Gießprozess-Simulation macht Leichtbau möglich
Casting process simulation facilitates lightweight construction

Leichtbau ist ein entscheidender Schritt in Richtung Reduktion von CO_2 Emissionen und des schonenden Umgangs mit Ressourcen. Doch reicht es nicht aus, nur gängige Werkstoffe durch spezifisch leichtere, jedoch meist deutlich teurere zu ersetzen, die in der Gewinnung außerdem energieintensiver sind. Viel mehr erreicht man durch die konsequente Nutzung des Potentials von Werkstoffen und Fertigungsverfahren. Durch Werkstoffeigenschaften, die auf die lokalen Anforderungen hin optimiert werden, sowie entsprechend angepasste Fertigungsprozesse kann das Gewicht vieler Bauteile signifikant reduziert werden.

Dies gelingt nur durch frühzeitigen und gezielten Einsatz von CAE-Technologien in der Entwicklung von Bauteilen. Dabei geht es nicht allein um die Vorhersage des Bauteilverhaltens im Betrieb, sondern ebenso um die Vorhersage fertigungsbedingter lokaler Bauteileigenschaften und Eigenspannungen. Gießereien nutzen Simulationen von Gieß- und Erstarrungsprozessen schon seit vielen Jahren zur vorbeugenden Qualitätssicherung und Optimierung ihrer Fertigungsprozesse. Eine Rückführung der Simulationsergebnisse in die Bauteilauslegung geschieht jedoch noch selten.

Dabei sind die Vorteile einer frühzeitigen Fertigungssimulation offenkundig: Sind fertigungsspezifische, lokale Werkstoffeigenschaften und Eigenspannungen ermittelt, können diese Informationen direkt in die Festigkeits- und Lebensdauerberechnung von Gussteilen integriert werden. Die Treffsicherheit der CAE-Analyse steigt. Gleichzeitig kann das Werkstoffpotential eines Bauteils bereits im Entwicklungsprozess gezielt ausgenutzt werden **[1].**

Dieser Beitrag zeigt, wie durch den frühzeitigen Einsatz der Fertigungssimulation für Gussteile die Gussteilentwicklung optimiert und Leichtbaukonstruktionen sicher realisiert werden können.

Optimierte Entwicklung von Zylinderköpfen

Die mechanischen Eigenschaften und die Lebensdauer von Aluminiumgussteilen werden zum einen durch das lokale Gefüge und zum anderen durch die mit dem Fertigungsprozess verbundenen Defekte wie zum Beispiel Gasporositäten, Oxideinschlüsse und Verunreinigungen beeinflusst. Insbesondere für die Lebensdauer ist dabei die Verteilung und Größe der Gasporen kritisch.

Gasporen entstehen durch die geringere Wasserstofflöslichkeit des erstarrten Aluminiums im Vergleich zur Schmelze. Während der Erstarrung wird der Wasserstoff ausgeschieden und bildet den Keim für eine Pore. Nimmt während der Abkühlung in der Form der Druck in der Schmelze ab, weil ein Bauteilbereich durch bereits erstarrte Bereiche vom anliegenden Gießdruck abgeschnitten wird, beginnen die Poren zu wachsen. Da das Ausscheiden des Wasserstoffs und das Wachstum der Gasporen Zeit benötigen, zeigen Bauteilbereiche in denen die Schmelze sehr schnell erstarrt keine oder nur sehr wenige, kleine Gasporen. Langsam abkühlende Bereiche weisen mehr und größere Gasporen auf.

Grundlage für die Porositätsvorhersage ist die Berechnung des Erstarrungsablaufes. Dabei werden, basierend auf dem Wasserstoffgehalt der Schmelze und den lokalen Abkühlbedingungen die lokale Konzentration und der Partialdruck des gelösten Wasserstoffs berechnet. Damit kann neben der lokalen Porenverteilung auch die Porengröße bzw. der Porenradius berechnet werden.

