

Fertigungsoptimierung von Aluminium - Strukturbauteilen

Strukturteile im KARMANN Crossfire Verdeck

Rolf Gerschwinat, ALCOA, Soest
Dr.-Ing. Götz Hartmann, MAGMA, Aachen

Zusammenfassung

Gießsimulation, also die computergestützte Berechnung der Phänomene während der Formfüllung, Erstarrung, Gefügebildung sowie der Bildung von Eigenspannungen und Verzug, ist heute aus dem Entwicklungsprozessen für Gussteile und Gießprozesse nicht mehr wegzudenken. Die Optimierung des Gussteildesigns nach gießtechnischen Gesichtspunkten, mehr noch die optimale Auslegung des Gießprozesses im Hinblick auf Qualität und Wirtschaftlichkeit sind dabei die Ziele der Gießsimulation.

In diesem Beitrag steht der Nutzen der Gießsimulation zur Optimierung der Werkzeugtechnik und der Gießparameter für Aluminiumdruckguss - Strukturbauteile im Vordergrund. Ein Schwerpunkt bei der Optimierung der Fertigungstechnik für dünnwandige Druckgussteile ist dabei die Simulation der Formfüllung: mit Ihrer Hilfe können lokale Strömungsgeschwindigkeiten, Verwirbelungen, Gasporositäten oder Kaltfließstellen und deren Ursachen erkannt und verringert werden.

Gießsimulation kann heute in sehr kurzer Zeit wertvolle Ergebnisse bereitstellen: In einem Tag ist es zum Beispiel möglich, eine Formfüllsimulation auch für sehr komplexe Strukturbauteile durchzuführen. Dazu wird lediglich das CAD Modell des Gussteils benötigt.

Anhand zweier Strukturbauteile für das Chrysler Crossfire – Verdeck wird gezeigt, wie mit Hilfe der Gießsimulation die Formfüllung für ein Werkzeugkonzept beurteilt und optimiert werden kann.

1. Simulation in der Prozessentwicklung

Die Simulation von Formfüll- und Erstarrungsvorgängen hat ihre erste Anwendung in Gießereien vor etwa 15 Jahren gefunden. Obwohl es sich also um eine recht junge Technologie handelt, ist die Gießsimulation heute weit verbreitet. In Deutschland nutzen mehr als 100 Gießereien Simulationsprogramme, unter denen insbesondere die größeren Gießereien und die direkten Automobilzulieferer zu finden sind.

Die meisten Anwender sind in den Bereichen der Gussteil- und Prozessentwicklung angesiedelt, während die Produktion mit der Simulation meist nicht direkt befasst ist. Zur Prozessentwicklung im Druckguss gehört im Wesentlichen die Auslegung der Werkzeuge im Hinblick auf die Formfüllung und Temperierung.

Die Anwendung der Simulation in der Prozessentwicklung wird dadurch unterstützt, dass Simulationsprogramme heute kein besonderes Verständnis über Computer an sich oder über die Bildung mathematisch – physikalischer Modelle verlangen. Vielmehr sollte ein Anwender ein gesundes Verständnis für das Gießen und die Prozessabläufe in seiner Gießerei mitbringen, Eigenschaften also, die man bei Mitarbeitern direkt aus der Gießerei und dem Werkzeugbau voraussetzt.

2. Optimierung der Formfüllung

Strukturbauteile aus Aluminium, Magnesium oder Zink haben tragende Funktion, sind Crashrelevant und haben oft sichtbare Oberflächen. Das bedeutet hohe Anforderungen an Steifigkeit und Dehnung der Gussteile: diese müssen Poren- und Blisterfrei sein und dürfen keine Kaltfließstellen aufweisen. Auch die bei den meisten Legierungen notwendige Wärmebehandlung erfordert eine entsprechende Gussteilqualität.

Eine optimale Formfüllung spielt also bei diesen dünnwandigen und gleichzeitig großen Druckgussteilen wie der Dachspitze des Chrysler Crossfire Verdeckes (Bild 1) eine sehr große Rolle.

