

Präzisionsfeinguss

Dipl.- Math. K.-H. Wodrazka, PORTEC GmbH Zella-Mehlis

© 2004 Dipl.-Math. K.-H. Wodrazka; Lizenznehmer RTEjournal, weitere Informationen sind zu finden unter: <http://www.dipp.nrw.de/service/dpp/>

urn:nbn:de:0009-2-197

Abstract

Oftmals werden Prototypen und Kleinserien in einem Produktentwicklungsprozess benötigt. Während bei Teilen aus Kunststoff auf dem Markt eine Vielzahl von direkten und indirekten Verfahren mit einer großen Materialauswahl existieren, gibt es bei metallischen Teilen bedeutend weniger Möglichkeiten, diese schnell zu erzeugen. Bei komplexen Geometrien scheiden konventionelle Technologien aus. Oftmals wegen der Machbarkeit bzw. hoher Kosten und langer Fertigungszeiten. Beim Metallsintern bzw. analogen Verfahren (Melting, Cusing, ...) ist die gegenwärtig noch stark eingeschränkte Anzahl der zur Verfügung stehenden Materialien vielfach Ausschlusskriterium. Als alternative Technologie wird deshalb vielfach das Feingießen nach dem Wachsausschmelzverfahren eingesetzt. Damit können präzise Prototypen und Kleinserien in allen gießbaren Materialien sowie einer hohen Oberflächenqualität und Detailtreue erzeugt werden. Setzt man dabei das Vakuum-Differenzdruckverfahren ein, bei dem die Wachstrauben in Küvetten eingebettet werden, stehen innerhalb weniger Tage Feingussteile zur Verfügung.

Im Vortrag wird am Beispiel von zwei Projekten gezeigt, wie sowohl für Kleinserien als auch für die Losgröße 1 mit Hilfe moderner Feingussverfahren äußerst schnell und kostengünstig Teile aus Aluminium- oder Zinklegierungen mit komplexen Geometrien hergestellt werden können.

Im ersten Projekt wird das Herstellen einer Kleinserie von Schaufelrädern mit räumlich gekrümmten Schaufeln für Kühlmittelpumpen des Automobilrennsports dargestellt. Die Geometrie lässt in diesem Fall kein konventionelles Fertigungsverfahren zu. Über Stereolithographiemodell und Silikonform werden Wachsmodelle erzeugt, die mittels Aluminiumfeinguss in das entsprechende metallische Teil überführt werden. Im zweiten Beispiel wird gezeigt, wie ausschmelz- bzw. ausbrennbare Rapid Prototyping Modelle direkt im Feingussprozess eingesetzt werden, um schnell und kostengünstig auch die Losgröße 1 zu realisieren.

Dabei werden auch die Vor- und Nachteile gegenüber dem klassischen Feinguss aufgezeigt.

1. Allgemeines

Oftmals werden Prototypen und Kleinserien in einem Produktentwicklungsprozess benötigt. Während bei Teilen aus Kunststoff auf dem Markt eine Vielzahl von direkten und indirekten Verfahren mit einer großen Materialauswahl existieren, gibt es bei metallischen Teilen bedeutend weniger Möglichkeiten, diese schnell zu erzeugen. Bei komplexen Geometrien scheiden konventionelle Technologien aus. Oftmals wegen der Machbarkeit bzw. hoher Kosten und langer Fertigungszeiten. Beim Metallsintern bzw. analogen Verfahren (Melting, Cusing, ...) ist die gegenwärtig noch stark eingeschränkte Anzahl der zur Verfügung stehenden Materialien vielfach Ausschlusskriterium. Als alternative Technologie wird deshalb vielfach das Feingießen nach dem Wachsausschmelzverfahren eingesetzt. Damit können Prototypen und Kleinserien in allen gießbaren Materialien sowie einer hohen Oberflächenqualität und Detailtreue erzeugt werden. Setzt man dabei das Vakuum-Differenzdruckverfahren ein, bei dem die Wachstrauben in Küvetten eingebettet werden, stehen innerhalb weniger Tage Feingussteile zur Verfügung.

