

Vorhersage von Gefüge und lokalen Eigenschaften für Kurbelgehäuse aus GJV

Dr.-Ing. **Achim Egner-Walter**, MAGMA GmbH, Aachen;
Dipl.-Ing. **Norbert Zenker**, Audi AG, Neckarsulm
Dipl.-Ing. **Eric Fritsche**, Eisenwerk Brühl GmbH, Brühl

Kurzfassung

Aufgrund ungleichmäßiger Abkühlbedingungen entstehen in Gussteilen lokal unterschiedliche Gefüge, die wiederum zu lokal unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften führen. Diese beeinflussen das Verhalten der Bauteile unter Last sowie deren Lebensdauer deutlich. Eine virtuelle Auslegung von Gussteilen kann daher nur dann effektiv durchgeführt werden, wenn die Fertigungssimulation in die Betriebsfestigkeitsberechnung integriert wird.

Das hierzu erforderliche Schließen der Lücke zwischen den bisher verfügbaren Ergebnissen der Gießprozesssimulation und lokalen zyklischen Werkstofffestigkeiten von Eisengusswerkstoffen wird derzeit im Rahmen des BMBF-Forschungsprojektes MABIFF untersucht. Erste Ergebnisse für Gusseisen mit Vermikulargraphit werden in diesem Beitrag vorgestellt.

Bei Gusseisen mit Vermikulargraphit gibt es im Wesentlichen zwei festigkeitsrelevante Gefügekenngößen: die Form und Größe der Graphitpartikel sowie die Ferrit-Perlitverteilung in der Matrix. Für die Simulation der Gefügeentstehung ist es notwendig, die metallurgischen Prozesse bei der Erstarrung und der eutektoiden Umwandlung zu verstehen und mathematisch zu beschreiben. Dazu wurden vorhandene Modelle im Bereich der Erstarrung erweitert und ein neues Modell zur Vorhersage der Ferrit-/Perlitverteilung entwickelt. Die Modelle wurden an Probekörpern und dem Audi 3,0l V6 TDI Kurbelgehäuse aus GJV-450 validiert. Die gemessenen und berechneten Gefügeverteilungen für Probekörper und Kurbelgehäuse werden im Rahmen des Beitrags vergleichend dargestellt und diskutiert.

1. Einleitung

Kurbelgehäuse werden nach dem Stand der Technik mit Hilfe von CAE-Methoden ausgelegt. Bei der rechnerischen Abschätzung der Betriebsfestigkeit geht man von einem homogenen Materialverhalten aus, fertigungsbedingte Materialfehler und Variationen im Gefüge werden nicht berücksichtigt. Die damit verbundene Unsicherheit in den Berechnungsergebnissen führt zu einer sehr konservativen Auslegung der Bauteile.

Ein wesentlicher Schritt in Richtung genauere Bauteilauslegung ist die Integration der Fertigungssimulation in die Festigkeitsberechnung. Dazu ist es erforderlich, einen quantitativen Zusammenhang zwischen dem fertigungsbedingten Gefüge und lokalen Schwingfestigkeiten zu ermitteln. Dieser muss dann in die Gießsimulation integriert werden. Parallel müssen die Programme zur Berechnung der Betriebsfestigkeit ertüchtigt werden, lokale Schwingfestigkeiten zu berücksichtigen.

Ein Ansatz, basierend auf den für Gusseisen mit Vermikulargraphit festigkeitsrelevanten Gefügekenngrößen Graphitform und -größe sowie Ferrit-/ Perlitverhältnis, [1], [2], wird im Folgenden am Beispiel des Audi 3,0l V6 TDI Kurbelgehäuses beschrieben.

2. Experimentelle Untersuchungen

Entscheidend für die Ermittlung einer repräsentativen Korrelation zwischen Gefüge und Schwingfestigkeit ist die Abbildung typischer, in einem Kurbelgehäuse auftretenden Gefügebroadbreiten in den Schwingproben. Da aufgrund der erforderlichen Probengröße aus dem Kurbelgehäuse ausschließlich Proben aus dem Bereich der Zylinderkopfverschraubungen genommen werden können, wurden für die Untersuchungen zusätzlich sog. Stufenkeile abgegossen. Die Geometrie des Stufenkeils und die Lage der Schwingproben im Stufenkeil sind in Bild 1 dargestellt.

