

Robuste und optimierte virtuelle Prozesskette für Feinguss

MAX PEYMANDAR, DANIEL SCHMIDT und JÖRG C. STURM

MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Kackertstrasse 11, 52072 Aachen, Germany
M.Peymandar@magmasoft.de, D.Schmidt@magmasoft.de, JC.Sturm@drflenderholding.de

Zusammenfassung

Feinguss hat sich in vielen Industriezweigen als wirtschaftlicher Weg zum Produzieren endabmessungsnaher Bauteile mit hoher geometrischer Komplexität und Maßgenauigkeit bewährt. Allerdings limitieren die Herstellungskosten und die Vorlaufzeiten während der Produktion die Wettbewerbsfähigkeit von Feinguss als bevorzugtes Herstellungsverfahren.

Die Prozess-Simulation ist das akzeptierte Werkzeug zur Vermeidung von Gießversuchen sowie zur Verbesserung der Gussqualität, wodurch die Produktionskosten und -zeiten erheblich gesenkt werden. Sie ermöglicht es den Ingenieuren, die technische Machbarkeit neuer Bauteile zu bewerten und den besten Kompromiss zwischen Gussqualität und Produktionskosten zu finden, und zwar bevor kostspielige physische Prototypen erstellt werden.

Anhand von realen industriellen Anwendungen gibt dieser Beitrag einen Überblick über neue Entwicklungen und demonstriert die aktuellen Möglichkeiten der Simulationssoftware MAGMASOFT®, die gesamte Prozesskette im Feinguss virtuell zu betrachten. Insbesondere wird der Nutzen von Autonomous Engineering für den Feingussprozess vorgestellt, einer neuen Methodik zur systematischen Untersuchung von Prozessfenstern durch virtuelle Versuchsplanung oder autonome Optimierung.

1. Einleitung

Feinguss ist eines der ältesten Fertigungsverfahren, um komplexe Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen endabmessungsnah herzustellen. Bedingt durch den wachsenden Bedarf verschiedener Industrien an Präzisionsbauteilen mit komplexen Geometrien hat sich die Technologie im Laufe der Zeit erheblich entwickelt. Die Vorteile, die das Gießverfahren bietet wie auch die Vielfalt der möglichen Produkte haben zu einem kontinuierlichen Wachstum der Feingussindustrie in den letzten Jahrzehnten geführt. Prozessingenieure in Feingießereien legen ihre Prozessbedingungen so aus, um die folgenden drei Hauptziele zu erfüllen:

- Die Herstellung fehlerfreier Gussteile entsprechend der Spezifikation,
- Kosteneinsparungen durch hohe Ausbringung zur Vermeidung von Ausschuss und Nacharbeit,
- die Realisierung eines robusten Prozessfensters von Anfang an.

Die Freiheit, eine optimale Anschnitt- und Speisungstechnik für das jeweilige Bauteil und den jeweiligen Werkstoff auszulegen, wird durch unterschiedliche verfahrenstechnische und wirtschaftliche Randbedingungen beeinträchtigt. Dies betrifft sowohl die Anforderung, die Wachstraube sicher zu manipulieren, begrenzte Freiheitsgrade beim Tauchen und Besanden sowie die Notwendigkeit, so viele Gussstücke wie möglich auf der Traube aufzubringen. Eine weitere Herausforderung ist, dass das Verfahren für fast alle Gusswerkstoffe genutzt werden kann, insbesondere auch für Legierungen, die hohe Schmelztemperaturen aufweisen oder die sich an Luft aggressiv verhalten. Daher werden zunehmend kompliziertere Teile aus schwieriger zu gießenden Legierungen im Feingussverfahren hergestellt.

Um den heutigen Anforderungen für die Herstellung hochkomplexer Feingussteile gerecht zu werden, ist ein umfassendes Verständnis des Werkstoffverhaltens und der Robustheit des Prozesses über den gesamten Produktionsweg erforderlich. Der Einsatz von Simulationsprogrammen zur Vorhersage des Gießprozesses und der daraus resultierenden Materialeigenschaften ist für Gießer zu einem Standardwerkzeug geworden, mit dem sich Fehler im Gussteil und daraus resultierende Eigenschaften für ein breites Spektrum von Gusslegierungen genau vorhersagen lassen. Feingießereien nutzen die Simulation seit vielen Jahren, um für ihre Konstruktionsentscheidungen und Prozesseinstellungen eine Absicherung (oder Informationen über den Änderungsbedarf) zu erhalten [1].

MAGMASOFT® [2] ermöglicht die Simulation und Optimierung des Feingussprozesses unter Berücksichtigung aller wesentlichen Prozessschritte und thermischen Randbedingungen. Die Software bietet spezielle Funktionen, um die Spezifikation des Prozesses nicht nur für die Teilschritte des Füllens und Erstarrens zu berücksichtigen. Die Vorhersage der lokalen Gefüge und daraus resultierender mechanischer Eigenschaften sowie die Vorhersage von Spannungen, Rissen und Verzug für das Teil im Gusszustand oder nach der Wärmebehandlung ermöglichen es, frühzeitig zuverlässige Konstruktionsentscheidungen zu treffen und ein robustes Prozessfenster zu erstellen, bevor reale Versuche durchgeführt werden (**Abb. 1**).

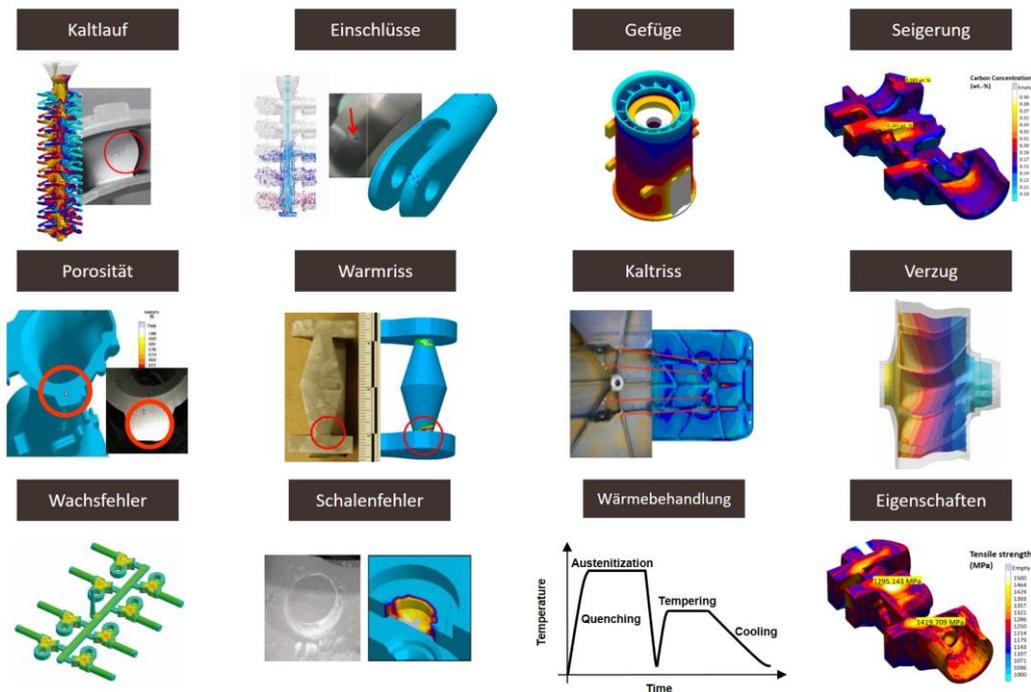


Abb. 1: Simulation und Vorhersage verschiedener Qualitätsprobleme im Feinguss.

In diesem Beitrag werden Grundlagen und wesentliche Einflussgrößen auf den Wärmefluss im Feingussverfahren erörtert. Die innovative Methode des „Autonomous Engineering“ nutzt die systematische Variation relevanter Prozess- oder Konstruktionsbedingungen in einer virtuellen Versuchsplanung.

Dies ermöglicht die Modellierung der Auswirkungen kritischer Parameter, wie z.B. unterschiedlicher Formschalenwerkstoffe, Änderungen des Modelldesigns oder des Gießsystems oder Prozessvarianten wie Gießzeiten und -temperaturen. Damit können die Auswirkungen der Variationen auf die daraus resultierenden Veränderungen unterschiedlichster Qualitätsmerkmale im Gussstück systematisch bewertet werden.

Die aus dieser Methodik für den Feinguss resultierenden Vorteile werden an verschiedenen industriellen Anwendungen dargestellt. Durch die Umsetzung dieser Entwicklungen erreichen Feingießereien für ihre Gießtechnik und Prozesseinstellungen ein ganz neues Niveau. Es ermöglicht ihnen, neue, robuste und optimierte Lösungen und zuverlässige Herstellungsverfahren zu realisieren, bevor die Produktion eines anspruchsvollen Gussteils beginnt.

2. Thermische Prozessanforderungen für Feinguss

Wird geschmolzenes Metall in eine vorgewärmte Feingusschale gegossen, kann die Erstarrung bereits während des Füllens beginnen. Das Ausmaß hängt von der Überhitzung der Schmelze, der Schalentemperatur sowie den thermophysikalischen Eigenschaften der Legierung ab. Sobald die Formfüllung abgeschlossen ist, wird die transiente Temperaturverteilung in der Schmelze durch Wärmeleitung und konvektiven Wärmetransport bestimmt. Die Wärme in der Schmelze wird durch das erstarrende Metall an die Form abgegeben. Gleichzeitig führt das Schwinden des Gussteils zu Spaltbildung und einem damit verbundenen Wärmewiderstand zur Formschale. Der daraus resultierende thermische Kontakt ausgedrückt als Wärmeübergangskoeffizient zwischen Gussstück und Form ist eine Funktion von Zeit und Druck, der Oberflächenspannung des flüssigen Metalls, der im Spalt ausgeschiedenen Gase sowie der Oberflächenrauheit der Feingusschale.

Abhängig von den Umgebungsbedingungen und dem Temperaturniveau an der Formschalenoberfläche wird die Wärme durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung weiter transportiert. Bei den meisten Feingussverfahren muss der Strahlungsaustausch zwischen verschiedenen Formoberflächen und der Umgebung als maßgeblicher Transportmechanismus berücksichtigt werden (**Abb. 2**) [3].

Um den Erstarrungsprozess präzise zu simulieren, sind zuverlässige und realitätsnahe Daten über die thermischen Eigenschaften der Feingusschale (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Dichte und Gasdurchlässigkeit) erforderlich (**Abb. 3**) [4].

