



Innovatives Produktdesign und robuste Prozessauslegung im Druckgießprozess mit Autonomous Engineering

VON HORST BRAMANN, LAURA LEINEWEBER UND JÖRG C. STURM, AACHEN

Entwicklungsablauf für Strukturteile

Modellvielfalt und starker Marktwettbewerb führen zu immer kürzeren Produktentwicklungszyklen bei gleichzeitig steigendem Zeit- und Kostendruck. Komplexe Bauteile, beispielsweise aus dem automobilen Fahrzeugbau, werden daher vielfach nur funktionsgerecht mit virtuellen Methoden wie FEM ausgelegt. Erst zu einem späteren Zeitpunkt, in der Regel im Rahmen der Anfrage bei Lieferanten, erfolgt eine Bewertung der Machbarkeit und potentieller Fertigungsrestriktion. Sinnvolle oder erforderliche Designänderungen sind zu diesem späten Zeitpunkt

der Produktentstehung selten realisierbar und stets mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand verbunden.

An den Demonstratorbauteilen „Verbindungsknoten“ und „Federbeinaufnahme“ wird die systematische Integration der Gießprozess-Simulation und virtuellen Optimierung zur frühzeitigen Identifizierung von Fertigungsrestriktionen im Produktentstehungsprozess beispielhaft dargestellt. Der Verbindungsknoten ist Bestandteil des Crashlastpfades vom Längsträger zum Mitteltunnel einer Pkw-Karosserie-Struktur. Die wesentlichen Anforderungen bestehen in der Realisierbarkeit der vier geplanten Verbindungstechniken zu den weiteren Bauteilen des Systems sowie der Einhaltung der Anforderungen eines frontalen Crashlastfalles nach FMVSS-Norm (siehe Bild 1).

Aufgrund der aus dem Packaging der Chassisstruktur resultierenden geometrischen Komplexität des Bauteils sowie der geplanten Stückzahlen fällt die Entscheidung für das Fertigungsverfahren Druckgießen. Die Umgestaltung der Funktionsgeometrie zu einem Gussbauteil erfolgt im Rahmen des konventionellen Entwicklungsprozesses bereits unter Berücksichtigung klassischer Design- und Konstruktionsregeln für Druckguss (Bild 2). Die Validierung der spezifizierten Anforderungen wird weitestgehend virtuell unter Nutzung von FE-Simulationstools realisiert. Das ausgestaltete Druckgussbauteil durchläuft vielfach parallel die virtuelle Validierung des Betriebslastfalles bzw. funktionalen Anforderungsprofils. In diesen Ablauf ist im Regelfall der Gusslieferant bis zum Reifegrad eines Design-Free-

ze nicht eingebunden [1]. Eine detaillierte Analyse und Bewertung der Herstellbarkeit erfolgt in wenigen Fällen bei der Anfrage, häufig jedoch erst nach Nominierung des Lieferanten. Die Belastbarkeit der Herstellbarkeitserklärung im Verlauf der Prozessentwicklung ist dabei wesentlich vom Verständnis des Lieferanten bezüglich der Anforderungen des Bauteils geprägt. In der Prozess- und Werkzeugauslegung, die als Stand der Technik von der Gießprozess-Simulation unterstützt ist, werden vielfach nachträgliche Designänderungen vorgeschlagen oder als notwendig gefordert. Deren Umsetzung ist in den meisten Fällen nur bedingt realisierbar und stets mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Die Prozessentwicklung endet meist mit der Bestätigung der Herstellbarkeit durch den Lieferanten und der Freigabe zur Fertigung der kostenintensiven Werkzeuge und Betriebsmittel (Bild 3). Die Konsequenz ist oft ein wenig robuster Fertigungsprozess mit geringer Transparenz, langen Anlaufzeiten und zu Beginn meist hohen Ausschussraten.

Die Verknüpfung der vielfältigen Möglichkeiten der Gießprozess-Simulation beim Lieferanten mit den etablierten Methoden der virtuellen Funktionsvalidierung während der Produktentstehung ermöglicht eine frühzeitige Untersuchung und Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen auf die Bauteileigenschaften. Dieses virtuell erzeugte Wissen ist die Basis für abgesicherte Entscheidungen und die Auslegung robusterer Produkte und Fertigungsprozesse.

Optimierung der Prozess- und Werkzeugauslegung

Einfluss der Gießkammer auf die Gasporosität

Gasporosität durch eingeschlossene Luft oder ausgeschiedene Gase ist bei Strukturteilen eine wesentliche Ausschursache. Die Fehler führen insbesondere in der Wärmebehandlung unmittelbar zu Ausschuss und wirken sich negativ auf die Anforderungen des Bauteils an die Verbindungstechnik, wie Schweißbarkeit und Nietbarkeit, aus. Die oft großflächigen und dünnwandigen Strukturbauteile sind darüber hinaus anfällig für starke Temperaturverluste der Schmelze im Verlauf des Füllens. Die Folge sind Fehlerbilder wie Fließlinien und Oberflächendefekte bis hin zu nicht akzeptablem Kaltlauf in den kritischen Verbindungsbereichen des Bauteils.

Im Rahmen der Prozessentwicklung und gießtechnischen Auslegung ist daher

KURZFASSUNG:

Leichtbau stellt in der Automobilbranche zunehmend höhere Anforderungen an die Produkt- und Prozessentwicklung im Druckgießverfahren. Dies liegt an immer kürzeren Produktentwicklungszyklen sowie der steigenden Funktionsintegration und Komplexität der Strukturkomponenten. Die Ziele für die technisch komplexen Prozesse und Werkzeuge beim Aluminium- und Magnesiumdruckgießen sind Kosten- und Ressourceneffizienz sowie die prozesssichere Einhaltung der definierten Qualitätsanforderungen des Gussteils. Gießprozess-Simulation ist dabei seit langem ein akzeptiertes Werkzeug für die Bauteilauslegung und Prozessgestaltung.

Am Beispiel von Strukturbauteilen aus Aluminium-Druckguss wird gezeigt, wie die neue Methodik des Autonomous Engineering die Forderungen nach

- > schneller Produkt- und Prozessentwicklung,
- > optimaler Prozess- und Werkzeuggestaltung im Hinblick auf Qualität, Ausbringung und Kosten, sowie
- > robuster Prozessauslegung mit maximaler Reproduzierbarkeit der Qualität

besser unterstützt als je zuvor.

Mit Autonomous Engineering wird das bekannte virtuelle Experiment der Gießprozess-Simulation um die Festlegung von quantifizierbaren Zielen und kritische variable Fertigungsparameter, deren Schwankungsbreiten sowie die relevanten Qualitätskriterien ergänzt. Autonomous Engineering bietet damit das Potenzial zur simultanen Optimierung von modernen Druckgusskomponenten über den gesamten Entwicklungsprozess. Es erlaubt die Identifikation der konkreten fertigungstechnischen Lösung, die Ermittlung des besten Kompromisses und die Festlegung eines robusten Prozessfensters. Der Gießer hat somit eine Basis für effektive Produkt- und Prozessentwicklung in Bezug auf Qualität und Wirtschaftlichkeit.

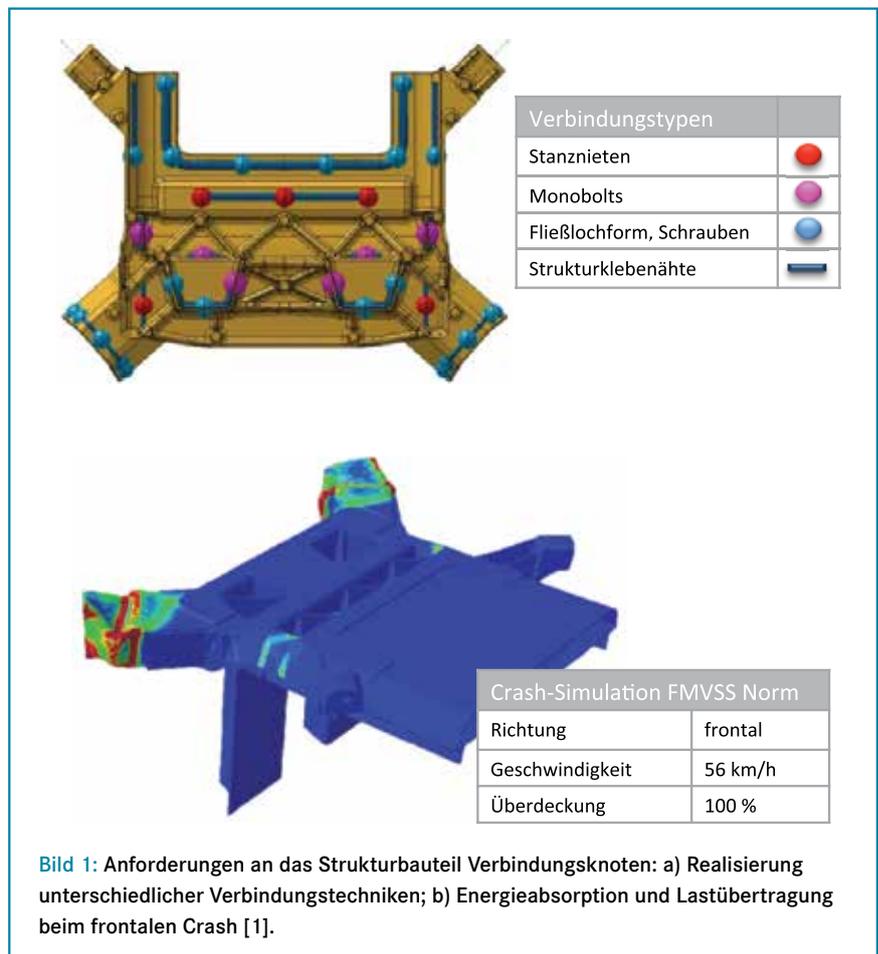


Bild 1: Anforderungen an das Strukturbauteil Verbindungsknoten: a) Realisierung unterschiedlicher Verbindungstechniken; b) Energieabsorption und Lastübertragung beim frontalen Crash [1].

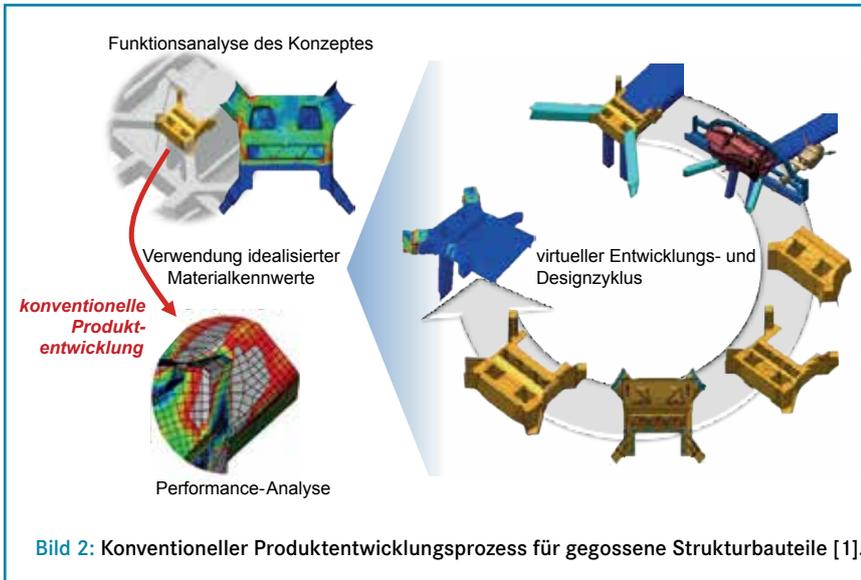


Bild 2: Konventioneller Produktentwicklungsprozess für gegossene Strukturbauteile [1].

