

Bach, Sascha, Dr.-Ing.  
Stein, Marcus, Dipl.-Ing.  
Bunk, Norbert, Dipl.-Ing.

# **Prozesssimulation beim Siegeln und Thermoformen**

## **1 Einleitung**

Viele Prozesse in der Verarbeitungs- und Verpackungstechnik sind durch eine komplexe Wechselwirkung der Wirkpaarung Verarbeitungsgut, i.d.R. Packstoff und/oder Füllgut sowie dem Arbeitsorganen gekennzeichnet. In den überwiegenden Fällen können die Vorgänge und Prozessgrößen im Prozess selbst nicht erfasst werden und einzig das Endergebnis des Vorgangs bewertet werden, worüber ein empirischer Zusammenhang zu dem Prozesseingangsgrößen hergestellt werden. Der Prozess selbst stellt sich dabei als „Black-Box“ dar, bei dem die orts- und zeitaufgelösten Prozessgrößen der Verarbeitungsgüter in der Regel unbekannt und auch messtechnisch nur schwer zu erfassen sind.

Physikalische Prozesssimulationen erlauben die Zusammenhänge zwischen Prozessparametern (Stellgrößen des Prozesses) und den Prozessgrößen, wie beispielsweise vorherrschenden Temperaturen und deren Verteilung oder lokal wirkende Prozesskräfte und daraus resultierende Beanspruchungen der Verarbeitungsgüter unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der Verarbeitungsgüter abzubilden.

Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend am Beispiel von Siegel- und Thermoformprozessen die Potenziale in Hinblick auf die Prozessanalyse und daraus abgeleiteter Prozessverbesserungen in der Kunststoffverarbeitung diskutiert.

## **2 Materialcharakteristik bei der Modellbildung thermischer Verarbeitungsvorgänge**

Die thermischen Verarbeitungsvorgänge, wie Siegeln oder Thermoformen sind im Wesentlichen dadurch gekennzeichnet, dass das Verarbeitungsgut (die Kunststoff- oder Kunststoffverbundfolie) durch Zufuhr thermischer Energie/Wärme seine Eigenschaften aufgrund einer starken Temperaturabhängigkeit verändert und damit Form- und Verbindungsvorgänge ermöglicht werden. Dabei werden im Allgemeinen mindestens zwei Zustandsbereiche der mechanischen Eigenschaften (vgl. Abbildung 1 für teilkristalline Kunststoffe) durchlaufen. Beim Thermoformen, speziell amorpher Kunststoffe, betrifft dies den Übergang vom energieelastischen Bereich (I gemäß Abbildung 1) in den entropieelastischen Bereich (II gemäß Abbildung 1) über den Erweichungsbereich bzw. Glasübergang hinweg. Beim Siegeln der zum überwiegenden Teil teilkristallinen Kunststoffe, wie Polyethylen oder Polypropylen, wird im Prozess beginnend vom entropieelastischen Bereich (thermoelastisch) notwendigerweise der Schmelzbereich überschritten, was ein thermoplastisch-viskoses Materialverhalten nach sich zieht (Bereich III gemäß Abbildung 1). Diese Übergänge sind, wie in Abbildung 1 zu

erkennen, stark nichtlinear und erfordern neben geeigneten konstitutiven mathematischen Materialmodellen auch Verfahren zur Lösung der hochgradig nichtlinearen Gleichungen.

