

# Dem Bauteilverzug mit Durchblick begegnen

## *Spritzgießsimulation ist ein potentes Werkzeug zur Qualitätssicherung*

Bauteilverzug wird bei der Fertigung komplexer Spritzgussteile oft als gegeben hingenommen. Dass dies nicht sein muss, zeigt eine Gegenüberstellung simulierter Verzugsresultate mit dem realen Bauteilverzug. Ergebnis einer Studie an einem elektrischen Bauteil: eine Übereinstimmung von 90 %.

Technische Kunststoffteile vereinen zunehmend eine Vielzahl an Funktionen in sich. Die daraus resultierenden Anforderungen zu erfüllen, verlangt ein hohes Maß an Dimensions- und Formteilstabilität. Für Entwickler und Hersteller bedeutet dies, den Bauteilverzug möglichst früh im Entwicklungsprozess erkennen und geeignete Gegenmaßnahmen ergreifen zu müssen. Unterstützung hierbei bietet die Spritzgießsimulation, wobei zu erwähnen ist, dass eine fundierte Aussage über Bauteilwindung und Verzug die ganzheitliche Betrachtung des Spritzgießprozesses erfordert. Dies beginnt beim Bauteildesign und reicht über die Werkstoffauswahl und Werkzeugkonstruktion bis hin zu den Verarbeitungsparametern.

### *Virtuelles Anfahren mit Multizyklusanalyse*

Dieser ganzheitliche oder Prozessansatz kennzeichnet die Simulationssoftware Sigmasoft (Anbieter: Sigma Engineering GmbH, Aachen). Er umfasst folgende Prinzipien:

- Alle relevanten Geometrien – vom Formteil, Einlegeteil und Angussystem bis zum Werkzeug und Temperierkanalverlauf – werden komplett dreidimensional und in beliebiger Detailgenauigkeit in der Simulation berücksichtigt.
- Die Software bildet den gesamten Spritzgießzyklus und die Prozessparameter analog den Maschineneinstellungen ab. Dadurch werden die einzelnen Phasen Füllen, Nachdruck und

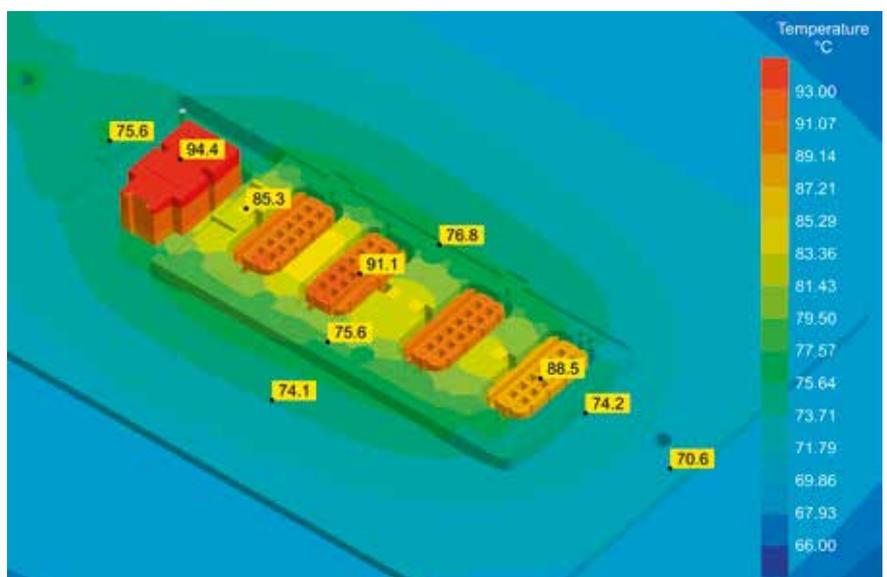
Kühlen möglichst realitätsnah wiedergegeben. Auch das weitergehende Abkühlen des Formteils außerhalb des Werkzeugs findet Berücksichtigung.

- Die sogenannte Multizyklusanalyse bietet die Möglichkeit, den Spritzgießprozess virtuell anzufahren und so erst nach einer definierten Anzahl an Zyklen die eigentliche Spritzgießsimulation durchzuführen.

