



FOTOS: DGH GROUP, DRUCKGUSS HEIDENAU

Prozessoptimierung im Druckgießverfahren

Laserstrahlgeschmolzener Werkzeugeinsatz im Praxistest

VON NANCY GERTH, ANDREAS FISCHER, INGOLF HAMANN UND HELFRIED SAUER, DOHNA, BERNHARD MÜLLER, THOMAS RÄDEL, MATHIAS GEBAUER UND THOMAS TÖPPEL, DRESDEN

Hochleistungsbauteile benötigen Hochleistungsqualität – diese Forderung aus der Automobilindustrie wird insbesondere auch im Motorenbau deutlich. Innovative Motorenkonzepte offerieren vor allem Verbesserungen in Drehmoment, Leistung und Wirkungsgrad – Fortschritte, welche zu hohen thermomechanischen Beanspruchungen der Bauteile, speziell der Leichtbaukomponenten, führen.

Dieser Trend stellt auch die Druckgussbranche vor immer wieder neue Herausforderungen. In der Praxis gestaltet sich

das Herstellen komplizierter Druckgussteile oft sehr schwierig, da eine Reihe von Gussfehlern wie zum Beispiel Kaltfließstellen, Ziehriefen, Klebstellen, Gießgrate, Einschlüsse, Einfallstellen oder Brandrisse die Qualität beeinträchtigen. Eine zentrale Rolle spielt an dieser Stelle das Thema Porosität, bei der es sich um Schwindungs-

porosität oder Gasporosität handeln kann.

Schwindungsporosität, auch als Erstarrungsporosität und Lunker bezeichnet, ist Folge thermophysikalischer Eigenschaften der Gusswerkstoffe während der Erstarrung und äußert sich in Form von Volu-

In der Druckgießform verbauter, laserstrahlgeschmolzener Werkzeugeinsatz unter Produktionsbedingungen.

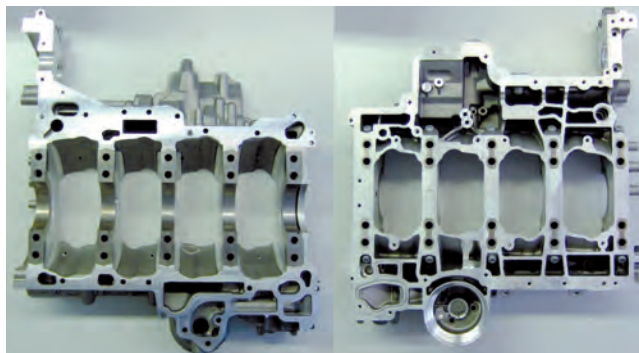


Bild 1: Audi-Lagertraverse V8-TFSI – Ansicht beidseitig.

mendefiziten. Gasporosität kann aufgrund thermodynamischer Ursachen in Form von Gasausscheidungen bei der Erstarrung auftreten als auch aufgrund strömungsmechanischer Ursachen in Form von Gaseinschlüssen vorkommen [1].

Aufgrund der Brisanz soll das Fehlerbild der Porosität in dieser Arbeit erneut aufgegriffen und am Beispiel des Druckgussteils Lagertraverse V8-TFSI der Audi AG erläutert werden. Dabei wird primär der Bauteilbereich des Ölfiltertopfes betrachtet, da diese Zone einen Brennpunkt im Druckgießverfahren und in der Qualitätsbeurteilung der Motorkomponente darstellt. Die Untersuchungen wurden unter realen Produktionsbedingungen durchgeführt.

Die Audi-Lagertraverse V8-TFSI und ihre Problemzonen in der Fertigung

Der neu entwickelte 4.0 I-V8-TFSI-Motor von Audi verbindet Effizienz und Performance in einem innovativen Hochleistungsaggregat. Mit einer Leistung von bis zu 382 kW (520 PS) und einem Drehmoment von bis zu 650 Nm im Drehzahlbereich von 1700 bis 5500 1/min zeigt der Biturbo Premiumcharakter. Er überzeugt durch einen angemessenen Verbrauch sowie eine leichte und kompakte Bauweise. Der Grundmotor besteht aus dem 90°-V-Zylinderkurbelgehäuse und dem unterhalb angelagerten Bedplate, der Lagertraverse [2]. Diese wird im Druckgießverfahren in der Legierung EN AC-Al Si9Cu3(Fe) hergestellt und besitzt zur Optimierung in Festigkeit, Akustik und Hauptlagerung eingegossene Kurbelwellenlagerdeckel aus Sphäroguss (Bild 1).