Eine Feingusschale ist ein Verbund aus mehreren keramischen Bestandteilen, die verschiedene thermische Prozesse durchläuft (Trocknen, Aufheizen zur Entfernung des Wachsmodells, Sintern und Vorwärmen vor dem Abguss).

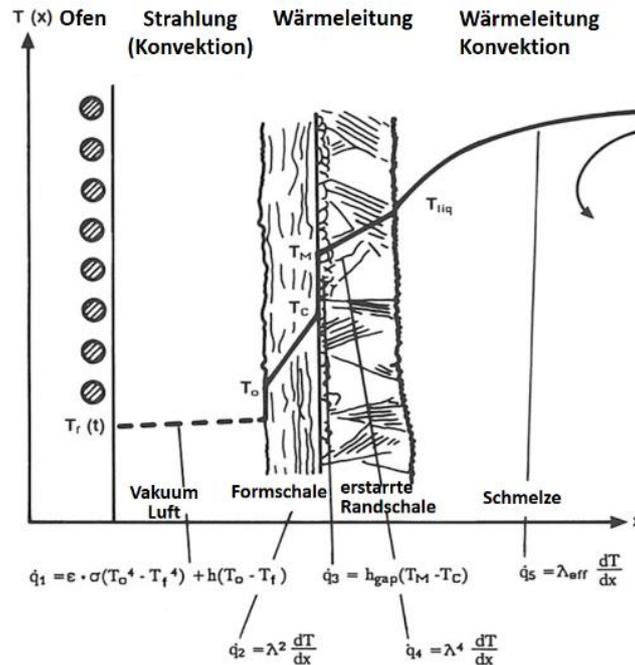


Abb. 2: Die wichtigsten Wärmetransportmechanismen im Feinguss [3].

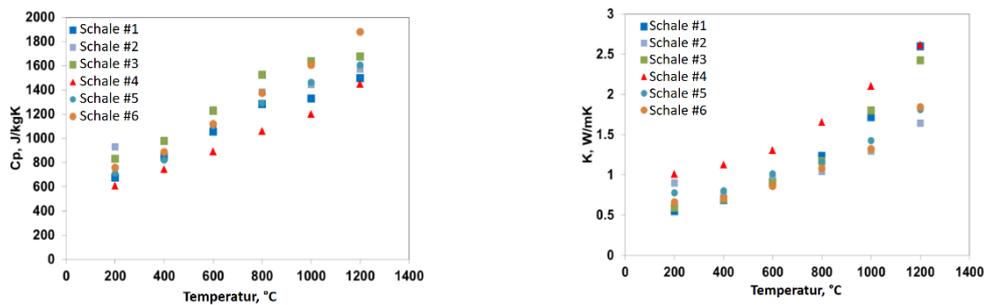


Abb. 3: Veränderung der thermophysikalischen Eigenschaften von Formschalen in Abhängigkeit der Temperatur für verschiedene Schalentypen, Wärmekapazität C_p (links) Wärmeleitfähigkeit K (rechts) [4].

2.1 Einfluss der Feingusschale auf den Wärmetransport

Voraussetzung für eine quantitative Vorhersage der Erstarrung und der daraus resultierenden Bauteilqualität mit Hilfe der Gießprozess-Simulation ist eine adäquate Berücksichtigung der keramischen Formschale als die gleichzeitig wesentliche Wärmesenke und thermische Barriere.

Dies bedeutet, dass neben den genauen thermophysikalischen Daten für das heterogene Schalenmaterial auch die lokale Dicke der Schale bekannt sein muss. Die lokale Schalendicke hängt von der Art der Beschichtung und der Besandung (Anzahl der Sandschichten, Korngröße und Rheologie des Schlickers) aber auch von der Teilegeometrie ab.

In inneren Konturen reichern sich sowohl der keramische Schlicker als auch der Sand an, während an Außenflächen und Ecken beides eher abgewaschen wird. Die daraus resultierende Schalendicke im Simulationsmodell kann als Funktion des lokalen Oberflächenwinkels betrachtet werden, wobei 180° als ebene Oberfläche angenommen wird (**Abb. 4**).

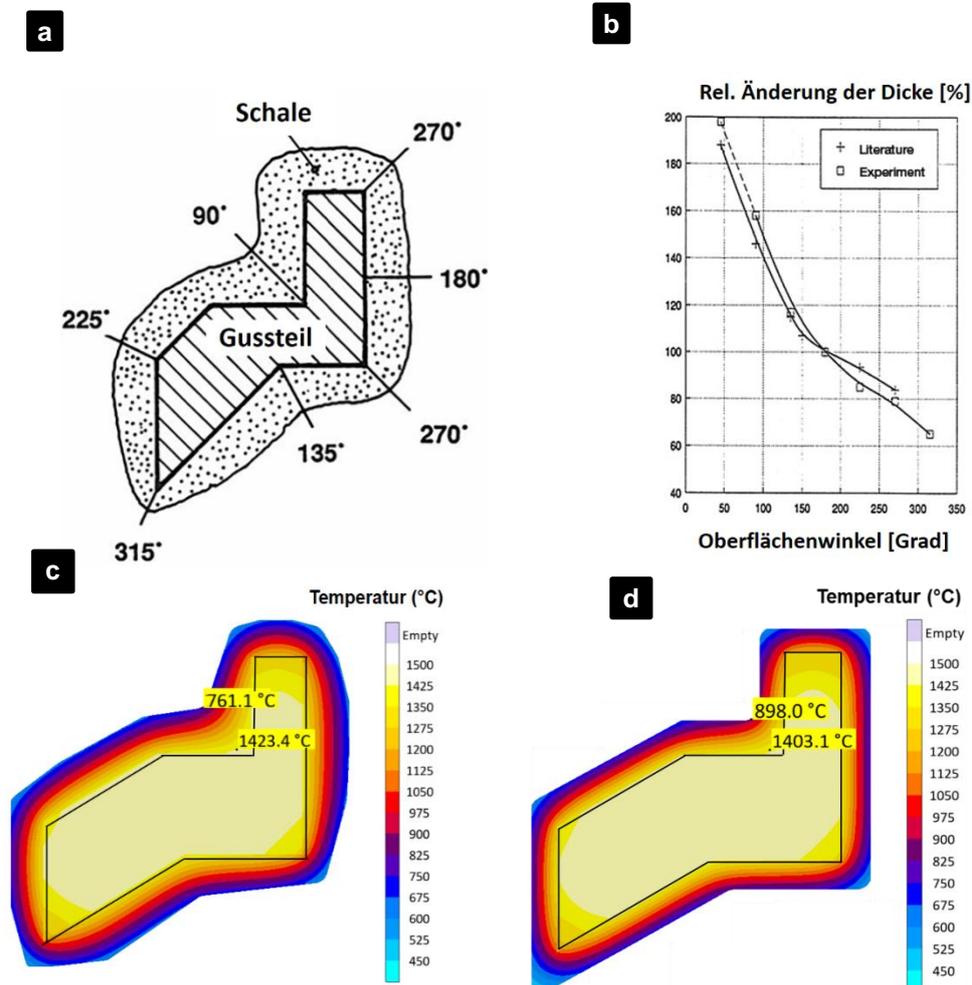


Abb. 4: Formschalendicke als Funktion der lokalen Oberflächenkontur und des Beschichtungsprozesses (a und b) [3]. Vergleich der simulierten Temperaturverteilung zwischen "realer" und einheitlicher Schalendicke zu einem bestimmten Zeitpunkt.

2.2 Berücksichtigung der Strahlung der Schale

Die gesamte Wärme, die durch die Formschale transportiert wird, muss weiter an die Umgebung abgegeben werden. Insofern wird die Abkühlung durch die Wärmeabgabe der Formschale bestimmt, die sich aus Strahlung, Wärmeleitung und Konvektion zusammensetzt. Beim Gießen unter Umgebungsbedingungen ist der Wärmetransport in der Luft durch Wärmeleitung und Konvektion jedoch aufgrund der linearen Beziehung zu den Temperaturunterschieden begrenzt. Strahlung ist daher in der Regel der vorherrschende Wärmeübertragungsmechanismus im Feingussverfahren.

Der Wärmestrom hängt vom Strahlungskoeffizienten der keramischen Oberfläche ab und steigt mit um die vierte Potenz mit der Temperaturdifferenz zwischen den Strahlungsflächen der vorgewärmten Form und der Umgebung. Im Falle des Gießens unter Vakuum ist Strahlung der einzige Transportmechanismus.

Die Wärmeabgabe hängt hauptsächlich von den lokalen Strahlungsbedingungen ab. Das bedeutet, dass die Wärmeabgabe bei Oberflächen mit freier Abstrahlung an die Umgebung größer ist als bei Oberflächen, bei denen die Abstrahlung aufgrund des Wärmeaustauschs mit anderen Teilen der Formschale begrenzt ist. Das Niveau des Strahlungsaustauschs wird durch Sichtfaktoren definiert, die die Ausrichtung der verschiedenen Oberflächen zueinander beschreiben [3]. Um dieses rechenintensive Problem effektiv zu lösen, wurden moderne Raytracing-Algorithmen entwickelt [5].

Das in **Abb. 5** gezeigte Beispiel veranschaulicht den Einfluss des Strahlungsaustauschs und der Abschattung der Formschale für eine Baugruppe aus drei Feigustrauben. Die Innenflächen der Schale bleiben heißer als die Außenbereiche, da die Wärme vom zentralen Lauf reflektiert wird.

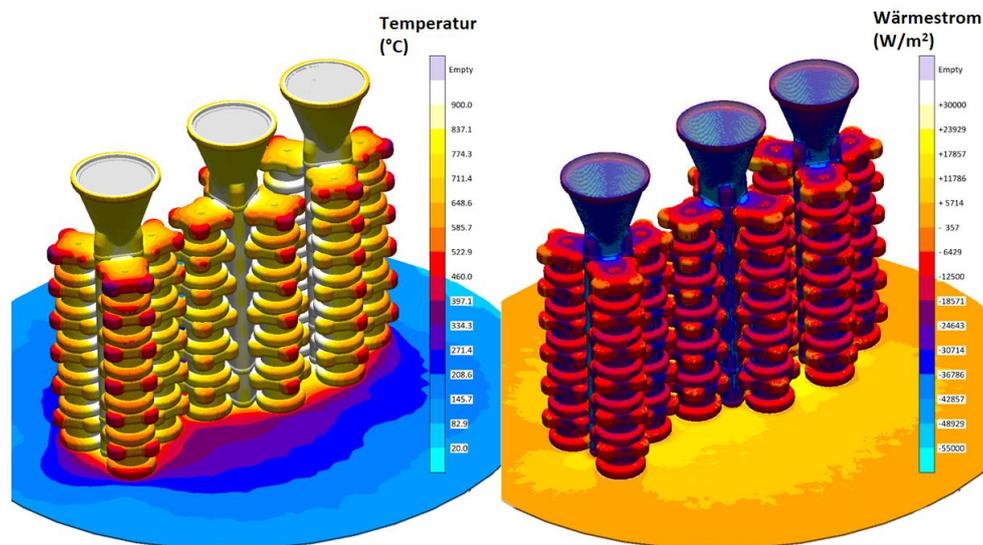


Abb. 5: Einfluss des Wärmeaustausches der Formschale durch Strahlung auf die Abkühlung des Gussteils; links die lokale Temperaturverteilung auf der Formschale und rechts der Wärmestrom zu einem bestimmten Zeitpunkt zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen inneren und äußeren Oberflächenbereichen.