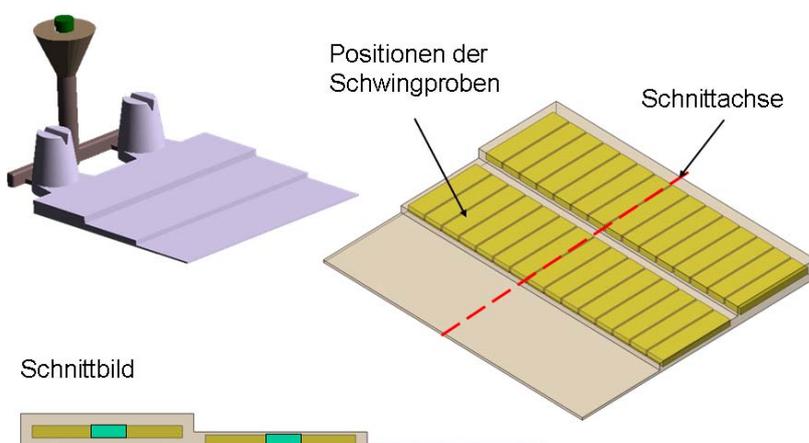
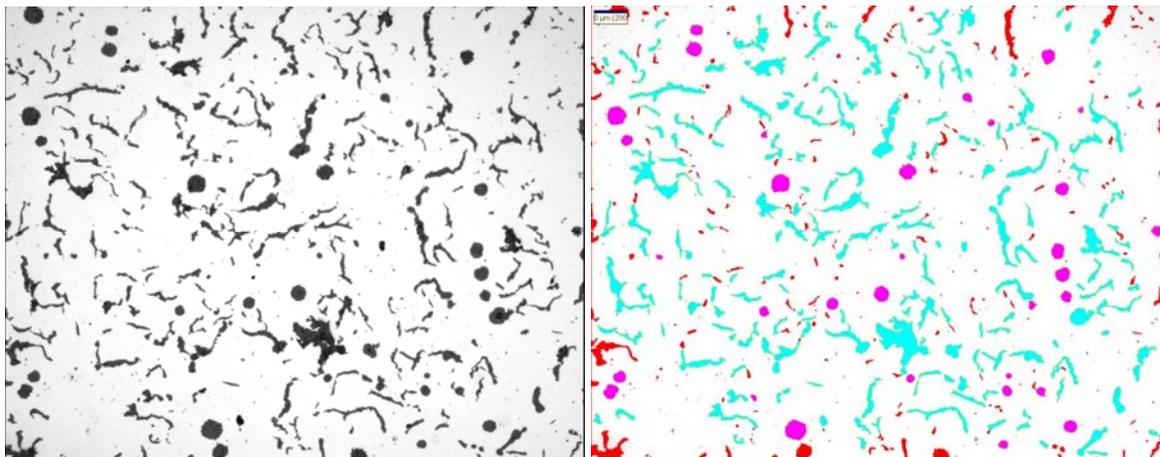


Bild 1: Geometrie des Stufenkeils und Lage der Schwingproben

Die Schmelzen wurden gezielt mit zwei unterschiedlichen Magnesium-Vorbehandlungsmengen konditioniert, die zu Rest-Magnesiumgehalten von 0,015% und 0,018% führen. Die sich daraus ergebenden Nodularitäten des Graphits spiegeln die typische, in kritischen Bereichen im Kurbelgehäuse auftretende Bandbreite wieder. Mit den unterschiedlichen Wandstärken im Stufenkeil wird darüber hinaus eine Variation des Ferrit-/Perlitverhältnisses erreicht.

Die Proben wurden bearbeitet und an der Oberfläche poliert, um ausschließlich den Einfluss des gesunden Gefüges auf die Schwingfestigkeit zu ermitteln. Der Einfluss der Guss Oberfläche war nicht Bestandteil der Untersuchungen.

Die Schwingversuche wurden sowohl unter Zug-Druck- als auch unter Biegewechselbelastung durchgeführt. Da in der rechnerischen Betriebsfestigkeitsanalyse zur Berechnung der Anrisslebensdauer sowohl das Spannungs- als auch das Dehnungskonzept angewendet wird, wurden sowohl spannungs- als auch dehnungsgeregelte Versuche durchgeführt.



Original : 100 : 1 (Stufenkeil 15 mm)

Nodularität 13,6 % => 235 Graphitpartikel / 32 Sphäroliten
(rot = nicht ausgewertete Teilchen)
(Magenta = Sphäroliten)
(Türkis = Vermikel)

Bild 2: Bildanalyse zur Bestimmung der Nodularität des Gefüges

Nach dem Bruch wurden die Schwingproben in der Bruchfläche metallographisch untersucht und das lokale Gefüge mit automatischer Bildauswertung gemäß DIN EN ISO 945 bestimmt. Ausgewertet wurden die Zahl, Form und Größe der Graphitpartikel, sowie die Ferrit-/ Perlitverteilung. Zusätzlich wurde die chemische Zusammensetzung ermittelt. Bild 2 zeigt exemplarisch die Ermittlung der Nodularität für einen Schliff einer Schwingprobe aus dem Stufenkeil.

3. Weiterentwicklung der Gefügevorschau

Die mechanischen Eigenschaften und das Gefüge von Eisengusswerkstoffen werden in hohem Maße durch die Metallurgie beeinflusst. Bei gleichem Wärmehaushalt im Gussteil sind hier insbesondere die Zusammensetzung der Legierungselemente, Zusatzelemente und Verunreinigungen, die Schmelzmetallurgie und die eingesetzte Impfbildung zu nennen. Zur Vorhersage des Gefüges müssen daher folgende physikalisch-chemische Einflüsse berücksichtigt werden [3]:

- Keimbildung des Graphits unter Berücksichtigung der Keimbildungswirksamkeit des Impfmittels und des Phasengleichgewichts
- Art, Verteilung und Morphologie des Graphits
- Austenitausscheidung
- Seigerungsverhalten der Legierungselemente
- Festphasenumwandlung Austenit -> Ferrit/Perlit aufgrund Seigerungsbedingungen und Diffusionslängen
- Berücksichtigung der wandernden Kondensationszone im Formsand

Während in der Gießprozesssimulation für Gusseisen mit Vermikulargraphit die mit der Erstarrung verbundenen Vorgänge bereits seit längerem gut beschrieben werden können, fehlte bisher ein Modell zur Vorhersage der Ferrit-/ Perlitverteilung. Dieses Modell wurde im Rahmen dieses Projektes entwickelt und auf die untersuchten Probekörper sowie das Kurbelgehäuse angewendet.