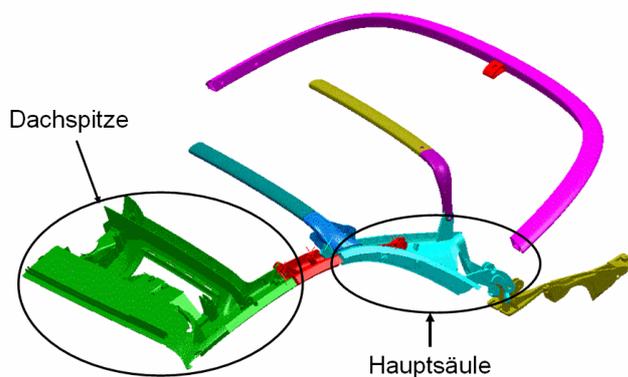
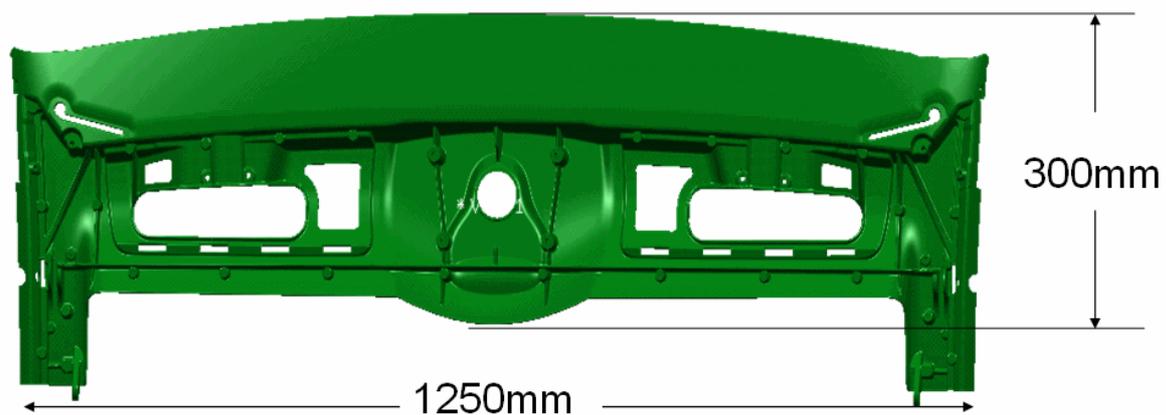


Bild 1: Die „Dachspitze“ des Chrysler Crossfire Verdeckes hat bei Abmaßen von 1.250mm x 300mm eine charakteristische Wandstärke von 2mm.

Aus den Bauteilspezifikationen (bei einer wärmebehandelten AlSi9Mg: Rp0,2 min. 120MPa; Rm min. 180MPa; A5 min. 12 %; Sichtflächen lackierfähig) ergibt sich, dass die Gussteile weitgehend frei von Gaseinschlüssen, Erstarrungsporosität und Kaltfließstellen sein müssen. Auf der Werkzeugseite besteht die Forderung nach einer Standzeit von mindestens 50.000 Schuss. Das bedeutet, dass die Strömungsgeschwindigkeiten bestimmte Werte nicht überschreiten sollten. Genau diese Kriterien lassen sich hervorragend mit Hilfe der gießtechnischen Simulation beurteilen.

Der Einsatz der Simulation unterstützt ein methodisches Vorgehen. So wird zunächst ein erster Ansatz für die Gießtechnik, also die Position der Anschnitte, die Dimension der Gießkammer und die wesentlichen Gießparameter wie Schusskurve und Prozesstemperaturen bestimmt. Die CAD Daten solcher Gussteile liegen grundsätzlich vor, der Gießlauf muss dimensioniert und in CAD konstruiert werden (Bild 2).

