

# Vorhersage des Verzuges dünnwandiger Druckgussteile

VON ACHIM EGNER-WALTER, AACHEN

Mit der Fertigung dünnwandiger, komplexer Strukturteile aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen konnte die Gießereindustrie zahlreiche klassische Blechbauteile durch Gussteile substituieren. Diese Strukturbauteile zeichnen sich neben der geometrischen Komplexität durch hohe Anforderungen an Festigkeit und Duktilität aus, um im Crashfall genügend Sicherheitsreserven zu gewährleisten.

Aufgrund der im Vergleich zur Bauteildicke sehr großen Abmessungen der Bauteile, stellt die Einhaltung maßlicher Toleranzen für die Fertigung eine Herausforderung dar, die bisher häufig nur durch Richten zu gewährleisten ist. Richtarbeiten sind kostenintensiv und stören in der Fertigungskette. Ziel muss es daher sein, die Entstehung des Verzuges in der gesamten Fertigungsprozesskette zu beherrschen, und dadurch das Richten zu vermeiden.

Grundlage einer Beherrschung des Verzuges ist die Kenntnis sowohl der Mechanismen der Verzugsentstehung für alle Schritte des Fertigungsprozesses als auch die Kenntnis der gegenseitigen Beeinflussung dieser Mechanismen. Aufgrund der Parametervielfalt ist dies nur mit dem Einsatz der Prozesssimulation in einem vernünftigen Zeit- und Kostenrahmen möglich.

## Entstehung von Eigenspannungen und Verzug bei der Fertigung gegossener Strukturbauteile

Die Zahl der benötigten Schritte für die Fertigung von Strukturbauteilen hängt von der gewählten Legierung ab. In der Regel werden hierfür sowohl naturharte Legierungen des Typs Al Mg5Si2Mn als auch warmhärtende Legierungen des Typs Al Si10MgMn eingesetzt.

Bei der Verwendung von naturharten Legierungen besteht der Fertigungsprozess aus Gießen und Stanzen, bei Verwendung von warmhärtenden Legierungen aus Gießen, Stanzen Lösungsglühen, Abschrecken und Warmauslagern (Bild 1). Jeder dieser Prozessschritte beeinflusst den Verzug der Bauteile.

Beim Gießen (Markierung (1) in Bild 1) und beim Abschrecken (4) entsteht der Verzug aufgrund der in beiden Fällen auftretenden inhomogenen Abkühlung bis Raumtemperatur, die zu einer inhomogenen Schwindung führt. Wird die mit der Temperatur verbundene thermische Schwindung schnell abkühlender Bereiche behindert, so entstehen dort Zugspannungen. Aufgrund der – bei hohen Temperaturen – geringen Festigkeit des Gussteils, werden die Spannungen durch plastische Verformungen abgebaut. Die Spannungen bzw. plastischen Verformungen erreichen ihr Maximum, wenn der Temperaturunterschied zwischen schnell und langsam abkühlenden Bauteilbereichen maximal wird. Überschreiten die plastischen Dehnungen während der Erstarrung oder Abkühlung die Bruchdehnung des Werkstoffes, so treten Risse im Gussteil auf. Mit fortschreitender Abkühlung verringert sich die Temperaturdifferenz zwischen schnell und langsam abkühlenden Bereichen. Dadurch kommt

es erst zu einem Spannungsabbau und anschließend zu einem Vorzeichenwechsel der Spannungen. Der Spannungswechsel wird durch die plastischen Verformungen aufgrund des Spannungsabbaus bei hohen Temperaturen verursacht. Nach dem Erkalten stehen dünnwandige Bereiche unter Druck- und dickwandige Bereiche unter Zugeigenspannungen [1]. Der Mechanismus der Spannungsentstehung wird in Bild 2 am Beispiel des Spannungsgitters veranschaulicht.

Die beim Gießen (1) entstandenen Eigenspannungen lagern sich beim nachfolgenden Stanzen (2) um, was zu einer Änderung des Verzuges führt. Durch Bearbeitungs- oder Spannkkräfte können zusätzlich Spannungen im Gussteil erzeugt werden. Im ungünstigsten Fall treten während der Bearbeitung bereits Risse im Bauteil auf [2].

Beim Lösungsglühen (3) nimmt die Festigkeit des Werkstoffes dramatisch ab. Die Eigenspannungen aus dem Gießprozess werden beim Aufheizen durch Kriechen

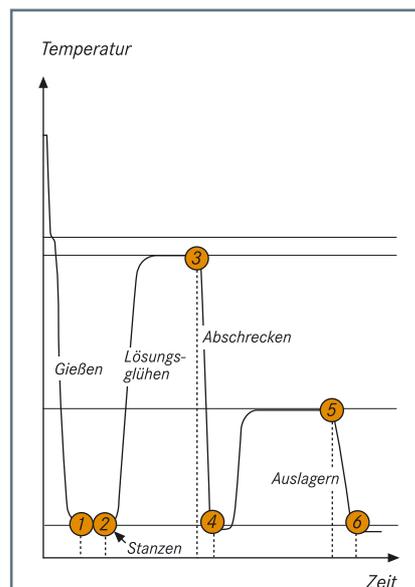


Bild 1: Temperaturverlauf bei der Fertigung gegossener, dünnwandiger Strukturbauteile