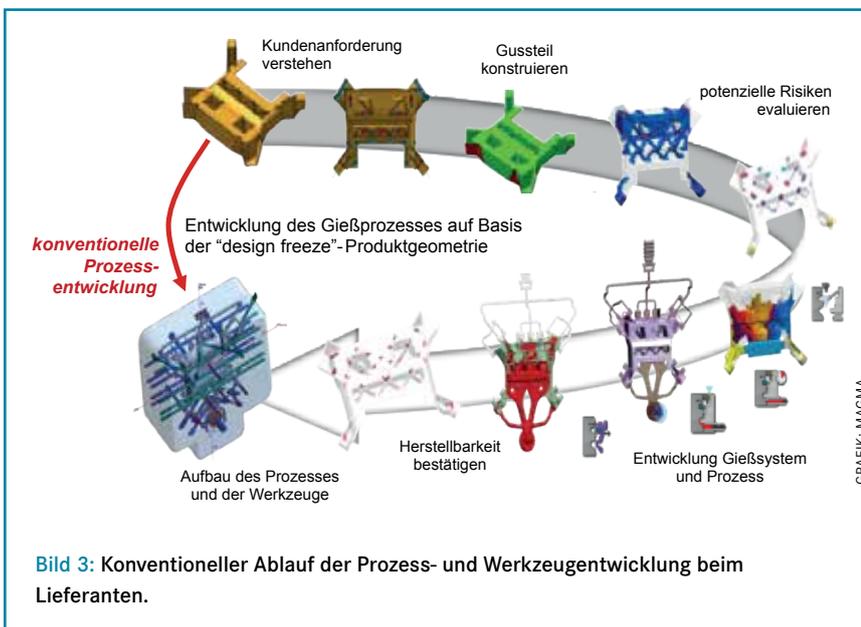


Bild 3: Konventioneller Ablauf der Prozess- und Werkzeugentwicklung beim Lieferanten.

ein optimales Füllen unter Vermeidung von Lufteinschlüssen und übermäßigem Temperaturverlust in Gießsystem und Bauteil anzustreben. Die Analyse und Identifizierung dieser potenziellen Risiken wird heute routinemäßig mit einem sinnvoll reduzierten Modell unter Berücksichtigung des Pressrestes durchgeführt. Ein besonderes Potenzial zur Vermeidung der oben genannten Risiken liegt auch in der entsprechenden Gestaltung der Prozesseinstellungen des Anfahrprozesses des Gießkolbens in der Schusskammer (Bild 4). Ungünstig gewählte Prozesseinstellungen führen sofort zu eingeschlossener Luft in der Gießkammer, die mit der weiteren Kolbenbewegung unkontrolliert ins Bauteil befördert wird.

Das nachfolgende Beispiel zeigt die systematische Analyse und Optimierung des Dosier- und Schussprofils unter Verwendung der neuen Methodik des Autono-

mous Engineering mit der neuen Version der Simulationssoftware Magssoft 5.4 (Bild 5). Die virtuellen Untersuchungen haben zwei Ziele:

1. Vermeidung von Lufteinschlüssen während des Dosier- und Anfahrprozesses und
2. Vermeidung starker Temperaturverluste der Schmelze in der Gießkammer.

Hierzu werden die Kolbengeschwindigkeit in der ersten Phase zwischen konstant 0,1 m/s und 0,4 m/s in Schritten von 0,1 m/s sowie gleichzeitig die Abstezeit nach dem Dosierprozess zwischen 1 s und 5 s in Schritten von 1 s variiert. Ein Qualitätskriterium zur Bewertung des virtuellen Versuchsplans ist die mittlere Temperatur der Schmelze in der Gießkammer am Ende des Füllens. Die Bewertung potenzieller Lufteinschlüsse in der Gießkammer erfolgt aufgrund der Komplexität

der Fragestellung anhand der 3-D-Ergebnisse.

Essentieller Bestandteil bei der Durchführung systematischer virtueller Prozessanalysen ist die effiziente Vereinfachung des Simulationsmodells. Im vorliegenden Fall wurden das komplexe Strukturbauteil sowie Überläufe und Entlüftungssystem durch eine vereinfachte Geometrie gleichen Volumens ersetzt. Für den vorliegenden virtuellen Versuchsplan wird darüber hinaus lediglich das Formfüllen ohne Aufheizzyklen für das Werkzeug gerechnet. Magssoft 5.4 unterstützt die Durchführung methodischer virtueller statistischer Analysen, angefangen von der Einzelsimulation, über virtuelle Versuchspläne (Design of Experiments, DoE) bis zur autonomen Optimierung unter Verwendung eines genetischen Algorithmus. Die sich aus den Freiheitsgraden ergebenden 20 Experimente des virtuellen Versuchsplans wurden vollfaktoriell berechnet.

Bild 6 zeigt den Vergleich der unterschiedlichen Abstezeiten für einige Kombinationen des Versuchsplans mit konstanten Gießkolbengeschwindigkeiten von 0,1 bis 0,3 m/s. Die Beruhigungszeit der Schmelze in der Gießkammer führt zu unterschiedlichen Risikopotenzialen für einen Lufteinschluss in der Gießkammer durch vorzeitiges Verschließen der Gießlaufumlenkung am Übergang zur Gießkammer. Die Kombination aus 2 s Abstezeit bei 0,2 m/s Kolbengeschwindigkeit führt zu einer kontinuierlichen Verdrängung der Luft vor der sich aufstauenden Schmelzefront und damit zur Vermeidung von eingeschlossener Luft in der Gießkammer. Grundsätzlich zeigt sich, dass es für jede Kolbengeschwindigkeit eine passende Abstezeit gibt, mit der ein akzeptables Füllprofil in der Gießkammer erzeugt werden kann. Tendenziell nimmt das Risiko eines Lufteinschlusses jedoch mit zunehmender Kolbengeschwindigkeit zu.

Mit einer Korrelationsmatrix können die Einflüsse von Gießgeschwindigkeit und Abstezeit auf den Temperaturverlust der Schmelze in der Gießkammer quantitativ bewertet werden (Bild 7). Erwartungsgemäß ergibt sich ein klarer Zusammenhang zwischen den beiden variierten Prozessgrößen und der mittleren Temperatur der Schmelze. Zwischen der schnellsten Parameterkombination (1 s Abstezeit bei 0,4 m/s Kolbengeschwindigkeit) und der langsamsten Kombination (5 s / 0,1 m/s) ergibt sich eine Temperaturdifferenz der Schmelze in der Gießkammer von 55 K. Der Temperaturverlust in der Gießkammer bis zum Ende des Formfüllens beträgt bei einer Dosiertemperatur von 700 °C min-

Gießtemperatur 700 °C = 700 °C in der Simulation

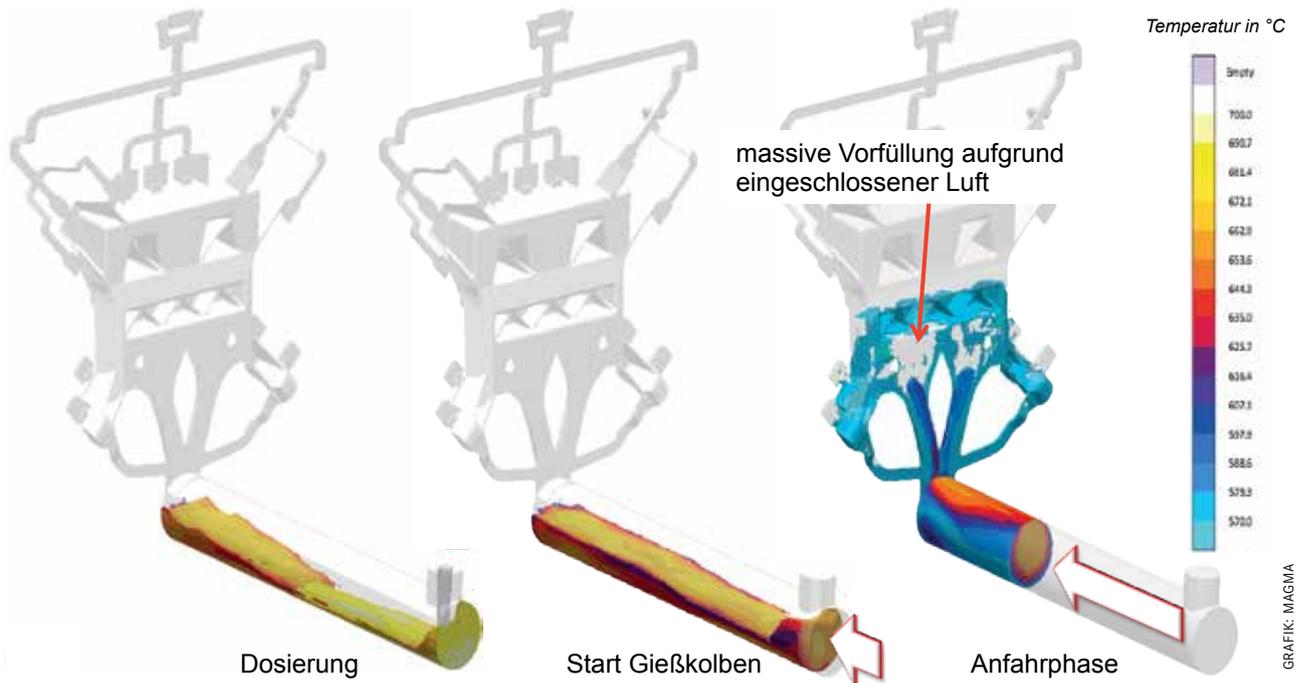


Bild 4: Formfüllanalyse des Verbindungsknotens mit Berücksichtigung der Gießkammer. Das gewählte Schussprofil führt zu massiven Lufteinschlüssen und einem starken Temperaturverlust der Schmelze während des Anfahrprozesses des Gießkolbens (1. Phase).

destens 66 K. Dies gilt für die kürzeste Abstezeit und höchste Kolbengeschwindigkeit.