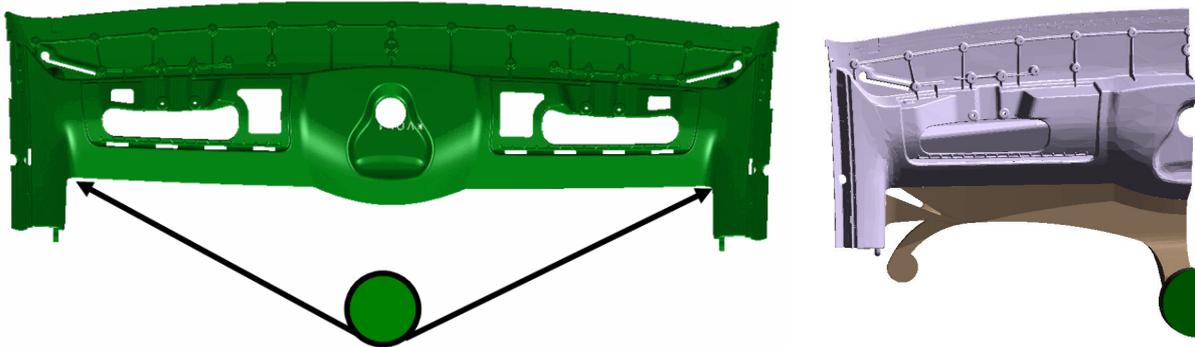


Bild 2: Aus dem Anschnittkonzept (links) entsteht die CAD Konstruktion des Gießlaufes (rechts, von der Angussseite aus gesehen). Natürlich müssen für die Simulation der Formfüllung auch die Fließhilfen in den Durchbrüchen mit konstruiert werden.

Bei einer Simulation mit MAGMASOFT® werden auf der Grundlage der Teile-, Gießlauf- und Gießkammergeometrien die auftretenden Sprengkräfte ermittelt und eine optimale Schusskurve vorgeschlagen. Der gesamte zeitliche Aufwand für die Vorbereitung der Simulationsrechnung beläuft sich auf einen halben Arbeitstag. Die Berechnung selber kann in allen Fällen über Nacht geschehen, bei Einsatz von größeren Parallelcomputern in wenigen Stunden.

Die Ergebnisse der Formfüllsimulation sind das Strömungsprofil mit den Strömungsgeschwindigkeiten und die Temperaturen der Schmelze. Natürlich werden auch die Änderung der Werkzeugtemperatur berechnet, sind allerdings bei einer Konzentration auf die Formfüllung nicht bestimmend.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse im Hinblick auf die Temperaturen der Schmelze während der Formfüllung lässt eine Beurteilung des Risikos von Kaltfließstellen zu (Bild 3). Aus der Charakteristik der Formfüllung, die insbesondere durch die Darstellung der Formfüllung als Film deutlich wird, lassen sich die am besten geeigneten Positionen von Überläufen oder Vakuumanschlüssen bestimmen.

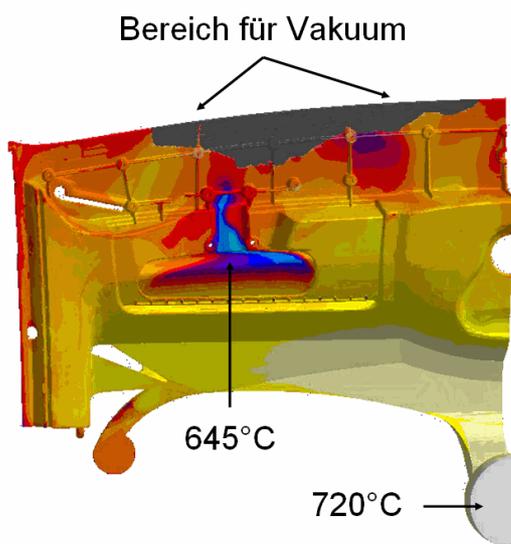


Bild 3: Die Temperaturen während der Formfüllung sind weitgehend unkritisch. Bei einer Gießtemperatur von 720 °C verliert die Schmelze nur im Bereich der dünnen Fließhilfe und dahinter stärker an Temperatur. Auch die hier erreichten Temperaturen von 645 °C sind noch unkritisch.

Das Gesamtprofil der Strömung lässt auch den geeigneten Bereich für einen Vakuumanschluss gut erkennen.

Die Auswertung der berechneten Strömungsgeschwindigkeiten erlaubt eine Beurteilung der Werkzeugbelastungen, insbesondere hinsichtlich möglicher Ausspülungen durch zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten (Bild 4).