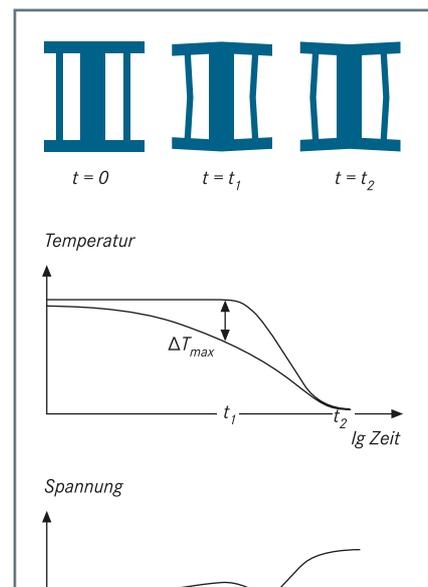


Bild 2: Mechanismus der Entstehung von Eigenspannungen und Verzug am Beispiel des Spannungsgitters

nahezu vollständig abgebaut. Gleichzeitig führt gerade bei Strukturbauteilen das Eigengewicht bereits zu bleibenden Verformungen, also Verzug. Beim Abschrecken (4) werden aufgrund inhomogener Abkühlung wie oben beschrieben wieder Eigenspannungen und Verzug erzeugt. Bei dem für Strukturbauteile häufig angewendeten Luftabschrecken sind die entstehenden Eigenspannungen und der Verzug in der Regel sehr gering. Das abschließende Warmauslagern (5) kann zu einem teilweisen Abbau der Eigenspannungen führen, jedoch nur, wenn die Eigenspannungen das für die Aktivierung von Kriechvorgängen notwendige Minimum überschreiten. Bei Strukturbauteilen ist dies normalerweise nicht der Fall.

Die Entstehung des Verzuges aufgrund des Gießens und Stanzens wird im Folgenden exemplarisch am Beispiel eines Schlossträgers für einen PKW der Premiumklasse dargestellt und diskutiert. Die berechneten Verzüge nach beiden Fertigungsschritten werden mit Messungen verglichen und mögliche Maßnahmen zur Verringerung des Verzuges aufgezeigt.

### Berechnung des Verzuges nach dem Gießen für einen Schlossträger

Die Berechnung des Verzuges gliedert sich in zwei Schritte. In einem ersten Schritt werden mit Hilfe einer Simulation des Formfüllens und der Erstarrung die Temperaturen im Bauteil und der Gießform berechnet. Im zweiten Schritt werden die Temperaturen als Lasten für die Spannungsberechnung verwendet. Entscheidend für eine genaue Berechnung des Verzuges sind die Kenntnis der temperatur- und gefügeabhängigen mechanischen Eigenschaften des Gusswerkstoffes sowie die Berücksichtigung der Schwindungsbehinderung durch die Form.

**CAD-Modell und Vernetzung.** Ausgangspunkt für die Simulation ist ein dreidimensionales Geometriemodell von Gussteil, Anguss und Überläufen, Heiz- bzw. Kühlkreisläufen sowie des Werkzeugs (Bild 3). Für die Berechnung wird anschließend das komplette Geometriemodell vollautomatisch vernetzt.

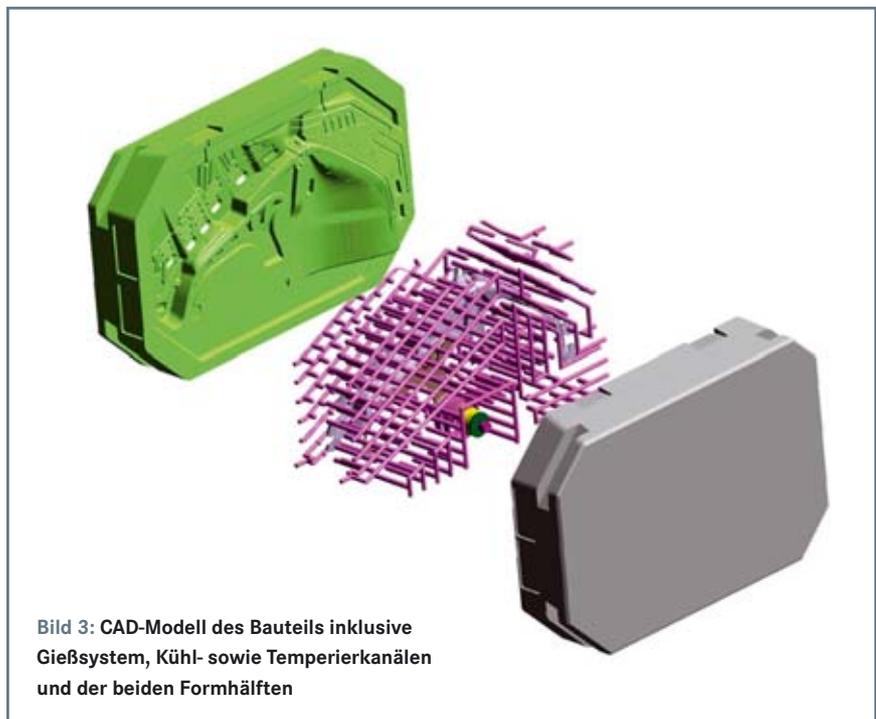


Bild 3: CAD-Modell des Bauteils inklusive Gießsystem, Kühl- sowie Temperierkanälen und der beiden Formhälften

