

## Von der Idee zum greifbaren Bauteil in einigen Stunden – Zusammenspiel zeitgemäßer Konstruktions- und Fertigungstechniken

Käferstein, B.; Klemp, E.

*Die Entwicklungszeit ist einer der entscheidenden Faktoren, der die Leistungsfähigkeit eines Industrieunternehmens charakterisiert. Je kleiner die Zeit zwischen Produktidee und Prototyp ist, desto höher ist die Konkurrenzfähigkeit. Die integrierte Produktentwicklung aus CAD, FEM, Rapid-Prototyping und Rapid Tooling ist das geeignete Werkzeug, um den Bezug von der Gedankenebene auf die Rechner Ebene und danach direkt zur physischen Welt zu schaffen. Anhand eines Schlüsselanhängers werden exemplarisch die im Institut für Maschinenwesen eingesetzten Techniken und vorgehenden Mittel dargestellt.*

*Time-To-Market is the most important keyword which characterises the main important potential of a company. The goal to be achieved must be to keep the time between idea and the first prototype as short as possible. The process of "Integrated product development and manufacturing" which includes CAD, FEA as well as Rapid prototyping and Rapid Tooling is the right tool to increase the companies market position. The use will allow to achieve a direct connection between the logical and the physical world within a short period of time. As an example to show the impact of these techniques and the capabilities of the tools being installed in IMW, a test part (key pendant) has been designed and been processed through this proceeding.*

### 1 Einleitung

Der Wettbewerb zwingt die Unternehmen neben der Verkürzung ihrer Entwicklungszyklen auch dazu, bereits sehr früh mit technisch ausgereiften Produkten auf dem Markt präsent zu sein. Zur Verkürzung der Zeit von der Idee bis zur Markteinführung werden in der industriellen Anwendung Simulations- und Prototypenverfahren eingesetzt, um den hohen Erwartungen gerecht zu werden.

Am Beispiel eines Schlüsselanhängers soll exemplarisch eine am IMW im Vorbereitung stehende Prozedurkette (von der Idee zum Produkt) gezeigt werden, die von der Konstruktion über die Simulation bis hin zur Herstellung von Prototypenwerkzeu-

gen für den Spritzgußprozeß, einschließlich der Simulation des Spritzgußvorgangs alle Schritte enthält, die notwendig sind.

### 2 Die Verfahrenskette in der Praxis

Grundlegender Gedanke dieser Untersuchung war es, einen Schlüsselanhänger im IMW mittels Spritzgußverfahren herzustellen. Dadurch sollte die o. g. Verfahrenskette auf Praxistauglichkeit an einem Beispiel getestet werden. Bis auf den eigentlichen Abformprozeß und eine Rapid-Prototyping-Maschine verfügt das IMW über die entsprechenden Programme und Einrichtungen im CIM-Labor.

#### 2.1 Der Gedanke und das Zielobjekt

Der Schlüsselanhänger hat dabei wesentliche Vorteile: Er ist klein, relativ einfach und zu Testzwecken muß nicht allzuviel Material eingesetzt werden. Desweiteren ist die Form recht einfach und überschaubar, so daß nur eine recht geringe Bauteilkomplexität vorliegt. Der Schlüsselanhänger als solches kann einerseits als anschauliches Muster der Prozedurkette verwendet werden, andererseits kann er als Geschenk für Institutsangehörige und Ehemalige des Institut als ein Erinnerungsstück dienen. Als Design wurde eine einfache Form gewählt, die im CAD-System ohne Freiformflächen erstellt werden kann und dem Motto „schlicht und funktionell“ folgt, **Bild 1**. Auf der einen Seite soll der Schriftzug des Instituts hervorstehen, auf der Rück-