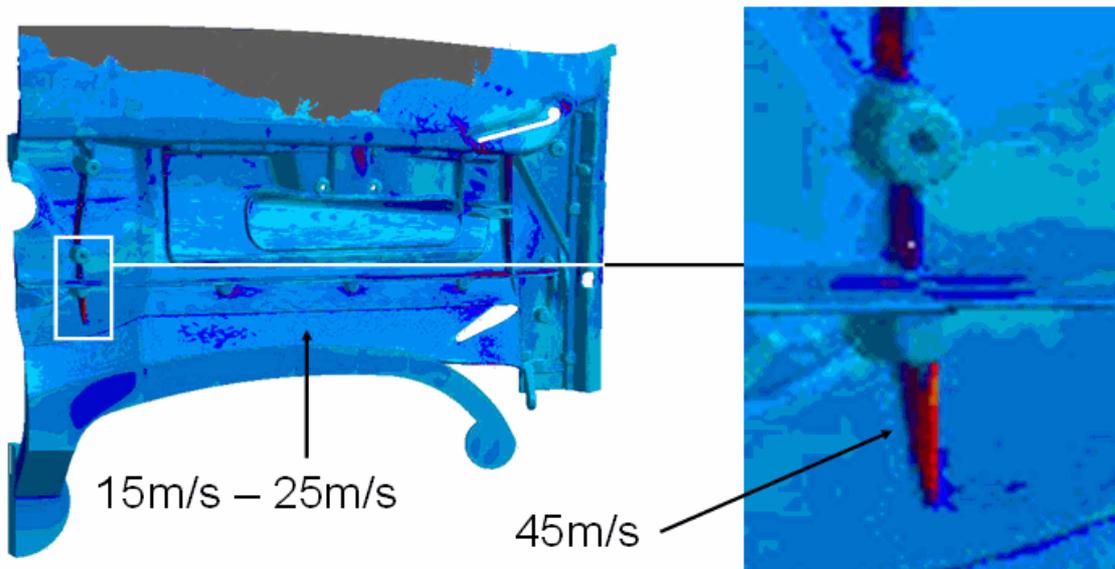


Bild 4: Fast in der gesamten Kavität liegt die Strömungsgeschwindigkeit bei unkritischen Werten zwischen 15m/s und 25m/s. In der detailliert hervorgehobenen Rippe liegen während der gesamten Formfüllung höhere Geschwindigkeiten vor, was Änderungen im Anschnitt vor diesem Bereich notwendig macht.

Eine ganz wesentliche Quelle von Gasporen in Druckgussteilen sind Verwirbelungen während der Formfüllung, bei denen die Schmelze bevorzugt Gase aufnehmen kann. Solche Verwirbelungen lassen sich sehr gut durch Tracer sichtbar machen, also virtuellen Teilchen die dem Weg der Schmelze folgen und dabei eine -auf dem Bildschirm- sichtbare Spur hinterlassen (Bild 5).

