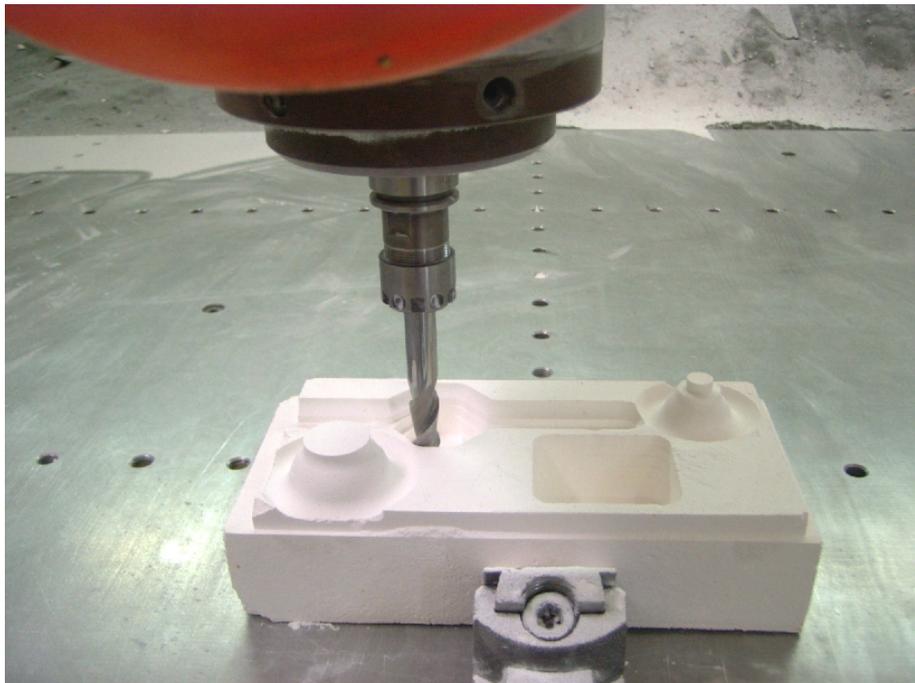


Detlev Gantner, Rezo Aliyev
ACTech GmbH in Freiberg

Fräsen mehrfach verwendbarer Keramikformen zur Herstellung von Gussteilen im Automobilbau „Keramikfräsen“



Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03i4814A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

1. Aufgabenstellung

Ziel des Projektes ist die Schaffung der methodischen Voraussetzungen für eine durchgängige Prozesskette zur Herstellung von Gießformen aus Keramik oder mit keramischen Komponenten.

Die gesamte Prozesskette umfaßt mehrere Etappen von der Entwicklung neuer keramischer Werkstoffsysteme, der Fertigung von Formen bis zum Abguß.

Die Aufgabenstellung im Teilvorhaben „Keramikfräsen“ war:

- Experimentelle Untersuchungen zur Fräsbarkeit von Keramiken, die für die Herstellung von Gießformen geeignet sind.
- Beschreibung der Oberflächengüte an der Keramikform und des Fräswerkzeugverschleißes beim Fräsen in Abhängigkeit der Fräsparameter.
- Anpassung der Fräsparameter und der Keramiken zur Verbesserung der Oberflächengüte und Maximierung des Standweges.
- Anforderungen an das System Werkzeugmaschine, Werkzeug, Spannmittel und Werkstück werden abgeleitet.
- Die Eignung der gewählten Keramiksorten bzgl. Gießbarkeit wird verifiziert.

2. Ausgangssituation

Die ACTech GmbH beschäftigt sich mit der Herstellung von Prototypengußteilen im Sandgußverfahren. Für die schnelle Herstellung von Gußteilen werden bei der ACTech GmbH unterschiedliche Technologien zur Formherstellung, z.B. CNC-Modelbau, das Lasersintern von Croning[®]-Sand und das Direkte Formstofffräsen eingesetzt.

Das Direkte Formstofffräsen eignet sich besonders zur Herstellung von mittleren und großen Formen, wobei die eingesetzte Maschinenteknik eine maximale Blockgröße von 2400mm x 1400mm x 700mm erlaubt. Mit diesen Verfahren ist es möglich, werkzeuglos Formteile für komplexe Gußteile direkt aus dem CAD-Datensatz herzustellen. Damit verbunden sind erhebliche Einsparungen bei Kosten und Zeit. Dabei muß die einmalige Verwendbarkeit der aufwändig hergestellten Formteile in Kauf genommen werden, da es sich um sog. verlorene Formen handelt.

Die in der Entwicklungsphase des Verfahrens Direktes Formstofffräsen, 1997 bis 1999, gewonnenen Erkenntnisse bilden eine wichtige Grundlagen für das vorliegende Projekt.

Eine weitere Schlüsseltechnologie ist das bei ACTech entwickelte Laser Sintern von Croning[®]-Formstoffen. Das Verfahren wird erfolgreich bei der Herstellung von kleinen Formen und Kernen mit komplexen Geometrien eingesetzt. Sinterteile und mit dem Verfahren Formstofffräsen hergestellte Formsegmente können vorteilhaft mit gefrästen Keramikformsegmenten zu einer kompletten Form montiert werden.

3. Stand der Wissenschaft und Technik zu Beginn und Ende des Vorhabens

Um eine kurze Produktentwicklungszeit zu gewährleisten, ist es erforderlich, schnell Gussteilprototypen mit serienidentischen Eigenschaften herzustellen. Dazu wurden in der Vergangenheit Verfahren entwickelt, die eine schnelle Herstellung der Form gestatten. Die ACTech GmbH als Anbieter von Gußteilprototypen setzt selbst derartige Verfahren ein.

Bei Beginn des Vorhabens war bekannt, dass durch den Einsatz von Keramikformen beim Feingießen sehr hohe Maßhaltigkeiten und Oberflächengüten am Gussteil erzeugt werden können. Die Formherstellung ist sehr zeit- und kostenaufwendig. Mehrere Prozessschritte sind dazu notwendig.