**Bild 1:** Entwurf zum Schlüsselanhänger

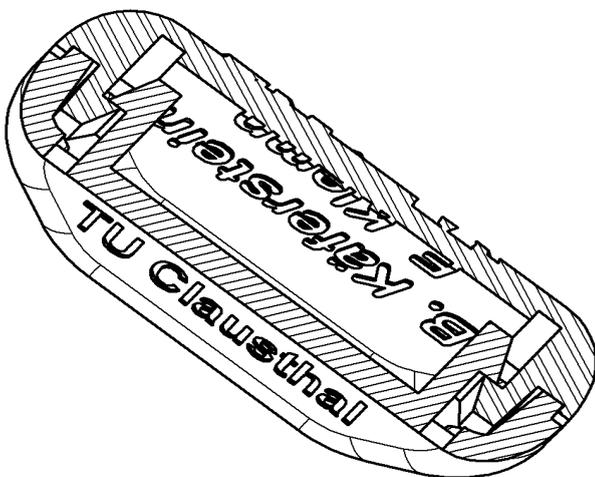
seite zwei kämmende Zahnräder. Daß sich leider das Logo der TU Clausthal für die Rückseite nicht realisieren ließ, zeigt daß auch hier wieder einmal das Design an die Grenzen des technisch machbaren stößt. Die Schlüssel selbst werden durch eine Kugelkette gehalten, die durch zwei Bohrungen in das Innere geführt und festgeklemmt werden. Nach dem Erstellen der Skizze wurde der zweischalige Anhänger im 3D-CAD-System SolidWorks modelliert.

## 2.2 Wo der Maschinenbau einsetzt

Da das Design konstruktiv umgesetzt werden muß, treten gleich am Anfang zwei Probleme für den „normalen“ Maschinenbauer ohne Spritzgußhintergrundwissen auf:

- Wie setze ich das Design in spritzgußgerechte geometrische Körper um?
- Wie verbinde ich die Körper untereinander?
- Was hatte es seinerzeit mit der Gußkonstruktion allgemein auf sich?

Der erste Punkt läßt sich relativ leicht intuitiv durch Zerlegen der Geometrie in eine minimale Anzahl primitiver Geometrieelemente lösen und ist für einen erfahrenen CAD-Modellierer kein Problem. Der zweite Punkt bedarf des Literaturstudiums (Konstruktionskataloge), offener Augen (z.B. Fernbedienungen, Taschenrechner etc.) oder eines morphologischen Kastens. Es kommen dann Verbindungen wie Kleben, Schrauben, Einpressen und die diversen „Snap-Ins“ zustande, von denen eine ausgewählt wurde, **Bild 2**.



**Bild 2:** Querschnitt durch Anhänger mit Snap-In

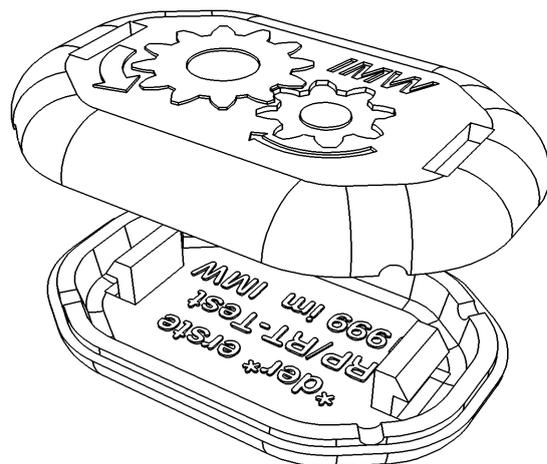
Etwas komplizierter war das Umsetzen in eine Gußform, da hier ohne Hinterschneidungen gear-

beitet werden sollte, um Schieber zu vermeiden. Die „Teilungsebene“ ist nicht eben, sondern eine komplizierte Fläche und die Gußform ist zweiteilig. Dabei tauchen erhebliche Schwierigkeiten auf, deren Lösung erst ersichtlich ist, wenn man die Bauteile durch Subtraktion aus dem Formblock im CAD-System generiert. Der Ausspruch: „Hoppla- da war doch vorhin noch ein Absatz“ oder ähnliche sind dabei keine Seltenheit.

Insgesamt führt dies zu einem iterativen Prozeß, der – so beweist es die Praxis– nicht immer dem Optimum entgegenstrebt. Man richtet dabei aber keinen allzu großen Schaden an, da das CAD-System einen großen „Rückgängig“-Button hat, der glücklicherweise nicht ausleiern kann. **Bild 2** zeigt einen Schnitt durch die zweischalige Konstruktion mit der Snap-in Einhakverbindung, die durch Zusammendrücken der beiden Hälften einrastet. Getrennt werden die Teile durch einen Schraubenzieher, der die Haken aushebelt. Die Zentrierung erfolgt durch einen umlaufenden Bund.

