

FOTO: MAGMA

# Vom Wärmezentrum zum abgesicherten Bauteilverhalten

Neue Möglichkeiten zur quantitativen Vorhersage von Gusseisen

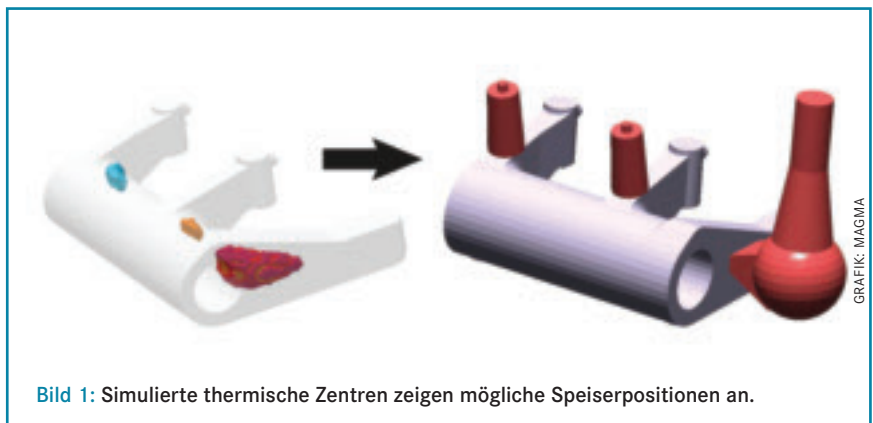
Vorhersage der Bauteil-Lebensdauer aufgrund lokaler Wöhlerkurven.

VON CORINNA THOMSER, MATHIAS BODENBURG UND JÖRG C. STURM, AACHEN

## Vom Wärmezentrum zur Gießprozess-Simulation

Die Gießprozess-Simulation wurde in ihren Anfängen häufig als „Erstarrungssimulation“ bezeichnet, da zunächst nur die Vorhersage der Erstarrung und der Abkühlung des Gussteils durch die Berechnung der Wärmeleitung möglich war. Erstes Ziel der computergestützten Prozessauslegung war damals die Vorhersage von lokalen thermischen Zentren, um die Position und Größe von Speisern sicher bestimmen zu können (Bild 1).

Mit den kontinuierlichen Entwicklungen in den letzten dreißig Jahren wurde



GRAFIK: MAGMA

Bild 1: Simulierte thermische Zentren zeigen mögliche Speiserpositionen an.

der gesamte Prozess des Gießens und Erstarrens berechenbar. Heute können das Strömungsverhalten der Schmelze beim Füllen der Form genauso simuliert

werden wie die bei der Erstarrung und Abkühlung lokal entstehenden Gefüge inkl. der damit verbundenen mechanischen Eigenschaften. Warm- und Kalt-

risse sowie der Verzug von Gussteilen können über die Simulation der Eigenspannungen vorhergesagt werden. Über den Gießvorgang hinaus sind die simulationsgestützte Herstellung von Kernen und die Berechnung des Verhaltens von Sandkernen beim Gießen (Ausgasen) sowie das Einstellen von geforderten Gefügen durch eine Wärmebehandlung heute Stand der Technik der Gießprozess-Simulation (Bild 2).

Seit langem diskutieren Gießer und Gussteilabnehmer, wie lokale Gusseigenschaften, die aus dem unterschiedlichen Erstarrungsverhalten resultieren, nicht nur als Risiko, sondern auch als Chance für den Leichtbau genutzt werden können. Der klassische Ansatz für die Auslegung von Gussbauteilen geht von homogenen Gefügen und damit verbundenen homogenen Materialeigenschaften aus. Darüber hinaus werden die Eigenspannungen aus dem Gießprozess auch nicht berücksichtigt. Diese Herangehensweise führt in der Regel zu großen Sicherheitszuschlägen bzw. Überdimensionierung und verhindert die systematische Erschließung und Nutzung des Werkstoffpotenzials. Hier bieten die Möglichkeiten der Gießprozess-Simulation mit der Vorhersage von quantitativen lokalen Materialkenngrößen (Gefüge, Eigenschaften, Eigenspannungen) große Potenziale für die betriebstechnische Auslegung von Bauteilen.

Die aktuellen Möglichkeiten werden in den folgenden Anwendungsbeispielen vorgestellt.

## KURZFASSUNG:

Die Anfänge der computergestützten Vorhersage von Gießprozessen reichen bis in die späten 1970er- und frühen 1980er-Jahre zurück. Zuerst waren es hauptsächlich sogenannte Expertensysteme, die empirisches Wissen mit geometrischen Informationen verknüpften. Danach folgten erste 2-dimensionale Simulationsanwendungen, die physikalische Gesetzmäßigkeiten berücksichtigten (z. B. Fouriersche Wärmeleitungsgleichung), bis schließlich – auch dank gesteigerter Rechenleistung – 3-dimensionale Simulationsmodelle entwickelt wurden.