2.3 Abkühlung der Formschale vor und während des Gießens

Verzögerungen aufgrund des Transports der Formschale vom Brennofen zum Gießplatz und weiterer Vorarbeiten können zu einer erheblichen Abkühlung der Formschale zum Zeitpunkt des Gießens führen und die Erstarrung entsprechend beeinflussen. **Abb. 6** zeigt die Oberflächentemperaturen der Formschale bei verschiedenen Verzögerungszeiten von 10 bis 120 Sekunden. Die Anfangstemperatur der Formschale beträgt 900 °C.

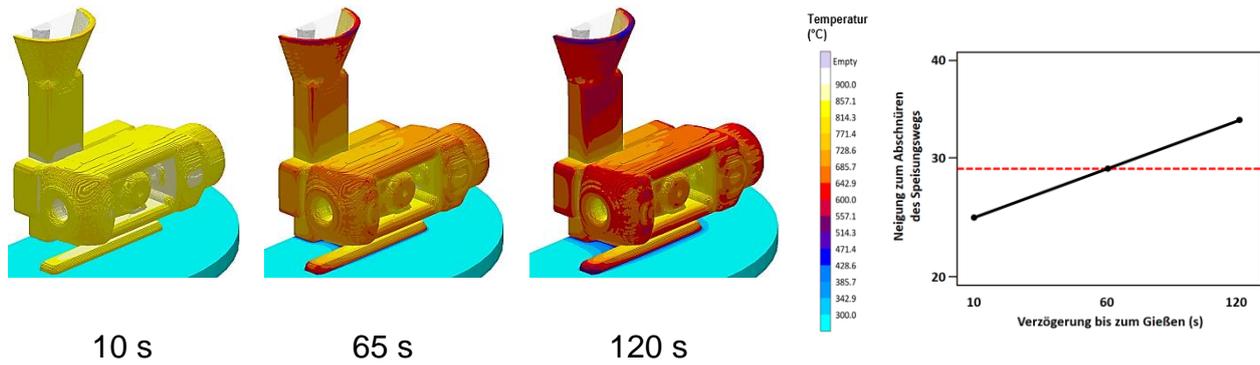


Abb. 6: Oberflächentemperaturen der Schale nach verschiedenen Zeiten bis zum Abguss für eine vorgewärmte Formschale bei 900 °C; das Haupteffekte-Diagramm zeigt den Einfluss der Verzögerung bis zum Gießen auf die Tendenz zum Abschnüren des Hauptspeisungswegs (rechts).

Beim Feingussverfahren wurden verschiedene Verfahren zur Steuerung des Wärmeflusses während des Gießvorgangs entwickelt. Das bekannte Bridgman-Verfahren wird eingesetzt, um eine gerichtete Erstarrung innerhalb des Gussteils zu erreichen, indem das Gussteil in einem Vakuumofen von einer beheizten in eine erkaltete Zone kontrolliert bewegt wird. Dieses Verfahren wird hauptsächlich zur Herstellung von gerichtet erstarrten oder einkristallinen Turbinenschaufeln verwendet (**Abb. 7a**).

Für komplexe Aluminium-Feingussteile wurden verschiedene Prozesse zur Beeinflussung der Kühlleistung und -richtung entwickelt (z. B. Sophia- und Elite-Prozess). Ein computergesteuerter Prozess lässt die gesamte Schale nach dem Gießen in ein Kühlmedium eintauchen. Die Tauchparameter sind auf die Geometrie des Bauteils abgestimmt und führen zu einer kontrollierten und schnelleren Erstarrung und damit zu verbesserten Gefügen und Eigenschaften (**Abb. 7 b**).

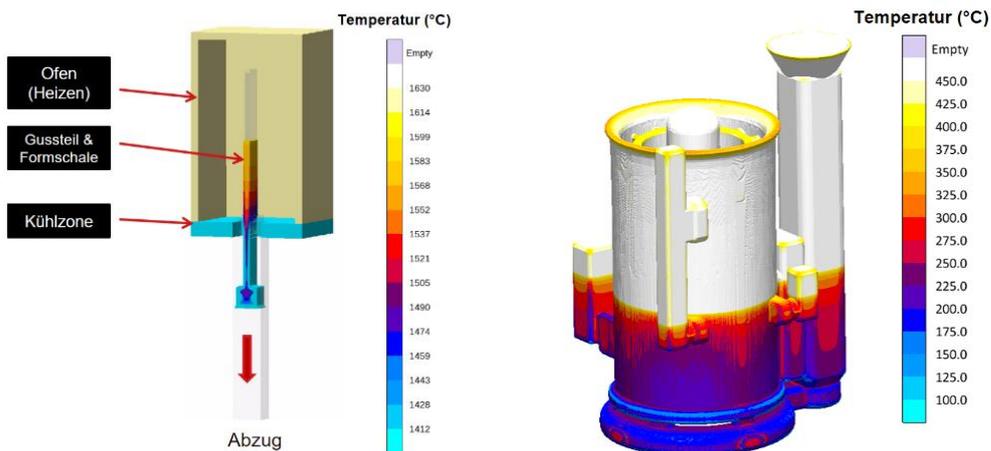


Abb. 7: Kontrollierte Abkühlung und Erstarrung durch definierte Wärmesenken; gerichtete Erstarrung in einem Vakuumofen mit definierten Heiz- und Kühlzonen (links); kontrollierte Abkühlung der Schale im Sophia-Prozess (rechts).

Beim Feingießen ist es üblich, die Schalen nach dem Gießen abzudecken (Haube). Dadurch kann der Wärmeübergang von der Schale zur Umgebung und damit die Abkühlungsgeschwindigkeit der Gussstücke beeinflusst werden. **Abb. 8** vergleicht die Oberflächentemperaturen der Schalen beim Einsatz von Hauben und bei freier Abkühlung.

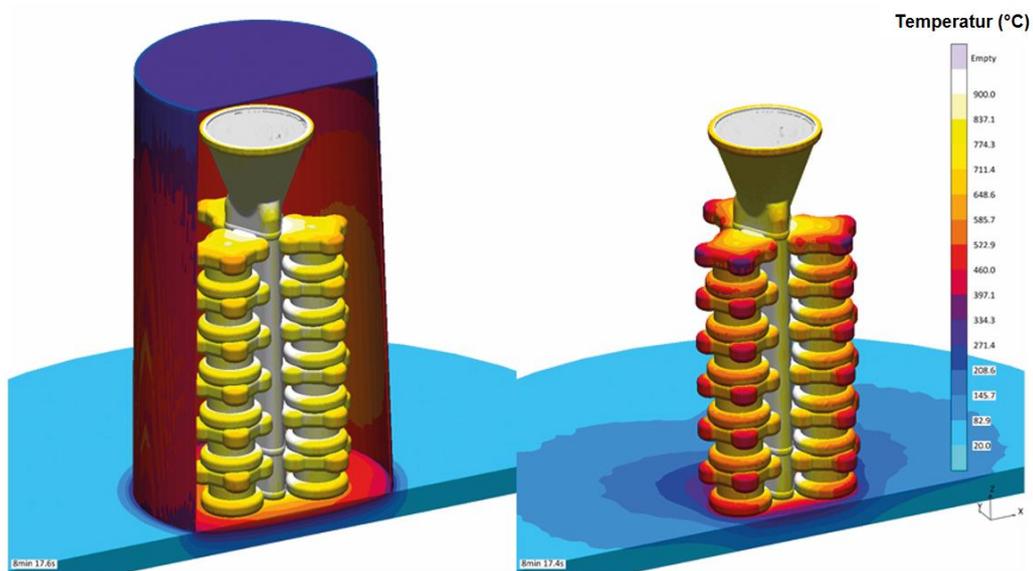


Abb.8: Vergleich der Oberflächentemperaturen der Schalen mit einer Haube (links) und offener Kühlung (rechts) zur gleichen Zeit.

3. Untersuchung von Spannungen, Rissen und Verzug

Das Gussteil schwindet beim Abkühlen. Abhängig von der inhomogenen Abkühlung, der unterschiedlichen thermischen Expansion sowie der Behinderung durch den mechanischen Widerstand der Schale kommt es zu plastischen Verformungen, die zu Eigenspannungen im Gussteil führen. Verzug und im Extremfall, Risse sind die negative Folge [6]. Kaltrisse können auftreten, wenn die von-Mises-Spannungen die lokale Zugfestigkeit bei einer bestimmten Temperatur während der Abkühlung überschreiten.

In **Abb. 9** (a) ist das berechnete von-Mises-Spannungsniveau bei 400 °C auf der Rückseite einer Turbinenschaufel dargestellt. Das Ergebnis zeigt hohe Spannungen in der Nähe der Anschnitte auf der Rückseite der Turbinenschaufel. Eine plastische Verformung ist zu erwarten, da die von-Mises-Spannung (rote Linie) die Streckgrenze vor dem Auspacken übersteigt. Da die Spannungen zu keinem Zeitpunkt die Zugfestigkeit (schwarze Linie) erreichen, wird keine Rissneigung vorhergesagt.