## 2.3 Erstellung des Schlüsselanhängers im CAD-System

Zuerst werden die beiden Hälften modelliert und danach im CAD-System zu fertigen Anhänger zusammengesetzt, **Bild 3**. Dadurch wird sichergestellt, daß die Teile zusammenpassen und keine Überschneidungen oder Maßabweichungen auftreten. Außerdem hat man die Möglichkeit durch Materialzuweisung und Rendern einen ersten fotorealistischen Eindruck des Anhängers zu erhalten.

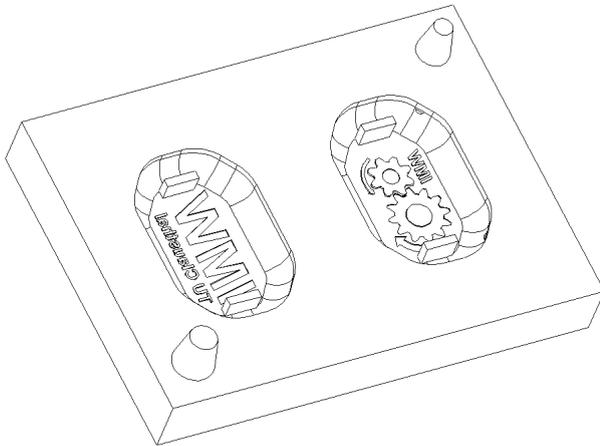


**Bild 3:** Schlüsselanhänger in Explosionsdarstellung

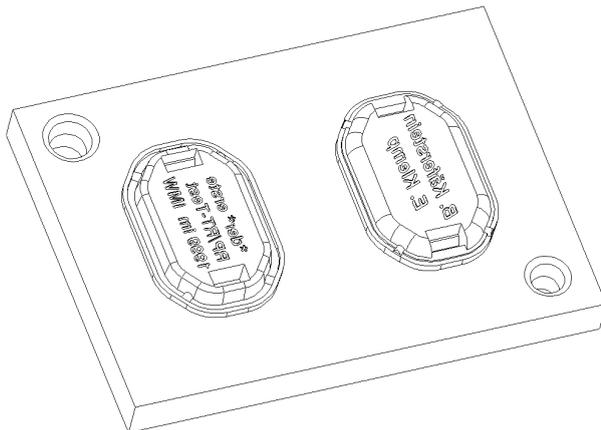
## 2.4 Erstellen der Negativformen

Das Erstellen der Negativformen für beide Schalen wurde ebenfalls im CAD-System vorgenommen.

Theoretisch könnte dazu ein globaler Skalierungsfaktor zur Kompensation des Schrumpfens eingestellt werden, was hier aber außer Acht gelassen wurde. Die Erstellung erfolgt durch boolesche Operationen zwischen Unterform, Oberform und den beiden Hälften der Konstruktion. Auf das Anflußsystem wurde verzichtet, da es erst später durch die technologischen Fertigungsparameter festgelegt werden soll. Da Ober- und Unterkasten getrennt werden müssen und sich nicht gegenseitig oder mit dem Teil verhaken dürfen, muß auf Hinterschneidungen extrem sorgfältig geprüft werden. Das  $\alpha$ -folgt bei SolidWorks rein manuell, während z.B. ProEngineer das automatisch durchführt. Es ist zweckmäßig, erst nach der Subtraktion die Formschrägen einzubauen, da sonst unbeabsichtigte Stufen auftreten können.



**Bild 4:** Negativform (Unterkasten)



**Bild 5:** Negativform (Oberkasten)

Eine Generierung mit einer einzigen Subtraktion aus einem festen Block und anschließender Trennung in Ober- und Unterform ist aufgrund der komplexen Teilungsebene schwierig. Daher wurde eine schrittweisen „Herauserodierung“ bevorzugt, die aber einen deutlich höheren Rechen- und Zeitauf-

wand (Modellgröße im Speicher ca. 260 MB, Regenerierungszeit 25 min auf PII 400 MHz mit 256 MB Speicher) nach sich zieht. Aus Vereinfachungsgründen wurden die beiden Hälften aus einem einzigen Formblock herausgearbeitet und können werden dann auch in einem Arbeitsgang abgeformt.