Die Lagertraverse wurde bereits im Entwicklungsstadium als sehr komplexes Bauteil eingestuft. Hohe Anforderungen seitens der Audi AG führten zu einer besonders sensiblen Betrachtungsweise der Gestaltung und Fertigung des Druckgussteils hinsichtlich der Hauptkriterien Druckgusslegierung, Druckgießtechnologie und Druckgießform. Dabei wurden entsprechende Einflussgrößen wie Eigenschaften der Legierung, Prozessparameter, technologische Parameter der Druckgießmaschine, Gestaltung der Druckgießform unter Verwendung eines optimalen Anguss- und Entlüftungssystems wechselseitig abgestimmt und auch unter Einsatz der numerischen Simulation abgesichert.

Nach ersten Versuchsreihen in der Fertigung befand sich die komplizierte Lagertraverse auf einem ersten Basisstand, der kontinuierlich weiterentwickelt wurde. Dabei lieferte die Qualitätsüberwachung, -dokumentation und -bewertung die Grundlagen für die andauernde Prozessanalyse

KURZFASSUNG:

Im Premium-Segment der Motorenklassen bringt die AUDI AG mit dem neuen 4.0 I-V8-TFSI-Motor nicht nur Fahrspaß auf die Straße, sondern auch ein umweltfreundliches Hochleistungsaggregat auf den Markt. Um den hohen Ansprüchen an Gewicht, Leistung und Emissionsverhalten gerecht zu werden, liefern auch Leichtbaukomponenten wie Gussteile aus Aluminium einen bedeutenden Beitrag.

Die zunehmende Komplexität der Bauteile stellt eine große Herausforderung für die Druckgussindustrie dar, da komplizierte Bauteile zunächst zu Nachteilen in der Produktqualität und hinsichtlich der Herstellungskosten führen können. Um die Wirtschaftlichkeit der Gussteile zu sichern, sind oftmals neue Wege im Entwicklungs- und Fertigungsprozess zu gehen.

Für den 4.0 I-V8-TFSI-Motor ist an dieser Stelle exemplarisch die Lagertraverse anzuführen (Bedplate). Das Bauteil wird im Druckgießverfahren in der Legierung EN AC-Al Si9Cu3(Fe) hergestellt. Die Lagertraverse stellt das Unterteil des Zylinderkurbelgehäuses dar und beinhaltet eingegossene Kurbelwellenlagerdeckel aus Sphäroguss (GJS – Gusseisen mit Kugelgraphit).

Im herkömmlichen Druckgießverfahren hergestellt, kann das Bauteil nur schwer die anspruchsvollen Qualitätskriterien des Premiumsegments erfüllen. Im Rahmen einer prozessorientierten Betrachtungsweise wurden in mehreren Schritten der Prozesskette erfolgreich Optimierungen durchgeführt, sodass die Produktqualität der Lagertraverse kontinuierlich gesteigert werden konnte. Dennoch stellt das Hauptproblem im Druckgießverfahren – das Auftreten von Porosität – ein zentrales Ausschussthema dar, wie in den Betrachtungen des Bedplates nachgewiesen werden konnte. Laboruntersuchungen zeigen lokale Gas- und Erstarrungsporosität im analysierten Bauteil.

Hochleistungsmotoren unterliegen massiven thermischen und mechanischen Beanspruchungen. Um entsprechend statische und dynamische Festigkeiten zu garantieren und gleichzeitig Bauteilundichtigkeiten zu vermeiden, sind auftretende Porositätsvolumina zu minimieren und es ist ihnen präventiv zu begegnen. In vorangegangenen Prozessschrittuntersuchungen erwies sich die Geometrie des Ölfiltertopfes als eine kritische Zone. In diesem Bereich treffen die Funktionsanforderungen des Bauteils und die gießtechnischen Bedingungen des Prozesses aufeinander. Eine Methode zur Reduktion derartiger Porositätsvolumina stellt das Einbringen einer zusätzlichen Temperierung im Bereich des Ölfiltertopfes der Lagertraverse dar. Dabei bedient man sich lokal der konturnahen Kühlung des Gießwerkzeuges. Unter realen Produktionsbedingungen wurde dazu in der temperaturkritischen Zone des Angusses, im Bereich Ölfiltertopf, ein Werkzeugeinsatz implementiert. Dieser beinhaltet querschnittsoptimierte Kanalsysteme nahe der Werkzeuoberfläche und wurde als generativ gefertigtes Hybridbauteil im Laserstrahlschmelzverfahren hergestellt. Über einen separaten Temperierkreislauf wurde eine gezielte Kühlung des Werkzeugeinsatzes realisiert. In mehreren Optimierungsschleifen konnten sowohl die Temperierung des Werkzeugeinsatzes angepasst als auch Prozessparameter infolge der neu eingesetzten Technologie angeglichen werden.

