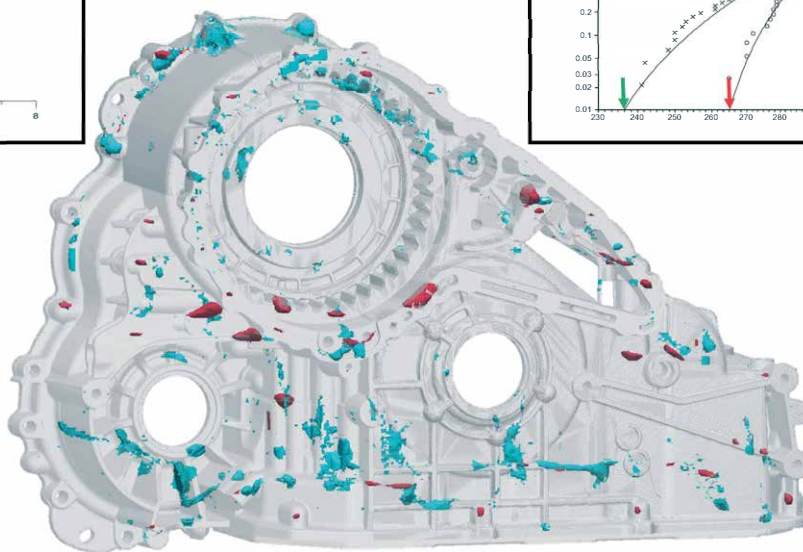
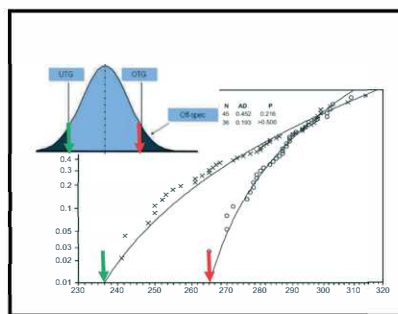
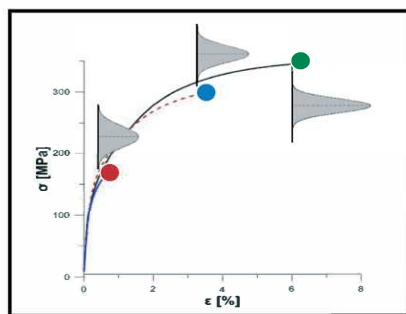




Probabilistisches Modellieren von lokalen Eigenschaften und Defekten ermöglicht die Vorhersage von Bauteilverhalten.

Probabilistische Eigenschaftsvorhersage

Methodik zur abgesicherten Gussteilauslegung und -fertigung, Teil 1 von 2

VON HORST BRAMANN, JAKOB OLOFSSON, JÖRG C. STURM

Die hier vorgestellte numerische Vorgehensweise erlaubt es, berechnete lokale Gefüge und Fehler zur Vorhersage einer statistischen Verteilung von lokalen mechanischen Eigenschaften zu nutzen. Die großen Ergebnismengen aus jeder einzelnen Simulation lassen sich wie zahlreiche einzelne Zugversuche betrachten und statistisch auswerten. In Verbindung mit der Einführung einer Prozessvariabilität in der Simulation ermöglicht diese Innovation eine probabilistische Modellierung der zu erwartenden lokalen Kennwerte.

Der hier veröffentlichte erste von zwei Beitragsteilen diskutiert die Anforderungen und Restriktionen der Gießprozess-Simulation im Entwicklungsprozess von Gussteilen. Skizziert wird die Entwicklung

zur Vorhersage von Gussteileigenschaften. Stärken und Schwächen der Nutzung deterministischer Modelle im Verhältnis zur Realität werden besprochen. Anschließend erfolgt eine Einführung in die Grundlagen der neuen Methodik zum probabilistischen Modellieren.

Auslegungsmethodik für Gussteile

Konstrukteure legen ihre Bauteile nach definierten Lasten und für eine gewisse Lebensdauer aus. Dabei berücksichtigen sie die standardisierten mechanischen Eigenschaften des Materials. Die resultierenden Bauteileigenschaften nach dem Gießen sind jedoch nicht nur vom Werkstoff, sondern auch von den Prozessbedingungen und der Schmelzbehandlung abhängig. Die durch den Gießprozess beeinflussten mechanischen Eigenschaften werden hauptsächlich

durch zwei unterschiedliche Einflüsse gebildet:

- > die lokale Gefügestruktur im Gussteil, beeinflusst durch die Legierungszusammensetzung, lokale Abkühlbedingungen und eine eventuelle Nachbehandlung.
- > Lokale Gussfehler, die von den Prozesseinstellungen und Gießbedingungen abhängig sind.

Die lokale Gefügestruktur und die lokalen Defekte bestimmen also die resultierenden mechanischen Eigenschaften.

Robustheit von Gussdesigns

Der Konstrukteur kennt in der Designphase noch nicht die finalen Prozessbedingungen, sodass er das Bauteil unter Berücksichtigung von Unsicherheiten auslegen muss. Die Beziehung zwischen Prozesseinstellung, lokaler Gefügestruktur, Defekten und den finalen mechani-

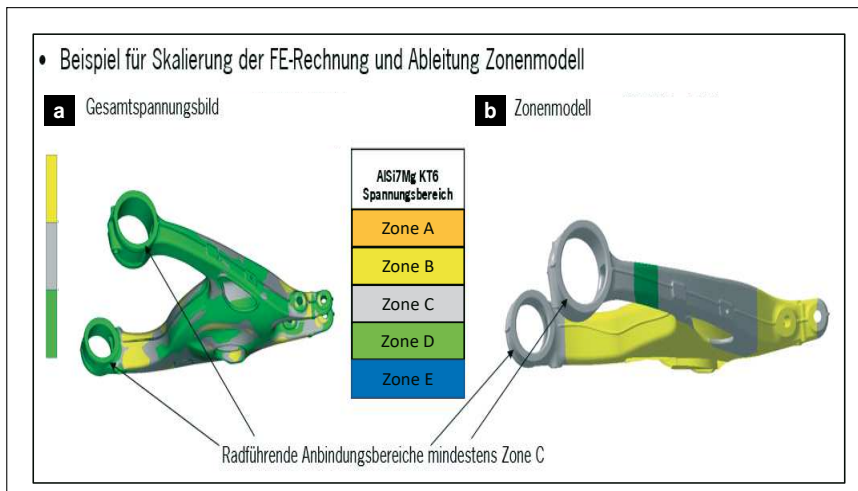


Bild 1: Technische Spezifikation für Aluminiumsand-, -schwerkraft- und -druckguss: a) Aufteilung des Bauteils in Zonen gleicher ertragbarer Last, b) basierend auf Ergebnissen aus z.B. Lebensdauerberechnungen, Crash-Simulationen und Misuse-Fällen leitet sich ein Zonenmodell ab. Die Zonen tolerieren unterschiedliche Fehlergrößen und -häufigkeiten [1].

schen Eigenschaften werden mit Sicherheitsfaktoren im Bauteildesign und mit anspruchsvollen Spezifikationen berücksichtigt. Das Potenzial der verwendeten Legierung wird so nicht vollständig genutzt und das Bauteil wird dadurch unnötig schwer.

Wir haben es hier also mit einem typischen „Henne oder Ei“-Problem zu tun: Wie kann die Gussteilgeometrie werkstoffgerecht optimiert werden, ohne dass ich zu diesem Zeitpunkt detaillierte Kenntnisse über die Fertigungsbedingungen habe? Häufig steht der Lieferant bis zum Designfreeze noch gar nicht fest. Damit ist das Zeitfenster für die Berücksichtigung von Informationen aus der Prozesssimulation klein. Der Konstrukteur fragt sich, wie er die vorhandenen Unsicherheiten durch die nicht festgelegten Pro-

zessrandbedingungen berücksichtigen soll. Die Konsequenz sind die oben genannten Sicherheitsfaktoren und anspruchsvollen Spezifikationen an den Lieferanten. In Abhängigkeit vom Lastfall fordern Gussteilkunden von ihren Lieferanten daher bestimmte Qualitätsniveaus und somit Eigenschaftslevel für unterschiedliche Bereiche der Gussteile (**Bild 1**). Auf diese Weise wird das Risiko reduziert, für die dadurch entstehenden Fertigungs- und Qualitätskosten ist der Lieferant verantwortlich.

Robustheit des Gießprozesses

Sobald das Bauteildesign feststeht, werden Entscheidungen bezüglich Gießtechnik, Werkzeug und Prozessfenster nötig. Spätestens in diesem Stadium werden weitere Akteure (Formenbau, Gießerei)

involviert. Gleichzeitig erhöht sich die Anzahl der Parameter, die die Bauteilqualität und zugehörige mechanische Eigenschaften beeinflussen, erheblich. Um ein robustes Werkzeugdesign und stabile Prozessbedingungen zu erhalten, ist es Stand der Technik, Informationen aus einzelnen Simulationen oder durch virtuelle Versuchsplanung mithilfe von Gießprozess-Simulation zu nutzen. Diese Analysen ermöglichen die Ermittlung von idealen Arbeitspunkten und die Einstellung eines robusten Prozessfensters für die erwarteten mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Der Werkzeugbauer entwirft Anschnitt und Werkzeug entsprechend der geforderten Bauteilqualität. Der Produktionsmanager in der Gießerei kann einen Betriebszustand einstellen, der eine nahtlose und kurze Hochlaufphase sichert. Diese Informationen ermöglichen dem Qualitätsmanager, seinen Kunden (d.h. den Bauteildesignern) auch über die zu erwartende Streuung zu unterrichten, noch bevor das erste Bauteil produziert wurde. Für die Optimierung des Gussteildesigns selbst kommen diese Aktivitäten aber zu spät.

Simulation von Gussteileigenschaften

Seit 40 Jahren wird die Gießprozess-Simulation genutzt, um mögliche Gießfehler frühzeitig zu erkennen und durch eine optimierte Gießtechnik zu vermeiden [2]. In den frühen 1990er-Jahren startete die Entwicklung von Modellen, die über die makroskopische Vorhersage von Strömung, Wärmefluss und Spannungen hinaus, Informationen über das zu erwartende lokale Gefüge liefern können. Die-

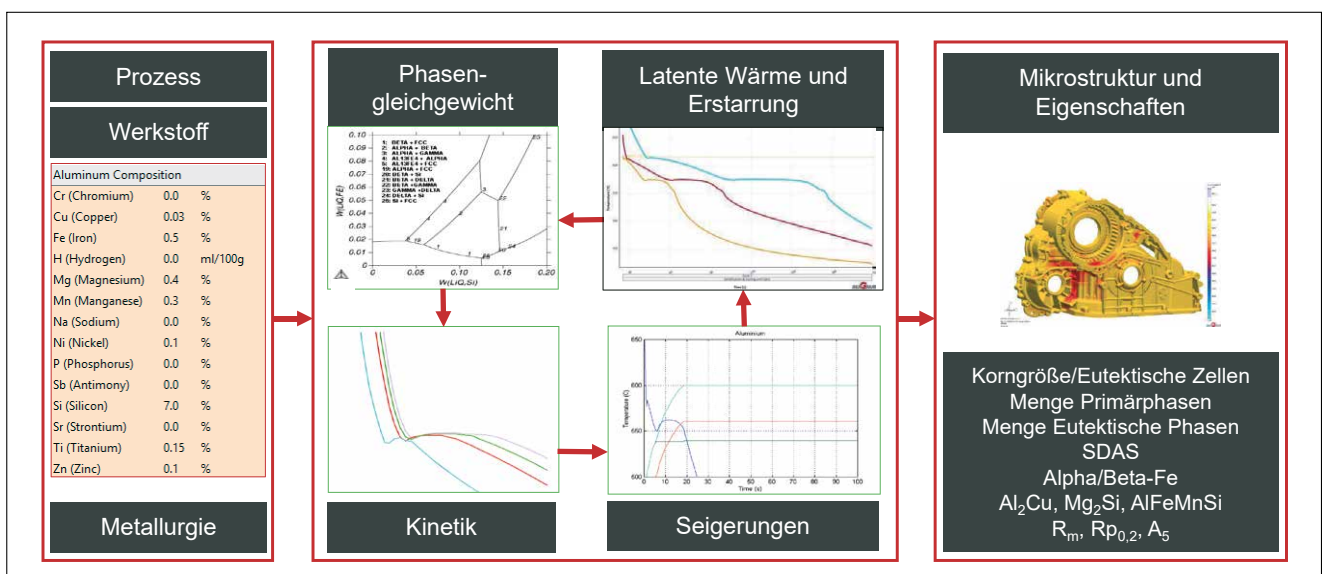


Bild 2: Prinzipschaubild zur Gefügesimulation von Aluminiumwerkstoffen. Neben den klassischen Eingabegrößen zum Prozess können Legierungszusammensetzungen und der metallurgische Zustand der Schmelze berücksichtigt werden und beeinflussen die Ergebnisse.

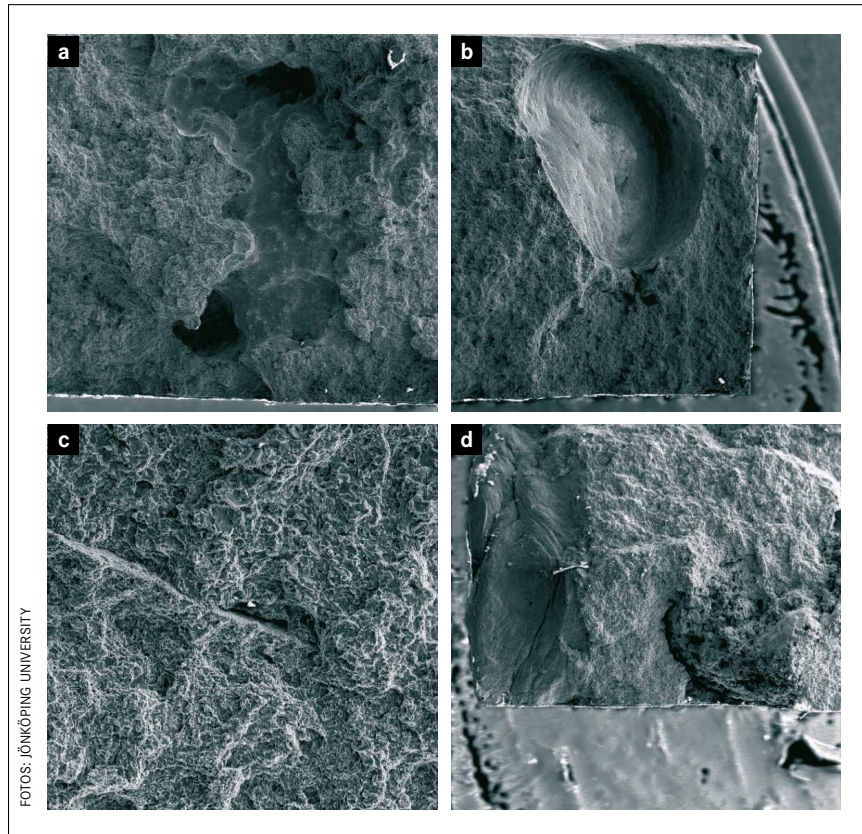


Bild 3: Typische Gussfehler im Druckguss: a) Mikroporositäten, b) eingeschlossene Luft und Wasserstoffausscheidungen während der Erstarrung, c) Oxide oder d) Kaltlauf.