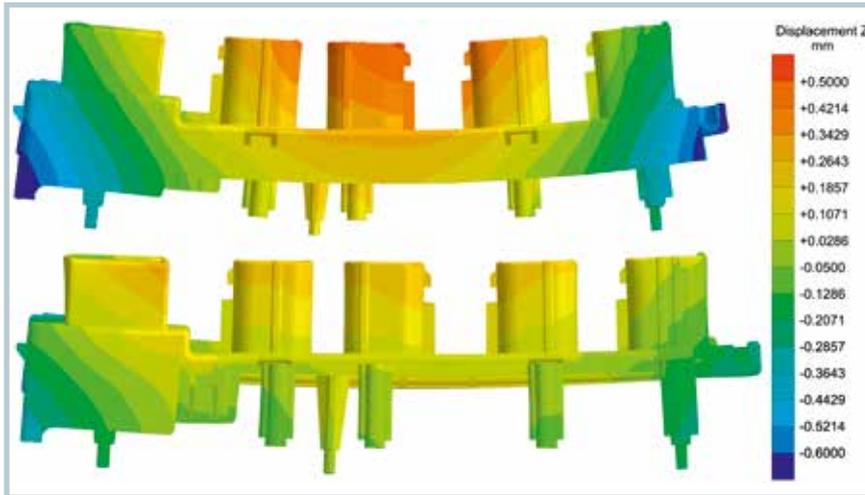
Die im letzten Punkt genannte Eigenschaft stellt einen wichtigen Aspekt dar, denn sie bewirkt, dass die thermischen Randbedingungen zu Beginn der Simulation nicht auf einer statischen Werkzeugtemperatur, sondern vielmehr auf der Temperaturverteilung eines einge-

schwungenen Spritzgießprozesses basieren (**Bild 1**).

Ist die Simulation aber tatsächlich in der Lage, den Bauteilverzug vorherzusagen? Und wenn ja, wie genau und wie zuverlässig sind die Ergebnisse? Diese Fragen zu beantworten, ist das Ziel einer Studie der /H&B/ Electronic GmbH & Co. KG, Deckenpfronn, in der die Verzugsresultate einer Spritzgießsimulation den aus praktischen Versuchen gewonnenen Ergebnissen gegenübergestellt werden. Bei dem betrachteten Bauteil handelt es sich um den Isolierkörper eines mehrpoligen Steckverbinders (**Bild 2**), hergestellt aus einem mit 25 % Glasfasern verstärkten Polypropylen. Die Studie soll u. a. bewer-



**Bild 1.** Inhomogene Werkzeugtemperatur zu Beginn des 20. Zyklus. Die thermischen Randbedingungen nehmen großen Einfluss auf das Simulationsergebnis (Bilder: /H&B/ Electronic)



**Bild 2.** Isolierkörper eines mehrpoligen Steckverbinders aus PP-GF25. Die Dicke der Grundplatte beträgt 1,7 mm, die Höhe der Steckergehäuse 16 mm. Die Simulation zeigt die Bauteildurchbiegung vor (oben) und nach (unten) der Optimierung

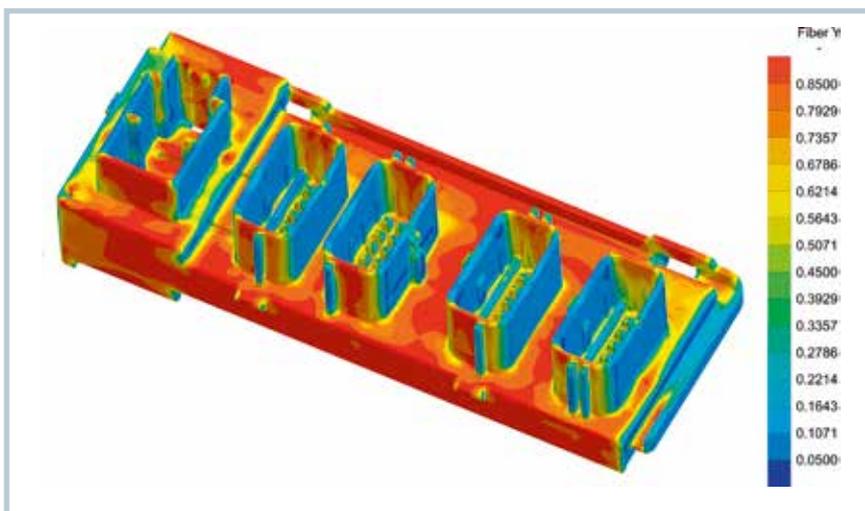
ten, wie realitätsnah die Simulation den Spritzgießprozess tatsächlich abbildet – spricht: ob sie den Prozessansatz konsequent verfolgt.