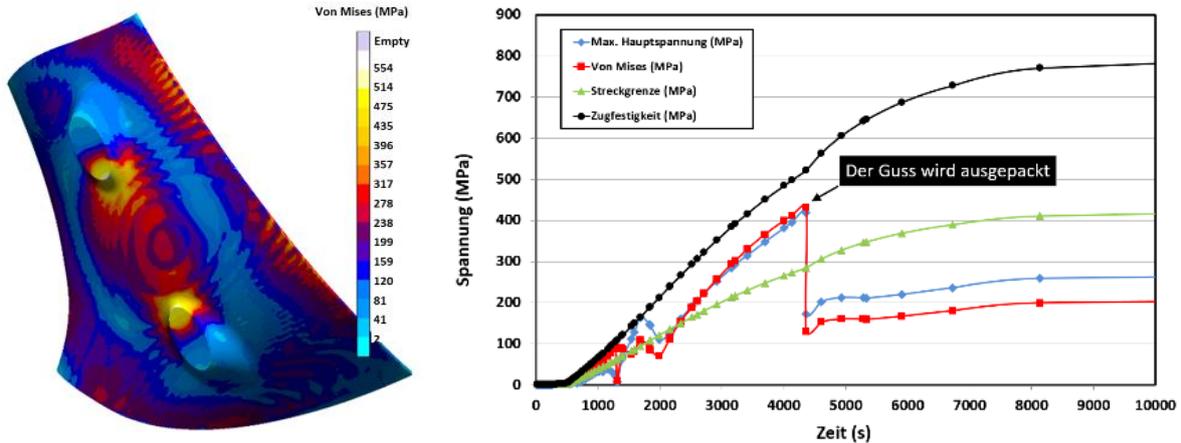


Abb. 9: Die von-Mises-Spannungen auf der Rückseite einer Turbinenschaufel zeigen hohe Spannungswerte im Bereich der Anschnitte (links); Entwicklung der von-Mises-Spannungen während der Erstarrung und Abkühlung (rechts).

Spannungen beim Gießen und Abkühlen führen zu Verzug des Bauteils. Aufgrund der Steifigkeit der Formschale führen plastische Verformungen im Gussstück zu Bauteilverzug, insbesondere nach dem Auspacken. Abb. 10 zeigt die Volumenschwindung und den Bauteilverzug für eine Turbinenschaufel und ein Turbinenrad nach der Erstarrung und Abkühlung. Die Bewertung der Ergebnisse in der Software mit einer „Virtuellen Koordinatenmessmaschine“ (CMM) ermöglichen die Quantifizierung und den Vergleich der lokalen Verformung bei verschiedenen Konstruktionen.

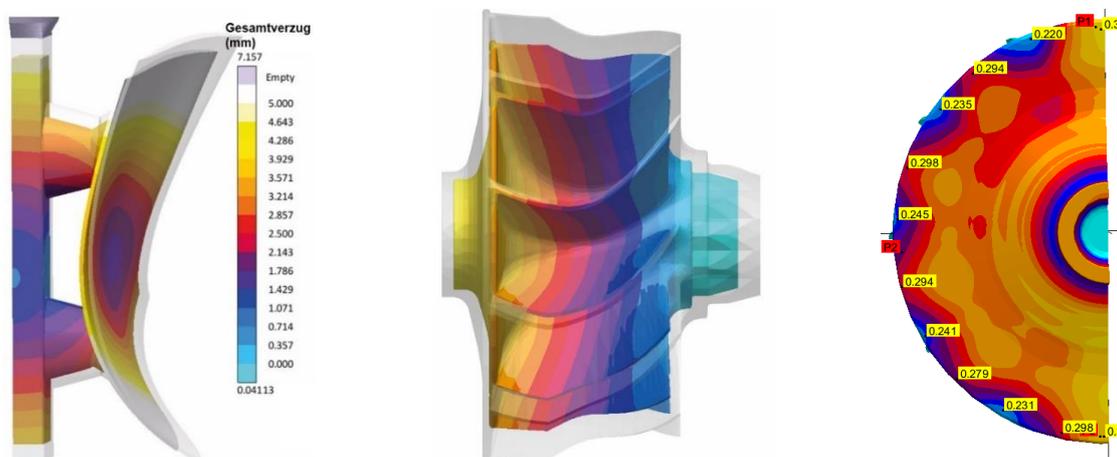


Abb. 10: Lineare Schwindung und Bauteilverformung im Vergleich zur ursprünglichen Geometrie für eine Turbinenschaufel (links) ein Turbinenrad (Mitte); quantitative Bewertung der Bauteilverformung in einer virtuellen CMM-Maschine (rechts).

Warmrisse sind wichtige spannungsbedingte Fehler in Feingießereien, die zu aufwändigen Reparaturen durch Schweißen oder sogar zu Ausschuss führen. Die Hauptursachen für Warmrisse sind thermische Gradienten, die Schwindung aufgrund der steifen Schale, die zu Spannungen während der Erstarrung führt, unzureichende Speisung und der metallurgische

Zustand der Schmelze. Die integrierte Erstarrungs- und Spannungsmodellierung ermöglicht die Bewertung möglicher Maßnahmen zur Vermeidung von Warmrissen. Das Beispiel in **Abb. 11** zeigt den Vergleich der prognostizierten Warmrissgefahr mit den realen Ergebnissen im Gussteil.

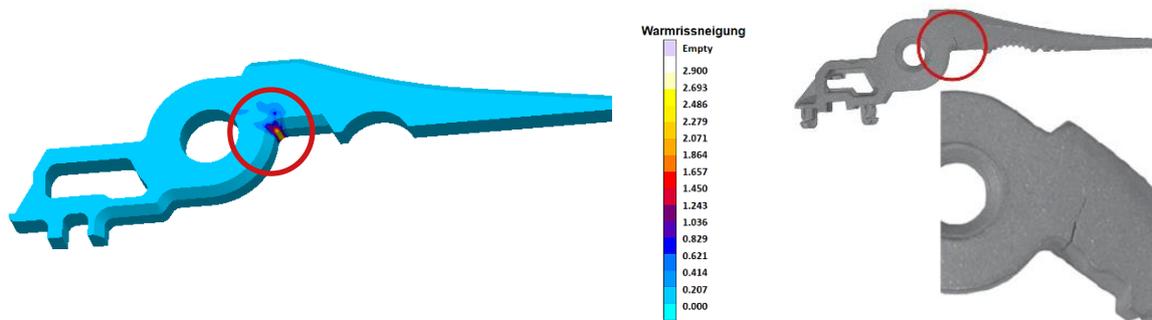


Abb. 11: Spannungssimulation; Anzeige des Risikos für Warmriss für eine Zange für definierte Prozessbedingungen und Vergleich mit realen Ergebnissen (rechts) [7]

4. Berücksichtigung der gesamten Prozesskette

4.1 Herstellung des Wachsmodells

Die Optimierung von Fertigungszeiten und -kosten über den gesamten Gießprozess hinweg ist ein wichtiges Ziel für jede Feingießerei. Daher ist das Interesse an der Simulation weiterer Teilprozesse im Feinguss groß. Betrachtet man die vorgelagerten Prozesse im Feinguss, so ist die Simulation der Herstellung von Wachsmodellen von großem Interesse [8]. Viele Fehler, die beim Einspritzen des Wachses entstehen, finden sich im fertigen Gussteil wieder, wenn sie nicht frühzeitig erkannt werden. Ein erheblicher Prozentsatz des gesamten Ausschusses ist eine direkte Folge schlechter Wachsmodelle, z. B. Oberflächenfehler, Gaseinschluss oder Kernbruch. Die Modellierung des Verhaltens von Wachsen sowie die Fähigkeit, den Füllvorgang in komplexen Geometrien vorherzusagen, sind der erste Schritt zum Verständnis dieser wichtigen Phase des Feingussverfahrens. SIGMASOFT® [9] ist ein Softwarepaket für die Simulation von Kunststoffspritzguss, das das nicht-Newton'sche Fließverhalten von Feingusswachsen berücksichtigt. **Abb.12** zeigt die Formfüllsimulation einer Wachsmodelltraube. Bei einer anfänglichen Einspritztemperatur von 56 °C kühlt das Wachs während des Füllens auf 19 °C ab. Am Ende des Einspritzens schwanken die Wachstemperaturen um bis zu 25 °C. Dies führt zu einer ungleichmäßigen Füllung, die Einfallstellen und Verzug zur Folge haben.

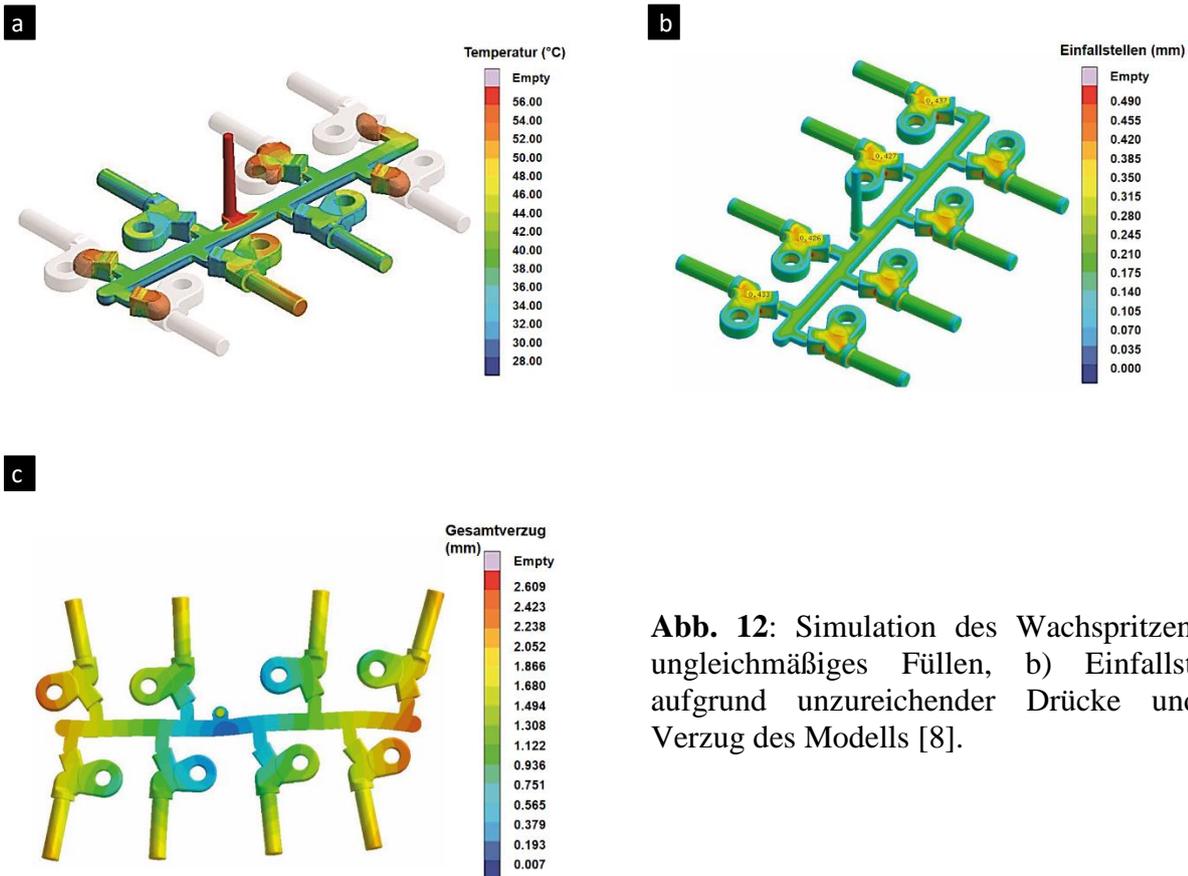


Abb. 12: Simulation des Wachspritzens, a) ungleichmäßiges Füllen, b) Einfallstellen aufgrund unzureichender Drücke und c) Verzug des Modells [8].