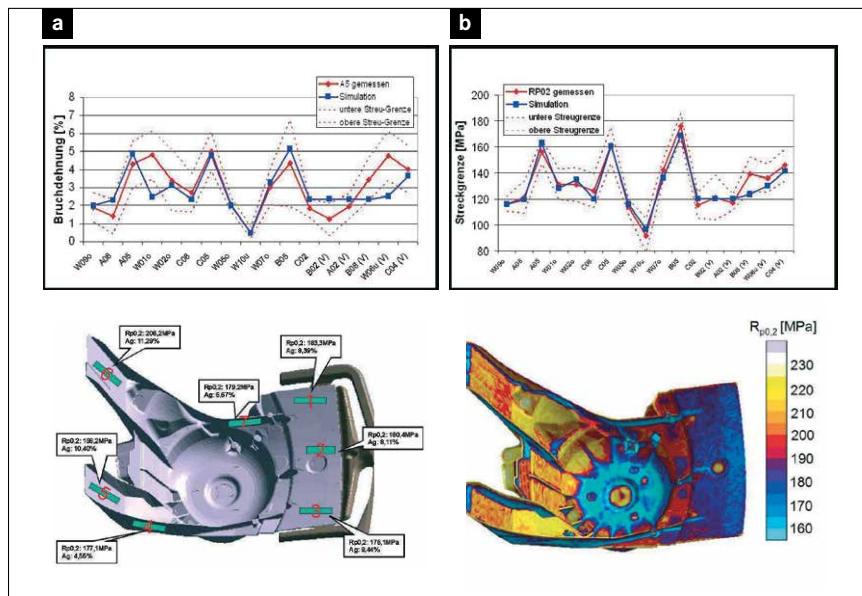


Bild 4: Eigenschaftsvorhersage durch Quality Mapping für einen Druckguss-Federbeindom. Korrelation a) der Streckgrenze und b) der Bruchdehnung mit den Ergebnissen der Zugversuche [9].

se sogenannten Mikromodelle nutzen Theorien zur Keimbildung, der Kinetik des Kristallwachstums sowie dem Seigerungsverhalten des Werkstoffs und koppeln sie mit dem makroskopischen Wärmeﬂuss zur Berechnung lokaler Gefüge [3]. Die Kenntnis über die lokalen Anteile und die Ausbildung unterschiedlicher Phasen ermöglichte auch erstmals die Vorhersage von lokalen mechanischen Eigenschaften (Bild 2).

Vorteile der Nutzung von Mikromodeln gegenüber den rein makroskopischen Berechnungen sind die zusätzlichen Informationen über lokale Mikrostrukturen und Eigenschaften. Die Gefügesimulation erlaubt zudem die Variation der Legierungszusammensetzung als Eingabeparameter und kann unterschiedliche Metallurgie und Impfstände berücksichtigen. Diese Methodik ist immer dann zielführend für die Eigenschaftsvorhersage, wenn das Grund-

gefüge dominant zu den lokalen mechanischen Eigenschaften beiträgt. Dies ist bei Gusseisenwerkstoffen und auch bei kontrollierten Gießverfahren im Leichtmetallguss der Fall. Daher kamen die Modelle auch früh für diese Werkstoffgruppen und Verfahren zum Einsatz [4-7].

Bei Gießprozessen, in denen das Werkstoffversagen dominant durch Imperfektionen im Gussteil bestimmt wird, ist die Vorhersage von lokalen mechanischen Eigenschaften nur aufgrund des berechneten Gefüges fraglich. Dies gilt insbesondere für das Druckgießen, bei dem die lokalen Eigenschaften aufgrund der turbulenten, in Millisekunden stattfindenden, Formfüllung sowie der schnellen Erstarrung durch unterschiedliche Fehlermechanismen entstehen. Maßgebliche Fehler, die zu natürlichen Schwächungen des Gefüges führen, sind neben schwindungsbedingten Poren, Gasporosität durch Lufteinschlüsse und Wasserstoffausscheidungen sowie Oxide, Kaltlauf und Mikrorisse (Bild 3). Die Modellierung dieser Fehler in der Gießprozess-Simulation hat in den letzten 20 Jahren ebenfalls signifikante Fortschritte gemacht.

Die meisten dieser Fehler, insbesondere Oxide und Einschlüsse, treten trotz eines robusten Prozessablaufs im Gussteil diskret und stochastisch verteilt auf. Verteilungen und Schwankungen können so quantitativ durch die oben beschriebenen deterministischen Modelle nur begrenzt vorhergesagt werden. Um dennoch auch für das Druckgießverfahren Aussagen über zu erwartende lokale Eigenschaften zu ermöglichen, wurde ab den frühen 2000er-Jahren die Methodik des sogenannten „Quality Mappings“ entwickelt. Hierbei wurden umfangreiche Messungen mechanischer Eigenschaften im Bauteil mit vorhandenen Qualitätskriterien aus der Gießprozess-Simulation korreliert und für die Vorhersage des lokalen Bauteilverhaltens genutzt [8-11]. Der Vorteil des Quality Mappings ist, dass die stochastischen Schwankungen der Gussteilqualität über die Versuchsplanung der realen Versuche abgesichert werden. Ein Nachteil ist allerdings, dass die ermittelten Korrelationen nicht beliebig auf andere Bauteile oder Verfahren übertragbar sind (Bild 4).

Die vorhergesagten lokalen Materialeigenschaften, einschließlich der Auswirkungen lokaler Defekte, können auf FE-Analysen des Teils übertragen werden, das statischen, Ermüdungs- oder thermomechanischen Belastungen ausgesetzt ist [12-16]. Bauteildesigner nutzen seit langem diese Möglichkeiten in CAE-Programmen zur Bauteilauslegung, um den

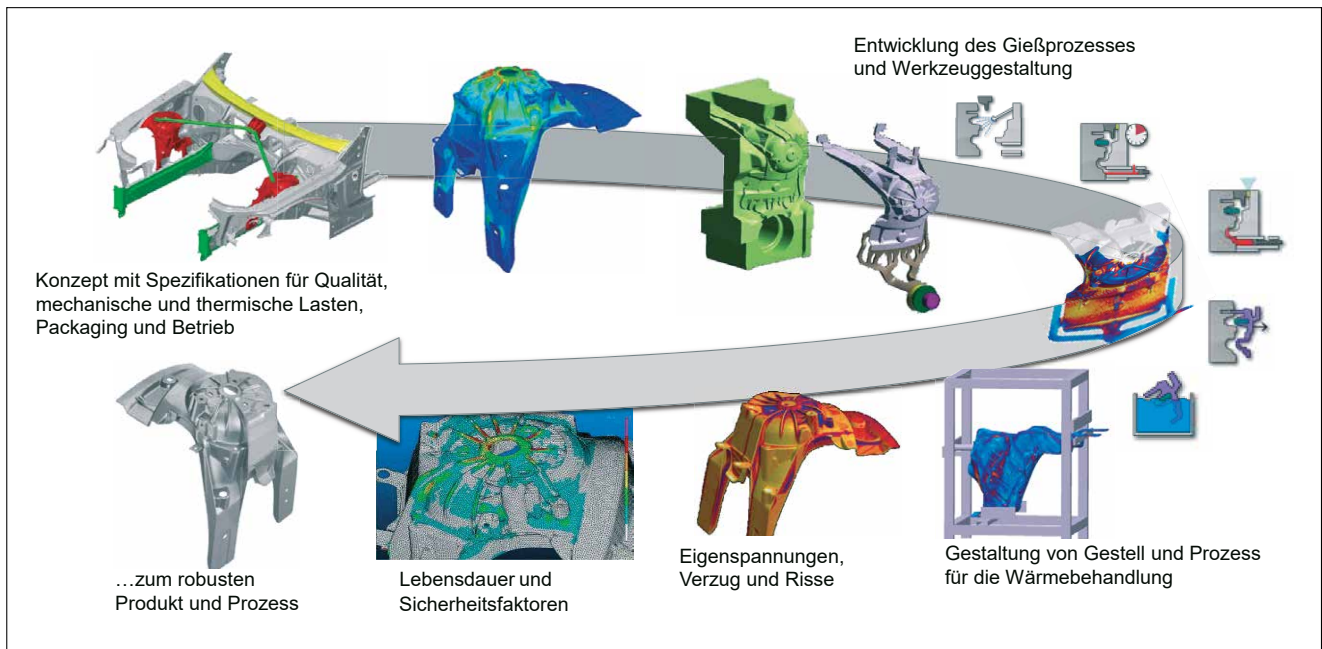


Bild 5: Integration der Ergebnisse der Gießprozess-Simulation in die Produktentwicklung und Prozessauslegung.

Einfluss variierender Gusseigenschaften auf die Last zu untersuchen [17]. Erste Anwendungen hierfür waren die Berücksichtigung von Eigenspannungen aus der Wärmebehandlung bei Zylinderköpfen [18-20]. Simulierte Informationen zu lokalen Eigenschaften können auch in der Lebensdaueranalyse genutzt werden [21, 22] (Bild 5). Dies wird in der Praxis jedoch nur akzeptiert, wenn die minimal erwarteten lokalen Eigenschaften statistisch validiert sind.

Von der deterministischen zur probabilistischen Modellierung

Die meisten Menschen haben eine deterministische Denkweise. So wurde es uns in der Schule beigebracht: Setze bestimmte Werte in eine Gleichung ein und du erhältst immer das gleiche Ergebnis. Dieses Denken wird gerne auf Materialeigenschaften übertragen (z. B. durch Verwendung von Werten aus Normen in Berechnungen als festgelegte Werte). Menschen neigen dazu, zu denken, dass wir uns von der Physik (oder der Genauigkeit) entfernen, wenn wir anfangen, Statistik anzuwenden. Wenn ich meinen Prozess immer konstant halte, sollte auch immer alles gleich bleiben.

Die Nutzung deterministischer Modelle in der Gießprozess-Simulation hat große Stärken. Wenn das Modell die Vorhersage einer Eigenschaft oder eines Fehlers erlaubt, führt jede Änderung in den Eingangsparametern (Bauteildesign, Werkzeuggestaltung, Gießtechnik, Metallurgie, Legierungszusammensetzung und Prozessparameter) zu einer messbaren Re-

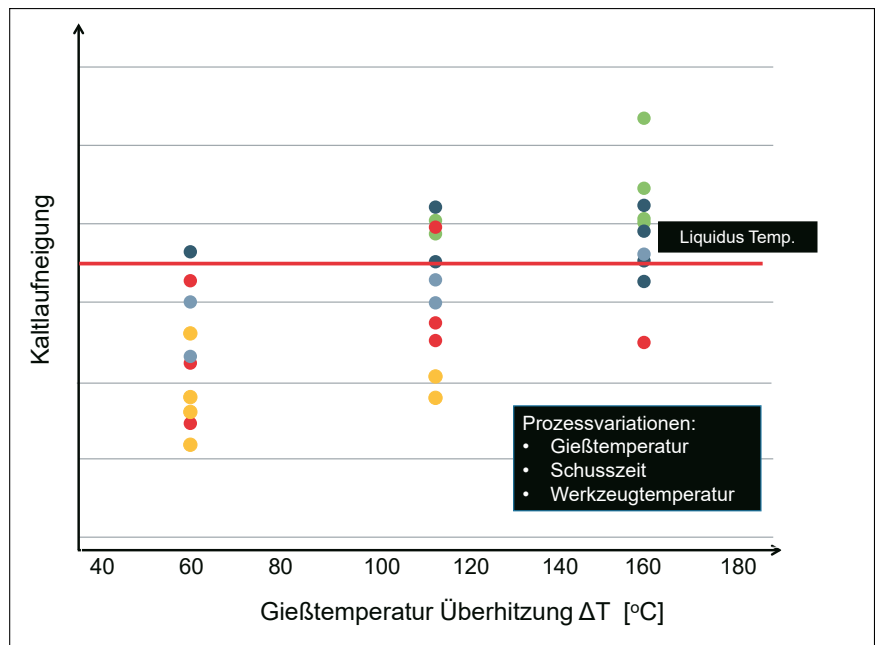


Bild 6: Beispiel einer systematischen Untersuchung von Prozessschwankungen auf die Kaltlaufneigung mit einem virtuellen Versuchsplan. Jeder Punkt entspricht dem Ergebnis einer Simulation mit unterschiedlichen Prozess- oder Randbedingungen, Bewertungskriterium ist die Liquidustemperatur. Die untersuchten Prozessänderungen (Gießtemperatur, Schusszeit, Werkzeugtemperaturen) führen bei einer Überhitzung der Schmelze von 160 °C nur in zwei von zehn Varianten zu Kaltlauf. Bei einer Überhitzung von 110 °C sind sieben und bei 60 °C neun von zehn Varianten ausschussgefährdet.

aktion in den Ergebnissen. Die implizit starke Kopplung von „Input“ und „Output“ ermöglicht es, durch systematisches Verändern der Eingangsgrößen zu dem gewünschten Ziel zu kommen (Qualität, Produktivität oder Kosten). Hier unterscheidet sich das Modell von der Realität, denn die Kopplung von Prozessdaten zur Bauteilqualität ist durch den Faktor Zeit und die unvollständige und häufig nur indirekte oder unvollständige Messbarkeit, so-

wohl der Eingangsgrößen als auch der Gussteilqualität, sehr schwach.