Durch die Anwendung der konturnahen Kühlung konnten der Porositätsanteil im Bereich Ölfiltertopf deutlich reduziert und weitere prozessrelevante Parameter wie die Zykluszeit gesenkt werden. Der wesentliche Ausschussfaktor wurde minimiert, wodurch eine Reduzierung der Herstellungskosten herbeigeführt werden konnte. Der laserstrahlgeschmolzene Werkzeugeinsatz erweist sich in den Untersuchungen als praxistauglich und offeriert zukünftig weiteres Potential in der Druckgießtechnologie. Schließlich kann durch die kooperativ erfolgte Entwicklungsarbeit im Bereich Prozessoptimierung ein entscheidender Beitrag zur Qualitätssicherung der Lagertraverse des 4.0 I-V8-TFSI-Motors im Premiumsegment geleistet werden.

und die Erstellung sowie Umsetzung entsprechender Maßnahmepläne zur Optimierung des Druckgussteils. In der Ausschussermittlung und -analyse wurden lokal Fehlerstellen wie zum Beispiel Saugstellen, Kaltlauf und Warmrisse registriert. Diese Fehlerbilder sind meist thermischer Natur

[3] und konnten mithilfe von Anpassungen im Wärmemanagement, aber auch in der Feinabstimmung der Prozessparameter verbessert werden. Die Schwierigkeiten lagen im Besonderen in den auftretenden Porositäten, die vor allem im Bereich des Ölfiltertopfes ein kritisches Aus-

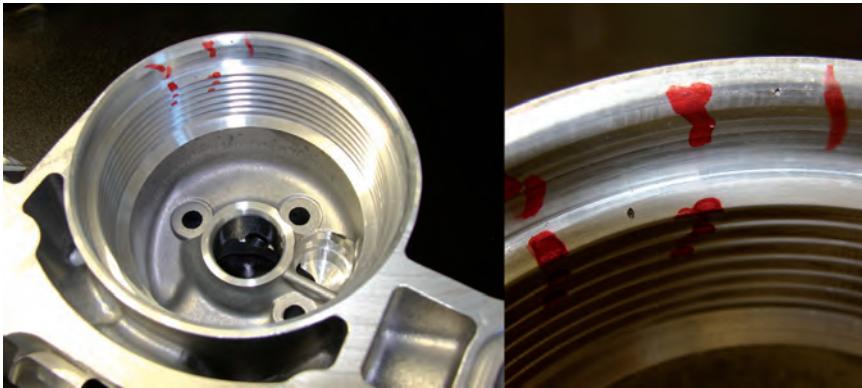


Bild 2: Porosität im Bereich Ölfiltertopf der Lagertraverse (rechts Zoomdarstellung).

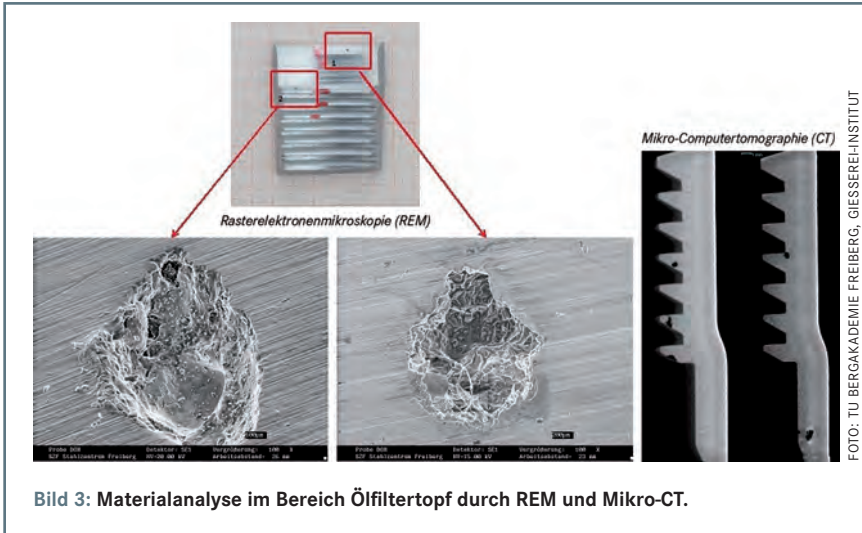


Bild 3: Materialanalyse im Bereich Ölfiltertopf durch REM und Mikro-CT.