4.2 Wärmebehandlung, Mikrostruktur und Materialeigenschaften

Auf der nachgelagerten Seite der Prozesskette erfordern viele Feingussteile aus Stahl oder Nichteisenwerkstoffen eine Wärmebehandlung im Anschluss an den Gießprozess. Ziel der Wärmebehandlung ist es, die gewünschten mechanischen Eigenschaften einzustellen und vorhandene Eigenspannungen und den Teilverzug zu reduzieren. Mit Hilfe der Prozesssimulation können Gefüge und die daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von den gewählten Wärmebehandlungsbedingungen vorhergesagt werden.

MAGMASOFT® berechnet die lokale Seigerung von Legierungselementen während der Erstarrung. Durch diese Informationen kann in den nachfolgenden Simulationen der Wärmebehandlung der Einfluss lokaler Konzentrationsunterschiede sowohl auf die Gefügeverteilung als auch auf die Werkstoffeigenschaften nach der Wärmebehandlung berücksichtigt werden. **Abb. 13** zeigt den Einfluss der Kohlenstoffseigerung auf die lokale Martensitbildung nach dem Abschrecken für zwei Bereiche eines Stahlgussteils mit ähnlichen Abkühlraten während des Abschreckprozesses (Geometrie siehe **Abb. 17**).

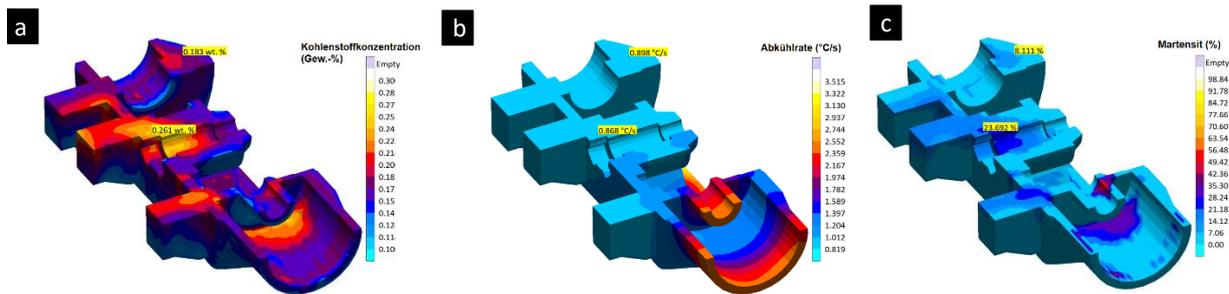


Abb. 13: Auswirkungen der Kohlenstoffseigerung auf die Martensitbildung beim Abschrecken. Unterschiede im Kohlenstoffgehalt aufgrund von Seigerungen während der Erstarrung (a), lokale Abkühlraten während des Abschreckens (b), Unterschiede im Martensitgehalt in zwei Bereichen nach dem Abschrecken trotz gleicher Abkühlraten (c).

Während der Wärmebehandlung ändert sich der Spannungszustand des Gussteils vollständig. Beim Tempern (Normalisieren oder Lösungsglühen) wird der Spannungsabbau im Gussteil durch Plastizität und Krieffekte bestimmt. Beim Abschrecken kommt es zu einem starken Spannungsaufbau, der von hohen Temperaturgradienten im Bauteil resultiert. Auch die Dichte des Gussteils ändert sich, wodurch sich das Risiko der Rissbildung beim Abschrecken erhöht. Mit zunehmender Abkühlrate nimmt auch der Martensitanteil im Gefüge zu. Dies führt zu einer Änderung der lokalen Dichte, was eine ungleichmäßige Volumenkontraktion im Gefüge zur Folge hat. Um den Verzug der Teile und das Risiko von Rissen zu minimieren, muss ein guter Kompromiss zwischen den Materialeigenschaften und den tolerierbaren Spannungsniveaus gefunden werden.

5. Von der Simulation zum Autonomous Engineering

Beim Gießen geschieht alles gleichzeitig und ist eng miteinander verzahnt. Dies kann als entscheidender Vorteil des Gießens im Vergleich zu anderen Herstellungsverfahren angesehen werden, macht aber auch die Entscheidungsfindung für eine optimale Prozessauslegung anspruchsvoll. Die Änderung nur eines Prozessparameters kann die endgültige Gussqualität in vielfacher Weise beeinflussen. Wenn sowohl die Anforderungen an die Qualität als auch die Kosten berücksichtigt werden, ist es in der Praxis schwierig, den Gießprozess manuell zu optimieren [9, 10]. Die komplexen Wechselwirkungen, die sich aus der Anzahl der Variablen im Gießprozess ergeben, sind die Ursache für verschiedene Qualitätsmängel. **Abb. 14** zeigt ein einfaches Ursache-Wirkungs-Diagramm für den Feingussprozess, das die Vielzahl der verschiedenen Variablen verdeutlicht, die Einfluss auf die Gussqualität haben.

Aufgrund der vielen unterschiedlichen Faktoren, die sich auf die Gussqualität auswirken, sowie der komplexen Wechselwirkungen zwischen Physik, Metallurgie und Gussgeometrie kennt selbst der Experte vor einer Vielzahl von Versuchen weder das mögliche Optimum noch die Robustheit des gewählten Prozessfensters. Ein neuer Lösungsansatz überwindet diese Grenzen

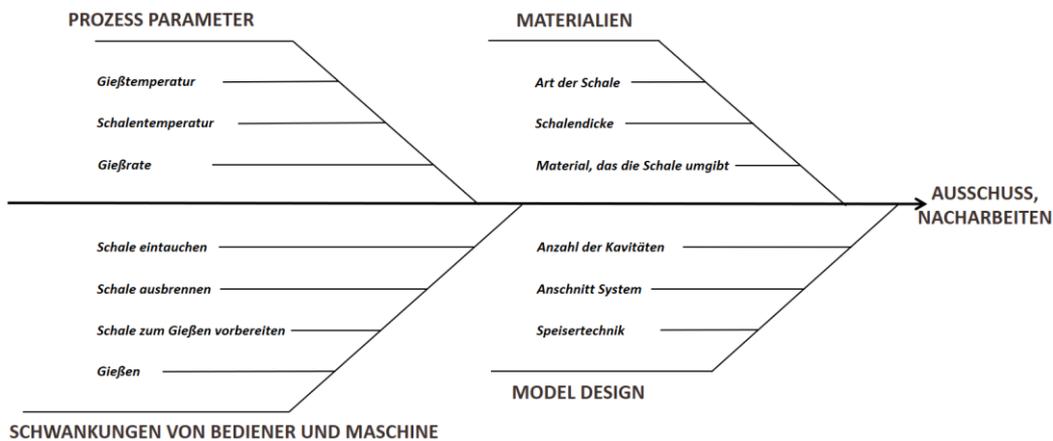


Abb. 14: Ursache-Wirkungs-Diagramm für den Feingussprozess mit der Darstellung verschiedener Variablen auf die Gussqualität.

Diese Methodik, Autonomous Engineering genannt, nutzt mehrere Simulationen mit MAGMASOFT® als eine Reihe von virtuellen Experimenten in einem virtuellen Versuchs- oder Testfeld. Durch die systematische Veränderung der Gießtechnik, z.B. der Anschnitt- und Speiserauslegung oder der Prozessparameter, sucht die Software einen optimalen Zustand innerhalb der vorgegebenen Grenzen. Mehrere Parameter können gleichzeitig modifiziert und unabhängig voneinander bewertet werden. Darüber hinaus kann die Robustheit des Prozesses bereits vor dem ersten Abguss beurteilt werden. Die Software verwendet für den Versuchsplan statistische Ansätze (Design of Experiments / DoE), um mehrere Ziele gleichzeitig zu verfolgen und findet den besten Kompromiss auf der Grundlage physikalischer Zusammenhänge [9].

Mit Hilfe der automatisierten Bewertung aller simulierten Qualitätskriterien lässt sich schnell und einfach der optimale Weg zur Realisierung der gewünschten Ziele finden. Darüber hinaus können die Anzahl der realen Versuche reduziert und die Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf das Erreichen eines robusten Prozessfensters in frühen Phasen der Guss-Modell- und Prozessentwicklung bewertet werden.

Die Methodik des Autonomous Engineering ist kein Ersatz für das Prozessverständnis und die Erfahrung des Gießers. Ausgehend von den technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen seines Prozesses muss der Gießerei-Ingenieur festlegen, welche Parameter er in welchem Umfang verändern darf. Dies geschieht in Verbindung mit den Vorgaben, die an das Gussteil gestellt werden und den zu erreichenden Zielen. Zur Beantwortung dieser Fragen sind quantitative Beschreibungen der wichtigen Einflussfaktoren, messbare Qualitäts- und Kostenindikatoren sowie die Zielsetzung erforderlich. Die Anwendung dieser Entwicklungen als integraler Bestandteil des Autonomous Engineering stellt für Feingießereien eine einmalige Chance dar, vor Produktionsbeginn eines hochkomplexen Gussteils neue und optimierte Anwendungen sowie sichere Fertigungsabläufe zu erreichen.

5.1 Robuste Prozessbedingungen – Auswirkungen der Prozessparameter

Der Begriff "robust" bedeutet fehlerfreie Ausführung unter einer Vielzahl von schwankenden Prozessbedingungen, die häufig nicht während des Prozesses kontrolliert werden können. Die Prozessschwankungen beim Feingießen sind ein wichtiges Thema. Die wichtigsten Variablen, die die Gießbarkeit beim Feingießen beeinflussen, sind Gießtemperatur, Gießgeschwindigkeit, Schalentemperatur und -dicke. Die Gießtemperatur hängt von der gegebenen Legierung, der Geometrie sowie den Prozessbedingungen ab. Hohe Gießtemperaturen können zur Gasbildung in der Schmelze oder zu unerwünschten Reaktionen zwischen Metall und Form führen. Im Gegensatz dazu können niedrige Gießtemperaturen zu Kaltlauf oder sogar zu ungefüllten Bereichen in dünnwandigen Gussstücken führen.