Seit den 2010er-Jahren haben die Implementierung von virtueller Versuchsplanung und automatischer Optimierung in die Simulation Möglichkeiten geschaffen, die gewohnte Vorgehensweise nach einem sequenziellen Ablauf (Festlegen der Gießbedingungen, Simulieren, Bewerten der Ergebnisse für eine nächste Variante) zu ergänzen. Dadurch wurde eine

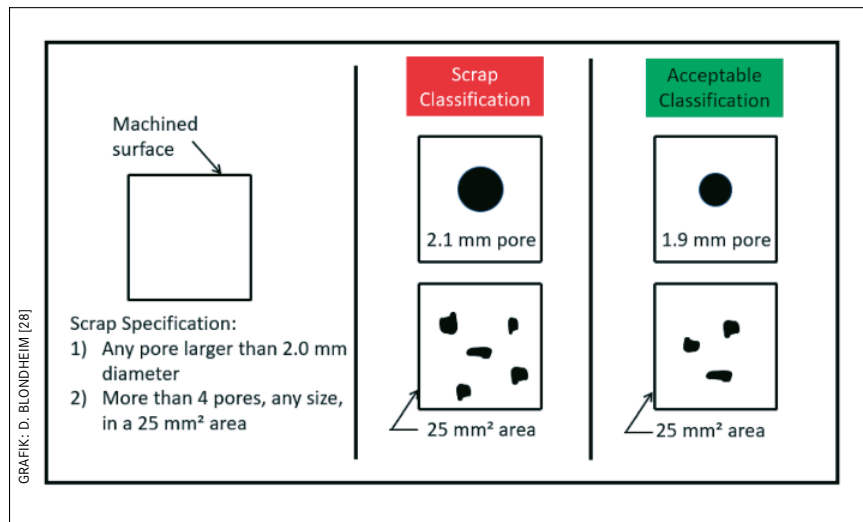


Bild 7: Spezifikation von Ausschussgründen im Gussteil. Kleinste Schwankungen in den gemessenen Fehlergrößen können je nach Grenzwert zu Ausschuss führen [28].

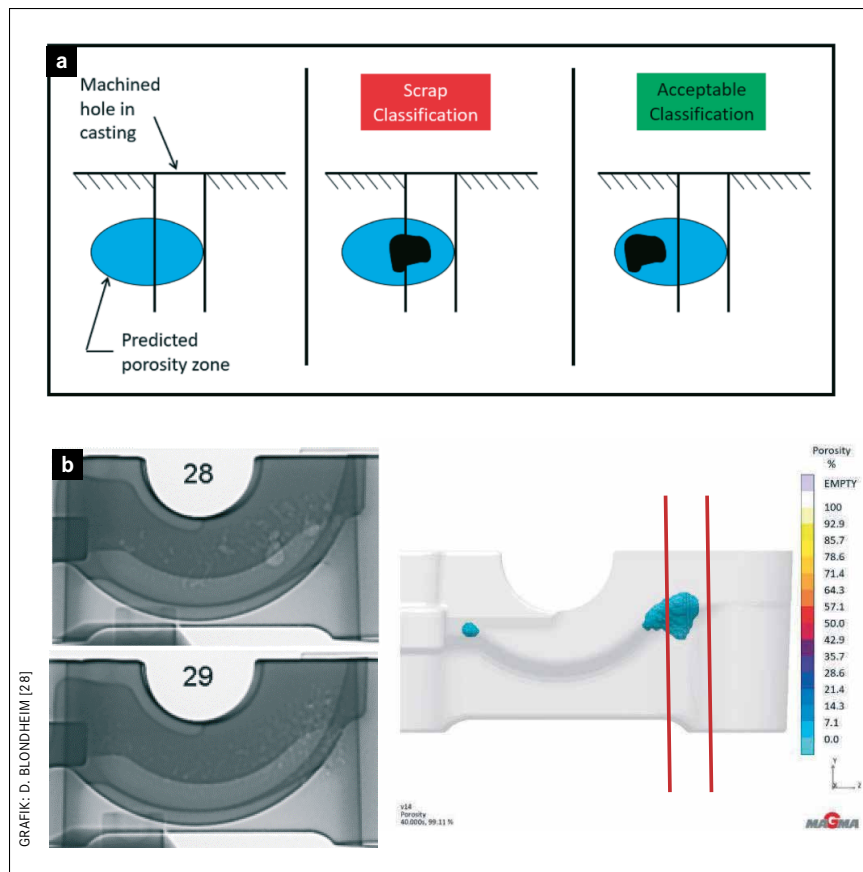


Bild 8: Vergleich von a) Simulationsergebnissen mit b) realen Fehlerbildern. Die Simulation zeigt einen Bereich an, in denen sich Fehler ergeben. Je nach Lage und Spezifikation ist der reale Fehler jedoch kritisch oder akzeptabel [28].

ganzheitliche Untersuchung von Fertigungsfenstern bis hin zum Ermitteln optimaler Bedingungen für die jeweilige Zielsetzung möglich [24-27]. Dies erlaubt auch eine systematische Untersuchung von Fertigungsschwankungen durch die Variation von Prozessbedingungen mit unterschiedlichen Simulationen (Bild 6). Die Schwäche des deterministischen Ansatzes bleibt, dass in einer einzelnen Simulation die simulierten Fehler oder Eigen-

schaften zwar örtlich variieren, aber keine Streuung haben. Dies ist bei der Bewertung eines simulierten Fehlers ein grundsätzliches Problem.

Das Vertrauen in die Vorhersagequalität der Gießprozess-Simulation ist heute vielfach so groß, dass der vorhergesagte Fehler als „real“ akzeptiert wird, dabei ist eine einzelne Simulation aber nur ein einziger virtueller Versuch. Zehn Mal das Gleiche simulieren führt zehn Mal zum

selben Ergebnis, die Realität in der Gießerei ist jedoch eine andere: Gießer müssen Fertigungsschwankungen und damit verbundene Qualitätsänderungen akzeptieren. Sie streben daher ein möglichst robustes Prozessfenster an, in dem die natürlichen Streuungen aufgefangen werden.

Wenn Gießer von Ausschuss sprechen, reden sie von 2 oder 5 %. Das heißt, nur jedes 20. oder 50. Teil zeigt den in der Simulation vorhergesagten Fehler. Darüber hinaus wird je nach Spezifikation ein realer Fehler als solcher klassifiziert oder auch vernachlässigt (Bild 7):

- > zulässige Porengröße 1 mm: was ist bei 0,9 mm?
- > zulässige fehlerbehaftete Zone mit 4 Poren von 25 mm²: was ist mit 6 kleinen Poren aber gleicher Fläche?

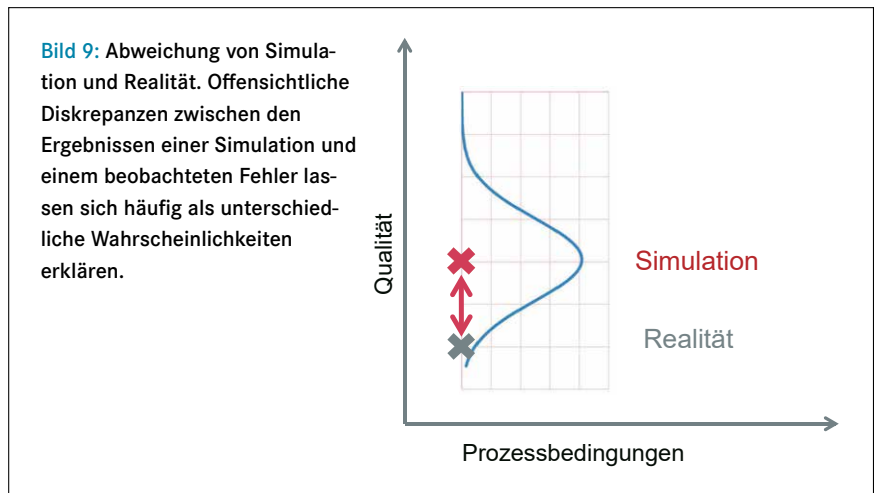
Darüber hinaus kann der gleiche Fehler je nach Lage oder geringer örtlicher Veränderung akzeptabel sein oder zu Ausschuss führen, ohne dass sich das Simulationsergebnis ändert (Bild 8). Daher kommt es häufig zu dem Missverständnis, dass bei Abweichungen zwischen der Realität und der Simulation die berechneten Ergebnisse offensichtlich „falsch“ sind. Fehler wie Poren sind im Gegensatz zu vielen kontinuierlich sich verändernden Eigenschaften Singularitäten mit diskreten Werten: Sie sind entweder da oder nicht und liegen im zulässigen oder im kritischen Bereich. Legt man aber die reale Verteilung der gemessenen Streuungen über die Abweichung zwischen Simulationsergebnis und Messung, liegt der simulierte Fehler überwiegend in der Normalverteilung der realen Schwankungen (Bild 9). Wie gesagt, das fehlerbehaftete Ausschussergebnis ist eher ein Ausreißer als die Norm. Das einzelne Simulationsergebnis sollte also als Wert maximaler Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Fehlers und nicht als reale geometrische Ausprägung bewertet werden.

Probabilistisches Modellieren mechanischer Eigenschaften

Die Aluminiumschmelze, die in die Form gelangt, enthält nicht nur Atome der angegebenen chemischen Zusammensetzung, sie wird immer auch eine stochastische Verteilung an Oxiden und anderen Einschlüssen enthalten. Die Menge dieser potenziellen Schädigungen des Werkstoffs hängt davon ab, wie viele von diesen Defekten bereits in der Schmelze vorhanden sind, wenn sie in die Gießkammer

gefüllt wird (was wir in der Simulation nie genau wissen können oder als feste Randbedingung vorgeben). Sie hängt auch davon ab, wie viel davon während der Formfüllung und der Erstarrung entsteht (was wir besser vorhersagen können). Es gibt also einen physikalischen Grund dafür, in die Simulation des Prozesses einen Parameter für die „Prozessvariabilität“ einzuführen, der z. B. den „Grad der Schädigung“ der Schmelze bereits vor Beginn der Simulation beschreibt. Dieser Faktor ist in hohem Maß von der Qualität des Rohmaterials und der Schmelzebehandlung in der Gießerei vor dem Gießen abhängig.

Gerade mechanische Eigenschaften in Gussteilen folgen nicht nur der Natur der zugrundeliegenden physikalischen Phänomene, die Verformung und das Versagen von Werkstoffen folgen einem stochastischen Prinzip. Die Dehnung des Werkstoffs bis hin zum Versagen muss daher als ein Problem des schwächsten Gliedes verstanden werden. Hierbei spielen Oxide aufgrund ihrer Form und Größe und Einschlüsse durch die hohe lokale Spannungskonzentration eine wesentliche Rolle (Bild 10) [29]. Die Streuung dieser ursächlichen Versagensgründe folgt naturgemäß einer stochastischen Verteilung und nicht nur einem deterministischen Wert (Bild 11) [30, 31]. Die Kombination der deterministischen Modelle der Gießprozess-Simulation mit einem probabilistischen Ansatz bedeutet also, dass wir eine Methode nutzen, die die zugrunde liegenden physikalischen Phänomene besser abbildet. Wenn die-



ses Verhalten akzeptiert wird, sind die Möglichkeiten in der realen Welt sehr limitiert:

- > Wie viele Proben werden für die Ermittlung robuster Werte für mechanische Eigenschaften in einem Gussteil benötigt?
- > Wie oft muss der Versuch reproduzierbar sicher wiederholt werden, um statistisch abgesicherte Daten über das werkstoffbezogene Bauteilverhalten zu erhalten?
- > Wo lassen sich überhaupt Proben aus dem Gussteil nehmen?

Um Materialeigenschaften korrekter interpretieren zu können, reichen Mittelwerte aus drei Stichproben nicht aus. In der Simulation mit der Gießerei-Simulationssoftware Magmasoft [32] wird das Gussteil häufig mit mehr als einer Million

Elementen diskretisiert. Das heißt, für jedes Kriterium, jeden Fehler oder berechnete Eigenschaft liegen auch eine entsprechende Anzahl von Informationen vor. Eine Million berechneter Werte mechanischer Eigenschaften kann man auch als eine Million Zugversuche interpretieren. Man kann also mit Recht von „Big Data“ sprechen, die sich für eine statistische Bewertung ideal eignen. Damit lässt sich das zuvor beschriebene Problem von Fehlerverteilungen und -schwankungen probabilistisch angehen. In der kommenden Ausgabe der GIESSEREI (Jahrgang 111 (2024), Nr. 07/08) wird die neue Methodik vorgestellt und anhand eines Anwendungsbeispiels beschrieben, wie die Umsetzung mit Magmasoft erfolgt. Ferner werden die Ergebnisse diskutiert sowie die neu geschaffenen Möglichkeiten zur Ermittlung der Design-

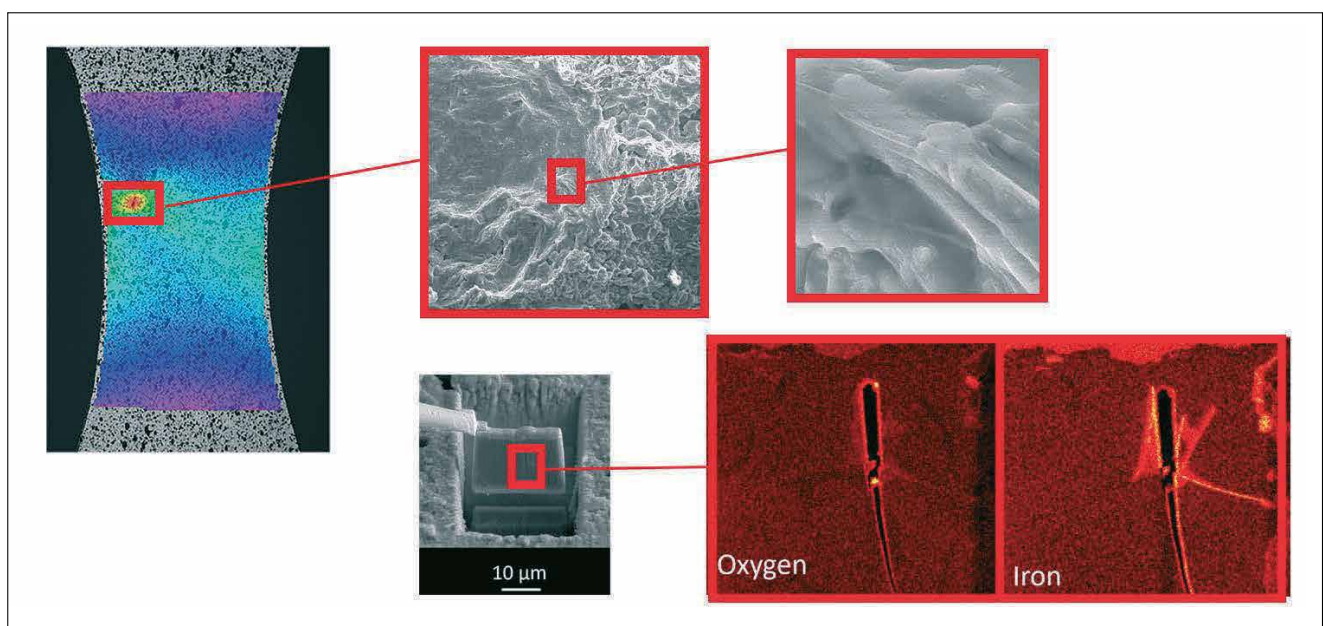


Bild 10: Ermittlung der Versagensursachen in einer Zugprobe. Digitale Bildkorrelation und rasterelektronenmikroskopische Beobachtungen von gegossenem Aluminium zeigen, dass der Bruch durch eine Oxidschicht verursacht wird, die bei Belastung als Dehnungskonzentration wirkt [29].