Anfänglich nur auf die Berechnung der Erstarrung beschränkt, wurden im Lauf der Zeit immer mehr Prozessschritte und physikalische Phänomene in die Simulation integriert und damit immer mehr Effekte beschrieben bzw. abgebildet. Heute können der Gießprozess und vielfältige Qualitätsmerkmale mit Hilfe der Simulation umfänglich beschrieben werden. Die Ergebnisse aus der Gießprozess-Simulation werden vielfach in anderen CAE-Anwendungen als Eingangsgröße genutzt, um deren Berechnungen genauer zu machen.

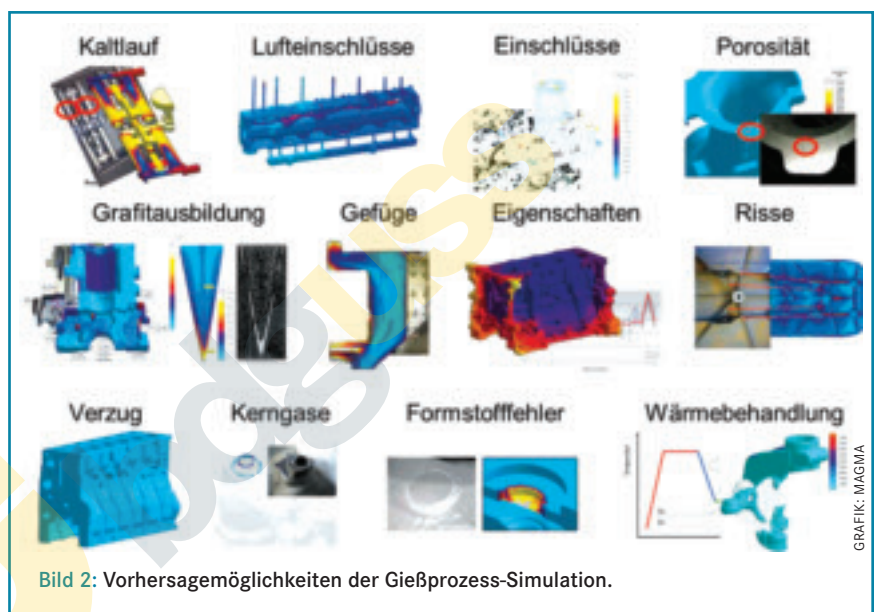


Bild 2: Vorhersagemöglichkeiten der Gießprozess-Simulation.

## Lokales Spannungs-Dehnungs-Verhalten

Basierend auf der prozessabhängigen Gefügevorhersage (z. B. Nodularität/Ferrit-/Perlit-Anteil) kann das lokale, statische Materialverhalten einer Eisengusslegierung sowohl im elastischen als auch im plastischen Bereich vorhergesagt werden [1]. Anstatt für die Auslegung des Bauteils homogene Gefüge und Eigenschaften vorzusetzen und damit mit einem konstanten Werkstoffverhalten für das ganze Bauteil zu rechnen, kann das gefügeabhängige, lokale Spannungs-Dehnungs-Verhalten direkt in einer Festigkeitsberechnung genutzt werden (Bild 3).

Diese differenziertere Berücksichtigung des lokalen Werkstoffverhaltens führt zu genaueren Ergebnissen für das Bauteilverhalten. In Bild 4 sind die Unterschiede für das in Bild 3 dargestellte Bauteil zu sehen. In diesem Beispiel führen die lokalen Materialdaten zu einer um 20 % verminderten maximalen Spannung.