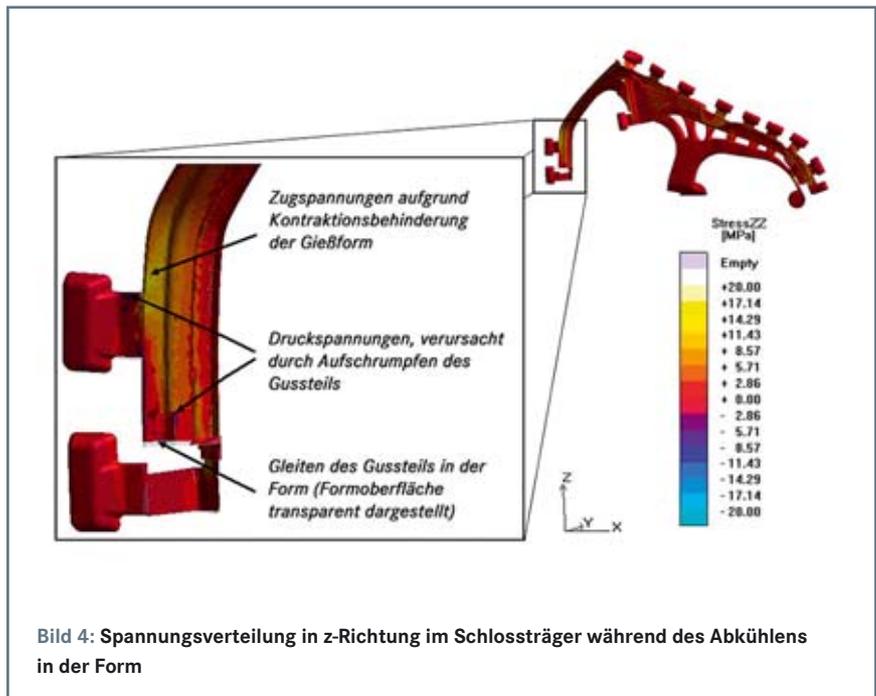


Bild 4: Spannungsverteilung in z-Richtung im Schlossträger während des Abkühlens in der Form

**Simulation des Formfüllens und der Erstarrung.** Die Simulation berücksichtigt alle relevanten Prozessbedingungen wie Schusskurve, Schmelze-, Temperierkanal- und Formtemperatur sowie den zeitlichen Verlauf des Gießzyklus inklusive des Sprühens eines Trennmittels. Da die Simulation den stationären Gießbetrieb abbilden soll, wird das Werkzeug wie in der Praxis auch in der Simulation einige Zyklen „warmgefahren“. Anschließend werden das Formfüllen, die Erstarrung und die Abkühlung des Gussteils berechnet.

**Berechnung der Eigenspannungen und des Verzuges.** Die berechneten Tempe-

peraturen werden in der nachfolgenden Spannungsberechnung als äußere Belastung auf Gussteil und Anguss betrachtet. Die am schnellsten abkühlenden Bereiche fangen unmittelbar nach der Erstarrung an zu kontrahieren. Die Kontraktion wird von der Gießform zumindest teilweise verhindert. In diesen Bereichen bauen sich Zugspannungen in tangentialer Richtung auf (Bild 4). An Stellen, an denen das Bauteil auf die Form aufschumpft, entstehen normal zur Oberfläche Druckspannungen. Aufgrund der bei dieser Temperatur sehr geringen Festigkeit sind die Spannungen zu diesem Zeitpunkt noch sehr niedrig. Mit fortschrei-

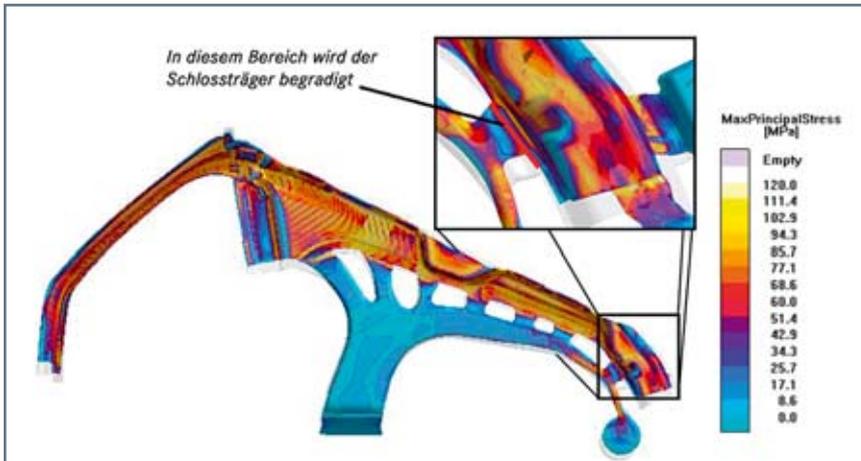


Bild 5: Maximale Zugspannungen im Schlossträger unmittelbar vor dem Ausformen. Zur Verdeutlichung sind die verformte und unverformte Geometrie (transparent) dargestellt.

