

Gießprozess-Simulation und bruchmechanischer Nachweis – aktueller Stand und Ausblick

Dieser Beitrag beschreibt eine neue Methodik zur Integration der Gießprozess-Simulation in den bruchmechanischen Nachweis für Eisengussteile. Diese Arbeit beruht auf der Empfehlung der VDMA-Leitlinie 23902 zur Nutzung der Gießprozess-Simulation bei der Herstellung von Planetenträgern für Windenergieanlagen – Gießprozess-Simulation für eine Sicherheitsbeurteilung. Als Beispiel diente ein typischer Planetenträger aus GJS-400. Die Bruchzähigkeit wurde aus Korrelationen zwischen dem simulierten lokalen Gefüge und den mechanischen Eigenschaften abgeleitet. Auf Grundlage der Porositätsvorhersage aus der Gießprozess-Simulation wurde eine Annahme zur Rissgröße getroffen. Die typische Belastung eines Planetenträgers wurde mit den aus der Gießprozess-Simulation resultierenden Eigenspannungen überlagert. Der bruchmechanische Nachweis wurde für typische Belastungsfälle geführt. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, wie die virtuelle Prozessauslegung und der Nachweis der Bauteilintegrität in ein gemeinsames Konzept zusammengeführt werden können. Damit können durch den Einsatz der Gießprozess-Simulation der Materialeinsatz bereits in der Auslegungsphase optimiert und neues Leichtbaupotenzial erschlossen werden.

Corinna Thomser, Peter Langenberg, Pawel Kucharczyk und Jörg C. Sturm, Aachen

1 Ziel der Arbeit

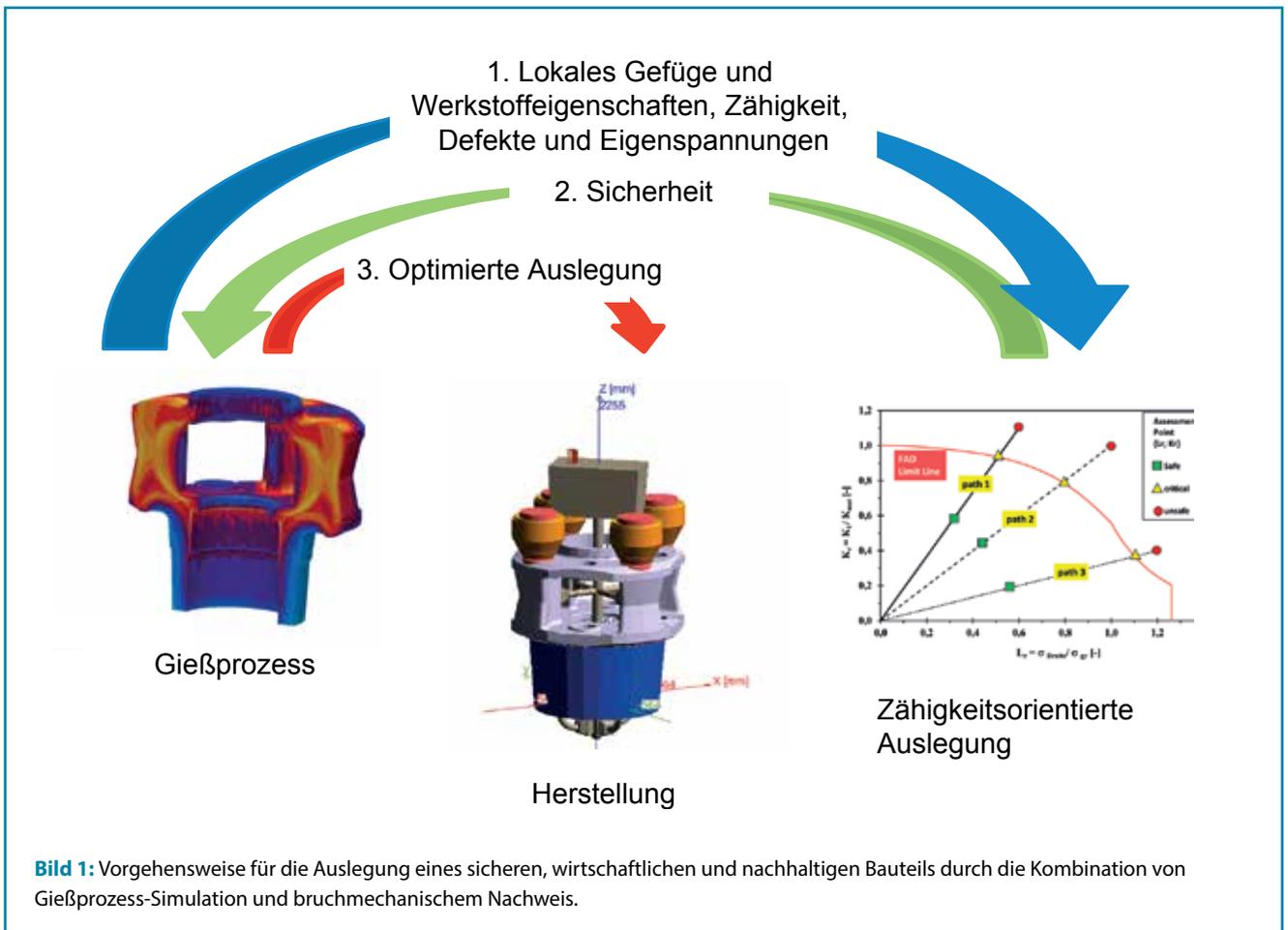
Niedrige Produktionskosten, endabmessungsnahe Produktion und ein großes Spektrum an Festigkeiten bei hoher Duktilität sind die bekannten Vorteile von Gusseisenwerkstoffen. Herausragende Beispiele für Gusseisenprodukte findet man im Motorenbau und auch in Form von großen Bauteilen für Windenergieanlagen. All diese Produkte müssen höchste Ansprüche hinsichtlich ihrer Lebensdauer erfüllen.

Insbesondere bei Windkraftanwendungen ist neben Defekten, die die Wahrscheinlichkeit von Ermüdungsbrüchen erhöhen, auch der Widerstand gegen plastisches Versagen und insbesondere gegen Sprödbbruch zunehmend Gegenstand der Diskussion. Für Planetenträger wird häufig Gusseisen des Typs GJS-700 eingesetzt, das über hohe Festigkeit verfügt, jedoch geringe Duktilität und Zähigkeit aufweist. Die VDMA-Arbeitsgruppe „Planetenträger“ hat sich mit der Frage beschäftigt, wie die Zähigkeitsanforderung für diese Bauteile definiert werden kann und eine entsprechende VDMA-Leitlinie [1, 2] erstellt. Diese Leitlinie beinhaltet zwei unterschiedliche numerische

Nachweismethoden, die für eine gezieltere Auslegung eingesetzt werden können:

1. die Gießprozess-Simulation und
2. die bruchmechanische Berechnung.