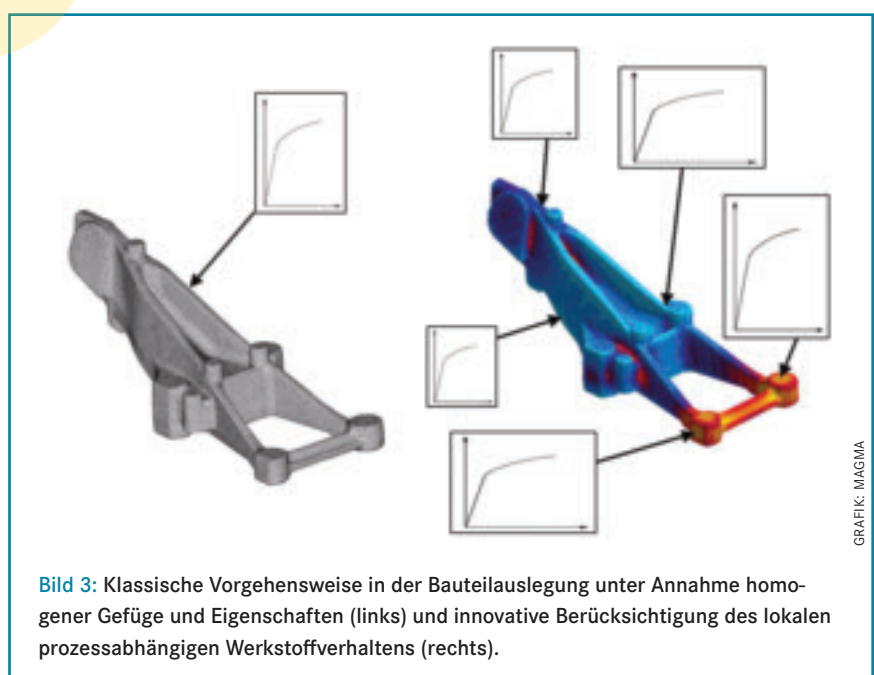
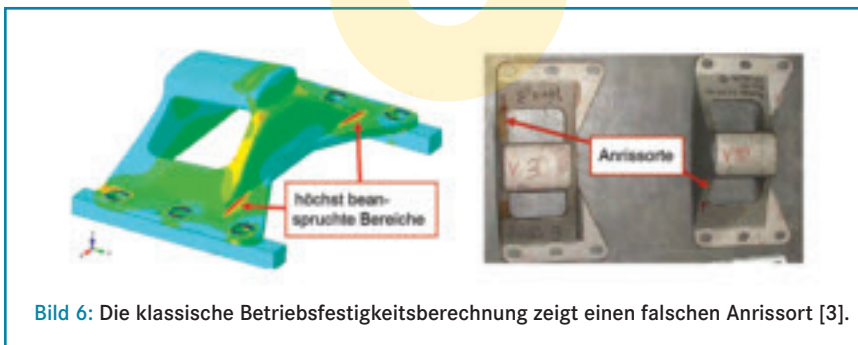
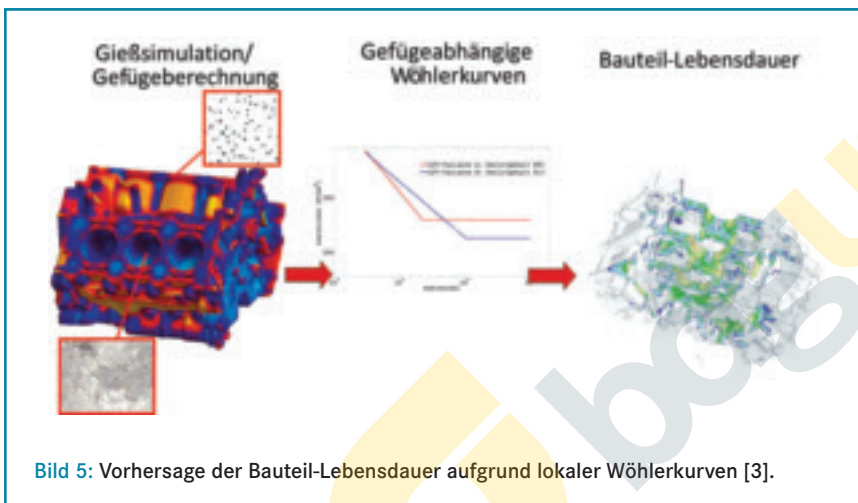
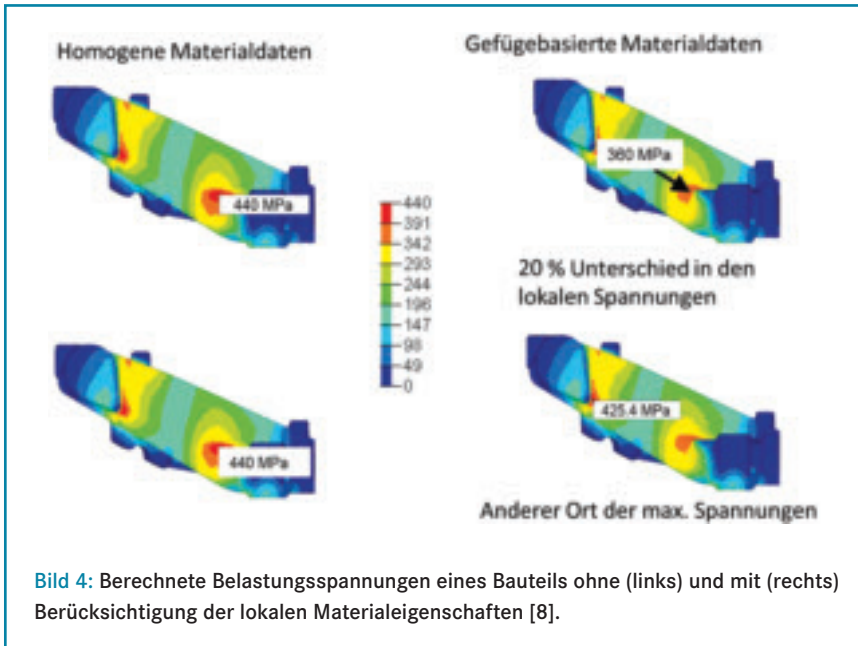


Bild 3: Klassische Vorgehensweise in der Bauteilauslegung unter Annahme homogener Gefüge und Eigenschaften (links) und innovative Berücksichtigung des lokalen prozessabhängigen Werkstoffverhaltens (rechts).