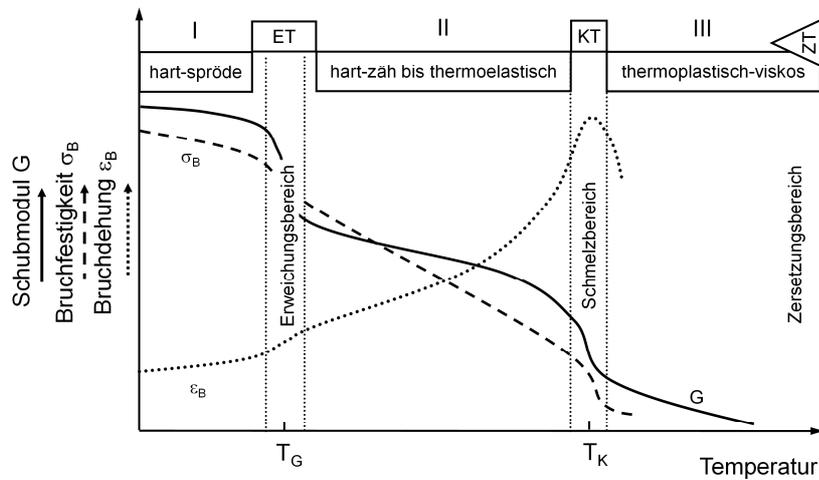


Abbildung 1 Zustandsdiagramm teilkristalliner Thermoplaste nach /POT 2004/

Für technische Berechnungen haben sich in den letzten Jahrzehnten verschiedene numerische Verfahren etabliert. Eines der bekanntesten stellt die Finite-Elemente-Methode (FEM) dar, bei der über eine räumliche und ggf. zeitliche Diskretisierung die Lösung der für die Verformungsberechnung erforderlichen Differentialgleichungen auch unter Berücksichtigung nichtlinearer Effekte näherungsweise erfolgt. Prinzipiell ist es in den gängigen und kommerziell verfügbaren FE-Programmen möglich, das temperaturabhängige und auch zeitabhängige Verhalten der Materialien abzubilden. Dazu stehen beispielsweise diverse viskoelastische, hyperelastische, viskoplastische oder elasto-plastische Materialmodelle zur Verfügung. Da die Verarbeitungsprozesse in der Regel instationär und unter Wärme-zu- bzw. -abfuhr ablaufen, müssen die parallel stattfindenden Wärmeleit- und Übergangsvorgänge betrachtet werden. Mathematisch erfolgt dies über die numerische Lösung der Fourierschen Differentialgleichung, mit Hilfe der die räumliche und zeitliche Verteilung des Temperaturfeldes für die vorrangig durch Wärmeleitung geprägten Vorgänge ermittelt werden kann. Auch die relevanten thermischen Eigenschaften, wie:

- Dichte bzw. spezifisches Volumen
- Wärmeleitfähigkeit
- Wärmekapazität bzw. Enthalpie

sind für Kunststoffe in der Regel abhängig von der Temperatur /POT 2004/. Die Ermittlung der temperaturabhängigen Wärmekapazität kann beispielsweise mittels DSC (Differential Scanning Calorimetry) Analyse erfolgen, bei der die aufgenommene bzw. abgegebene Wärmemenge während der definierten Aufheizung und Abkühlung einer Probe ermittelt wird /EHR 2003/. Die Ermittlung von Dichte und Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur hingegen ist deutlich aufwändiger, in der Regel werden diese Eigenschaften in Simulationsrechnungen daher als konstant angenommen und müssen bei nicht akzeptablen Abweichungen während der Verifizierung nachträglich angepasst werden.