Im Hinblick auf herstellungsbedingte und unvermeidbare kritische Bereiche in einem Planetenträger, die zudem sehr hohen Gebrauchsbelastungen unterliegen können, ermöglichen bruchmechanische Methoden, wie sie zum Beispiel der Britische Standard BS 7910 [3] beschreibt, eine Bewertung der Bauteilintegrität unter Verwendung der Risszähigkeit des Werkstoffs. Ziel der hier vorgestellten Untersuchung ist die Nutzung der Ergebnisse aus der Gießprozess-Simulation zur Vorhersage von lokalen mechanischen Eigenschaften, insbesondere der üblicherweise nicht verfügbaren Eingangsgrößen „Risszähigkeit“ und lokale Festigkeiten. Darüber hinaus können mögliche Abmessungen eines Defekts in dem Bereich mit höchsten kriti-



schen Belastungen für den bruchmechanischen Nachweis aus den Simulationen abgeleitet werden. Dazu wird die Möglichkeit zur Vorhersage lokaler Porosität aus der Gießprozess-Simulation genutzt. In einem zweiten Schritt wird diese Information als Eingangsgröße für die Ableitung einer Rissgeometrie verwendet, die für den bruchmechanischen Nachweis notwendig ist. Schließlich können neben den äußeren Belastungen auch die intern entstandenen Eigenspannungen aus dem Gießprozess in die Berechnungen für den bruchmechanischen Nachweis einbezogen werden. **Bild 1** zeigt in einem Überblick den grundlegenden Ablauf des Verfahrens.

2 Bedingungen für einen bruchmechanischen Nachweis nach VDMA-Richtlinie 23902

Bei der Auslegung eines neuen Gussbauteils müssen die folgenden Grenzzustände berücksichtigt werden, um die Geometrie und Werkstofffestigkeit des Teiles ableiten zu können:

1. Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit,
2. Grenzzustand der Tragfähigkeit,
3. Sprödbruchvermeidung (als Ergänzung zu 1. und 2.),
4. Grenzzustand der Ermüdung (als Ergänzung zu 1. und 2.) und
5. Korrosionsbeständigkeit (sofern notwendig).

Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit entspricht dem üblichen Betriebszustand der Bauteile. Er ist verbunden mit dem elastischen Verhalten, da eine Formveränderung zwar zu einem Funktionsverlust, aber zu keinem Integritätsverlust führen würde. Der Grenzzustand der Tragfähigkeit schließt den Überlastungsfall ein, der zu einem plötzlichen Vollaussfall führen kann. Bei Stahl- und Eisenprodukten besteht ein gewisser Zusammenhang mit der Zugfestigkeit R_m , die mit Hilfe von uniaxialen Zugversuchen ermittelt wird. Sprödbruch, Ermüdung und Korrosionsbeständigkeit sind spezielle Fälle, die bei der Auslegung gesondert betrachtet werden müssen.

Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit sowie Ermüdungs- und Korrosionsprobleme werden in diesem Beitrag nicht bzw. an anderer Stelle [4] behandelt. Die hier beschriebene Arbeit befasst sich hauptsächlich mit der Vermeidung von Sprödbruch. Hierzu werden die Zähigkeitsanforderungen, die zumeist Teil der Werkstoffspezifikationen sind, oder die in der VDMA-Leitlinie 23902 [2] vorgeschlagene zähigkeitsorientierte Auslegung hinzugezogen. Das Werkstoffverhalten wird in der Regel in Kerbschlagbiegeversuchen bestimmt. Bei Erstzulassungen oder komplizierten Fällen lässt sich am besten über eine bruchmechanische Untersuchung eine geeignete zähigkeitsorientierte Auslegung erzielen. Dies gilt auch für Planetenträger aus GJS-700 gemäß der VDMA-Leitlinie [1] oder für den Einsatz unter kalten klimatischen Bedingungen.

Bei einem linearen elastischen Bauteilverhalten (wie es für die Anwendung der VDMA-Leitlinie 23902 und GJS-700 ange-

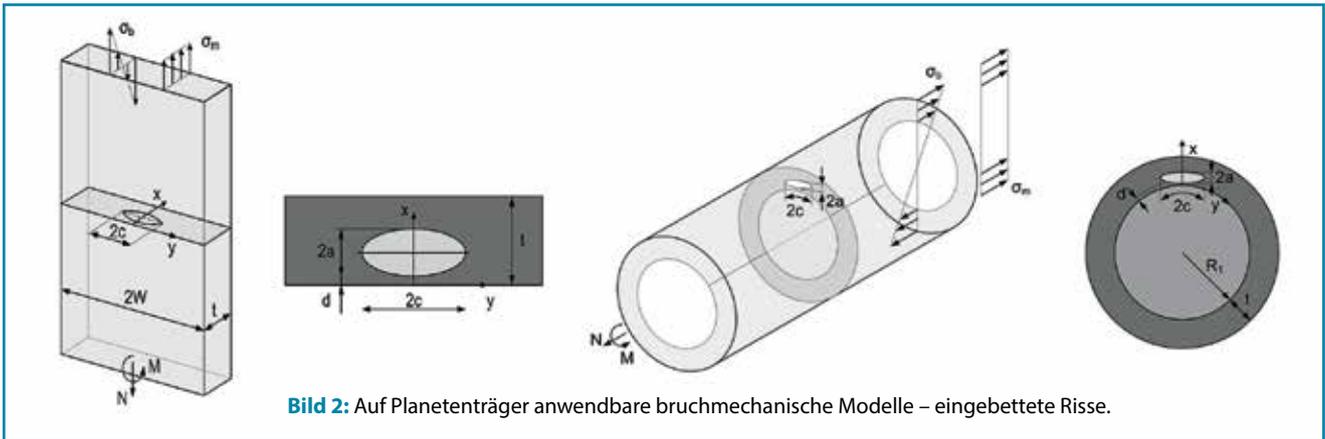


Bild 2: Auf Planetenträger anwendbare bruchmechanische Modelle – eingebettete Risse.

nommen wird) kann die risstreibende Kraft einfach aus den Ergebnissen einer Analyse typischer Rissgeometrien abgeleitet werden, wie in **Bild 2** dargestellt [2, 3].

In Fällen, in denen ein elastisch-plastisches Materialverhalten angenommen werden kann, z. B. bei Gusseisen des Typs GJS-400-LT (aber auch für ADI-800 oder -1000), ist es möglich, anstelle von FEM-Simulationen mit dem analytischen Failure Assessment Diagram (FAD) zu arbeiten. Diese Methode ist Teil bruchmechanischer Beurteilungsstandards wie dem britischen Standard BS7910, dem amerikanischen Standard API 579 oder der deutschen FKM-Richtlinie [3, 5, 6].