Durch den Feinguss können prinzipiell sehr präzise Teile hergestellt werden. Für bestimmte (Pass-)Maße muss jedoch meist eine konventionelle Nacharbeit vorgesehen werden. Solche Stellen sind mit einem entsprechenden Aufmass zu versehen. Weiterhin ist stets das VDG-Merkblatt P 690 zu beachten, in dem die Standard-Toleranzgrenzen beim Feinguss aufgestellt sind.

In der Folge beziehen sich die Aussagen auf Klein(st)serien oder die Losgröße 1, wie sie in der PORTEC GmbH realisiert, d.h., wenn die verlorenen Modelle aus Wachs mittels Silikonformen bzw. direkt über ein Rapid Prototyping (RP) Verfahren erzeugt werden.

2. Einflussfaktoren

Die Präzision sowie Detailtreue der Gussmodelle sind im Wesentlichen

- vom Datenmodell,
- der Wachs- und Gusschwindigkeit,
- der Geometrie,
- dem Aufheiz- und Abkühlprozess der Silikonform,
- dem Gießsystem (Anschnitte, Speiser) sowie
- der Keramikmasse und dem Ausbrennprozess

abhängig.

Die wenigsten Probleme bereiten Datenmodelle, die unter gusstechnischen Aspekten konstruiert sind. Hier kann durch eine optimale Triangulation der 3D-Daten eine für den Fertigungsprozess hinreichend exakte STL-Datei erzeugt werden, die Ausgangspunkt für

jeden Rapid Prototyping Prozess ist.

Weiterhin kann durch das Platzieren des Bauteils auf der Plattform des RP-Prozesses bzw. mittels datentechnischem Schneiden, Teilefertigung und anschließendem Fügen der Einzelteile das Urmodell am günstigsten gefertigt werden (z.B. Schriftzüge).

Bei ausreichender Erfahrung ist die Schwindungsproblematik, die vorrangig vom eingesetzten Wachs und der Gusslegierung abhängig ist, so gut beherrschbar, dass präzise Feingussmodelle gefertigt werden können. Gemeinsam mit der TU Ilmenau wurde in den Jahren 1996/ 1997 das Schwindungsverhalten neuartiger Feingusswachse untersucht. Für die wesentlichsten Wachsarten und Legierungen werden die Schwindungswerte hinreichend beherrscht. Bei PORTEC beschränkt man sich gegenwärtig auf drei Wachsarten: ungefülltes flexibles, gefülltes und stark gefülltes sprödes Wachs. Durch die unterschiedlichen Färbungen des Wachses sind Verwechslungen ausgeschlossen, wobei generell auf den Auftragsbegleitpapieren alle erforderlichen Informationen vermerkt sind. Auf bestimmten Kundenwunsch werden selbstverständlich auch andere Wachsarten eingesetzt (z.B. Bereitstellung durch einen klassischen Feingießer).

Kritischer das Einschätzen des Schwindungsverhaltens des Modells, wofür eine langjährige Erfahrung von Nutzen ist. Dies betrifft nur die Kleinserien, wenn die Wachsmodelle über Silikonformen gefertigt werden. Hier ist zu beachten, dass sowohl freie als auch behinderte Schwindungen auftreten können und dass bei unterschiedlichen Wandstärken unterschiedliche Schwindungen zu verzeichnen sind (dünnwandige Stellen schwinden relativ stärker). Da Softwaresysteme gegenwärtig im Wesentlichen nur in den 3 Achsen Skalierungen zulassen, müssen bestimmte Flächen speziell behandelt werden (z.B. Offsets oder konstruktiver Einflussnahme). Es kann in besonderen Fällen vorkommen, dass ein zusätzlicher Iterationsschritt vorgenommen werden muss, wenn bei sehr hohen Anforderungen im ersten Schritt die Maße nicht zielgenau erreicht werden konnten.

Mit dem Aufheiz- und Abkühlprozess sowie der Wachstumperatur kann ebenfalls die Schwindung beeinflusst werden. Da im Datenmodell die Gesamtschwindung vorgesehen wird, ist das exakte Einhalten der Parameter Temperatur und Zeit qualitätsbestimmend. Je nach Wachsart steht beim Entformen nur ein bestimmter Temperaturkorridor von wenigen Grad zur Verfügung. Eine zu hohe Temperatur, und damit zu weiches Wachs, führt zu einem „Schmieren“ und Verbiegen, so dass die Geometrie des Modells nicht mehr exakt bestimmt ist. Beim Einsatz des ungefüllten Wachses lassen sich bestimmte Hinterschnitte noch realisieren bzw. Verzüge des Modells korrigieren. Dieses Wachs besitzt einen gewissen Memoryeffekt, so dass man nach einer gezielten Wärmebehandlung wieder ein formgetreues Modell erhalten kann. Bei zu kalten Modellen muss mit einem Zerschlagen des Modells beim Entformen gerechnet werden.