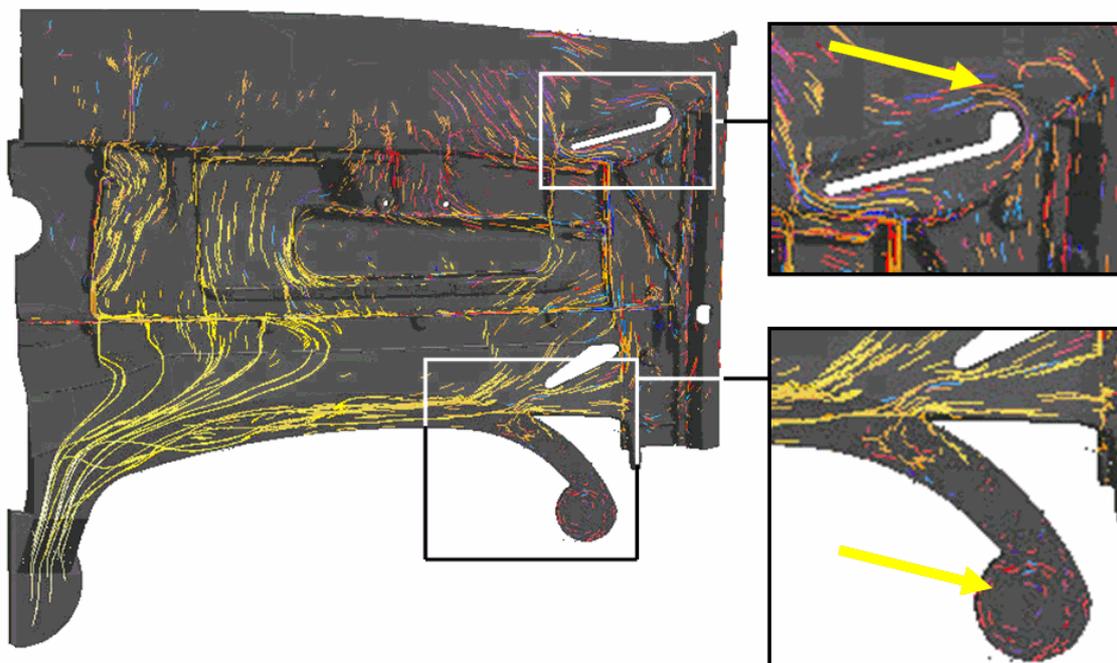


Bild 5: Die Darstellung von Tracern macht Verwirbelungen sichtbar. Diese treten oft in Gießläufen, Materialanhäufungen oder hinter Durchbrüchen auf. Die hier gefundenen Wirbel sind entweder gewollt (im Schockabsorber, rechts unten) oder unkritisch (hinter einem Durchbruch, rechts oben)

Die Auslegung der Druckgussform mit Unterstützung der Formfüllsimulation hat in diesem konkreten Projekt dazu geführt, dass die Gießergebnisse auf Anhieb in Ordnung waren.

3. Optimierung des Erstarrungsablaufes

Die meisten Strukturbauteile weisen kleine Materialanhäufungen nur dort auf, wo Befestigungen geplant sind. Die notwendige Steifigkeit der Bauteile wird im Allgemeinen durch eine entsprechende Verrippung erzielt. Bei der Konstruktion eines Cabrioletdaches kann es aus Platzgründen jedoch geboten sein, besonders beanspruchte Bereiche eines Bauteiles massiv, mit Wandstärken bis über 10mm auszuführen (Bild 6).

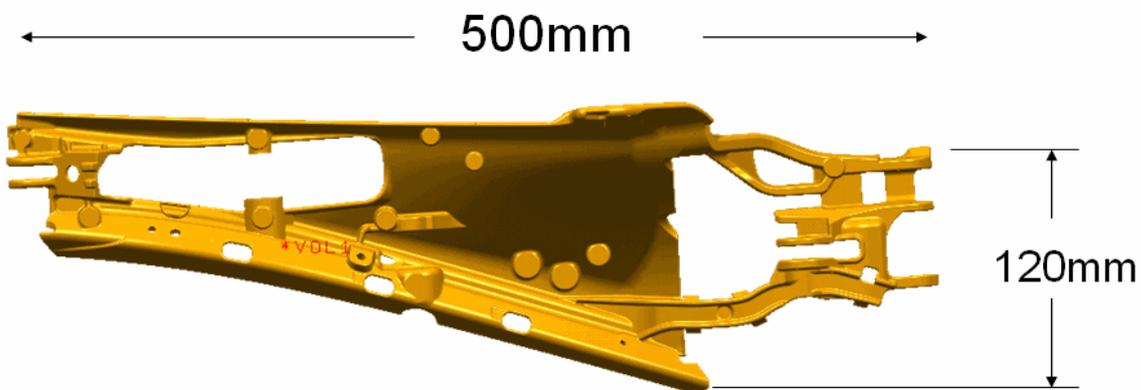


Bild 6: Die „Hauptsäule“ des Cabrioletdachs (s. auch Bild 1) ist ein kompaktes Strukturbauteil, welches hohen Belastungen ausgesetzt ist. Die Querschnitte sind teilweise massiv bis zu 10mm charakteristischer Wandstärke.