In der konventionellen Gießerei ist der klassische Modellbau mit CNC-Unterstützung dominant. Hier wird also ein Modell erzeugt, das mehrmals abformbar ist. Auch bei Stückzahl 1 ist ein derart teures Modell erforderlich. Zusätzlich entstehen natürlich auch noch Lagerkosten für das Modell.

Die Erkenntnisse über das DMM-Direct Mould Milling[®] Verfahren, das bei der ACTech GmbH entwickelt wurde, bieten eine wesentliche Grundlage zur Verfahrensentwicklung Direktes Keramikfräsen.

Anhand der optimierten Werkstoffsysteme ist es gelungen, Keramikformen in der Größe 200x100x100 mit einem max. Zeitspanvolumen von 10^6 mm³/min zu fräsen. Durch die Optimierung der Fräsparameter war es möglich, den Werkzeugverschleiß so zu begrenzen, daß die Zerspanung wirtschaftlich ist.

Gießversuche zeigten die Eignung der Keramik als Formstoff für die Werkstoffe Aluminium, Grauguß und Stahl. Besondere Vorteile konnten bei der Herstellung dünnwandiger Stahlgußteile verzeichnet werden. Bemerkenswert ist die hohe Oberflächengüte des Gußteiles. Die Versuche haben auch gezeigt, daß es nicht möglich ist, die thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Keramik und Gießmetall derart anzugleichen, das eine komplette Form mehrfach verwendet werden kann. Das Metall schrumpft auf die Keramik auf.

Mit Hilfe von CA-Techniken, insbesondere der Erstarrungssimulation ist es gelungen, eine ausgewählte Gießform so zu gestalten, das große Teile wiederverwendet werden konnten.

4. Erzielte Ergebnisse

4.1. Untersuchungen zur Fräsbarkeit

Die Fräsbarkeit hängt wesentlich von den Eigenschaften der Keramik ab. Diese Eigenschaften können beim Herstellungsprozeß der Keramik in gewissen Grenzen beeinflußt werden. Folgende Prozeßkenngrößen beschreiben die Fräsbarkeit:

- Schnittkraft,
- Werkzeugverschleiß,
- Oberflächenqualität am Werkstück und die
- Zerspantemperatur

Diese Kenngrößen können durch die Spanbedingungen:

- Schneidengeometrie,
- Schneidstoff,
- Schnittgeschwindigkeit,
- Vorschub,
- Schnitttiefe und
- Eingriffsbreite

beeinflußt werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Fräsbarkeit der Keramik werden im Weiteren dargestellt.

4.1.1. Vorversuche

Über die Zerspanung der in Aussicht genommenen Keramikwerkstoffe war zu Beginn des Projektes nichts bekannt. Deshalb war es erforderlich Vorversuche durchzuführen. Das Ziel der Versuche bestand in der Einordnung der Keramiken bezüglich Fräsbarkeit und der Eingrenzung der Fräsparameter.

Bild 1 stellt wichtige Fräsparameter dar.

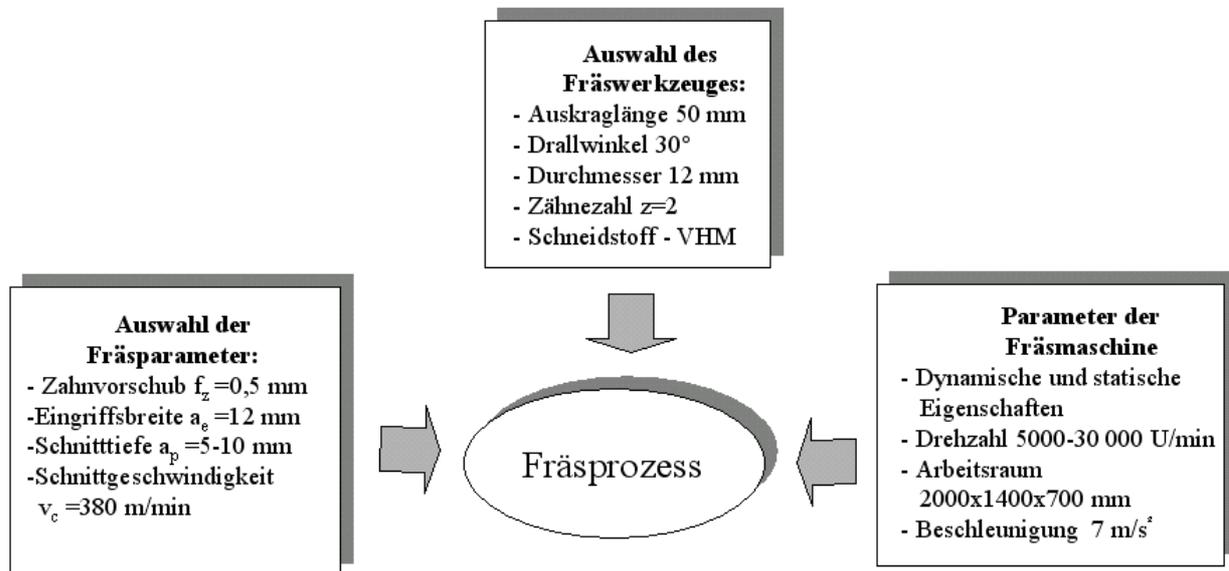


Bild 1: Auslegung des Fräsprozesses

Auf der HSC Formstofffräsmaschine wurden erste Versuche durchgeführt. Die erforderliche Spindelleistung lässt erste Rückschlüsse auf die auftretende Schnittkraft zu. Erste Bewertungen der erreichten Oberflächengüte sind möglich. Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Versuchsergebnisse beim Keramikfräsen ($n=12\ 000$ 1/min, $v_f=30$ m/min)