Für die Bildung von Ferrit und Perlit sind im Wesentlichen die bei der Erstarrung entstehende Graphitverteilung und die eutektoide Umwandlung entscheidend. Bei der Erstarrung von GJV entstehen zwei Arten von eutektischen Zellen: GJS-Zellen und GJV-Zellen. Beide Zelltypen wachsen nach unterschiedlichen Mechanismen, wobei neben der chemischen Zusammensetzung und der Impfung die Abkühlgeschwindigkeit darüber bestimmt, ob am Ende der Erstarrung mehr Sphärolithen (GJS-Zellen) oder mehr Würmchen (GJV-Zellen) vorliegen.

Bei der eutektoiden Umwandlung von Eisengusswerkstoffen wandelt sich der Austenit in Ferrit und Graphit sowie Perlit um. Welche dieser Phasen in welcher Menge gebildet wird, hängt von der chemischen Zusammensetzung der Legierung, der Zahl der Graphitteilchen und der lokalen Abkühlgeschwindigkeit ab. Die Umwandlung beginnt mit der Bildung des Ferrits, dessen Bildungstemperatur bei den im Sandguss üblichen Abkühlgeschwindigkeiten oberhalb der Bildungstemperatur des Perlits liegt. Allerdings läuft die Bildung des Ferrits deutlich langsamer ab, als die des Perlits.

Der bei der Ferritbildung entstehende Graphit lagert sich an den vorhandenen Graphit an. Dieser Diffusionsvorgang benötigt Zeit, so dass über die Verteilung von Ferrit und Perlit zum einen die lokale Abkühlgeschwindigkeit bei der eutektoiden Umwandlung und zum anderen die Diffusionslänge (und damit der Abstand der Graphitteilchen) entscheidet.

Die Ferritbildung beginnt immer im Innern einer eutektischen Zelle, da dort die Bildungstemperatur aufgrund von Seigerungsvorgängen höher ist als an deren Rand. Die größten Ferritmengen finden sich daher im Innern der eutektischen Zellen. Die Ferritbildung ist diffusionskontrolliert und wird über die entsprechenden 3-dimensionalen Diffusions-Differentialgleichungen im Berechnungsmodell abgebildet. Dabei wird der Abstand der Graphitteilchen ebenso berücksichtigt wie die Seigerungen von Si, Cu und Mn. Bild 3a zeigt exemplarisch den Verlauf der Ferritbildungstemperatur T_{fer} und der Perlitbildungstemperatur T_{per} über dem Radius einer eutektischen Zelle r_{eu} und Bild 3b die zugehörigen Seigerungsprofile.

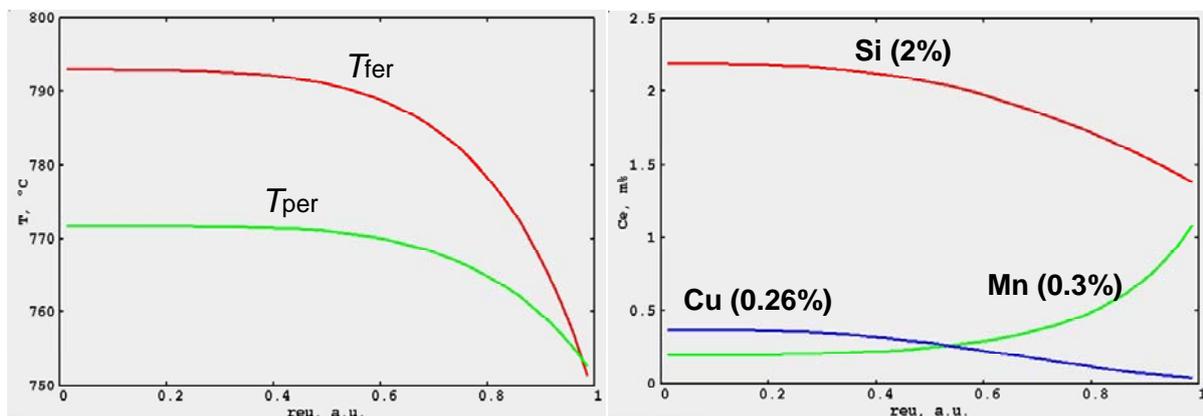


Bild 3: Verläufe über den Radius einer eutektischen Zelle

- Bildungstemperaturen von Ferrit und Perlit,
- Seigerungen von Silizium, Kupfer und Mangan (der angegebene Wert bezieht sich auf die mittlere Verteilung im Gefüge)

4. Validierung der Berechnungsmodelle

Die Gefügevorhersage wurde durch einen Vergleich von berechneten und gemessenen Gefügeverteilungen für die beiden Varianten des Stufenkeils und für das Kurbelgehäuse validiert. Da die lokalen Erstarrungs- und Abkühlgeschwindigkeiten sowohl ein Berechnungsergebnis als auch eine wesentliche Einflussgröße auf die Gefügeberechnung darstellen, wurde die Erstarrung und Abkühlung anhand von realen und virtuellen Thermo-Elementen untersucht. Bild 4 zeigt exemplarisch gemessene und berechnete Abkühlkurven für drei charakteristische Positionen im Kurbelgehäuse. Die Kurven stimmen sehr gut überein, die Abweichungen liegen im Bereich typischer Streuungen von Messkurven.