Zusätzlich verschiebt sich der Ort der höchsten Belastung im Bauteil.

**Lokale gefügeabhängige Lebensdauer**

Über die statischen Eigenschaften hinaus ist für bestimmte Gusseisenqualitäten die Berechnung von lokalen Dauerfestigkeiten in Abhängigkeit der auftretenden Gussgefüge (z. B. Perlitanteil, Nodularität etc.) möglich (Bild 5). Die Übertragung von simulierten, lokalen Dauerfestigkeiten kann Betriebsfestigkeitsberechnungen verbessern und helfen, Gussteilkonstruktionen systematisch zu optimieren [2, 3].

Die klassische Betriebsfestigkeitsberechnung (wanddicken- und gefügeunabhängige Materialeigenschaften) zeigt für einen Lagerbock aus GJS einen falschen Anrissort (Bild 6).

Durch die Berücksichtigung lokaler Wöhlerkurven, basierend auf den lokal unterschiedlichen Gefügen, wird der Anrissort korrekt vorhergesagt. Es zeigt sich, dass nicht unbedingt die höchstbeanspruchten Bereiche für das Versagen kritisch sind, sondern die Bereiche, in denen die lokale Belastungsgrenze überschritten wird. Diese Bereiche sind gefügeabhängig (Bild 7).

**Quantitative Bewertung von Dross**

Neben der Berücksichtigung lokaler Gussteileigenschaften und Eigenspannungen gewinnt die Bewertung des Einflusses von lokalen Ungängen in der Bauteilauslegung immer mehr an Bedeutung. Porositäten, also erstarrungsbedingte Fehler, lassen sich mit Hilfe der Gießprozess-Simulation quantitativ gut vorhersagen. Nichtmetallische Einschlüsse, zum Beispiel Dross, die im Wesentlichen beim Formfüllen entstehen, entziehen sich bisher noch einer genauen Vorhersage. Aus diesem Grund wurde ein Modell entwickelt, das die Entstehung und Verteilung von Dross bei GJS berechnet.

Dross besteht hauptsächlich aus Quarz (SiO<sub>2</sub>) und Magnesia (MgO) bzw. aus Kombinationen dieser beiden Oxide. Häufig ist Forsterit (2 MgO · SiO<sub>2</sub>) die Hauptkomponente. Hierfür ist Sauerstoff erforderlich, der mit den Legierungsbestandteilen der Schmelze reagiert. Basis des Modells ist die Berechnung der während des Formfüllens eingeschlossenen Luft als Funktion der turbulenten kinetischen Energie und des Geschwindigkeitsgradienten senkrecht zur Strömungsrichtung an der Grenzfläche Luft – Schmelze (Bild 8).

Der in der eingeschlossenen Luft enthaltene Sauerstoff reagiert vollständig

(stöchiometrisch) mit den Legierungselementen entsprechend einer charakteristischen Drosszusammensetzung. Die dabei gebildeten Partikel können agglomerieren und werden aufgrund der Konvektion in der Schmelze durch ihren Strömungswiderstand und Auftrieb kontinuierlich transportiert [4, 5].

**Bild 9** zeigt exemplarisch die Verteilung der Drosspartikel am Ende des Formfüllens der Schmelze in einer Gießpfanne sowie nach 10 min. Man erkennt deutlich die veränderte Drosskonzentration. Im Verlauf des Abstehens der Pfanne sammeln sich mehr und mehr Partikel an dessen Oberfläche und bilden Schlacke.