Als bester Kompromiss aus den angestrebten Zielen ergeben sich eine Abstezeit von 2 s und eine Kolbengeschwindigkeit von 0,2 m/s. Diese Parameter werden mit dem Gesamtmodell für die komplexere Bauteilgeometrie überprüft (Bild 8). Die Ergebnisse sind im Vergleich zur Ursprungsvariante dargestellt. Die optimierten Prozesseinstellungen zeigen einen gleichmäßigen Transport der Luft aus der Gießkammer durch die Bauteilkavität. Der Temperaturverlust in der Gießkammer bis zum Ende des Formfüllens beträgt ca. 90 K. Bild 9 vergleicht die optimierten Prozesseinstellungen mit dem reduzierten Simulationsmodell ohne Gießkammer. Das nahezu identische Füllverhalten der beiden Modelle bestätigt, dass das schnellere Simulationsmodell ohne Gießkammer für den vorgelagerten Entwicklungsprozess der Gießtechnik genauso geeignet ist. Für eine Detailanalyse oder Prozessoptimierung der Vorgänge in der Gießkammer kann das Simulationsmodell nach Bedarf erweitert werden.

Optimierung des Sprühprozesses

Strukturbauteile sind geprägt durch großflächige, komplexe, dünnwandige Geometrien, kombiniert mit teilweise dickwan-

ZIELE SETZEN

Minimierung des Temperaturverlustes in der Gießkammer bei gleichzeitiger Vermeidung von Lufteinschlüssen

VARIABLEN DEFINIEREN

Design Variable	Lower Limit (m/s)	Upper Limit (m/s)	Step (m/s)
Filling - First Phase - Final Plunger Velocity	0.1	0.4	0.1

Design Variable	Lower Limit (s)	Upper Limit (s)	Step (s)
Dosing - Dwell Time	1.0	5.0	1.0

QUALITÄT SPEZIFIZIEREN

Name	Type	Value	Expression
Temperature	Maximize		{Cycle/L/Filling/Temperature/End of Filling/Avg/Skirt Chamber ID}

Lufteintrag ins Bauteil } Bewertung anhand klassischer 3D-Ergebnisse
 Risiko für Oxidbildung }

EFFIZIENZ SICHERN

- Verwendung eines einfachen Ersatzmodells
- Minimierung Vorbereitungszeit durch Nutzung von MAGMASOFT® Assistenten
- Relevante Prozesse betrachten
 - nur Formfüllung ohne Erstarrung
 - keine Aufheizzyklen
- Grundsätzlich gilt:
„So einfach wie möglich und so detailliert wie nötig“

METHODE WÄHLEN

Algorithm	Parameters						
<input type="radio"/> User Defined	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Design Variable</th> <th>Level</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Filling - First Phase - Final Plunger Velocity</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Dosing - Dwell Time</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>	Design Variable	Level	Filling - First Phase - Final Plunger Velocity	4	Dosing - Dwell Time	5
Design Variable	Level						
Filling - First Phase - Final Plunger Velocity	4						
Dosing - Dwell Time	5						
<input type="radio"/> Sobol							
<input checked="" type="radio"/> Full Factorial	Number of combinations: 20						
<input type="radio"/> Reduced Factorial							

GRAFIK: MAGMA

Bild 5: Systematische Optimierung relevanter Prozessparameter zur Vermeidung von Lufteinschlüssen und Temperaturverlusten in der Gießkammer. Die methodische Vorgehensweise unterstützt eine zielgerichtete und effiziente Bearbeitung gießtechnischer Fragestellungen mit Magmasoft.

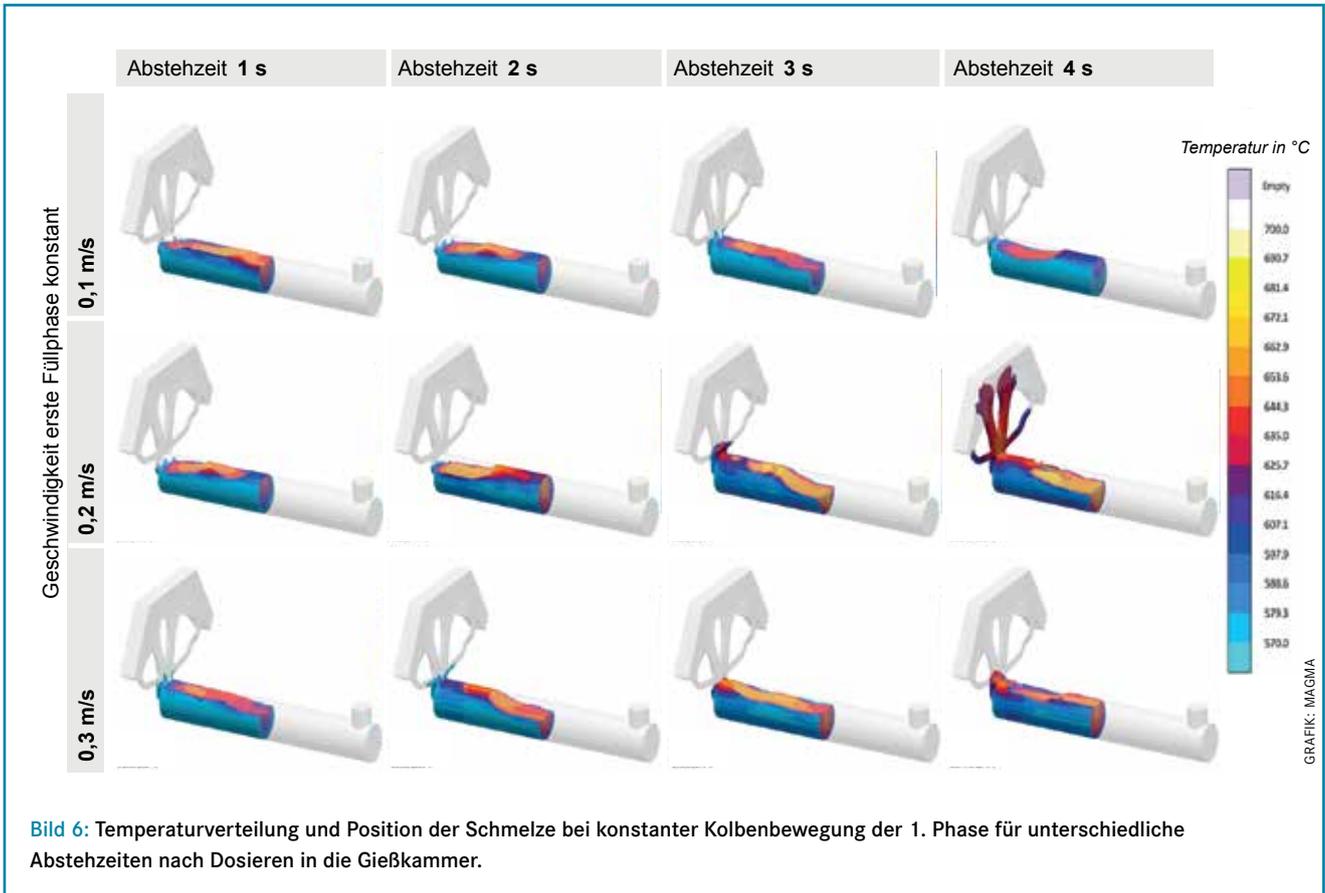


Bild 6: Temperaturverteilung und Position der Schmelze bei konstanter Kolbenbewegung der 1. Phase für unterschiedliche Abstehzeiten nach Dosieren in die Gießkammer.

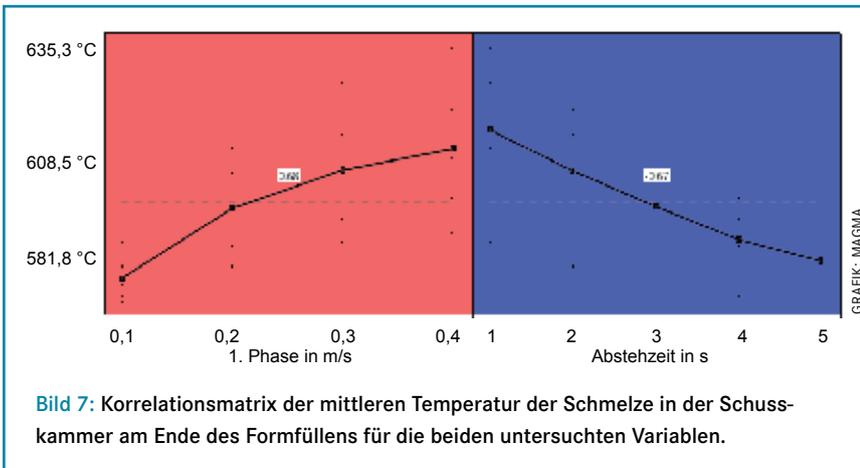


Bild 7: Korrelationsmatrix der mittleren Temperatur der Schmelze in der Schusskammer am Ende des Formfüllens für die beiden untersuchten Variablen.

digen Bereichen für Aufnahme- oder Anschraubpunkte. Minimale Ausformschrägen und hohe Anforderungen an die Oberflächenqualität der Bauteile stellen dabei eine besondere Herausforderung für den Sprühprozess dar. Die Vermeidung von frühzeitigen Werkzeugschädigungen aufgrund von Thermoschock durch klassisches wasserbasiertes Sprühen hat hohe Priorität.

Die neuen Möglichkeiten in Magma-soft 5.4 erlauben die Optimierung des Sprühprozesses im Detail. Eine detaillierte Analyse der Oberflächentemperaturen des Werkzeuges oder die Beurteilung der Benetzung einzelner Werkzeugbereiche zur Optimierung der Qualität des Guss-

teiles im Hinblick auf Kaltlauf, Porosität und Kleben sind ebenso möglich wie die Bewertung des Verzugs von Werkzeugkomponenten oder die Optimierung der lokalen Lebensdauer.

Für das Strukturbauteil wurde das Simulationsmodell um eine realitätsgetreue Abbildung des Sprühprozesses inklusive richtungsabhängigen Sprühdüsen mit Sprühkegeln, Sprühkreisen und Ablaufprogramm erweitert (**Bild 10**).

Die Auswertung von Temperaturmessungen im oberflächennahen Bereich veranschaulicht die Wirkungsweise des Sprühprozesses im Zusammenspiel mit der inneren Werkzeugtemperierung (**Bild 11**). Ausgehend von einer idealisier-

ten homogenen Starttemperatur des Werkzeuges erfolgt in den Bereichen 1 und 4 nach dem oberflächlichen Energieaustausch durch das Sprühen eine Rückwärmung der Oberfläche durch die im Werkzeug gespeicherte Energie. Insbesondere im Bereich 3 nahe dem Anschnitt entsteht über dem Zyklus eine deutliche Temperaturhysterese mit dem Risiko frühzeitiger Werkzeugschädigung durch sogenannte Brandrisse. Die im Bereich 2 eingebrachte innere Punktkühlung entzieht dem Werkzeug lokal Energie und reduziert die Rückwärmung der Werkzeugoberfläche.

Quantitative Bewertung der Formtemperierung

Die Auslegung geeigneter Werkzeugtemperierungen ist insbesondere bei der Anwendung von Minimalmengen-Sprühprozessen wichtig. Aufgrund des minimalen Energieaustauschs durch das Sprühmedium muss ein Großteil der durch die Schmelze eingebrachten Energie über innere Werkzeugkühlungen abgeführt werden.