Bild 4: Laserstrahlgeschmolzener Werkzeugeinsatz.

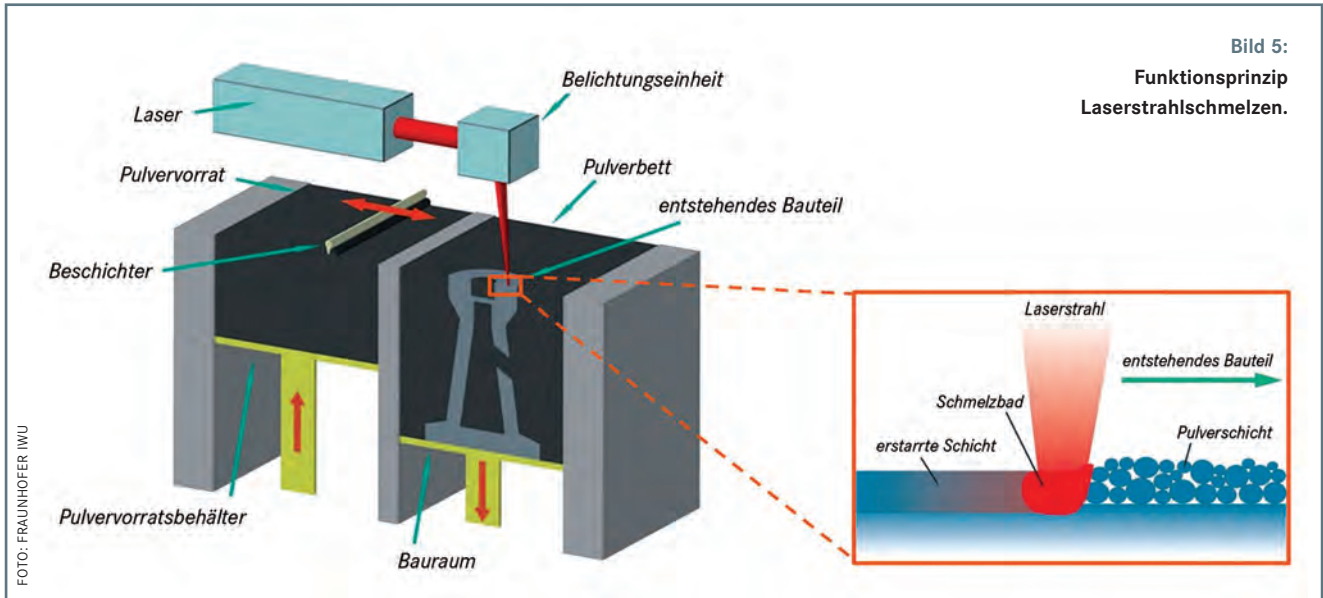
schussthema darstellten. Bild 2 gibt Aufschluss über die Lage der Porosität am Bauteil und ihr Ausmaß.

Die Porosität trat in verschiedenen Bereichen des Ölfiltertopfes auf, sowohl in Form von Mikro- als auch Makroporosität. Vor allem die Mikroporosität konnte weder durch das Röntgenverfahren, noch durch ein CT-Verfahren der gesamten Lagertraverse eindeutig spezifiziert werden. Im Weiteren wurden in Zusammenarbeit der beteiligten Einrichtungen wissenschaftliche Materialanalysen in Form von Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Mikro-CT durchgeführt [4], wodurch die problematischen Bereiche identifiziert und ihre Ursachen ermittelt werden konnten (Bild 3).

Die REM-Aufnahmen zeigen Poren mit stark zerklüfteter Oberfläche, die einzelne Dendritenspitzen und eutektische Bereiche erkennen lassen, als auch Poren, deren Oberfläche mit einer Oxidschicht überzogen ist (glattwandige Bereiche) und Dendritenspitzen aufweist. Es handelt sich um eine Mischform der Gas- und Speisungsporosität. Darauf folgende Maßnahmen, beispielsweise in der Schmelzebehandlung, in der Prozessführung als auch in einer verbesserten Prozesstechnik sowie auch in der Umgestaltung des Angussystems im Formwerkzeug führten zu einer Ausschusssenkung des Fehlerbildes, jedoch nicht zur nachhaltigen Beseitigung. Die Forderung nach minimalen zulässigen Grenzwerten der Porengröße in der jeweiligen Zone des Ölfiltertopfes resultierte aus dem Sicherheitsaspekt, unter dem gewährleistet sein musste, dass der zu montierende Ölfiltertopf beim Einschrauben nicht beschädigt wird und ebenso der Dichtring keine Defekte erleidet. Weiterhin musste sichergestellt sein, dass Materialermüdung oder Bauteilwandzerstörung ausgeschlossen werden können und im Betrieb des Bauteils kein Öl abdiffundiert.