## 2.5 Simulation für den Spritzgußprozeß

Durch Simulation sollen u.a. folgende Punkte geklärt werden:

- Kann das Bauteil in der vorhandenen Gestalt hergestellt werden?
- Füllt sich die Form komplett mit Kunststoff oder bleiben leere Bereiche übrig. Was muß verändert werden, um die Form vollständig zu füllen?
- Wo sind die Anstiche zu plazieren?
- Wie ist der Einfluß von Dicke, Druck, Temperatur und Kunststoff?
- Wie groß muß die Maschine sein?

Es wurde eine Testversion des einfach zu bedienenden Programms C-Mold 3D „QuickFill“ verwendet, das hervorragend mit Solidworks zusammenarbeitet. Es bietet die Möglichkeit STL-Dateien (Stereolithographie) von SolidWorks einzulesen. Nachdem die Werkstoffkennwerte (hier ABS), und die Maschinenkennwerte (Druck, Temperatur, Formtemperatur) eingegeben wurden, können die Anflußpunkte gesetzt werden. Danach wird das Modell automatisch mit Tetraederelementen vernetzt und die Simulation gestartet. Es werden folgende Kenngrößen berechnet:

- Ausbreitung und Zusammentreffen der Schmelze, **Bild 6, Bild 10**
- Druckverteilung, **Bild 7**
- Temperaturverteilung, **Bild 8**
- Abkühlzeit
- Richtung der Fasern und Moleküle, **Bild 9**
- Anordnung der Belüftung, **Bild 11**
- Kurzbericht über Technologieparameter

## 2.6 Datenaufbereitung

Nachdem die Konstruktionsdaten als Datei vorliegen, müssen sie für die Verwendung in einer Rapid Prototyping oder Rapid Tooling Maschine vorbereitet werden. Dazu wird die 3D-CAD Datei im Stereolithographie-Format (\*.STL) gespeichert und an den Rechner der Rapid Prototyping Maschine übertragen. Bei der Konvertierung in das STL-

