diese Werkstücke reagieren aufgrund ihrer Inhomogenität auf Zugbelastungen, im Vergleich zu Vollmaterialien, empfindlicher.

Die an Rippen auftretenden Belastungen können bei einem zu großen Höhen-Breiten-Verhältnis zum Verbiegen oder zum Abriss der Struktur führen. Bei den in der **Tabelle 1** dunkel dargestellten Seitenverhältnissen zwischen Rippenhöhe und -breite sollten deshalb Stahlstege in die Rippen eingesetzt werden. Die dazu erforderlichen Aussparungen müssen schon im CAD-File vorgesehen werden.

Breite [mm]	Höhe [mm]					
	< 1	1	2	5	10	10
< 1						
1						
2						
3						
5						
> 5						

Tab. 1: Seitenverhältnisse bei Rippen

1.7 Stifte

Das gleiche gilt für Stifte, die sich in dem aufzubauenden Werkzeug befinden. Bei zylindrischen Geometrien ist es in den meisten Fällen zu empfehlen Stahlstifte - in vorher im CAD-File konstruierte Bohrungen - einzusetzen. Der Aufwand für die Nachbearbeitung wird dadurch wesentlich reduziert. Bei nicht rotationssymmetrischen Geometrien sollten bei den in **Tabelle 2** dunkel markierten Höhen-Durchmesser-Verhältnissen ebenfalls Stahlverstärkungen eingesetzt werden.

Ø [mm]	Höhe [mm]					
	< 1	1	2	5	10	10
< 1						
1						
2						
3						
5						
> 5						

Tab. 2: Geometrieverhältnisse bei Stiften

1.8 Angußkanäle

Um im Bereich des Angußkanals Auswaschungen beim Einspritzvorgang zu vermeiden, sollte dieser

im CAD-File vorbereitet sein. Durch die Belichtung der Kontur wird eine Steigerung der Oberflächenhärte - und damit des Verschleißverhaltens - erreicht.

1.9 Kühlkanäle

Durch den schichtweisen Aufbau beim Sinterprozess ist es möglich, Kühlkanäle dreidimensional und an die Geometrie der Kavität angepasst durch das Werkzeug verlaufen zu lassen. Hierdurch wird eine wesentlich effektivere Kühlung erreicht.

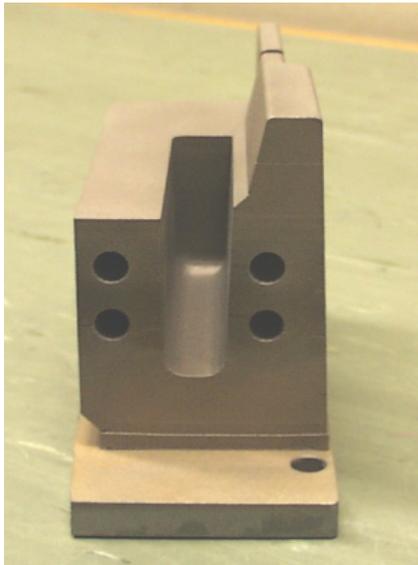


Bild 3: Bauteil mit integrierten 3D-Kühlkanälen

Während der Konstruktion der Kühlkanäle sollte darauf geachtet werden, dass die Anschlüsse so liegen, dass kein unnötiges Volumen aufgebaut wird. So ist es beispielsweise möglich, die Anschlüsse direkt an die Stahlplatte zu legen. Nach dem Generieren der Form werden dann die entsprechenden Zuleitungen durch die Stahlplatte gebohrt.

1.10 Bearbeitungszugaben

Beim Einpassen der Formeinsätze werden diese in den meisten Fällen umfräst oder geschliffen. Dazu ist in der Konstruktion ein Übermaß von 0,2 mm bis 0,5 mm auf jeder relevanten Fläche vorzusehen. An Trennebenen reicht ein Übermaß von 0,2 mm. Diese können später mechanisch nachbearbeitet oder aufeinander erodiert werden. Die eine Formhälfte wird dann als Elektrode und die Andere als Werkstück verwendet.

1.11 Einbau in Stammwerkzeugen

Beim Aufbau des Stammwerkzeuges ist darauf zu achten, dass die Trennflächenbelastung bzw. der Zuhaltedruck der Spannvorrichtung zumindest teilweise am Stammwerkzeug anliegt.

2 Praktische Beispiele

In diesem Abschnitt werden noch einmal Beispiele für Rapid Tooling gerechte bzw. nichtgerechte Konstruktionen gezeigt, und auf mögliche Auswirkungen für das Werkstück, die Rapid Tooling Anlage und eine anschließende Nachbearbeitungen eingegangen.