Konturnahe Kühlung mittels generativer Fertigung

Vor diesem Hintergrund widmete man sich erneut der Thematik Temperierung, bei der man sich die Aufgabe stellte, gezielt Bereiche formnah kühlen und kleinste Kühlkanalsysteme integrieren zu können, da einer üblichen Formtemperierung aufgrund der Bauteilwanddicken und -abmaße hier Grenzen gesetzt waren. Dabei bestand der Zielkonflikt darin, dass die komplizierte Lagertraverse konstruktionsbedingt einen hohen Energieeintrag benötigt, um ein hochwertiges Formfüllen zu gewährleisten, jedoch der sich im Anguss befindliche Bereich des Ölfiltertopfes im Erstarrungsverhalten unter der hohen Dynamik der Schmelze leidet. Um die Qualität der Lagertraverse weiterhin absichern zu kön-



nen, bediente man sich im Rahmen einer Kooperation der Anwendung der konturnahen Kühlung mittels eines separat in der Druckgießform integrierten Werkzeugeinsatzes, welcher im Laserstrahlschmelzverfahren hergestellt wurde. Bild 4 zeigt die Applikation als einzelnes Teilwerkzeug.

Im Folgenden soll das Verfahren der konturnahen Kühlung mittels generativer Fertigung näher erläutert werden.

Verfahrensprinzip Laserstrahlschmelzen für Druckgussanwendungen

Die Fertigung von Werkzeugen oder Werkzeugmodulen durch generative Fertigungsverfahren besitzt besonders im Hinblick auf die gestalterischen Freiheiten einen großen Vorteil gegenüber der konventionellen Werkzeugfertigung. Beim Laserstrahlschmelzverfahren (Bild 5) – eine Untergruppe der generativen Fertigungsverfahren – bildet Metallpulver das Ausgangsma-

terial für die Herstellung von komplexen Bauteilen und Werkzeugen. Auf der Basis der 3-D-CAD-Daten der zu fertigenden Komponente wird das Bauteil mit Hilfe einer speziellen Software virtuell in dünne Schichten zerlegt. Die Daten der Schichten nutzt der Laser, um das reale Bauteil anschließend Schicht für Schicht vollautomatisch wieder aufzubauen. Durch den Laser wird das Metallpulver selektiv aufgeschmolzen und erstarrt nach der Abküh-

lung zu einem festen Körper. Das Bauteil entsteht somit durch das schichtweise Aufbringen von Material („Generierung“) und nicht durch Abtragen.

Aufgrund ihrer großen geometrischen Freiheiten bieten generative Fertigungsverfahren, insbesondere das Laserstrahlschmelzen, ein hohes Potential zur Fertigung gekühlter Druckgießwerkzeuge. Die schichtweise Fertigung der Werkzeuge erlaubt eine nahezu beliebige Gestaltung werkzeuginnerer Hohlräume und Kanalsysteme nahe und konform zur Werkzeugoberfläche (**Bilder 6 und 7**). Durch den Einsatz von serienmäßigem Werkzeugstahl stellt es bereits heute eine ernstzunehmende Alternative zu klassischen Fertigungsverfahren wie Zerspanen oder Gießen dar [5, 6].

Bisher ist in Werkzeugen für das Aluminiumdruckgießen eine gezielte Temperierung einzelner Bereiche nahe der Werkzeugkontur nur sehr aufwendig und mit Einschränkungen realisierbar. Das Resultat daraus ist eine mangelhafte Erzielung der Solltemperatur und oft eine unzureichende Wärmeabfuhr in den kritischen Bereichen. Im Formenbau haben sich generativ gefertigte Werkzeuge mit konturnaher Kühlung bzw. Temperierung bei Spritz- und Druckgießformen bereits bewährt. Dabei werden einzelne Werkzeug-

bereiche durch die Anordnung von Kühlkanälen sehr dicht unterhalb der Werkzeugkontur gezielt gekühlt.