Für eine realitätsnahe Einschätzung des Verzugsverhaltens ist zudem interessant, wie empfindlich die Software auf eine Änderung derjenigen Phänomene reagiert, die den Verzug maßgeblich beeinflussen:

- der (inhomogene) Wärmehaushalt des Spritzgießwerkzeugs und des Formteils, insbesondere die thermische Vergangenheit des Kunststoffes,
- die Bauteilgeometrie mit lokal unterschiedlichen geometrischen Steifigkeiten, wie etwa Rippen, und

- die anisotrope, also richtungsabhängige Schwindung, etwa durch den Einfluss der Faserorientierung.

Die erste Simulation wird entsprechend den Prozessparametern der laufenden Produktion durchgeführt. Auf diese Weise sollen erste Erkenntnisse über die Genauigkeit des Simulationsergebnisses gewonnen werden. Bauteilgeometrie und Werkzeugdesign entsprechen den realen Gegebenheiten. Das Ergebnis des Abgleichs mit dem realen Bauteil kann sich sehen lassen: Während an den unter den aktuellen Einstellungen gefertigten Bauteilen eine Durchbiegung von 0,45 mm gemessen wird, liefert die Simulation einen Wert von »



**Bild 3.** Dominierende Faserorientierung in Vorzugs-/Bauteillängsrichtung (rot) und niedrig orientierte Bereiche führen zu richtungsabhängigen Schwindungsunterschieden und zu anisotropiebedingtem Verzug

0,51mm und somit eine Annäherung von 87%.

### Zwei Effekte: anisotrope und volumetrische Schwindung

In den folgenden Simulationen wird der Einfluss ausgewählter Parameteränderungen auf das Verzugsergebnis ermittelt. Art und Umfang der Änderungen basieren auf der detaillierten Analyse der vorliegenden Simulationsergebnisse unter besonderer Berücksichtigung der Schwindungsunterschiede innerhalb des Bauteilvolumens. Gelten diese im Allgemeinen als Ursache für den Bauteilver-

zug, lohnt es sich, an dieser Stelle zwischen zwei Effekten zu differenzieren, nämlich der anisotropen, also richtungsabhängigen und der inhomogenen volumetrischen Schwindung.

Erstgenannter Effekt resultiert aus richtungsabhängigen Materialeigenschaften, hervorgerufen z. B. durch Orientierungen, vor allem in Kombination mit Glasfasern. So zeigt das Simulationsergebnis eine tendenziell starke Faserorientierung in eine Vorzugsrichtung (**Bild 3**), die jedoch an den Stellen, an denen die Schmelze umgeleitet wird, durch Bereiche niedriger Faserorientierung unterbrochen wird. Die daraus re-

sultierende anisotrope Schwindung stellt eine der Ursachen der Bauteildurchbiegung dar.

Bei der Beurteilung der volumetrischen Schwindung gilt es, mehrere Aspekte zu berücksichtigen. In den meisten Fällen spielen Temperatur und Erstarrungszeit eine entscheidende Rolle. Was in diesem Zusammenhang zunächst auffällt: In der Nachdruckphase gelingt es nicht, die plastische Seele aufrecht zu erhalten. Vielmehr sorgen dünnwandige Stellen im Bauteil dafür, dass nicht alle Bereiche ausreichend mit Schmelze versorgt werden. Die Folge: Die entsprechenden Bereiche erstarren

## Praxisnutzen

Wenn, wie im vorliegenden Fall, hauptsächlich die Bauteilgeometrie für den Verzug verantwortlich ist, kommt es nicht zuletzt auf Erfahrung und Können des Simulationsingenieurs an, zumal es in der täglichen Arbeit nicht möglich ist, beliebig viele Simulationen durchzuführen. Für das korrekte Aufsetzen der Simulation und eine zielführende Interpretation der Ergebnisse sind fundierte Fachkenntnisse in den Bereichen Spritzgießen, Polymereigenschaften und Rheologie genauso Grundvoraussetzung wie numerisches Hintergrundwissen. Schließlich muss der Anwender die Verzugsneigung jedes Bauteils separat einschätzen – und nur, wenn er die Simulationsergebnisse richtig interpretiert, kann er die geeigneten Verbesserungsmaßnahmen ableiten und die Projektdauer entscheidend verkürzen.