2.1 Wandstärken

Bild 4 zeigt eine durch den Abstreifer eingedrückte Bauteilwand. Ursache hierfür war eine unzureichende Wanddicke (1,5 mm) im Vergleich zur Wandhöhe (20 mm).

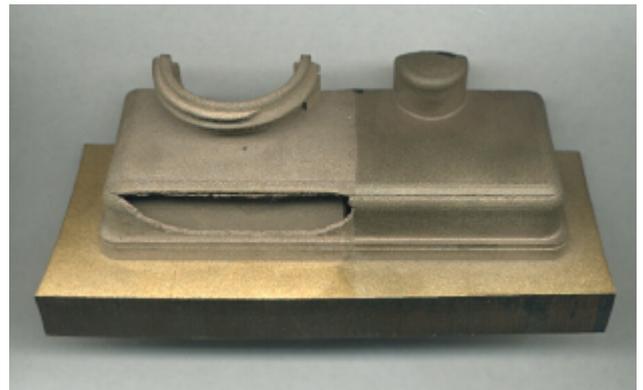


Bild 4: ungenügende Wandstärke

Zu vermeiden wäre die Bauteilerstörung gewesen durch eine größere Wandstärke, das Anbringen von Verstärkungsrippen oder eine andere Anordnung des Bauteils auf der Bauplattform.

Als Folge dieses Konstruktionsfehlers können weitere Werkstücke auf der Bauplattform beschädigt werden, und zwar wenn der Abstreifer bei seiner Weiterfahrt Bruchstücke mitschleift, die dann bereits gesinterte Schichten zerstören oder den Aufbau neuer Schichten verhindern. Zudem ist es möglich, dass durch die Bruchstücke oder durch die Bruchstelle Kerben an der Abstreiferklinge entstehen, wodurch dieser unbrauchbar wird.

Ein Abrechen oder Eindringen von Bauteilstrukturen ist also unbedingt durch entsprechende konstruktive Maßnahmen zu vermeiden.

2.2 Bohrungen und Überhänge

Bei waagerechten Bohrungen und Überhängen (max. 3 mm) kommt es prozessbedingt zu sogenannten Vertropfungen. Darunter versteht man das Fließen von aufgeschmolzenen Metallpulver in darunter liegende, nicht belichtete Schichten. Vermeiden lässt sich dieser Effekt durch das Anbringen von Supports, das Verrunden von rechtwinkligen Überhängen und die konstruktive Formgebung der Bohrungen (siehe **Bild 5**).

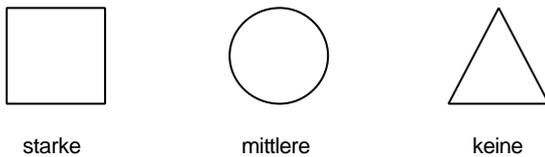


Bild 5: Tropfenbildung in Abhängigkeit von der Form

2.3 Supportgenerierung

Bei der Konstruktion der Bauteile ist unbedingt darauf zu achten, dass möglichst wenig Stützstrukturen (Supports) erforderlich sind. Diese verlängern nur unnötig die Bauzeit, verbrauchen Metallpulver und müssen unter großen Aufwand nachträglich entfernt werden. Supports können aber durch konstruktive Maßnahmen, wie zum Beispiel durch das Anbringen von Schrägen oder Radien, relativ einfach vermieden werden (siehe **Bild 6**).

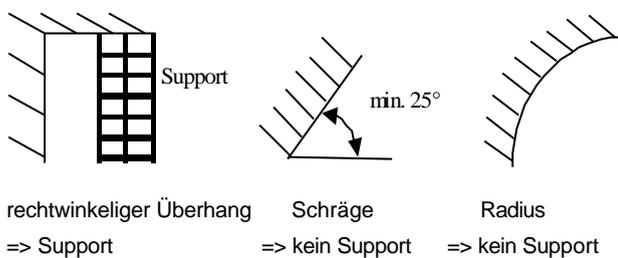


Bild 6: Vermeiden von Supports durch Formgebung

2.4 Minimale Strukturen

Bild 7 soll verdeutlichen, was passiert, wenn die konstruierten Strukturen kleiner sind, als die minimale Aushärtbreite des Lasers.

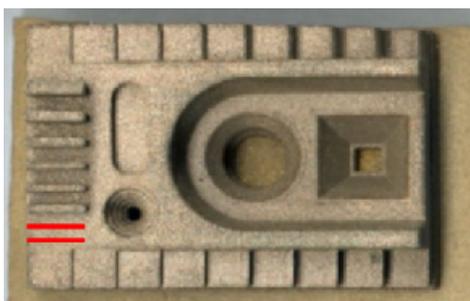


Bild 7: Probebauteil mit nicht gesinterten Stegen

Auf der Oberseite des Probekörpers sollten eigentlich 8 Stege mit einer abnehmenden Breite von 1,1 bis 0,4 mm gesintert werden. Bis zu einer Breite von 0,7 mm war dies auch ohne Probleme möglich. Beim sechsten Steg von oben (0,6 mm) macht sich aber der sogenannte „Überschwing-Effekt“ bemerkbar. Dieser tritt auf, wenn die Abmaße der Bauteilstruktur kleiner oder gleich dem Laserdurchmesser sind und bewirkt eine Vergrößerung der tat-

sächlich gesinterten Struktur. Dieser Effekt tritt auch bei spitz zulaufenden Kanten und Ecken auf.

