

## Digitaler Zwilling für die Qualitätssicherung

# Vorhersage der Wanddickenverteilung

Am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) wurde eine Methode entwickelt, mit der während des laufenden Produktionsprozesses die Wanddickenverteilung beim Thermoformen vorhergesagt wird. Die Inline-Messung erfolgt mithilfe einer Infrarotkamera, deren Messergebnisse in die Simulationssoftware einfließen. Ein digitaler Zwilling sagt innerhalb von fünf Minuten die Wanddickenverteilung mit hoher Genauigkeit voraus.

Schwankende Umgebungs- und Prozessbedingungen beim Thermoformen führen zu einer ungleichmäßigen Halbzeugtemperaturverteilung und damit zu inhomogenen Wanddickenverteilungen, was eine durchgängige Qualitätskontrolle erforderlich macht. Die konventionelle Qualitätskontrolle ist mit einem großen personellen Aufwand verbunden und liefert die Ergebnisse mit erheblichem zeitlichem Versatz. Ziel war deshalb die Entwicklung einer neuen Methode mit einem „Digitalen Zwilling“ (Bild 1): Das Modell benötigt fünf Minuten, um die Wanddickenverteilung des Formteils widerzuspiegeln.

### Bestimmung der realen Halbzeugtemperatur zum Umformzeitpunkt

Aufgrund des stark temperaturabhängigen Umformverhaltens von thermoplastischen Halbzeugen ist die Kenntnis über die Halbzeugtemperaturverteilung zum Umformzeitpunkt eine zwingende Voraussetzung für die Vorhersage der Wanddickenverteilung durch simulative

Methoden. Eine Messung der flächigen Temperaturverteilung ist jedoch aufgrund des geschlossenen Werkzeugs kurz vor der Umformphase nicht möglich. Die Temperaturerhebung des Halbzeugs zwischen Heiz- und Blasstation führt aufgrund der Zeitdifferenz  $t_{\text{Abkühl}}$  zwischen Messung und Umformung zu einer oft erheblichen Überschätzung der real vorliegenden Temperaturen ( $\Delta T$ ). Daher wird zur Temperaturbestimmung zunächst eine Infrarot-Kamera (IR) vom Typ A320 der Firma Flir Systems in die Versuchsanlage (Negativ-Thermoformanlage KD 2025 der Kiefel GmbH) zwischen Blas- und Formstation integriert. Mit diesem Messaufbau kann die Abkühlung des Halbzeugs simuliert werden, in dem dieses nach der Aufwärmung nicht in die Formstation verfahren wird, sondern stattdessen für die Zeitdifferenz  $t_{\text{Abkühl}}$  der Abkühlvorgang thermografisch erfasst und so die Umformtemperatur bestimmt wird. Zur Bestimmung der realen Halbzeugtemperatur wird eine Abkühl-simulation in Abaqus der Firma Dassault Systèmes Simulia Corp. durchgeführt.

Diese löst FEM-gestützt unter Kenntnis der kalorimetrischen Materialkennwerte des Halbzeugs (800  $\mu\text{m}$  dicke Polystyrolfolie der Firma W. u. H. Fernholz GmbH & Co. KG) die dreidimensionale, instationäre Wärmeleitungsgleichung in allen drei Raumrichtungen. Die mittlere Abweichung der simulativ ermittelten zur realen Umformtemperatur beträgt temperaturabhängig maximal  $0,4^\circ\text{C}$ . Als nachteilhaft stellt sich dagegen eine Simulationsdauer von  $> 100$  s heraus, was die Reaktionszeit bei Ausschussproduktion verringert. Zur Reduktion der Rechenzeiten wird daher ein vereinfachtes, analytisches Berechnungsmodell in Matlab (The MathWorks) implementiert: Mit den thermografisch gemessenen Abkühlverläufen können die aus dem Halbzeug austretenden Wärmeströme pro  $\text{m}^2$  Fläche als Funktion der absoluten Temperatur formuliert werden. Die Wärmestromdichten werden mithilfe der Materialkennwerte auf die Änderungsrate der Temperatur zurückgerechnet und den Temperaturen zugeteilt. Die berechnete mittlere Temperaturabweichung beträgt hier  $0,5^\circ\text{C}$  bei einer Rechenzeit von rund  $0,05$  s. Das Modell bietet somit eine hohe Vorhersagegenauigkeit bei geringer Rechenzeit und wird daher für die weitere Entwicklung des digitalen Zwillings verwendet.