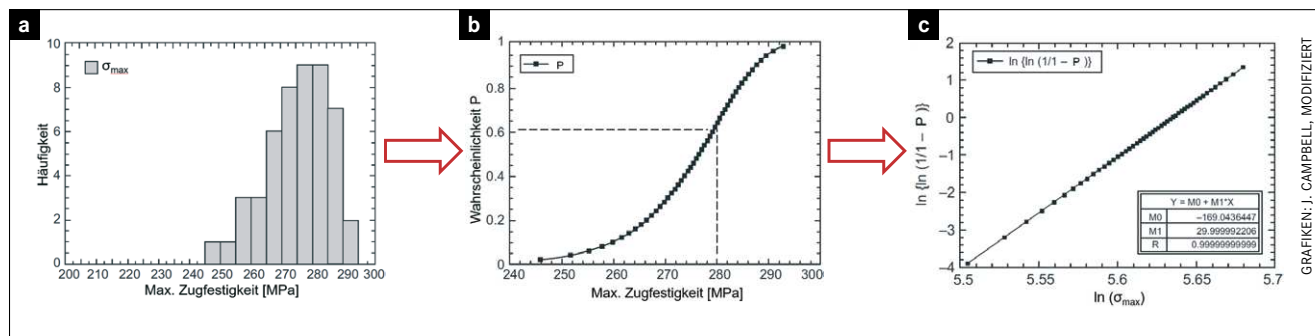


Bild 11: a) Die reale oder berechnete Häufigkeitsverteilung für die maximale Zugfestigkeit kann b) als Wahrscheinlichkeit P dargestellt werden. c) Mit einer Weibull-Analyse können sowohl die Konsistenz der Daten (Gerade) als auch die minimal erwarteten Eigenschaften ermittelt werden [31].

fähigkeit und Prozessfähigkeit im Entwicklungsprozess neuer Gussteile erörtert.

Dr.-Ing. Horst Bramann, MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen; Associate Prof. Dr. Jakob Olofsson, Jönköping University und Simonorus AB, Jönköping, Schweden; Dr.-Ing. Jörg C. Sturm, Beratender Ingenieur, Aachen.

Dr. Toni Bogdanoff, Jönköping University, Schweden, wird für die Zurverfügungstellung der Gefügebilder in Bild 3 gedankt.

Literatur:

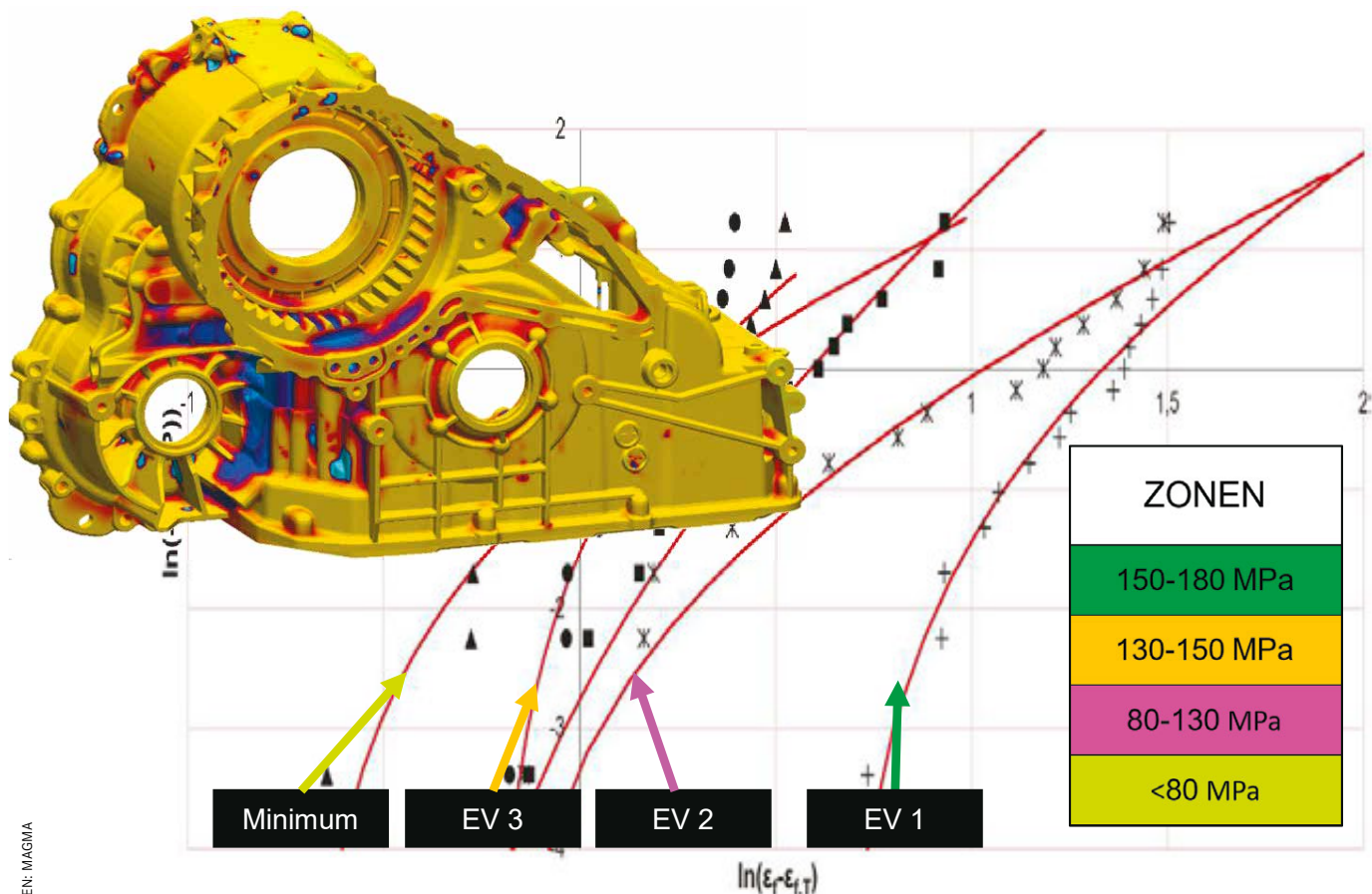
- [1] persönliche Mitteilung, Dr. F. Porsche AG.
- [2] *International Journal of Metalcasting* 4 (2010), [Nr. 2], S.7-23, doi.org/10.1007/BF03355463.
- [3] M Rappaz: Does MCWASP still follow Moore's law? Forty years of advances in microstructure modeling, 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 861 012001.
- [4] W. Schäfer und J.C. Sturm: Cast Iron - a predictable material. 25 years of modeling the manufacture, structures and properties of cast iron. 11. Int. Symposium Eisenguss, Jönköping, Schweden. Sept 2017.
- [5] *Giesserei-Praxis* 54 (2003), [Nr. 7], S. 287-291.
- [6] M. Wessén, I. Svensson, S. Seifeddine, J. Olsson u. W. Schäfer: Simulation of Cooling Curves, Microstructures and Mechanical Properties in Cast Al-Si Based Alloys, MCWASP, 2006.
- [7] M. Schneider und J. Kappey: Modellierung von Gefüge und mechanischen Eigenschaften von Aluminium-Gusslegierungen während des Gießens und der Wärmebehandlung, VDI-Berichte 2122, VDI Verlag GmbH, Kapitel „Werkstoffeigenschaften Aluminiumguss“, Feb. 2011, S. 203-2.
- [8] Hepp, E., Lohne O. and Sannes: S: Extended Casting Simulation for Improved Magnesium Die Casting, in Conference Proceedings of Int. Conference on Magnesium Alloys and their Applications, 26.-29. Oct. 2009.
- [9] Hepp, E., Tewes, S. Weiss, U.: Integrated design and Process Simulation for crash resistant Mg die casting parts, in Conference Proceedings of Int. Conference on Magnesium Alloys and their Applications, 26.-29. Oct. 2009.
- [10] H. Gese, A. Bach, U. Weiss, N. Nowack und P. Bernbeck: Crashworthiness Simulation of Mg Die Casting Parts including Local Properties from Process Simulation in Conference Proceedings of Int. Conference on Magnesium Alloys and their Applications, 26.-29. Oct. 2009.
- [11] S. Tewes: Vorhersage strömungsbedingter Gussdefekte, Dissertation RWTH Aachen, 2015.
- [12] *Materials & Design* 34 (2011), p. 494-500, doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.029.
- [13] J. Olofsson, I.L. Svensson: Casting and stress-strain simulations of a cast ductile iron component using microstructure based mechanical behavior, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 33, 012051 (2012).
- [14] J. Jansson, J. Olofsson, K. Salomonsen: On the use of heterogeneous thermomechanical and thermophysical material properties in finite element analyses of cast components, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 529, 012076 (2019).
- [15] *Journal of Computational Design and Engineering* 5 (2018), [Nr. 4], p. 419-426, doi.org/10.1016/j.jcde.2018.02.002.
- [16] J. Olofsson: Integrated fatigue life predictions of aluminium castings using simulated local microstructure and defects, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1281, 012067 (2023).
- [17] R. J. Menne, A. Bohmer, A. Egner-Walter, M. Weber und P. Oelling, 28. Internationales Wiener Motorensymposium 2007.
- [18] A. Egner-Walter, Optimierte Motor-

entwicklung durch gezielte Nutzung des Werkstoffpotentials: Risiken und Potentiale von lokalen Bauteileigenschaften und thermischen Eigenspannungen, Aachener Kolloquium 2005.

- [19] *Giesserei-Praxis* 56 (2005), [Nr. 3], S. 102-103.
- [20] G. Hartmann, J. C. Sturm: Integrated Numerical Optimization of Highly Loaded Aluminum Cylinder Heads, SAE Paper, 21-23. Nov. 2002, Sao Paulo.
- [21] *Giesserei-Praxis* 62 (2011), [Nr. 9], S. 424-429.
- [22] A. Egner-Walter, H. Dannbauer: Integration lokaler Bauteileigenschaften gegossener Fahrwerksteile in die Betriebsfestigkeitsberechnung, in: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik, VDI-Berichte Nr. 1846: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Tagung Würzburg 29. - 30.9.2004.
- [23] *Giesserei* 90 (2003), [Nr. 6], S. 44-55.
- [24] G. Hartmann: Selbstständige Rechnerische Optimierung, Druckguss (2008), [Nr. 04], S. 279.
- [25] *Giesserei* 96 (2009), [Nr. 7], S.36-41.
- [26] *Giesserei* 102 (2015), [Nr. 6], S. 86-100.
- [27] D. Gaddam: Autonomous Optimization of Die Casting Processes, AFS 2016.
- [28] D. Blondheim: Improving Manufacturing Applications of Machine Learning by Understanding Defect Classification and the Critical Error Threshold, Int. J. of Metal Casting June 2021.
- [29] J. Olofsson, T. Bogdanoff, M. Tiryakioglu, "On revealing hidden entrainment damage during in situ tensile testing of cast aluminum alloy components.
- [30] *Giesserei Rundschau* 61 (2014), [Nr. 9/10], 09/10-2014, S. 283-291.
- [31] J. Campbell: „Complete Casting Handbook, Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design“.
- [32] MAGMASOFT® ist ein weltweit geschütztes Warenzeichen der MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen.

entwicklung durch gezielte Nutzung des Werkstoffpotentials: Risiken und Potentiale von lokalen Bauteileigenschaften und thermischen Eigenspannungen, Aachener Kolloquium 2005.

- [19] *Giesserei-Praxis* 56 (2005), [Nr. 3], S. 102-103.
- [20] G. Hartmann, J. C. Sturm: Integrated Numerical Optimization of Highly Loaded Aluminum Cylinder Heads, SAE Paper, 21-23. Nov. 2002, Sao Paulo.
- [21] *Giesserei-Praxis* 62 (2011), [Nr. 9], S. 424-429.
- [22] A. Egner-Walter, H. Dannbauer: Integration lokaler Bauteileigenschaften gegossener Fahrwerksteile in die Betriebsfestigkeitsberechnung, in: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik, VDI-Berichte Nr. 1846: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Tagung Würzburg 29. - 30.9.2004.
- [23] *Giesserei* 90 (2003), [Nr. 6], S. 44-55.
- [24] G. Hartmann: Selbstständige Rechnerische Optimierung, Druckguss (2008), [Nr. 04], S. 279.
- [25] *Giesserei* 96 (2009), [Nr. 7], S.36-41.
- [26] *Giesserei* 102 (2015), [Nr. 6], S. 86-100.
- [27] D. Gaddam: Autonomous Optimization of Die Casting Processes, AFS 2016.
- [28] D. Blondheim: Improving Manufacturing Applications of Machine Learning by Understanding Defect Classification and the Critical Error Threshold, Int. J. of Metal Casting June 2021.
- [29] J. Olofsson, T. Bogdanoff, M. Tiryakioglu, "On revealing hidden entrainment damage during in situ tensile testing of cast aluminum alloy components.
- [30] *Giesserei Rundschau* 61 (2014), [Nr. 9/10], 09/10-2014, S. 283-291.
- [31] J. Campbell: „Complete Casting Handbook, Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design“.
- [32] MAGMASOFT® ist ein weltweit geschütztes Warenzeichen der MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen.



GRAFIKEN: MAGMA

Probabilistisches Modellieren von lokalen Eigenschaften und Defekten ermöglicht die Vorhersage von realem Bauteilverhalten.

Probabilistische Eigenschaftsvorhersage

Methodik zur abgesicherten Gussteilauslegung und -fertigung, Teil 2 von 2

Versuche komplett virtuell zu gestalten, würde viel Entwicklungszeit einsparen. Der hier beschriebene Ansatz nutzt die Möglichkeiten der Gießprozesssimulation zur Vorhersage einer statistischen Verteilung von mechanischen Eigenschaften aufgrund berechneter lokaler Gefügeausprägungen und verspricht so neue Möglichkeiten bei der Bauteil- und Prozessauslegung.