### 3 Modellierung und Simulation von Siegelvorgängen

Ein in der Verpackungs- und Verarbeitungstechnik häufig eingesetztes Siegelverfahren stellt das Wärmekontaktsiegelverfahren dar. Dabei wird mittels eines dauer- oder impulsbeheizten Siegelwerkzeugs Wärme im Kontakt auf die zu verbindenden Packstoffe übertragen. In Abhängigkeit der Wärmeleiteigenschaften, bestimmt durch den Packstoffaufbau, wird die thermische Energie in die Fügeebene (Kontaktebene der zu verbindenden Folienlagen) geleitet. Eine praxismäßige Fragestellung für eine solche Simulationsaufgabe kann beispielsweise sein, wieviel Zeit mindestens erforderlich ist, um für einen bestimmten Packstoffaufbau bei einer gegebenen Siegelwerkzeugtemperatur und -kontur die erforderliche Temperatur in der Fügeebene (in der Regel mindestens die Schmelztemperatur) zu erreichen. Dies stellt zwar zunächst eine weitestgehend thermodynamische Aufgabenstellung dar, wird aber auch von mechanischen Wechselwirkungen zwischen Siegelwerkzeug und Packstoff beeinflusst. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn profilierte Siegelwerkzeuge zum Einsatz kommen und eine signifikante Packstoffverformung eintritt, die neben den Kontaktverhältnissen für den Wärmeübergang auch eine mechanische Beanspruchung des Packstoffes bedingt. Dahingehend kann auch eine durch die Siegelwerkzeuge unzulässige Beanspruchung erfolgen, was eine Schädigung der Packstoffe bedingt. Eine bekannte und immer noch aktuelle Problemstellung stellt dafür beispielsweise das lokale Reißen von Barrierschichten aus Aluminium dar.

Bei der Simulation von Siegelvorgängen existieren daher verschiedene Komplexitätsstufen (siehe Abbildung 2). Je nach Anwendungsszenario und Anforderungen an die Ergebnisse können von einfachen eindimensionalen, teilweise sogar analytischen Berechnungen von Wärmeleitvorgängen, bis hin zu dreidimensionalen thermisch-mechanischen gekoppelten Berechnungen erforderlich sein. Wesentliches Kriterium dafür, welche Komplexität das Modell aufweist stellt die Anwendung, aber auch die spezifischen Materialeigenschaften dar.