### Modellierung des Materialverhaltens

Es ist bekannt, dass die Komplexität des verwendeten Materialmodells einen großen Einfluss auf die erreichbare Simulationsgenauigkeit als auch auf die erzielbare Rechenzeit aufweist. So erreichen komplexere Materialmodelle zwar höhere Vorhersagegenauigkeiten hinsichtlich der Wanddickenverteilung, jedoch erhöht sich dadurch ebenfalls die benötigte Rechenzeit. Reale Thermo-

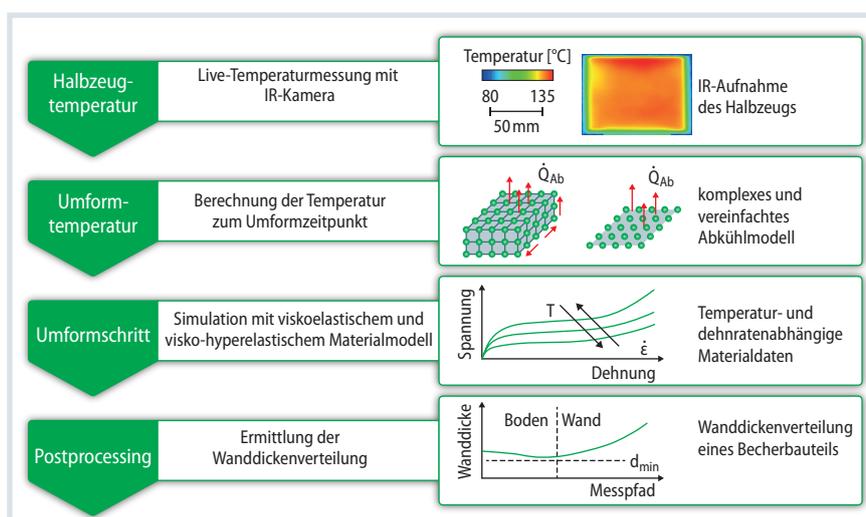


Bild 1. Digitaler Zwilling zur Bestimmung der Wanddickenverteilung. Quelle: IKV; Grafik: © Hanser

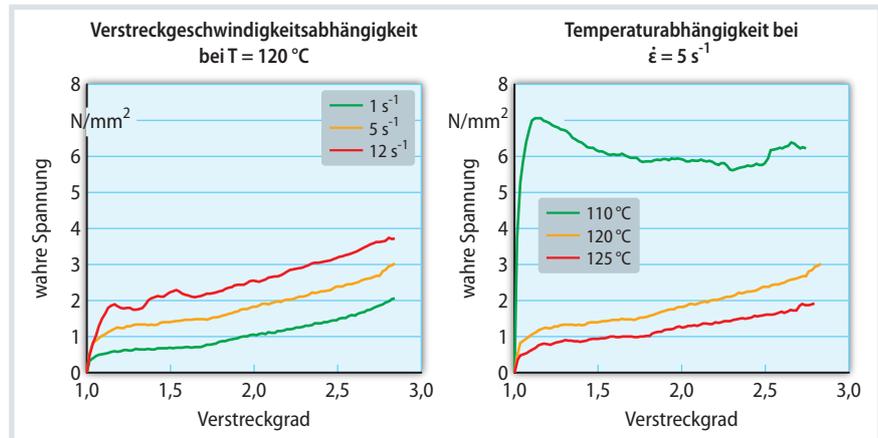
plaste weisen in ihrem Spannungs-Dehnungs-Verhalten (hyper-)elastische und viskose Anteile auf. Ein verbreiteter Ansatz zu deren Darstellung ist ein Yeoh-Prony-Modell. Um Rechenzeit zu sparen, kann jedoch der viskose Anteil vernachlässigt werden, sodass ein rein (hyper-)elastisches Yeoh-Modell zurückbleibt [2, 8]. Zur Kalibrierung der Materialmodelle wird das biaxiale Verhalten des Halbzeugs während der Umformung erhoben, welches durch Verstreckversuche auf dem Laborreckrahmen der Blow Moulding Technologies Ltd. ermittelt wird [7]. Über einen Scherenmechanismus werden die Klammern mit vorgegebener Geschwindigkeit verfahren und die Probe so äquibiaxial bis zu einem angestrebten Endverstreckgrad von drei verstreckt. Die ermittelten Kräfte und Verschiebungen werden anschließend in wahre Spannungen und technische Dehnungen bzw. Verstreckgrade umgerechnet. **Bild 2** zeigt auf der linken Seite exemplarisch die wahre Spannung in Abhängigkeit des Verstreckgrades bei einer Halbzeugtemperatur von 120 °C und steigenden Verstreckgraden. Es wird deutlich, dass die wahre Spannung mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit zunimmt.