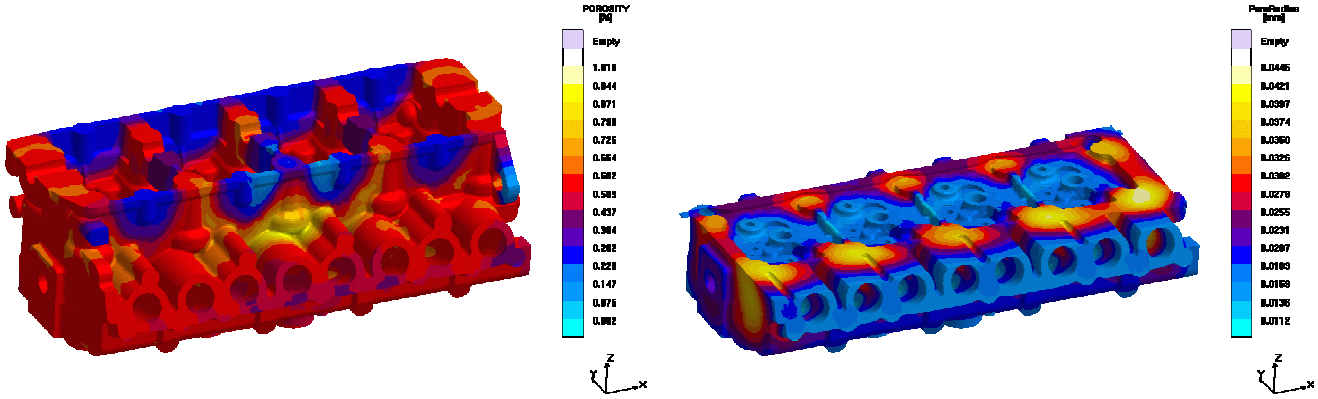

Bild 1: Vorhersage der Mikroporositäten für einen Zylinderkopf. a) zeigt die Porositätsverteilung in % und b) die Porengröße in mm in einem Schnitt [2].

Die in einer Simulation des Gießprozesses berechnete Porenverteilung kann für die Betriebsfestigkeitsberechnung auf das FE-Netz eines entsprechenden Programms übertragen werden. Mit Hilfe experimentell ermittelter Korrelationen zwischen Porenverteilung und Dauerfestigkeit **[3]** können dann die lokalen Dauerfestigkeiten für das Gussteil berechnet werden. Mit dieser Vorgehensweise kann die Vorhersagegenauigkeit von Betriebsfestigkeitsberechnungen deutlich erhöht werden.

Zylinderköpfe aus Aluminiumwerkstoffen werden zur Festigkeitssteigerung einer Wärmebehandlung unterzogen. Der typische Wärmebehandlungs-Prozess besteht aus den Prozessschritten Lösungsglühen, Abschrecken und Warmauslagern. Beim Lösungsglühen wird das Bauteil bis auf wenige Grad unterhalb der Erstarrungstemperatur erhitzt. Dabei werden die Eigenspannungen, die während des Gießprozesses entstanden sind, durch Kriechen vollständig abgebaut. Beim nachfolgenden Abschrecken werden die Zylinderköpfe zumeist in ein Wasserbad getaucht. Die schroffe Abkühlung führt zu sehr großen Temperaturunterschieden innerhalb des Bauteils und damit zur Entstehung neuer Eigenspannungen. Diese werden bei der abschließenden Warmauslagerung zu ca. 30% abgebaut.

Die Entstehungsgeschichte der Eigenspannungen kann mit heutigen Berechnungsmethoden zuverlässig ermittelt werden. Dabei werden sowohl die kritischen Prozessparameter wie Temperatur beim Lösungsglühen, Abschreckmedium, Temperatur des Abschreckmediums, Abschreckrichtung sowie Auslagerungstemperatur und -dauer berücksichtigt. Zusätzlich wird die Spannungsumlagerung bei der mechanischen Bearbeitung berechnet, so dass dem Bauteilentwickler der vollständige Spannungszustand des fertig bearbeiteten Zylinderkopfs zur Verfügung gestellt werden kann.