## Der Autor

**M.Eng. Jan Bayerbach** ist Teamleiter Entwicklungsdienstleistungen bei der /H&B/ Electronic GmbH & Co. KG, Deckenfronn; info@h-und-b.de

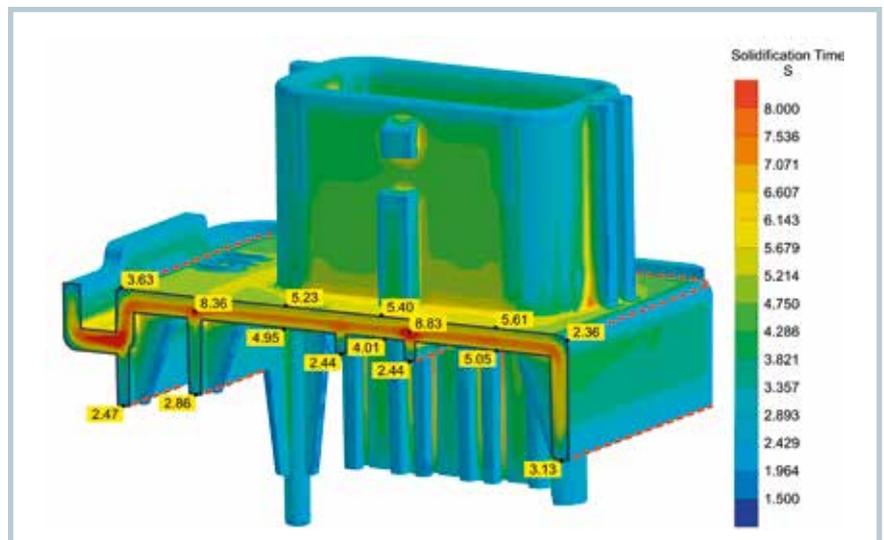
## Service

### Digitalversion

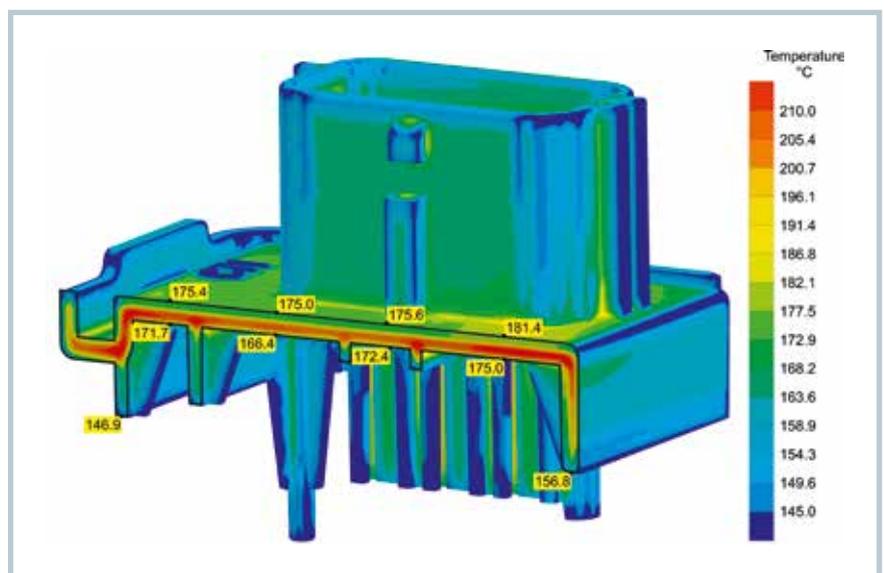
- » Ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/857483](http://www.kunststoffe.de/857483)

### English Version

- » Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)