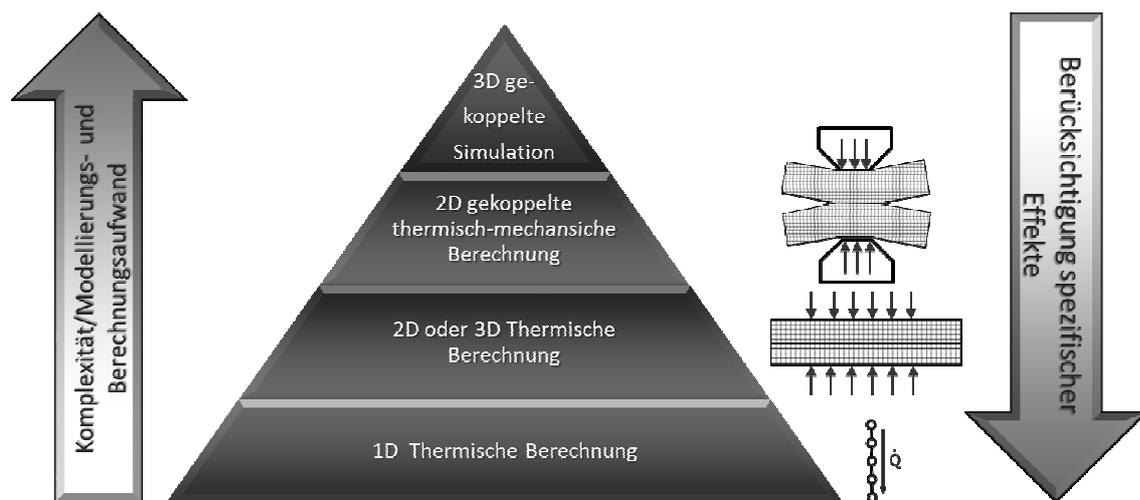


Abbildung 2 Komplexitätsstufen der Simulation von Siegelvorgängen

Ein wesentliches bestimmendes Kriterium der Komplexität ist neben der Form und Art der Siegelwerkzeuge, die Anordnung der zu verbindenden Folienlagen. Werden beispielsweise nur zwei ebene Folienlagen mit einem flachen Siegelwerkzeug gesiegelt, kann für eine Berechnung vereinfachend bereits eine einfache eindimensionale thermische Berechnung ausreichend sein, da mechanische Einflüsse nahezu vernachlässigbar sind bzw. das Temperaturfeld nicht maßgeblich beeinflussen. Derartige Modelle sind unter anderem in /MEKA1994/ und /MAUE 2001/ beschrieben. Der Vorteil der eindimensionalen Modelle stellt der sehr geringe Berechnungsaufwand dar. Es können auch Lagenaufbauten, wie beispielsweise bei Verbundfolien berücksichtigt werden, sofern die erforderlichen Materialeigenschaften der Einzelschichten bekannt sind. Ein derartiges Berechnungsmodell ermöglicht eine einfache und schnelle Abschätzung der erforderlichen Siegelzeit in Abhängigkeit der Packstoff- bzw. Lagendicken, Siegelwerkzeugtemperatur und thermischen Eigenschaften der Packstoffe. Bereits in /BACH 2012/ wurde auf die Bedeutung der Temperaturabhängigkeit der thermischen Eigenschaften, insbesondere der Wärmekapazität bzw. Enthalpie verwiesen. Aufgrund der Phasenumwandlung und dem Aufschmelzen der kristallinen Bereiche der teilkristallinen Kunststoffe wird Wärme benötigt, die zunächst nicht wesentlich zur Temperaturerhöhung beiträgt (latente Wärme) /EHR 2003/. Dies führt je nach Kristallisationsgrad des Siegelpolymers zu einem charakteristischen Verlauf der Temperatur in der Fügeebene. Abbildung 3 (links) zeigt die Abhängigkeit der Wärmekapazität von der Temperatur für PE-LD. Im Bereich der Schmelztemperatur (in dem Fall bei ca. 115 °C) kann diese um ein Vielfaches ansteigen, was durch die bereits diskutierten Phasenübergangsvorgänge bedingt ist. Der Einfluss auf die Temperatur in der Fügeebene ist in Abbildung 3 rechts illustriert. Dargestellt sind Messergebnisse ermittelt mit Feindrahtthermoelementen und entsprechende Simulationsergebnisse für die symmetrische Siegelung zweier Folienlagen aus einem PET/PE Verbund. Deutlich erkennbar ist die Abflachung im Kurvenverlauf um die Schmelztemperatur infolge der latenten Wärme für die gemessene und ausschließlich bei Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität berechnete Temperatur in der Fügeebene.

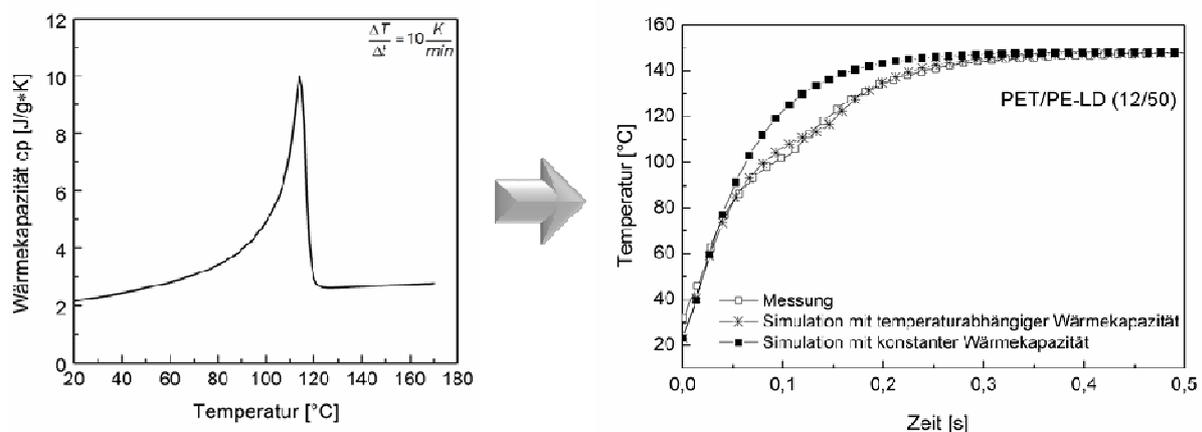


Abbildung 3 Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität von PE (links) und Einfluss auf den Temperaturverlauf in der Fügeebene (rechts) /BACH 2012/