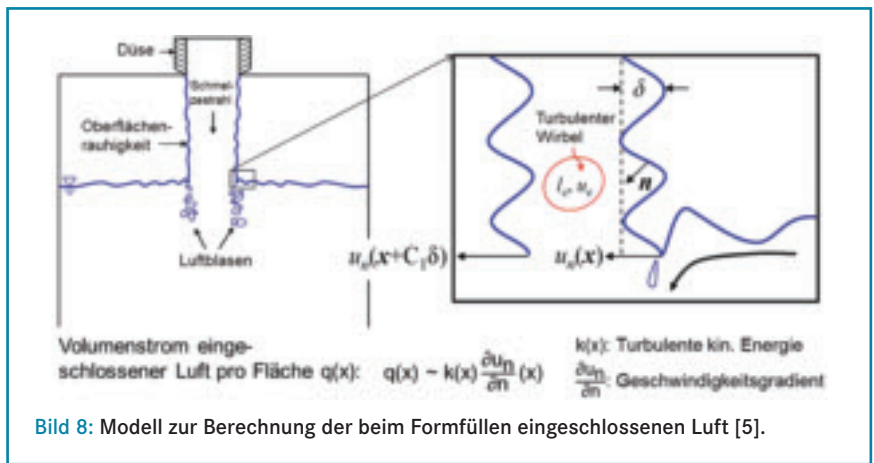
Das virtuelle Experiment mit der Gießpfanne zeigt, wie sehr die lokale Konzentration der Drosspartikel gerade bei dickwandigen Gussteilen mit entsprechend langen Abkühlzeiten von der natürlichen Konvektion bei der Erstarrung beeinflusst wird. Außerdem verbleiben immer fein verteilte Partikel in der Schmelze bzw. es werden neue gebildet. Dies ist unabhängig davon, wie gut abgeschlackt wird. Diese kleinen Drosspartikel werden beim Abgießen des Gussteils in die Kavität gespült. **Bild 10** zeigt den Unterschied bei der Drossverteilung eines Gussteils nach der Erstarrung, zum einen mit einer drossfreien Schmelze in der Pfanne (a) und zum anderen mit einer drossbehafteten Schmelze (b).

Ziel der Entwicklungen ist die quantitative Vorhersage von Dross, ähnlich wie für die Vorhersage von Porositäten, um sie u. a. für eine sicherheitstechnische Auslegung von Gusskomponenten verwenden zu können.

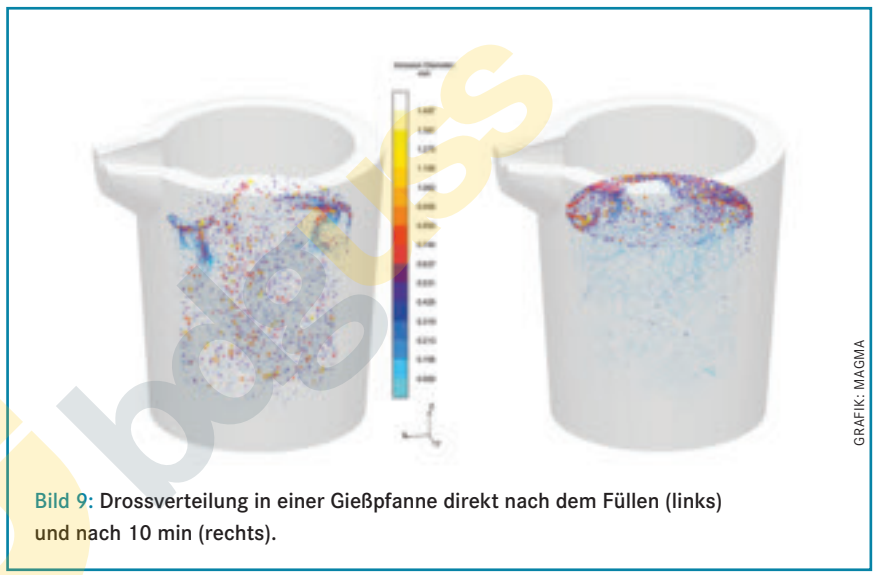
### Nutzen der lokalen Eigenschaften für die Bruchmechanik

Der Einfluss von Porosität, lokalen Gefügen und lokalen Eigenspannungen eines Bauteils aus GJS auf seine sicherheitstechnische Auslegung wurde untersucht [6, 7].

Grundlage für die bruchmechanische Bewertung des Bauteils ist das sogenannte Versagenbewertungs-Diagramm (Failure Assessment-Diagramm, FAD). **Bild 11** zeigt ein Diagramm für einen Werkstoff mit einer kontinuierlichen Fließkurve.