Die Anforderungen an eine optimale Werkzeugtemperierung sind vielfältig und teilweise gegensätzlich. Die Werkzeugtemperierung soll gleichzeitig die geforderte Gefügequalität im Gussteil sicherstellen, eine minimale Zykluszeit bei gleichzeitig minimaler Werkzeugbelastung erreichen sowie ein sicheres Formfüllen bei insge-

samt minimalem Energieeinsatz gewährleisten.

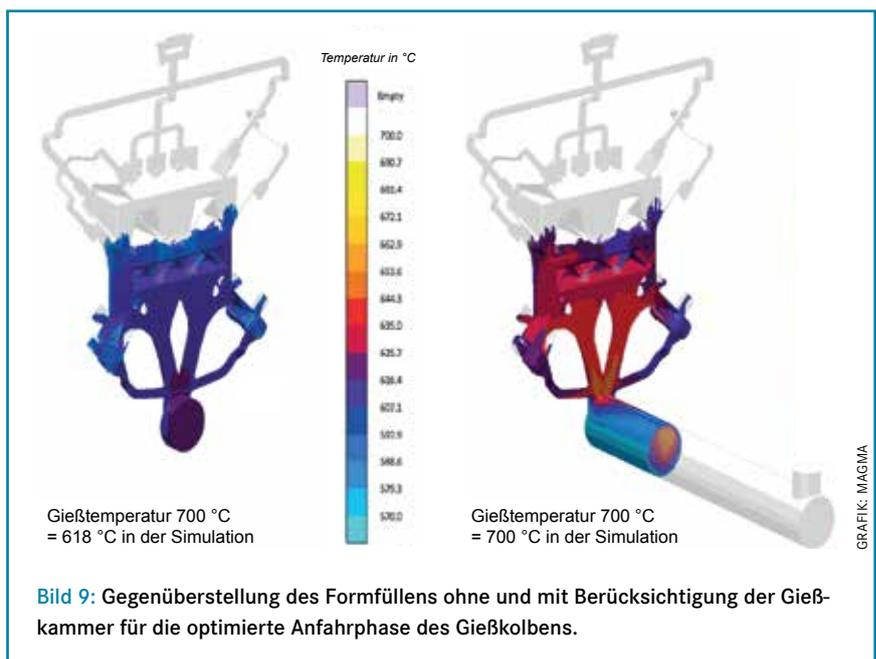
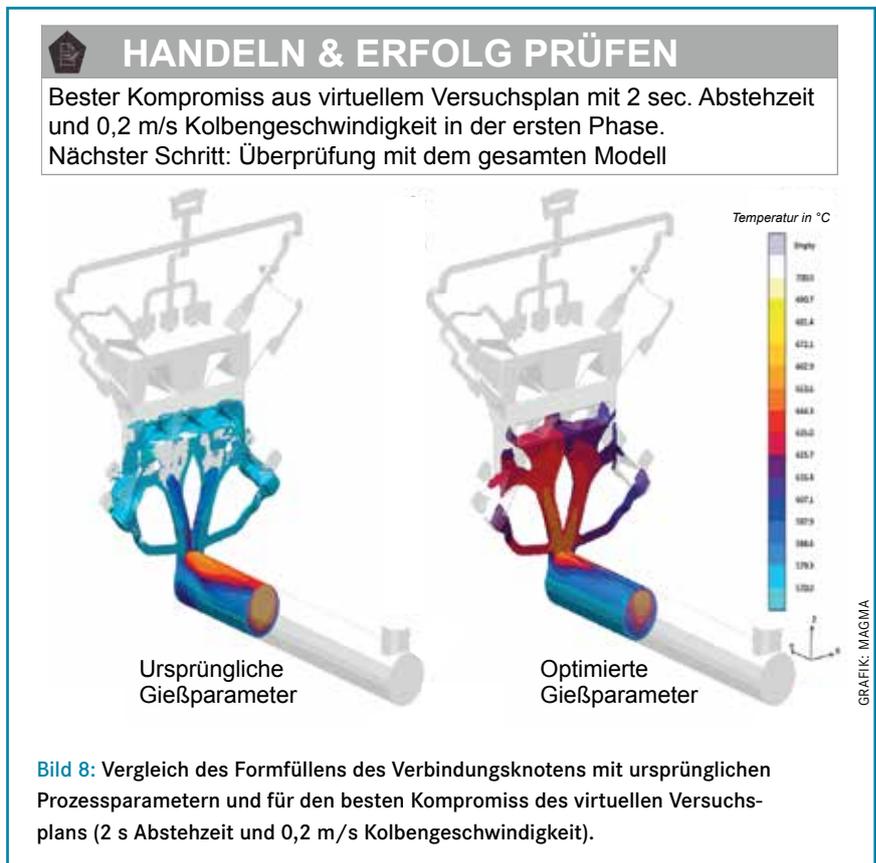
Die Lösung dieses vielfachen Zielkonflikts ist nur durch Transparenz über die lokalen Wirkungen komplexer Werkzeugtemperierungen sowie ihre Abhängigkeit der in der Praxis verfügbaren Steuergrößen (Temperatur des Temperierungsmediums, Durchflussrate) möglich. **Bild 12** veranschaulicht die in Magmasoft 5.4 integrierte Strömungssimulation in einem komplexen Temperiereinsatz. Die Strömungsberechnung kann zeitgleich oder separat zur Formfüllsimulation durchgeführt werden und liefert neben Ergebnissen zur Strömungsrichtung, zur Geschwindigkeit, zu Drücken und zur Temperatur vor allem die lokal an der Grenzfläche zur Schmelze resultierenden wirksamen Wärmeübergangskoeffizienten.

Dieses erweiterte Prozessverständnis erlaubt eine systematische, automatisierte Bewertung und Optimierung beliebiger Werkzeugtemperierungen. Als Ziele können Prozesseinstellungen zur Verbesserung der Bauteilqualität, die Beeinflussung von Prozesszeiten (Zykluszeit), wie auch die Verminderung von Werkzeugbelastungen und die Bewertung der Energiebilanz verfolgt werden. Dabei können als Freiheitsgrade sowohl die Geometrie als auch Lage der Temperierung im Werkzeug und alle Prozessbedingungen variiert werden. **Bild 13** zeigt die Auswirkungen unterschiedlicher Strömungssituationen im Temperiereinsatz auf die Verteilung der lokalen Kühlleistung am Beispiel des Wärmeübergangskoeffizienten. Die Verwendung eines Rohres zur Führung der Strömung führt zur gewünschten Steigerung der Kühlleistung im Bereich des Fingers.

Zur Bewertung der Prozessstabilität wurde der Einfluss unterschiedlicher Durchflussraten (5 bis 25 l/min in Schritten von 5 l/min) auf die lokale Erstarrungszeit im kritischen Bauteilbereich in einem virtuellen Versuchsplan untersucht. Das entsprechende Haupteffektdiagramm in **Bild 14** zeigt eine nichtlineare Reduzierung der Erstarrungszeit mit zunehmender Durchflussrate. Eine detaillierte Auswertung der Druckverteilungen im Temperiereinsatz für die unterschiedlichen Durchflussraten erklärt die Ursache. Mit steigender Durchflussrate erhöht sich der Druckverlust im System und führt zu einer zunehmenden Ineffizienz.

Wärmehaushalt der Form

Eine Bewertung des Wärmehaushaltes der Form sowie der thermischen Stabilität des Gesamtsystems kann mit der in Magmasoft 5.4 integrierten Energiebilanz erfolgen (**Bild 15**). Mit Hilfe der intuitiven



Übersicht kann der Energieaustausch zwischen allen Materialien oder Materialgruppen (z. B. Gussteil, Gießsystem, Werkzeugbestandteil) über dem ganzen Prozesszyklus, einzelnen Prozessphasen oder genau definierten Zeitabschnitten analysiert und bewertet werden. Beispielsweise können die über den Prozesszyklus abgeführten Energiemengen durch innere Werkzeugtemperierung und äußeres Sprühen unmittelbar miteinander verglichen und im Hinblick auf Energie- und Kosteneffizienz optimiert werden.

Die wirtschaftliche und effiziente Anwendung der Gießprozess-Simulation bedingen den Einsatz dieser vielfältigen Möglichkeiten in Form eines flexiblen Werkzeugkastens, der zielgerichtet eingesetzt wird. Für jede Phase der Prozessauslegung gilt für die Simulation „so einfach wie möglich und so detailliert wie nötig“. Die Methodik des Autonomous Engineering mit Magmasoft unterstützt die methodische Bearbeitung von Detailfragestellungen und die Identifizierung konkreter fertigungstechnischer Lösun-

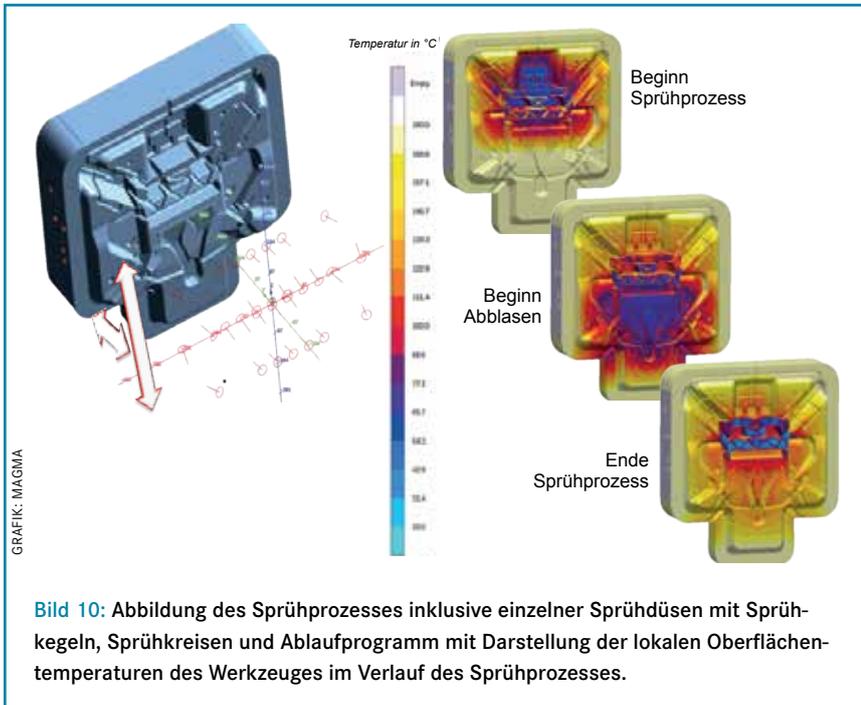


Bild 10: Abbildung des Sprühprozesses inklusive einzelner Sprühdüsen mit Sprühkegeln, Sprühkreisen und Ablaufprogramm mit Darstellung der lokalen Oberflächentemperaturen des Werkzeuges im Verlauf des Sprühprozesses.