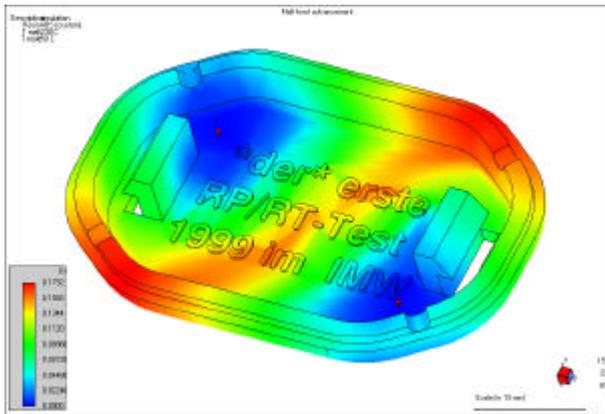


Bild 6: Ausbreitung der Schmelze

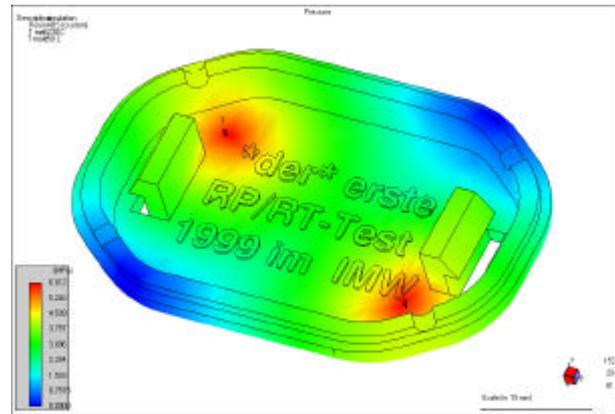


Bild 7: Druckverteilung

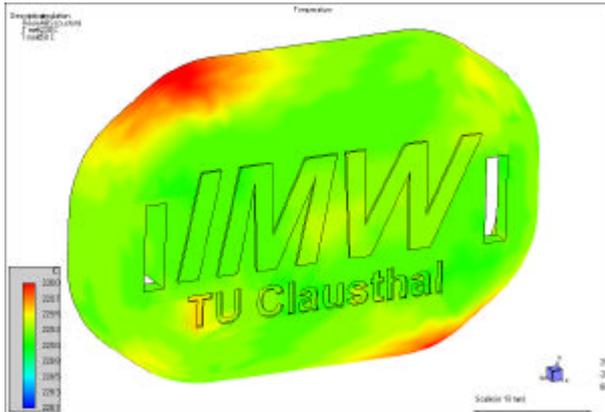


Bild 8: Temperaturverteilung Rückseite

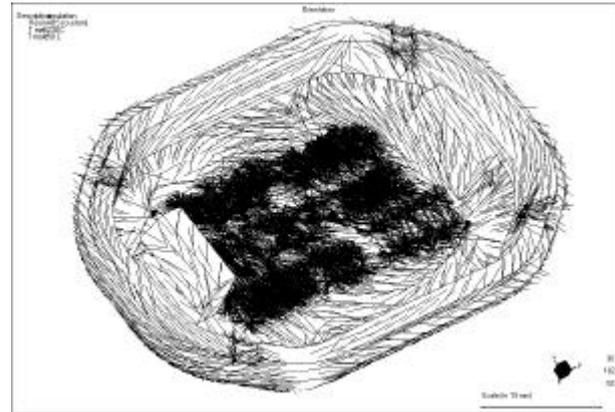


Bild 9: Faserrichtung und Kettenmolekülrichtung



Bild 10: Verschmelzungslinien



Bild 11: Potentielle Luftblasen (Belüftungsorte)

Format führt das CAD Programm eine Triangulierung durch, das bedeutet, das Bauteil wird in kleine Dreiecke zerlegt. Für die Übertragung der Daten steht im IMW das hausinterne Netzwerk mittels FTP-Protokoll zur Verfügung.

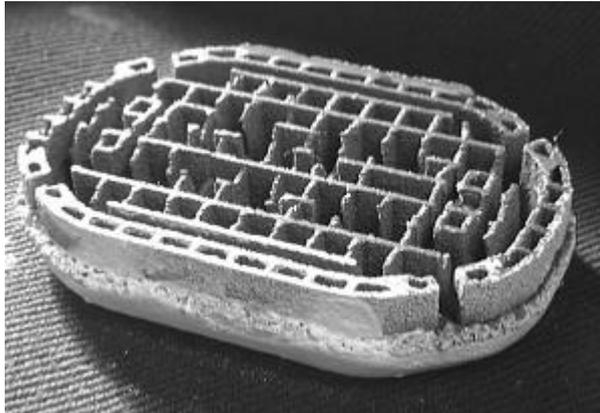
### 2.6.1 Vorbereitung der Daten

Die Datenaufbereitung hat das Ziel, die herzustellenden Bauteile für die Plazierung im Bauraum der Rapid Prototyping Maschine vorzubereiten. Dies geschieht in mehreren Stufen: Zunächst wird das Bauteil so gedreht, daß ein Plazieren auf der Bauplattform der Rapid Prototyping Maschine möglich ist. Das bedeutet, daß die plane Fläche nach unten zeigt. Durch Drehen des Bauteils in der Bauebene

(X-Y) kann der Einfluß von Biegespannungen auf das Bauteil, hervorgerufen durch den Materialauftrag auf die Bauplattform (sogenannte Wischerbewegung) verringert werden.

In einem nächsten Schritt wird eine Bauteilunterstützung (sog. Support) angebracht. Der Support ist bei unterhöhlten Flächen notwendig, denn beim generativen Verfahren können keine Bauteile im „freien Raum“ gebaut werden. Das bedeutet, daß ein Support an den Stellen angebracht werden muß, die einen Winkel größer als  $30^\circ$  oder einen Überhang von mehr als 3 mm zur vorhergehenden Bauteilschicht haben und somit Überhänge bilden. Bei der verwendeten Maschine vom Typ EOS M250 ist der Support auch notwendig, um das

Bauteil von der Bauplattform abzutrennen. **Bild 12** zeigt den Support an der Unterseite des Schlüsselanhängers.



**Bild 12:** Support

Bei dieser Datenaufbereitung besteht die Möglichkeit, fehlerhafte Dateien zu reparieren, so daß die Rapid Prototyping Maschine unterbrechungsfrei durcharbeiten kann.

Nachdem die Datei soweit vorbereitet ist, müssen die Bauteildaten zur weiteren Verwendung an der Maschine in Schichten geschnitten werden (sogenanntes „Slicen“). Bei diesem Prozeß werden für die Bauteilhülle, den Kern und den Support eigene Arbeits- Dateien erzeugt. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, daß verschiedenen Strukturen (der Support muß sich nach dem Bau entfernen lassen und darf daher nicht so fest gebaut sein wie die Bauteilhülle) bestimmte Maschinenparameter zuordnen kann.