Bild 3 zeigt ein Failure Assessment Diagram (FAD). Die Grenzzustandsbedingung für die Rissentstehung verläuft entlang der in dem Diagramm dargestellten Kurve $K_r = f(L_r)$. Der Verlauf dieser Kurve ist abhängig von den Eingangsgrößen Streckgrenze, Zugfestigkeit und Belastung und ist hier für Werkstoffe mit kontinuierlicher Fließkurve dargestellt.

Das Failure Assessment Diagram (FAD) (Bild 3) ist wie folgt zu lesen: Für jedes Bruchproblem kann auf der Grundlage der mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes (Festigkeit und Zähigkeit), der Riss- und Bauteilgeometrie sowie der Belastung ein Auslegungspunkt $\{K_{r,i}; L_{r,i}\}$ abgeleitet werden. Jeder Punkt innerhalb der Kurve bedeutet sicheres Verhalten, während jeder außerhalb liegende Punkt (rote Kreise) unsicheres Verhalten bedeutet.

An der Ordinate des Diagramms gibt K_r das bruchmechanische Verhalten als einer der Faktoren dieses sogenannten 2-Kriterien-Ansatzes an. Die aus dem Spannungsintensitätsfaktor K_I (linear-elastische Bruchmechanik) berechnete risstreibende Kraft wird mit dem Bruchzähigkeitswert K_{mat} normalisiert. Daraus ergibt sich $K_r = K_I / K_{mat}$. In dieser Gleichung steht der Wert K_{mat} für die Risszähigkeit des Werkstoffes.

Die Anwendung der Funktion ermöglicht die Berücksichtigung lokaler Plastizitätseffekte vor der Risspitze bei gleich-

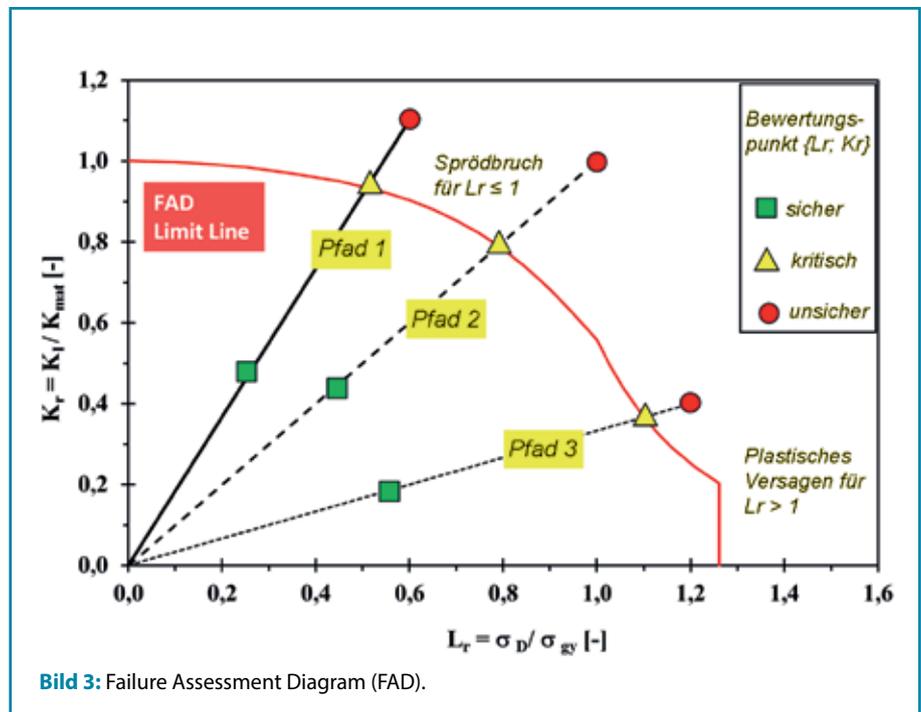


Bild 3: Failure Assessment Diagram (FAD).

zeitiger Verwendung eines linear-elastischen Spannungsintensitätsfaktors für die Berechnung der risstreibenden Kraft in Abhängigkeit von der Rissgeometrie und der anliegenden Nennspannung (für Modelle wie in Bild 2 dargestellt).

Ein anerkannter Nachteil der bruchmechanischen Analyse ist jedoch, dass die Risszähigkeitswerte zunächst nur aus sehr kostenintensiven und zeitaufwendigen Risszähigkeitsversuchen ermittelt werden müssen. Dazu muss festgehalten werden, dass nur wenige Labore in der Lage sind, diese Tests durchzuführen, und von diesen Laboren sind darüber hinaus nur wenige zertifiziert, z. B. nach DIN EN ISO/IEC 17025. Daher ist es sehr nützlich, eine alternative Quelle für die Bruchzähigkeitswerte, wie sie in diesem Beitrag vorgestellt und in Abschnitt 3.3 näher beschrieben wird, zur Verfügung zu haben.

Auf der Abszisse ist das zweite Kriterium L_r aufgetragen. Es stellt das festigkeitsorientierte Verhalten dar. Es ist zu verstehen als eine Art Spannungswirkung relativ zur Fließspannung in dem Bauteilquerschnitt, in dem der Riss vorliegt. Zur Berechnung des Wertes L_r wird die Nennspannung (in der Re-

gel als Auslegungsspannung σ_d bezeichnet) mit der Fließspannung des Bauteils σ_{gy} (mit „gy“ = Bauteilfließspannung) auf der X-Achse normalisiert. Für Modelle, wie in Bild 2 dargestellt, kann der Wert für die Fließspannung σ_{gy} den oben erwähnten kritischen technischen Beurteilungsstandards entnommen werden. Sie kann aber auch aus anderen Literaturquellen individuell hergeleitet oder im Idealfall aus einer FEM-Analyse abgeleitet werden.

Der Punkt, in dem der Belastungspfad die Grenzzustandskurve schneidet, gibt an, dass die kritische Grenzbelastung für den Beginn eines instabilen Bruches erreicht ist. Folglich stellen alle Nachweispunkte $\{K_{pr}; L_{pr}\}$ des Pfades innerhalb des Bereiches unterhalb der Kurve ein sicheres und alle Punkte außerhalb dieses Bereiches ein unsicheres Bauteilverhalten dar. Die Anwendung des Failure Assessment Diagram (FAD) ist eine allgemein anerkannte Methode. Sie deckt eine große Zahl von Gusseisensorten und deren lineares elastisches Verhalten ab.

3 Gießprozess-Simulation

3.1 Modell

Die Gießprozess-Simulation kann zahlreiche Eingangsgrößen für den bruchmechanischen Nachweis liefern, etwa die lokale Vorhersage von Defekten, Eigenspannungen, Gefügeausbildung und mechanischen Eigenschaften. Neben den lokalen Abkühlbedingungen üben auch die Legierungszusammensetzung, die Schmelzbehandlung und die angewandte Metallurgie einen wesentlichen Einfluss auf das Endgefüge und die daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften eines Gussteils aus (Bild 4) [7].