Realisierung in Hybridbauweise und Optimierung der Kühlstrukturen

Um eine möglichst wirtschaftliche Fertigung im vorliegenden Anwendungsfall zu realisieren, wurde der Werkzeugeinsatz in Hybridbauweise hergestellt. Darunter versteht man die Kombination von einem konventionell vorgefertigten Werkzeuggrundkörper und einer generativ darauf aufgebauten Funktionsgeometrie, wie zum Beispiel eine Werkzeugtemperierung. Dies stellt die bestmögliche Synthese aus größtem Mehrwert, kurzer Fertigungszeit und möglichst geringen Kosten dar. In diesem Fall wurde sowohl für den Werkzeuggrundkörper als auch für den generativ aufzubauenden Funktionsbereich der gleiche Werkzeugstahl gewählt. Kombinationen verschiedener Stahlsorten sind jedoch ebenfalls umsetzbar. Die Verbindungsfläche zwischen Grundkörper und Funktionsgeometrie wird vor Beginn des generativen Fertigungsprozesses geschliffen und für eine möglichst hohe Absorption der Laserenergie zusätzlich gestrahlt. Hierdurch wird gewährleistet, dass die Oberfläche des Grundkörpers beim Aufbau der ersten Schichten der Funktions-

geometrie mit aufgeschmolzen wird und sich der Grundkörper so mit dem generativen Teil des Werkzeugeinsatzes stoffschlüssig verbindet.

Die Verarbeitung von metallischen Serienwerkstoffen liefert Werkzeugeinsätze mit Serieneigenschaften. Dabei unterscheiden sich die konventionellen und laserstrahlschmolzenen Werkstoffe in wesentlichen Eigenschaften, wie Dichte, Zugfestigkeit und erreichbare Härte nach der entsprechenden Wärmebehandlung, annähernd nicht voneinander.

Durch den Einsatz des generativen Laserstrahlschmelzverfahrens war es möglich, sich bei der Entwicklung des Kühlsystems auf die Funktionalität bzw. den Wirkungsgrad zu konzentrieren und die Fertigungsmöglichkeit in den Hintergrund rücken zu lassen.

Ausgehend von den Kühlwasseranschlüssen im Gesamtwerkzeug wurde unter anderem mit Hilfe von numerischer Simulation ein anforderungsspezifisch optimiertes Kühlsystem entwickelt. Dabei dienten numerische Simulationen zum einen als Hilfsmittel, um einen möglichst geringen Abstand zu Kontur bei gleichzeitig ausreichender Festigkeit des Werkzeugeinsatzes zu gewährleisten (FE-Simulation) und zum anderen zur stufenweisen Optimierung des Kühlsystems (thermische Si-

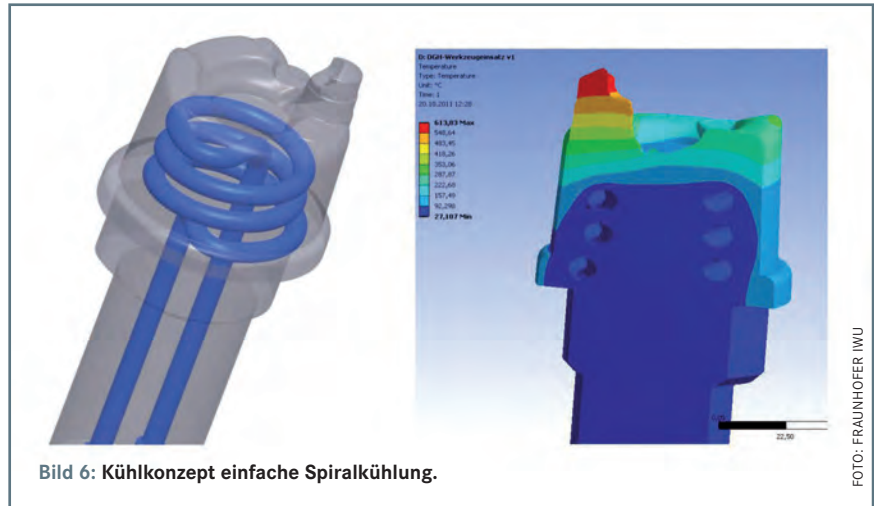


Bild 6: Kühlkonzept einfache Spiralkühlung.