Ganz wesentlich für die Qualität der Feingussteile sind die Anordnung der verlorenen Modelle an der Wachstraube sowie die Gestaltung des Gießsystems.

Nach der Entscheidung der Gussrichtung (fallend oder steigend) muss beachtet werden, dass die Gusschmelze ungehindert, zügig und möglichst ohne Verwirbelungen den Hohlraum ausfüllen kann, der durch die ausgeschmolzenen Modelle entstanden ist. Das angelegte Vakuum beim Gießen unterstützt ein gutes Füllen, insbesondere bei sehr detailreichen und dünnwandigen Teilen. Weiterhin müssen so genannte Speiser vorgesehen werden, um die Volumenkontraktion während der Erstarrung dickwandige Bereiche auszugleichen und so Einfallstellen (Makrolunker) zu vermeiden bzw. Mikroporosität (schwammartiges Gefüge) zu verhindern. Die Lunkerausprägung kann auch über den Einsatz verschiedener Legierungen beeinflusst/ minimiert werden (z.B. Legierung mit höherem Siliziumanteil), wobei jedoch vielfach der Kunde die einzusetzende Legierung vorgibt. Ebenfalls ist das Gussgefüge stark von der Erstarrungsgeschwindigkeit abhängig, der beim Vakuumfeinguss mittels Küvetten nur gering beeinflussbar ist. Eine Diplomarbeit (bis Dezember 2004) beschäftigt sich gegenwärtig mit der Thematik der Verbesserung des Gussgefüges, da hier noch ein wesentlicher Nachteil gegenüber dem klassischen Schalenfeinguss besteht.

Mit der eingesetzten Keramikmasse sowie dem Ausbrennprozesses kann ebenfalls die Qualität der Feingussteile beeinflusst werden. Dies weniger bei den Abmessungen, sondern bzgl. der Detailtreue bzw. Abbildungsgenauigkeit. Im Rahmen eines Forschungsthemas wurden verschiedene Keramikmassen getestet und auf dem Markt verfügbare manipuliert. Dabei ist es der PORTEC gelungen, beim Einbetten des Gießbaumes eine sehr dünnflüssige Masse einzusetzen, die unter Vakuum eine äußerst exakte Abbildung garantiert und trotzdem sehr stabil nach dem Ausbrennen bleibt. Damit wird das Gießen sehr dünner Wandstärken sowie von Bohrungen mit einem hohen Aspektverhältnis möglich. Auf diese Weise sind bereits Bauteile mit relativ langen und dünnen Bohrungen gegossen worden, die normalerweise im Wachmodell geschlossen werden und nach dem Gießen wieder eingebracht werden müssen (2 mm Durchmesser, 10,5 mm lang). Damit wurden und werden aufwändige Nacharbeiten und Kosten für die Kunden vermieden.

3. Präzisionsguss von Klein(st)serien

Als Beispiel dient das Feingießen von Schaufelrädern für Kühlmittelpumpen, die in Hochleistungsmotoren zum Einsatz kommen. Der gegenüber „normalen“ Motoren geforderte höhere Wirkungsgrad hatte zwangsläufig räumlich gekrümmte Schaufeln zur Folge, die durch kein konventionelles Fertigungsverfahren erzeugt werden konnten. Die im Einsatz zu bewältigende Dynamik (in wenigen Sekunden auf ca. 10.000 Umdrehungen) ließ auch keine

mehrteilige Fertigung mit nachfolgendem Fügen zu. Das Feingussverfahren blieb damit die einzige Möglichkeit einer effizienten Herstellung. Die geforderten Stückzahlen bei einer Serie liegen im Bereich von 20 bis 40 Stück.