VON HORST BRAMANN, JAKOB OLOFSSON, JÖRG C. STURM

In der letzten Ausgabe der Giesserei [1] wurde eine neue Methodik vorgestellt, die die Möglichkeiten der virtuellen Gießprozesssimulation nutzt, um eine statistische Verteilung von lokalen mechanischen Eigenschaften aufgrund berechneter lokaler Gefüge und Fehler vorher-

zusagen. Die großen Ergebnismengen aus jeder einzelnen Simulation können dabei wie zahlreiche einzelne Zugversuche genutzt und statistisch ausgewertet werden. In Verbindung mit der Einführung einer Prozessvariabilität in der Simulation ermöglicht diese Innovation eine probabilistische Modellierung der zu erwartenden lokalen Eigenschaften. Die vorgestellte Vorgehensweise unterstützt damit sowohl

den Konstrukteur im Designstadium bei der abgesicherten Auslegung seines Bauteils als auch den Gießer bei einer robusten Prozessauslegung.

Teil 1 dieses Beitrags [1] hat die Anforderungen und Restriktionen der Nutzung der Gießprozess-Simulation im Entwicklungsprozess von Gussteilen diskutiert und die Grundlagen der neuen Methodik zum probabilistischen Model-

lieren vorgestellt. Dieser zweite Teil beschreibt, wie die probabilistische Modellierung in der Gießprozess-Simulation umgesetzt wird, zeigt die Ergebnisse der Methodik am Beispiel einer Anwendung und diskutiert die neuen Möglichkeiten zur Ermittlung der Design- und Prozessfähigkeit im Entwicklungsprozess neuer Gussteile.

Probabilistisches Modellieren mechanischer Eigenschaften

In einer Magmasoft-Simulation wird das Gussteil häufig mit mehr als 1 Million Elementen diskretisiert [2]. Das heißt, für jedes berechnete Kriterium, jeden Fehler oder jede Eigenschaft liegen auch eine entsprechende Anzahl von Informationen vor. 1 Million berechnete Werte mechanischer Eigenschaften kann man auch als 1 Million Zugversuche interpretieren. Man kann also mit Recht von „big data“ sprechen, die sich für eine statistische Bewertung ideal eignen. Damit lässt sich das zuvor beschriebene Problem von Fehlerverteilungen und -schwankungen probabilistisch angehen.

An einer stochastischen Fehlerverteilung in einem gegossenen Zugstab lässt sich die Methodik erklären. Jede berechnete Zelle im Zugstab liefert einen unterschiedlichen Wert für das erwartete Gefüge, die berechneten Fehler und die dadurch ermittelten mechanischen Eigenschaften (Bild 1). Aus der Gefügesimulation ergibt sich die lokale ideale Spannungs-Dehnungskurve für den Werkstoff. Aus der Bewertung der Fehler ergibt sich eine statistische Verteilung, die als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion dar-

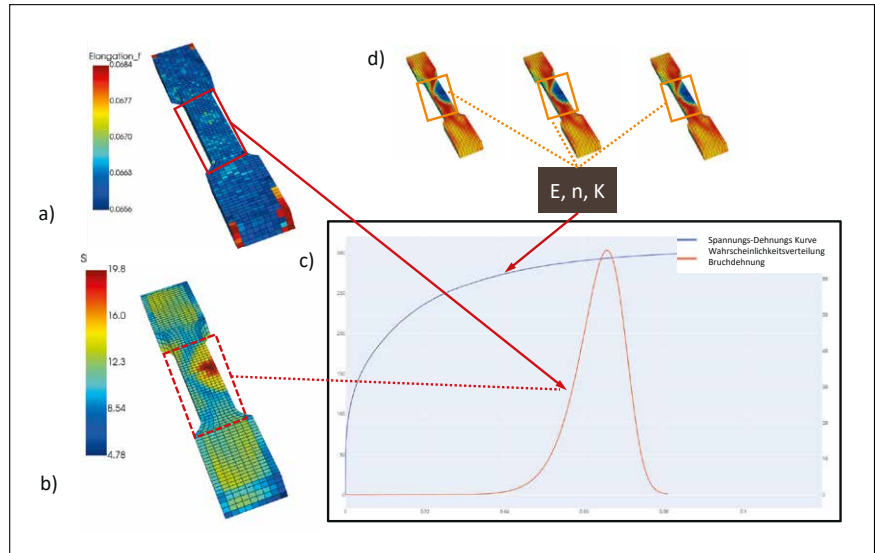


Bild 1: a) Verteilung berechneter Bruchdehnungen A5 und b) ihre Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion in einem Zugstab, in einer Spannungs-Dehnungskurve c) und einer Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion können diese Informationen dargestellt werden und d) mit wenigen Parametern (E,n,K) anderen Berechnungsprogrammen zur Verfügung gestellt werden.

gestellt werden kann. Sie zeigt die Dehnungen, bei der der Zugstab am häufigsten versagen wird und, viel wichtiger, die statistisch untere Grenze, also mit welchen minimalen Dehnungen man rechnen muss. Diese Informationen können mathematisch beschrieben werden und lassen sich mit wenigen Parametern als Feld in andere Berechnungsprogramme exportieren.

Die nachfolgend beschriebene neue Methodik nutzt diese Ideen für die probabilistische Modellierung der mechanischen Eigenschaften von Gussteilen (Bild 2). Dabei werden die Vorhersagen aus Magmasoft in Verbindung mit der Gefügesimulation für Aluminium zur lokalen

Berechnung von mechanischen Eigenschaften des Gefüges genutzt und mit einer statistischen Bewertung der Fehlerverteilung verbunden. Hierbei kommen die folgenden Innovationen zum Einsatz:

- > Berücksichtigung einer Erwartungsfunktion für die Prozessvariabilität in der Simulation,
- > Berechnung von lokalen Spannungs-Dehnungskurven für das lokale Grundgefüge mit der Gefügesimulation,
- > statistische Bewertung von simulierten Fehlerverteilungen über einen definierten Bereich und Nutzung dieser statistischen Ergebnisse als Abschlagsfaktoren auf die jeweilige Spannungs-Dehnungskurve an jedem Ort,

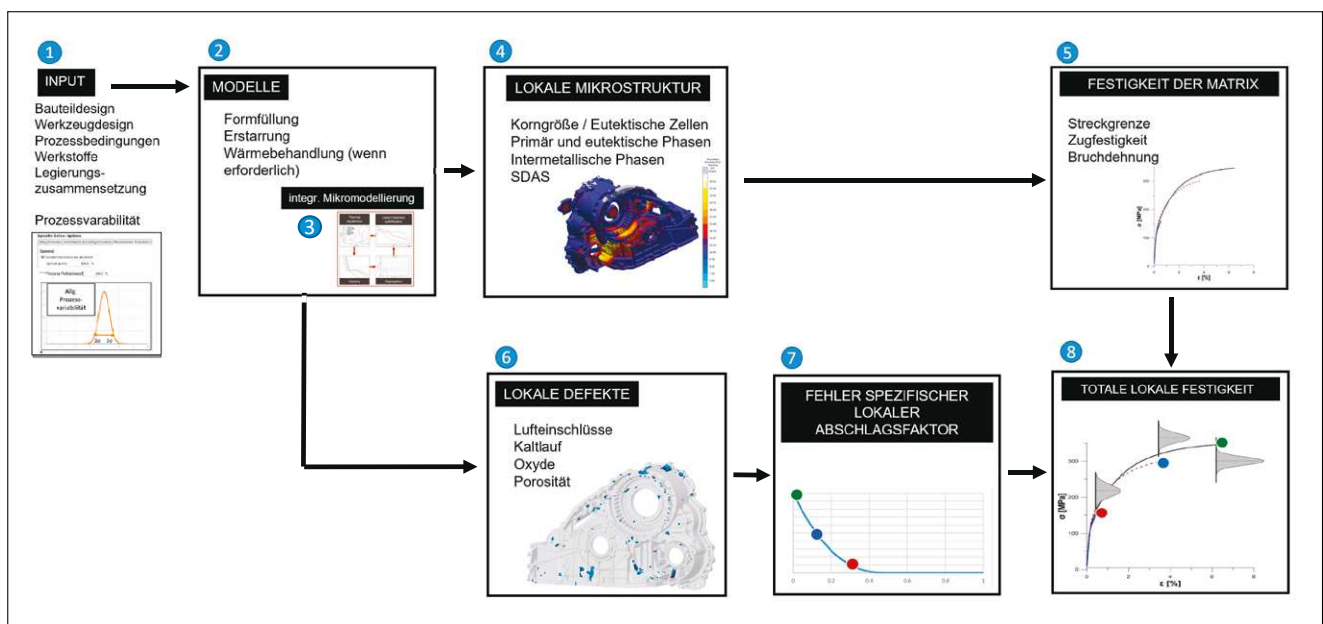


Bild 2: Ablaufschaubild des Kernprozesses der Methodik für ein berechnetes Design.

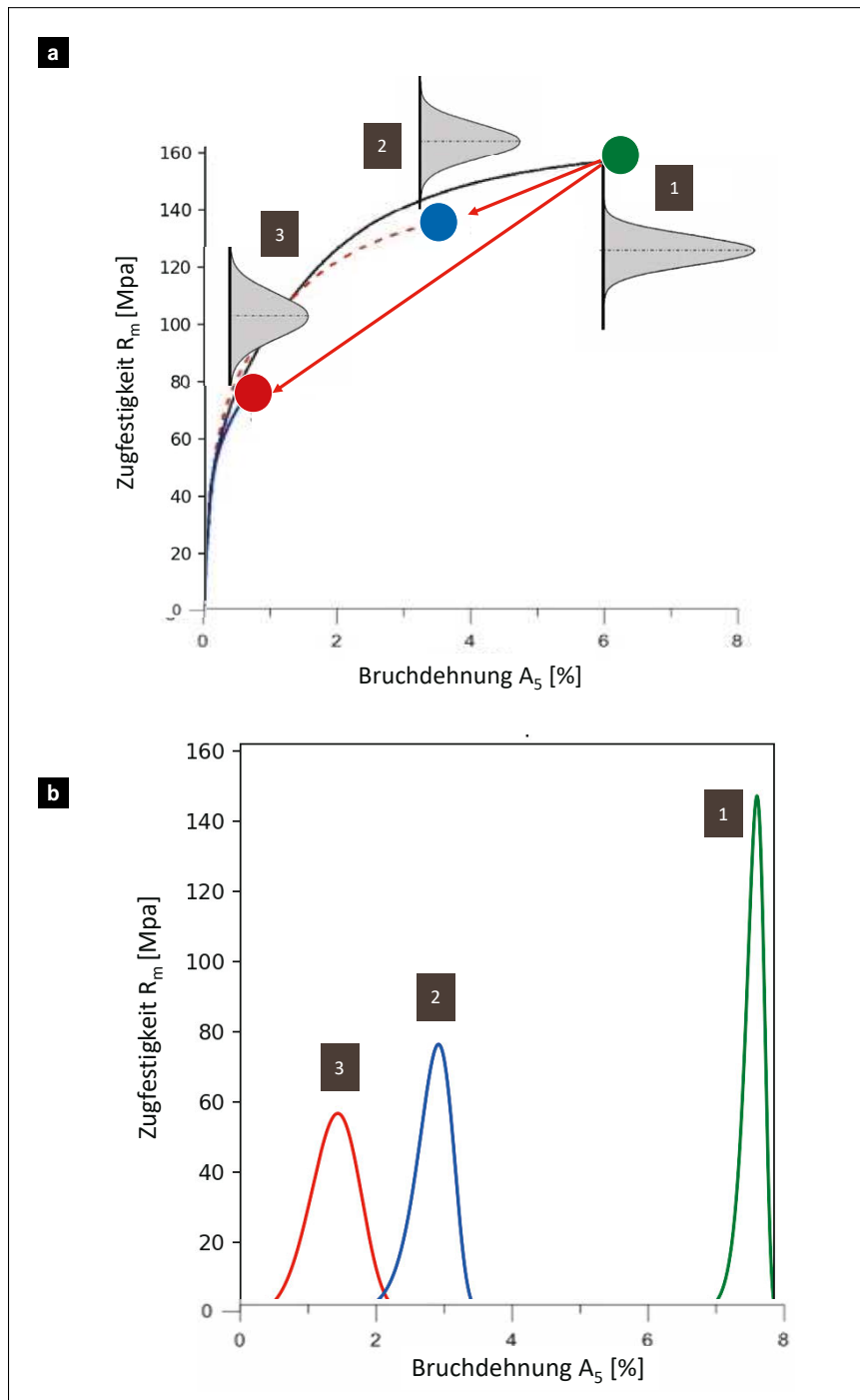


Bild 3: a) Berechnung der totalen Festigkeit aufgrund der ermittelten Fehlerverteilung für drei unterschiedliche Orte im Bauteil. b) Mithilfe der vorgegebenen Prozessvariabilität kann für jeden Ort im Gussteil eine Wahrscheinlichkeitsfunktion für die erwarteten mechanischen Eigenschaften ermittelt werden.

- > statistische Auswertung der ermittelten Spannungs-Dehnungskurven für einen beliebigen Bereich oder eine Zone mit speziellen Lastfall- oder Qualitätsanforderungen,
- > Ermittlung von Verteilungsfunktionen und minimal erwarteten Eigenschaften für jeden Bereich.

Die in der Software integrierte Methodik hat den folgenden Ablauf:

- > Der Nutzer definiert zunächst den für den jeweiligen Entwicklungsstatus be-

kannten Stand der Teilegeometrie, des Werkzeugdesigns und der Prozessbedingungen sowie die normalen Eingaben für die Gefügesimulation wie Legierungszusammensetzung und erwartete Metallurgie. Dies sind die üblichen Eingabeinformationen für jede Simulation (s. Bild 2, Schritt 1). Darüber hinaus legt er eine Verteilungsfunktion für die erwartete Prozessvariabilität fest, die aus praktischen Erfahrungswerten früherer oder ähnlicher Projekte ermittelt werden kann.

> Mit diesen Informationen wird eine einzelne Prozesssimulation durchgeführt, die abhängig vom Kenntnisstand, so detailliert wie aktuell möglich erfolgen sollte (s. Bild 2, Schritt 2). Mit der integrierten Gefügesimulation (s. Bild 2, Schritt 3) werden neben den klassischen, bekannten Ergebnissen lokale Gefügeverteilungen für den Werkstoff berechnet (s. Bild 2, Schritt 4). Sie sind die Grundlage für die Ermittlung der lokalen mechanischen Eigenschaften und entsprechender idealer Spannungs-Dehnungskurven für das jeweilig berechnete Gefüge (s. Bild 2, Schritt 5).