Material	Maschinenleistung	notw. Spindelleistung	Oberfläche	Fräsbarkeit
12/2Z	Ca. 1.7 kW	4%	Porös, Rau	Leicht Zerspannbar
17/1A	Ca. 1.7 kW	4%	Porös, Rau	Leicht Zerspannbar
16/2Z	Ca. 1.7 kW	5%	Porös, Rau	Leicht Zerspannbar
18/1C	Ca. 1.7 kW	10%	Porös, Glatt	Leicht Zerspannbar
10/1C	Ca. 1.7 kW	25%	Porös, Glatt	Leicht Zerspannbar
9/2C	Ca. 1.7 kW	36%	Porös, Glatt	Leicht Zerspannbar

Aufgrund der schlechten Oberflächengüte, die sich durch das Fräsen auch nicht weiter verbessern lässt, konnten schon hier die Keramiksorten A und Z von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen werden. Im Bild 2 ist der Unterschied zur Sorte C, die weiter untersucht wird, auch deutlich zu erkennen.



Sorte Z



Sorte C

Bild 2: Gefräste Keramikformen

4.1.2. Verschleißuntersuchungen

Die Maximierung des Werkzeugstandweges ist für eine wirtschaftliche Bearbeitung der Keramik wichtig. Deshalb wurden an der Keramiksorte C systematische Untersuchungen zum Werkzeugverschleiß durchgeführt.

Beim Keramikfräsen mit Vollhartmetall-Werkzeuge wurde erwartungsgemäß ein abrasiver Verschleiß an der Haupt- und Nebenschneide beobachtet. Dies ist auf die mechanische Reibung in der Schnittzone des Werkzeuges zurückzuführen. Da beim Keramikfräsen kein Span entsteht, sondern die Keramikkörner aus der Bindung herausgeschlagen werden, führt die dadurch entstehende raue Oberfläche zur erhöhten Reibung. Kolk- und Freiflächenverschleiß ist die Folge (Bild 3).

Bereits erste Vorversuche zeigten, daß die Fräsparameter (Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit, Schnitttiefe und Eingriffsbreite) im untersuchten Parameterbereich keinen signifikanten Einfluß auf den Werkzeugverschleiß haben. Am Werkzeug erlaubt ein Drallwinkel von 30° einen ruhigen und schwingungsarmen Schnitt. Der signifikante Einfluß von Schwingungen wurde schon in /1/ beschrieben.

Signifikanten Einfluß auf die Keramikeigenschaften und damit auf den Werkzeugverschleiß haben der Bindergehalt des Keramikwerkstoffes und dessen Sintertemperatur. Versuche zeigen den Zusammenhang zwischen diesen Größen auf.

In Bild 4 sind die Verläufe zweier ausgewählter Keramiken (maximaler/minimaler Standweg) dargestellt.

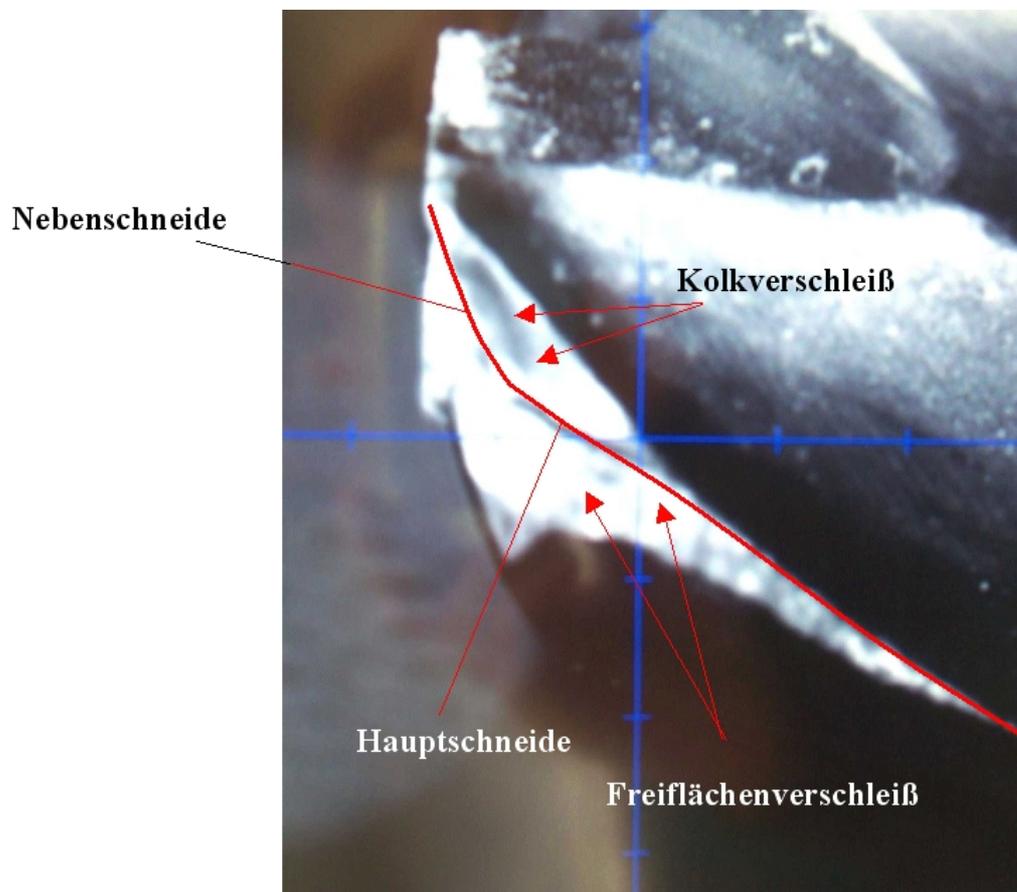
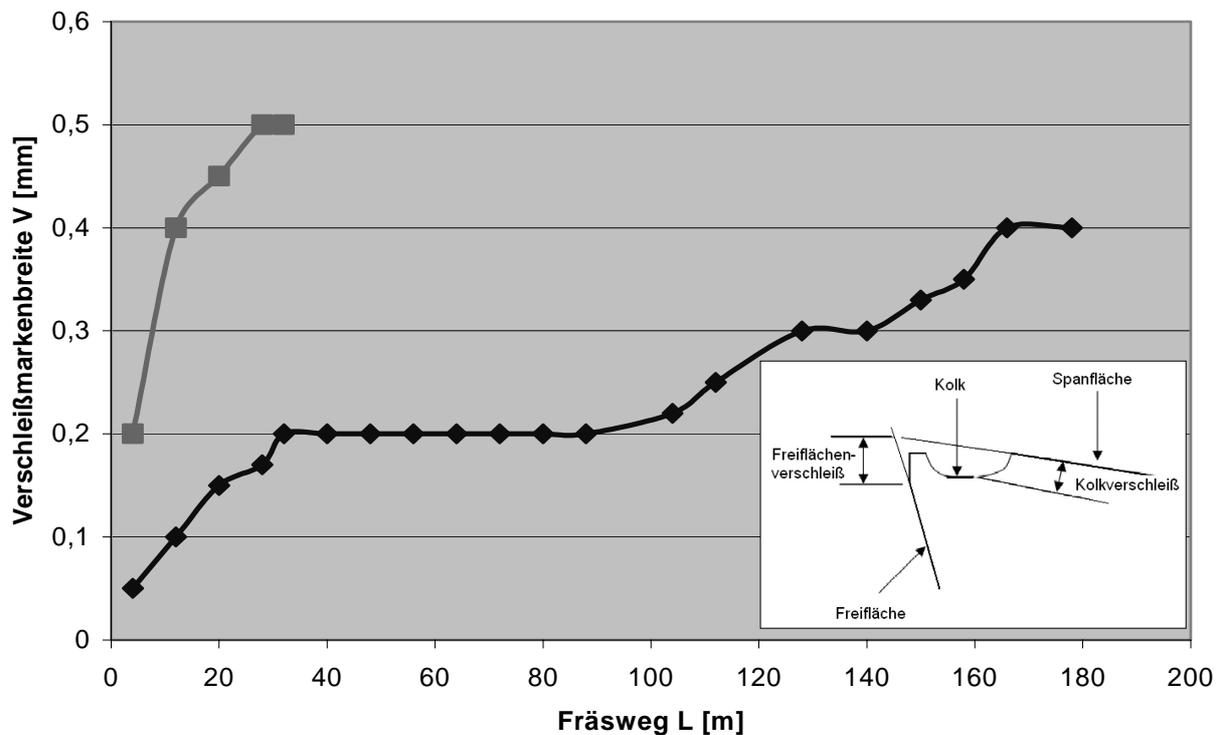