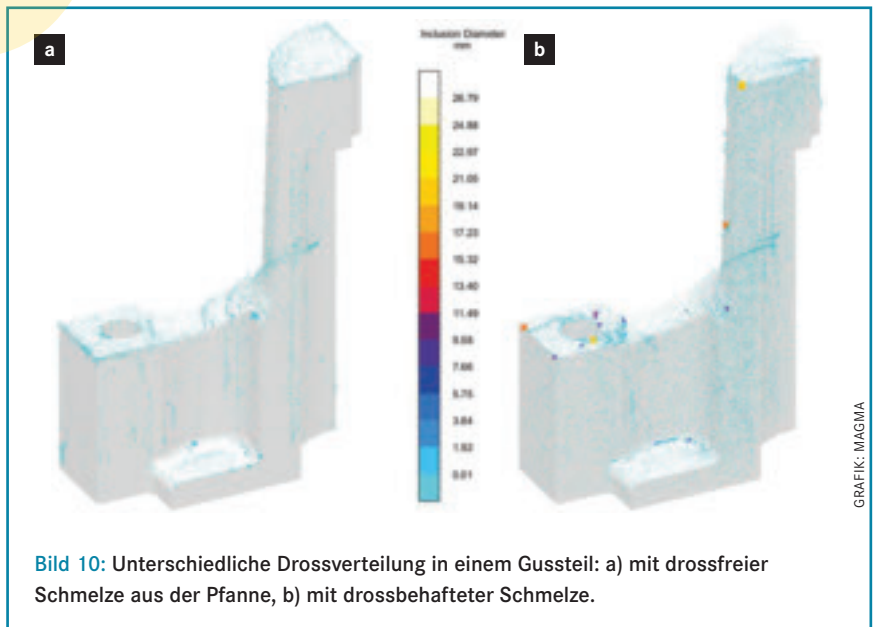


**Bild 8:** Modell zur Berechnung der beim Formfüllen eingeschlossenen Luft [5].



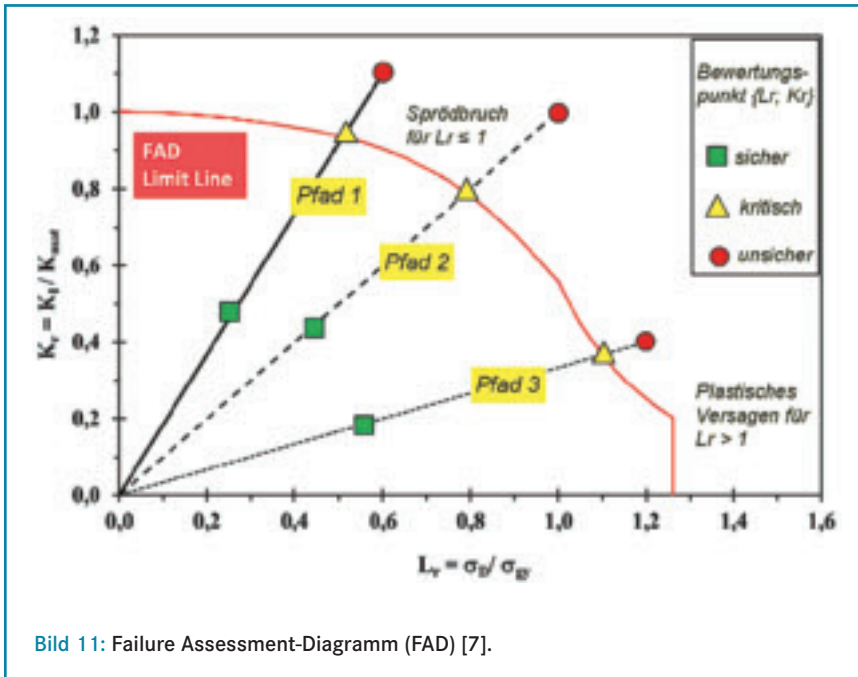
**Bild 9:** Drossverteilung in einer Gießpfanne direkt nach dem Füllen (links) und nach 10 min (rechts).

GRAFIK: MAGMA



**Bild 10:** Unterschiedliche Drossverteilung in einem Gussteil: a) mit drossfreier Schmelze aus der Pfanne, b) mit drossbehafteter Schmelze.

GRAFIK: MAGMA

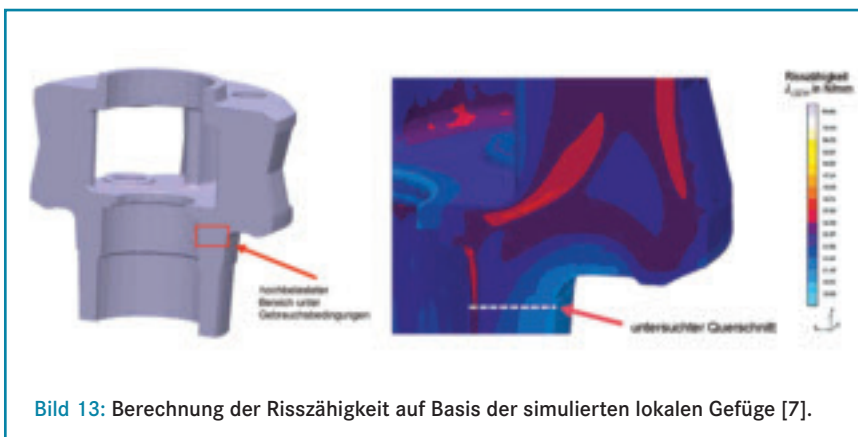
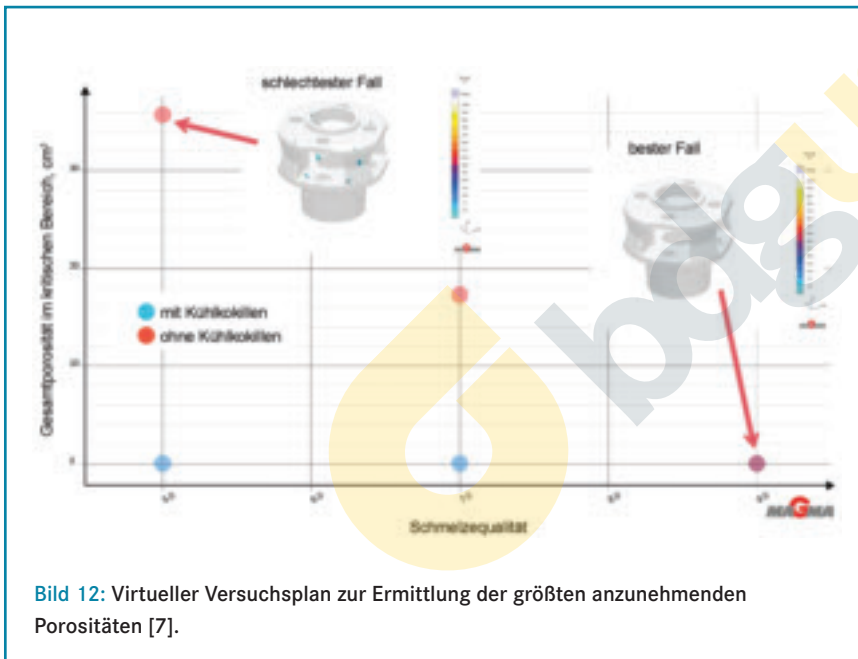