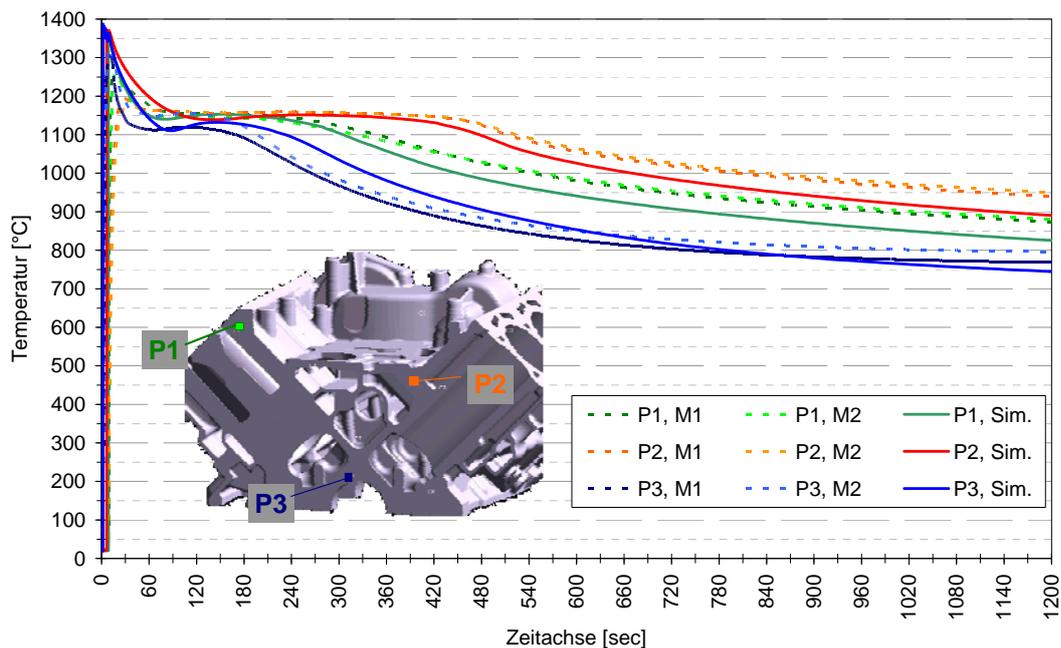


Bild 4: Vergleich gemessener und berechneter Abkühlkurven für drei charakteristische Positionen im Kurbelgehäuse

Die Gefügeausbildung wurde für beide Varianten des Stufenkeils mit den Rest-Magnesiumgehalten von 0,015% und 0,018% sowie für ausgewählte Positionen im Kurbelgehäuse untersucht. Die Positionen im Kurbelgehäuse wurden so gewählt, dass aufgrund unterschiedlicher Abkühlungs- und Wandstärkenverhältnisse signifikante Gefügeunterschiede erwartet werden konnten. Die für diese Positionen berechneten und gemessenen Nodularitäten sind in Bild 5 und die Ferrit-/ Perlitverteilungen in Bild 6 vergleichend dargestellt. Der Fehlerbalken repräsentiert die Streubreite der Messungen. Der erhöhte Magnesiumgehalt führt sowohl in der Messung als auch in der Simulation zu einer deutlich höheren Nodularität in den Stufen. Das gleiche Verhalten zeigen erwartungsgemäß die schnell erstarrenden Bereiche im Kurbelgehäuse, die gegenüber dem dickwandigeren Lagerstuhlbereich deutlich höhere Nodularitäten aufweisen. Insgesamt stimmen berechnete und gemessene Nodularitäten gut überein, die maximalen Abweichungen liegen innerhalb des gemessenen Streubandes. Die in Bild 6 dargestellten berechneten und gemessenen Ferritverteilungen zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Auch hier liegen die Abweichungen im Streuband der Messungen.