**Bild 4.** Unterschiede in der Erstarrungszeit über den Bauteilquerschnitt führen zu uneinheitlicher volumetrischer Schwindung und Verzug. Sehr früh erstarrende Bereiche wie Rippen oder Ecken bilden versteifende Elemente und begünstigen so ebenfalls den Verzug



**Bild 5.** Die Temperaturverteilung – hier in der Nachdruckphase – beeinflusst den Verzug. Das Temperaturniveau an der Bauteiloberseite ist 5 bis 10 K höher als an der Unterseite

nachdrucklos und somit unter einer erheblich größeren Volumenkontraktion als der Rest des Bauteils. Diese inhomogene volumetrische Schwindung resultiert dann in inneren Spannungen und zeigt sich letztendlich im Bauteilverzug (**Bild 4**).

Im Umkehrschluss handelt es sich bei den besagten unterversorgten Bereichen um Masseanhäufungen oder – wiederum das Ergebnis für die Erstarrungszeit zugrunde gelegt – um „Hotspots“ – Bereiche also, die wesentlich später erstarren als der Rest des Bauteils. Diese zeitlich verzögerte Volumenkontraktion führt ebenfalls zu Spannungen und in letzter Konsequenz zu Verzug. Derartige Unterschiede in der volumetrischen Schwindung, wenn auch moderater, lassen sich über das gesamte Bauteil beobachten. Sie sind in erster Linie unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten aufgrund behinderter Wärmeabfuhr bzw. Wärmeübertragung geschuldet. Unter den aktuellen Parametern weist die Erstarrungszeit von den Außenkanten und den Rippen des Bauteils ins Innere eine Differenz von 4 bis 5 s auf und begünstigt somit die inhomogene volumetrische Schwindung (**Bild 4**).

### **Einfluss der Bauteilgeometrie und Materialsteifigkeit**

Offen bleibt nach diesen Beobachtungen zunächst die Richtung des Verzugs. Hier lohnt sich ein detaillierter Blick auf die Temperaturverteilung, beispielsweise in der Nachdruckphase. Diese zeigt eine – wenn auch minimale – Verlagerung der höheren Temperatur in Richtung der „konkaven“ (oberen) Bauteilseite, etwa im Bereich von 5 bis 10 K (**Bild 5**). Obwohl dieser Temperaturunterschied moderat erscheint, bedeutet er nichtsdestotrotz eine gleichzeitige Verschiebung der Volumenkontraktion und somit ein Durchbiegen in Richtung der warmen Seite.

Die Unterschiede in der Temperaturverteilung lassen sich durch einen Blick auf das Ergebnis der Abkühlgeschwindigkeit und des Wärmeflusses erklären. Deutlich zu sehen ist hier, dass aufgrund der Teilegeometrie erheblich mehr Wärme von der oberen Bauteilseite abgeführt werden muss, als von der unteren. Erschwerend kommt hinzu, dass die Werkzeugtemperierung hier aufgrund der Bauteilgeometrie deutlich ineffektiver ist.

Ein erheblicher Anteil am Verzug ist der Bauteilgeometrie und der Materialsteifigkeit zuzuschreiben, die zudem starken Einfluss auf die Richtung der Durchbiegung nimmt. Während die Ecken und die Enden der Rippen an der Außenseite des Bauteils bereits nach 2 bis 3 s eingefroren sind, erstarrt das Material in der Bauteilmitte erst nach 5 bis 7 s (**Bild 4**). Dass die Festigkeit des Kunststoffes beim Erstarren und auch im weiteren Verlauf mit sinkender Temperatur zunimmt, hat wiederum zwei Effekte zur Folge. Zum einen stellen die frühzeitig erstarrenden umlaufenden Ecken einen Rahmen mit hoher

Steifigkeit dar, was den bereits beschriebenen Effekt des Verzugs durch sich nachträglich zusammenziehende Bereiche im Innern begünstigt. Zum anderen bewirken die Rippen eine extreme Aussteifung der „konvexen“ (unteren) Bauteilseite und dadurch eine Verschiebung der weiterführenden Kontraktion in Richtung der ohnehin wärmeren Bauteilseite, was sich letztlich in der beobachteten Durchbiegung äußert.