Demgegenüber verläuft die Temperaturkurve bei Annahme konstanter Wärmekapazität gleichmäßiger und deutlich abweichend zur experimentellen Messung. Die Schmelztemperatur, als Kriterium für eine erfolgreiche Siegelung, ist deutlich früher überschritten, was für die praktische Problemstellung unter Umständen zu einer Fehlinterpretation führen kann.

Weiterhin konnte bereits in /BACH 2012/ gezeigt werden, dass auch für rein thermische Berechnungen ein 2-dimensionales Modell unter gewissen Bedingungen erforderlich sein kann. Dies ist insbesondere dann entscheidend, wenn in einzelnen Schichten der Verbundfolien eine signifikante laterale Wärmeleitung auftritt, wie bei Aluminium-Barriereschichten. In dem Fall wird die Temperaturverteilung durch den seitlichen Wärmeabfluss aus der Fügezone signifikant beeinflusst /BACH 2012/.

Thermische Berechnungen können neben der Ermittlung der erforderlichen Siegelzeit auch zur Bewertung des Packstoffaufbaus in Bezug auf die Abkühlung nach dem Siegelvorgang genutzt werden. Dazu wird im Anschluss an den Siegelvorgang anstelle des über die Siegelwerkzeuge zugeführten Wärmestroms eine konvektive Randbedingung aufgebracht. Dies wurde u.a. in /KÜC 2006/ und /BACH 2012/ vorgestellt. Dabei zeigte sich, dass mit Wärmeübergangskoeffizienten für freie Konvektion von ca.  $15 \text{ W/m}^2\text{-K}$  prinzipiell eine gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Abkühlkurven ermittelt werden konnte. Deutlich wurde jedoch zusätzlich, dass auch der Unterschied der temperaturabhängigen Wärmekapazität zwischen dem Aufschmelz- und Abkühl-(Rekristallisations-)Prozess einen deutlichen Einfluss auf das Simulationsergebnis besitzt und für exakte Ergebnisse zusätzlich die temperaturabhängige Wärmekapazität des Rekristallisationsprozesses ermittelt und berücksichtigt werden muss.

Für den Fall profilierter Werkzeuge ist eine 2-dimensionale Berechnung unabdingbar. Für komplexere Werkzeugstrukturen oder Folienüberlappungen mit Lagensprüngen, wie bei der Überlappstelle zwischen Längs- und Quernaht am Schlauchbeutel, kann sogar eine 3-dimensionale Modellerstellung erforderlich sein. Auch ist dazu eine Berechnung mit Kopplung thermischer und mechanischer Berechnung erforderlich. Abbildung 4 (rechts) zeigt beispielhaft ein 2-dimensionales Modell für die thermisch-mechanisch gekoppelte Simulation des Wärmekontaktsiegelvorgangs zweier Lagen einer Duplex-Verbundfolien (PET/PE) mit einem längsgeriffelten Siegelwerkzeugprofil.

Da diese Modelle im Vergleich zum eindimensionalen Fall einen deutlich höheren Berechnungsaufwand erfordern, wurden gegebene Symmetrien genutzt und nur die Hälfte der geometrischen Anordnung im Schnitt quer zur Siegelnaht modelliert. Ebenfalls vereinfachend wurden lediglich die Oberflächen der Siegelwerkzeuge als Balkenelemente abstrahiert und die Siegelwerkzeug-Solltemperatur als Temperaturrandbedingung angesetzt. Über konvektive Randbedingungen wurde dem seitlichen Wärmeabfluss Rechnung getragen. Die temperaturabhängig ermittelten mechanischen Eigenschaften (Spannungs-Dehnungskurven) wurden mittels eines multilinearen elastisch-plastischen Materialmodells abgebildet.