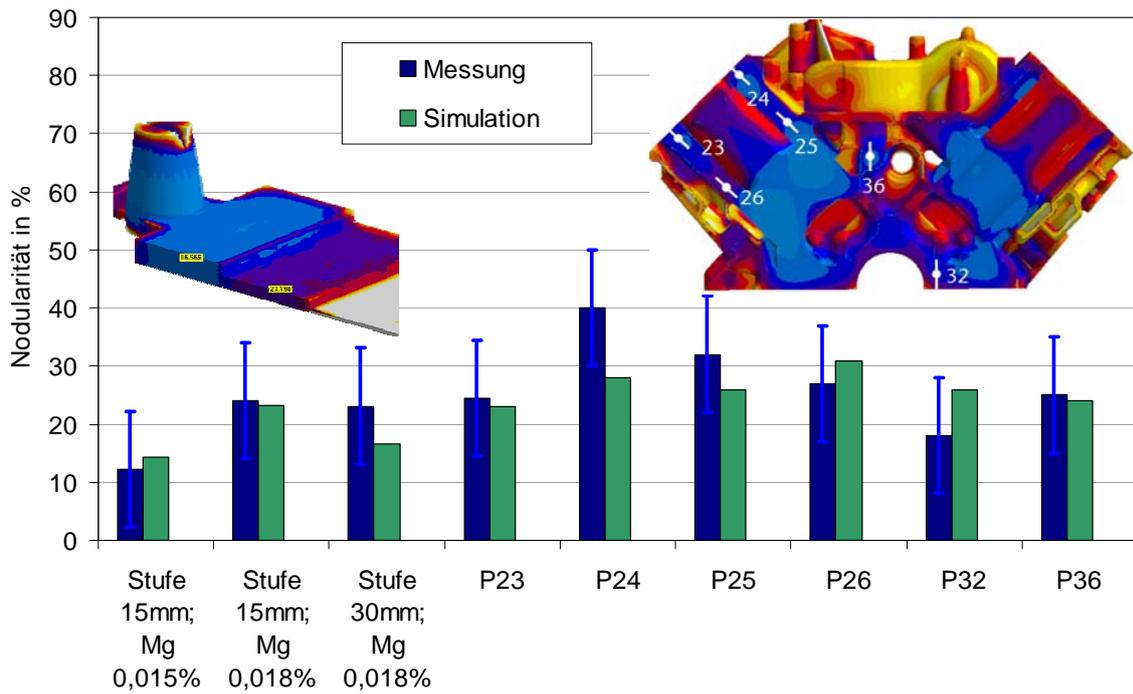


Bild 5: Berechnete und gemessene Nodularitäten für den Stufenkeil und ausgewählte Positionen im Kurbelgehäuse

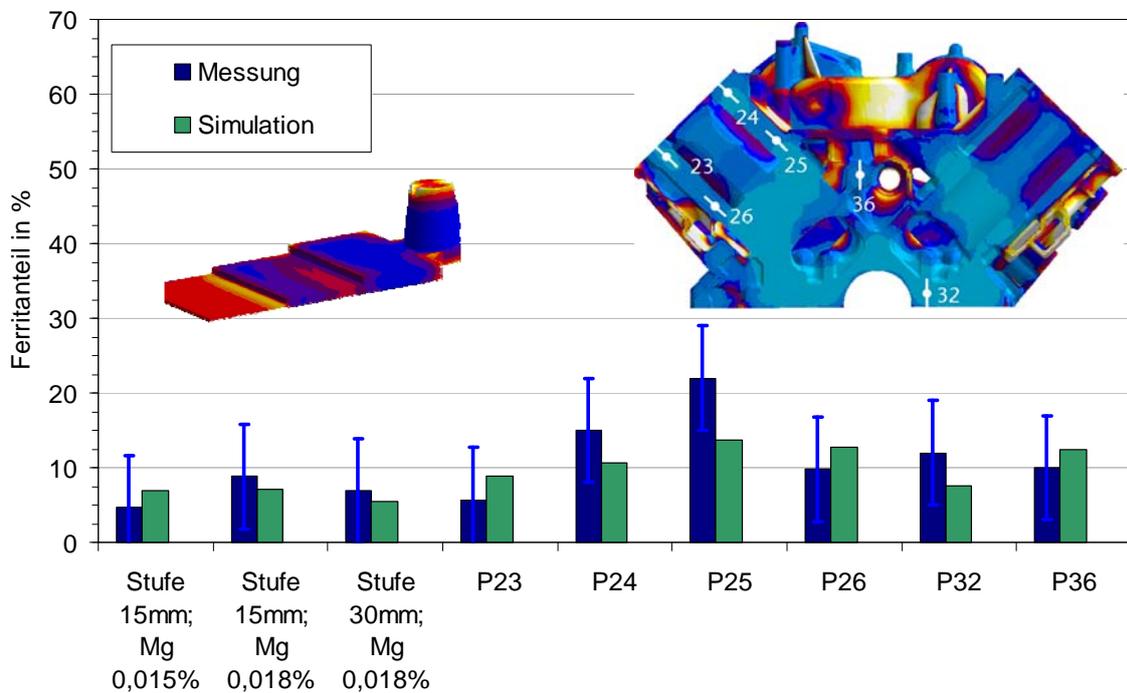


Bild 6: Berechnete und gemessene Ferritanteile für den Stufenkeil und ausgewählte Positionen im Kurbelgehäuse

5. Regressionsanalyse zur Kopplung von Gefüge und Schwingfestigkeit

Für die Proben aus den Stufenkeilen und dem Kurbelgehäuse wurden zahlreiche Schwingversuche (unter Zug-Druck- sowie Biegewechselbelastung) durchgeführt. Basierend auf den untersuchten Gefügevarianten wurden gefügeabhängige Wöhlerkurven ermittelt. Bild 7 zeigt exemplarisch zwei gemessene Wöhlerkurven für unterschiedliche Perlit-Anteile.

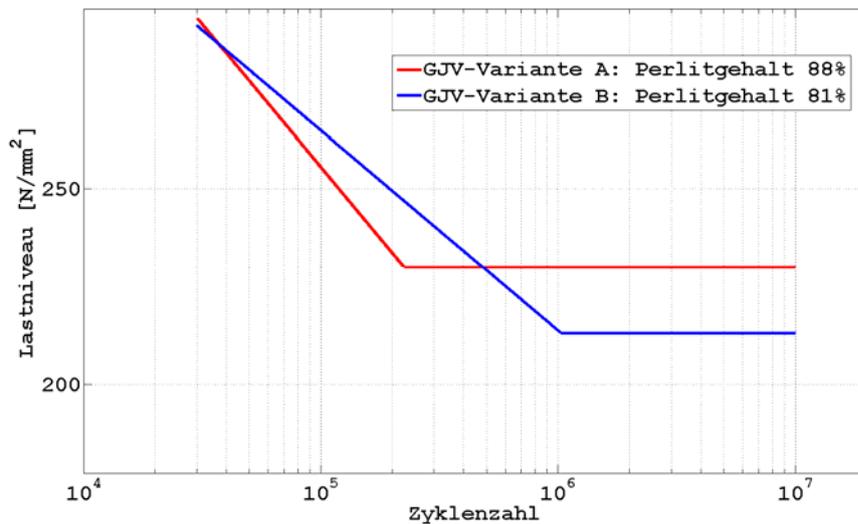


Bild 7: Beispielhafte gemessene Wöhlerkurven für GJV-450 für unterschiedliche Perlitanteile