Gießereingenieure nutzen diese Prozessvariablen, um das gewünschte Gefüge und die entsprechenden mechanischen Eigenschaften wie Zugfestigkeit und Duktilität einzustellen. Gleichzeitig versuchen sie, unerwünschte Erscheinungen (wie

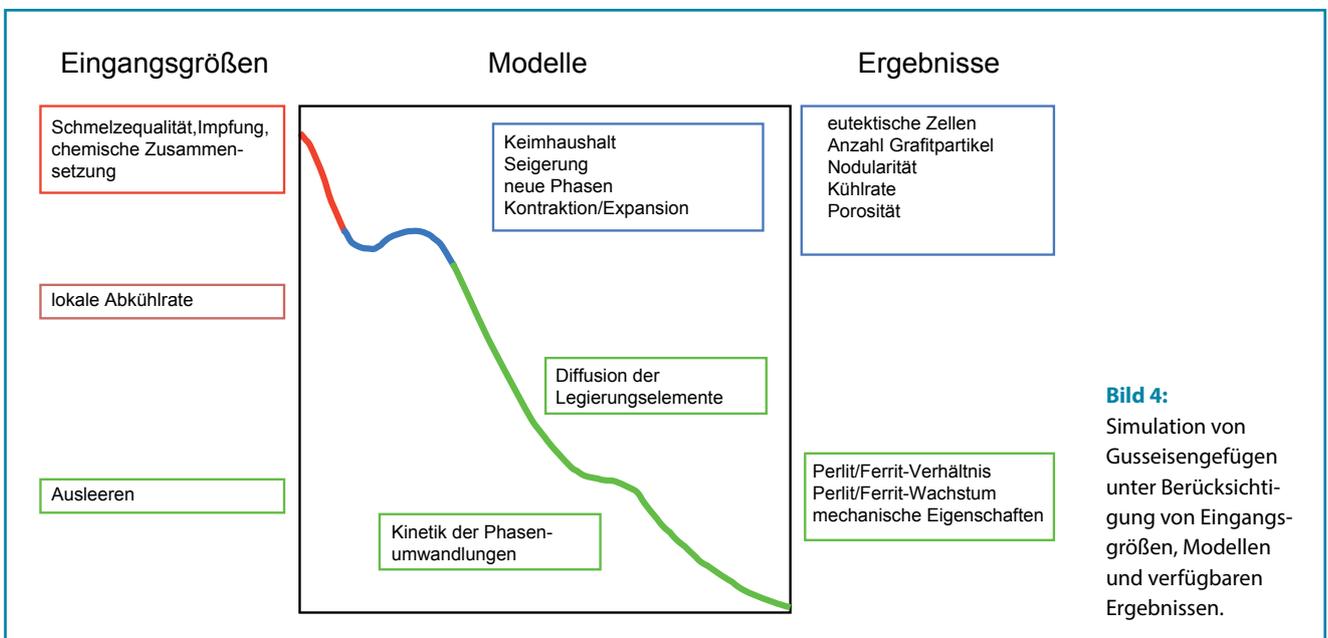


Bild 4: Simulation von Gusseisengefügen unter Berücksichtigung von Eingangsgrößen, Modellen und verfügbaren Ergebnissen.

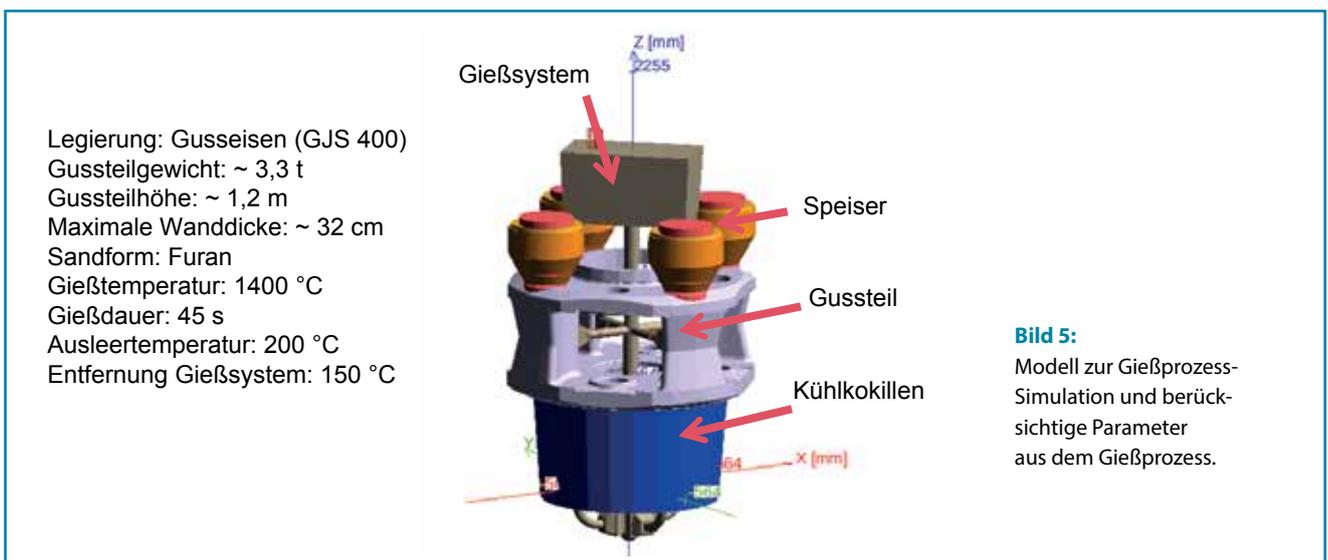


Bild 5: Modell zur Gießprozess-Simulation und berücksichtigte Parameter aus dem Gießprozess.

Porosität oder Dross) und ungünstige Gefügeausbildungen zu vermeiden. Die Modellierung des Gießprozesses und die angenommenen Parameter sind in **Bild 5** dargestellt.

In **Bild 6** ist der für den bruchmechanischen Nachweis relevante kritische Bereich des Planetenträgers markiert. Dieser Bereich wurde mit Hilfe einer Finite-Elemente-Simulation bzw. einer Worst-Case-Analyse ermittelt. Diese wird an dieser Stelle nicht näher beschrieben, kann jedoch als typisch für diese Bauteile angenommen werden.

