## Integration lokaler Bauteileigenschaften gegossener Fahrwerksteile in die Betriebsfestigkeitsberechnung

# Integration of local properties of metal cast suspension parts into fatigue calculations

Dr.-Ing. A. Egner-Walter , Aachen Dipl.-Ing. H. Dannbauer, St. Valentin, Österreich

#### Kurzfassung

Die Berechnung der Betriebsfestigkeit gegossener Bauteile wird derzeit immer noch unter der Annahme örtlich konstanter mechanischer Eigenschaften durchgeführt. In der Praxis weisen Gussbauteile jedoch, bedingt durch den Herstellungsprozess eine inhomogene Verteilung der mechanischen Eigenschaften auf. Eine Gefügekenngröße, die bei Sand- und Kokillenguss eine brauchbare Korrelation zu den mechanischen Eigenschaften zeigt, ist der sekundäre Dendritenarmabstand (SDAS). Anhand eines Schwenklagers aus Aluminium wird mit Hilfe der Simulation des

Gießprozesses der SDAS und die lokale Gefügeverteilungen berechnet. Die Ergebnisse der Gießsimulation werden anschließend auf das FE-Netz für die Festigkeitsberechnung übertragen und in eine Betriebsfestigkeitsberechnung integriert.

#### Abstract

The analysis of the fatigue life of light alloy cast parts is currently based on the assumption of constant, isotropic mechanical properties. In reality these properties are always inhomogeneous distributed, caused by the casting process. One essential characteristic of a casting, that can be correlated with the fatigue limit, is the secondary dendrite arm spacing (SDAS).

For an aluminium suspension arm, the secondary dendrite arm spacing was determined by a casting process simulation. The inhomogeneous distribution of the SDAS was then used as an improved boundary condition for the fatigue life computation.

#### 1. Einleitung

Der Druck zu immer kürzeren Entwicklungszeiten im Automobilbau führt zwingend zu einer möglichst durchgehenden virtuellen Entwicklung sowohl der Bauteile als auch der Fertigungsprozesse. Ziel ist dabei die virtuelle Freigabe von Bauteilen und Fertigungsprozessen. Um die dafür erforderliche Genauigkeit der Berechnung zu erreichen, müssen die bestehenden Modelle sukzessive erweitert werden.

Die Berechnung der Betriebsfestigkeit gegossener Bauteile wird derzeit immer noch unter der Annahme örtlich konstanter mechanischer Eigenschaften durchgeführt. In der Praxis weisen Gussbauteile jedoch, bedingt durch den Herstellungsprozess eine inhomogene Verteilung der mechanischen Eigenschaften auf. Die mechanischen Eigenschaften von Aluminiumgussteilen werden zum einen durch das Gefüge und zum anderen durch die prozessbedingten Fehler wie Gasporositäten, Oxideinschlüsse und Verunreinigungen bestimmt. Für Bauteile, die im Sandgussoder Kokillengießverfahren hergestellt werden, wurde mit dem sekundären Dendritenarmabstand (SDAS) eine Gefügekenngröße gefunden, die eine brauchbare Korrelation zu den mechanischen Eigenschaften zeigt [1,2]. Dies liegt daran, dass die Entstehung von Gasporositäten genauso wie der SDAS auch von der Erstarrungszeit beeinflusst wird.

Anhand eines Schwenklagers aus Aluminium wird mit Hilfe der Simulation des Gießprozesses der SDAS und die lokale Gefügeverteilungen berechnet. Die Ergebnisse der Gießsimulation werden anschließend auf das FE-Netz für die Festigkeitsberechnung übertragen und in eine Betriebsfestigkeitsberechnung integriert. Durch die örtliche Variation der Materialeigenschaften ergeben sich Änderungen der vorhergesagten Lebensdauern welche für die Auslegung relevant sind. Zusätzlich wird der Einfluss von Prozessparametern des Gießprozesses auf den sekundären Dendritenarmabstand und somit auf die Betriebsfestigkeit dargestellt.