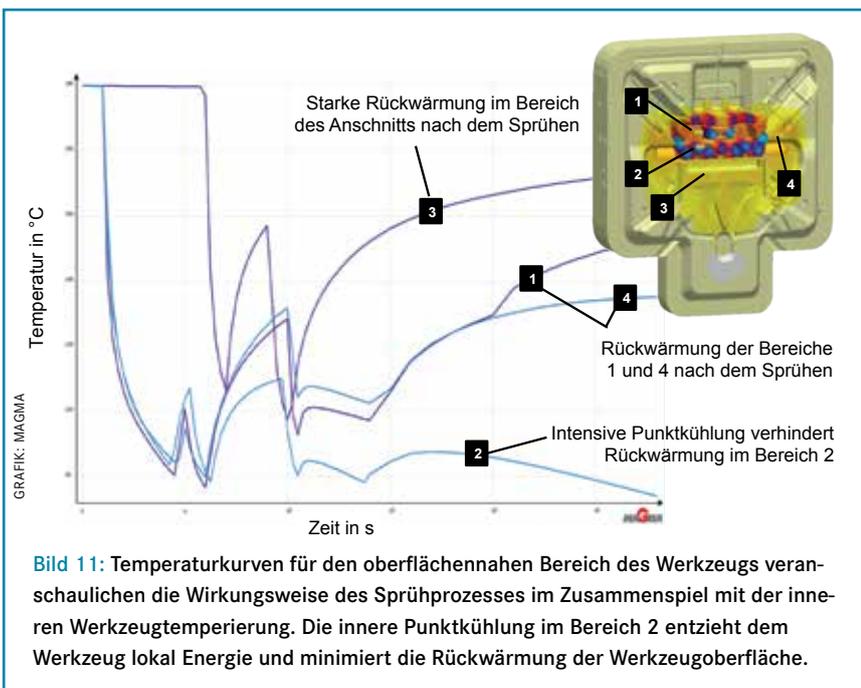


Bild 11: Temperaturkurven für den oberflächennahen Bereich des Werkzeuges veranschaulichen die Wirkungsweise des Sprühprozesses im Zusammenspiel mit der inneren Werkzeugtemperierung. Die innere Punktkühlung im Bereich 2 entzieht dem Werkzeug lokal Energie und minimiert die Rückwärmung der Werkzeugoberfläche.

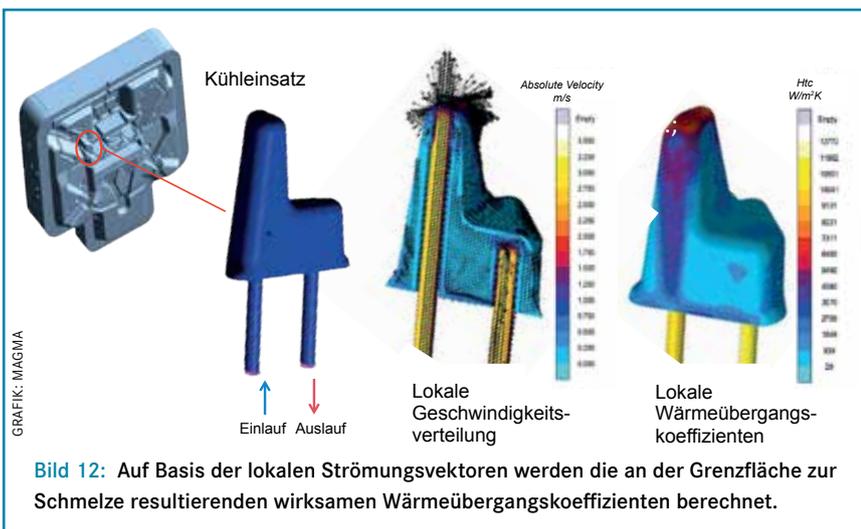


Bild 12: Auf Basis der lokalen Strömungsvektoren werden die an der Grenzfläche zur Schmelze resultierenden wirksamen Wärmeübergangskoeffizienten berechnet.

gen. Für die systematische Untersuchung von Varianten oder Prozesseinstellungen empfiehlt sich eine sinnvolle Vereinfachung oder Vergrößerung des Simulationsmodells mit anschließender Validierung der identifizierten Lösung oder deren Alternativen am genauen Modell.

Robuste Produkte und Prozesse

Neben den Zielen Ressourcen- und Kosteneffizienz hat die prozesssichere Einhaltung der festgelegten Qualitätsanforderungen bei Strukturbauteilen absolute Priorität. Zur Bewertung der Robustheit des entwickelten Gießsystems und festgelegter nomineller Prozessparameter wird das virtuelle Modell um kritische Fertigungsparameter sowie deren Schwankungsbreiten ergänzt. Der Fachmann legt seine Ziele, die zu variierenden Freiheitsgrade und die Qualitätskriterien für die Bewertung des Erfolgs fest. Die Untersuchung des sich daraus ergebenden virtuellen Versuchsplans oder Prozessfensters erfolgt in Magmasoft vollautomatisch ohne weiteres Zutun des Anwenders (Bild 16).

Zur leichteren Bewertung der Gussteilqualität wurde das Simulationsmodell des Gussknotens um sogenannte Auswertgebiete (Evaluation Areas) ergänzt. Diese Auswertgebiete messen die berechneten Qualitätskriterien in Bereichen von besonderem Interesse. In diesem Beispiel betrifft das die funktionskritischen, dickwandigen, unteren Verbindungspunkte (Evaluation Area 1) oder eine im Hinblick auf das Formfüllen sensible dünne Wanddicke (Evaluation Area 2) (siehe Bild 17). Aus Erfahrungswissen enthält die Gießkurve des geplanten Nennprozesses eine Abbremsung des Gießkolbens am Ende des Formfüllens zur Vermeidung von Grabbildung (siehe Schusskurve in Bild 17).

Im nächsten Schritt wird das Simulationsmodell um die zu untersuchenden kritischen Prozessvariablen und deren Schwankungsbreite, also das relevante Prozessfenster, ergänzt. Im vorliegenden Fall handelt es sich um Veränderungen in der Dosiermenge (im Simulationsmodell als Pressrestdicke definiert), die Schwankung der Gießtemperatur +/-15 °C, die unvollständige Nachverdichtung (3. Phase) und die Veränderung der Intensität einer Punktkühlung im Bereich der funktionskritischen, dickwandigen, unteren Verbindungspunkte. Den Variablen werden ein unteres und ein oberes Limit sowie eine Schrittweite zugewiesen. Qualitative Parameter oder Geometrieänderungen können als variabel, aktiv oder inaktiv definiert werden (siehe Bild 18).

Für den Gussknoten wurden alle möglichen Varianten des virtuellen Versuchsplans bzw. Prozessfensters vollständig (vollfaktoriell) untersucht. Die in Bild 19 dargestellte Korrelationsmatrix ist eine Zusammenfassung aller Haupteffekte, also der Abhängigkeiten der untersuchten Prozessvariablen von den definierten Qualitätskriterien des Strukturbauteils. Als Qualitätskriterien können alle in Magmasoft verfügbaren Ergebnisse für alle im Modell befindlichen Materialien (Gussbauteil, Gießsystem, Werkzeug) genutzt werden.

Der quantitative Vergleich aller Varianten unter Nutzung statistischer Methoden liefert belastbare Ergebnisse ohne subjektive Einflüsse. Je größer die Steigung und je intensiver die Farbe eines einzelnen Diagramms ist, desto stärker ist der Einfluss des betrachteten Parameters auf das entsprechende Qualitätskriterium. Für den Gussknoten zeigt sich mit einem Blick die Bedeutung eines genauen Dosierprozesses für alle relevanten Qualitätskriterien. Die Ursache liegt in der Verschiebung der Gießkurve in Abhängigkeit von der Dosiermenge. Eine zu geringe Füllmenge verschiebt die gesamte Gießkurve (Start, Beschleunigung zweite Phase und Abbremspunkt) hin zu früheren Zeiten, wodurch der Abbremspunkt vom Ende des Formfüllens ins Bauteil verschoben wird. Die Folge ist eine massive Verlängerung der Füllzeit mit dem entsprechenden Risiko für Fließfehler und Kaltlauf. Eine zu große Füllmenge führt zwangsläufig zur Verschiebung der Gießkurve hin zu späteren Zeiten, wodurch im schlimmsten Fall die programmierte Abbremsung nicht mehr wirkt und ein hohes Risiko für Überspritzen und Gratbildung entsteht.

Durch eine systematische virtuelle Analyse von Prozessvariationen kann reales Prozesswissen erzeugt werden, lange bevor erste Bauteile gegossen sind. Natürlich nimmt eine umfangreiche virtuelle Prozessanalyse mehr Zeit in An-

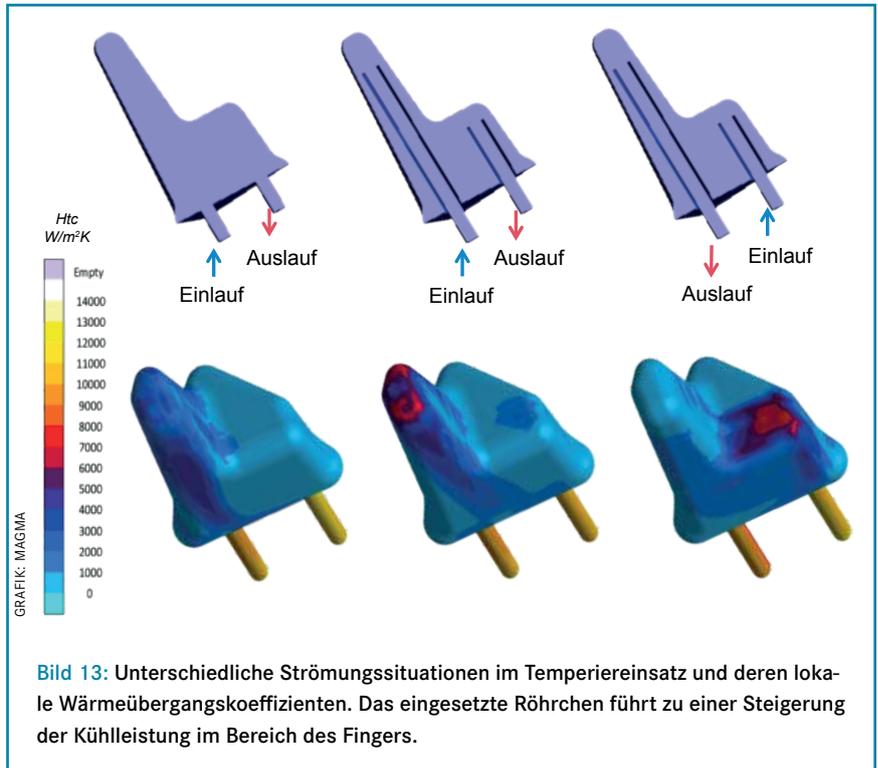


Bild 13: Unterschiedliche Strömungssituationen im Temperiereinsatz und deren lokale Wärmeübergangskoeffizienten. Das eingesetzte Röhrchen führt zu einer Steigerung der Kühlleistung im Bereich des Fingers.

