

# Realisierung keramischer Prototyping mittels 3D-Druck und Heißgießen

A. Kindtner, M. Kindtner, W. Kollenberg\*

## Inhalt

- 1 Einleitung
- 2 Vergleichende Betrachtung der Verfahren
  - 2.1 Abtragende Verfahren
  - 2.2 Formgebundene Verfahren
  - 2.3 Aufbauende Verfahren
- 3 Beispiele für die Prototypenfertigung
  - 3.1 Brennhilfsmittel
  - 3.2 IR-Strahlerplatte
  - 3.3 Keramikeinsatz für elektrische Schaltanlagen
  - 3.4 Schneidelemente
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

## 1 Einleitung

Der Begriff Rapid Prototyping bezeichnet die schnelle Herstellung von Prototypen und bezieht sich auf eine Technologie, die seit Anfang der 1990er Jahre durch stetige Weiterentwicklung mit leistungsfähiger, computergestützter Steuerungs- und Regeltechnik für generative Fertigungsverfahren geeignet ist. In der Kunststoffindustrie gehören Verfahren des Rapid Prototyping zum Stand der Technik. Durch sie ist es möglich, Komponenten direkt auf Basis von 3D CAD-Daten zu fertigen. Es lassen sich kostengünstig hochkomplexe und filigrane Strukturen innerhalb weniger Stunden realisieren. Somit können Entwicklungszeiten und –kosten deutlich reduziert werden und auch die Zeit bis zur Markteinführung neuer Komponenten wird erheblich verkürzt.

Keramische Werkstoffe bieten mit ihren herausragenden Eigenschaften (z.B. hohe Härte, mechanische und chemische Verschleißbeständigkeit, hohe Festigkeit, einsetzbar bei hohen Temperaturen, elektrisch und thermisch isolierend) ein breites Feld innovativer Anwendungen. Dennoch haben sie derzeit häufig das grundsätzliche Problem, dass ihr Potential bei Ingenieuren und Konstrukteuren nicht hinreichend bekannt und die Erprobung von Prototypen meist mit hohem Aufwand verbunden ist. Daher ist für keramische Werkstoffe der Einsatz von sehr schnellen, computergestützten Verfahren zur Fertigung von Prototypen von besonderer Bedeutung.

Der relativ lange und kostenintensive Herstellungsprozess (Abb. 1), bestehend aus Modellentwicklung, Formenbau, Optimierung der Arbeitsform, Aufbereitung der Rohstoffe, Formgebung, Sinterprozess und Nachbearbeitung, führt in der Regel zu langen Entwicklungszyklen. Als ein entscheidender Aspekt ist hier insbesondere der Werkzeugbau zu nennen. Je nach Formgebungsverfahren können dabei sehr hohe Kosten entstehen. Während der Produktentwicklung führen kleinste Designänderungen hier zu einer enormen Zeit- und Kostenbelastung. Für Hersteller und Anwender sind daher Verfahren zur schnellen und kostengünstigen Bereitstellung von Prototypen dringend erforderlich.

---

\* Werkstoffzentrum Rheinbach GmbH  
Lise-Meitner-Str. 1, 53359 Rheinbach  
[www.werkstoffzentrum.de](http://www.werkstoffzentrum.de)

Neben der bekannten Fertigung von Prototypen mittels Grünbearbeitung ist in den letzten Jahren die Anwendung unterschiedlicher, vorwiegend aus der Kunststofffertigung bekannter Methoden, auf keramische Werkstoffe in der Literatur beschrieben worden. Bei diesen Verfahren kommen sehr unterschiedliche Technologien zum Einsatz. Diese können darauf abzielen, Zeit und Kosten für die Herstellung der Werkzeuge – etwa durch Kunststoff-Formen – zu reduzieren, keine Werkzeuge zu verwenden, oder sogar Formgebung und Sintern zu kombinieren.