Die Bauteilspezifikationen (bei einer wärmebehandelten AISi9Mg: Rp0,2 min. 140MPa; Rm min. 180MPa; A5 min. 8 %; Sichtflächen lackierfähig) müssen also insbesondere dort, wo nach den Lastfallanalysen die höchsten Beanspruchungen auftreten können, sicher erfüllt werden (Bild 7).

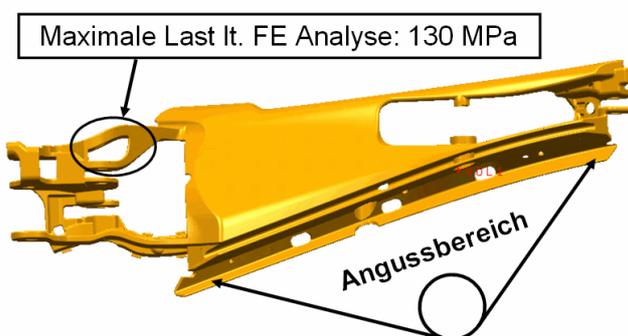


Bild 7: Im Bereich der maximalen berechneten Last dürfen keine Lunker oder Poren sein. Auf dieser Voraussetzung beruht die belastungsgerechte konstruktive Auslegung des Teiles.

Das bedeutet, dass dort die zur Erreichung der mechanischen Eigenschaften notwendigen Gefüge nach der Wärmebehandlung eingestellt sein müssen. Gleichzeitig müssen solche Bereiche natürlich Lunker- und porenfrei sein, wovon der Konstrukteur und alle FE Berechnungen im Rahmen der BauteilAuslegung zunächst, d.h. weil sie es nicht besser wissen, ausgehen müssen.

Mit Hilfe der Erstarrungssimulation ist es möglich, die Volumenfehler mit ihren verschiedenen Ursachen festzustellen. Verantwortlich für Volumenfehler sind die Erstarrungskontraktion, in der Schmelze gelöstes Gas oder durch Verwirbelungen eingebrachte Luft (s.o.). Im Falle einer gasarmen Schmelze und beim Vakuumdruckguss kann man sich zunächst auf Porosität durch Erstarrungskontraktion konzentrieren.

Zur Beurteilung des Erstarrungsablaufes eignet sich die Betrachtung der Isotherme, bei der die Schmelze auch in der Nachdruckphase nicht mehr fließen kann (Bild 8). Die üblichen sehr dünnen Anschnitte frieren bereits 1s nach dem Schuss zu. Die kritischen, hoch belasteten Stege erstarren dagegen erst nach ca. 5s – 6s. Wenn also dort keine gerichtete Erstarrung vorliegt, werden sich Lunker ausbilden.

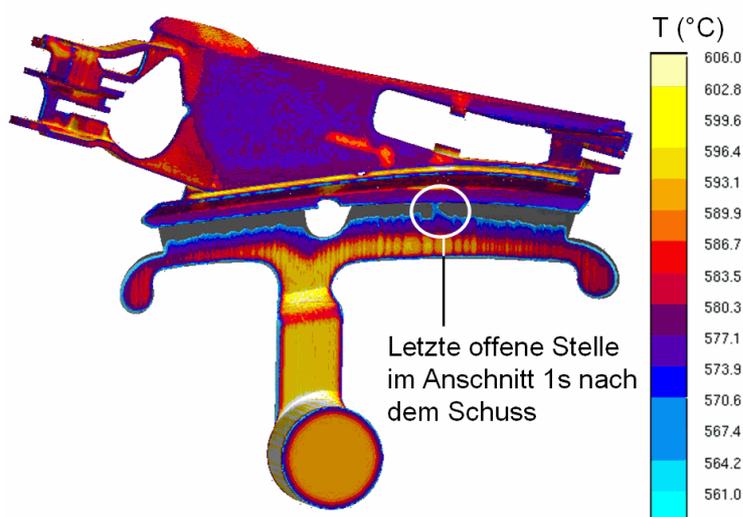


Bild 8: Temperaturverteilung im Gussteil etwa 1s nach dem Schuss. Die bereits erstarrten Bereiche im Anschnitt sind ausgeblendet. Ab diesem Zeitpunkt kann keine Schmelze mehr nachgedrückt werden.