Die beiden unteren Stege (rot bzw. dunkel eingezeichnet) wurden aufgrund ihrer zu kleinen Abmessungen von 0,5 bzw. 0,4 mm nicht hergestellt. Verantwortlich hierfür ist die Prozesssoftware der Rapid Tooling Anlage, die beim Unterschreiten der minimalen Dimensionen automatisch Strukturen entfernen kann. Der Maschinenbediener sollte sich vor dem Bauprozess also noch einmal alle kritischen Punkte der Konstruktion in der Prozesssoftware ansehen.

2.5 Risse im Bauteil

Ursache für Risse in lasergesinterten Bauteilen können die gewählten Belichtungsparameter oder die konstruktive Gestaltung sein. Um ein Ablösen von Schichten schon während des Bauprozesses zu verhindern und eine möglichst feste Baustruktur zu erreichen, sollte für die Belichtung der Hülle der Fülltyp „UpDown-Stripes“ und „Square“ für den Bauteilkern verwendet werden.

Konstruktiv können Bauteilrisse durch das Anbringen von Radien und das Vermeiden von großen Wandstärkenunterschieden und Materialanhäufungen verhindert werden. Zudem ist es möglich, einen internen Support zu generieren.

Weiterhin sollte das fertige Bauteil nicht sofort aus dem Pulverbett entfernt werden, um Spannungen durch ein zu schnelles Abkühlen zu vermeiden.

2.6 Anordnung auf der Bauplattform

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Anordnung der Werkstücke auf der Bauplattform. Dünne Wände oder Stege sollten immer in Richtung der Abstreiferfahrt oder in einem Winkel von 45° dazu liegen, um ein Abknicken bzw. Eindringen zu verhindern (siehe **Bild 8**).

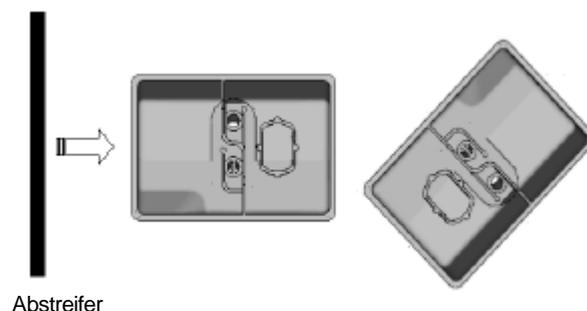


Bild 8: Anordnung der Bauteile zum Abstreifer

Ansonsten muss darauf geachtet werden, dass Beschädigungen an kritischen Bauteilen nicht zur Zerstörung von weiteren Werkstücken führen. Dies kann zum Beispiel durch ein seitliches Versetzen der Bauteile erreicht werden.

3 Zusammenfassung

An den aufgeführten Konstruktionsregeln und praktischen Beispielen wird deutlich, wie entscheidend die Rapid Tooling gerechte Gestaltung für den Erfolg des Bauprozesses ist. Aus diesem Grund werden hier noch einmal die wichtigsten Kriterien in Checklistenform aufgeführt. Diese Punkte müssen vom Konstrukteur in allen Stadien der Produktentwicklung berücksichtigt werden.

1. Bauteilgeometrie:

- Werden große Wandstärkenunterschiede vermieden?
- Sind die Außenkonturen mit Radien versehen?
- Kommt es zu Materialanhäufungen?
- Kann die Bauplattform als Teil des Werkstücks verwendet werden?
- Sind die Außenmaße so klein wie möglich?

2. Bohrungen:

- Sind sämtliche Bohrungen in der CAD-Konstruktion vorgesehen?
- Auswerferbohrungen?
- Bohrungen für Befestigungsschrauben?
- Angußbohrungen?
- Gewindebohrungen?
- Durchmesser der Bohrungen im CAD-File 0,6 mm kleiner als der Sollwert?

3. Minimale Strukturen:

- Können spitze Ecken und Kanten vermieden werden?
- Sind Strukturen kleiner als 0,7 mm?
- Müssen Stützrippen vorgesehen werden ?

4. Nuten:

- Sind für tiefe Nuten Ausformschrägen vorgesehen?
- Sind die Nuten zum Schleifen und Polieren frei zugänglich?
- Muss eine Werkzeugteilung vorgesehen werden?