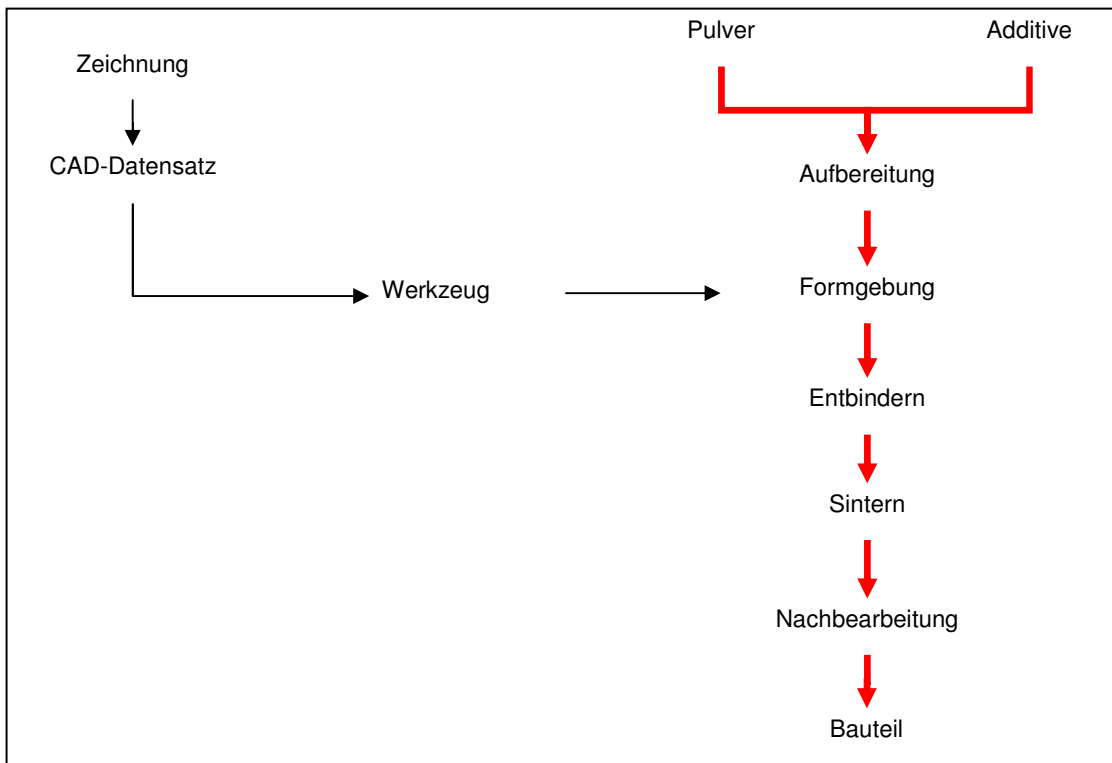


Abb. 1: Schematische Darstellung der Herstellung keramischer Bauteile

Einige dieser Verfahren werden im Folgenden kurz dargestellt. Der Schwerpunkt dieser Arbeit ist jedoch den Einsatz des Rapid Prototyping in der Praxis an Hand einiger Beispiele zu erläutern.

## 2 Vergleichende Betrachtung der Verfahren

### 2.1 Abtragende Verfahren

Die heute gängige Methode keramische Einzelteile oder Prototypen zu fertigen ist die Grünbearbeitung. Dabei wird die Form des herzustellenden Bauteils möglichst endkonturnah vor dem Sinterbrand hergestellt. Die Bearbeitung des Grünlings, meist über kalisostatisches Pressen (CIP) hergestellt, erfolgt im Allgemeinen mittels bekannter Methoden der mechanischen Bearbeitung wie Bohren, Drehen, Fräsen und Schleifen. Im Idealfall lassen sich durch Grünbearbeitung von CIP-Grünlingen heute Endmaßtoleranzen im Bereich der DIN 2768m ohne Nacharbeit erzielen, wobei feinste, homogene Ausgangspulver und verzugsfreies Sintern vorausgesetzt werden müssen.

Zu den Vorteilen des Verfahrens ist zu rechnen, dass auch sehr große Bauteile auf diese Weise gefertigt werden können. Als Nachteil sind der Materialverlust bei der Bearbeitung und die erforderliche Erfahrung der Mitarbeiter zu nennen. Bei der Herstellung von mehreren Bauteilen tritt keine Reduzierung des Aufwandes ein, es sei denn durch die Programmierung einer CNC-Maschine. Die Geometrie des zu fertigenden Bauteils muss der Bearbeitung zugänglich sein. Komplexe Körper können nicht, oder nur mit sehr hohem Aufwand, gefertigt werden.