Nach Abschluß dieser vorbereitenden Arbeiten kann das endgültige Plazieren der Teile im Bauraum der Rapid Prototyping Maschine vorgenommen werden.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß bei der Vorbereitung der Daten auch eine Skalierung und das Erzeugen von Negativformen aus Positivmodellen (vergleichbar mit dem Vorgehen in Solid-Works), also der Erzeugung eines Formbauteils oder Spritzgußformeinsatzes möglich ist.

### 2.6.2 Prozeß des Rapid Prototyping und Rapid Tooling

Bei der Herstellung von Prototypenmodellen unterscheidet man das Rapid Prototyping vom Rapid Tooling. Beim Prototyping werden aus verschiedenen Materialien (Polyamid, Metall, Sand, Papier, Stärkemehl u.v.a.) Positivmodelle erstellt. Sie dienen der Anschauung, zum Abformen, zum Testen

des Einbaus etc. In Ergänzung hierzu steht das Rapid Tooling, das sogenannte Bauen von Werkzeugen. Bei diesem Verfahren werden nicht die Positive gebaut, sondern Prototypen in Form von Negativformen oder als Formeinsätze. Diese können in der Regel direkt in die Normalie einer Spritzgußmaschine eingesetzt werden. Standardmäßig sind dies ein oder zwei (Ober und Unterteil) Formbauteile (Formhälften), die direkt zum Abgießen verwendet werden können. Schließt man die beiden Formbauhälften, so entsteht ein Hohlraum in deren Mitte, in den das flüssige Spritzgußmaterial eingebracht wird und das Bauteil nach der Aushärtung vorliegt.



**Bild 13:** Schlüsselanhänger Oberseite unbehandelt

Gemeinsam ist beiden Verfahren, egal ob RP oder RT, daß aufbauend (generativ) ein Bauteil entsteht. Durch das lokale Belichten von losem, ungebundenem Material auf der Bauplattform entsteht Schicht für Schicht das Bauteil, das vorher als Modell im Rechner „gesliced“ wurde. Durch Absenken der Bauplattform um eine Schichtdicke von ca. 0,05 mm nach der Belichtung und erneutes Beschichten „wächst“ das Bauteil- von unbelichtetem Pulver umschlossen- nach unten in den Bauraum. **Bild 13** zeigt das aus Metallpulver hergestellte Positivmodell des Oberteils des Schlüsselanhängers.

### 2.6.3 Vorbereitung des Bauteil für den Spritzprozeß / Nachbearbeitung

Um die Rapid Tooling Bauteile im industriellen Herstellungsprozeß einzusetzen, ist eine gewisse Nacharbeit unumgänglich. So zeigt zum Beispiel Bild 13 deutliche Rauigkeiten auf der Oberseite und auf dem Support auf der Unterseite. Der Arbeitsaufwand ist abhängig vom gewählten Bauprozeß und dem Geschick des Einrichters, denn eine

gute Plazierung im Bauroum kann viel Nacharbeit verursachen oder vermeiden.

Nach der Entnahme der Stahl bzw. Metallwerkzeuge aus der RP Maschine muß zunächst das lose (nicht gesinterte) Pulver entfernt werden.

Da je nach verwendetem Pulver die Dichte zwischen nur ca. 70% der theoretisch erreichbaren Dichte beträgt, müssen Hohlräume aufgefüllt werden. Dies geschieht durch Infiltration mit einem Expydharz. Das Harz wird dabei vorsichtig auf das Bauteil aufgetragen

und dringt in die Oberfläche ein. Im anschließenden Ofenprozeß bei ca. 200°C härtet das Harz aus und sorgt somit für eine Verbesserung der Bauteil- und Materialeigenschaften. Eine zusätzlich aufgetragene Epoxydharzschicht dient zum Glätten der Oberfläche.