Mit Hilfe des mathematischen Verfahrens der Varianz- und Regressionsanalyse wurde auf Basis des experimentellen Datenmaterials eine Korrelation zwischen dem lokalen Gefüge und der Schwingfestigkeit abgeleitet. Wesentliche Teile der Korrelationsfunktion stellen Form und Menge des Graphits sowie der Perlitanteil dar. Allerdings ist kein dominanter Einfluss eines einzelnen Gefügeparameters erkennbar, entscheidend ist die richtige Kombination.

Bild 8 zeigt exemplarisch die Korrelationsvorhersage für die Dauerfestigkeit polierter Zug-Druck-belasteter Probestäbe im Vergleich zur Messung. Dargestellt ist die Abweichung von der mittleren Schwingfestigkeit. Der linke und rechte Grenzwert kennzeichnen die Bandbreite der gemessenen Abweichungen. Der Bestimmtheitsgrad des Modells liegt bei 83%.

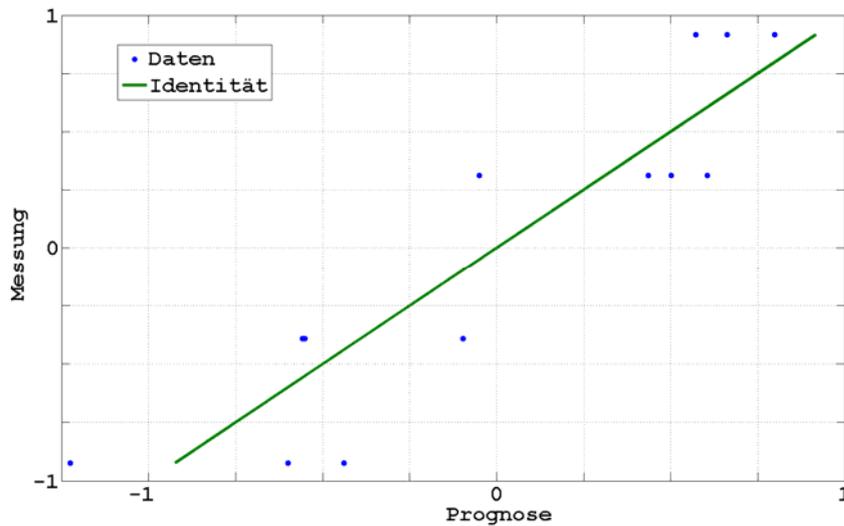


Bild 8: Vorhergesagte und gemessene Zug-Druck Dauerfestigkeit für GJV-450. Dargestellt ist die Abweichung von der mittleren Schwingfestigkeit, der linke und rechte Grenzwert kennzeichnen die Bandbreite der gemessenen Abweichungen

6. Simulation der Betriebsbeanspruchung des Kurbelgehäuses

Die wesentlichen mechanischen Beanspruchungen eines Kurbelgehäuses entstehen durch die beim Zünden wirkenden Druckkräfte. Über Kolben und Pleuel werden die Kräfte in die Kurbelwelle und die Kurbelwellenlager übertragen und von dort über die Lagerbrücke und die Verschraubung in das Kurbelgehäuse eingeleitet.

Die Betriebsfestigkeit eines Motors wird in sehr aufwendigen Dauerlaufversuchen auf Prüfständen nachgewiesen. Um in der Entwicklungsphase eines Motors den Testaufwand zu reduzieren, wird die Betriebsfestigkeit des Kurbelgehäuses in einem vereinfachten Zweiachs-Pulsprüfstand messtechnisch untersucht. Der Prüfstands Aufbau ist in Bild 9 dargestellt.

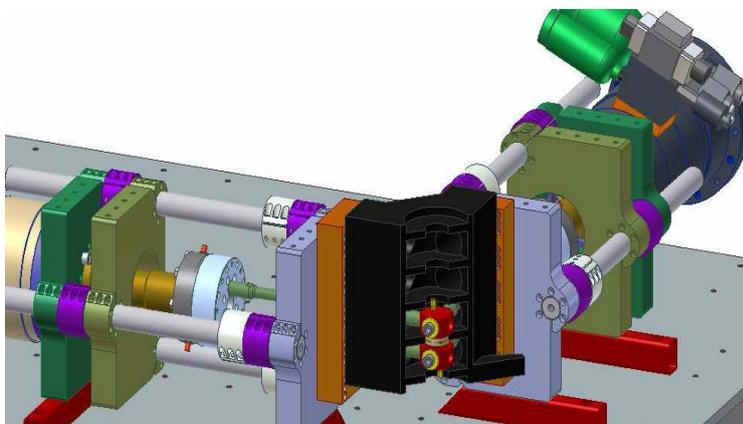


Bild 9: Zweiachs-Pulsprüfstand der Fa. IMA Dresden

Basis des Pulsversuchs sind die mit Hilfe einer Mehrkörpersimulation berechneten Hauptlagerkräfte für den Drehzahlhochlauf und den Volllastbereich. Für die Zweiachs-Pulsprüfung werden daraus zwei einhüllende Kraftellipsen ermittelt, die zur Erfassung statistischer Streuungen aus Fertigung, Montage- und Betriebslasten skaliert werden. Zur Modellabstimmung werden die berechneten Dehnungsverläufe an einigen Stellen mit gemessenen Dehnungssignalen verglichen, Bild 10.