## 2.2 Formgebundene Verfahren

Eine erste Vereinfachung der keramischen Prozesskette stellt der Einsatz von Kunststoff-Formen, im Gegensatz zu den sonst üblichen Werkzeugen aus gehärtetem Stahl oder Hartmetall, dar. Dies geschieht beispielsweise beim Heißgießen. Zum Abformen der Körper mittels Heißgießen können Formen aus Kunststoff gefertigt werden, sofern dieser zuverlässig bei Temperaturen zwischen 60° und 110°C formstabil eingesetzt werden kann. Dieser Kunststoff kann mittels bekannter Verfahren des Rapid Prototyping, vorzugsweise Stereolithographie oder 3D-Drucken verarbeitet werden. Es können aber auch mittels CNC-Fräsen hergestellte Modelle in Silikon abgeformt werden. Auf diese Weise können sehr hohe Kanten- und Oberflächengüten realisiert werden. Die keramische Masse wird z.B. mit Wachs aufbereitet und kann bei entsprechender Temperatur mit geringer Viskosität vorzugsweise unter Vakuum in die Kunststoff-Form gefüllt werden. Nach dem Entbindern und Sintern liegen dichte keramische Bauteile vor.

Nachteil formgebundener Verfahren ist, dass die Bauteile „entformbar“ sein müssen, d.h. Hinterschneidungen sind nur sehr begrenzt realisierbar. Ferner stellt der Entbinderungsprozess einen zusätzlichen Verfahrensschritt dar. Als Vorteil ist zu nennen, dass der Formenverschleiß gering ist und Abformungen von mehr als 100 Teilen problemlos mit einer Form möglich sind.

Erfolgt der Formenbau über Stereolithographie, kann dies auf vorliegenden CAD-Daten basieren. Gleiches gilt für die Fertigung von Modellen mittels CNC-Fräsen. In beiden Fällen ist die Schwindung der Keramik entsprechend zu berücksichtigen.

## 2.3 Aufbauende Verfahren

Eine weitere Vereinfachung der Prozesskette tritt dann ein, wenn auf ein Werkzeug zur Formgebung verzichtet werden kann. Die aufbauenden Verfahren können entweder

- unmittelbar keramische Pulver (z.B. 3D-Druck) oder
- mit keramischen Pulvern gefüllte Polymere (z.B. Stereolithographie und Fused Deposition Modelling FDM)

verarbeiten. Bei diesen Verfahren wird schichtweise das Material auf eine Plattform aufgetragen, so dass das gewünschte Bauteil entsteht.

Lasersintern ist ein aufbauendes Verfahren, das sowohl Pulver als auch gefüllte Polymere verarbeiten kann. Werden Pulver eingesetzt ist auch ein unmittelbares Verfestigen der Pulver möglich. Allerdings ist dieser Prozess nicht mit der keramischen, diffusionsgesteuerten Sinterung vergleichbar. Vielmehr werden hier punktuelle Schmelzphasen erzeugt. Darin ist sicherlich ein großer Nachteil zu sehen, so dass ein zusätzlicher Sinterbrand in aller Regel notwendig ist. Ein weiterer Nachteil des Lasersinterns sind die hohen Investitionskosten.

FDM und Stereolithographie sind Verfahren die sich noch in der Entwicklung befinden. Die industrielle Nutzung ist kurzfristig nicht zu erwarten.

Beim 3D-Druck wird pulverförmiges Material verarbeitet. Druckkopfähnliche Düsen dienen hier zum Einspritzen eines Binders, durch welchen die Pulver- oder Granulatteilchen miteinander verklebt werden. Somit wird es möglich, jedes Material miteinander durch passende Binder zu verarbeiten, da das Verfahren fast ausschließlich von den Eigenschaften des Binders abhängt. Der 3D-Druck als Formgebungsverfahren in Kombination mit „Keramik“ erweitert die Grenzen des Designs in deutlichem Maße. Es sind alle geometrischen Freiheiten, wie auch Hinterschneidungen, gegeben. Ein Nachteil des Verfahrens ist es, dass nach dem Sinterprozess keine dichten Bauteile vorliegen. Die resultierenden Porositäten, z.B. für  $Al_2O_3$ , liegen zurzeit zwischen 20 und 40 %, soweit kein Flüssigphasensintern erfolgt. Durch Infiltration kann die Porosität jedoch deutlich reduziert werden.