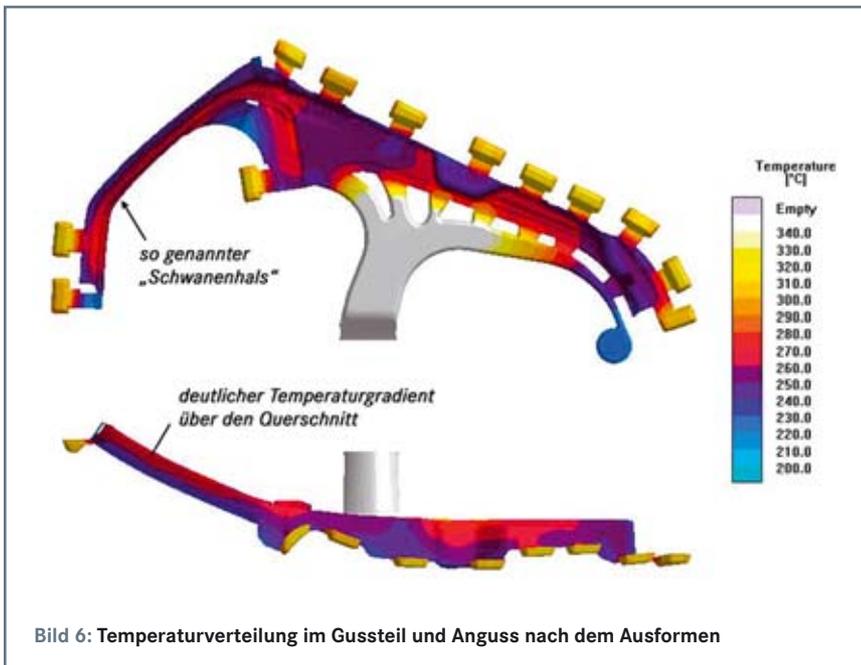


Bild 6: Temperaturverteilung im Gussteil und Anguss nach dem Ausformen

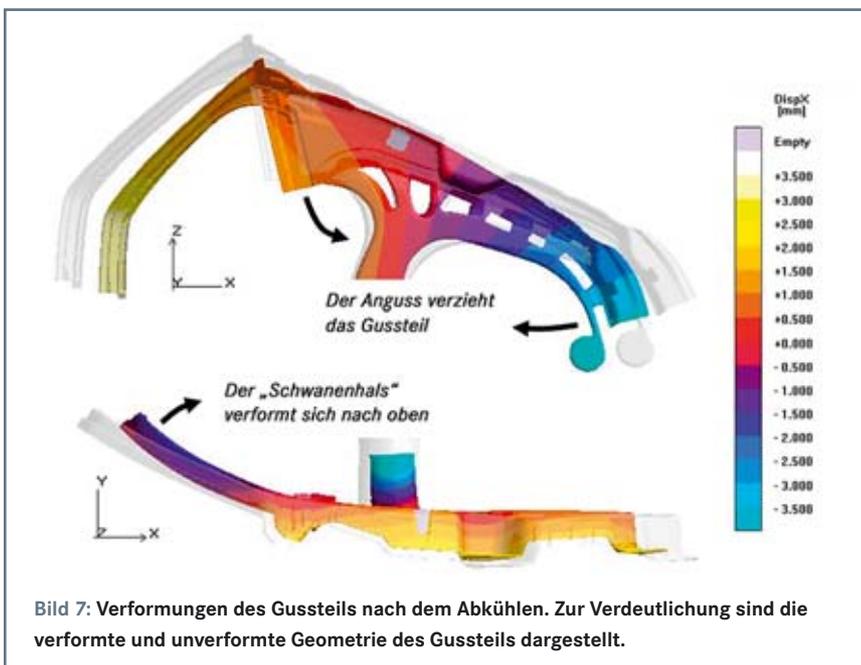


Bild 7: Verformungen des Gussteils nach dem Abkühlen. Zur Verdeutlichung sind die verformte und unverformte Geometrie des Gussteils dargestellt.

tender Abkühlung und dem damit verbundenen Anstieg der Festigkeit nehmen die Spannungen deutlich zu. Unmittelbar vor dem Ausformen steht nahezu das gesamte Rahmenteil unter Zugspannungen (Bild 5).

Nach dem Ausformen entfällt die Behinderung durch die Form, das Bauteil kann sich frei verformen. Lediglich der Anguss behindert die Kontraktion, wodurch das Gussteil zum Anguss hingezogen wird. Das Temperaturfeld zum Zeitpunkt „Ausformen des Gussteils“ bildet nun die Basis für den Aufbau von Spannungen und Verformungen während des Abkühlens auf Raumtemperatur (Bild 6).

Bei der Abkühlung zieht sich das Gussteil weiter in Richtung des Angusses zusammen (Bild 7). Der so genannte „Schwanenhals“ wird dabei nach oben gezogen, da die obere, dem Pressrest zugewandte Seite des Schlossträgers nach dem Ausformen wärmer ist als die untere Seite.