Im folgenden Beispiel wurde ein virtueller Versuchsplan für die folgenden Prozessvarianten durchgeführt:

- Temperaturen der Formschale (900 bis 1100 °C)
- Gießtemperaturen (1530 bis 1630 °C)
- Gießzeiten (7 s, 10 s, 13 s, 16 s)

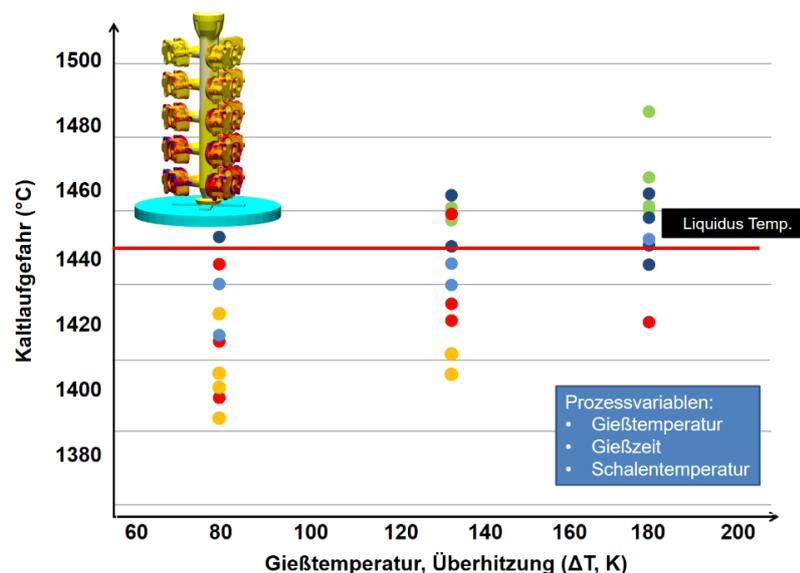


Abb. 15: Kaltlaufneigung als Funktion der Überhitzung der Schmelze für verschiedene Prozessvarianten.

Insgesamt umfasst der Versuchsplan 36 virtuelle Experimente (Simulation der Formfüllung und Erstarrung). **Abb. 15** zeigt die Ergebnisse für alle virtuellen Versuche in einem Streudiagramm. Die Ergebnisse für die Kaltlaufneigung sind über der Variablen „Überhitzung“ eingezeichnet. Die Gefahr für Kaltlauf nimmt mit sinkender Gießtemperatur deutlich zu. Aufgrund des Einflusses der anderen Variablen (Temperaturen der Form, Gießzeiten) zeigt die Abbildung eine Verteilung der Ergebnisse für jede gewählte Gießtemperatur. Dies deutet darauf hin, dass die Robustheit des Prozesses mit geringerer Überhitzung abnimmt.

Abb. 16 zeigt die Korrelation von drei weiteren Prozessparametern, die die Gussqualität, hier die Menge an Porositäten und Mikroporositäten im Gussteil, beeinflussen. Wie bereits erwähnt, ist es nicht nur wichtig, die Schwankungen eines Parameters sichtbar zu machen. Es ist noch aufschlussreicher, die Wechselwirkung mit anderen Prozessparametern aufzuzeigen. Während sich die Gießzeit nur geringfügig auf die endgültige Porosität auswirkt, haben vor allem höhere Gieß- und Schalentemperaturen einen signifikanten Einfluss auf die vorhergesagte Makro- und Mikroporosität.

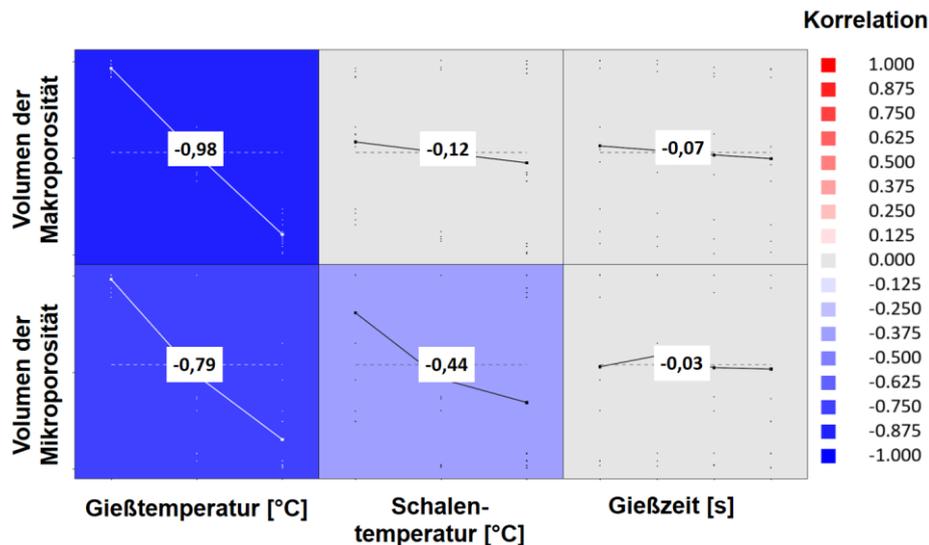


Abb. 16: Korrelations-Diagramm zeigt den Einfluss von Gießtemperatur, Schalentemperatur und Gießzeit auf das Volumen der Makro- und Mikroporosität im Gussteil.

5.2 Robuste Gießtechnik

Bei der Planung hat die Auslegung der Anschnitt- und Speisungstechnik einen direkten Einfluss auf die Qualität des Gussteils. Die Mehrzahl der Gussfehler kann durch ein optimiertes Anschnitt- und Speisungssystem vermieden werden, meist auf Kosten des Kreislaufanteils oder der Herstellungskosten.

5.2.1 Verbesserte Speisung durch Anpassung von Gießlauf und Anschnitt

Die Auslegung einer effizienten Gießtechnik für Feingussbauteile ist immer eine große Herausforderung. Die komplexen Geometrien und Prozessanforderungen haben eine Reihe von einschränkenden Faktoren zur Folge. Im folgenden Beispiel wurden mehrere Anschnittkonzepte mit einem virtuellen Versuchsplan für die folgenden Varianten von Anguss und Gießlauf unter Verwendung parametrischer Geometrien untersucht:

- Querschnitt von Gießlauf und Anguss (blaue Linie, 5 Varianten)
- Position des Angusses (gelbe Linie, 7 Varianten)
- Anschnittbreite an der Verbindungsstelle des Gießlaufs (rote Linie, 3 Varianten).

Die Software berechnet Formfüllung und Erstarrung für alle denkbaren Kombinationen auf Basis eines voll faktoriellen Versuchsplans mit 105 verschiedenen Designs. Ohne jegliche Interaktion des Anwenders wird jede Simulation in dem autonomen Versuchsplan eingerichtet,

gerechnet und automatisch auf der Grundlage der gewählten Qualitätskriterien bewertet. Der Anwender definiert nur zuvor seine Ziele: Dies ist in diesem Beispiel die Suche nach dem besten Kompromiss unter allen Varianten, um eine möglichst optimale Speisung im Gussteil zu realisieren. Dabei wird der Einfluss der geometrischen Änderungen der Gießtechnik auf die Minimierung des Volumens der Wärmezentren in bestimmten kritischen Bereichen untersucht (Abb. 17).

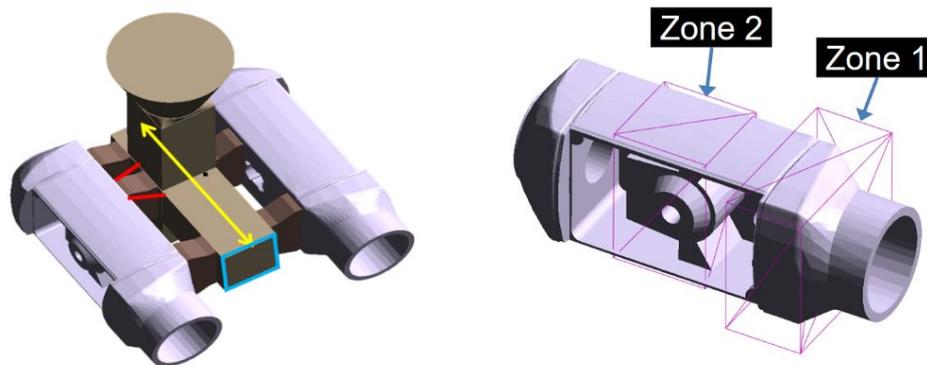


Abb. 17: Parametrische Variation der Abmessungen des Angussystems zur Verbesserung des Speisungsvermögens im Gussteil; Variablen: Querschnitt des Angusses (blau), Änderung der Position des Gießlaufes (gelb), Verbreiterung der Anschnitte (rot); (links). Bewertungsbereiche zur Beurteilung der Qualitätskriterien während der Erstarrung in kritischen Zonen des Gussteils (rechts).

Abb. 18 zeigt die Ergebnisse des virtuellen Versuchsplans zur Bewertung des Einflusses der verschiedenen gießtechnischen Varianten auf die Qualitätskriterien „Wärmezentrum“ (Hotspots) und „Porositäten“. Mit Hilfe des Parallelkoordinatendiagramms kann der Einfluss der einzelnen Variablen auf das Speisungsvermögen im Gussteil einfach visualisiert und bewertet verstanden werden.

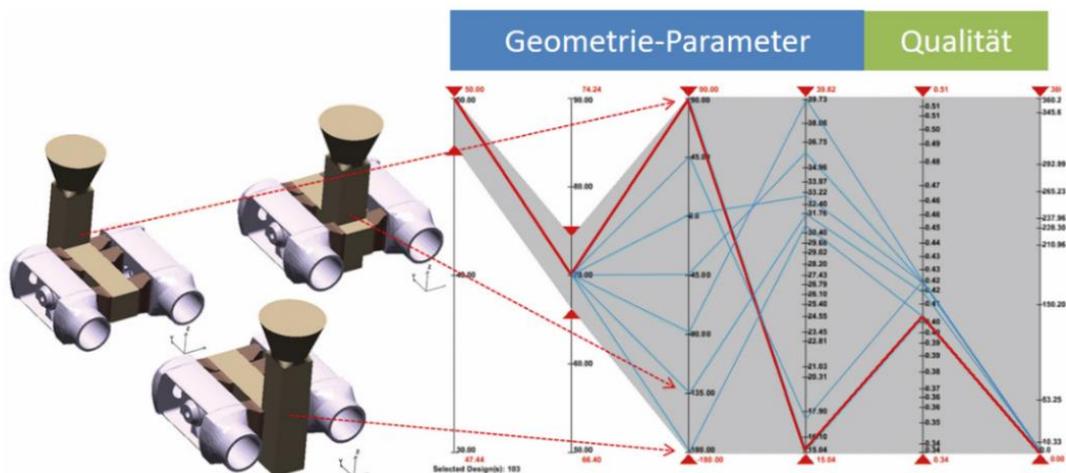


Abb. 18: Bewertung der Auswirkungen von Designvariablen auf die ausgewählten Qualitätskriterien anhand eines Parallelkoordinatendiagramms. Jede blaue Linie zeigt den Zusammenhang von Variablen und den resultierenden Qualitätskriterien für ein virtuelles Experiment. Der rote Linienzug verknüpft das Qualitätsoptimum (minimale Porosität und Wärmezentren) mit den zu Grunde liegenden Geometrien für Gießlauf und –anschnitt.