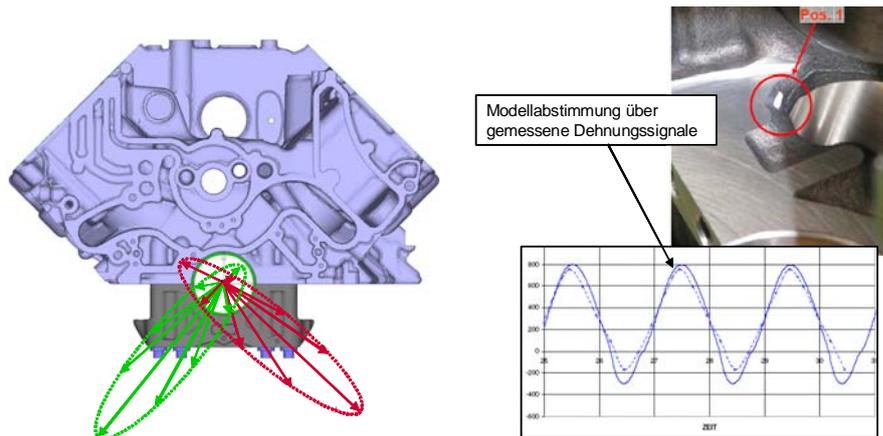


Bild 10: Modell zur Nachrechnung des Pulsversuchs

In der Festigkeitsberechnung werden die lokalen Spannungen und Dehnungen basierend auf den Vektoren der einhüllenden Lagerkraftellipsen mit Hilfe der FE-Methode berechnet. Mit lokalen Konzepten werden diese dann hinsichtlich ihrer schädigenden Wirkung bewertet und die zu erwartende Lebensdauer abgeschätzt. Als zulässige Werte der Beanspruchbarkeit dienen Ergebnisse aus zyklischen Probenversuchen. Für das 3,0l V6-TDI Kurbelgehäuse wurden auf diese Weise die in Bild 11 dargestellten höchstbeanspruchten Bereiche ermittelt.

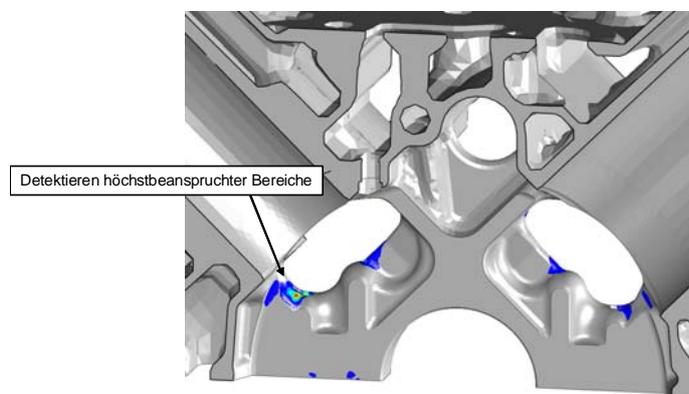


Bild 11: Die höchstbeanspruchten Bereiche im Kurbelgehäuse liegen im oberen Bereich der Verschraubung der Lagerbrücke

Für eine verbesserte rechnerische Abschätzung der Betriebsfestigkeit wurde das berechnete Gefüge im rissgefährdeten Bereich analysiert. Die berechnete Nodularität liegt dort bei ca. 20%, der Perlitanteil bei über 90%, Bild 12.

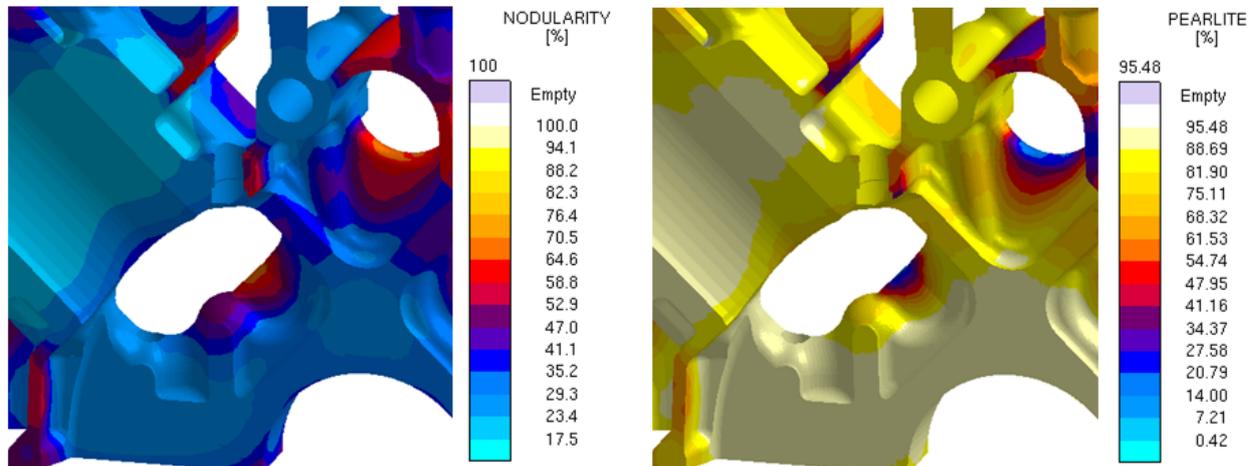


Bild 12: Berechnete Verteilung der Nodularität (links) und des Perlits (rechts) in den höchstbeanspruchten Bereichen des Kurbelgehäuses