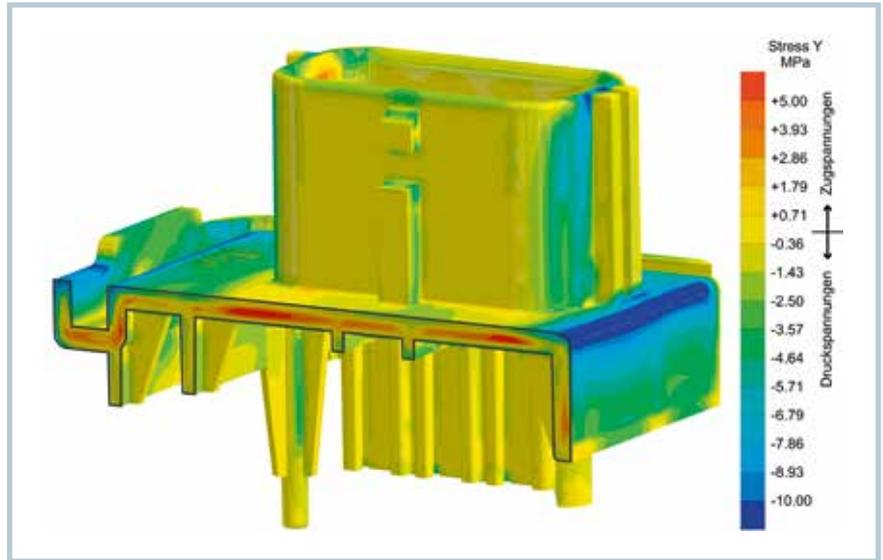
Die Spannungsverteilung über den Bauteilquerschnitt zum Zeitpunkt der Entformung bestätigt diesen Effekt. Markant hierbei sind die im Bauteilinne- »

ren verbleibenden Zugspannungen, die auf anhaltende Kontraktion hindeuten und in Kontrast mit den Druckspannungen in den äußeren Bereichen des Bauteils stehen (**Bild 6**).

### Maßnahmen zur Verzugsminimierung

Aus der Analyse der Simulationsergebnisse werden konkrete Maßnahmen abgeleitet, wobei sich die Vielzahl der simulierten Parameteränderungen an dieser Stelle auf solche beschränkt, die tatsächlich mit praktischen Versuchen abgeglichen werden können (**Bild 7**).

Der Versuch, die Wirksamkeit des Nachdrucks durch ein Anheben des Nachdruckniveaus zu erhöhen, verbessert das Verzugsverhalten nicht. Zwar ist in der Tat ein Anstieg des Innendrucks zu beobachten, der geometriebedingte Abriss der plastischen Seele sorgt jedoch nach wie vor dafür, dass große Bereiche nachdrucklos erstarren. Dass es sich hier tatsächlich um ein geometrisches Problem handelt, zeigt auch die nahezu erfolglose Erhöhung der Werkzeugtemperatur, die lediglich dazu führt, dass das Abreißen der plastischen Seele zeitlich nach hinten verschoben, das Abkühlverhalten aber nur unwesentlich homoge-