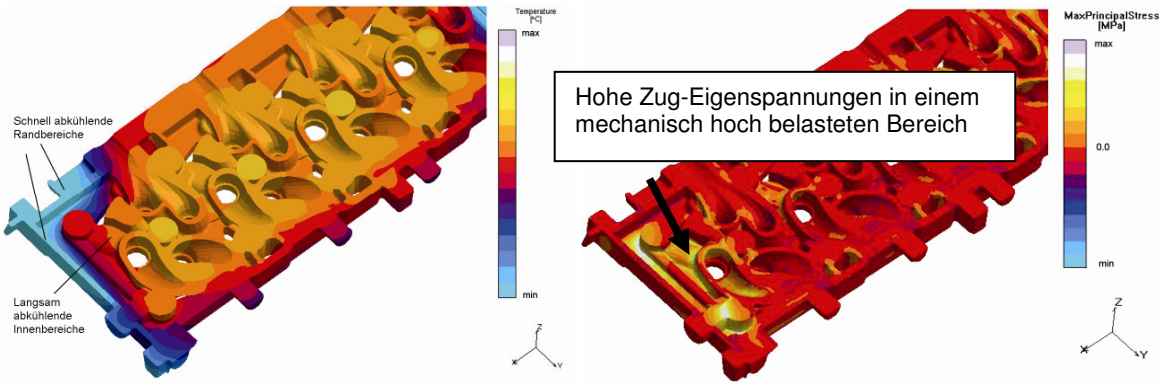

Bild 2: Die schnelle Abkühlung der Randbereiche führt zu hohen Zug-Eigenspannungen im Fußbereich des langen Einlasskanals. Das Bild zeigt die Temperaturverteilung nach 30 Sekunden Abschrecken (links) und die Verteilung der maximalen Haupt-Eigenspannungen (rechts) [4].

Die Eigenspannungen in wärmebehandelten Zylinderköpfen liegen teilweise derart dicht an der Versagensgrenze, dass alleine schon die Eigenspannungsanalyse die Erklärung für Prototypenschäden liefert. Durch Änderung der Wärmebehandlungsparameter oder der Lagerung der Zylinderköpfe im Abschreckkorb können die Eigenspannungen deutlich reduziert werden. Ein noch größeres Potential bietet die Verwendung eines anderen Abschreckmediums wie z.B. Polymer oder Luft.
Sehr effektiv können die Eigenspannungen auch durch konstruktive Maßnahmen minimiert werden. All diese Potentiale lassen sich allerdings nur bei Integration der Wärmebehandlung in die geschlossene CAE-Prozesskette heben **[4].**

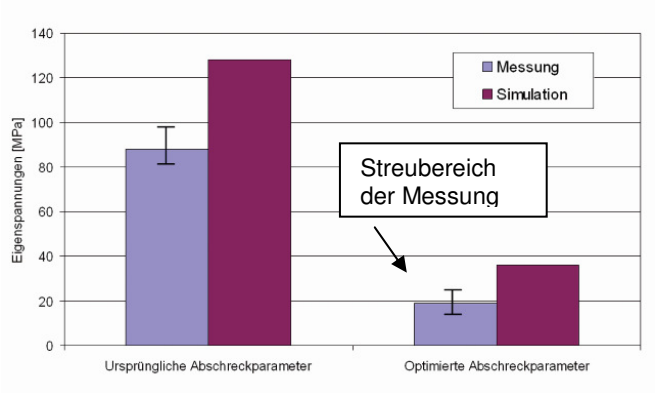

Bild 3: Mit Hilfe der Simulation lassen sich Parameter für eine optimierte Wärmebehandlung ermitteln. Diese können zu einer drastischen Senkung der Eigenspannungen in den kritischen Bereichen führen.

Minimierung des Verzugs dünnwandiger Druckgussteile

Mit der Fertigung dünnwandiger, komplexer Strukturteile aus Leichtmetall konnte die Gießereiindustrie zahlreiche klassische Blechbauteile durch Gussteile substituieren. Diese Strukturbauteile zeichnen sich neben der geometrischen Komplexität durch hohe Anforderungen an Festigkeit und Duktilität aus. Eine der größten Herausforderungen bei der Fertigung der Bauteile stellt die Einhaltung der maßlichen Toleranzen dar, die oft nur durch kostenintensives Richten zu gewährleisten ist.

Die Fertigung der Strukturbauteile besteht für naturharte Aluminiumlegierungen aus den Schritten Gießen und Stanzen. Für warmaushärtende Legierungen ist nachfolgend noch eine Wärmebehandlung erforderlich. Alle Fertigungsschritte beeinflussen den Verzug des Bauteils **[5]**.