Auf der rechten Seite von **Bild 2** ist der Einfluss der Halbzeugtemperatur auf das Spannungs-Dehnungsverhalten dargestellt. Eine Erhöhung der Temperatur führt erwartungsgemäß zu einer Verringerung der gemessenen Spannungen.

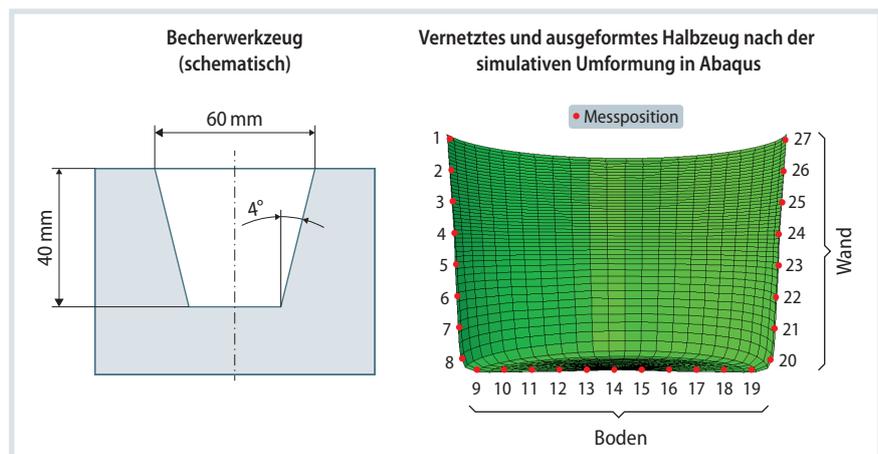
Die charakteristischen Koeffizienten der beiden Materialmodelle werden auf Basis der Messungen so angepasst, dass die berechneten Spannungs-Verstreckgrad-Verläufe mit den gemessenen Verläufen übereinstimmen. Möglich wird dies durch die Minimierung der relativen Fehlerquadrate zwischen gemessener wahrer Spannung  $\sigma_{i_{\text{mess}}}$  und berechneter wahrer Spannung  $\sigma_{i_{\text{berechnet}}}$ .

### Simulationsroutine zur Vorhersage der Wanddickenverteilung

Ausgehend von der berechneten Halbzeugtemperaturverteilung zum Umformzeitpunkt erfolgt die Simulation des Umformvorgangs mit Abaqus. Die Temperaturverteilung wird der Simulationsumgebung automatisiert mittels Python-Schnittstelle der Abaqus-Input-Datei übergeben. Diese enthält alle relevanten



**Bild 2.** Abhängigkeit der Spannungs-Verstreckgrad-Verläufe von Verstreckgeschwindigkeit und Temperatur. © Quelle: IKV; Grafik: © Hanser



**Bild 3.** Becherwerkzeug: links in schematischer, rechts in Abaqus vernetzter Darstellung.

© Quelle: IKV; Grafik: © Hanser

Daten wie beispielsweise die Geometrie des Werkzeugs, Prozessparameter oder das verwendete Materialmodell. Entsprechend dem realen Vergleichsprozess an der Technikumsanlage wird ein rotationssymmetrischer Joghurtbecher mit einer Tiefe von 40 mm und einem Durchmesser von 60 mm simulativ beschrieben. Da die Kontaktbedingungen zwischen einem Vorstreckstempel und dem Halbzeug schwer zu beschreiben sind [1], erfolgt die Ausformung des Bechers ausschließlich mit Luftdruck (maximal 5 bar). Der Druckaufbau folgt einem rampenförmigen Verlauf, welcher am Blaskasten mittels Druckmessung erhoben und in der Simulation nachgestellt wird. **Bild 3** zeigt auf der linken Seite das Werkzeug in schematischer Darstellung sowie auf der rechten Seite die Bechergeometrie mit Messpunkten nach dem simulativen Umformschritt.