### 3 Beispiele für die Prototypenfertigung

Aus der Reihe möglicher Verfahren wurden im Werkstoffzentrum das Heißgießen und das 3D-Drucken aufgebaut. Beide Verfahren werden umfassend erprobt und fortlaufend weiterentwickelt. Die nachfolgenden Beispiele sollen verdeutlichen, welches Potential die Verfahren haben und in welcher Weise Rapid Prototyping bei der Entwicklung neuer Komponenten unterstützend eingesetzt werden kann.

#### 3.1 Brennhilfsmittel

Beim Brand sehr kleiner oder besonders komplexer keramischer Bauteile ist der Einsatz spezieller Brennhilfsmittel von besonderer Bedeutung. Übliche Brennhilfsmittel in Form meist dicker Platten führen zu einem ungünstigen Verhältnis von Brenngut zu Brennhilfsmitteln.

Spritzgegossene Formteile durchlaufen je nach Bindersystem mehrere Entbinderungsstufen. Angepasste Brennhilfsmittel, sogenannte Sintertrays, ermöglichen eine problemlose Entbinderung sowohl in flüssigen Medien als auch unter thermischem Einfluss. Die Flüssigkeit muss ungehindert ins Sintertray gelangen und dieses wieder verlassen können. Porosität und Perforation des Trays müssen individuell und gezielt eingestellt werden können.

Aufgrund der geringen Stückzahlen war die Fertigung von Sintertrays in der Vergangenheit relativ teuer. Der Aufwand wird durch die moderne Formgebungstechnik, den keramischen 3D-Druck, deutlich minimiert. Dieser Prozess ermöglicht die Herstellung komplexer, individuell geformter Bauteile innerhalb kürzester Zeit. Die gedruckten Sintertrays bieten viele Vorteile gegenüber den Brennhilfsmitteln, die auf herkömmlichem Wege hergestellt werden:

Der 3D-Druck ermöglicht minimale Wandstärken bei hoher Stabilität des Sintertrays. Dies führt zu einer Minimierung der Energiekosten im Sinterprozess durch Wegfall des Aufheizens von Brennhilfsmitteln. Außerdem ermöglichen diese Bauteile einen dichteren Besatz des Ofenraumes. Zudem können die Sintertrays direkt aufeinander gestapelt werden. Dies ermöglicht weiterhin eine bessere Ofenraumausnutzung und trägt zur Minimierung der Energiekosten im Herstellungsprozess bei.