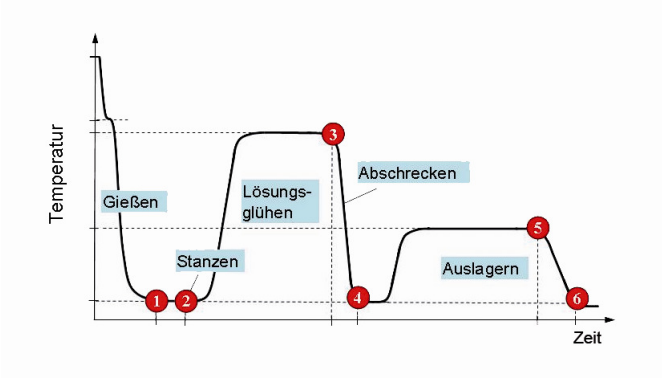

Bild 4: Temperaturen eines wärmebehandelten Aluminiumgussteils im Verlauf der Fertigung. Jeder Prozessschritt beeinflusst den Gussteilverzug.

Beim Gießen entstehen Eigenspannungen und Verzug durch die inhomogene Abkühlung sowie die Schwindungsbehinderung der Form. Die Eigenspannungen lagern sich beim nachfolgenden Stanzen um, was zu einer Änderung des Verzuges führt. Bearbeitungs- oder Spannkräfte können zusätzliche Spannungen verursachen. Beim Lösungsglühen werden die Eigenspannungen aus dem Gießprozess durch Kriechen fast vollständig abgebaut, was zu einer neuerlichen Änderung der Verformungen führt. Aufgrund der bei hohen Temperaturen sehr geringen Festigkeit des Werkstoffs reicht die Belastung durch das Eigengewicht aus, um das Bauteil weiter zu verformen. Beim nachfolgenden Abschrecken entstehen durch inhomogene Abkühlung erneut Eigenspannungen und Verzug, wobei die Eigenspannungen beim abschließenden Auslagern durch Kriechen wieder teilweise abgebaut werden und den Verzug nochmals ändern.

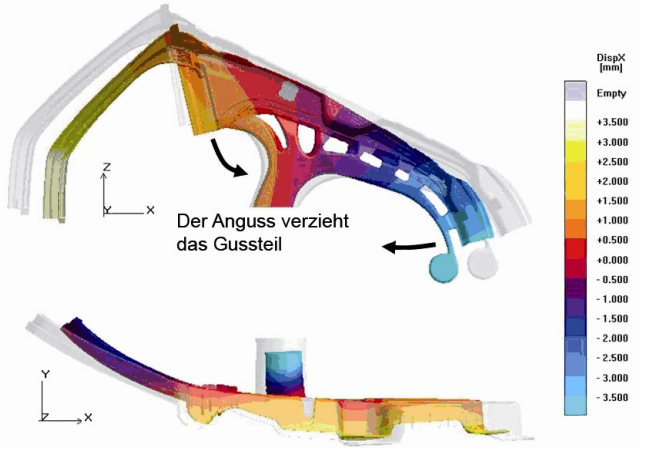

Bild 5: Verformungen eines Schlossträgers nach dem Abkühlen auf Raumtemperatur. Während der hintere Teil durch den massiven Anguss verformt wird, biegt sich der sog. „Schwanenhals“ durch die inhomogene Abkühlung nach oben.

Die Vielzahl der Einflussfaktoren macht die Beherrschung des Verzugs sehr schwierig. Sie erfordert eine sorgfältige Auswahl aller Fertigungsparameter und gegebenenfalls eine geeignete Konstruktion des Lagerungsgestells für die Wärmebehandlung. Mit Hilfe der Fertigungssimulation kann der Verzug während jeder Phase des Herstellungsprozesses berechnet, sowie die Entstehungsursache ermittelt werden. Durch frühzeitigen Einsatz in der Konstruktionsphase kann bereits zu diesem Zeitpunkt entschieden werden, ob die geforderten Toleranzen durch optimale Prozessauslegung oder nur durch konstruktive Änderungen eingehalten werden können.

Leichtbau im Großguss

Leichtbau hat sich nicht nur im Automobilbau, sondern auch im Maschinenbau zu einer Schlüsseltechnologie entwickelt. Gerade bei den im Maschinenbau häufig anzutreffenden

Großgussteilen ist das Leichtbaupotential sehr hoch. Eine nur 20% leichtere Konstruktion bringt dort für ein zehn Tonnen schweres Gussteil eine Gewichtseinsparung von zwei Tonnen!

Eine Besonderheit der Gusseisenwerkstoffe ist die Wandstärkenabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften, d.h. bei abnehmender Wandstärke steigt die Materialfestigkeit. Leichtbau zahlt sich im Großguss also doppelt aus: Zusätzlich zur Gewichtseinsparung steigt in den abgespeckten Bereichen zugleich die Werkstofffestigkeit deutlich an.