Bild 3: Beim Keramikfräsen auftretender Werkzeugverschleiß

4.1.3. Schnittkraftuntersuchungen

Die beim Fräsen auftretenden Schnittkräfte haben wesentliche Auswirkungen auf die Fräsparameter, das Ergebnis der Fräsbearbeitung und die Auslegung der Fräsmaschine.

Die experimentellen Untersuchungen hatten das Ziel, die wenigen Erkenntnisse zur Größe der Schnittkräfte aus den Vorversuchen zu erweitern und systematisch in Form eines mathematischen Modelles darzustellen.



Schnittbedingungen:

vc = 450 m/min
ap = 5 mm
ae = 5 mm
vf = 10 m/min

Werkzeug:

D = 12 mm
z=2
VHM

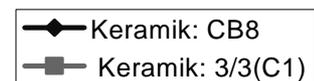


Bild 4: Verschleißverlauf beim Keramikfräsen

Bereits aus diesen Vorversuchen war bekannt, dass der Binderanteil der Keramik (B) und die Sintertemperatur (T) die signifikanten Einflußparameter auf die spezifische Schnittkraft sind.

Für die Prüfung der Aussagefähigkeit und Zuverlässigkeit des Modells und zur Minimierung des Versuchsaufwandes wurden die Versuche mit Methoden der statistischen Versuchsplanung geplant, durchgeführt und ausgewertet.

Da ein Modell für die spezifische Schnittkraft angestrebt war, genügte es, die Tangentialkraft zu bestimmen. Dafür wurde das Werkzeugdrehmoment indirekt über die

Spindelleistung ermittelt. Anhand der Messergebnisse wurden die spezifischen Schnittkräfte für jeden Versuchspunkt berechnet und daraus ein Polynom erstellt. Die

Durchführung des F-Tests lieferte eine sehr gute Korrelation zwischen den gemessenen und berechneten Kraftwerten. Der Zusammenhang läßt sich als Polynom darstellen.

Mit zunehmenden Binderanteil und steigender Sintertemperatur nimmt die spezifische Schnittkraft zu. Zwischen den Parametern Sintertemperatur T und Binderanteil B besteht eine starke Wechselwirkung.

4.1.4. Dynamik des Fräsprozesses

Fräsen ist ein dynamischer Vorgang. Das dynamische Verhalten des Systems Werkzeugmaschine, Werkstück, Spannmittel und Werkzeug (WWSW) hat erheblichen Einfluß auf das Ergebnis der Fräsbearbeitung (hauptsächlich Oberflächengüte am Werkstück) und auf die Werkzeugstandzeit /1/.

Die Werkzeugmaschine war vorgegeben und ihr dynamisches Verhalten näherungsweise bekannt. Die Einspannung des Werkstückes wurde als unendlich steif und ohne Einfluß auf das System angenommen.