> Parallel dazu berechnet die Software die erwarteten unterschiedlichen Fehler für das ganze Bauteil (s. Bild 2, Schritt 6). Dies betrifft im Druckguss speziell Verteilungen der Schwindungsporosität und der Lufteinschlüsse. Es kann aber auch jedes andere berechnete Kriterium (z. B. für Oxidverteilung, Kaltlauf- oder Rissneigung) genutzt werden. Für jede dieser Fehlerkriterien kann eine statistische Bewertung über eine große Anzahl von Zellen durchgeführt werden, um das Problem der Abweichungen von diskreten Werten zu vermeiden. Der Mittelwert der Fehlerverteilung wird für den jeweiligen Bereich mit einer Abschlagsfunktion, die für jedes Fehlerkriterium unterschiedlich sein kann, mit den zuvor berechneten lokalen Spannungs-Dehnungskurven verknüpft (s. Bild 2, Schritt 7). Dies führt für jede einzelne Kurve zu einer Reduzierung der idealen Kurve auf den erwarteten fehlerbehafteten Wert (s. Bild 2, Schritt 8) und damit zu der erwarteten Verteilung der totalen Festigkeit in jeder berechneten Zelle (Bild 3a). Mit der zuvor definierten Prozessvariabilität liegt jetzt für jede berechnete Zelle im Gussteil eine Spannungs-Dehnungskurve mit einer entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilung vor (Bild 3b).

Mit diesen Informationen kann jetzt in der Software weiter klassische Statistik für die Eigenschaftsverteilung im Gussteil durchgeführt werden. Der Anwender kann entscheiden, welche Bereiche des Gussteils oder welche Datenmengen er für die Auswertung heranzieht. Die Software ermittelt für vordefinierte Auswertebereiche im Bauteil automatisch die Verteilung über alle berechneten Eigenschaften und ihre Wahrscheinlichkeiten. Dies kann wie eine extrem große Anzahl von Zugversuchen aus dem Bauteil, jeweils abgesichert durch eine virtuelle Versuchsstreuung, verstanden werden (s. Bild 3b). Das erlaubt auch die Durchführung von Weibullanalysen, die für die definierten Zonen Verteilungsfunktionen und Erwar-

tungswerte für die minimal erwarteten Eigenschaften in dem jeweiligen Bereich darstellen. Die Ausgabe ist eine Reihe von erwarteten minimalen mechanischen Eigenschaften und die zu erwartende Verteilung für jeden Auswertebereich sowie deren Streuung (Streckgrenze $R_{p0,2}$, Zugfestigkeit R_m , Dehnung $A5$).

Anwendung im Entwicklungsprozess

Ermittlung der Designfähigkeit

Die Methodik wird mit Magmasoft am Beispiel eines druckgegossenen Getriegehäuses angewendet. Um den Anforderungen des kleinen Zeitfensters im Entwicklungsprozess für die Ermittlung einer „Designfähigkeit“ gerecht zu werden, wird eine Prozesssimulation für ein einzelnes Design durchgeführt. Dies ist je nach Teilkomplexität in wenigen Stunden möglich.

Nach der üblichen Definition von Gießtechnik, Werkzeug und den Prozessbedingungen (Bild 4), wird das Gussteil zusätzlich und automatisch in sogenannte Auswertebereiche (Evaluation Areas EA) zur statistischen Bewertung der berechneten Fehler unterteilt. Die Größe der Auswertebereiche und die entsprechende Anzahl der Zellen kann vom Anwender frei festgelegt werden. Typischerweise stehen in jedem Auswertebereich mehrere tausend Zellen für die statistische Bewertung der berechneten Fehler zur Verfügung. Für die Ausgabe der erwarteten mecha-

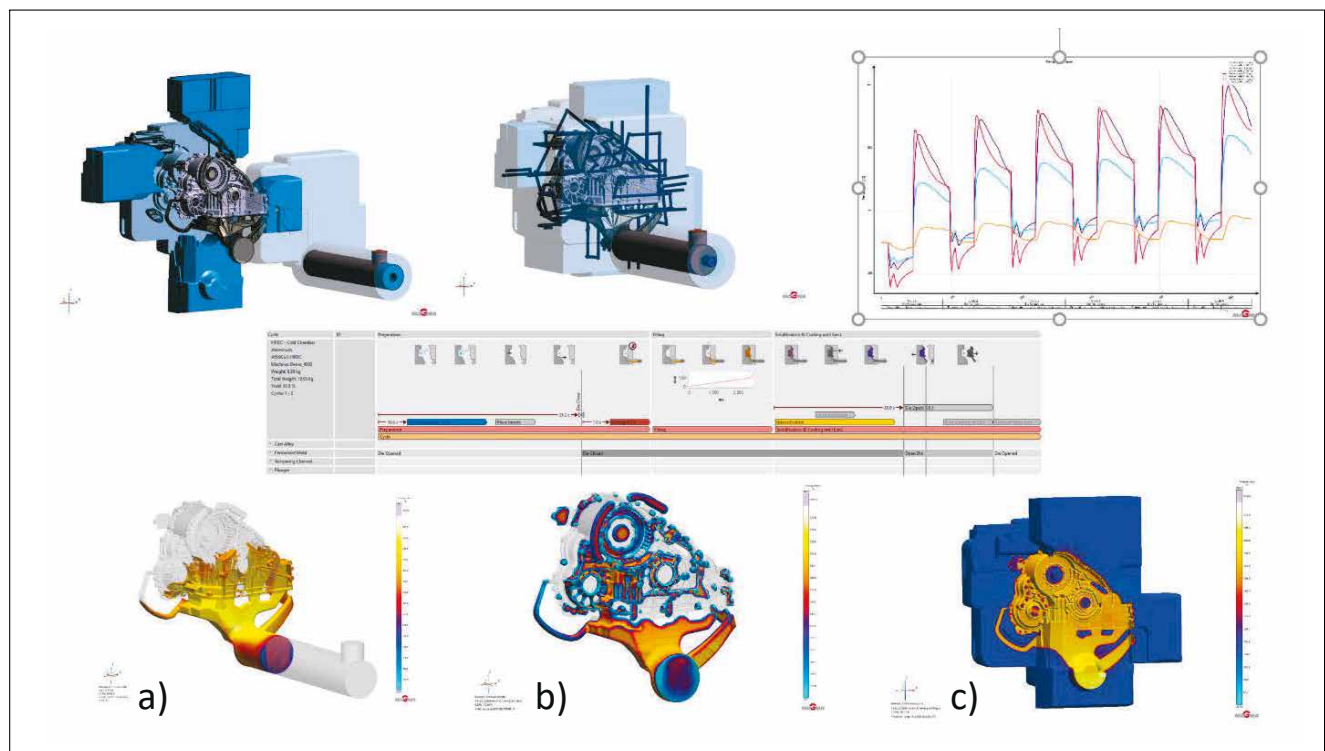
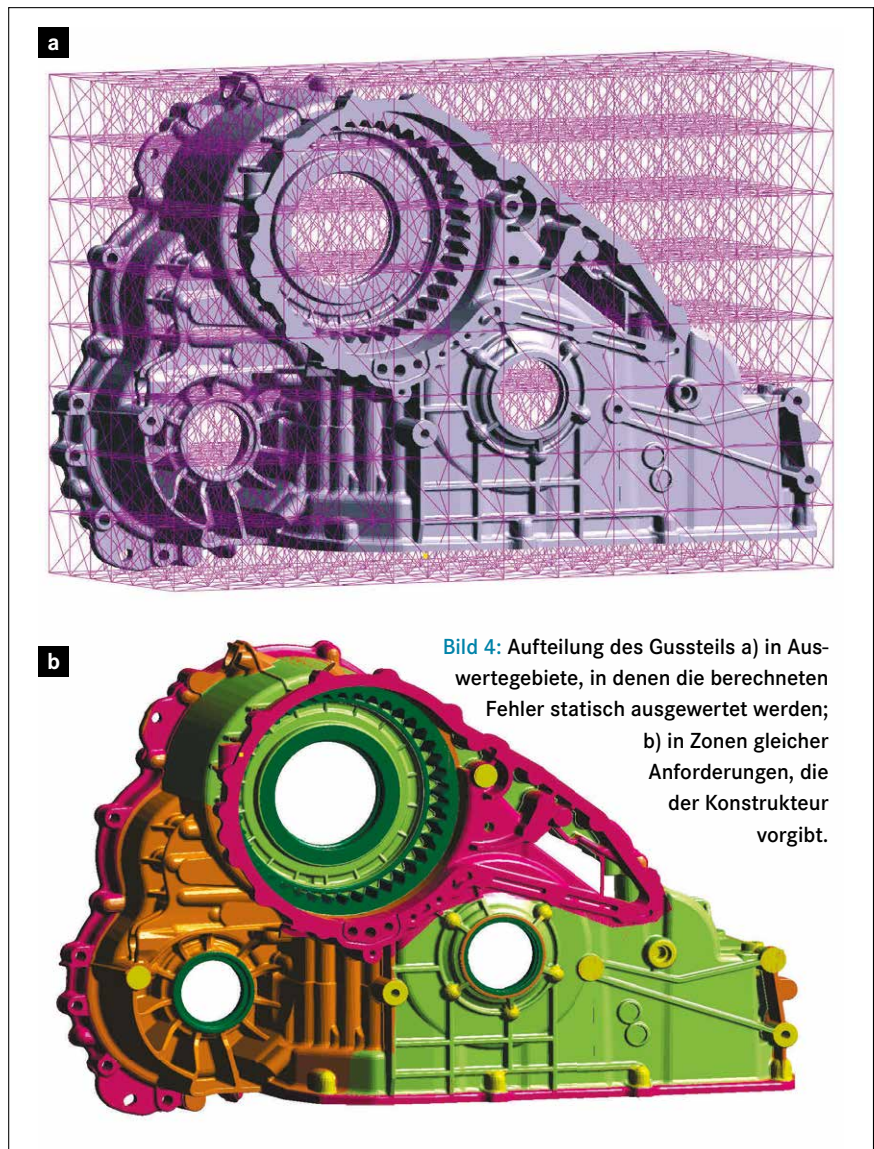


Bild 5: Die klassischen Ergebnisse der Gießprozess-Simulation für das Druckgießen: a) Formfüllung, b) Erstarrung und c) Formtemperaturen sind die Basis für die probabilistische Modellierung von Gefügen und Eigenschaften.

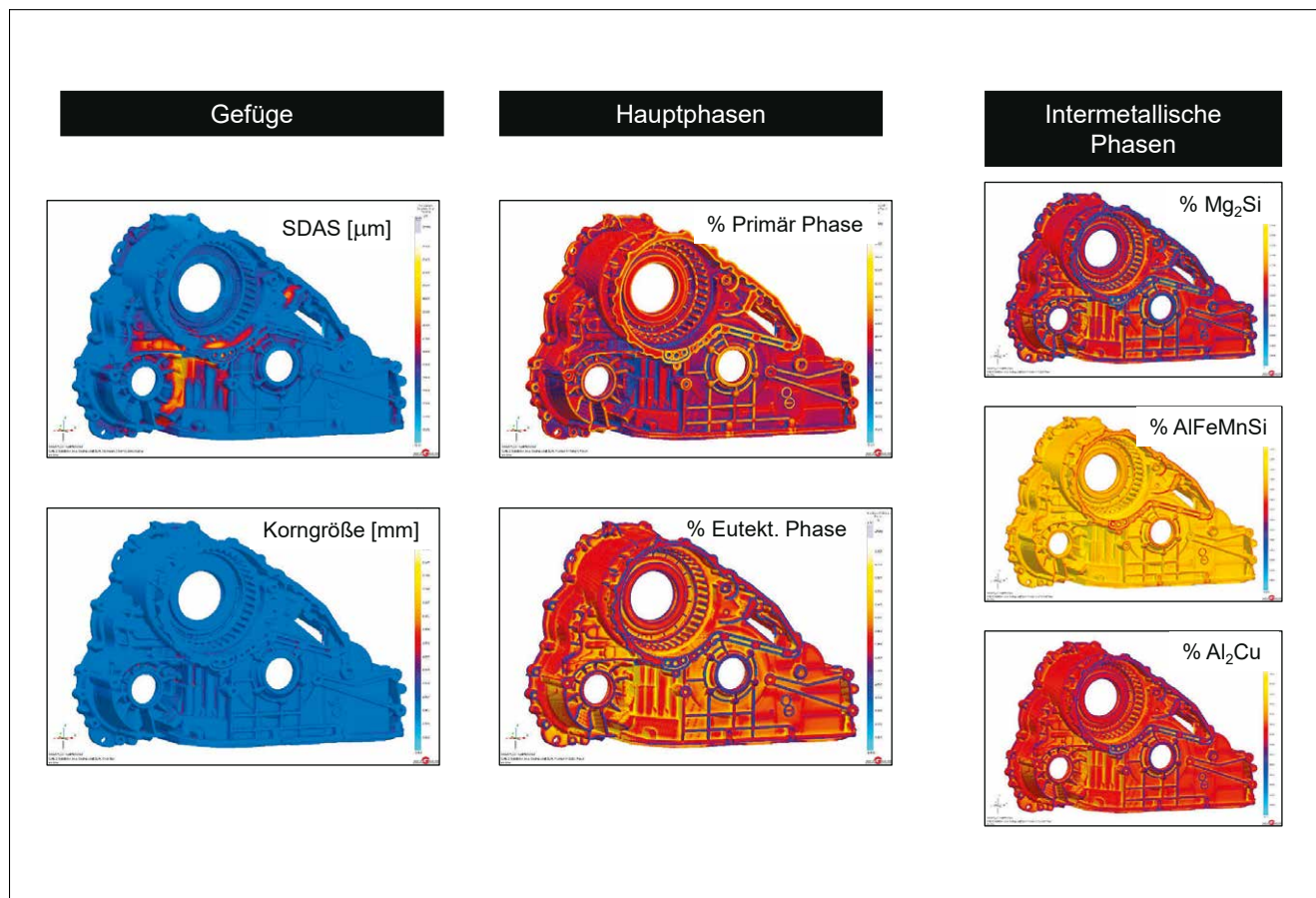


Bild 6: Ergebnisse aus der Gefügesimulation. Neben quantitativen Verteilungen von Gefügemerkmalen werden auch Phasenanteile und die Menge an (teilweise schädlichen) intermetallischen Phasen berechnet.

nischen Eigenschaften und ihrer Verteilungen wird das Gussteil zusätzlich in die vorgegebenen Zonen unterschiedlicher Anforderungen unterteilt.

Die Prozesssimulation ist gegenüber dem bekannten Ablauf weitgehend unverändert. Zusätzliche Informationen betreffen die Definition der Legierungszusammensetzung und metallurgische Parameter für die Impfung und Veredelung, die die integrierte Gefügesimulation nutzt. Außerdem wird der bereits vorgestellte neue probabilistische Parameter für die Prozessvariabilität festgelegt. Primäre Ergebnisse aus Zyklusrechnung, Formfüllung und Erstarrung sind alle bekannten Kriterien (Bild 5). Zusätzlich werden aus der integrierten Gefügesimulation Gefüge- und Phasenverteilungen sowie intermetallische Phasen berechnet (Bild 6). Diese Informationen sind die Basis für die Ermittlung der lokalen idealen Spannungs-Dehnungskurven (Bild 7).