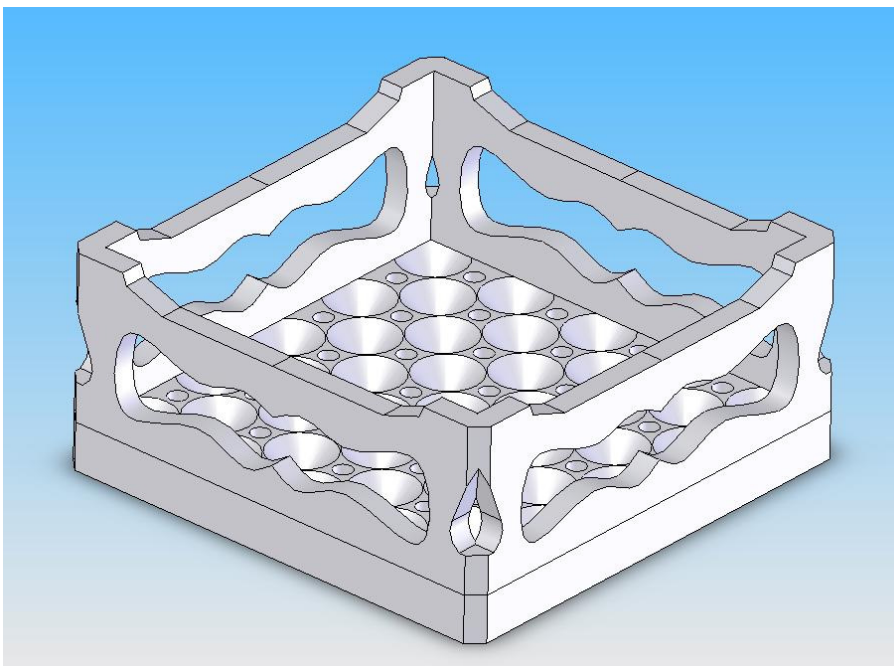


Abb. 2: CAD-Zeichnung eines Sintertrays

Der Herstellungsprozess keramischer Bauteile, insbesondere solcher, die mittels Spritzguss hergestellt werden, wird vereinfacht und sicherer, da die Teile nach der Formgebung bis zum fertigebrannten Bauteil im Sintertray verbleiben. Dies führt zu einer Ausschussminimierung, da das risikobehaftete Handling von Grünlingen und Braunlingen entfällt.

Die herkömmliche Formgebung von Sintertrays erfolgt entweder über das Axialpressen oder über das Gießen ungeformter Massen mit z.B. hydraulischer Bindung. In beiden Fällen sind die Werkzeugkosten bei kleinen Losgrößen bestimmende Kostenfaktoren. Diese steigen entsprechend sobald weitere Designänderungen notwendig sind.

Das 3D-Drucken bietet die Möglichkeit in sehr kurzer Zeit, basierend auf einem CAD-Modell (Abb. 2), individuelle Sintertrays zu fertigen (Abb. 3). Das Beispiel zeigt ferner eine aufwendige Formgestaltung, deren Realisierung auf konventionellem Weg nur mit hohem Aufwand möglich ist. Dieses Beispiel zeigt, dass der 3D-Druck auch zur Fertigung von Kleinserien wirtschaftlich eingesetzt werden kann.



Abb. 3: Sintertrays aus Aluminiumoxid hergestellt mittels 3D-Druck nach dem Brand

### 3.2 IR-Strahlerplatte

Die Infrarotstrahlerplatte ist ein poröses, zusätzlich gelochtes Bauteil, das zur Wärmeerzeugung benutzt wird. Die Platte wird von Erdgas durchströmt. Auf der Oberfläche der Platte wird das Gas gezündet und erzeugt durch die hohe Porosität der Platte eine Vielzahl von kleinen Flammen die die Oberfläche auf ca. 900 °C aufheizen diese Energie wird dann als Wärmestrahlung abgegeben. Die Rückseite der Platte erreicht lediglich eine Maximaltemperatur von 200 °C. Man nennt diese Art der Verbrennung „kalte Verbrennung“, die aufgrund der niedrigen NO<sub>x</sub>-Werte als umweltschonend zu bezeichnen ist. Für die Herstellung eines Infrarotstrahlers werden mehrere dieser keramischen Platten benötigt.

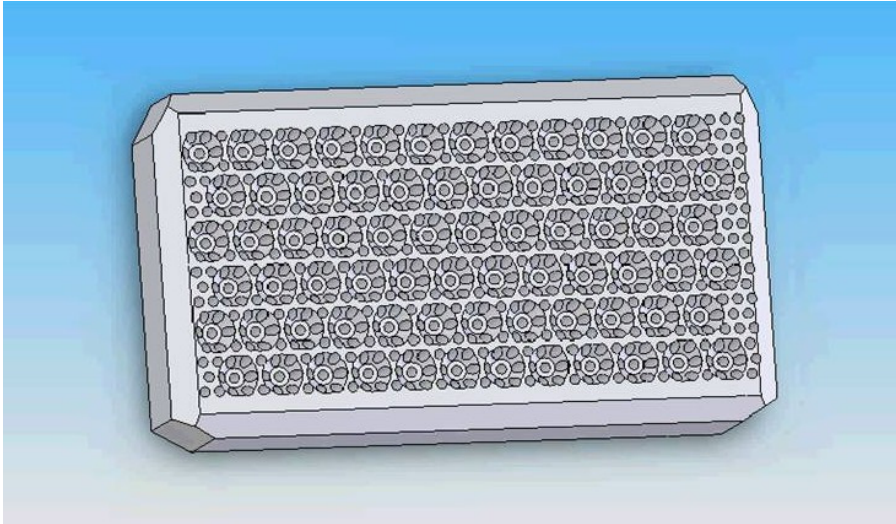


Abb. 4: CAD-Zeichnung einer IR-Strahlerplatte (nach einer Vorlage der Fa. Rauschert)

Die konventionelle Fertigung von IR-Strahlerplatten erfolgt über uniaxiales Pressen. Von besonderem Interesse ist die Gestaltung der Oberfläche und der Durchmesser der Bohrungen (Abb. 4). Für die Optimierung des Designs bietet sich das 3D-Drucken zur Fertigung von Prototypen an (Abb.5).