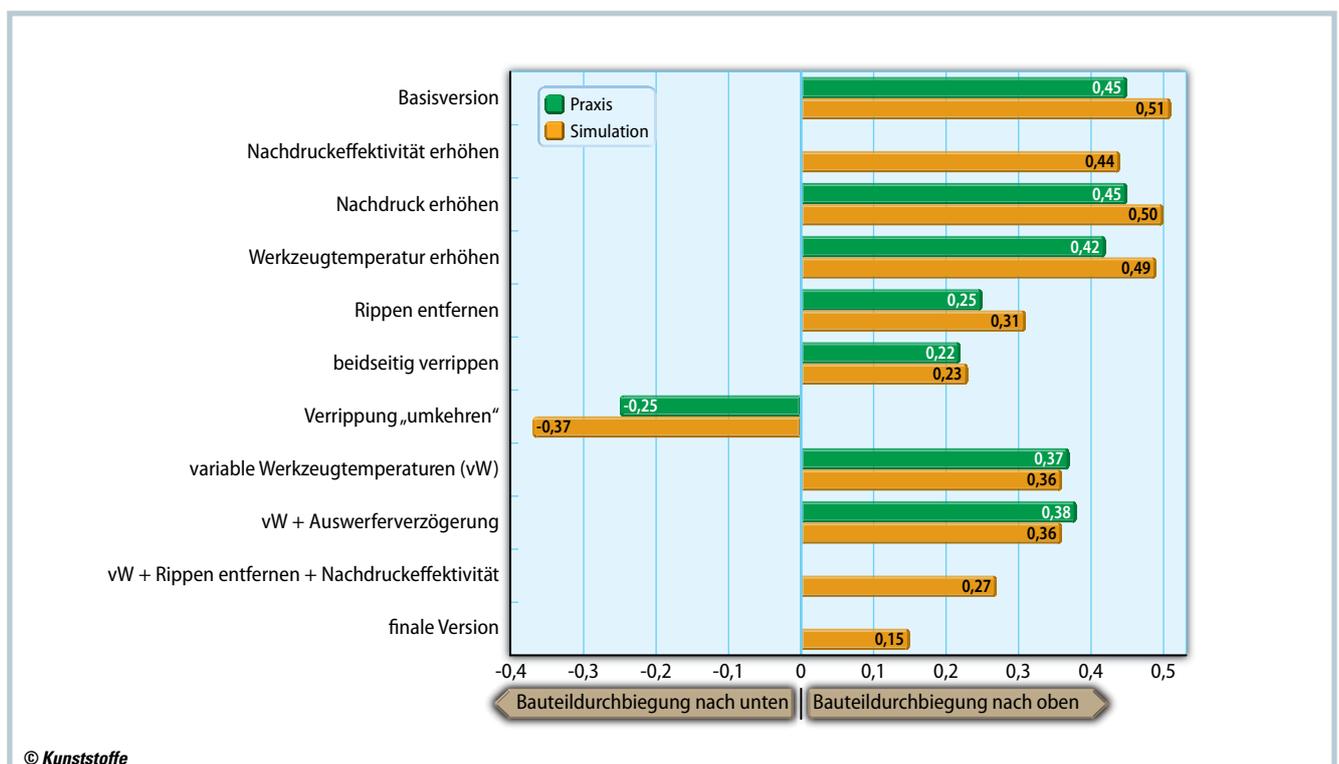


**Bild 6.** Spannungszustand unmittelbar nach der Entformung. Zugspannungen (rot) deuten auf anhaltende Schwindung hin und begünstigen somit den Verzug

ner wird. Beide Maßnahmen sind also nicht zielführend – im Gegenteil, ist doch allgemein bekannt, dass sie – vor allem in Kombination – ein erhebliches Risiko für die Bauteilqualität darstellen.

Aufgrund ihres beträchtlichen Einflusses auf das Gesamtergebnis versprechen die Bauteilgeometrie und Materialsteifigkeit das größte Potenzial zur Verzugsmini-

mierung. Dies bestätigen die Ergebnisse zweier Optimierungsmaßnahmen (**Bild 7**). So zeigt der erste Versuch, bei dem die Verrippung auf die andere Bauteilseite verlagert wird, dass sich der Steifigkeitseffekt und letztendlich die Bauteildurchbiegung umkehren – sowohl in der Simulation, als auch in der Praxis. Verdeutlicht wird dieser Effekt durch die analoge Ver-



**Bild 7.** Die Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen zur Reduzierung des Verzugs lässt sich an der Bauteildurchbiegung (Einheit: mm) ablesen. Beim Vergleich mit den realen Bauteilen zeigt sich eine große Übereinstimmung

schiebung der Erstarrungszeit, der volumetrischen Schwindung und der Spannungsverteilung. In einem zweiten Versuch, bei dem das Bauteil weitgehend ohne Rippen gestaltet wird, liegt eine homogene und symmetrische Spannungsverteilung nahezu ohne extreme Spannungsspitzen vor. Folglich wird auch hier die Bauteildurchbiegung deutlich reduziert.