Das Urmodell wurde über die Stereolithographie erzeugt. Nach Überprüfen des Wirkungsgrades (Modell wurde direkt auf dem Prüfstand eingesetzt) wurden die Bearbeitungszugaben berücksichtigt und nach dem Bestimmen der Schwindung das Datenmodell skaliert sowie das entsprechende STL-Modell gefertigt. Wegen leichter Hinterschneidungen und nichtlinearen Entformungsrichtungen wurde für das Werkzeug ein Silikon geringer Härte und ungefülltes Wachs eingesetzt. Aufgrund der Geometrie (6 Schaufeln) musste in diesem Fall eine achteilige Form erzeugt werden. Um präzise Feingussteile zu fertigen, werden die Silikonformelemente mehrfach mit Metallstiften arretiert. Die Aufheiz- sowie Abkühlzeiten werden auf einem Auftragsbegleitblatt vermerkt und sind exakt einzuhalten. Das Wachsgießen erfolgt bei sehr filigranen Modellen generell in einer Vakuumkammer mit beheizbarem Becher. Nach dem Entformen werden manuell die durch die Trennebenen entstehenden Wachshäute entfernt und die Wachstraube aufgebaut. Alle Wachstrauben werden nummeriert, digital fotografiert und die entsprechende Datei abgelegt.

Damit wird bei Folgeaufträgen die Reproduzierbarkeit der Feingussteile gesichert bzw. bei ähnlichen Geometrien kann das Gießsystem sicherer konzipiert werden. Nach dem Feingussprozess erfolgt das Ausbetten der metallischen Teile aus der gebrannten und damit zerschlämbaren Keramikmasse mittels Hochdruck-Wasserstrahl. Die Endbearbeitung wird mit konventionellen Technologien durchgeführt (Abtrennen des Gießsystems, Verschleifen, Strahlen).

Gegossen werden solche Schaufelräder in einer hochfesten Aluminiumlegierung (A357 – AlSi7Mg0,6), die vielfach in der Luft- und Raumfahrtindustrie eingesetzt wird. Zur Erhöhung der Festigkeit wird noch eine Wärmebehandlung (Lösungsglühen und Warmauslagern) vorgesehen. Damit kann die Zugfestigkeit von ca. 170 N/mm² auf bis zu 260 N/mm² gesteigert werden.

Kleinserien solcher Schaufelräder wurden bereits mehrfach gefertigt. Bei extremen Anforderungen (Formel 1-Bereich) werden gegenwärtig in der PORTEC nur die Wachsmodele gefertigt. Der klassische Schalenfeinguss wird in Kooperation realisiert, da bei diesem zurzeit noch bessere Gefüge und höhere Festigkeiten erzielt werden.

Die geforderten Parameter wurden allesamt erfüllt, alle Maße lagen im vorgegebenen Toleranzbereich. Die Schaufeln (auslaufend bis ca. 0,8 mm) hatten nach dem Gießen die exakten Endkonturen, es brauchten nur noch die vorgesehenen Nacharbeiten erfolgen (Abdrehen auf passgenauen Durchmesser, Einbringen der Nabenkontur). Der Wirkungsgrad

konnte von vordem 35 bis 50 % auf 68 % erhöht werden. Die Durchlaufzeit für solch eine Serie liegt ab Übermittlung der freigegebenen Daten bis zum Versand bei etwa 10 Arbeitstagen. Bei Einbeziehung eines klassischen Feingießers werden ab Übergabe der Wachsmodele mindesten 14 Arbeitstage zusätzlich benötigt.

4. Feingussteile in Losgröße 1

Von Kundenseite wurde des Öfteren der Wunsch geäußert, metallische Teile auch in der Losgröße 1 herzustellen. Bei dieser Stückzahl ist der Weg über ein Urmodell – Silikonform – Wachsmodele und anschließendem Feinguss oftmals schon zu lang, insbesondere aber teuer. Aufgrund der auf dem Markt verfügbaren Metallpulver schied Sintern bisher stets aus. Feingussversuche mit QuickCast-Modellen über die Stereolithographie brachten die allseits bekannten Restascheprobleme. Benchmarktests mit gesinterten Polystyrolmodellen verschiedener Hersteller (EOS bzw. 3D System/ DTM) fanden bei den PORTEC-Kunden keine Akzeptanz. Die Rauigkeit der Oberfläche wurde noch hingenommen, die Konturschärfe war jedoch meist nicht ausreichend.