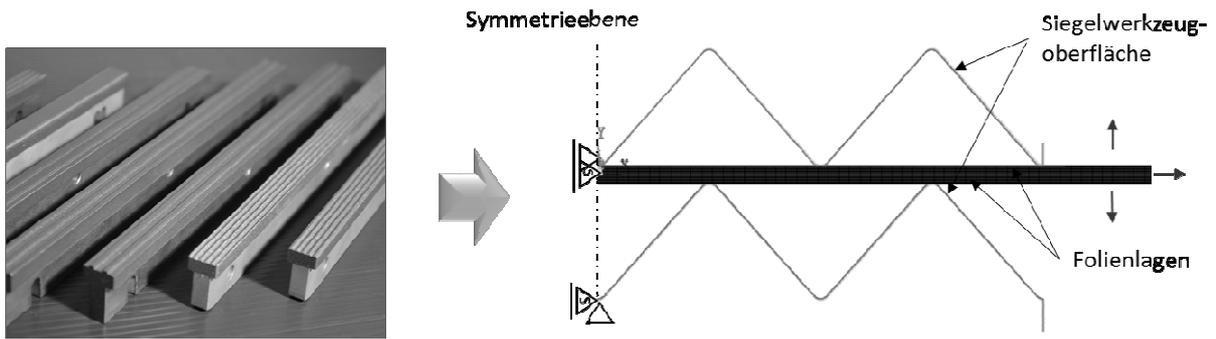


Abbildung 4 Profilierte Siegelwerkzeuge (links) und abgeleitetes 2D-Modell für eine gekoppelte thermisch-mechanische Simulation des Siegelvorgangs (rechts) /BACH 2014/

In Abbildung 5 sind die Ergebnisse der Simulation mit experimentellen Ergebnissen verglichen. Aufgrund der Werkzeugprofilierung ist eine messtechnische Erfassung der Temperatur in der Fügeebene nicht möglich, daher wurden Mikroskopaufnahmen der Packstoffverformung während des Siegelvorgangs und nach dem Siegelvorgang am Mikrotomschnitt zum qualitativen Vergleich hinzugezogen.