FOTO: FRAUNHOFER IWU

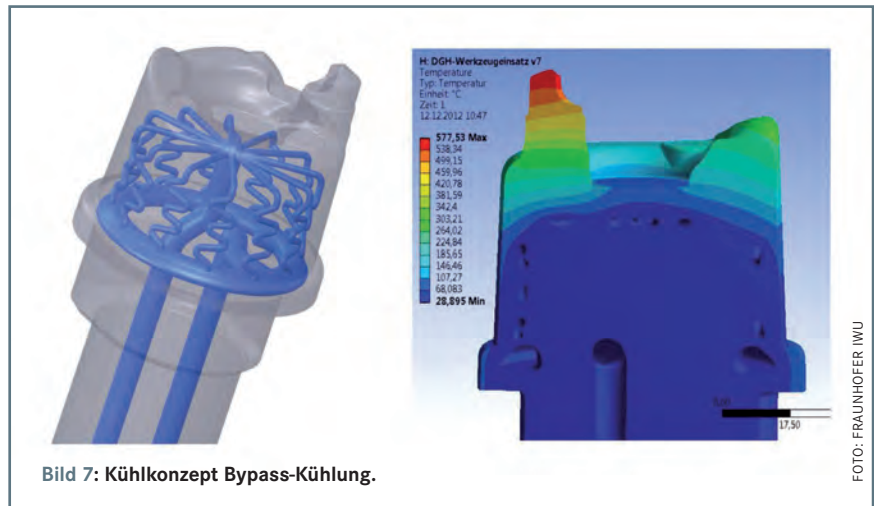


Bild 7: Kühlkonzept Bypass-Kühlung.

FOTO: FRAUNHOFER IWU

mulation), ausgehend von einer einfachen Spirale (siehe Bild 6) bis hin zu einem komplexen Kanalsystem (siehe Bild 7). Generell wurde bei der Konstruktion der Kühlung darauf geachtet, dass die Summe der Einzelquerschnitte der Kühlkanäle dem Querschnitt des Zu- bzw. Rücklaufs entspricht. Dies gewährleistet eine gleichmäßige Verteilung des Kühlmediums über alle Kanäle und somit eine möglichst homogene Temperaturverteilung. Nur durch den Einsatz der generativen Fertigung war es möglich, selbst bei einem derart komplexen Kühlsystem große Radien bei der Kanalführung und großzügig verrundete Übergänge zu realisieren, um die Druckverluste so gering wie möglich zu halten.

Laserstrahlgeschmolzener Werkzeugeinsatz im Praxistest

Der spezielle Werkzeugeinsatz wurde zunächst als Basisversion in der Entwicklungsphase der Lagertraverse im Druckgießwerkzeug verbaut und eingefahren, anschließend im Serieneinsatz als Nachfolgeversion mit optimierten Kühlkanälen ausgestattet.

In den ersten Testläufen ging es zunächst um den gesicherten Einbau des Werkzeugeinsatzes und den generellen

Nachweis seiner Kühlfunktion. Dafür wurde das Bauteil in der Druckgießform verschraubt und die Kühlkanäle über ein speziell ausgewähltes Temperiergerät und die entsprechenden Temperierschläuche mit dem Kühlmedium Wasser versorgt. Daraufhin wurden Temperierphasen gefahren, in denen man schrittweise die Temperierung in einem Min-Max-Range modifizierte. An dieser Stelle war ein erkennbarer Einfluss zu verzeichnen. Die Schwierigkeit bestand darin, die Temperierung im Bereich Ölfiltertopf genügend niedrig zu fahren, sodass dem hohen Energieeintrag in dieser Zone des Angusses gegengesteuert werden kann, um die Porosität zu verringern. Damit musste gleichzeitig bei einer lokalen Temperaturabsenkung im Bereich Ölfiltertopf der fortlaufende Formfüllprozess gesichert bleiben. Außerdem war das Entstehen einer „überkühlten Zone“ im heißen Angussbereich zu vermeiden, um einerseits ebenso den Formfüll- und Erstarrungsprozess nicht zu behindern und andererseits gefährliche Temperaturbarrieren im Hinblick auf das Gießwerkzeug zu vermeiden. Direkte Auswertungen am Bauteil zu einzelnen Temperierschrittfolgen wurden im Rahmen der Röntgenanalyse, der zügigen Probebearbeitung am Bauteil und der nachträglichen

Materialanalyse durchgeführt. Schließlich konnte eine geeignete Einstellung in der Temperierung gefunden werden, welche über den gesamten Gießprozess konstant gehalten wird. Damit konnte die Gas- und Schwindungsporosität maßgeblich gesenkt und in den Grenzbereich der zulässigen Porosität gebracht werden.

Die ermittelten Einstellungen fanden auch im Serienanlauf Anwendung. Die erzielte Optimierung bestätigte sich und resultierte in einer Ausschussminderung um 10 % bezüglich dieses Fehlerbildes. Der Einsatz der innovativen Applikation der Temperierung führte gleichzeitig zu einer um 5 % verminderten Störanfälligkeit des Prozesses und schließlich zu einer um 3 % kürzeren Zykluszeit. Kritisch zu betrachten ist die Ausführung der Kühlkanäle, die hinsichtlich ihrer lokalen bauteilnahen Krümmungsradien optimiert werden mussten, um einen langfristigen Einsatz zu sichern und damit der Lebensdauer eines Gießwerkzeuges gerecht zu werden. Die Untersuchungen bezüglich der Nachhaltigkeit im kompletten Lebenszyklus einer Gießform sind noch nicht beendet.