Für jedes Bruchproblem kann auf Grundlage der mechanischen Eigenschaften (Festigkeit und Zähigkeit), der Riss- und Bauteilgeometrie sowie der Belastung ein Auslegungspunkt abgeleitet werden. Jeder Punkt innerhalb der Kurve bedeutet sicheres Verhalten, außerhalb liegende Punkte kennzeichnen unsicheres Verhalten.  $K_r$  gibt das bruchmechanische Verhalten an. Die aus dem Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$  berechnete risstreibende Kraft wird mit dem Bruchzähigkeitswert  $K_{mat}$  normalisiert.  $L_r$  stellt das festigkeitsorientierte Materialverhalten dar und ist die mit der Fließspannung des Bauteils  $\sigma_{gy}$  normierte Nennspannung (in der Regel die Auslegungsspannung)  $\sigma_D$ .

Mit Hilfe eines virtuellen Versuchsplans wurde der Einfluss unterschiedlicher Parameter beim Gießen, wie z. B. die Legierungsanalyse, die metallurgische Qualität der Schmelze sowie die Gießtechnik (Einsatz von Kühlkokillen) auf das Porositätsergebnis mit dem Simulationsprogramm Magmasoft untersucht. Für die bruchmechanische Bewertung wurde das Porenvolumen des schlechtesten Falls verwendet (Bild 12).

Darüber hinaus wurde im hochbelasteten Querschnitt die Risszähigkeit mit Hilfe der vorhergesagten Gefüge ermittelt und daraus der lokale Bruchzähigkeitswert  $K_{mat}$  berechnet (Bild 13).

Zusätzlich wurden die Eigenspannungen im kritischen Bereich des Bauteils simuliert (Bild 14). Die vorhergesagten Eigenspannungen betragen etwa 20 % des Wertes für die Streckgrenze des Werkstoffs, korrespondieren also mit dem Punkt ES 20 (Bild 15). Damit liegt der Auslegungspunkt noch innerhalb des bruchmechanisch sicheren Bereichs, jedoch sehr nahe an der Grenzlinie. Für Eigenspannungen, die Werte von 30 % der Streckgrenze erreichen, läge der Auslegungspunkt schon außerhalb des abgesicherten Werkstoffverhaltens.



**Zusammenfassung**

In mehr als 30 Jahren hat sich die Gießprozess-Simulation von der Vorhersage von Wärmezentren zu einem umfassenden Werkzeug zur robusten Prozessauslegung und Qualitätssicherung für Gießereien entwickelt. Heute können viele Effekte entlang der Prozesskette mit der Simulation treffsicher vorhergesagt werden. Der Beitrag zeigt, wie die Möglichkeiten zur quantitativen Vorhersage von Gefügen und mechanischen Eigenschaften