Durch den diskontinuierlichen zeitlichen Verlauf der Schnittkräfte wird das System WWSW zu Schwingungen angeregt. Die Anregungsfrequenz wird dabei durch die Drehzahl des Fräswerkzeuges und der Anzahl der Werkzeugschneiden bestimmt. Deshalb wurden unterschiedliche Drehzahlbereiche untersucht. Für die eingesetzte Fräsmaschine und Werkzeuge wurde als günstiger Drehzahlbereich $10000-12000 \text{ min}^{-1}$ ermittelt. Mit den sich aus diesen Drehzahlen ergebenden Schnittgeschwindigkeiten ist die Bearbeitung von Keramiken gut möglich.

Eine wichtige Komponente im System WWSW stellt das Fräswerkzeug dar. Insbesondere bei der Bearbeitung filigraner Werkstücke ist oft das Werkzeug das schwächste Glied im System.

Der maximale Werkzeugdurchmesser und die minimale Werkzeugauskraglänge sind durch die Fräsaufgabe und die Werkzeugmaschine bestimmt. Diese Parameter bestimmen hauptsächlich das dynamische Verhalten des Fräswerkzeuges. Treten durch das Werkzeug verursachte Schwingungen auf, kann man deren Amplitude durch Verringerung der Schnitttiefe begrenzen oder versuchen, mit der Variation der Schnittgeschwindigkeit den Eigenfrequenzbereich des Werkzeuges zu vermeiden. Alle eingesetzten Werkzeuge (Bild 5) wurden diesbezüglich untersucht und die Parameter entsprechend angepaßt.

Die Anzahl der Fräuserschneiden beeinflusst die Eigenfrequenz des Fräasers. Durch den Drallwinkel der Fräuserschneide wird ein kontinuierlicher Eintritt der Schneide in das Material erreicht.

Schruppen	Schichten	Restmaterialbearbeitung
		
<i>Material:</i> Vollhartmetall	<i>Material:</i> Vollhartmetall	<i>Material:</i> Vollhartmetall
<i>Auskraglänge:</i> 60 mm	<i>Auskraglänge:</i> 60 mm	<i>Auskraglänge:</i> 50 mm
<i>Schneidengeometrie:</i> Eckig	<i>Schneidengeometrie:</i> Kugel	<i>Schneidengeometrie:</i> Kugel

Bild 5: Fräswerkzeuge für das Keramikfräsen

Um den Einfluß der Faktoren auf das Arbeitsergebnis des Keramikfräsens zu ermitteln, wurden Fräswerkzeuge mit verschiedener Schneidenzahl (2, 3 und 4 Schneiden) und unterschiedlichen Drallwinkel untersucht (0° und 30°). Werkzeuge mit einen Drallwinkel von 30° und 2 Schneiden zeigten das günstigste dynamische Verhalten. Zahnvorschub und Zeilenabstand haben Einfluß auf die Oberflächenqualität. In Versuchsreihen in denen der Zahnvorschub zwischen $f_z = 0,3-0,5$ mm und die Eingriffsbreite zwischen $a_e = 0,4 - 1,2$ mm systematisch variiert wurden, konnten optimale Parameter für den Schlichtprozeß und die Restmaterialbearbeitung in Abhängigkeit vom Werkzeugdurchmesser gefunden werden.

Die Schnitttiefe ist dagegen nur beim Schruppen von besonderer Bedeutung, weil beim Schichten und der Restmaterialbearbeitung die Zustellung in Z-Richtung durch den Zeilenabstand bestimmt wird. Die Größe der Schnitttiefe ist einerseits für die auftretende Schnittkräfte, andererseits für die Zwischengestalt der geschruppten Oberfläche maßgebend. Bei hoher Schnitttiefe entsteht auf der Oberfläche eine hohe Stufigkeit, die das Aufmaß für das Schichten beeinflusst. Deshalb wurde bei der Prozessauslegung der

Einfluss der Schnitttiefe beim Schruppen mit betrachtet. Hohe Schnitttiefen rufen große Schnittkräfte und daraus große Verformungen im Fertigungssystem und dadurch eine negative Auswirkung auf die Maßgenauigkeit hervor /2/.

4.2. Gießversuche

Entscheidend für die neuentwickelten Keramiken ist ihre Eignung als Formstoff. Gerade in dieser Eigenschaft sind sie extremen Belastungen ausgesetzt. Dieser Aspekt wurde während der Bearbeitung des Themas sehr deutlich und erforderte deshalb sehr intensive Untersuchungen. Die Eignung der Keramik für den Einsatz in der Giesserei wurde unter dem Begriff Giessbarkeit zusammengefaßt.

Die Gießbarkeit der gefrästen Keramikform hängt von mehreren Parametern ab:

- Wärmebeständigkeit,
- Temperaturwechselbeständigkeit,
- chemische Beständigkeit gegen Schmelzen und
- mechanische Festigkeit.
- zerstörungsfreie Entformbarkeit als Voraussetzung der Wiederverwendbarkeit von Formen oder Teilen,
- leichte Zerstörbarkeit der Keramik nach dem Giessen ist erforderlich, um Keramikkerne aus dem Gußteil entfernen zu können,
- erreichbare Oberflächengüte am Gußteil und
- Formfüllungsvermögen insbesondere beim dünnwandigen Stahlguß.

Für die Gießversuche wurden 3 Probewerkstücke ausgewählt (Bild 6).

