

Zusammenfassung der Promotionschrift

**Lebensdauerabschätzung von Bauteilen aus globularem Grauguss auf der  
Grundlage der lokalen gießprozessabhängigen Werkstoffzustände**

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der

Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

**Jiasheng Wang**

Mentor:

Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke

März 2020

## **Problemstellung**

1. Das Verhältnis zwischen der statischen Festigkeit und der Dauerfestigkeit von Eisengusswerkstoffen ist nur in den herkömmlichen Festigkeitsrichtlinien, die aus den Prüfergebnissen deutscher Werkstoffproben abgeleitet wurden, vorgegeben und kann infolge des mangelnden Gieß-Know-hows insbesondere von Gießereien in Niedriglohnländern nicht unbedingt gewährleistet werden. Es kann vorkommen, dass die erwarteten Festigkeitswerte nicht gewährleistet werden können und zu einem vorzeitigen Ausfall des Bauteils führen.
2. Die gegossenen Komponenten werden heute unter der Annahme einer homogenen Verteilung der Eigenschaften berechnet und konstruiert. Dies kann aber auch dazu führen, dass die kritischen Stellen eines Gussbauteils hinsichtlich ihrer Festigkeit zwar richtig ausgelegt sind, aber die untergeordneten Bereiche deutlich überdimensioniert sein könnten.

## **Zielsetzung der Arbeit**

3. Das Ziel der Arbeit ist, eine mögliche Verbesserung der Güte der Lebensdauervorhersage für Gusseisenwerkstoffe mit Kugelgraphit zu erreichen.

## **Stand der Wissenschaft**

4. Nach dem Stand der Technik wurde das Festigkeitsverhältnis zwischen der Werkstoffdauerfestigkeit und der Zugfestigkeit für GJS-Werkstoffe vorzugsweise als konstant 0,34 angenommen (z.B.:  $S_d/R_m=0,34$  nach der sogenannten FKM-Methode), was der bisherigen industriellen Erfahrung manchmal offensichtlich widerspricht. Die SWL-Methode geht ebenfalls von einer konstanten Festigkeitsverhältnis aus, die aber mit der Streckgrenze  $R_{p0.2}$  korreliert ist.
5. Die Gießprozesssimulation wird derzeit standardmäßig zur Optimierung der Gießtechnik und Fertigungsparameter eingesetzt. Für Gusseisen mit Kugelgraphit sind neben der traditionellen Formfüllung und Erstarrungssimulation auch die Gefügeberechnung und die Vorhersage statischer mechanischer Eigenschaften möglich. Obwohl die Gießprozesssimulation für Eisenguss lokale Werkstoffeigenschaften (Gefüge) liefert, fehlt bisher ein direkter, quantifizierbarer Zusammenhang dieser Größen zu den lokalen Materialkennwerten der Grunddauerfestigkeit.
6. Die künstliche Intelligenz ist für Datenanalysen sehr vielversprechend. Für Festigkeitsberechnungen wird diese Methodik aber noch kaum eingesetzt. Die Möglichkeit der Anwendung eines künstlichen neuronalen Netzes zur Klassifizierung der Gießkompetenz der Gießer und der lokalen Gussqualität wäre theoretisch denkbar.

## **Forschungsmethodik**

7. Insgesamt wurden Schwingfestigkeitswerte der einzelnen gegossenen Proben sowie der Proben des Bauteils von verschiedenen Gussherstellern weltweit entweder durch direkte Schwingversuche oder durch eine Sammlung von Betriebsfestigkeitsversuchen bestimmt.
8. Die statischen Festigkeitswerte, die Härte und die chemische Zusammensetzung wurden ebenfalls gemessen. Zur besseren metallografischen Untersuchung der Bruchflächen wurde eine Grafikerkennungssoftware mit der Programmiersprache Python entwickelt.

9. Diverse Korrelationsmöglichkeiten zwischen der Dauerfestigkeit und chemischen Zusammensetzungen, der Nodularität (Rundheit) der Kugelgraphite, der Ferrit-Perlit-Anteile, der Größenklasse der Kugelgraphite usw. wurden ausprobiert. Auch Regressionen mit Multiparametern wurden untersucht.
10. Eine Gießprozesssimulation wurde für das getestete Bauteil durchgeführt und durch Korrelation mit CT-Daten der Porosität validiert. Somit können die lokalen statischen Festigkeitswerte und die Eigenschaften der Mikrogefüge auch ohne Messungen ermittelt werden.
11. Alle Proben und getesteten Bauteile wurden mit der Finite-Element-Methode analysiert. Die Lebensdauer der Bruchstelle wurde sowohl mit der konventionellen Methode (ohne Berücksichtigung des Herstellungsprozesses) als auch mit der neuen Methode (mit Gießprozesssimulation) prognostiziert.
12. Die gesammelten und berechneten Daten wurden mit einem künstlichen neuronalen Netzwerk analysiert. Die Gewichtungen der Netzwerkverbindung wurden visualisiert. Zum Zweck der automatischen Korrektur der Lebensdauerprognosen basierend auf einer geschätzten Gießqualität ist ein sogenannter „kNN“-Algorithmus (Englisch: k-Nearest-Neighbors) zum Einsatz gekommen.