Die gleichzeitig berechneten Fehlerverteilungen im Gussteil (hier für eingeschlossene Luft und Schwindungsporosität) werden in den festgelegten Auswertebereichen statistisch ausgewertet (Bild 8). Der mit dem jeweiligen Abschlagsfaktor ermittelte Schädigungswert wird auf die idealen Spannungs-Dehnungskurven in jeder Zel-

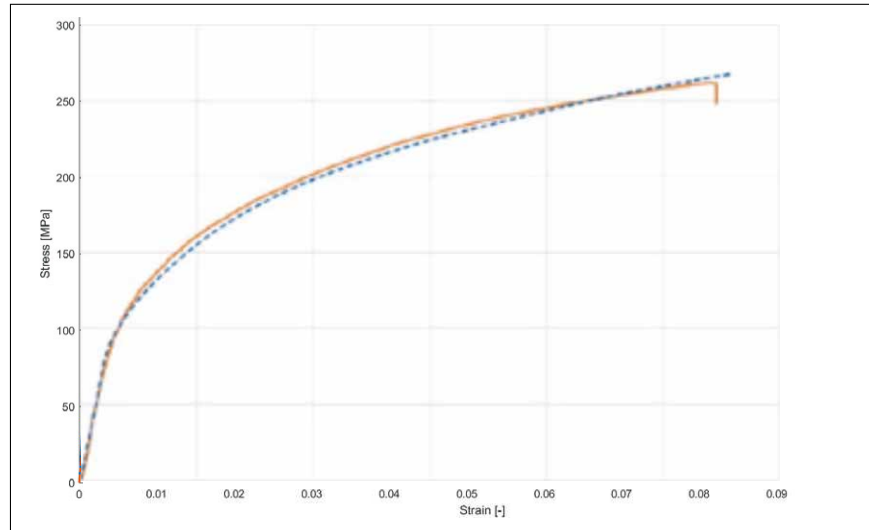


Bild 7: Vergleich von berechneter idealer Spannungs-Dehnungskurve der Matrix aus der Gefügesimulation mit realen Messungen an einem Punkt im Gussteil.

le angewendet und vermindert damit die lokale Zugfestigkeit und Dehnung entsprechend. Daraus ergeben sich Eigenschaftsverteilungen für Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung (Bild 9).

Die ermittelten Daten aus allen Zellen werden für die Bewertung in den definierten Zonen in einer Weibull-Analyse statistisch ausgewertet. Dies ermöglicht die quantitative Bewertung der Designfähigkeit des Bauteils (Bild 10). Bild 11 zeigt

in einem Überblick beispielhaft die Eigenschaftsverteilungen in den einzelnen Zonen und die für jede Zone ermittelten Spannungs-Dehnungskurven mit den entsprechenden Wahrscheinlichkeits-Dichteverteilungen.

Ermittlung der Prozessfähigkeit

In einer späteren Phase des Produktentwicklungsprozesses von Getrieben muss die Gießerei, die den Auftrag erhält, den

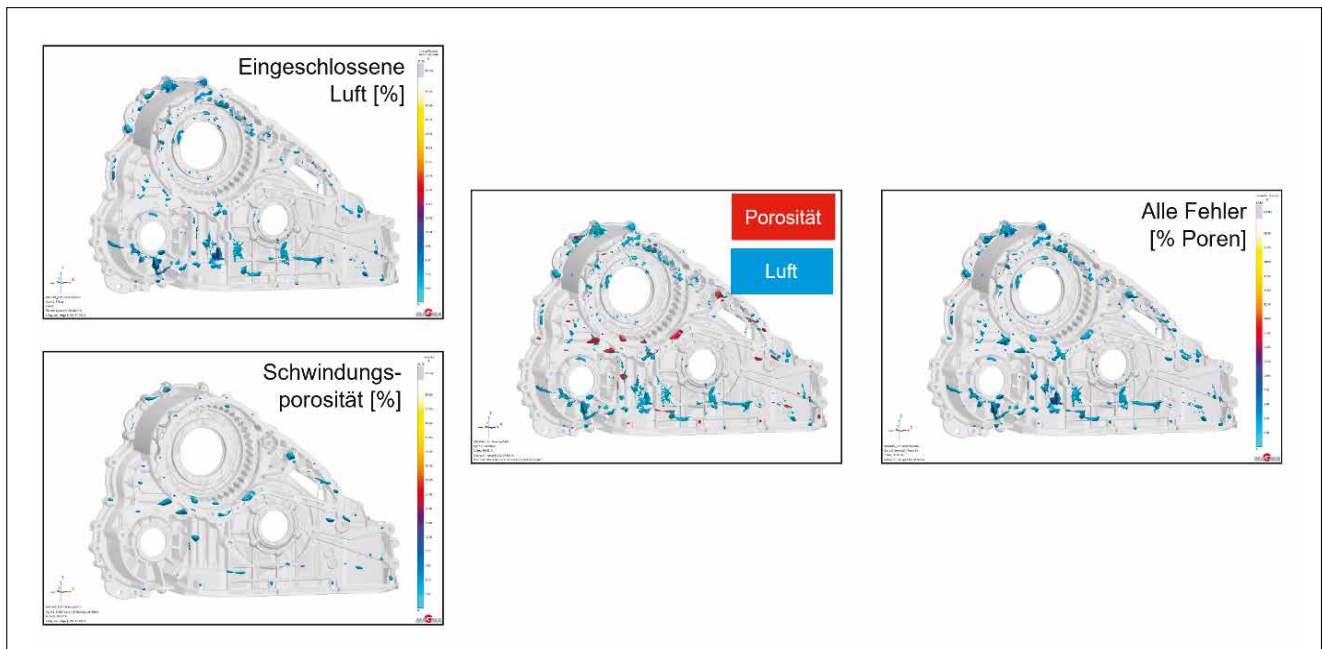


Bild 8: Bewertung unterschiedlicher Fehler für das Getriebegehäuse, hier Porosität und Lufteinschlüsse.

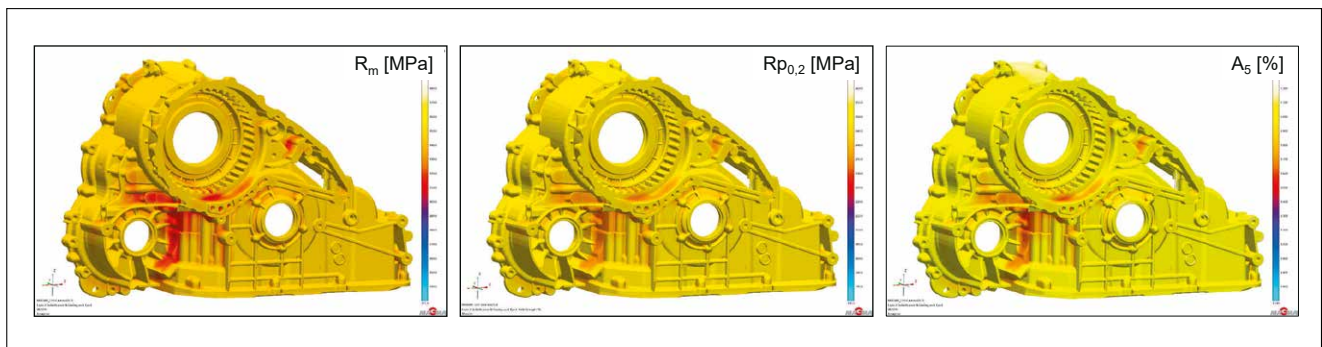


Bild 9: Durch die Methodik berechnete Festigkeitsverteilungen im Gussteil.

Gießprozess im Detail auslegen. Das Hauptziel dabei ist es, ein Guss- und Anschnittlayout sowie Prozessbedingungen zu verwenden, die robuste Betriebsbedingungen und ein robustes Prozessfenster bieten, das die unvermeidlichen Prozessschwankungen zu akzeptablen Kosten bewältigen kann. Da kein Gussstück fehlerfrei ist, ist die Kontrolle von Fehlern und deren Auswirkungen auf die spezifizierten Qualitätsniveaus (bei den endgültigen mechanischen Eigenschaften) von größter Bedeutung.

Die angewandte Methodik (Bild 12) ist im Prinzip die gleiche wie bei der Bewertung der Designfähigkeit der Gusskonstruktion (s. Bild 12 c, (2)–(8)). Anstatt eine Prozesssimulation für einen einzigen Betriebspunkt zu definieren und auszuführen, variiert die Gießerei nun das Teile- und Werkzeugdesign (Beispiel: verschiedene Anschnittkonzepte oder Kühlungslayouts) und das Prozessfenster mit mehreren Eingangsvariablen (Beispiel: variierte Füllbedingungen wie 1st-Phasengeschwindigkeit, Beschleunigung und Umschaltpunkt). Außerdem

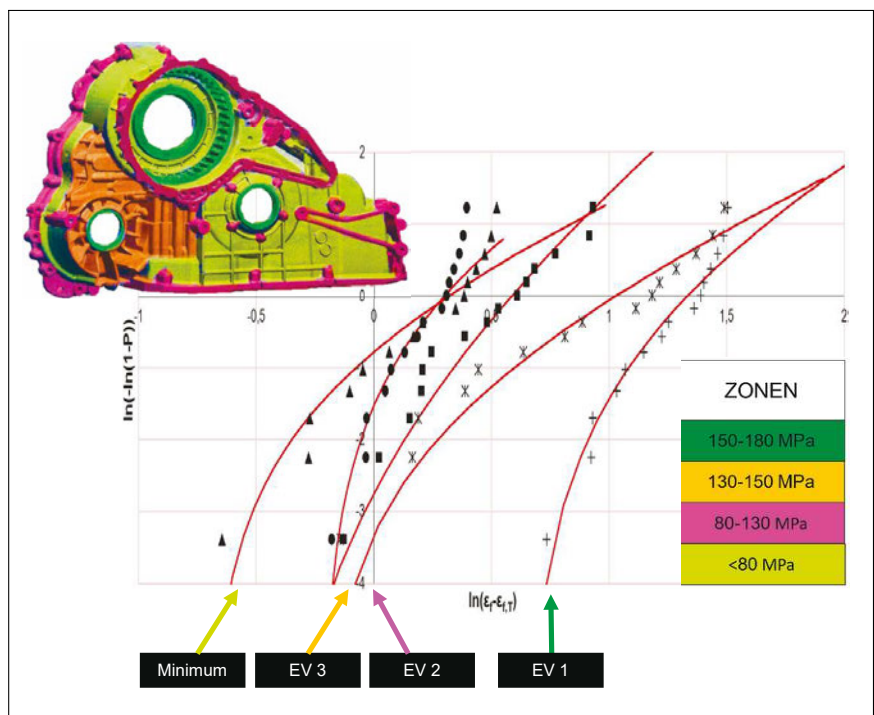


Bild 10: Statistische Auswertung der Eigenschaften in unterschiedlichen Zonen durch eine Weibull-Analyse der berechneten Werte. Die Kurven zeigen, dass die Ergebnisse den statistisch erwarteten Verteilungen folgen. Gleichzeitig kann aus den Ergebnissen auf die minimal erwarteten Eigenschaften in jedem Bereich geschlossen werden.

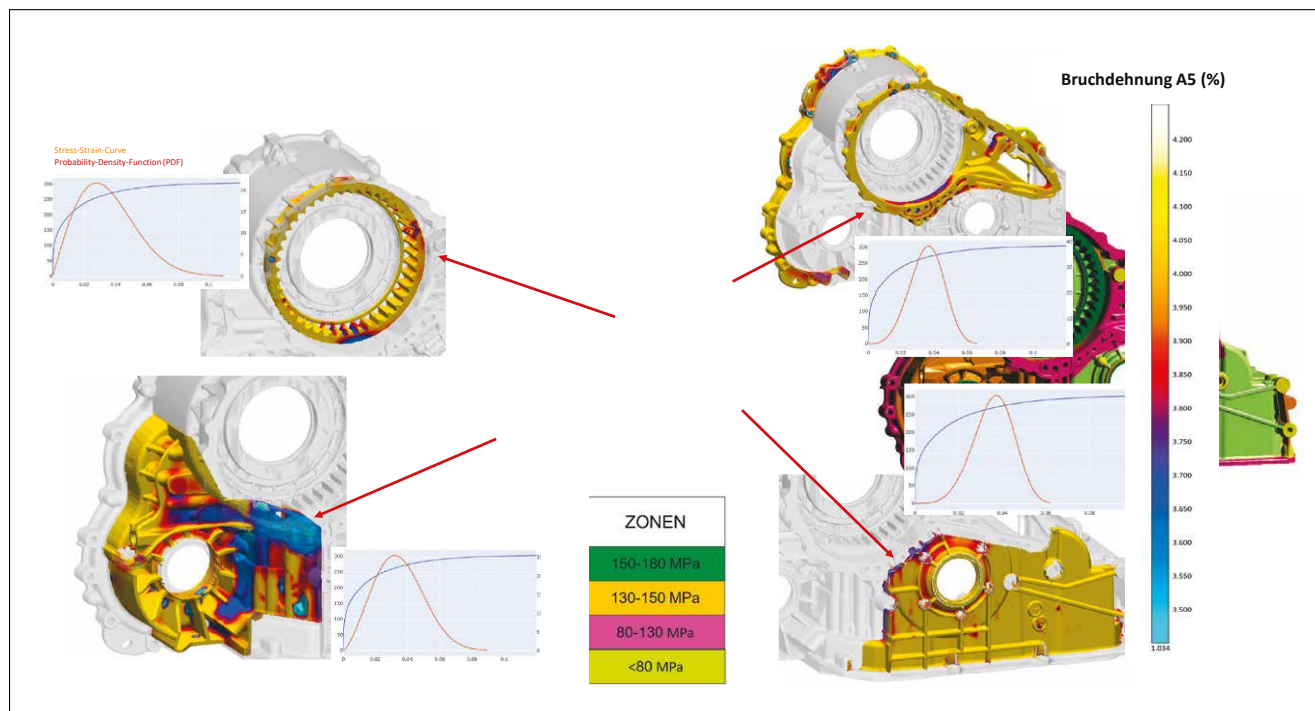


Bild 11: Anwendung der Methodik auf verschiedene Zonen im Gussteil mit unterschiedlichen Anforderungen. Die Kurven stellen die erwartete Spannungs-Dehnungskurve und die erwarteten Verteilungen der mechanischen Eigenschaften im statistischen Mittel der jeweiligen Zone dar.