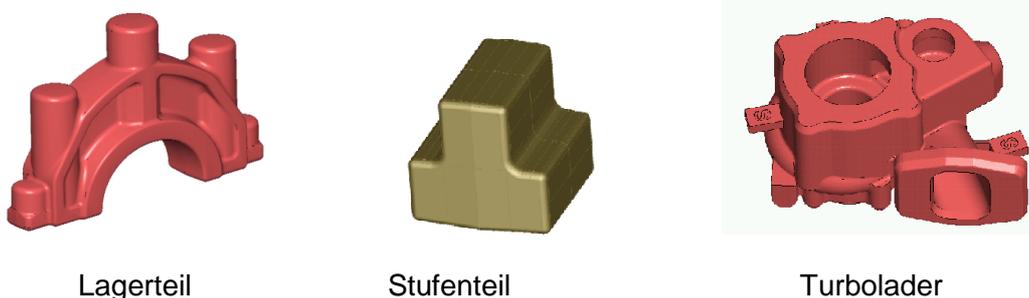


Bild 6: Probewerkstücke

4.2.1 Verfahrensablauf

Die Konstruktion der Formen wurde so gestaltet, das nur die Gußstückgeometrie im Keramikblock abgebildet wird. Anguß, Speiser und Verriegelung liegen hingegen im

umgebenden Sand (Bild 7). Die Vorgehensweise war notwendig, da zu Beginn des Themas keine größeren Keramikblöcke prozeßsicher und wirtschaftlich herstellbar waren.

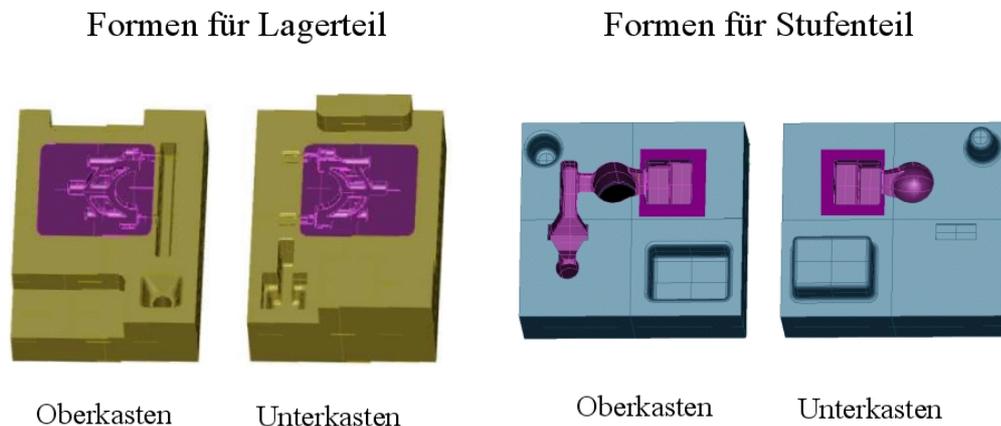


Bild 7: Kostruktion der Keramikformen

Die Herstellung der Keramikformen erfolgte durch das direkte Keramikfräsen, Bild 8. Die Erkenntnisse aus den Fräsversuchen wurden umgesetzt.

Der Fräsprozess besteht aus den Bearbeitungsschritten Schruppen, Schlichten und Restmaterialbearbeitung. Während beim Schruppen eine möglichst schnelle Entfernung eines großen Materialvolumens zur groben Annäherung der Sollgeometrie im Vordergrund steht, hat die Schlichtbearbeitung die Aufgabe, die Endkontur schnell und möglichst genau zu fertigen. Danach werden die nicht mit dem Schlichtfräser erreichbaren Restmaterialbereiche von kleineren Fräsern entfernt.

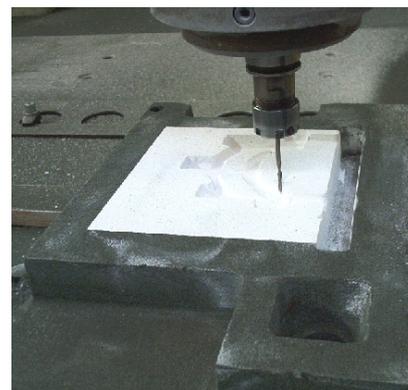
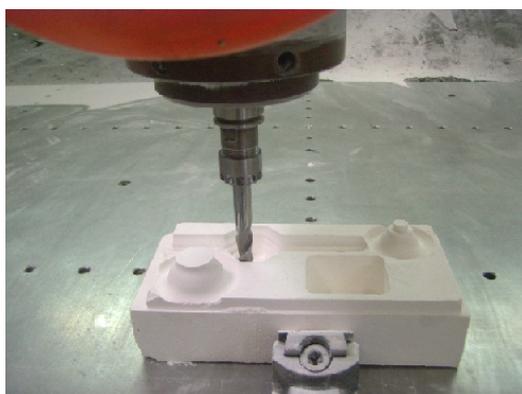


Bild 8: Keramikfräsen

Die gefrästen Keramikformen wurden mit verschiedenen gießereiüblichen Schichten (Graphit-, Zirkon und Molkoschichte) überzogen, um den Einfluss der Schichte auf Oberflächengüte und Entformbarkeit zu untersuchen, Bild 9.

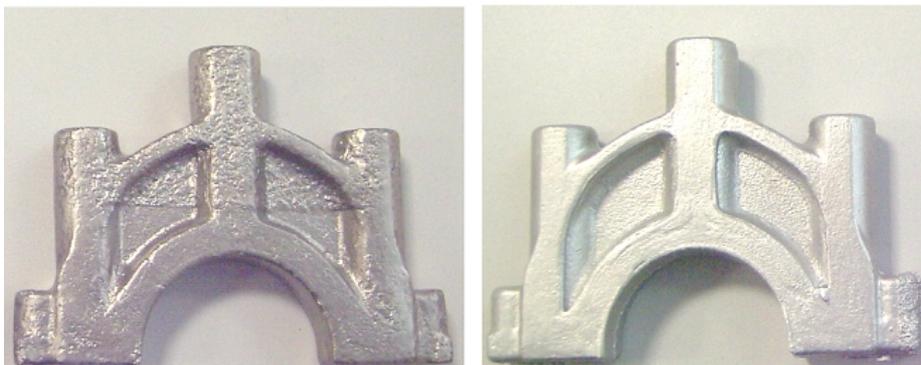
Die Keramikformen wurden mit gießeretechnischen Zubehör versehen und anschließend montiert. Nach dem Abguß und der Erstarrung der flüssigen Metalle in der Form wurde das Gußstück ausgepackt und das Angußsystem entfernt.