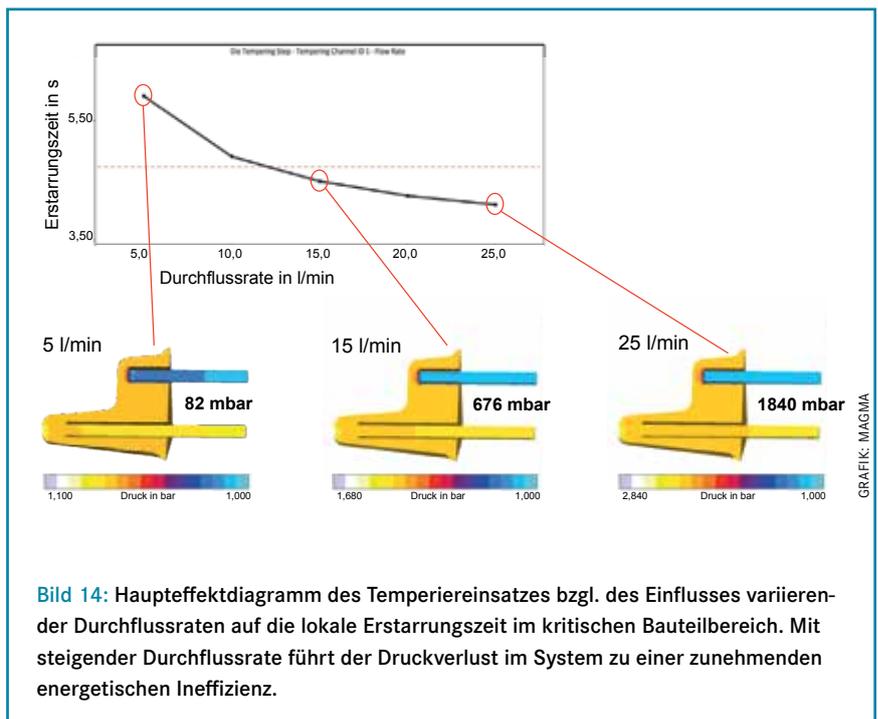


Bild 14: Haupteffektdiagramm des Temperiereinsatzes bzgl. des Einflusses variierender Durchflussraten auf die lokale Erstarrungszeit im kritischen Bauteilbereich. Mit steigender Durchflussrate führt der Druckverlust im System zu einer zunehmenden energetischen Ineffizienz.



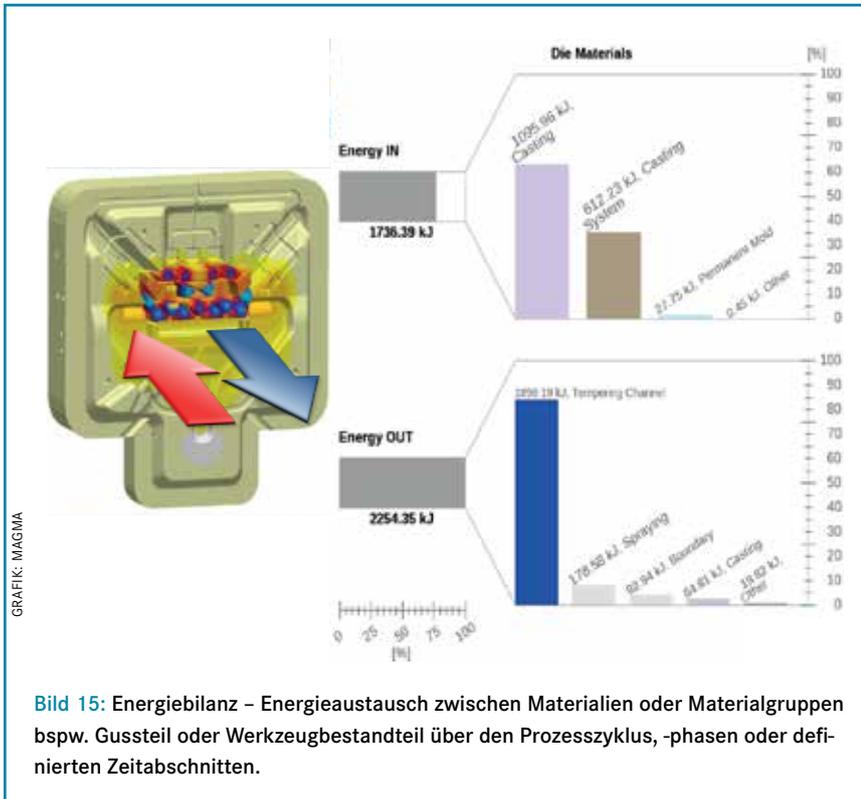


Bild 15: Energiebilanz – Energieaustausch zwischen Materialien oder Materialgruppen bspw. Gussteil oder Werkzeugbestandteil über den Prozesszyklus, -phasen oder definierten Zeitabschnitten.

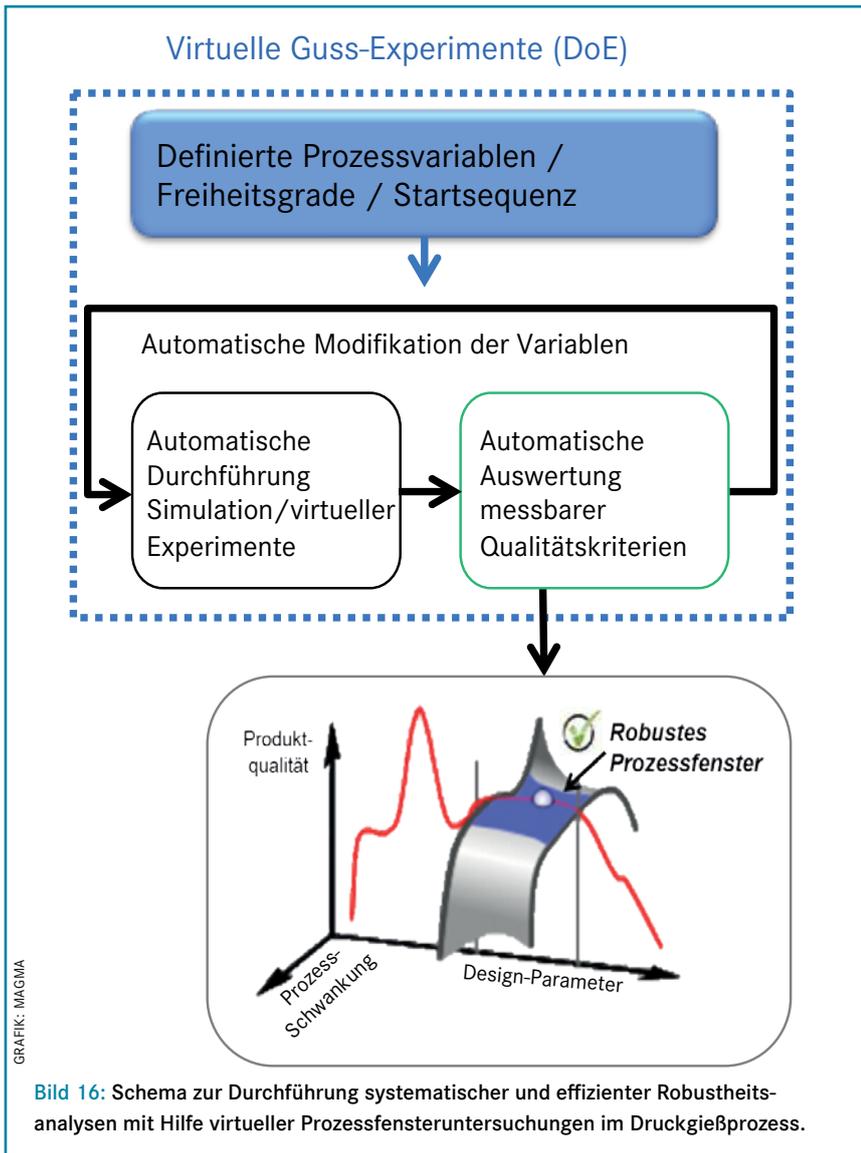


Bild 16: Schema zur Durchführung systematischer und effizienter Robustheitsanalysen mit Hilfe virtueller Prozessfensteruntersuchungen im Druckgießprozess.

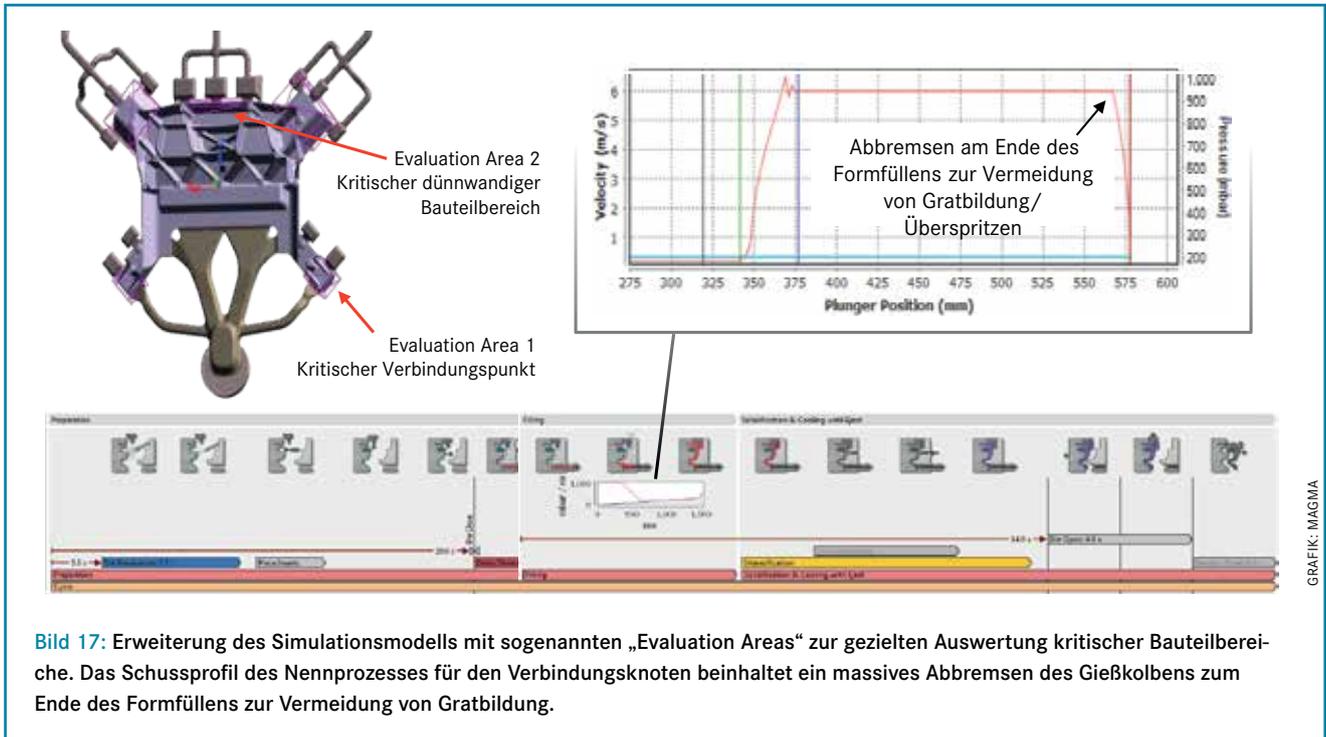
spruch als ein einzelner Simulationsdurchlauf. Andererseits ist eine derartige Untersuchung in der Praxis überhaupt nicht durchführbar oder nicht wirtschaftlich. Die so gewonnen Erkenntnisse unterstützen die Auslegung robuster Prozesse und sichern einen reibungslosen Produktionsanlauf [2].