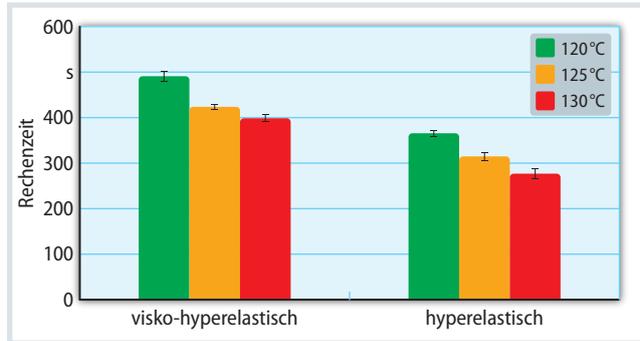
Um eine Verformung des Werkzeugs auszuschließen, werden zur Vernetzung

des Werkzeugs „rigid“-Elemente verwendet. Die Geometrie des Halbzeugs wird dagegen mit rotationssymmetrischen Schalenelementen versehen, welche zum Einsatz kommen können, weil die Ausdehnung des zu vernetzenden Elements in einer Dimension (hier: Dicke) wesentlich kleiner ist als in den anderen. Ziel der Umformsimulation ist die Bestimmung der Wanddickenverteilung entlang eines definierten Messpfades im Formteil. Systematische Untersuchungen führen zu der Erkenntnis, dass beide Simulationsmodelle auch die ungleichmäßige Wanddicke der gegenüberliegenden Wandstücke gut abbilden, jedoch ist die an den realen Formteilen gemessene starke Temperaturabhängigkeit der Wanddickenverteilung nicht erkennbar. Die Untersuchung weiterer Halbzeugtemperaturen liefert ähnliche Vorhersagegenauigkeiten. In **Bild 4** sind die benötigten Rechenzeiten für die Umformsimulation bei verschiede-

»

**Bild 4.** Benötigte Rechenzeiten in Abhängigkeit der Halbzeugtemperatur und des Materialmodells.

©- Quelle: IKV;  
Grafik: © Hanser



nen Temperaturniveaus und Materialmodellen abgebildet. Es wird deutlich, dass das hyperelastische Modell bei ähnlicher Genauigkeit etwa 25 % weniger Rechenzeit benötigt als die Umformsimulation mit dem visko-hyperelastischen Modell. Weiterhin lässt sich feststellen, dass ungeachtet des verwendeten Materialmodells bei niedrigem Temperaturniveau höhere Rechenzeiten benötigt werden. Dies ist leicht mit dem bei höheren Temperaturen geringeren Verstrekwiderstand zu erklären. Da der Verlauf des Blasdruckes konstant bleibt,

ist die Formgebung bei höheren Temperaturen früher abgeschlossen.

### Validierung des digitalen Zwillings

Um die Leistungsfähigkeit des digitalen Zwillings beurteilen zu können, wird dieser unter realen Produktionsbedingungen betrieben. Störeinflüsse, wie eine schwankende Halbzeugtemperatur infolge erzwungener Konvektion oder irreguläre Formlufthaltezeiten, müssen sich in der Simulation der Wanddickenverteilung widerspiegeln. **Bild 5** zeigt exemplarisch die reale und simulierte Wanddickenverteilung unter Einfluss eines unerwünschten Luftstroms (Schlechtteil) entlang des Messpfades am Becherboden im Vergleich zu einem Gutteil im gleichen Prozesspunkt. Infolge der reduzierten Halbzeugtemperaturen überschreitet die Dicke die unter Normalbedingungen erreichbaren Materialstärken, was sich simulativ widerspiegelt. Der digitale Zwilling meldet daraufhin eine Unregelmäßigkeit und gibt Hinweise auf die Störung durch Analyse der Halbzeugtemperaturverteilung.