Bild 9: Formschichten

4.2.2. Ergebnisse

Die Abgußversuche der Keramikformen mit Aluminium, Grauguß und Stahl waren erfolgreich. Im Vergleich zu einer gefrästen Sandform ist die Oberflächengüte der Gußteile aus der Keramikform wesentlich besser. Im Bild 10 wird dies auch noch einmal deutlich. Der obere Bereich des Stahlgußteiles wurde durch eine Sandform ausgebildet, der untere Bereich durch ein Keramikformsegment (Bild 10 links). In Aluminium kann mit einer geeigneten Schlichtetechnologie nahezu Feingußoberflächenqualität (Rz 20) erreicht werden (Bild 10 rechts).



Stahl

Aluminium

Bild 10: Gussteile

In der ersten Keramikform, die mit Stahl abgegossen wurde, konnte man eine farbliche Veränderung feststellen, was auf eine chemische Reaktion des Stahles mit der Schmelze schließen läßt. Deshalb wurde die Keramik entsprechend angepaßt.

Unter Beachtung des thermischen Ausdehnungsverhaltens und der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Keramik und Metall, lassen sich Komponenten von Keramikformen mehrfach verwenden.

Der Ausdehnungskoeffizient der verwendeten Keramik ist geringer als der von Aluminium oder Stahl. Dies hat zur Folge, daß das Metall auf die Keramik aufschumpft. Ein zerstörungsfreies Entformen ist dann nicht mehr möglich. Deshalb werden die Bereiche der Form, auf die das Metall aufschumpfen kann, als Kerne ausgebildet und für Versuche als Sandsinterteile ausgeführt (Bild 11).

Glatte Oberflächen der Form sind eine weitere Voraussetzung für die gute Entformbarkeit. Bereits die gefräste Oberfläche der Keramikform hat eine geringe Rauheit (Rz 20), die durch die Korngröße der Keramik bestimmt wird. Durch die Optimierung der Schlichtetechnologie ist es gelungen, die Oberflächengüte noch weiter zu verbessern.

Nach dem Abguß und dem vorsichtigen Auspacken des Gußteiles, sind die gesinterten Kerne bzw. deren Reste aus der Keramikform zu entfernen und für den nächsten Abguß

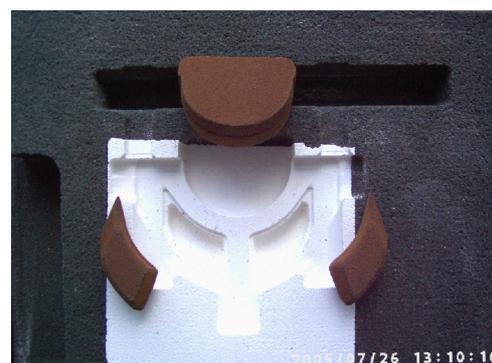
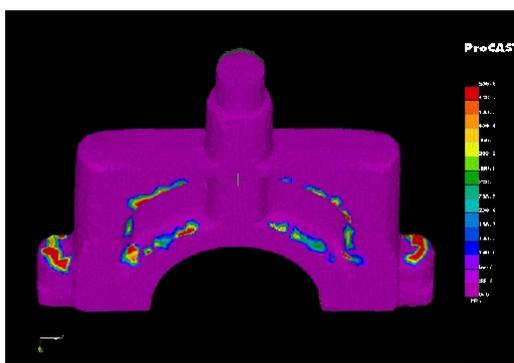


Bild 11: Simulationsgestützte Konstruktion der Keramikform mit Sinterkernen (Sinterteile sind im Bild braun)

durch neue Sinterkerne zu ersetzen.

Von besonderen Interesse ist die Herstellung dünnwandiger Stahlgußteile, die im Sandguß problematisch sind.

Der entscheidende Faktor beim Dünnwandstahlguß ist die Formfüllbarkeit. Diese wird durch die Parameter Fließ- und Formfüllungsvermögen beschrieben.

Für die Untersuchung der Formfüllung wurden zwei Prüfkörper in Betracht gezogen, die Schaufelprobe und die Fließspirale.

Die Originalprüfkörper mit genormten Abmessungen sind für unsere Versuche zu groß. Deshalb wurde hier auf verkleinerte Probekörper zurückgegriffen, welche für Stahlfeinguß entwickelt und erfolgreich angewendet wurden / 3/.

Versuche mit Schaufelprobe

Zunächst wurden Versuche mit zwei Stahlsorten durchgeführt. Das Bild 12 stellt die Geometrie des Prüfkörpers dar. Für die Abgußversuche wurde ein hochlegierter und ein niedriglegierter Stahl verwendet (GX40CrNiSi25-40 und GS20Mn5). In einer Keramikform wurden 3 bzw. 4 Probeteile abgegossen.

t	r
1,0	45,62
1,3	35,36
1,9	24,70

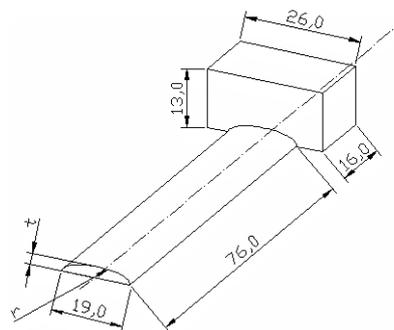


Bild 12: Probegeometrie zur Bestimmung des Formfüllungs- und Fließvermögens

Das Formfüllvermögen und das Fließvermögen ist in hohem Maße vom Kohlenstoffgehalt des Stahles abhängig. Mit der Stahlsorte GX40CrNiSi25-40 (hochlegierter, hochviskoser Stahl, Kohlenstoffgehalt: 0,4%) konnte in der kalten Keramikform eine Formfüllung von 100% erreicht werden. Ebenso in der zum Vergleich mit abgegossenen Sandform (Bild 13).