Bild 6: Maschinenträger für ein Bearbeitungszentrum der Hermle AG, gegossen von SHW Casting Technologies GmbH

Ein sehr eindrucksvolles Beispiel für Leichtbau im Großguss stellt das in **Bild 6** abgebildete Maschinengehäuse aus GJS400 dar. Hier wurden das Bett für den Schlitten der Fräse sowie verschiedene Motorengehäuse in einem Bauteil vereinigt. Eine derartig komplexe Geometrie, mit im Vergleich zu den Abmessungen sehr dünnen Wänden und Verrippungen, stellt gießtechnisch eine Herausforderung dar. Modellschrägen von nur einem Grad bei den Rippen sind formtechnisch anspruchsvoll. Damit das Werkstoffpotential auch in der Praxis erreicht wird, dürfen Porositäten oder Dross keine Schwachstellen bilden.

Die Entwicklung solch anspruchsvoller Gussteile erfordert die frühzeitige Unterstützung durch gießtechnische Simulation. Nur diese liefert dem Konstrukteur bereits im Vorfeld zuverlässige Aussagen bezüglich Gießbarkeit, lokalen mechanischen Eigenschaften und Eigenspannungen.

Ein wesentliches Kriterium hinsichtlich Gießbarkeit stellt der sogenannte thermische Modul dar, **Bild 7**. Mit diesem können speisungstechnische Problembereiche frühzeitig erkannt und gegebenenfalls durch konstruktive Maßnahmen entschärft werden.

Das spezielle Speisungsverhalten von Gusseisenwerkstoffen und die starke Abhängigkeit des Erstarrungsverhaltens von der Metallurgie stellen hohe Anforderungen an die Simulationsmodelle. Basierend auf Mikromodellen muss zuerst die Bildung des Gefüges während der Erstarrung berechnet werden. Die Summe aus Flüssig-, Ferrit-, sowie Austenitschwindung und Graphitexpansion ergibt dann den lokalen Speisungsbedarf.

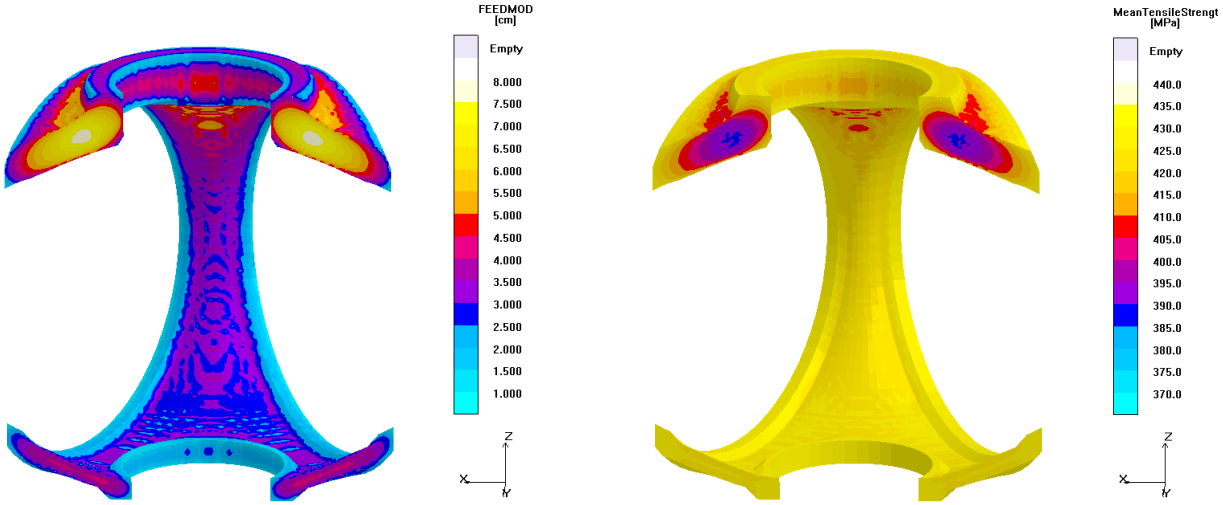

Bild 7: Thermischer Modul und lokale Verteilung der Zugfestigkeit, hier am Beispiel einer Windradnabe aus GJS400-18-LTU.