Aus den Simulationsergebnissen ergibt sich die Notwendigkeit einer starken, gezielten Punktkühlung im Werkzeug, die eine gerichtete Erstarrung durch die Stege in Richtung des niedrig belasteten Endbereiches des Gussteiles unterstützt.

Die Prüfung dieser Maßnahme zeigt ihre Wirksamkeit (Bild 9), so dass schließlich die geforderte Lunkerfreiheit in den hoch belasteten Bereichen ebenfalls ab der ersten Musterserie erreicht wurde.

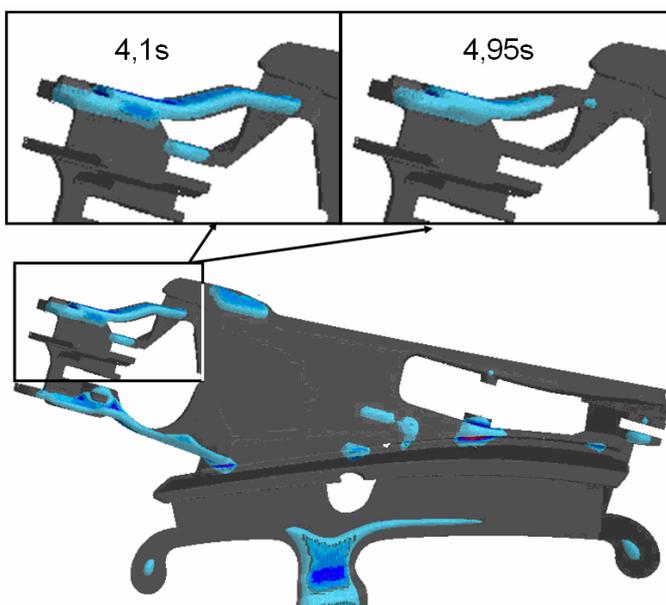


Bild 9: Im hoch belasteten Steg kann durch eine entsprechend starke Punktkühlung im Werkzeug eine gerichtete Erstarrung erzielt werden. Gezeigt ist die Restschmelze 4,1s bzw. 4,95s nach dem Schuss. Das zuletzt erstarrende Wärmezentrum liegt im geringer belasteten Endbereich des Gussteiles.

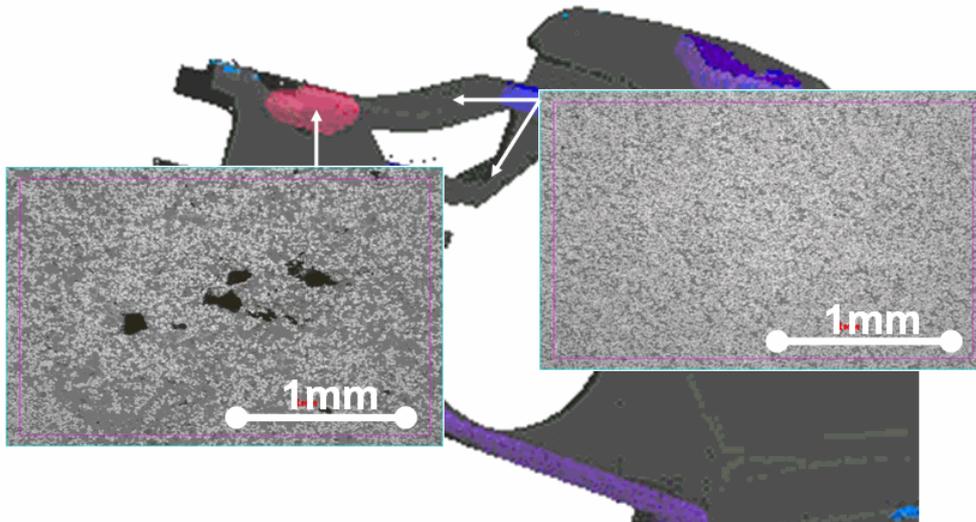


Bild 10: Ein Porositätskriterium (HOTSPOT) bestätigt die zu erwartende Porenfreiheit im hoch belasteten Bereich des Steges. Diese berechnete Porenverteilung korrespondiert sehr gut mit den Poren, die im Gussteil gefunden wurden.