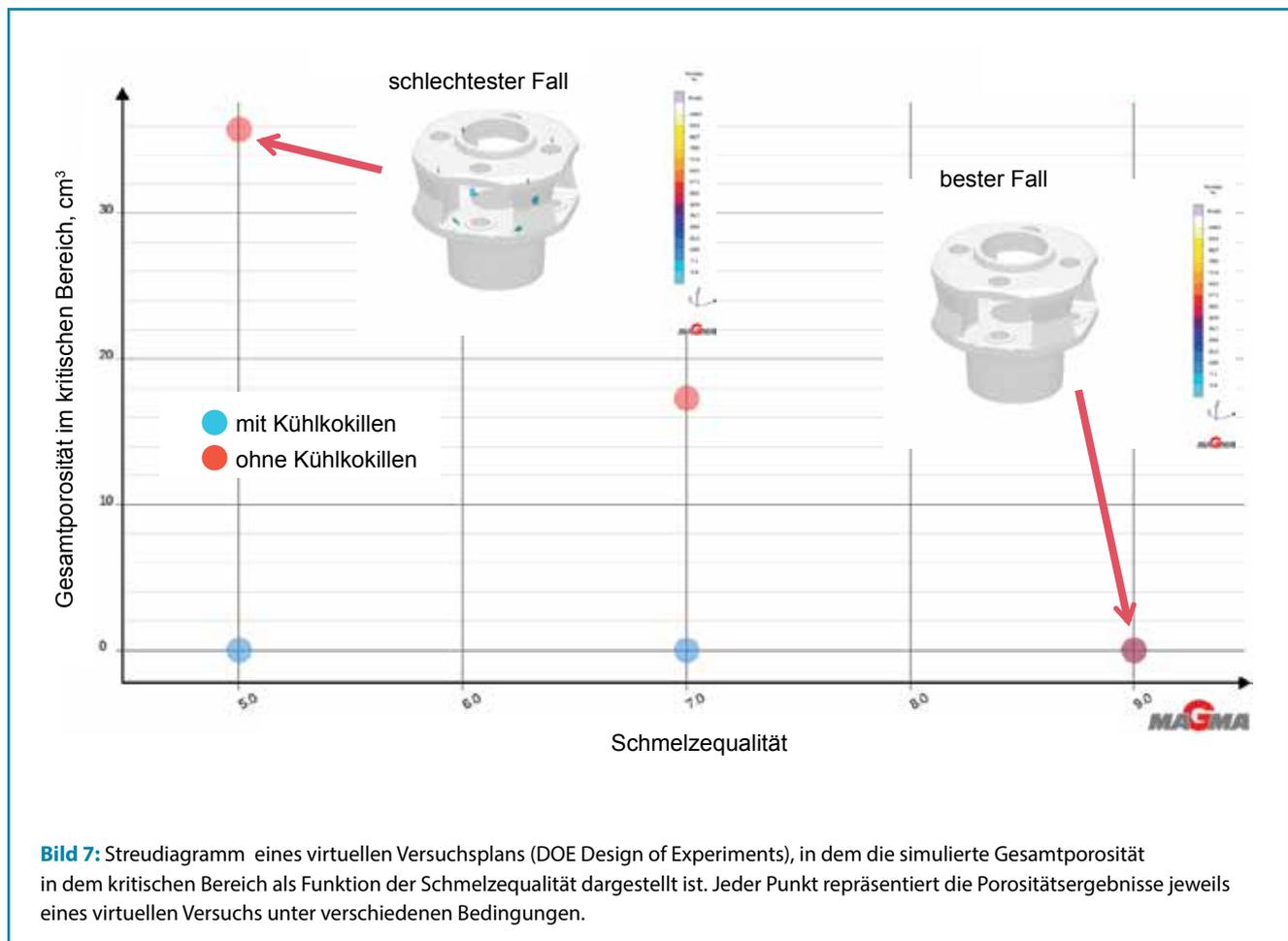
zesses und der Versagensrisiken die folgenden Prozessparameter berücksichtigt:

- Schmelzequalität
- Gießtechnik, hier Einsatz von Kühlkokillen.

Die Ergebnisse einer virtuellen Versuchsplanung (DOE Design of Experiments) sind in **Bild 7** dargestellt. Jeder Punkt in der Grafik repräsentiert das Ergebnis einer einzelnen Simulation. Es

3.2 Vorhersage der Porosität

Als Qualitätskriterium für das Gussteil wird die Gesamtporosität im kritischen Bereich angenommen, da die Porosität als wesentlicher Auslöser für die Entstehung von Rissen und deren Wachstum unter Gebrauchsbedingungen wirken kann. Die Porosität kann daher für eine begrenzte Lebensdauer des gegossenen Bauteils verantwortlich sein. Die Gesamtporosität im kritischen Bereich wird stark durch den Gießprozess selbst beeinflusst. Zum Beispiel werden für die Analyse der Zuverlässigkeit des Gießpro-



ist zu erkennen, dass der Einsatz von Kühlkokillen einen starken Einfluss auf die Porosität hat. Die Gießprozess-Simulation sagt bei Nutzung von Kühlkokillen im kritischen Bereich geringe Porosität voraus, und zwar unabhängig von der Schmelzequalität. Analog führt bei einem Gießprozess ohne Kühlkokillen eine gute Schmelzequalität zu einer Reduzierung der Porosität im kritischen Bereich des Gussteils, während eine schlechte Schmelzequalität zu vergleichsweise stark ausgeprägter Porosität führt.

Die virtuelle Versuchsplanung diente zur Identifizierung der folgenden beiden Szenarien, die für den bruchmechanischen Ansatz zu berücksichtigen sind:

Schlimmster Fall: Eine Gesamtporosität mit einem Volumen von $\sim 36 \text{ cm}^3$ wird, verteilt auf vier verschiedene Stellen (d. h. $\sim 9 \text{ cm}^3$ Porosität pro Stelle), innerhalb des kritischen Bereichs detektiert. Es wurde bewusst eine hohe Porosität angenommen, die in der Regel bei einem simulationsgestützten, qualifizierten Gießprozess vermieden werden kann.

Bester Fall: Im kritischen Bereich liegt geringe Porosität vor.

3.3 Berechnung der Bruchzähigkeit

In der Literatur wird über den Einfluss der Gefüge- und mechanischen Eigenschaften auf die Bruchzähigkeit am Beispiel der Werkstoffgruppe GJS-400 [8, 9] berichtet. Drei verschiedene Korrelationen wurden abhängig von den Einflussparametern abgeleitet und die jeweilige Bruchzähigkeit gemessen. Die wesentlichen Parameter für die Bruchzähigkeitsberechnungen sind:

- Mittlerer Kugelabstand,
- Nodularität,
- Streckgrenze,
- Bruchdehnung und
- Perlitgehalt.

Außer der Nodularität werden alle erforderlichen Parameter in der Gießprozess-Simulation lokal vorhergesagt. **Bild 8** zeigt die Simulation der Bruchzähigkeit unter Annahme der Korrelation, die die niedrigsten Bruchzähigkeitswerte vorhersagt (konservativer Ansatz). Auch der untersuchte Querschnitt ist eingezeichnet. Eine detaillierte Beschreibung der Ableitung der Bruchzähigkeit aus den Ergebnissen einer Gießprozess-Simulation ist in der Literatur zu finden [10].