Bewertung der gesamten Prozesskette

Eine abgesicherte und belastbare Qualitätsvorhersage für Strukturbauteile erfordert neben der methodischen Auslegung der Werkzeug- und Prozesstechnik für den Guss die Berücksichtigung der gesamten Prozesskette. Für die zuverlässige Eigenschafts- und Verzugsvorhersage von Strukturkomponenten betrifft dies insbesondere die Prozessschritte nach der Entnahme des Gussteils aus dem Druckgießwerkzeug.

Bild 20 verdeutlicht schematisch die durchgängige Eigenschafts- und Verzugsvorhersage über die Prozesskette Gießen bis zur Wärmebehandlung für eine Federbeinaufnahme aus Aluminium. Mit MagmaSoft können die aus dem Fertigungsprozess entstehenden Eigenspannungen des Bauteils und der resultierende Verzug zu jedem Zeitpunkt in der Prozesskette berechnet und bewertet werden. Die frühzeitige Identifikation potenzieller Risiken im Rahmen der Designphase erlaubt die Implementierung von Vermeidungsmaßnahmen mit allen verfügbaren Freiheitsgraden. Dies können Änderung des Bauteildesigns, vorbeugende geometrische Anpassungen von Werkzeugen oder eine angepasste Auslegung des Wärmebehandlungsprozesses sein. Die prozesssichere Einhaltung des Verzugs innerhalb der geforderten Toleranzgrenzen stellt für komplexe, großflächige Strukturbauteile in der Wärmebehandlung eine besondere Herausforderung dar. In der Regel beginnt die Auslegung der Wärmebehandlungsgestelle erst, nachdem die ersten Gussteile aus der Fertigung beim Wärmebehandler ankommen sind und ist meist geprägt durch Versuch und Irrtum. Virtuelle Wärmebehandlungsversuche ermöglichen dagegen eine optimierte Gestellauslegung bereits in der Planungsphase.

Voraussetzung für die Verzugsvorhersage ist die Berechnung der lokalen Eigenspannungen und effektiven plastischen Dehnungen zu jedem Zeitpunkt in der Prozesskette. Dabei werden alle relevanten Prozessschritte berücksichtigt: Erstarrung und Entformung des Bauteils, Abschrecken, Abtrennen des Gießsystems, Aufheizen, Lösungsglügen, Ab-



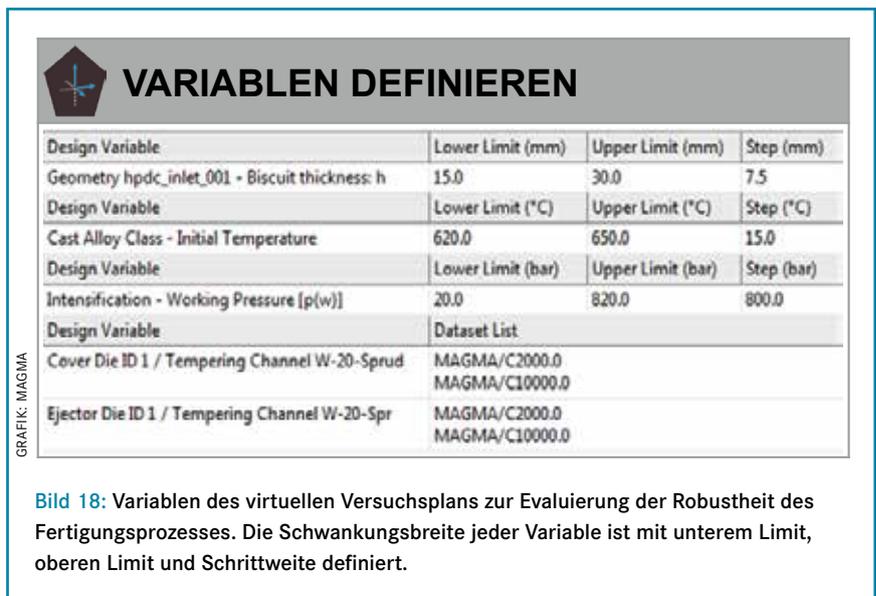
GRAFIK: MAGMA

Bild 17: Erweiterung des Simulationsmodells mit sogenannten „Evaluation Areas“ zur gezielten Auswertung kritischer Bauteilbereiche. Das Schussprofil des Nennprozesses für den Verbindungsknoten beinhaltet ein massives Abbremsen des Gießkolbens zum Ende des Formfüllens zur Vermeidung von Gratbildung.

schrecken und Anlassen während der Wärmebehandlung bis zur Berücksichtigung einer finalen mechanischen Bearbeitung [3]. **Bild 21** zeigt den Verzug des Strukturbauteils nach einer klassischen T6-Wärmebehandlung, bestehend aus Lösungsglügen, Abschrecken und Anlassen. Die Simulation der Wärmebehandlung mit Magmasoft verwendet ein temperatur- und dehnratenabhängiges Kriechmodell, das die Lasten auf das Bauteil aufgrund der Schwerkraft speziell während des Lösungsglühens und den daraus resultierenden Verzug berücksichtigt.

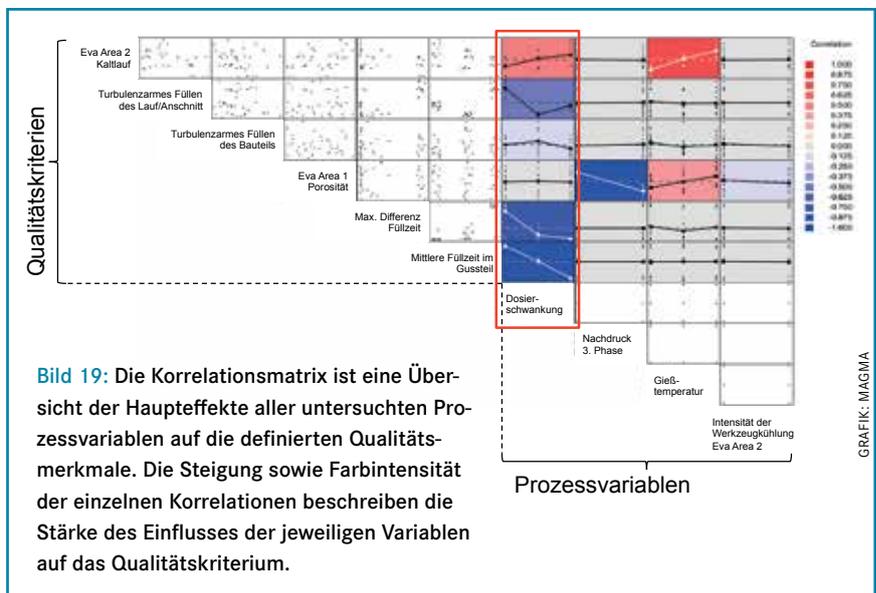
Die mit der Software für den gesamten Fertigungsprozess vorhergesagten lokalen plastischen Dehnungen und Eigenspannungen erweitern und verfeinern die Zustandsbeschreibung des Strukturbauteils vor der virtuellen CAE-Funktionsanalyse (**Bild 22**). Aus den lokalen plastischen Dehnungen während der Erstarrung können irreversibel vorgeschädigte Bereiche des Gusswerkstoffs identifiziert werden. Bereiche signifikanter lokaler VonMises-Spannungen nach der Wärmebehandlung ergänzen das Lastkollektiv der FE-Crashsimulation. Eine ungünstige Überlagerung hoher Lasten aus der Funktionssimulation mit lokal reduzierten Eigenschaften des Gussbauteils kann zu einem erhöhten Versagensrisiko beim Crash führen.

Die systematische Integration der berechneten lokalen Eigenschaften des Bauteils aus dem Fertigungsprozess in die virtuelle Funktions- und Risikoanalyse der Konzeptentwicklung ermöglicht



GRAFIK: MAGMA

Bild 18: Variablen des virtuellen Versuchsplans zur Evaluierung der Robustheit des Fertigungsprozesses. Die Schwankungsbreite jeder Variable ist mit unterem Limit, oberem Limit und Schrittweite definiert.



GRAFIK: MAGMA

Bild 19: Die Korrelationsmatrix ist eine Übersicht der Haupteffekte aller untersuchten Prozessvariablen auf die definierten Qualitätsmerkmale. Die Steigung sowie Farbintensität der einzelnen Korrelationen beschreiben die Stärke des Einflusses der jeweiligen Variablen auf das Qualitätskriterium.

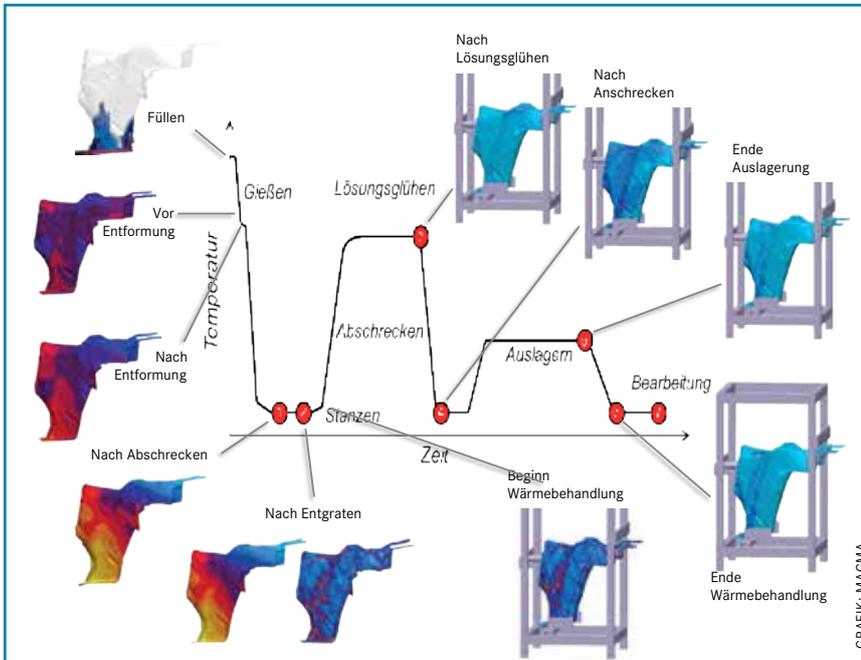


Bild 20: Virtuelle Berücksichtigung der gesamten Prozesskette im Strukturgießprozess inklusive der Wärmebehandlung.

genauere Vorhersagen. Das virtuell generierte systematische Wissen zu Korrelationen zwischen Fertigungsparametern und Qualitätsmerkmalen des Gussteils befähigt zur Auslegung robusterer Produkte und Fertigungsprozesse durch frühzeitig abgesicherte Entscheidungen (Bild 23).