**Aufbereitung der Simulationsergebnisse.** Der Verzug wird in der Praxis mit einer Koordinatenmessmaschine gemessen, die für ausgewählte Punkte den Abstand der tatsächlichen Geometrie von der hinterlegten Sollgeometrie ermittelt. In der Simulation werden hingegen die Verschiebungen der Elemente (oder Knoten), bezogen auf die Ausgangsgeometrie, berechnet. Die Ergebnisse von Messung und Berechnung sind daher nicht unmittelbar miteinander vergleichbar.

Um die Vergleichbarkeit herzustellen, wird zusätzlich der Messvorgang nachgerechnet. Dazu wird in einem ersten Schritt das verformte Berechnungsnetz auf die Referenzpunkte der Verzugsmessung gelegt. Diesem Vorgang liegt eine iterative Berechnung zugrunde, da die Lage der Referenzpunkte auf dem verformten Bauteil nicht bekannt ist. Sobald das deformierte Netz seine Endposition gefunden hat, kann man im zweiten Schritt die Abstände der Messpunkte von der Sollgeometrie bestimmen.

**Vergleich von gemessenen und berechneten Verformungen.** In Bild 8 sind die Abweichungen von der Sollkontur für 23 Messpunkte nach dem Gießen dargestellt. Dabei sind zum einen der Mittelwert aller 15 durchgeführten Messungen (blaue Linie), die obere und untere Grenze der Messungen (gestrichelte Linien) sowie die Ergebnisse der Simulation (rote Linie) eingezeichnet. Die Positionen der Mess- und Referenzpunkte (RPS) sind ebenfalls in der Grafik angegeben. Man erkennt, dass die berechneten Verzüge sehr gut mit den gemessenen übereinstimmen.

Durch das Abtrennen des Angusses federt das Bauteil zurück (Bild 9). Dennoch

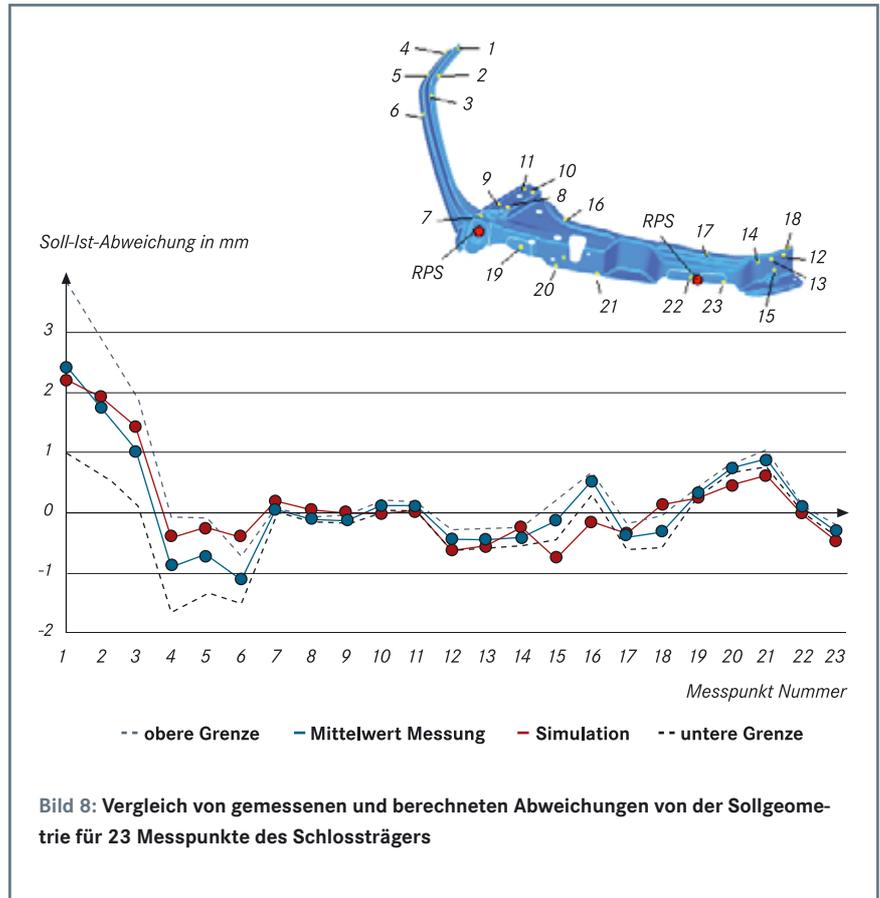
bleibt eine gewisse Krümmung in Richtung des Angusses erhalten. Insgesamt zeigt sich nach dem Stanzen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem Verzug.

**Maßnahmen zur Minimierung des Verzuges.** Nach dem erfolgreichen Abgleich zwischen Berechnung und Messung stellt sich die Frage, wie der Verzug minimiert werden kann. Dazu wurde eine Parameterstudie durchgeführt:

- > Einfluss der Ausformzeit (der Schlossträger wird statt nach 24 s bereits nach 16 s ausgeformt);
- > Einfluss der Gießtemperatur (die Gießtemperatur wird von 640 °C auf 690 °C erhöht).