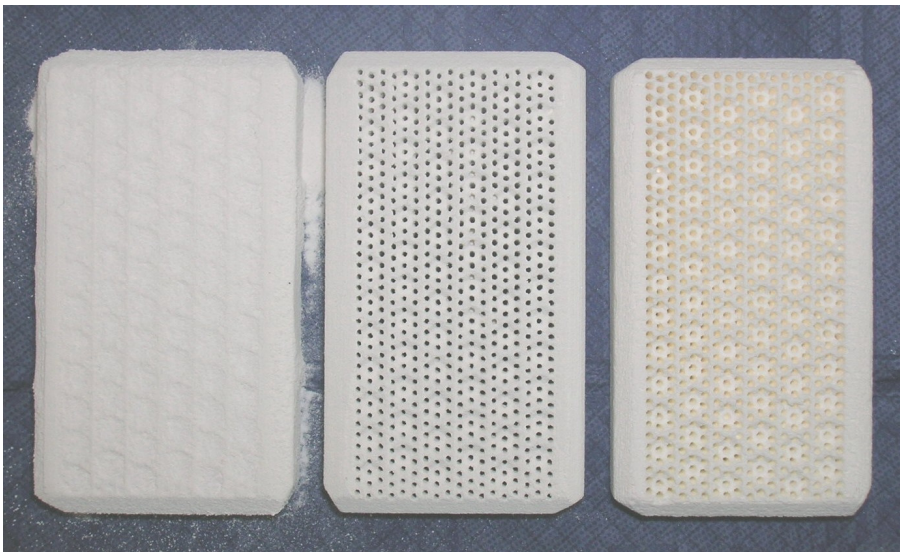


Abb. 5: Grünling nach dem Druck, abgeblasener Grünling und gesintertes Bauteil

### 3.3 Keramikeinsatz für elektrische Schaltanlagen

Beim Schalten von hohen elektrischen Strömen entsteht ein Lichtbogen. Dieser kann auf verschiedene Weise gelöscht werden, z.B. durch Einsatz von Kühlrippen von Form von Messing-einsätzen. Die Zuverlässigkeit der Schaltanlagen soll durch den Einsatz keramischer Einsätze gesteigert werden (Abb.6).

Dazu werden unterschiedliche Werkstoffe erprobt. Für die Fertigung dieser Versuchsteile in einer kleinen Serie von jeweils 50 Teilen wurde das 3D-Drucken ausgewählt. Die unterschiedliche Schwindung verschiedener Werkstoffe kann unmittelbar bei der Erstellung der Druckdatei-

en berücksichtigt werden. Die gewünschte Geometrie kann problemlos in der geforderten Toleranz realisiert werden.