## Wesentliche Ergebnisse

13. Ein detaillierter Vergleich der gebrochenen Schwingproben zweier Gießereien hat gezeigt, dass sie auch bei nahezu gleicher Zugfestigkeit unterschiedliche Dauerfestigkeiten aufweisen können. Der Hauptgrund lässt sich auf deren unterschiedliche Mikrogefüge zurückführen. Auch der Vergleich der chemischen Zusammensetzungen hat auf unterschiedliche Gießkompetenzen der Gießereien hingewiesen.
14. Dank der metallografischen Arbeit und Korrelationsanalyse konnten drei wesentliche Parameter zur Bestimmung der lokalen Dauerfestigkeit festgestellt werden:
  - a. statische Festigkeit
  - b. Ferrit- und Perlitanteil der Mikrostrukturen und
  - c. Kugelgraphitanzahl pro Flächeneinheit.
 Die Nodularität des Kugelgraphits scheint nur eine untergeordnete Rolle zu spielen. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein neues Festigkeitsverhältnisdiagramm (sogenanntes Sd/Rm-SG-Diagramm) entwickelt.
15. Die gesammelten Daten, die zum Teil aus den kommerziellen Werkstoffdatenbanken und zum Teil aus den Literaturen stammen, sind gemeinsam mit den aktuellen Versuchsdaten unter diesem Aspekt mit einer selbst programmierten Graphikerkennungssoftware erneut analysiert worden. Die Kurven des neu erstellten Festigkeitsverhältnisdiagramms wurden mathematisch beschrieben und ihre allgemein gültige Formulierung mit dem Namen „WJS-Gleichung“ bezeichnet (Wechselfestigkeitsverhältnis von GJS). Diese neue Methodik sollte vor allem ermöglichen, die Bauteildauerfestigkeit auf der Grundlage der gemessenen oder durch eine Gießsimulation vorhersagten lokalen Zugfestigkeitswerte sowie Mikrogefügenstrukturen besser zu prognostizieren.
16. Mit diesem neuen Ansatz kann die Abweichung der bisherigen konventionellen Dauerfestigkeitsprognosen gut begründet werden. Je nach lokalem Gießprozess sind die Größe der Kugelgraphite und deren Anzahl antiproportional. Je langsamer der Abkühlprozess ist, desto weniger erscheinen die Kugelgraphite. Dementsprechend steigt auch die Neigung zur Bildung von

Gussfehlern. Die Werkstoffprobe ist von innen bereits „angerissen“. Hohlräume der großen Kugelgraphite und Mikrolunker sind auch potenziell gefährdete Stellen. Während die Zugfestigkeit im Zugversuch aufgrund der geringen Änderung der globalen Querschnittsfläche nur wenig beeinträchtigt wird, würde die Schwingfestigkeit im Dauerversuch infolge der inneren Schwachstellen je nach deren Grundmatrizen dagegen stark abfallen.

17. Mithilfe der Versuche sowie der Durchführung der Gießsimulation ist es gelungen, unterschiedliche Methoden der Lebensdauervorhersage unter Berücksichtigung der Herstellungsprozesse miteinander zu vergleichen und weiterzuentwickeln. Reichliche Verbesserungsmöglichkeiten wurden für das Projekt SWL2020 (synthetische Wöhlerlinie für eiserner Gusswerkstoffe), an dem sich die Materialforschungs- und prüfanstalt Weimar (MFPA) beteiligt hat, vorgeschlagen.
18. Eine KI-basierte (KI: Künstliche Intelligenz) Datenbank wurde sowohl für die getesteten Proben als auch für die getesteten Bauteile erstellt. Ein zusätzlicher Kompetenzfaktor der Gießer bzw. ein zu schätzender Gießqualitätsfaktor anhand der Gießbedingung wurde für die Korrektur des Verhältnisses zwischen der statischen Festigkeit und Dauerfestigkeit je nach angewendeter Methodik eingeführt. Unsicherheiten der Lebensdauervorhersage im Zeitfestigkeitsbereich können auch automatisch korrigiert werden. Die neuen Versuchsdaten können mittels eines künstlichen neuronalen Netzes nach Gießqualitäten kategorisiert werden und jede Zeit mit den alten Daten integriert werden. Somit ist die Datenbank lernfähig. Ein Vergleich hat gezeigt, dass der Einsatz von diesem innovativen Verfahren die Streuung der Lebensdauerprognosen um 50 Prozent reduzieren kann.