Durch das frühere Ausformen reduziert sich die Temperaturdifferenz über den Querschnitt des „Schwanenhalses“, was zu einer Reduzierung des Verzuges am Messpunkt 1 um ca. 35 % führt (Bild 10). Gleichzeitig ist nach 16 s die Temperaturdifferenz zwischen Gießlauf und Gussteil noch etwas höher als nach 24 s. Dies führt zu einem leichten Ansteigen des Verzuges von Messpunkt 21 von 0,6 mm auf 0,75 mm (25 %). Eine höhere Gießtemperatur zeigt qualitativ ähnliche Auswirkungen, wobei jedoch der Verzug des Messpunkts 1 lediglich um ca. 0,1 mm zurückgeht.

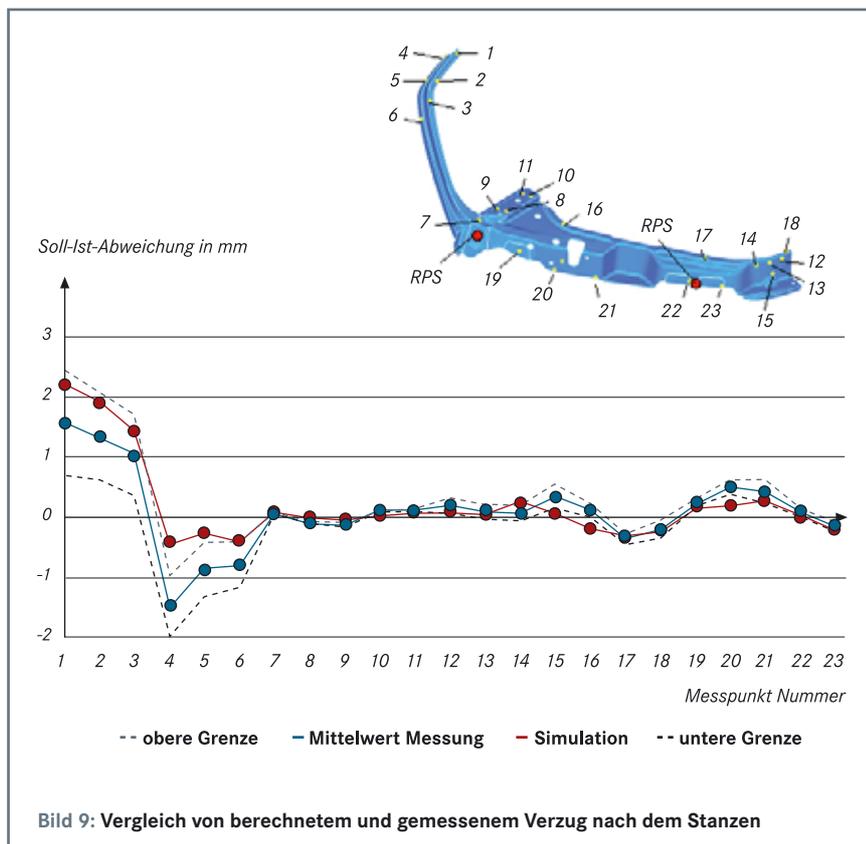
Die Parameterstudie zeigt, dass eine signifikante Reduzierung des Verzuges



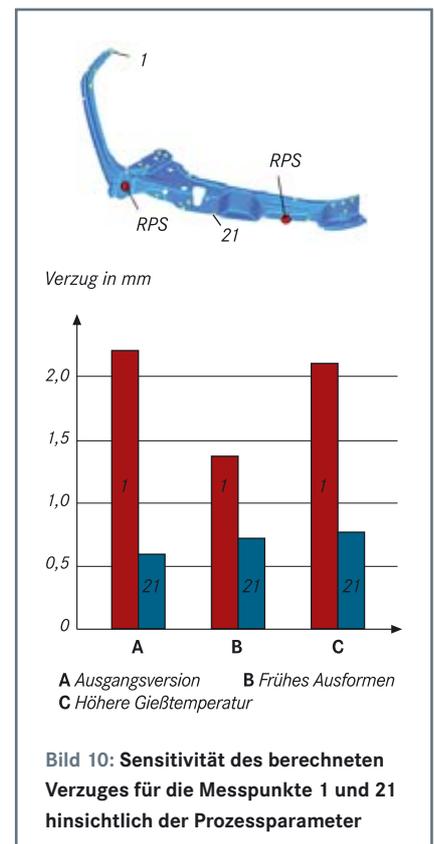
**Bild 8:** Vergleich von gemessenen und berechneten Abweichungen von der Sollgeometrie für 23 Messpunkte des Schlossträgers

nicht ausschließlich durch eine Modifikation der Prozessparameter erreicht werden kann. Die wesentliche Ursache des Verzuges des „Schwanenhalses“ ist der lo-

kale Temperaturgradient über den Bauteilquerschnitt. In einem zweiten Schritt wurde daher versucht, durch Anbringen von Bohren an den kalten Rändern die