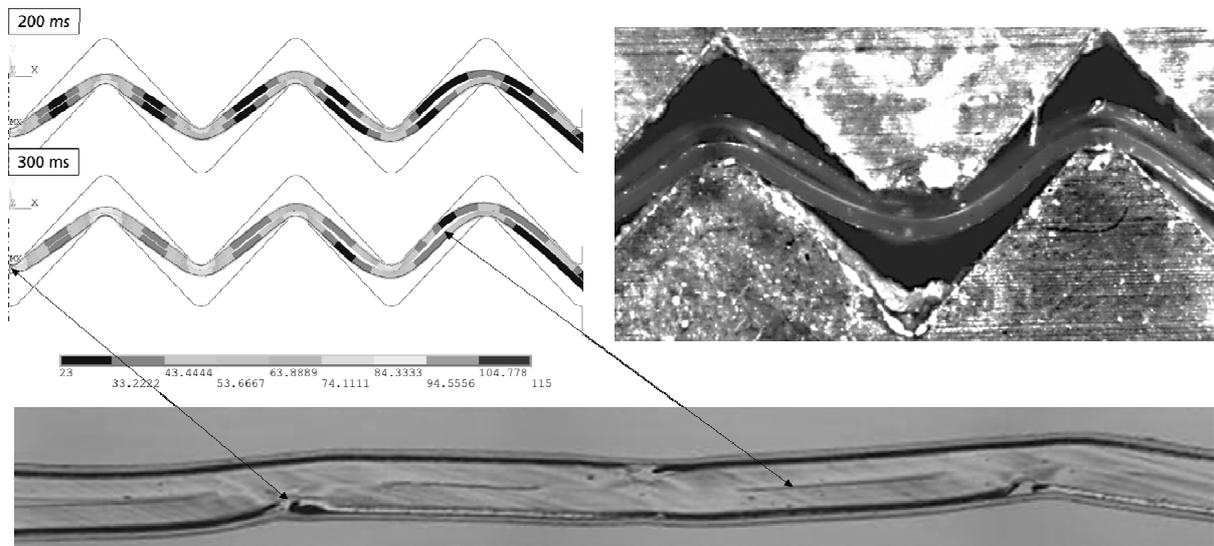


Abbildung 5 Simulationsergebnis für die gekoppelte thermisch-mechanische Simulation der Siegelung eines PET/PE-Verbundes mit längsgeriffeltem Siegelprofil (links oben) bei 115°C Siegeltemperatur und zugehörige Messung der Packstoffverformung während des Siegelvorgangs (recht oben) sowie einem Mikrotomschnitt einer Siegelnaht (unten)

Bei den in Abbildung 5 dargestellten Ergebnissen mit vergleichsweise niedriger Siegeltemperatur und einer Siegelkraft von 1000 N (bezogen auf eine Siegellänge von 200 mm und einer Werkzeugbreite von ca. 10 mm) resultiert eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation

und Experiment. In beiden Fällen schließen die Siegelwerkzeuge nicht vollständig, da der Widerstand infolge der Packstoffverformung zu groß ist. Anhand der Simulationsergebnisse (Abbildung 5 links oben) wird auch deutlich, dass die Kontaktverhältnisse die Packstoff-erwärmung signifikant beeinflussen. So treten insbesondere im Bereich der Profilflanken, bei denen kein Kontakt eintritt, deutlich geringere Temperaturen im Packstoff auf. An Mikrotom-schnitten der Siegelung wird deutlich, dass genau in diesen Bereichen keine Versiegelung stattfindet. An den Profilspitzen hingegen zeigen sich deutliche Versiegelungen und es kommt infolge der dort auftretenden Spannungskonzentrationen zu Packstoffschädigungen. Mithilfe des im AiF-Forschungsprojekt „Siegelwerkzeuggestaltung“ (Förderkennzeichen 17015N) erarbeiteten Simulationsmodells konnten verschiedene Profilvarianten vergleichend untersucht werden und neben dem Einfluss spezifischer Profilparameter auf die Temperatur-verteilung und Packstoffbeanspruchung auch der Heizleistungsbedarf in Abhängigkeit von Packstoffaufbau und Siegelwerkzeugprofil ermittelt werden /SCHR 2014/. Es existieren aktu-ell jedoch auch Limitierungen. So kommt es infolge einsetzender Fließvorgänge, die bis zu einem gewissen Grad noch berücksichtigt werden können, zu starken Netzverformungen bei der zugrundeliegenden Lagrange'schen Berechnungsmethode.

#### **4 Modellierung und Simulation des Thermoformvorgangs**

Der Thermoformvorgang ist ähnlich dem Siegelvorgang durch eine für den Prozess bestim-menden Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften der Kunststoffolie durch Erwär-mung gekennzeichnet. Die Folie wird dabei mittels Kontakt- oder Strahlerheizung auf Um-formtemperatur (Glastemperatur für amorphe Kunststoffe oder Schmelzbereich für teilkristal-line Kunststoffe) erwärmt und anschließend mittels Über- oder Unterdruck ausgeformt. Beim sogenannten Negativformen wird die Folie dabei in die Kavität (Formwerkzeug) geformt, häufig unterstützt durch eine mechanische Vorstreckung mittels Vorstreckstempel /THRO 2008/.