Zusammenfassung

Methodisches virtuelles Experimentieren oder Autonomous Engineering mit Magmasoft ist im Druckgießverfahren eine zukunftsweisende Methodik, um Werkzeuge und Fertigungsabläufe durch transparentes und quantitatives Prozessverständnis optimal und robust zu gestalten. Die neue Vorgehensweise ermöglicht neben der Identifizierung der konkreten fertigungstechnischen Lösung die Festlegung des besten Kompromisses, den der Gießer hinsichtlich Qualität und Wirtschaftlichkeit anstrebt. Nahezu frei von wirtschaftlichen oder produktiven Risiken kann so systematisches Wissen zu Korrelationen zwischen Fertigungsparametern und Qualitätsmerkmalen des Gussteils auch für komplexe Fragestellungen frühzeitig bereits in der Planungsphase generiert werden.

Frühzeitig abgesicherte Entscheidungen unterstützen sowohl den Produktentwickler als auch den Gießereifachmann bei der Auslegung robuster, kosten- und ressourceneffizienter Produkte und Prozesse. Die Anwendung dieses virtuell generierten Wissens bereits in der Planungsphase bildet die Basis für einen CAE-Entwicklungsprozess, bei dem Bauteil und Prozess vom Konstrukteur und Gießer simultan optimiert werden.

Dr.-Ing. Horst Bramann, M.Sc. Laura Leineweber, Dr.-Ing. Jörg C. Sturm, MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen

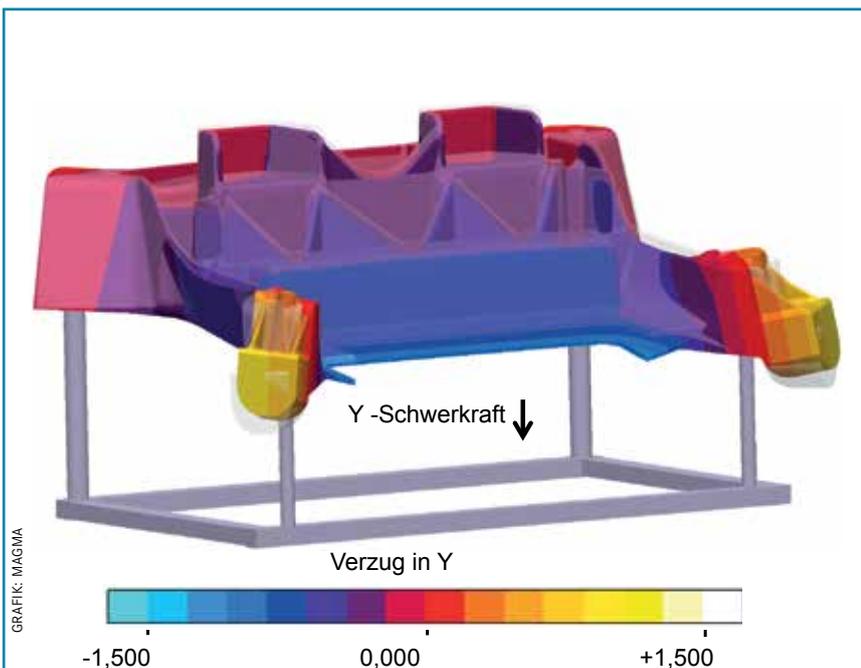


Bild 21: Verzug des Verbindungsknotens im Gestell in Y-Richtung am Ende der Wärmebehandlung als Folge des Schwerkrafteinflusses während des Lösungsglühens.

Literatur:

- [1] Leineweber, L.: Untersuchung der Einsetzbarkeit von Magmasoft in der frühen Konzeptphase der Karosseriebauteilentwicklung. Masterarbeit, GTA Kassel, 2015.
- [2] Bramann, H., u. a.: Casting process simulation for robust and optimized castings with tailored properties. NAFEMS World Congress, 2017, Stockholm.
- [3] Gaspers, H.-J., u. a.: Design Optimization of heat treatment support frames for aluminium alloy structural cast parts using virtual experimentation. 22. IFHTSE Euro pean conference on Heat Treatment, Venedig, 2016.

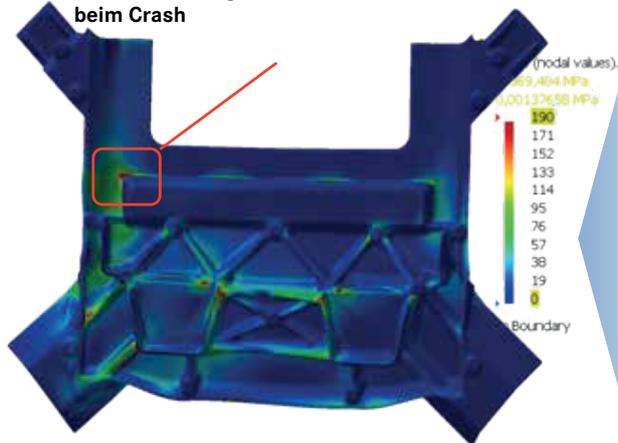
Hier kommuniziert die Gießereibranche

G GIESSEREI

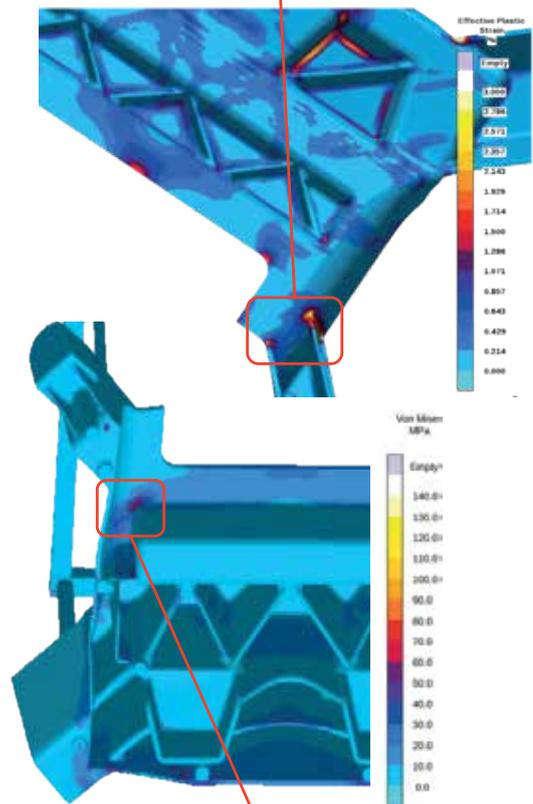
www.giesserei.eu

Kritischer Bereich hoher mechanischer Lasten aus der FEM-Crash-Simulation

erhöhtes Versagensrisiko beim Crash



Irreversible Vorschädigung des Gusswerkstoffs durch hohe plastische Dehnung während der Erstarrung



Signifikante Von Mises-Spannungen mit hohem Zuganteil nach Wärmebehandlung

Bild 22: Einbindung von Informationen (lokalen effektiven plastischen Dehnungen und Eigenspannungen) aus der Gießprozess-Simulation in die virtuelle Funktionsanalyse [1].

GRAFIK: MAGMA

Funktionsanalyse des Konzeptes

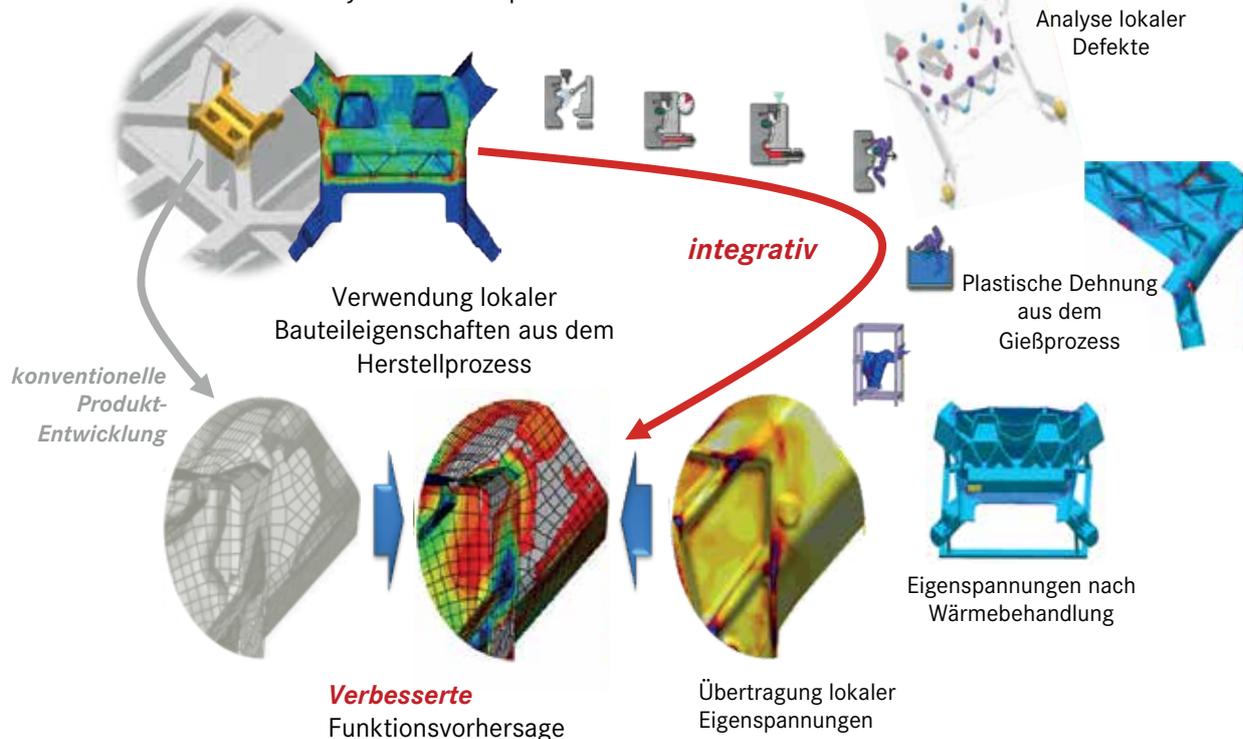


Bild 23: Innovativer CAE-Prozess: verbesserte Funktionsvorhersage und Risikoabschätzung durch Verwendung lokaler Bauteileigenschaften aus der Gießprozess-Simulation. Virtuell generiertes Wissen als Basis für abgesicherte Entscheidungen in der Konzept- und Designphase führt zu robusten Produkten und Prozessen [1].

GRAFIK: MAGMA