**Bild 9:** Vergleich von berechnetem und gemessenem Verzug nach dem Stanzen



**Bild 10:** Sensitivität des berechneten Verzuges für die Messpunkte 1 und 21 hinsichtlich der Prozessparameter

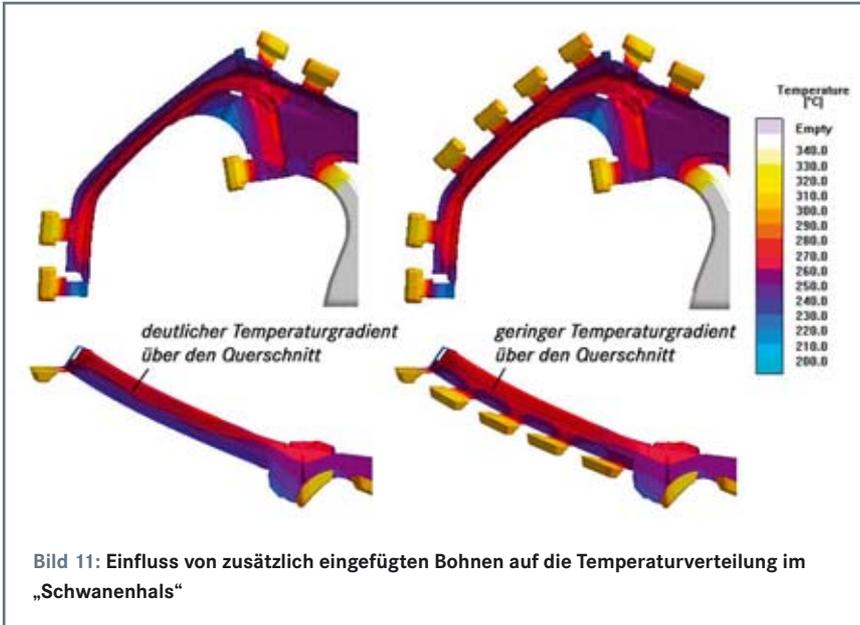


Bild 11: Einfluss von zusätzlich eingefügten Bohnen auf die Temperaturverteilung im „Schwanenhals“

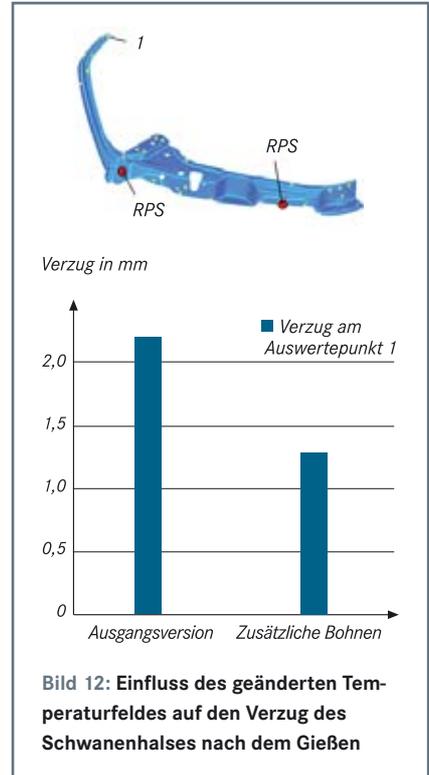


Bild 12: Einfluss des geänderten Temperaturfeldes auf den Verzug des Schwanenhalses nach dem Gießen



Bild 13: Lagerung des Wasserkastens bei der Wärmebehandlung

sen Temperaturgradienten zu verringern (Bild 11).

Die Berechnung zeigt, dass sich alleine durch diese Maßnahme eine Reduzierung des Verzuges um 42 % erreichen lässt (Bild 12).

**Berechnung des Verzuges aufgrund einer Wärmebehandlung für einen Wasserkasten**

Als weiteres Beispiel soll die Entstehung des Verzuges für einen so genannten Wasserkasten für ein Fahrzeug des Premium-segments gezeigt und diskutiert werden. Die Berechnung des Verzuges konzentriert sich dabei auf das Lösungsglühen, da vorangegangene Messungen zu unterschiedlichen Prozessschritten den Schritt des Lösungsglühens als den für den Gesamtverzug entscheidenden Schritt ausgewiesen hatten.

Der Wasserkasten wird zur Wärmebehandlung beidseitig in der in Bild 13 dargestellten Aufhängung gelagert. Die Symmetrie der Geometrie des Gussteils und

die Lagerbedingungen werden in der Simulation berücksichtigt.

In Bild 14 sind die Spannungen und Verformungen nach dem Lösungsglühen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die maximalen Spannungen lediglich 0,9 MPa betragen, die maximalen Verschiebungen jedoch 4,6 mm.

In Bild 15 sind die berechneten Maßabweichungen zusammen mit dem Mittel-

wert und den oberen und unteren Extrema der Messungen dargestellt. Die berechneten Verzüge des Wasserkastens liegen in unmittelbarer Nähe der Mittelwerte der Messungen.