4. Gießsimulation im Druckguss und Werkzeugbau

Die oben gezeigten Beispiele machen die typischen Fragestellungen bei der Auslegung von Druckgusswerkzeugen für Strukturbauteile deutlich, die mit Hilfe der gießtechnischen Simulation beantwortet werden können. Bei dem seit einigen Jahren erreichten Stand der Simulationstechnik ist es nicht mehr erforderlich, dass bei dem Anwender der Software Kenntnisse in Mathematik, Physik, Informatik oder Programmierung vorausgesetzt werden müssen. Die Lauffähigkeit der Software auf dem PC, umfangreiche vorhandene Datenbanken mit thermophysikalischen und mechanischen Eigenschaften für die allermeisten Gusslegierungen sowie effiziente Modelle für die in Gießprozessen typischen Strömungs- und Wärmeflussprobleme haben die Nutzung der Simulationsprogramme immer näher an die Gießereipraxis gerückt.

Den wesentlichsten Beitrag, um Simulationsprogramme speziell Gießereifachleuten zugänglich zu machen, liefern jedoch die interaktiven Benutzeroberflächen: diese sind so ausgelegt, dass Fachleuten aus der Gießerei oder dem Werkzeugbau die Nutzung der Software sehr leicht gelingt, und dass nach kurzer Einarbeitungszeit verwertbare Projekte durchgeführt werden können.

Die Rechenzeiten für Projekte werden immer kürzer; zwar werden immer mehr metallurgische Phänomene in den Modellen berücksichtigt und damit der Rechenaufwand immer höher, auf der anderen Seite werden Algorithmen permanent weiterentwickelt und Computer immer schneller. Simulationen, bei denen die Formfüllung, die Erstarrung inklusive Gefügeausbildung, die Bildung mechanischer Eigenschaften und die Bildung von Eigenspannungen berechnet werden, lassen sich meistens an einem Tag durchführen. Wenn kürzere Rechenzeiten gefordert sind, werden heute Parallelrechner mit bis zu 64 Prozessoren genutzt, die die Rechenzeit auch für größte Projekte in den Bereich von Minuten reduzieren.

Natürlich kann man im Rahmen der Werkzeugauslegung verschiedene Varianten von Gießsystemen durch „Versuch und Irrtum“ ausprobieren. Aber auch wenn man dabei sehr schnell vorgeht, vergeht mehr Zeit als wenn man die Entscheidungen zur Optimierung des Gießprozesses auf der Basis von Simulationsrechnungen fällt. Davon abgesehen ist dieses Verfahren unakzeptabel teuer. Bei kaufmännisch korrekter Betrachtung (Werkzeugänderung, Prüfaufwand, reduzierte Werkzeuglebensdauer, Transport, Maschinenstunden, Personalaufwand, Schmelzkosten) ist bei fast allen Druckgussteilen eine zusätzliche Musterserie teurer als eine Simulationsrechnung.

Die Gießsimulation ist in Optimierungsprozessen erheblich informativer als Röntgenbilder oder Schliffe, denn sie liefert fast immer den Grund dafür, warum sich ein Gussfehler einstellt. Deswegen lassen sich unter Nutzung der Gießsimulation Verbesserungen in weniger Schritten, also auch schneller und vor allem erheblich wirtschaftlicher erreichen als mit konservativem Vorgehen.

Es ist ganz klar, dass der Nutzen der Simulation mit der Nähe zum Gießprozess (oder zur Gussteilkonstruktion) dramatisch steigt. Das bedeutet zum Beispiel, dass die mittlere Führungsebene in der Gießerei und dem Werkzeugbau bei der Nutzung der Simulation zu integrieren ist. Stand der Dinge ist, dass die Simulationsprogramme das grundsätzlich zulassen, die Entscheidungsstrukturen in den Gießereien oft jedoch nicht. Hier liegt ein Potential, das zu heben notwendig ist.