3.4 Eigenspannungen beim Gießen

Während des Gießens und Erstarrens von Gussteilen entstehen lokal unterschiedliche Temperaturgradienten. Die verschiedenen Temperaturfelder führen zu unterschiedlicher Kontraktion innerhalb des Gussteils und damit zu Eigenspannungen und Verzug. Die Entstehung der entsprechenden mechanischen Felder wird mit Hilfe eines zeitabhängigen konstitutiven Modells berechnet, das Kriechen und die plastische Verformung in einem vereinheitlichten Ansatz berücksichtigt.

Der Grenzfläche zwischen dem Gusswerkstoff und den umgebenden Kern- und Formwerkstoffen wird mit Hilfe eines Kontaktalgorithmus Rechnung getragen. So wird die durch

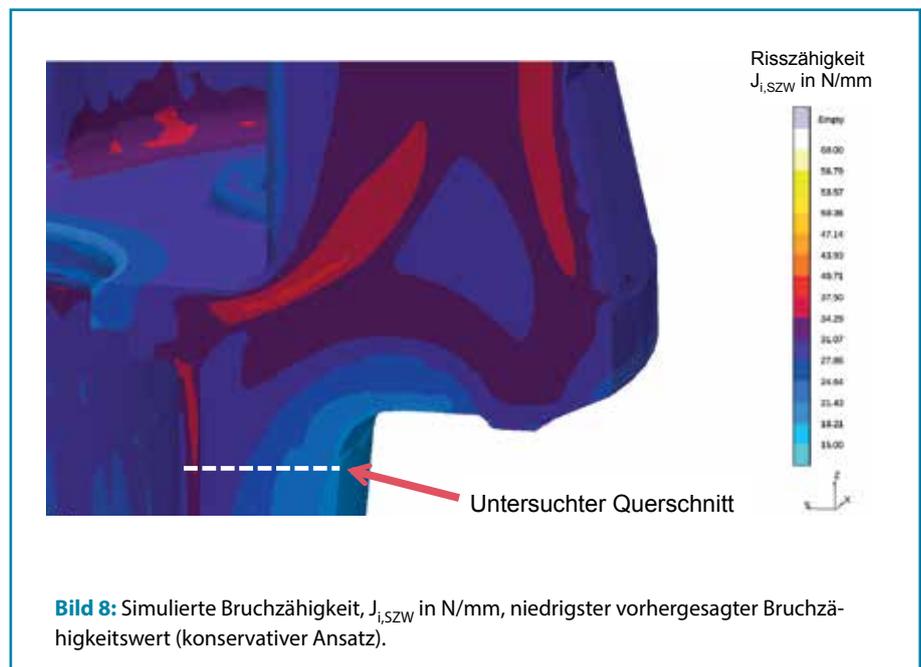


Bild 8: Simulierte Bruchzähigkeit, $J_{i,szw}$ in N/mm, niedrigster vorhergesagter Bruchzähigkeitswert (konservativer Ansatz).

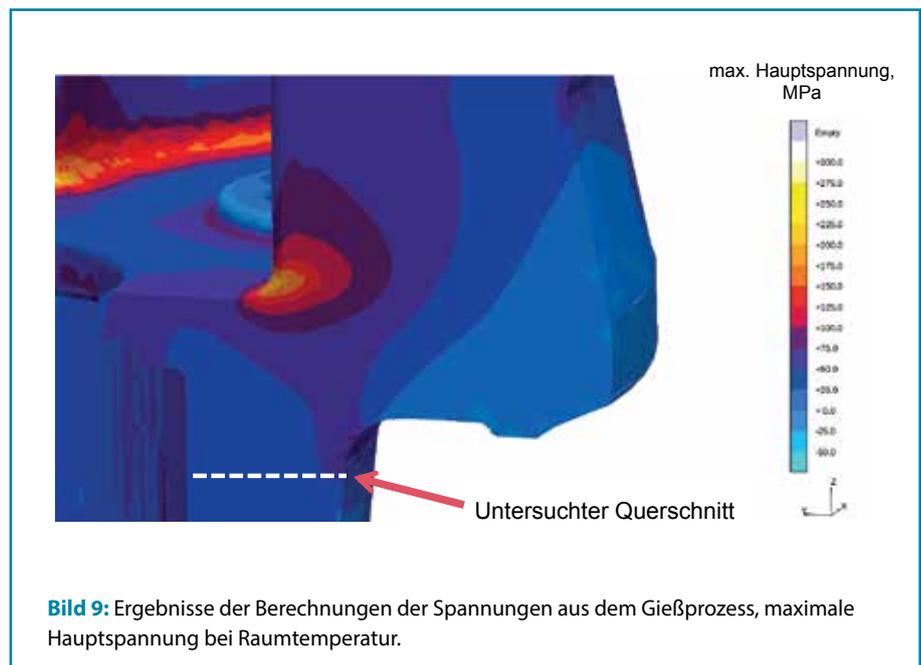


Bild 9: Ergebnisse der Berechnungen der Spannungen aus dem Gießprozess, maximale Hauptspannung bei Raumtemperatur.

die Sandform und die Sandkerne bedingte Schwindungsbehinderung bei der Spannungssimulation berücksichtigt. Auch das temperaturabhängige, nichtlineare Verhalten der mechanischen und thermophysikalischen Werkstoffparameter findet Eingang in die Simulation [11]. Die Ergebnisse der Spannungsberechnung für den Planetenträger zeigt **Bild 9**.

4 Bruchmechanische Berechnung

4.1 Eingangsgrößen für die Berechnung

Die bruchmechanische Berechnung beruht auf berechneten Spannungsverteilungen über die Wanddicke. Die maximale Auslegungszugspannung wurde mit $\sigma_D = 160$ MPa angenommen. Die Bruchgeometrie wird aus dem Worst-Case-Szenario der Porositätsvorhersage im Rahmen der Gießprozess-Simulation abgeleitet, indem das entsprechende Porengrößenvolumen an einer der vier Stellen $V = 9 \text{ cm}^3$ (Abschnitt 3.2) auf ein flaches zigarrenförmiges Ellipsoid mit den drei Achsen a, b und c übertragen wird. Die Projektion des Ellipsoids auf eine Fläche (b nimmt den Wert null an) wird dann als maximale Rissgröße mit c und der halben Achse a angenommen. Die Projektion der b -Achse auf die Fläche wurde durch die Annahme gerechtfertigt, dass die Länge der b -Achse nur $0,5 \cdot a$ beträgt. Eine wei-

tere konservative Annahme ist, dass das a/c -Verhältnis des innenliegenden elliptischen Risses $0,2$ beträgt. Aber auch für andere a/c -Verhältnisse, die zu einer runderen Rissform führen, wurden die Auswirkungen untersucht [10].

Der **Tabelle 1** ist die Rissgeometrie, die als Grundlage für die Berechnung gedient hat, zu entnehmen. Es handelt sich hierbei wirklich um das Worst-Case-Szenario, denn es wird angenommen, dass sich die Porosität an einer Stelle in einem einzelnen großen Defekt im kritischen Bereich konzentriert. Als Fehlerposition wurde gemäß der VDMA-Leitlinie 23902 eine Randzonenposition mit einem Abstand $d = 5 \text{ mm}$ zur Oberfläche gewählt [2].