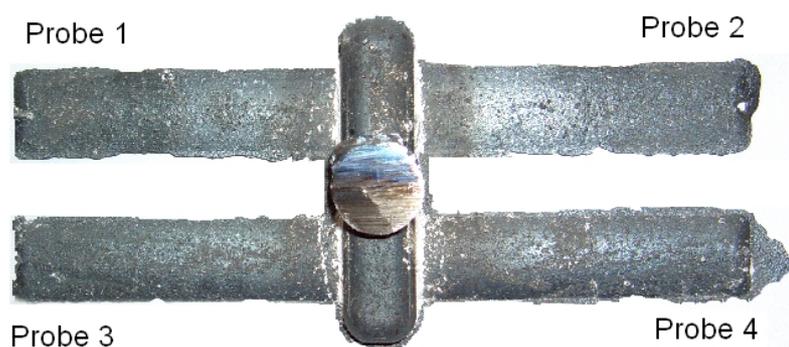


Bild 13: Versuchsergebnisse für GX40CrNiSi25-20

Beim Stahl GS20Mn5 (niedriglegierter Stahl, Kohlenstoffgehalt: 0,2%) sieht das Ergebnis anders aus. In der kalten Keramikform wurde nur eine Formfüllung von 12% erreicht (Sandform 11%). Hier hat die Keramikform den Vorteil, daß man sie auf 900°C vorheizen kann. Beim Abguß in die vorgeheizte Form wurde eine Formfüllung von 81% erreicht (Bild 14).

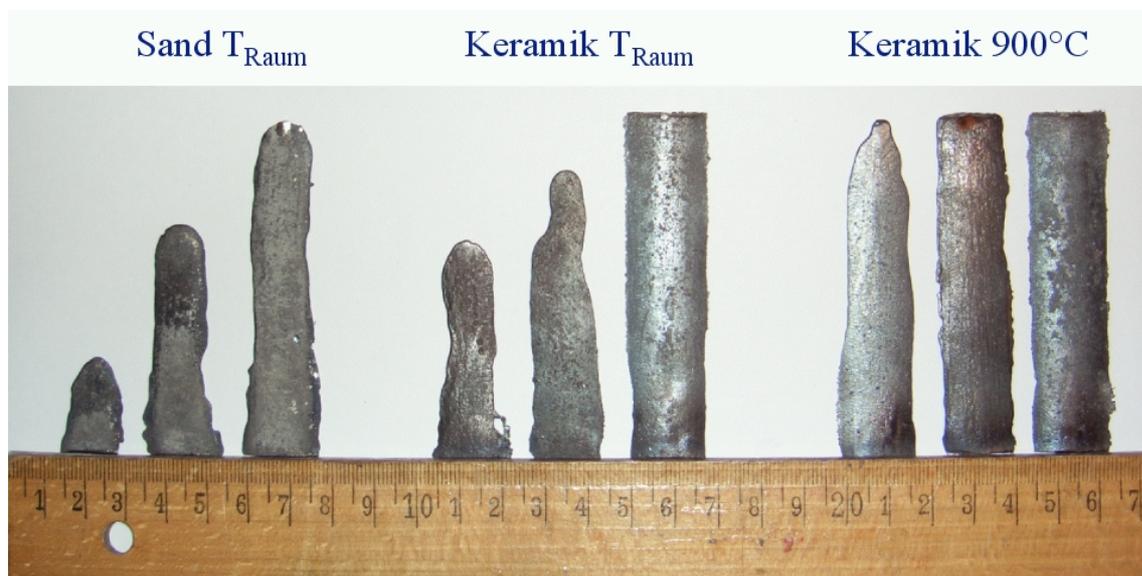


Bild 14: Versuchsergebnisse für den Stahl GS 20Mn5

Versuche mit Fließspirale

Zur Untersuchung des Formfüll- und Fließvermögens von hochlegierten Stählen wurde eine Versuchsreihe mit Fließspiralen durchgeführt. Auch deren Geometrie wurde der Literatur entnommen (Länge: 843 mm, Kanalquerschnitt 3,3x3,6 mm).

Für die Versuchsreihe wurde die Temperatur der Keramikformen systematisch zwischen Raumtemperatur und 850°C erhöht.

Um die Einflüsse der Keramikoberfläche auf das Versuchsergebnis zu verdeutlichen, wurde eine Keramikform mit gießereüblicher Schlichte überzogen. Die Versuchsergebnisse sind im Bild 15 dargestellt.



Bild 15: Versuchsergebnisse für den Stahl GX40CrNiSi25-20

Wie man sieht, haben Formtemperatur und Schlichte einen erheblichen Einfluss auf die Formfüllbarkeit des Stahles in der Keramikformen. Das Vorheizen der Form (Bild 15, mitte) und durch das Schlichten der Form kann das Formfüllvermögen wesentlich verbessert werden. Das maximale Formfüllvermögen wird erzielt, wenn die geschichtete Form vorgeheizt wird.

4.2.3. Literatur

1. Chen, X. Analytische und experimentelle Untersuchungen zur Optimierung der Bearbeitung von Graphitelektroden beim Hochgeschwindigkeitsfräsen (HSC). Shaker Verlag 1999, 118 S.
2. Alijew, R. Prozessoptimierung des dreifunktionalachsigen HSC-FräSENS zur Sicherung der Formgenauigkeit am Beispiel der Bearbeitung von Graphit. Shaker Verlag 2001, 164 S.

3. Friedrich, H.: Abbildungsgüte von Stahlfeinguss in keramischen Formen – Untersuchung ergebnisrelevanter Verfahrensparameter bei Schalenform- und Gießtechnik. Dissertation, RWTH Aachen, 1984.