5.3.2 Gießlaufkonfiguration für optimierten Reinheitsgrad

Um Qualitätsschwankungen zu vermeiden, muss bei der Auslegung eines Gießsystems für Feingussbauteile vor allem eine gleichmäßige Füllung und Erstarrung aller Kavitäten sichergestellt sein. Aus gießtechnischer Sicht besteht das Ziel darin, Turbulenzen und Gaseinschlüsse während der Formfüllung zu minimieren und eine ausreichende Speisung während der Erstarrung zu gewährleisten. Diese Ziele werden oft durch die Anforderungen an die Gießtraube beschränkt, den mechanischen Belastungen beim Tauchen und Besanden standzuhalten.

Bei vielen Stahlgussteilen sind Reoxidationseinschlüsse eine Hauptursache für Nacharbeit oder sogar Ausschuss. Die Bildung von Einschlüssen ist eng mit der Turbulenz während der Füllung verbunden. Die Simulation von Turbulenzen während der Formfüllung erlaubt die quantitative Modellierung resultierender Gaseinschlüsse als auch die Größe und Verteilung von Einschlüssen (**Abb. 19**). In der vorliegenden Fallstudie wurden verschiedene Angusskonzepte mit Blick auf die Bildung von Reoxidationseinschlüssen im Gussteil untersucht.

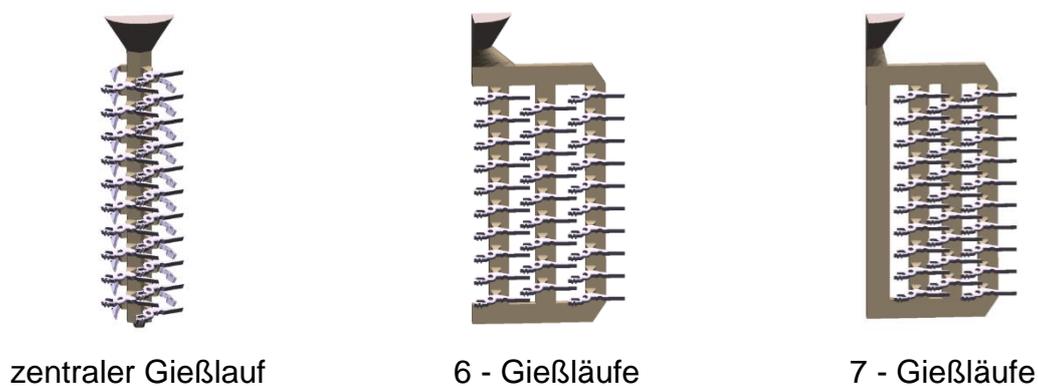


Abb. 19: Untersuchung von Reoxidationseinschlüssen für verschiedene Angussdesigns [7].

Abb. 20 zeigt die vorhergesagte Verteilung und Menge an Einschlüssen der Gussteile am oberen und unteren Ende der Gießtraube. Man erkennt einen deutlichen Unterschied der vorhergesagten Einschlüsse zwischen den drei verschiedenen Baumdesigns sowie zwischen oberen und unteren Teilen.

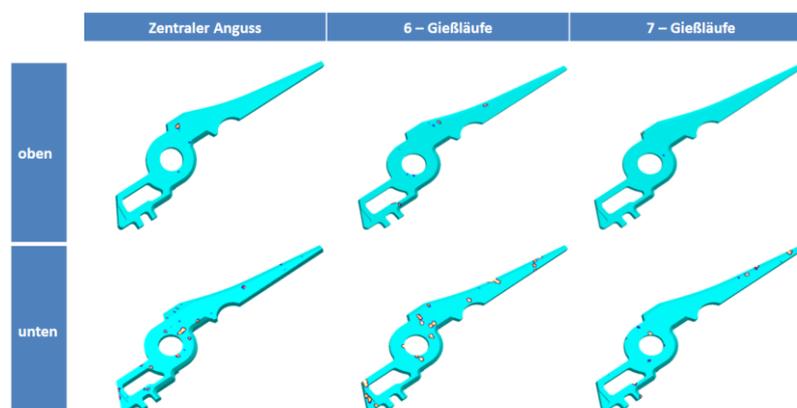


Abb. 20: Einfluss des Angussdesigns auf Anzahl und Verteilung von Reoxidationseinschlüssen auf der Oberfläche der Gussteile [7].

5.2.3 Die Suche nach dem optimalen Weg

Viele Teile der Schmuckindustrie sind Feingussteile aus Edelmetall. Es ist daher eine der größten Herausforderungen für den Hersteller von Schmuckstücken, ein Optimum zwischen erforderlicher Gussqualität und den eingesetzten (Material-) Kosten zu finden. **Abb. 21** veranschaulicht am Beispiel von gegossenen Ringen die Möglichkeiten zur systematischen Prozessoptimierung mit Hilfe der virtuellen Versuchsplanung. Die Ringe sollten aus der Silberlegierung AgCu7 hergestellt werden. Es wurde in zwei Stufen vorgegangen: In Stufe 1 (d1 bis d4) sollte zunächst das beste Anschnittkonzept für den einzelnen Ring ermittelt werden. In Stufe 2 wurden für die ganze Modelltraube unter Nutzung des besten Anschnittkonzepts zwei Gießläufe mit unterschiedlichen Durchmessern untersucht (Design A und B) [12].

Zur Bewertung wurden zwei verschiedene Qualitätskriterien (ruhige Formfüllung und Porosität) untersucht und mit der jeweiligen Ausbringung verglichen. Die Korrelationsmatrix (**Abb. 21**) zeigt, dass das zweite Design (d2) von allen Designs den besten Kompromiss zwischen ruhiger Formfüllung (weniger Turbulenzen während der Füllung) und der höchsten Ausbringung darstellt. Die Auswertung der beiden Gießtraubendesigns für alle Kriterien ergab eindeutig, dass Design B die bessere Wahl war. Diese Variante zeigte geringere Turbulenzen während der Füllung, geringere Porosität und minimale Tendenz zu Kaltlauf bei gleichzeitig höherem Ausbringen.

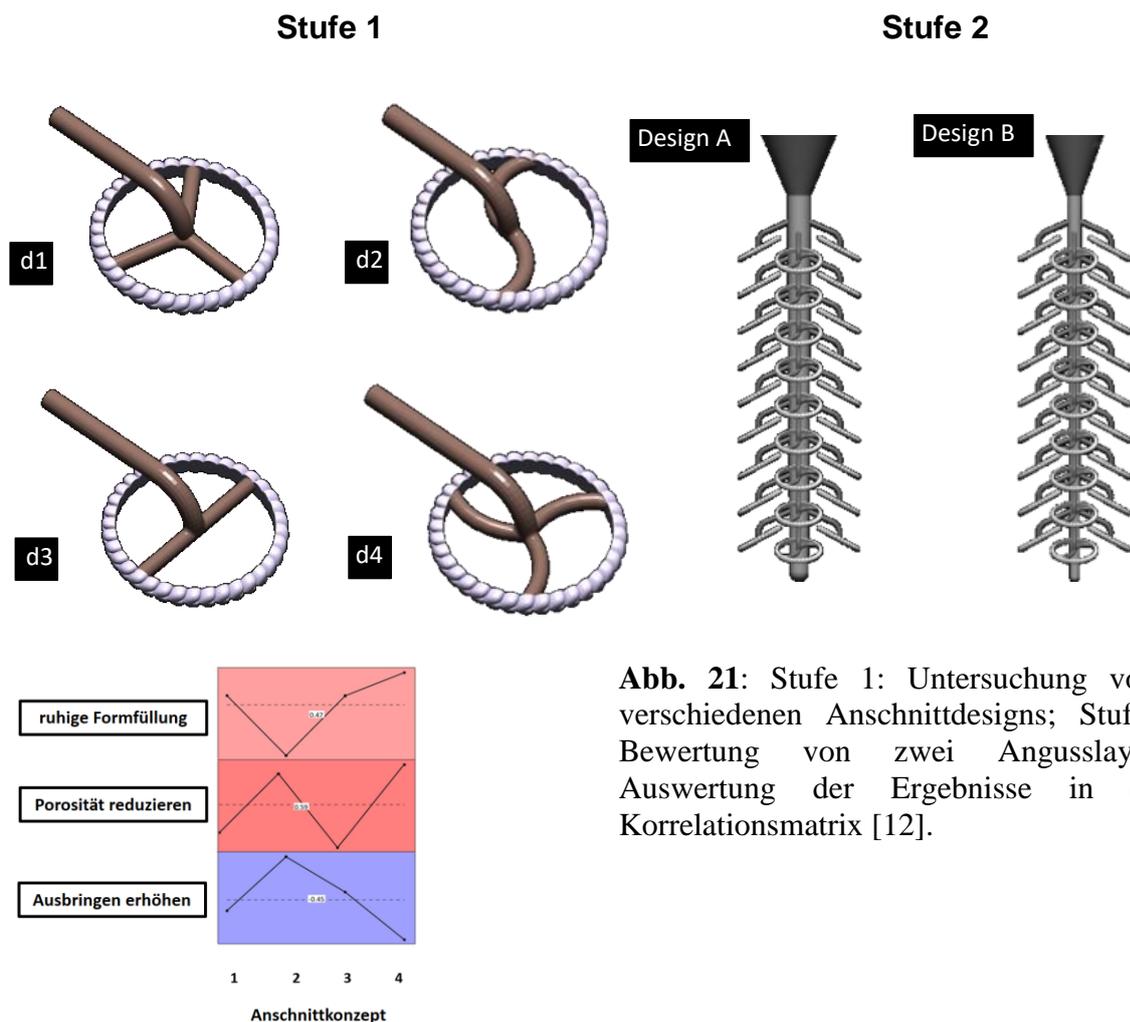


Abb. 21: Stufe 1: Untersuchung von 4 verschiedenen Anschnittdesigns; Stufe 2: Bewertung von zwei Angusslayouts, Auswertung der Ergebnisse in einer Korrelationsmatrix [12].