Auf der Grundlage der Abmessungen des Planetenträgers ergeben sich für das Röhrenmodell (in Bild 2) folgende Abmessungen:

- Innenradius $R_1 = 272,5 \text{ mm}$,
- Wanddicke $t = 150 \text{ mm}$.

Für dieses Modell lassen sich der Spannungsintensitätsfaktor und die Grenzbelastung mit Hilfe von gängigen Formeln aus Handbüchern oder den erwähnten Leitlinien [3, 5, 6] mit einer Berechnungssoftware ermitteln [12].

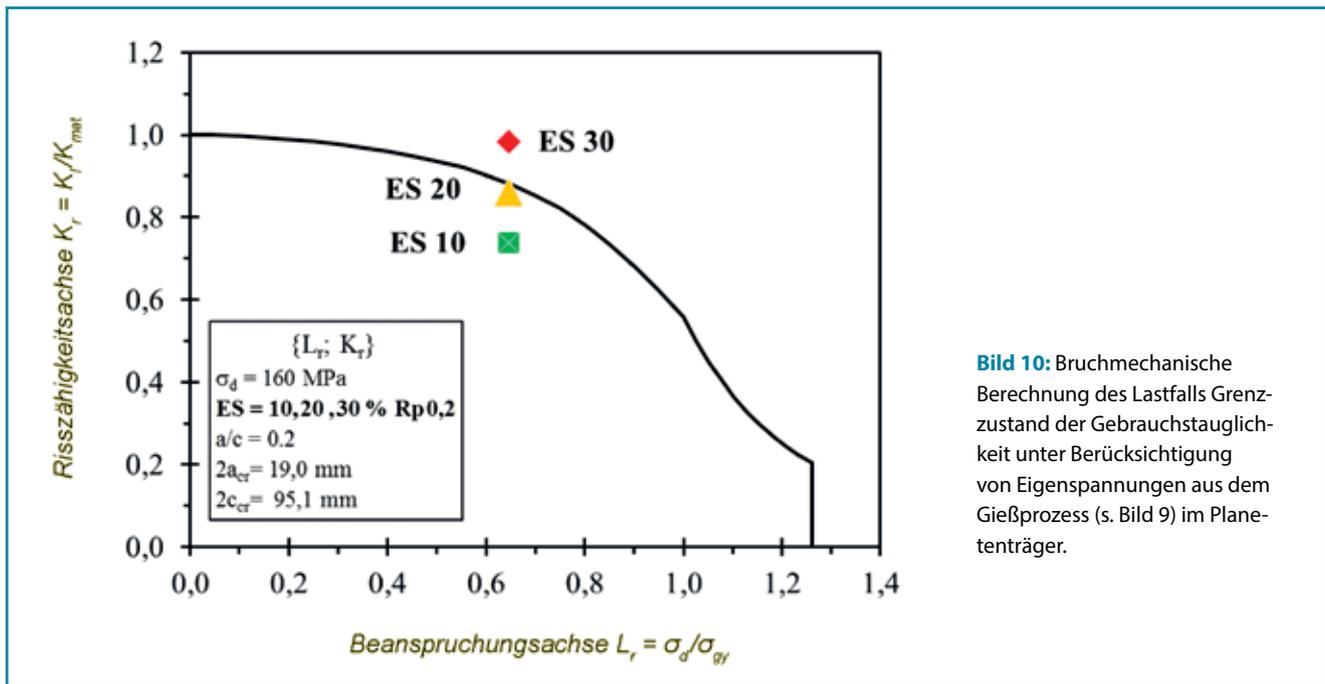
Die Kombination mit der Gießprozess-Simulation erfolgt auf der Widerstandsseite. In **Tabelle 2** sind die wesentlichen aus der Gießprozess-Simulation übernommenen Parameter aufgeführt.

Die Ergebnisse der Berechnung sind beispielhaft in **Bild 10** für den Lastfall Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit unter Berücksichtigung verschiedener Eigenspannungsniveaus dargestellt. Für ES 10 (grünes Quadrat) wird ein sicheres Verhalten vorhergesagt.

Die simulierten Eigenspannungen aus dem Gießprozess liegen bei knapp 20 % der 0,2 %-Dehngrenze, d. h., sie entsprechen ES 20. Der Auslegungspunkt liegt knapp unter der Grenzlinie. Für diesen Lastfall ist das Bauteil hinsichtlich der durch den Gießprozess bedingten Eigenspannungen noch als sicher zu bewerten, denn das gelbe Dreieck befindet sich innerhalb des sicheren Bereiches des Failure Assessment Diagram (FAD).

Tabelle 1: Fehlergröße für ein a/c -Verhältnis von 0,2.	
Geometrische Kennwerte	Abmessungen
V	9 cm^3
a	9,5 mm
c	47,5 mm
2a	19 mm
2c	95,1 mm

Tabelle 2: Eingangsgrößen für den Werkstoff (Widerstandsseite).			
Werkstoffkennwert	Verwendeter Wert	Quelle	Auswirkung auf die bruchmechanische Berechnung
Festigkeit			
0,2 %-Dehngrenze ($R_{p0,2}$), MPa	278	Simulation	Koordinate L_r
Zugfestigkeit R_m , MPa	421	Simulation	
Zähigkeit			
Elastizitätsmodul E, GPa	168	Simulation	Übertragung von J in K_{mat}
Poisson-Zahl ν	0,275	DIN EN 1563	
J-Integral, N/mm	20,94	Simulation, s. Bild 8	Koordinate K_r
K_{mat} , MPa \sqrt{m}	62	Berechnungsformel $K_{mat} = [J_{c,i} \cdot E / (1 - \nu^2)]^{0,5}$	



Der Auslegungspunkt liegt jedoch sehr nahe an der Grenzlinie. Für ES 30 wird ein unsicheres Verhalten vorhergesagt. Der Auslegungspunkt (rotes Quadrat) liegt außerhalb der Grenzlinie des Failure Assessment Diagram (FAD).

In der Literatur werden zahlreiche andere Lastfälle im Detail diskutiert [10]. Falls unsicheres Verhalten vorhergesagt wird, stehen verschiedene Alternativen zur Verfügung:

1. Fehlerreduzierung durch simulationsunterstütztes Gießen,
2. Steigerung der lokalen Bruchzähigkeit durch gezielte Gefügeveränderung und
3. Veränderung der Auslegung und/oder Belastungen des Planetenträgers.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag stellt das Potenzial für die Zusammenführung zweier numerischer Nachweismethoden für die sichere Auslegung und Qualitätsoptimierung am Beispiel eines Windkraftbauteils aus Gusseisen vor. Diese Methodik unterstützt sowohl den Hersteller als auch den Gussteilanwender bei der Einstellung gewünschter mechanischer Eigenschaften und innerer Fehlerfreiheit und bietet damit Schutz gegen jede Art von Dehnungs- oder Versprödungsbrüchen.