Versuche mit Modellen von der Oktober 2002 bei der PORTEC installierten FDM-Anlage Titan brachten dagegen eine hohe Kundenzufriedenheit. Die größere Schichtstärke von 0,12 bis 0,25 mm beim Aufbau der FDM-Modelle (Sintern 0,1 mm) und die damit bei den Feingussteilen ersichtliche Stufung wurde hingenommen, da andererseits die gegossenen Metallteile in ihren Abmessungen äußerst präzise und verzugsfrei waren.

Der Ablauf des Fertigungsprozesses ist ganz analog dem Weg über Wachsmodele. Ein großer Vorteil besteht noch darin, dass keinerlei Wachsschwindung oder das Verhalten des Wachses beim Abkühlen in der Silikonform beachtet werden muss. Um beim Ausbrennen des Modells die Umwelt nicht zu belasten, ist an dem entsprechenden Ausbrennofen eine Nachverbrennungsanlage angeschlossen.

Mit einem konkreten Projekt trat Anfang 2003 die Brose GmbH Coburg, Marktführer in Europa bei der Produktion von Fensterhebern für die Automobilindustrie, an die PORTEC heran. Es waren in kürzester Zeit 8 verschiedene Mitnehmer aus Aluminium für verschiedene Einbau- und Montageversuche, einschließlich Vorführung beim Kunden, herzustellen. Solche Prototypen wurden bisher durch Fräsen gefertigt. Es wurde vorgeschlagen, die verlorenen Modelle aus Polycarbonat (PC) über das FDM-Verfahren für den Feinguss zu erzeugen, wobei auf die prozessbedingten Schichtungen hingewiesen wurde. Eine kleinere Schichtstärke als 0,25 mm wurde verworfen, da sich dabei der Fertigungsprozess um einen Tag verlängert hätte und die zur Verfügung stehende Zeit der kritischste Faktor war.

Folgender Ablauf wurde realisiert:

- 1.Tag: Datenumwandlung CATIA – STL, Skalierung, Vorbereitung Job, Start FDM
2. Tag: Entfernen Stützen, Aufbau Gießbaum, Einbetten, Ausbrennen der Modelle
3. Tag: Aluminiumfeinguss, Ausbetten
4. Tag: Mechanische Nacharbeit, Versand

5. Ergebnis:

alle Anforderungen des Kunden wurden voll erfüllt. Die Mitnehmer aus Aluminiumfeinguss waren so präzise, dass sie ohne jegliche Nachbearbeitung zum Einsatz kamen. Die Montage von Mitnehmer-Anbauteilen erfolgte problemlos. Die Teile wurden beim Kunden in die Fahrzeugtür eingebaut und durchliefen erfolgreich mehrere Funktionstests.

Gegenüber der konventionellen Fertigung, die 13 Arbeitstage gedauert hätte, wurde eine Zeiteinsparung von fast 70 % erreicht. Da gleichzeitig die Kosten über das Feingießen zusätzlich um 30 % geringer waren, wurde dieses Projekt ein voller Erfolg und hatte bereits eine Reihe weiterer Projekte zur Folge.

Zwischenzeitlich wurden weitere Projekte auch mit ABS-Material realisiert, welches neben dem hochtemperaturbeständigen PPSU auf der FDM-Anlage Titan eingesetzt werden kann. Auch dieses Material zeigte keinerlei Restascheprobleme, so dass es gleichwertig zur Erzeugung verlorener Modelle verwendet werden kann. Dies hat zwei Vorteile: ABS-Modelle können in kleineren Schichtstärken von bis zu 0,12 mm gefertigt werden und im Auftragsfall braucht nicht zwingend notwendig auf der FDM-Anlage ein Materialwechsel mit erneuter Kalibrierung stattfinden.

Der Einsatz von FDM-Modellen für eine größere Anzahl von Feingussteilen ist im Einzelfall zu prüfen. Betrachtet man nur die Kosten, liegt der break-even meist bei etwa 3 Stück. Zeitvorteile ergeben sich nur bei relativ kleinen Dimensionen. Bei hohen Anforderungen an die Oberflächenqualität ist der Einsatz von Wachsmodellen absolut vorzuziehen.

6. Kontaktangaben

Dipl.-Math. K.-H. Wodrazka
Portec GMBH
Am Köhlersgehäu 32
D-98544 Zella-Mehlis