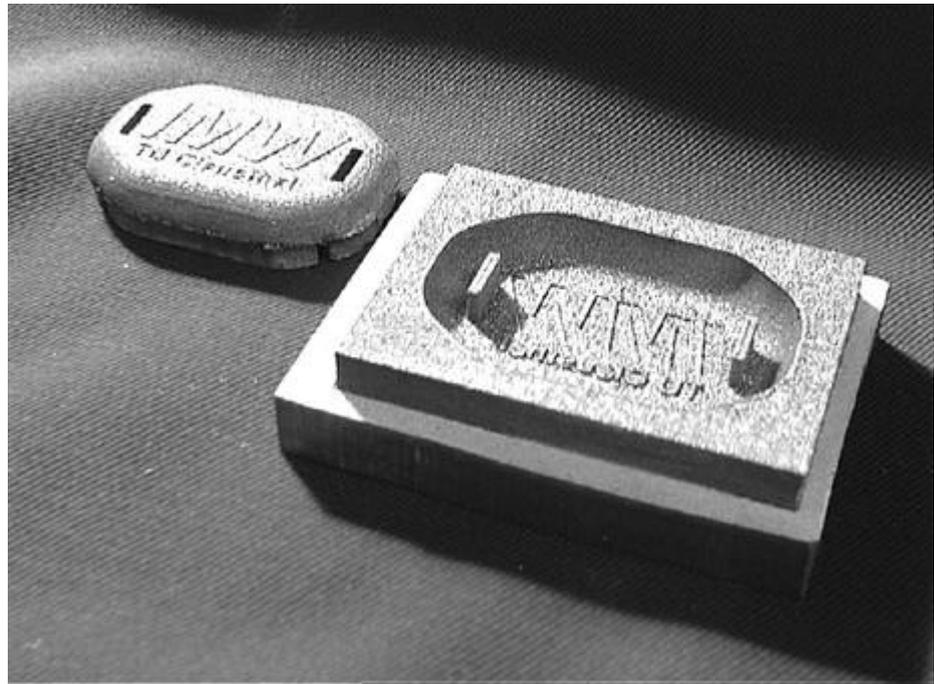
Eine weitere Möglichkeit der Oberflächenverbesserung bildet das Strahlen. Hierbei wird vorsichtig mit Strahlgut (meist kleine Metallkugeln oder Natursubstraten wie zum Beispiel Wallnußschalen) die Oberfläche verdichtet und geglättet. Damit die Maßhaltigkeit gewährleistet bleibt, ist darauf zu achten, daß kein Materialabtrag stattfindet.

Ein weiterer Schritt, der vor dem Einsetzen in die Normalie zu erledigen ist, ist das Entfernen des Supports und das Polieren der Oberflächen. Hier kann vorsichtig mit mechanischen Feilen und Schmirgelleinen gearbeitet werden, um eine exzellente Oberfläche zu erreichen.

Desweiteren werden in diesem Arbeitsgang die Schiebervorrichtungen, die bei Hinterschneidungen erforderlich sind, und der Anguß angebracht.

#### 2.6.4 Verwendung und mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften eines so hergestellten Bauteils sind in erster Linie von der Wahl des eingesetzten Pulvers und von der Nachbehandlung durch Infiltration und mechanischem Strahlen abhängig. Es sind Bronze und Stahlpulver



**Bild 14** Positiv und Negativ des oberen Schlüsselanhängerteils

auf dem Markt erhältlich und es können je nach Art Biegebruchfestigkeiten von bis zu 900 N/mm<sup>2</sup> und eine Zugfestigkeit von bis zu 500 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. In den meisten Fällen genügen diese Werte durchaus, natürlich in Abhängigkeit von der Geometrie und den Belastungen, um mit diesen Bauteilen im Spritzgußverfahren Kleinserien bis über 10.000 Stück herzustellen, oder Prototypen zu testen. Die erreichbaren Werkstoffkennwerte sind in erster Linie abhängig vom Grad der Verdichtung durch mechanisches Strahlen und somit von der Dichte an der Oberfläche. Die Wärmeleitfähigkeit liegt zwischen 14 und 26 W/mK.

**Bild 14** zeigt einen metallischen Prototypen der bei der Firma EOS im Werkstoff „Direct Metal 50-V2“ hergestellt wurde und das zugehörige obere Formbauteil.

### 3 Zusammenfassung

Es wurde anhand eines Schlüsselanhängers die CIM-Verfahrenskette von der CAD-Konstruktion bis zur Herstellung einer Spritzgußform mit dem Rapid Tooling Verfahren gezeigt. Dadurch kann für Spritzgußteile die Entwicklungszeit entscheidend verkürzt werden.

### 4 Literatur

- /1/ Solid-Works-Handbuch
- /2/ Weilhammer, Josef: Workshop C: EOS M250. EOS Usermeeting, Planegg 1999