Die Kombination der beiden Methoden wurde am Beispiel eines Planetenträgers aus dem Werkstoff GJS-400 für Getriebekästen in Windenergieanlagen angewendet. Im Ergebnis zeigte sich, dass die folgenden, für eine bruchmechanische Berechnung notwendigen Eingangsgrößen mit Hilfe von Gießprozess-Simulationen bereitgestellt werden können:

- Nachweis einer maximalen Defektgröße mit Hilfe von Porositätsvorhersagen,
- lokale Gefügeausbildung und mechanische Eigenschaften des Gusseisens,

- Berechnung örtlich aufgelöster Risszähigkeitseigenschaften und damit Vermeidung aufwendiger Versuche,
- durch den Gießprozess bedingte Eigenspannungen im Gussbauteil.

Dank der Kenntnisse über die lokale Bruchzähigkeit, die wichtigste Werkstoffeingangsgröße für die Berechnung, kann eine bestehende Lücke geschlossen werden. Um diese Daten für den Werkstoff GJS-400 zu erhalten, wurden bestehende Korrelationen zwischen den mechanischen Eigenschaften, dem Gefüge und der Bruchzähigkeit aus der Literatur übernommen und für die Gießprozess-Simulation genutzt. Die Ergebnisse dieser Berechnung fanden Eingang in den bruchmechanischen Nachweis. Die Kombination beider Methoden in ein gemeinsames Konzept bietet folgende Vorteile:

1. Die Kombination von Gießprozess-Simulation und bruchmechanischem Nachweis bietet die Möglichkeit einer sicheren und gewichtssparenden Gussteilauslegung bereits während der Auslegungsphase. Dies setzt jedoch voraus, dass die Gussteilauslegung und die Entwicklung des Gießprozesses für neue Bauteile Hand in Hand gehen.
2. Durch die Gießprozess-Simulation lassen sich die Bereiche eines Gussteils identifizieren, die möglicherweise von Fehlern betroffen sind. Dieses Wissen kann genutzt werden, um kritische Bruchszenarien, auch im Hinblick auf die Prozesssicherheit, abzuleiten. Dies ist umso wichtiger, wenn die Methodik auch auf die Berechnung für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis ausgedehnt werden soll.
3. Aus dem Ergebnis der Berechnung können die maximal tolerierbaren Fehler abgeleitet werden. Dies ist hilfreich bei Entscheidungen hinsichtlich der notwendigen Qualitätsniveaus. Wenn vergleichsweise niedrige Qualitätsniveaus ausreichend sind (eine entsprechende zerstörungsfreie Prüf-

schärfe vorausgesetzt), können die Gussteile zu niedrigeren Kosten produziert werden.

4. Die Bruchzähigkeit kann durch die Gießprozess-Simulation vorhergesagt werden. Dadurch können wesentliche Einsparungen bei den Versuchskosten und entsprechende Zeitgewinne erzielt werden. Die Vorhersage erfolgt auf der Grundlage einer relativ einfachen Korrelation zwischen dem Gefüge und den mechanischen Eigenschaften.
5. Ein Nebeneffekt dieser integrierten Methode besteht darin, dass die Gießprozess-Simulation auch zur Entwicklung repräsentativer Versuchsproben eingesetzt werden kann, die die gleichen mechanischen Eigenschaften aufweisen wie die kritischen Querschnittsbereiche.
6. Eigenspannungen, die aufgrund fehlender Kenntnis oder fehlender experimenteller Validierung ihrer absoluten Werte häufig nicht hinreichend berücksichtigt werden, ergeben sich aus der Gießprozess-Simulation und können unmittelbar als Eingangsgrößen in die bruchmechanische Berechnung einfließen. Dies schafft zusätzliche Sicherheit.

Die Autoren dieses Beitrags sind sich bewusst, dass das Ergebnis der hier vorgestellten kombinierten Methodik nur der Anfang eines zukünftigen Entwicklungsprozesses sein kann, an dessen Ende die Möglichkeit zur optimierten Auslegung von Gusseisenteilen stehen sollte. Diese Aussicht wird umso interessanter, je mehr Leichtbaukonzepte bei den neuen Hochleistungswindenergieanlagen der 10-MW-Klasse an Bedeutung gewinnen, um im Wettbewerb bestehen zu können.

Dr.-Ing. Corinna Thomser, MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen, Prof. Dr. Peter Langenberg und Dr.-Ing. Pawel Kucharczyk, IWT-Solutions AG, Aachen, Dr.-Ing. Jörg C. Sturm, MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen

Literatur:

[1] Broeckmann, C.; Bartz, M.; Keusemann, S.; Krull, F.; Langenberg, P.: *Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Planetenträger aus*

hochfestem Gusseisen in Getrieben für Windenergieanlagen. CWD Aachen, 2013.

[2] VDMA Guideline 23902: *Guideline for fracture mechanical strength assessment of planet carriers made of nodular cast iron EN-GJS-700-2 for wind turbine gear boxes. 2014.*

[3] BS7910: *Guideline on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. British Standard Institutions, 2013.*

[4] Thomser, C.; Bodenburg, M.; Sturm, J. C.: *Optimized durability prediction of cast iron based on local microstructure. International Journal of Metalcasting. DOI: 10.1007/s40962-016-0091-x.*

[5] FKM Heft 258: *Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis, 2009 (Info: www.vdma/fkm).*

[6] API RP 579-1 / ASME FFS-1: *Fitness-for-service. API Publishing Services, First edition, Jan. 2016.*

[7] Sturm, J. C.; Busch, G.; Spangenberg, J.: *Stand der Simulation für Gusseisen. Giesselei (2004), [Nr. 2].*

[8] Baer, W.: *Bruchmechanische Bewertung ferritischer Gusseisenwerkstoffe sowie artgleicher Schweißverbindungen bei statischer Beanspruchung. Diss. TU Bergakademie Freiberg, 1996.*

[9] Pusch, G.; Henkel, S.; Biermann, P.; Hübner, P.; Ludwig, A.; Trubitz, P.; Mottitschka, T.; Krüger, L.: *Determination of fracture mechanics parameters for cast iron materials under static dynamic and cyclic loading. Dedicated to Professor Meinhard Kuna on the occasion of his 65th birthday, 2015.*

[10] Langenberg, P.; Thomser, C.; Sturm J. C.; Kucharczyk, P.: *Integration of casting process simulation into safety-oriented component design – Status and outlook. CastTec Conference, November 2016, Darmstadt.*

[11] Thorborg, J.; Klinkhammer, J.; Heitzer, M.: *Integrated modelling of transitions in mechanical conditions during casting and heat treatment. Proc., 14th Int. Conf. on Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes, vol. 14, 2015.*

[12] IWM Verb 8-1. *Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg, 2016.*