5.3 Technologische Entscheidungen verbunden mit robuster Qualität und optimierten Kosten

Feingießereien versuchen stets, ein Prozessfenster zu schaffen, das eine robuste, anforderungsgerechte Qualität und optimierte Kosten über den gesamten Gießprozess gewährleistet. Das Verständnis von Auswirkungen technischer Entscheidungen auf die resultierenden Qualitätskosten durch Reparaturen oder gar Ausschuss ist ein Schlüssel, um zuverlässige Entscheidungen zu treffen. Diese vereinfachte Fallstudie eines Turbinengehäuses zeigt, wie sich die Änderung eines Prozessparameters (Temperatur der Formschale) auf die Gussqualität auswirkt (Risiko von nicht gefüllten Bereichen, Schwindungsporosität und Gefüge (Dendritenarmabstand DAS)) (**Abb. 22**). Das Aluminium-Strukturteil (A356) wiegt 64 kg und ist 90 cm hoch. Die Simulationen wurden für drei verschiedene Temperaturen der Schale (200 °C, 400 °C und 600 °C) durchgeführt.

Das Hauptziel bestand darin, den besten Kompromiss zwischen minimaler Porosität und minimalem Risiko von nicht gefüllten Bauteilbereichen für ein optimiertes Gefüge zu finden. Die Temperatur der Formschale hat einen erheblichen Einfluss auf die Kühlleistung der Formschale. Je niedriger die Schalentemperatur ist, desto feiner wird das Gefüge (niedrigerer DAS Wert). Gleichzeitig steigt das Risiko von Kaltlauf oder nicht gefüllten Bereichen.

Andererseits nimmt steigt die Porosität im Gussteil sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Schalentemperaturen und erreicht bei 400 °C ein Minimum. Die systematische Bewertung des gegebenen Prozessfensters ermöglicht es, gleichzeitig die Auswirkungen auf Gussqualität und Kosten und die Robustheit bzw. die Sicherheit des optimalen Fertigungsfensters zu beurteilen.

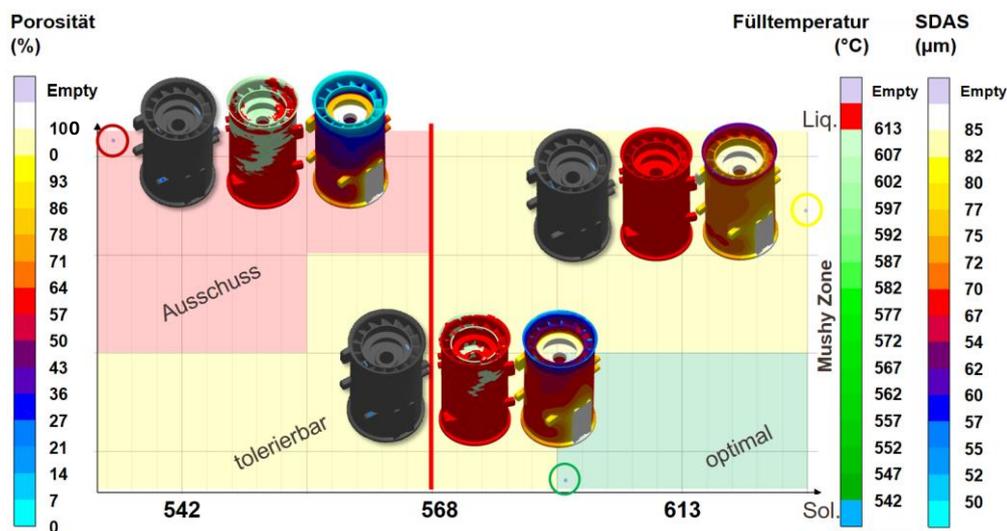


Abb. 22: Qualitätsdiagramm (hier Porosität vs. nicht gefüllte Bauteilbereiche für verschiedene Schalentemperaturen) zur Ermittlung optimaler Betriebsbedingungen und robuster Teilequalität [7].

5.4 Robuste und optimierte Prozessbedingungen für die Wärmebehandlung

Für viele hochwertige Feingussteile sind optimierte Prozessbedingungen für eine notwendige Wärmebehandlung unverzichtbar. Autonomous Engineering ermöglicht die Bewertung von Prozessvariablen bei der Wärmebehandlung auf das entstehende Gefüge und die resultierenden mechanischen Eigenschaften durch einen virtuellen Versuchsplan.

Ziel der Optimierung ist es, den besten Kompromiss zwischen Gefüge und Materialeigenschaften zu finden und die Ressourcen wie Energie, Bearbeitungszeit und Produktionskapazität effizient zu nutzen. Wichtige Prozessvariablen, wie die thermische Geschichte und die chemische Zusammensetzung der Legierung können dabei systematisch untersucht werden.

Abb. 23 zeigt die Ergebnisse eines virtuellen Versuchsplans für ein Stahlfeingussteil, bei dem die Auswirkung verschiedener Kühlmedien beim Abschrecken auf die Abkühlzeit sowie auf die daraus resultierende Härte untersucht wurde. Die Härte des Gussteils ist stark vom Kühlmedium abhängig. Die Abbildung zeigt auch, wie die chemische Zusammensetzung, in diesem Beispiel Kohlenstoff und Mangan, das Gefüge (hier Restaustenit) und die resultierenden Werkstoffeigenschaften (Härte) nach der Wärmebehandlung beeinflussen.

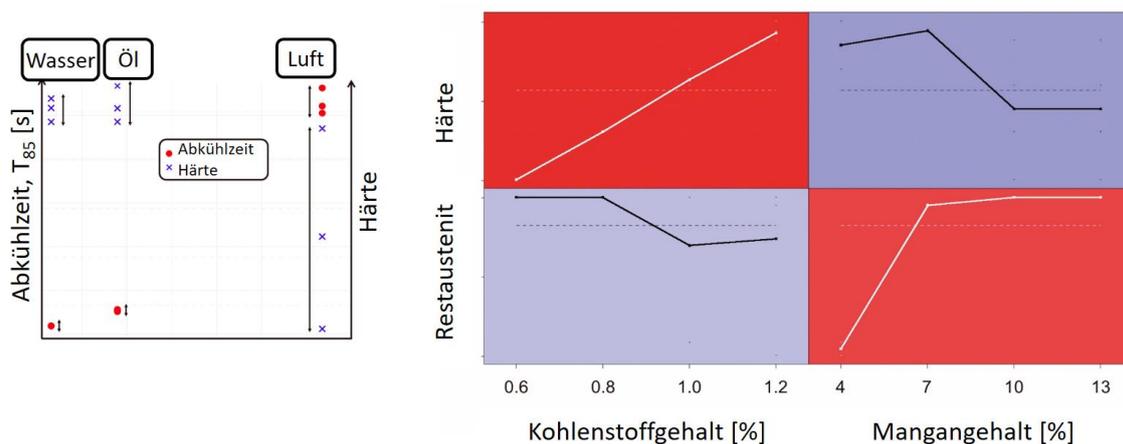


Abb. 23: Berechneter Einfluss des Kühlmediums auf die Abkühlzeit und die entstehende Härte (links); Das Haupteffekt-Diagramm zeigt den Einfluss der Legierungselemente (C und Mn) auf das Gefüge (Restaustenit) und die entstehenden Werkstoffeigenschaften (Härte) nach der Wärmebehandlung (rechts).

6. Schlussfolgerungen

Feinguss hat sich im Laufe seiner langen Geschichte zu einem zuverlässigen Fertigungsverfahren entwickelt, das in verschiedenen Branchen für hochintegrierte und anspruchsvolle Gussteile eingesetzt wird. Das Verfahren ist gegenwärtig mit vielen Herausforderungen konfrontiert, wie dem Verfahrenswettbewerb mit additiver Fertigung oder Pulvermetallurgie (MIM Metal Injection Molding) oder der Globalisierung und dem damit verbundenen Preiswettbewerb.

Das macht den Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Unterstützung von Konstruktions- und Prozessentscheidungen unerlässlich. Der systematische Einsatz von virtuellen Experimenten und Optimierungen verändert die Methodik der Simulation von einem Werkzeug, das bereits getroffene Entscheidungen bestätigt hin zu einem vorhersagenden Werkzeug, das es dem Gießer ermöglicht, optimale Betriebspunkte und robuste Prozessfenster für die gesamte Prozesskette zu ermitteln, bevor das erste Gussteil hergestellt wird.

Dr.-Ing. Max Peymandar, Produktmanager, Daniel Schmidt, B. Eng., Anwendungstechniker, MAGMA Gießereitechnologie GmbH und Dr.-Ing. Jörg C. Sturm, Dr. Flender Holding GmbH, Aachen

Referenzen

- [1] Giesserei Special (2020), [Nr. 01], pp. 60-73.
- [2] MAGMASOFT® ist ein Produkt der MAGMA GmbH, Aachen, Deutschland. MAGMASOFT® und Autonomous Engineering sind eingetragene Warenzeichen der MAGMA GmbH bzw. MAGMA Inc. Schaumburg, IL. USA.
- [3] Sturm, J.C., Optimierung des Feingussverfahrens durch den Einsatz moderner Simulationstechniken, Dissertation, VDI Verlag, 1990.
- [4] Xu, Mingzhi, Characterization of investment shell thermal properties (2015). Doctoral Dissertations. 2423.
https://scholarsmine.mst.edu/doctoral_dissertations/2423.
- [5] Fainberg, J, Schaefer; W.: A fast and efficient adaptive parallel ray tracing, based model for thermally coupled surface radiation in casting and heat treatment processes, in Proceedings of MCWASP 2015 (21.-26. June 2015, Hyogo, Japan).
- [6] GIESSEREI Special (2018), [Nr. 02], S. 56-71.
- [7] Investment casting webinar series, 4 keys to unlocking a more robust investment casting process, MAGMA Foundry Technologies, Inc., Episode 1-4, 09 & 10/2020. <https://www.MAGMASOFT.com/en/>.
- [8] Mansfeld, T., Simulation von Feingusswachsen, 22-23. Okt. 2015, Bad Dürkheim, Germany.
- [9] SIGMASOFT® ist ein Produkt der SIGMA Engineering GmbH, Aachen, Deutschland. SIGMASOFT® ist ein eingetragenes Warenzeichen der MAGMA GmbH.
- [10] Schneider, M., Meeting future challenges in shape casting process simulation, Modeling of Casting, Welding, and Advanced Solidification Processes, TMS 2009.
- [11] Giesserei 102 (2015), [N. 6], S. 86-100.
- [12] Courtesy of ProTech, Thailand.