**Zusammenfassung**

Die Beherrschung des Verzuges gegossener dünnwandiger Strukturbauteile stellt eine große Herausforderung für die Fertigung dar. Voraussetzung hierfür ist eine genaue Kenntnis der Mechanismen der Verzugsentstehung sowie ihrer bauteilspezifischen Auswirkungen. Mit Hilfe moderner Simulationsmethoden ist man heute in der Lage, sowohl den Verzug aufgrund des Gießprozesses und des Stanzens als auch aufgrund der Wärmebehandlung genau vorherzusagen. Basierend auf diesen Ergebnissen können dann Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden, die sowohl den Fertigungsprozess als auch die Gestalt des

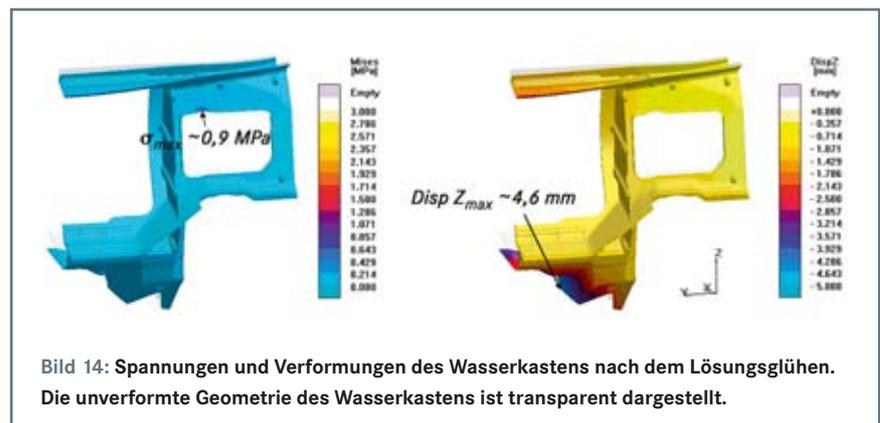
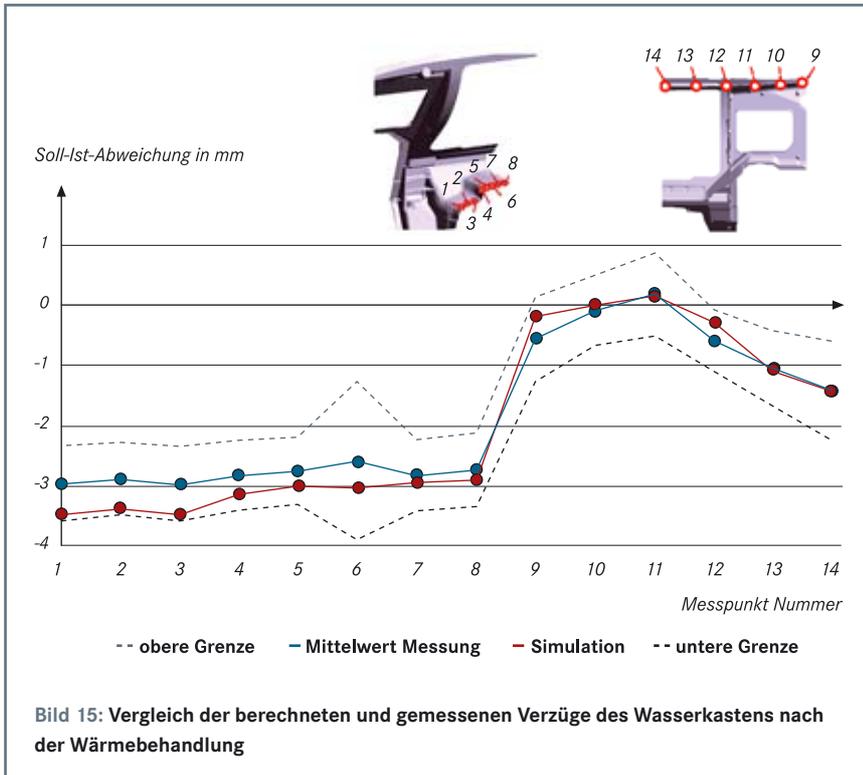


Bild 14: Spannungen und Verformungen des Wasserkastens nach dem Lösungsglühen. Die unverformte Geometrie des Wasserkastens ist transparent dargestellt.



Gussteils betreffen können. Typische gießtechnische Maßnahmen sind die optimierte Gestaltung des Gießlaufs (zur Verringe-

rung des Verzuges in Richtung des Gießlaufs), die Optimierung der Ausformzeit oder der thermischen Verhältnisse im

Werkzeug sowie einer Vorkorrektur des Verzuges im Werkzeug. Der Verzug bei der Wärmebehandlung kann durch simulationsunterstützte Entwicklung geeigneter Lagerstellen minimiert werden.

Mit den neuen Programmentwicklungen unterstützt die Simulation den Druckgießer bei der Fertigung dünnwandiger Strukturbauteile.

*Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF, Bonn/Berlin, das wesentliche Teile der Arbeit innerhalb des Rahmenkonzeptes „Forschung für die Produktion von morgen“ im Rahmen des Vorhabens FOGL (Kennz. 02PD2141) gefördert hat, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.*

*Dr.-Ing. Achim Egner-Walter, MAGMA GmbH, Aachen*

#### Literatur:

[1] Egner-Walter, A.: Gussprodukte '99. Berechnung der Entstehung von Spannungen beim Gießen. Hoppenstedt 1999.

[2] Wieckowicz, P.; Olive, S.: Residual Stress and Casting Cracking during Machining. A Case Study. MAGMAtimes 03/2003, Vol. 8. MAGMA GmbH, Sept. 2003.