#### 2. Berechnung der mechanischen Belastungen für das Schwenklager

Das Schwenklager wird im Betrieb im wesentlichen durch Bremsvorgänge, Kurvenfahrten und durch Befahren schlechter Wegstrecken beansprucht. Das Modell zur Berechnung der Spannungen im Schwenklager ist in Bild 1 dargestellt. Die höchsten Beanspruchungen des Schwenklagers treten im Bereich eines Anschlussauges auf. Die maximalen Spannungsamplituden in der kritischen Schnittebene für das meistschädigende Rainflow-Kollektivelement, Bild 2, beträgt 150-200 MPa. Bei der Berechnung der Spannungen wird von einem homogen über das gesamte Bauteil verteilten Elastizitätsmodul ausgegangen, was aufgrund der geringen Unterschiede gerechtfertigt ist.





Bild 1: Modell zur Berechnung der Spannungen im Schwenklager aufgrund der Betriebsbelastungen

Bild 2: Die maximalen berechneten Betriebsspannungen treten im Auge des Schwenklagers auf.

Für die Ermittlung der Betriebsfestigkeit werden im Gegensatz dazu jedoch die zu erwartenden mechanischen Eigenschaften mit Hilfe einer Gießsimulation bestimmt.

#### 3. Simulation des Gießprozesses des Schwenklagers

Die Simulation des Gießprozesses hat sich als sehr wichtiges Hilfsmittel zur Auslegung und Optimierung von Gießprozessen durchgesetzt. Aufgrund des wachsenden Bewusstseins von Konstrukteuren und Berechnungsingenieuren, dass der Fertigungsprozess maßgeblich die Qualität des Bauteils beeinflusst, wird die Gießsimulation auch zunehmend für die virtuelle Bauteilentwicklung eingesetzt. Die Gießsimulation besteht aus den Teilen Formfüllung, Erstarrung, Vorhersage von Gefüge und mechanischen Eigenschaften sowie der Berechnung von Eigenspannungen und Verzug [3].

Das Schwenklager ist sowohl im Sandguss als auch im Kokillengießprozess darstellbar. Die Bilder 3a) und 3b) zeigen für beide Gießverfahren jeweils ein mögliches Gießsystem.

Bei der Gießsimulation werden sowohl das Gussteil und das Gießsystem, als auch die Form und die Kühlkanäle (im Kokillen- und Druckguss) mit Finiten Volumen vernetzt. Für die Simulation des Kokillengießverfahrens wird wie in der Praxis die Form "warm gefahren", d.h. es werden mehrer Zyklen gerechnet, bis sich ein stationärer Temperaturzustand in der Form eingestellt hat.



Bild 3: Gussteil und Gießsystem für a) den Sandgussprozess und b) den Kokillengießprozess

#### 3.1 Simulation von Formfüllung und Erstarrung

Die Anschnittsysteme werden möglichst so gewählt, dass die Formfüllung steigend erfolgt. Dadurch kann die Bildung von Turbulenzen in der Schmelze und damit die Gefahr von Oxideinschlüssen weitgehend vermieden werden. Die Temperaturen am Ende der Formfüllung sollten möglichst noch oberhalb der Liquidustemperatur liegen, um die Bildung von Kaltläufen zu vermeiden. Die Bilder 4 und 5 zeigen die Temperaturverteilung der Schmelze während der Formfüllung für den Sandgießprozess.



Bild 4: Temperaturverteilung während der Formfüllung des Schwenklagers im Sandgussprozess zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten.

Basierend auf der Temperaturverteilung am Ende der Formfüllung wird die Erstarrung und Abkühlung des Schwenklagers in der Form und nach dem Auswerfen des Gussteils berechnet, Bild 5. Für den Sandgießprozess sind in Bild 6 Bereiche gezeigt, in denen die Flüssig- und die Erstarrungsschwindung der Schmelze nicht mehr durch die Speiser ausgeglichen werden kann. Hier ist mit Schwindungsporositäten zu rechnen. Sollte das Gusssteil in der Serie in Sand gegossen werden, muss das Speisersystem optimiert werden.







Bild 6: Speisungskritische Bereiche.

#### 3.2 Berechnung der lokalen mechanischen Eigenschaften

Die Festigkeit und Duktilität eines Gussteils ist nicht konstant über das gesamte Bauteil, sondern ist lokal durch den Fertigungsprozess geprägt. Für die genaue rechnerische Ermittlung der Betriebsfestigkeit eines Bauteiles ist daher die Kenntnis der lokalen mechanischen Eigenschaften von großer Bedeutung.