### Fazit und Ausblick

Ziel ist die simulative Vorhersage der qualitätsbestimmenden Wanddickenverteilung des Formteils bei niedriger Rechenzeit und hoher Genauigkeit. Der zu diesem Zweck entwickelte Digitale Zwilling muss dazu die thermischen Vorgänge beim Umformvorgang, wie die temperatur- und dehnratenabhängige Dehnviskosität, berücksichtigen. Die mit dem vereinfachten Berechnungsmodell ermittelte, reale Halbzeugtemperaturverteilung zum Umformzeitpunkt wird dem Simulationsmodell übergeben. Vergleichend wurden ein rein hyperelastisches und ein visko-hyperelastisches Materialmodell kalibriert, welche in der Simulation ähnliche Vorhersagegenauigkeit der Wanddickenverteilung liefern. In Kombination des vereinfachten Rechenmodells zur Bestimmung der Halbzeugtemperaturverteilung mit der Simulation unter Nutzung des weniger komplexen Yeoh-Modells kann die Wanddickenverteilung in rund 5 Minuten bestimmt werden. Die zum Ziel gesetzte Halbierung der Zeit zur Ermittlung der Wanddickenverteilung wird demnach erreicht. Eine feinere Vernetzung des Halbzeugs lässt bessere Übereinstimmungen erwarten, jedoch erhöht sich dadurch wiederum die Rechenzeit, was durch leistungsfähigere Rechencluster ausgeglichen werden könnte. Der digitale Zwilling konnte darüber hinaus erfolgreich unter typischen, industrienahen (Stör-)Bedingungen validiert werden und bietet deshalb ein hohes Potenzial zur Optimierung der Prozessüberwachung und damit zur Reduktion von Ausschüssen. ■

## Info

### Text

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann** ist Inhaber des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung und Leiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen.

**Daniel Grüber, M.Sc.**, beschäftigt sich mit dem Thermoformen am IKV.

**Timo Witte, M.Sc.**, beschäftigt sich mit faserverstärkten Kunststoffen und der Tapeverarbeitung am IKV.

**Malte Schön, M.Sc.**, ist Leiter der Abteilung Extrusion und Kautschuktechnologie am IKV.

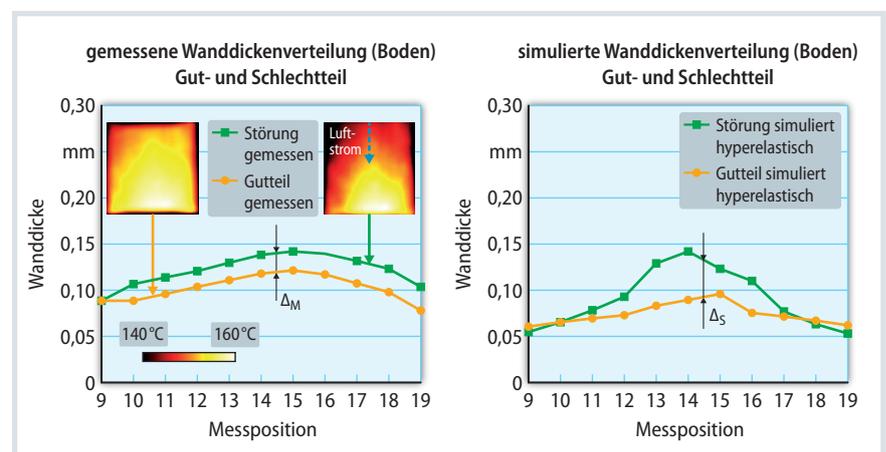
### Dank

Das IGF-Forschungsvorhaben 21301 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

### Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter

[www.kunststoffe.de/onlinearchiv](http://www.kunststoffe.de/onlinearchiv)



**Bild 5.** Vergleich der gemessenen und simulierten Wanddickenverteilungen am Becherboden mit und ohne Störeinfluss. © Quelle: IKV; Grafik: © Hanser