Die Optimierung der (ungleichmäßigen) volumetrischen Schwindung setzt – idealerweise – symmetrische Abkühlverhältnisse bzw. eine homogene Temperaturverteilung voraus. Im vorliegenden Beispiel ist eine Optimierung der Werkzeugtemperierung, z.B. durch konturnahes Kühlen, nicht möglich. Somit besteht die einzige Möglichkeit, dem behinderten Wärmefluss der oberen Bauteilseite entgegenzuwirken, darin, einen größeren Temperaturgradienten innerhalb des Werkzeugs zu schaffen.

In der Praxis bedeutet dies, die Temperatur des Kühlmediums in diesem Bereich zu reduzieren, um dadurch mehr Wärme abzuführen. Das Ergebnis ist eine um 0,15 mm in der Simulation bzw. 0,08 mm in der Praxis verringerte Durchbiegung, einhergehend mit einer drastischen Reduzierung der Restspannungen, sowohl vor als auch nach dem Entformen. Analog dazu ist die volumetrische Schwindung äußerst homogen und weist ein deutlich niedrigeres Niveau auf.

### Rippe zieht das Bauteil beim Abkühlen gerade

Wie groß die eingefrorenen Spannungen letztendlich sind und wie stark diese auf das Bauteil wirken, zeigt der abschließende erfolglose Versuch der Auswerferverzögerung. Dabei wird die obere Seite des Bauteils nach dem Öffnen des Werkzeugs für eine gewisse Zeit in der auswerferseitigen Kavität belassen, um so die Schwindung einseitig zu behindern. Das Ergebnis von 0,36 mm (0,38 mm in der Praxis) lässt jedoch darauf schließen, dass das Bauteil vor dem Öffnen des Werkzeugs bereits so viele Restspannungen enthält, dass diese Maßnahme wirkungslos ist.

Erwähnenswert, obgleich nicht durch praktische Versuche verifiziert, ist der Versuch, die Nachdruckeffektivität zu erhöhen. Mit dem Ziel, alle Bereiche so lange wie möglich mit zusätzlicher Schmelze zu

versorgen, werden in diesem Fall Fließhilfen in Form dicker Rippen an der früher erstarrenden (unteren) Bauteilseite angebracht. Die Verbesserung um 0,07 mm ist jedoch keinesfalls auf eine Optimierung der Nachdruckversorgung zurückzuführen. Vielmehr zeigt sich, dass die Rippe relativ langsam abkühlt und somit das Bauteil nach dem Entformen wieder „geradezieht“. Markant: Die gleiche Maßnahme unter Wegfall der versteifenden Elemente und mit variabler Werkzeugtemperatur verbessert die Abweichung um 0,12 mm (Bild 7).

Den Abschluss der Studie bildet eine finale Simulation, die mehrere Maßnahmen zur Verzugsoptimierung in sich vereint:

- Nachdruckeffektivität erhöhen,
- Werkzeugtemperatur variieren und
- Rippen entfernen.

Obwohl für diese Maßnahmenkombination kein praktischer Versuch vorliegt, stellt zumindest die aus der Simulation gewonnene Durchbiegung von 0,15 mm eine eindeutige Verbesserung der Bauteilqualität dar. Aufgrund der bisher positiven Simulationsergebnisse kann man davon ausgehen, dass diese Version den Verzug auch in der Praxis minimiert.

### Fazit

In allen Fällen, in denen der berechnete Bauteilverzug sich mit praktischen Versuchen verifizieren lässt, stimmen die Werte sehr gut miteinander überein. Die Qualität der Simulationsergebnisse ist demzufolge sehr hoch. Darüber hinaus ist die Software in der Lage, alle drei für den Bauteilverzug relevanten Phänomene – den thermisch, den geometrie- und den anisotropiebedingten Verzug – aufzuzeigen, was ein gezieltes Optimieren ermöglicht.

Nicht zuletzt aufgrund dieser positiven Ergebnisse hat /H&B/Electronic die Spritzgießsimulation mittlerweile als festen Bestandteil im Entwicklungsprozess etabliert. Bereits zu einem frühen Zeitpunkt werden Simulationen zur Optimierung des Bauteildesigns durchgeführt, die im weiteren Projektverlauf unter Einbeziehung der Werkzeugkonstruktion zur Werkzeugauslegung erweitert werden. So bildet die Prozesssimulation vor der anstehenden Erstinbetriebnahme des Werkzeugs den abschließenden Qualitätscheck. ■