Es gibt zwei wesentliche Faktoren, welche die Betriebsfestigkeit eines Gussteiles beeinflussen: zum einen das Gefüge, zum anderen die durch den Gießprozess hervorgerufenen Defekte wie z.B. Gasporositäten, Oxideinschlüsse und Verunreinigungen. Während für Eisenwerkstoffe die mechanischen Eigenschaften weitgehend durch das Gefüge bestimmt werden, wird das Verhalten von Leichtmetallen sehr viel stärker durch Gießfehler bestimmt. Dies gilt insbesondere für im Druckgussverfahren hergestellte Bauteile.

Da mit feinerem Gefüge jedoch auch die Ausbildung der Fehler feiner wird, kann man zumindest in einem ersten Schritt und bei Begrenzung auf das Sand- und Kokillengießverfahren von einem gewissen Zusammenhang von Gefüge und Fehler ausgehen. So korreliert der sekundäre Dendritenarmstand (SDAS) mit der lokalen Abkühlgeschwindigkeit (und damit mit dem Gefüge) und in begrenztem Rahmen mit der Gasporosität (da die Abkühlgeschwindigkeit die Ausscheidung von Wasserstoff beeinflusst). Der sekundäre Dendritenarmabstand (SDAS) ist der Abstand zwischen zwei benachbarten sekundären Dendritenarmen, Bild 7. Nach [1,2] kann ein Einflussfaktor für den SDAS auf die Dauerfestigkeit angegeben werden.



Bild 7: Definition des sekundären Dendritenarmabstandes (SDAS) und Darstellung des Einflussfaktors für den SDAS [µm] auf die Dauerfestigkeit. [1,2].

Es ist jedoch zu beachten, das dies nur einen ersten aber nicht hinreichenden Schritt zur Vorhersage lokaler mechanischer Eigenschaften darstellt. Gefüge als auch Fehler hängen stark den Prozessbedingungen von und der Schmelzebehandlung (Metallurgie) ab. So können bei gleicher Bauteilgeometrie und gleichen Abkühlbedingungen sowohl sehr hohe als auch sehr niedrige Duktilitäten in einem Bauteil erreicht werden. In Bezug auf die Betriebsfestigkeitsanalyse spielt die Duktilität nur bei sehr hohen Lastniveaus eine wichtige Rolle.

Im folgenden wird basierend auf der Korrelation zwischen sekundärem Dendritenarmabstand und Betriebsfestigkeit der Einfluss von Gießverfahren und Prozessparametern auf die Betriebsfestigkeit eines Schwenklagers demonstriert. In Bild 8 ist jeweils der berechnete SDAS für den Sandgießprozess (links) und den Kokillengießprozess (rechts) dargestellt. Da der SDAS für den Kokillengießprozess deutlich niedriger liegt als für den Sandgießprozess, ist hierfür auch eine deutlich höhere Betriebsfestigkeit zu erwarten.



Bild 8: Berechneter sekundärer Dendritenarmabstand (SDAS) für den Sandgießprozess (links) und den Kokillengießprozess (rechts).

### 4. Übertragung des berechneten Dendritenarmabstandes auf das FE-Netz zur Betriebsfestigkeitsberechnung

Die Betriebsfestigkeitsberechnung und die Gießsimulation stellen deutlich unterschiedliche Anforderungen an eine Vernetzung. Sinnvollerweise werden daher für beide Simulationen auch unterschiedliche Berechnungsnetze verwendet. Um dennoch den Datenaustausch zwischen den Berechnungsprogrammen sicherzustellen, wurden leistungsfähige Schnittstellen entwickelt. Bild 9 zeigt den SDAS für den Sandgießprozess einmal auf dem MAGMASOFT<sup>®</sup>-Modell und einmal auf dem FEMFAT<sup>®</sup>-Modell.



Bild 9: Berechneter sekundärer Dendritenarmabstand (SDAS) für das Sandgussverfahren. Die Werte werden von MAGMASOFT<sup>®</sup> (linke Seite) nach FEMFAT<sup>®</sup> (rechte Seite) übertragen.

# 5. Einfluss der lokalen Verteilung des sekundären Dendritenarmabstandes auf die Betriebsfestigkeit

Die Bewertung der Betriebsfestigkeit wird nun unter Berücksichtigung des lokalen Dendritenarmabstandes durchgeführt. In Bild 10 ist die berechnete Schädigung des Schwenklagers für den Sandgießprozess und in Bild 11 für den Kokillengießprozess dargestellt. Man erkennt, dass die maximale Schädigung für den Kokillengießprozess nur ca. 1/3 der Schädigung für den Sandgießprozess beträgt, das bedeutet umgekehrt 3-fache Lebensdauer für das Kokillenguß-Bauteil.