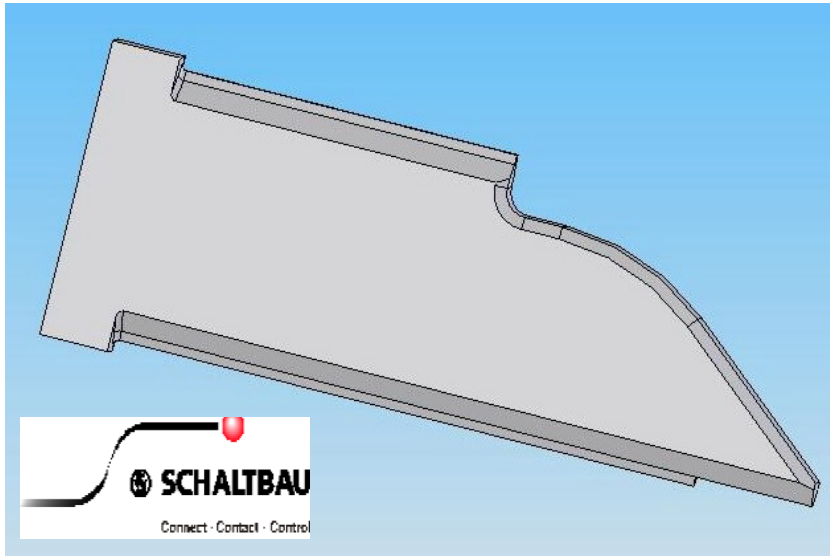


Abb. 6: CAD-Zeichnung eines Keramikeinsatzes für elektrische Schaltanlagen

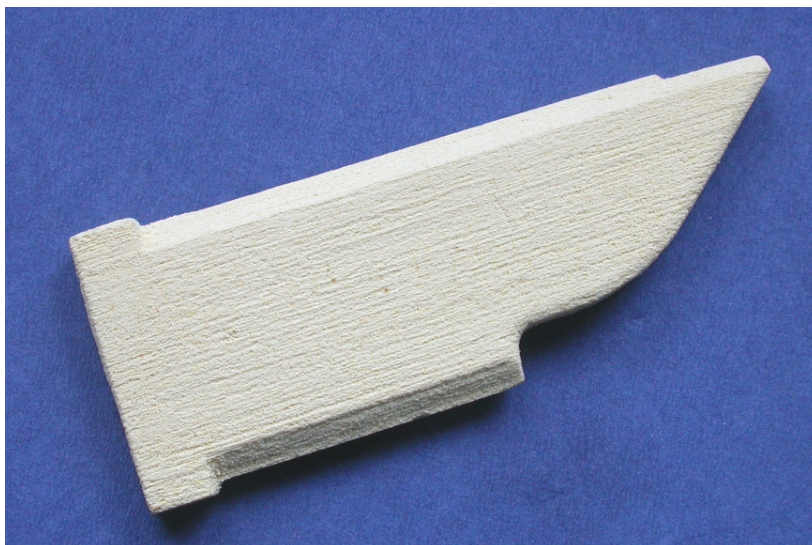


Abb. 7: Keramikeinsatz für elektrische Schaltanlagen, gesintert

### 3.4 Schneidelemente

Diese Schneidelemente der Firma Intercable sind Komponenten einer Spezial-Abisolierzange für den Einsatz an spannungsführenden Kabeln (Abb. 8). Da die Keramikelemente den elektrischen Strom nicht leiten, wird die Gefahr von Kurzschlüssen deutlich verringert.

Die keramischen Schneidelemente werden im Heißgießverfahren hergestellt. Das Modell (Abb. 9) wird zunächst mit einem an die Schwindung des keramischen Materials angepassten Aufmaß mittels CNC-Fräsen hergestellt. Dieses wird anschließend in Silikon abgeformt, wodurch die eigentliche Gießform entsteht. In die Gießform kann dann die temperierte Masse eingegossen werden. Nach der Entformung folgen der Entbinderungs-, sowie der Sinterprozess.