Für die Auslegung des Bauteils sind die lokalen Materialeigenschaften für den Konstrukteur von besonderem Interesse. Im Gegensatz zu Aluminiumwerkstoffen werden die mechanischen Eigenschaften überwiegend durch das lokale Gefüge bestimmt. Gusseisenwerkstoffe zeichnen sich durch eine hohe Bandbreite an möglichen Gefügen und damit Eigenschaften aus, von hochfestem zu hochduktilem Werkstoffverhalten. Legierungszusammensetzung, die verwendete Schmelz- und metallurgische Praxis sowie die lokalen Abkühlverhältnisse bei der Erstarrung und der eutektoiden Umwandlung beeinflussen die Eigenschaften. Hier bieten moderne, auf Mikromodellen basierende Simulationswerkzeuge eine Vielzahl an Vorhersagemöglichkeiten wie z.B. Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung oder Härte, **Bild 7**.

Während ein Gussteil erstarrt und abkühlt, entstehen durch ungleichmäßige Temperaturverteilung Eigenspannungen, **Bild 8**. Diese sind die Folge eines komplexen Zusammenspiels zwischen lokal unterschiedlicher Schrumpfung, deren Behinderung durch Gussform und Gussteil sowie der temperaturabhängigen Festigkeit der Legierung. Bei der nachfolgenden Bearbeitung lagern sich die Eigenspannungen um. Dabei können vorher unkritische Eigenspannungen derart ansteigen, dass bereits während der Bearbeitung Risse im Bauteil auftreten.

Die vorhergesagten Eigenschaften und Eigenspannungen können problemlos auf FE-Netze übertragen und zu einer verbesserten Vorhersage der Betriebsfestigkeit herangezogen werden. Die fertigungsbedingten Eigenspannungen stellen in der Betriebsfestigkeitsberechnung einen Teil der Mittelspannung dar. Während Zugeigenspannungen die Betriebsfestigkeit deutlich reduzieren, können Druckeigenspannungen zu einer signifikanten Erhöhung beitragen. Druckeigenspannungen besitzen somit ein Potential für Gewichtseinsparung durch reduzierte Wandstärken.