Bild 10: Vergleich der berechneten Schädigung des Schwenklagers für den Sandgießprozess (links) und den Kokillengießprozess (rechts).

### 6. Einfluss der Prozessbedingungen auf den lokalen Dendritenarmabstand und auf die Betriebsfestigkeit

Der Dendritenarmabstand in einem Gussteil hängt sowohl von der Konstruktion als auch von den Prozessparametern ab. Somit kann z.B. für den Kokillengießprozess durch eine verstärkte Kühlung im Bereich der am höchsten belasteten Stelle am Anschlussauge der SDAS von ca. 45 µm auf ca. 37 µm verringert werden.



Bild 11: Berechnete SDAS-Verteilung für den Kokillengießprozess: a) Ausgangsversion b) optimierter Kokillengießprozess.



Bild 12: Berechnete Schädigungssumme für den Kokillengießprozess: a) Ausgangsversion b) optimierter Kokillengießprozess.

Durch die Minimierung des SDAS kann die Schädigung nochmals um 10% reduziert werden. Die Steigerung der Betriebsfestigkeit ist zwar nicht sehr hoch, kann aber durch recht einfache Maßnahmen erreicht werden.

#### 7. Zusammenfassung

Die virtuelle Produktentwicklung hat sich in der Automobilindustrie mittlerweile weitgehend durchgesetzt. Bereits heute weisen die verwendeten Simulationstechnologien wie die Berechnung der Betriebsfestigkeit einen Reifegrad auf, der eine signifikante Reduktion der Entwicklungszeiten ermöglicht hat. Dennoch besteht auch in diesem Bereich noch ein deutliches Optimierungspotential. Getreu dem Motto, dass eine Berechnung nicht besser sein kann, als die ihr zugrunde liegenden Werkstoffdaten und –modelle muss insbesondere im Bereich der lokalen mechanischen Werkstoffeigenschaften noch weitere Entwicklungsarbeit geleistet werden.

Erste Schritte in diese Richtung sind bereits unternommen worden. Mit Hilfe der in der Gießereiindustrie bereits etablierten Simulation von Gießprozessen lassen sich bereits erste, für die Betriebsfestigkeit relevanten Größen wie der sekundäre Dendritenarmabstand (SDAS) berechnen und in Programme zur Berechnung der Betriebsfestigkeit integrieren. Dies wurde am Beispiel eines Schwenklagers in diesem Beitrag demonstriert. Dabei wurde auch gezeigt, dass die lokalen Werkstoffeigenschaften durch Optimierung der Prozessbedingungen beeinflussbar sind und im Hinblick auf eine Optimierung der Betriebsfestigkeit eines Bauteils eingesetzt werden können.

Dennoch sollte klar sein, dass mit dem sekundären Dendritenarmstand (SDAS) noch kein hinreichender Parameter zur Beschreibung lokaler Bauteileigenschaften gefunden ist. Die Qualität von Gussteilen aus Aluminium wird sehr stark durch Gießfehler wie Gasporositäten, Oxideinschlüsse und Verunreinigungen beeinflusst, die durch den SDAS nur begrenzt bzw. gar nicht erfasst werden.

#### Literatur

- [1] Dannbauer, H., Gaier, Ch.: "Integrating the Results from Process Simulation into Fatigue Life Analysis", NAFEMS Seminar "Integration of Numerical Simulation into the Development Process", Wiesbaden/Germany, Nov. 2003
- [2] Minichmayr, R.; Eichsleder, W.: "Lebensdauerberechnung von Gussbauteilen unter Berücksichtigung des lokalen Dendritenarmabstandes und der Porosität", Giesserei 90 Nr. 5, 2003, pp. 70-75
- [3] Hansen, P., M. Lipinski and M. Schneider: "Numerical Techniques And Their Application In Foundry ", Numerical Simulation of Foundry Processes, pp. 11-50, edited by F. Bonollo, S.Odorizzi, Sept. 2001
- [4] Hartmann, G.; Hepp, E.; Egner-Walter, A.; Dannbauer, H. : "Simulation of Local Properties of Metal Cast Engine and Suspension Parts", Conference "Virtual Product Creation", Stuttgart, June 2004