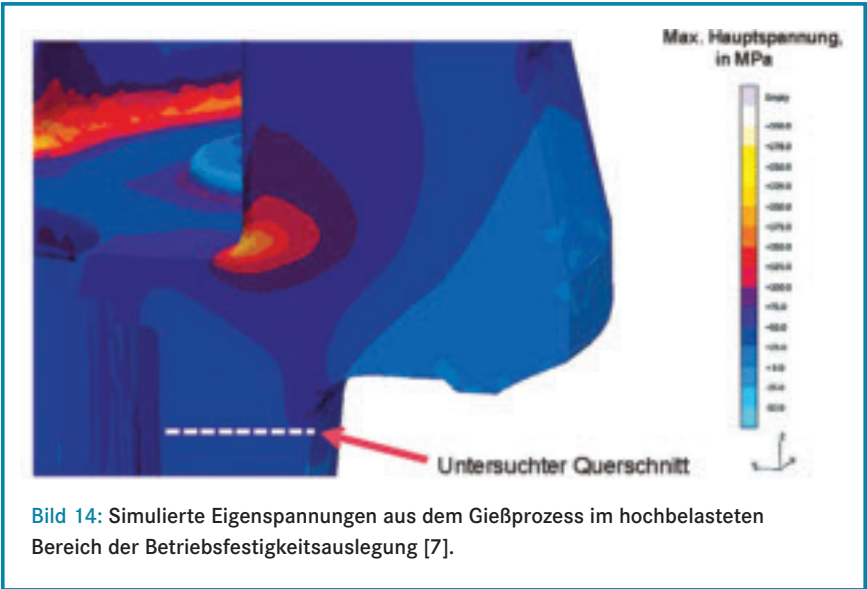


Bild 14: Simulierte Eigenspannungen aus dem Gießprozess im hochbelasteten Bereich der Betriebsfestigkeitsauslegung [7].

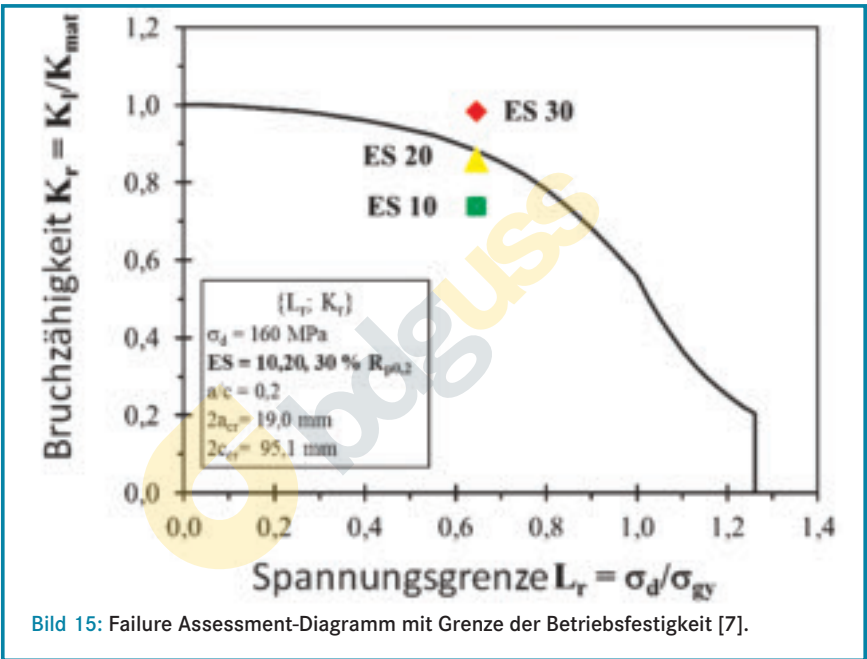


Bild 15: Failure Assessment-Diagramm mit Grenze der Betriebsfestigkeit [7].

ten als Funktion des Werkstoffs und des Prozessablaufs genutzt werden können, um das lokale Werkstoffverhalten im Einsatz quantitativ zu berücksichtigen. Dies bietet sowohl für den Gießer als auch für den Konstrukteur neue Chancen zur Ausnutzung des Werkstoffs Gusseisen für robusten Leichtbau.

Dr.-Ing. Corinna Thomser, Dipl.-Ing. Mathias Bodenburg und Dr.-Ing. Jörg C. Sturm, MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen

**Literatur:**

[1] *Materials & Design* 43 (2013), S. 264-271.  
 [2] Heinrietz, A.; Eufinger, J.; Stets, W.,

u. a.: *Maßgeschneiderte Bauteileigenschaften durch Integration von Fertigungs- und Funktionssimulation. Abschlussbericht BMBF-Projekt Nr. 01R/0713, 2011.*  
 [3] *Giesserei* 101 (2014), [Nr. 11], S. 26-35.  
 [4] *Materials Science Forum* 925 (2018), S. 419-426. ISSN: 1662-9752.  
 [5] *International Journal of Cast Metals Research* 30 (2017), [Nr. 5], S. 301-315.  
 [6] Langenberg P.; Thomser C.; Sturm J. C., u. a.: *Integration of casting process simulation into safety-oriented component design – Status and outlook. CastTec Conference, November 2016, Darmstadt.*  
 [7] *Giesserei-Special* (2017), [Nr. 2], S. 44-53.  
 [8] Oloffsen, J.; Svensson, I. L.: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 33.