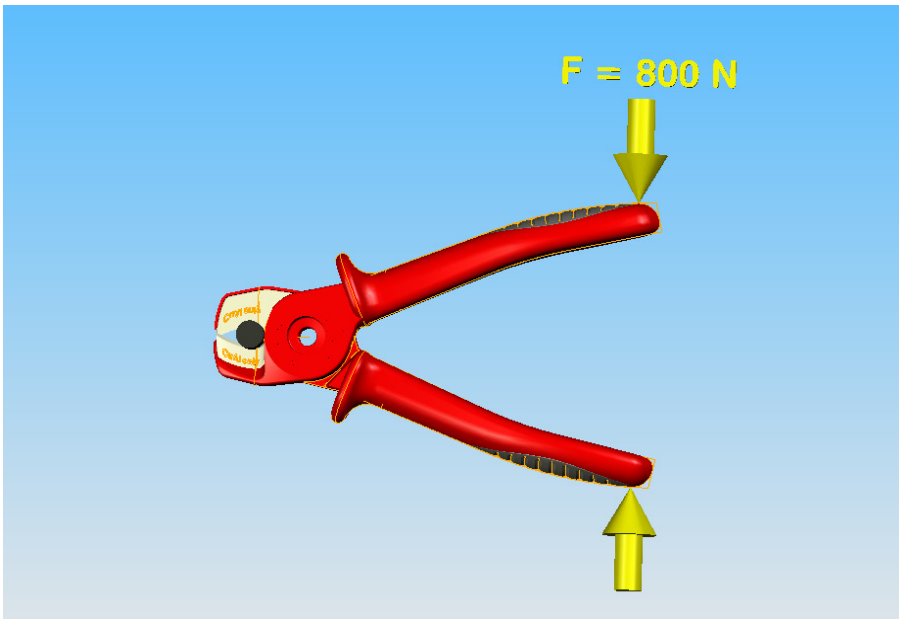


Abb. 8: Zange mit keramischer Schneide (Entwurf Fa. intercable)

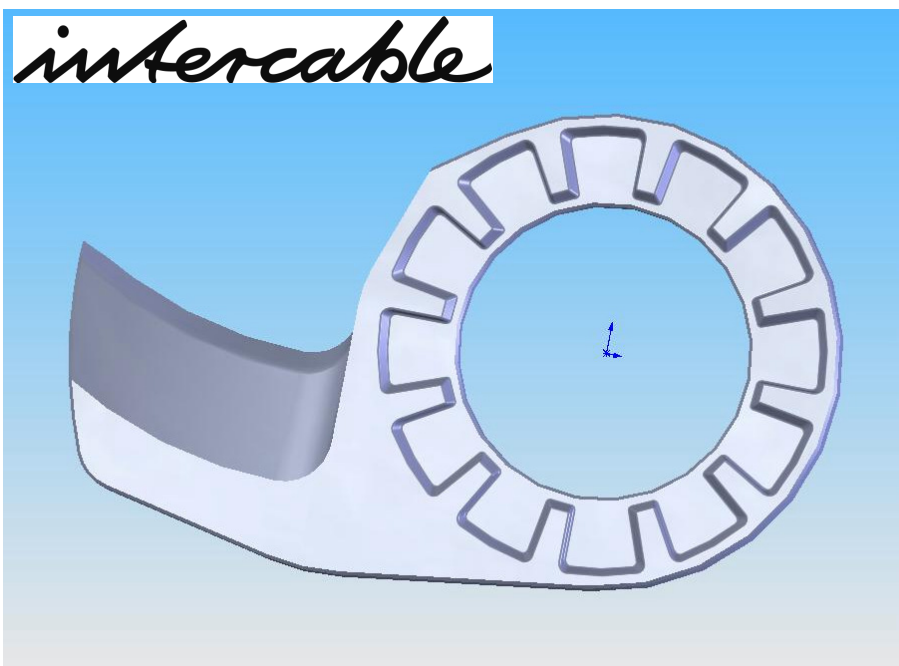


Abb. 9: CAD-Zeichnung der Keramikschnaide,

Durch Einsatz des Rapid Prototyping lassen sich auch für diese Anwendung in kurzer Zeit unterschiedliche Werkstoffe und verschiedene Ausführungen der Schneide erproben. Diese Entwicklung kann durch parallele FEM-Simulationen unterstützt und weiter beschleunigt werden.



#### **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Rapid Prototyping bietet viele Vorteile bei der Neuentwicklung von Produkten. Es stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, die die Entwicklungs- und Produktionszeiten und -kosten deutlich senken können um ein attraktives Produkt auf den Markt zu bringen.

Neben der Grünbearbeitung gewinnen insbesondere das 3D-Drucken und das Heißgießen zunehmend an Bedeutung. Diese Verfahren kommen im Werkstoffzentrum zur Anwendung. Sie lassen die Realisierung komplexer Geometrien zu. Beim 3D-Druck können problemlos Innengeometrien dargestellt werden. Die Fertigung eines Bauteils erfolgt in wenigen Tagen. Das Heißgießen hingegen ermöglicht eine hohe Oberflächengüte mit hervorragenden physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Bauteile.

Neben der Herstellung von Prototypen können die beschriebenen Verfahren auch zur Fertigung von Kleinserien eingesetzt werden. Dabei erlaubt das 3D-Drucken die Herstellung von komplexen Geometrien, die mit konventionellen Verfahren nicht zu fertigen sind.