5. Rippen:

- Sollen Rippen aus Stahl eingesetzt werden?
- Sind die Taschen dafür im CAD-File vorgesehen?

6. Stifte:

- Sind die Stiftdurchmesser im Verhältnis zur Höhe groß genug?
- Sollen Stifte nachträglich eingesetzt werden?

7. Angußkanal:

- Ist der Angußkanal in der CAD-Konstruktion vorgesehen?

8. Kühlkanäle:

- Können 3-dimensional verlaufende Kühlkanäle verwendet werden?
- Liegen diese nahe genug an der formgebenden Geometrie?
- Wird mit Luft oder Wasser gekühlt?
- Wie sind die Anschlussmaße für die Kanäle?

9. Bearbeitungszugaben:

- Sind Bearbeitungszugaben zum Einpassen der Einsätze ins Stammwerkzeug vorhanden?
- Sind Bearbeitungszugaben an den Trennflächen vorgesehen?
- Betragen die Bearbeitungszugaben min. 0,5 mm?

10. Einbau ins Stammwerkzeug:

- Sind die Einsätze umfassend montiert?
- Liegt der Zuhaltedruck nicht nur an den Einsätzen sondern auch am Stammwerkzeug an?

11. Supports:

- Sind nur unbedingt notwendige Supportstrukturen vorhanden?
- Kann durch konstruktive Maßnahmen auf Supports verzichtet werden?
- Lassen sich die Supports einfach entfernen, ohne dabei das Bauteile zu beschädigen ?

12. Durchbrüche und Überhänge:

- Ist kein rechtwinkliger Überhang größer als 3 mm?
- Beträgt die Neigung von Schrägen min. 25° ?
- Lässt sich die „Tropfenbildung“ durch entsprechende Formgebungen vermeiden?
- Wird keine Bauteilstruktur „freischwebend“ gebaut?

13. Radien:

- Sind soweit möglich alle Ecken und Kanten mit Radien versehen?
- Kann es durch zu große Radien zum „Stufen-Effekt“ kommen?

14. Anordnung auf der Bauplattform:

- Liegen dünne Wände und Stege in Richtung der Abstreiferfahrt?
- Können Schäden an einem Bauteil zu Folgeschäden an anderen Bauteilen führen?

15. Datenqualität:

- Sind alle Bauteilvolumen geschlossen?
- Sind verdrehte oder fehlerhafte Dreiecke vorhanden?
- Wurde das Bauteil in Skin/Core-Schichten zerlegt ?
- Beträgt die Schichtdicke 0,05 mm?
- Wurden Skin, Core und Support die richtigen Belichtungsparameter zugeordnet?
- Ist die Netzdicke bei der STL-Generierung auf maximalen Wert gestellt worden?

Werden diese Punkte vom Konstrukteur beachtet, können durch den DMLS-Bauprozess in kürzester Zeit sehr strukturierte und belastbare Werkzeuge oder Prototypen hergestellt werden. Ein Beispiel dafür ist der in **Bild 9** dargestellte Kabelkanal. Die Kavitäten wären mit konventionellen Fertigungsverfahren nur unter großen Aufwand herzustellen gewesen.

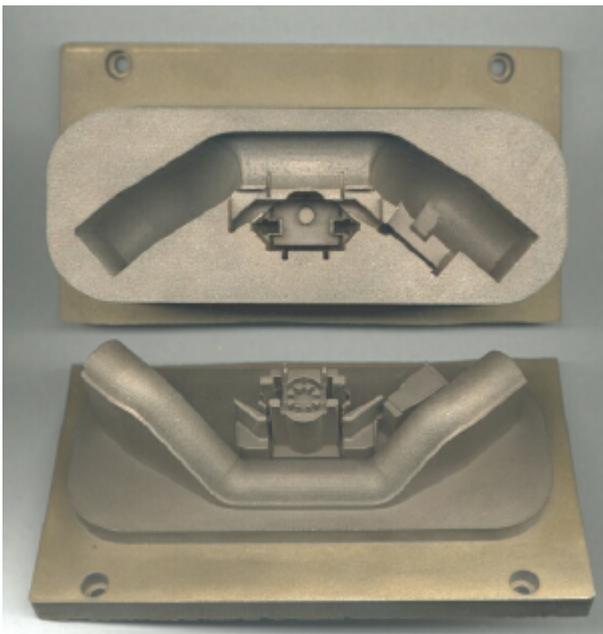


Bild 9: lasergesinterte Formhälften

4 Literatur

- /1/ EOS; Basis Training
EOS GmbH, Planegg, 1999
- /2/ EOS; Betriebsanleitung EOSINT M 250
EOS GmbH, Planegg, 1999