Aufgrund des hohen Perlitanteils kann für die Bewertung der Betriebsfestigkeit die in Bild 7 dargestellte, obere Wöhlerlinie verwendet werden. Diese zeigt eine im Vergleich zur üblicherweise verwendeten Wöhlerlinie um ca. 20 MPa erhöhte Dauerschwingfestigkeit. Eine auf dieser Basis durchgeführte Betriebsfestigkeitsberechnung führt zu einer Verdopplung der Bruchlastspielzahl, Bild 13. Dies erklärt, warum in diesem Bereich trotz niedriger rechnerischer Sicherheitsbeiwerte auf dem Prüfstand keine Risse auftreten.

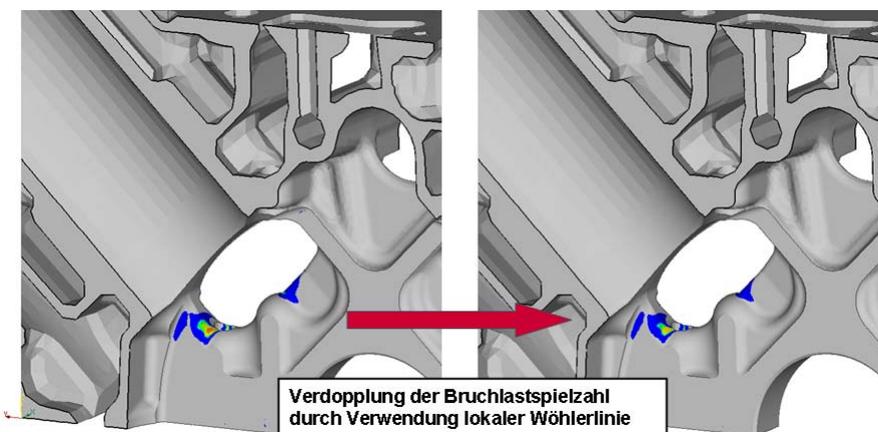


Bild 13: Berechnete Betriebsfestigkeit im höchstbeanspruchten Bereich unter Berücksichtigung der aufgrund des hohen Perlitanteils höheren Schwingfestigkeit

7. Zusammenfassung

Die lokalen Schwingfestigkeiten von GJV zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der lokalen Gefügeausbildung. Eine Varianz- und Regressionsanalyse unter Verwendung der lokalen Graphit- und Ferrit-/ Perlitverteilung zeigt eine gute Korrelation zwischen gemessenen und vorhergesagten Schwingfestigkeiten. Dabei ist kein dominanter Einfluss eines Gefügeparameters erkennbar, entscheidend ist die richtige Kombination mehrerer Parameter.

Die Gefügeverteilung für Bauteile aus Gusseisen mit Vermikulargraphit kann mit Hilfe der Gießsimulation zuverlässig berechnet werden. Dazu wurde ein neues Berechnungsmodell zur Vorhersage der Ferrit-/ Perlitverteilung entwickelt und an Probekörpern und dem Audi 3,0l V6 TDI Kurbelgehäuse validiert.

Die Anwendung der Ergebnisse der Gießsimulation auf die betriebsfeste Auslegung des Kurbelgehäuses führt in den höchstbeanspruchten Stellen im Vergleich zur konventionellen Berechnung zu einer Verdopplung der Bruchlastspielzahl. Dies deckt sich mit den experimentellen Ergebnissen, da trotz geringer Sicherheitsfaktoren der konventionellen Berechnung auch bei erhöhter Belastung keine vorzeitigen Ausfälle auf dem Prüfstand auftreten.

Die Integration der Fertigungssimulation in die betriebsfeste Auslegung von gegossenen Bauteilen ist eine Schlüsseltechnologie für erfolgreichen Leichtbau. Nur damit kann das Potential gegossener Werkstoffe ausgeschöpft werden. Die in diesem Beitrag für Kurbelgehäuse aus GJV dargestellte Vorgehensweise ist ein konsequenter Schritt in diese Richtung.

Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF, das wesentliche Teile der Arbeit unter dem Förderkennzeichen 01R/0713D fördert, sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Projektpartner in diesem Projekt sind Audi AG, Eisenwerk Brühl GmbH, Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Institut für Gießereitechnik IFG, MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Meuselwitz Guss Eisengießerei GmbH und Walter Hundhausen GmbH.

Literatur

- [1] Dawson, S.: Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Properties for Engine Design. Material in Powertrain, Dresden (1999)
- [2] Grunow, F., Görtz, W.; Weber, R.: Gusseisen mit Vermikulargraphit (GJV) – Der Sandwichwerkstoff zwischen Gusseisen mit Lamellengraphit und Aluminium für PKW-Zylinderkurbelgehäuse, VDI-Berichte Nr. 2061 (2009), S.21-31
- [3] Sturm, J. C.: Prozesssimulation des Werkstoffes Gusseisen mit Vermikulargraphit, Gießerei 90, Nr. 3, S. 64-70, (2003)