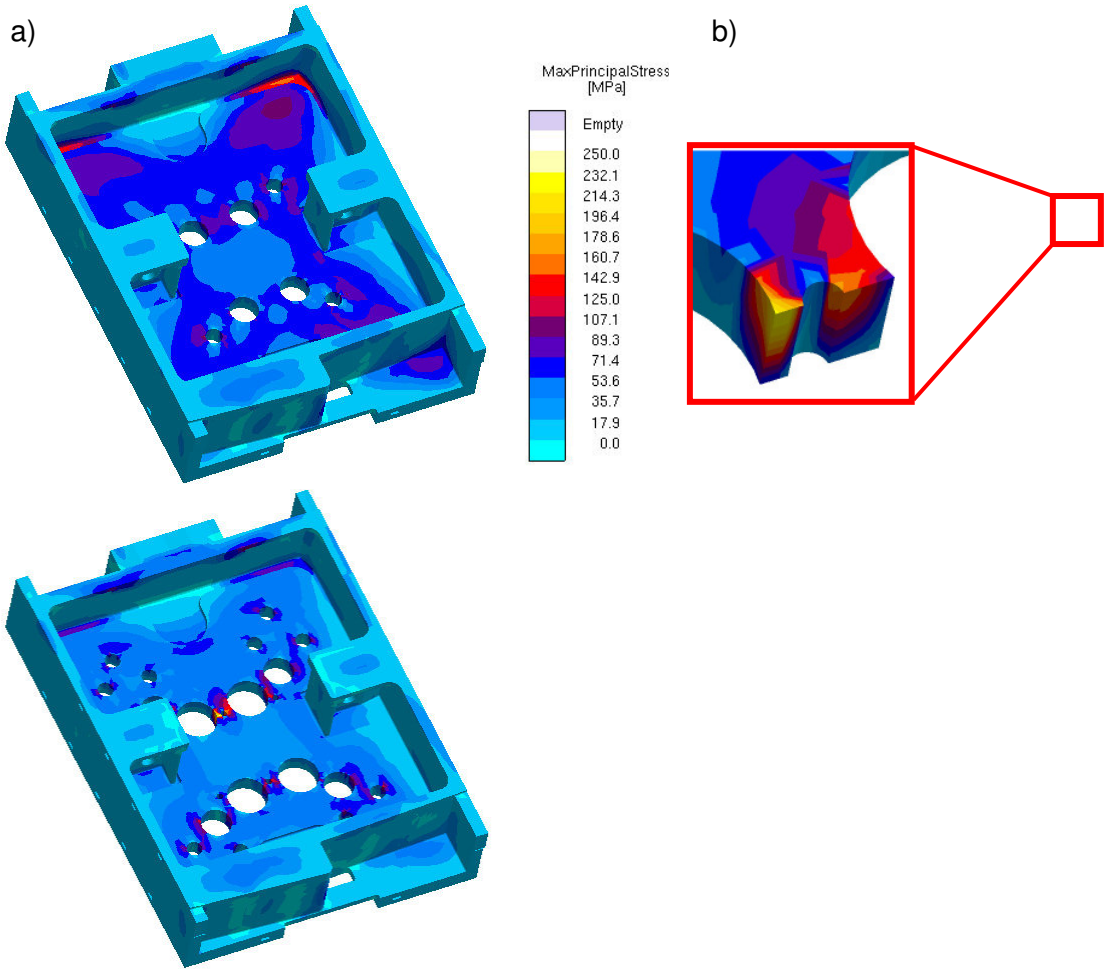

Bild 8: Umlagerung der Eigenspannungen bei der mechanischen Bearbeitung, a) zeigt die maximale Hauptspannung vor und b) nach dem Bearbeiten.

Zusammenfassung

Leichtbau hat sich in der Automobilindustrie und im Maschinenbau zu einer Schlüsseltechnologie entwickelt. Um das Potential dieser Technologie auszuschöpfen, müssen bereits im frühen Stadium der Bauteilentwicklung Konstruktion und Fertigung aufeinander abgestimmt werden. Nur dann kann sichergestellt werden, dass in hoch belasteten Bauteilbereichen auch die benötigte lokale Werkstofffestigkeit erreicht wird.

Der Weg dorthin führt über die durchgängige Integration der Fertigungssimulation in den CAE-Entwicklungsprozess. Dabei werden mit Hilfe der Fertigungssimulation die lokalen Bauteileigenschaften und die Eigenspannungen bestimmt und für die Betriebsfestigkeit auf das FE-Netz eines entsprechenden Programms übertragen. Eine darauf basierende Betriebsfestigkeitsberechnung besitzt dann eine deutlich bessere Vorhersagegenauigkeit. Gleichzeitig minimiert eine frühzeitig durchgeführte Fertigungssimulation die Risiken unerwarteter Fehler in der Fertigung.

Moderne Programme zur Simulation von Fertigungsprozessen sind heute in der Lage, die Qualität eines Gussteils und den Einfluss von Fertigungsparametern auf die Gussteilqualität zuverlässig vorherzusagen. Die in diesem Beitrag beschriebenen Beispiele zeigen das enorme Potential einer frühzeitigen Integration der Fertigungssimulation in die Gussteilentwicklung. Diese Integration ist der Schlüssel zur Entwicklung gewichtsoptimierter Gussteile.

Literatur

[1] R.J. Menne, U. Weiss, A. Brohmer, A. Egner-Walter, M. Weber, P. Oelling: „Einsatz der Gießprozesssimulation zur Bauteil-Leistungssteigerung bei gleichzeitiger Reduzierung von Entwicklungszeit und -kosten – Ausgewählte Beispiele aus der Ford-Motorenentwicklung.“, 28. Internationales Wiener Motorensymposium 2007

[2] J. C. Sturm: „Vorhersage lokaler Eigenschaften von Gussteilen im Motorenbau“, VDI-Konferenz Gießtechnik im Motorenbau 2005

[3] R. Minichmayr, W. Eichlseder: “Lebensdauerberechnung von Gussbauteilen unter Berücksichtigung des lokalen Dendritenarmabstandes und der Porosität”, Giesserei 90 Nr. 5, 2003, pp. 70-75

[4] B. Kim, A. Egner-Walter, H. Chang: Estimation of Residual Stress in Cylinder Head. In: International Journal of Automotive Technology, Vol. 7, No. 1, pp. 69 -74 (2006)

[5] A. Egner-Walter: „Vorhersage des Verzugs dünnwandiger Druckgussteile“, Gießerei 93, 12/2006, S. 26 – 31