Zusammenfassung

Die Lagertraverse des neu entwickelten Audi-4.0 l V8-TFSI muss den anspruchsvollen Kriterien im Premiumsegment der Automobilbranche genügen. Gleiche Anforderungen werden entsprechend an das Fertigungsverfahren Druckgießen gestellt. Bekannten Gussfehlern muss zunehmend mit neuen Technologien begegnet werden. Die Komplexität der Lagertraverse führte an dieser Stelle auch zum Einsatz von Sonderverfahren, wie die Nutzung von Einsussteilen, die Vakuumtechnik, die CO₂-

Kühlung, die Druckwasserkühlung, das Squeezen und die in dieser Arbeit erläuterte Anwendung der speziellen Kühlkanalintegration. Das kritische Thema der Porosität in der Fertigung der Lagertraverse wurde mithilfe bekannter Anpassungen im Prozess bearbeitet und insbesondere durch den Einsatz des lasersrahlgeschmolzenen Werkzeugeinsatzes verbessert.

Diesbezüglich stehen heute für die Funktionsintegration in Urformwerkzeuge leistungsfähige Lösungsansätze zur Verfügung. Die Akzeptanz hängt davon ab, inwieweit es gelingt, sie ohne eine Verschlechterung der Grundfunktion in bewährte und robuste industrielle Applikationen zu integrieren. Das vorgestellte Beispiel hat dieses Potential. Der Grundaufbau des Urformwerkzeuges bleibt unverändert. Das generative Verfahren des Laserstrahlenschmelzens ermöglicht den Aufbau von Werkzeugeinsätzen mit optimierten oberflächennahen Kühlkanälen. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die verbesserte Nutzung der Temperierung als Maßnahme zur gezielten direkten Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften des Gussteils.

Der spezielle Werkzeugeinsatz erwies sich in der Entwicklungsphase als geeignete Maßnahme, um die Qualitätsanforderungen des Hochleistungsbauteils Lagertraverse hinsichtlich der Porosität im Bereich Ölfiltertopf zu erfüllen. Auch im Serienlauf konnten ein wesentlich verminderter Ausschuss diesbezüglich verzeichnet und die Produktion sichergestellt werden. Die langfristige Eignung des Werkzeugeinsatzes im Sinne einer stabilen Daueranwendung über die gesamte Lebensdauer einer Druckgießform bleibt weiterhin zu untersuchen.

Dipl.-Ing. Nancy Gerth, Andreas Fischer, Dipl.-Ing. (FH) Ingolf Hamann, Dipl.-Ing. (FH) Helfried Sauer, DGH-Group Druckguss Heidenau GmbH, Dohna, Dr.-Ing. Bernhard Müller, Dipl.-Ing. Thomas Rädcl, Dipl.-Ing. (FH) Mathias Gebauer, Dipl.-Wi.-Ing. (FH) Thomas Töppel, Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Dresden

Literatur:

- [1] VDG, Verein Deutscher Giessereifachleute: VDG-Merkblatt P201 – Volumendefizite von Gusstücken aus Nichteisenmetallen. Mai 2002.
- [2] Königstedt, J.; Abmann, M.; Brinkmann, C., u. a.: Die neuen 4.0 l-V8-TFSI-Motoren von Audi – die konsequente Verbindung von Effizienz und Performance. 33. Internationales Wiener Motorensymposium 2012, 26.4.2012, Wien, Österreich.
- [3] Nogowizin, N.: Theorie und Praxis des Druckgusses. Fachverlag Schiele & Schön GmbH, Berlin, 2011.
- [4] Eigenfeld, K.; Jäckel, E.: Gutachten zur Bauteilanalyse. TU Bergakademie Freiberg, Gießerei-Institut, 2012.
- [5] Levy, G.; Davidson, J.: The consequent setup of total quality management (TQM) including standards is vital for additive layer manufacturing (ALM). In: The 4th International Conference on Advanced Research and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 6.-10. Oktober 2009.
- [6] Müller-Lohmeier, K.: Willkommen beim Rapid Manufacturing! Industrielle Praxis: Fallbeispiele und gegenwärtige Hürden. In: 14. Anwenderforum RPD – Durch Funktionsmuster zur Serienreife. Tagungsband 2009. Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2009.
- [7] Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren. Carl Hanser Verlag, München, 2007.