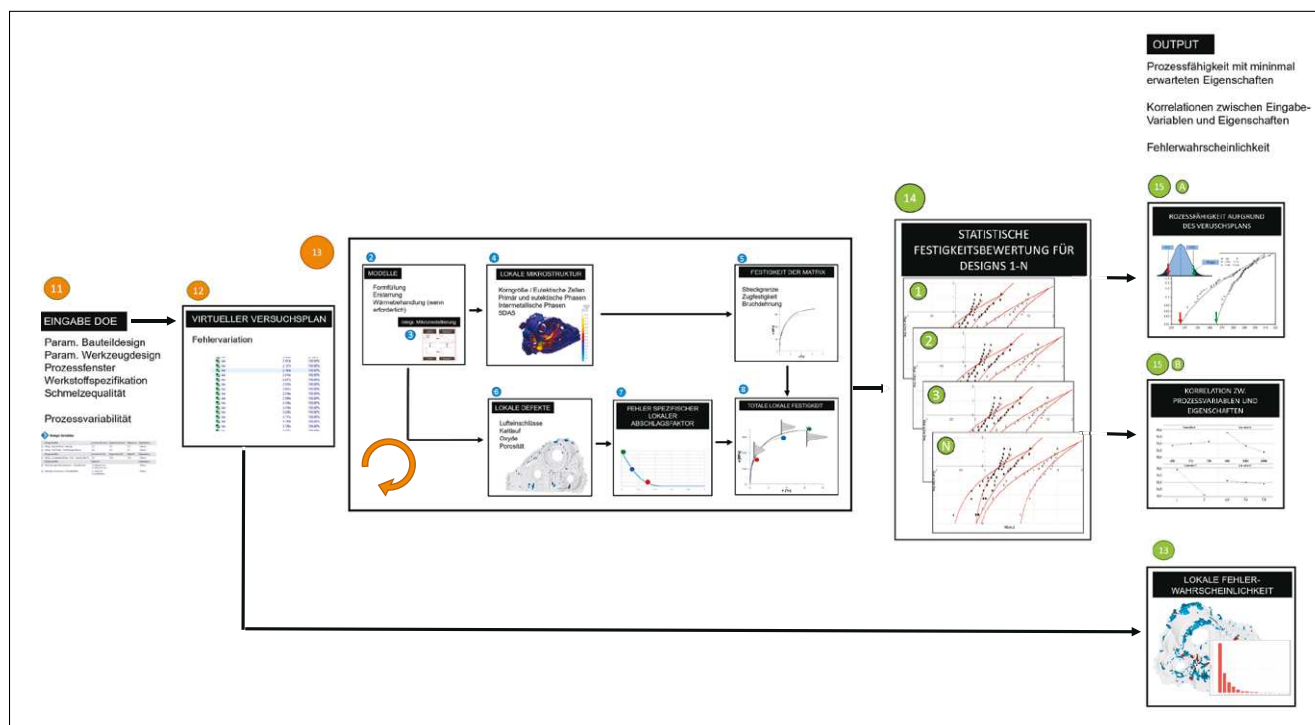


Bild 12: Ablaufschaubild des Gesamtprozesses zur Ermittlung einer „Prozessfähigkeit“. Dabei wird die Methodik anstelle einer einzelnen Simulation durch einen virtuellen Versuchsplan in MagmaSoft ergänzt, in dem beliebige Prozessparameter systematisch untersucht und bewertet werden.

kann sie Prozessstreuungen (z. B. Auswirkungen von Betriebspausen auf die Teilequalität) berücksichtigen, um die Eingangsdaten für die DoE zu definieren (s. Bild 12a). Je nach Anzahl der zu variierenden Eingangsparameter werden mehrere Prozesssimulationen automatisch und ohne menschliche Interaktion durchgeführt (s. Bild 12b), um ein ganzes Prozessfenster zu untersuchen.

Die statistische Auswertung (**Bild 13**) erfolgt ähnlich wie zuvor für den Anwendungsfall „Designfähigkeit“ beschrieben. Durch die variierten Prozessbedingungen können jetzt zusätzlich das untersuchte Prozessfenster und dessen Prozessfähigkeit in Bezug auf die erwarteten Eigenschaften bewertet werden. Die in Magmasoft integrierten Auswertewerkzeuge erlauben auch die Untersuchung einzelner

Prozessvariablen auf die erwarteten Eigenschaften und die statistische Untersuchung von Fehlern im Prozessfenster.

Diskussion

Die vorgestellten Möglichkeiten zur probabilistischen Modellierung von Eigenschaften, kombiniert mit den deterministischen Modellen der Prozesssimulation,

bieten ganz neue Ansätze zur Absicherung von gegossenen Bauteildesigns und der gewählten Prozessbedingungen. Die Ergebnisse entsprechen der Realität des Verfahrens, in dem viele Variablen gut vorhergesagt werden können, das aber auch prozessbedingte Schwankungen beherrschen muss, die nicht gut in Modellen beschrieben werden können. Dies gilt insbesondere für die stochastische Fehlerverteilung, die aus der Metallurgie und Schmelzebehandlung sowie dem Gießprozess selbst resultiert.

Die Integration der Stochastik in die Gießprozesssimulation hat darüber hinaus den Vorteil, unterschiedlich berechnete Fehler und ihren Einfluss auf die Eigenschaften im Gussteil separat und integral zu berücksichtigen. Eigenschaftsverteilungen und minimale Erwartungswerte können über das ganze Gussteil für beliebige Bereiche oder Zonen bewertet werden. Hierdurch wird insbesondere die Auslegung von innovativen gegossenen Neuteilen, speziell Strukturbauteilen, für die noch keine großen Erfahrungen vorliegen und das Fertigungs- und Kostenrisiko sehr hoch ist (z. B. Giga-Castings), unterstützt. Durch die schnellen Berechnungszeiten einer einzelnen Simulation können die Informationen frühzeitig im Entwicklungsprozess neuer gegossener Bauteile genutzt werden. Der Aufwand des Anwenders bleibt durch die Automatisierung der Berechnungen und der Auswertung in der Software gleich. Wenn Werkzeug und Prozess ausgelegt werden, bietet die Kombination mit virtuellen Versuchsplänen eine systematische Möglichkeit, die Gießtechnik oder das Prozessfenster nicht nur in Bezug auf Fehlervermeidung zu optimieren, sondern auch den Einfluss auf die geforderten Eigenschaften zu untersuchen.

Das Konzept, mit der Simulation viele Zugversuche virtuell durchzuführen, ermöglicht die statistische Bewertung großer Datenmengen. Dies ist ein entscheidender Vorteil gegenüber realen Versuchen, die oft wiederholt werden müssen, um sichere Aussagen zu gewährleisten. Natürlich hat auch die neue Methodik Grenzen: Die Qualität der Ergebnisse und deren Bewertungen sind abhängig von der Kenntnis und Genauigkeit der definierten Eingabewerte für den simulierten Prozess. Je besser die verwendeten Modelle in der Lage sind, speziell versagensverantwortliche Fehler im Gussteil vorherzusagen, desto genauer werden die Aussagen zu den erwarteten Eigenschaften. Auch hier macht die Nutzung der Stochastik die Ergebnisse und damit ihre Anwendung zur Bauteilauslegung und Prozessbeherrschung sicherer.

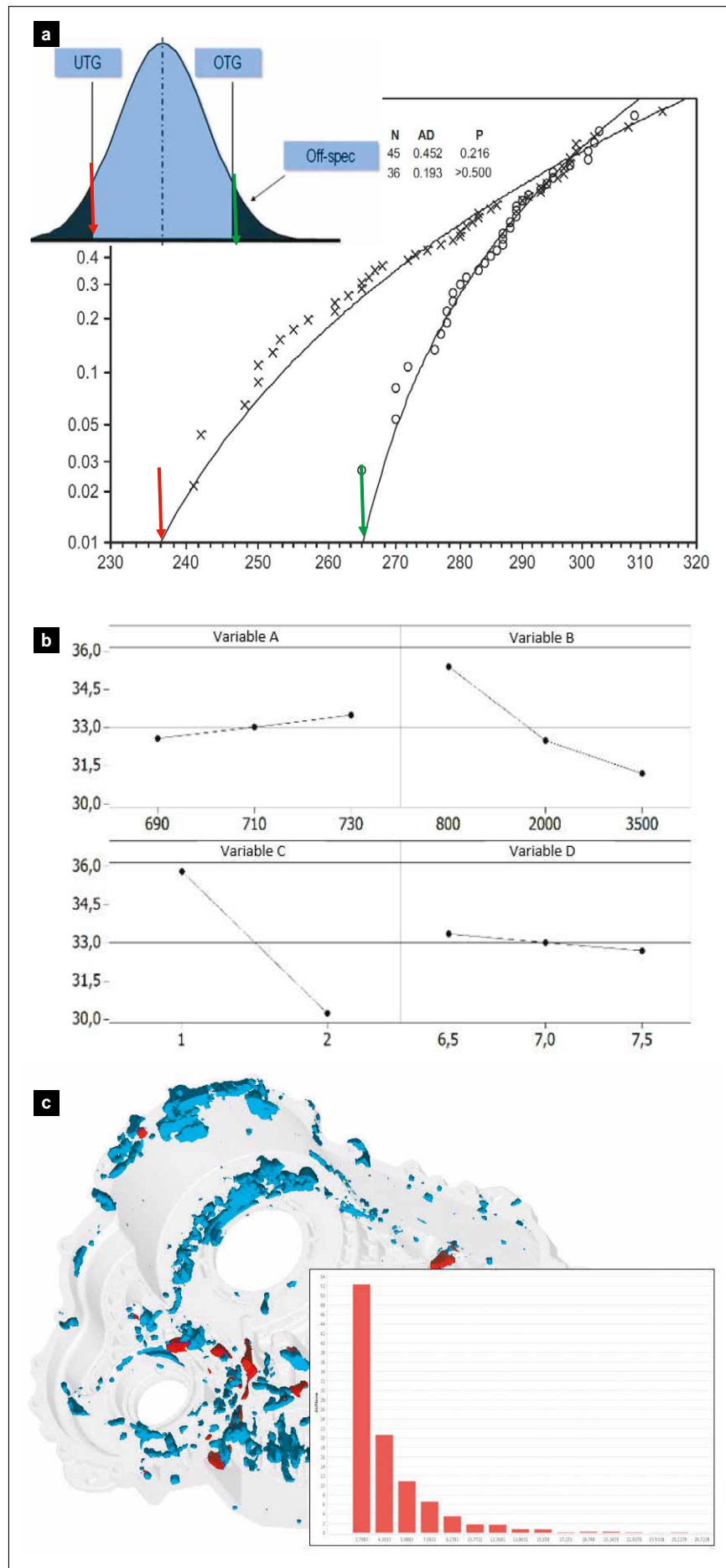


Bild 13: Wesentliche zusätzliche Ergebnisse der Methodik „Prozessfähigkeit“: Erwartete „Prozessfähigkeit“ aufgrund a) des untersuchten virtuellen Versuchsplans, b) unterschiedlicher Korrelationen zwischen Prozessvariablen und den erwarteten Eigenschaften sowie c) der Verteilung der berechneten Fehler im Gussteil.

Zusammenfassung und Ausblick

40 Jahre nach Einführung der Gießprozesssimulation ist die Kombination der bekannten Fähigkeiten deterministischer Modelle mit probabilistischen Methoden eine wichtige Innovation für die Prognosefähigkeit für Gussteildesigns und Gießprozesse. Die hier vorgestellte zum Patent angemeldete neue Methodik ist nicht auf das Druckgießen beschränkt [3]. Sie ist mit Adaptionen für alle Gießverfahren und Werkstoffe anwendbar. Die Methodik ist noch in der Entwicklung und bedarf weiterer Untersuchungen – insbesondere im realen Versuchsfeld. Hierzu laufen derzeit mehrere industrielle Projekte mit Anwendern sowohl mit OEMs als auch mit Gießereien.

Heute redet jeder über die Nutzung von „big data“ und die Anwendung von KI zur Ermittlung von Korrelationen zur Beherrschung von Prozessen. Gerade in der Gießerei ist die Erfassung von großen Datenmengen eine Herausforderung. Dies liegt an der langen Entwicklungskette und den vielen Einflussnehmern auf Entscheidungen. Viele Einflussgrößen sind nur indirekt messbar und lassen sich nicht regeln. Des Weiteren gibt es eine große Anzahl qualitäts-

beeinflussender Faktoren. Die Daten können im Wesentlichen erst in der Produktion ermittelt werden. Alle kostenrelevanten Entscheidungen sind dann bereits getroffen. Die Gießprozesssimulation unterliegt nicht diesen Restriktionen. Wesentliche Informationen und entsprechende Daten können bereits im Designstadium und vor Produktionsbeginn erzeugt werden. Dies bietet die Chance, die Ideen von KI auch mit Daten des digitalen Zwillings von realen Messungen anzuwenden. Probabilistisches Modellieren entspricht damit auch der Lebenswelt und den Erfahrungen des Gießers, der in Termini wie Prozessvariabilität, Ausschussraten und Eigenschaftsstreuungen denkt. Damit bietet diese Methodik das Potenzial, die Akzeptanz in die Simulationsergebnisse bei Nutzung der aktuell verfügbaren Modelle weiter signifikant zu verbessern.

Die hier vorgestellte Methodik ermöglicht, diese Herausforderungen im virtuellen Raum anzugehen und trägt damit zu einer abgesicherten Bauteilauslegung und robuster Prozessbeherrschung bei. Das Ziel ist nicht, den Ort der einzelnen Pore zu 100 % vorherzusagen. Das Ziel ist, dem Anwender die verlässliche Antwort zu liefern, mit welcher Wahrscheinlichkeit er sein Gussteil sicher auslegen oder fertigen kann.

www.magma-soft.de

Dr.-Ing. Horst Bramann, MAGMA Gießertechnologie GmbH, Aachen; Associate Prof. Dr. Jakob Olofsson, Jönköping University und Simonorus AB, Jönköping, Schweden; Dr.-Ing. Jörg C. Sturm, Beratender Ingenieur, Aachen

Literatur:

- [1] H. Bramann, Jakob Olofsson und J. C. Sturm: *Abgesicherte Gussteilauslegung und -fertigung durch probabilistisches Modellieren der Eigenschaften Teil 1, Giesserei 111 (2024), [Nr. 06], S. 50-56.*
- [2] Magma-soft (MAGMASOFT®) ist ein weltweit geschütztes Warenzeichen der MAGMA Gießertechnologie GmbH, Aachen.
- [3] *European Patent application EP23175003.5 „Integrated Virtual Product and Process Design for Casting Components“, applied 24 May 2023, published 6.12.2023*
- [4] J. Olofsson, T. Bognanoff, M. Tiryakioglu, H. Bramann, J.C. Sturm: *“The effect of hidden damage on local process variability in Al-10%Si alloy high pressure die castings”, eingereicht in Material Science & Engineering A*