Simulationsmodelle auf Basis der Finiten-Elemente-Methode sind in zahlreichen Publikatio-nen beschrieben, beispielsweise in /NIED 1990/, /SONG 2000/, /DONG 2006/. Vorrangig wurden hyperelastische Materialmodelle für die Materialmodellierung eingesetzt, die sich einerseits gut für die Simulation großer Verformungen bzw. Dehnungen eignen und darüber hinaus eine temperaturabhängige Definition der Materialeigenschaften erlauben.

Im Rahmen des durch das BMBF geförderten VIP-Vorhabens „CeraHeat“ wurde ein Simula-tionsmodell für den Thermoformvorgang ohne mechanische Vorstreckung erarbeitet. Hinter-grund ist die gezielte Beeinflussung der Wanddickenverteilung durch eine inhomogene Er-wärmung, dessen positive Prozessbeeinflussung in /MARW 1996/ beschrieben ist. Im Pro-jekt wurde dafür eine neuartige Heiztechnologie auf Basis keramischer Dickschichtheizer eingesetzt, die ein definiertes inhomogenes Temperaturfeld auf der umzuformenden Folie im Kontaktverfahren erzeugen kann. Das Modell wurde dabei unterstützend zur Ermittlung der formspezifisch optimalen Temperaturverteilung entwickelt /STEIN 2013/. Für das Beispiel einer rotationssymmetrischen Form wurde ein axialsymmetrisches 2D-Modell gemäß Abbil-dung 6 aufgebaut, das später auch in ein 3D-Modell nach gleichem Prinzip erweitert wurde.

Die Kopplung der thermischen und mechanischen Berechnung erfolgte dabei sequentiell (siehe Abbildung 6). Zunächst wird das vom Heizsystem auf die Folie übertragene Temperaturfeld in einer transienten thermischen Analyse berechnet und anschließend in einem zweiten Berechnungsschritt, die durch Konvektion bedingte Abkühlung während des Transports in die Formstation sowie lokale Abkühlung der Randbereiche infolge Kontakt mit den Formwerkzeugen betrachtet. In der nachfolgenden impliziten strukturmechanischen Berechnung wird zunächst das Temperaturfeld aus der thermischen Berechnung übertragen und anschließend der eigentliche Formvorgang durch Aufbringung des Formdrucks simuliert.

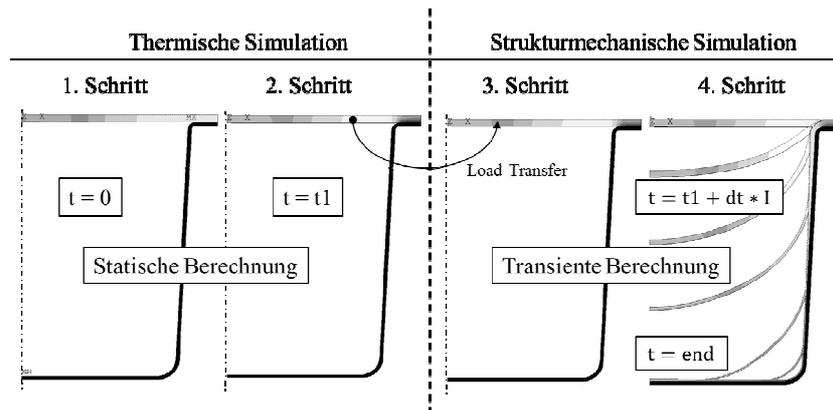


Abbildung 6 Schematischer Ablauf der physikalisch gekoppelten Simulation /STEIN 2013/

Das temperaturabhängige und zudem dehnratenabhängige Materialverhalten (siehe Abbildung 7) wurde mithilfe des TMC-Versuchs, entwickelt und durchgeführt an der Universität Stuttgart, und durch biaxiale Zugversuche ermittelt. Die Materialmodellierung erfolgte ebenfalls unter Nutzung eines hyperelastischen Materialmodells, dem 3-parametrischen Mooney-Rivlin Modell in Kombination mit Prony-Reihen zur Abbildung des zeitabhängigen Verhaltens.

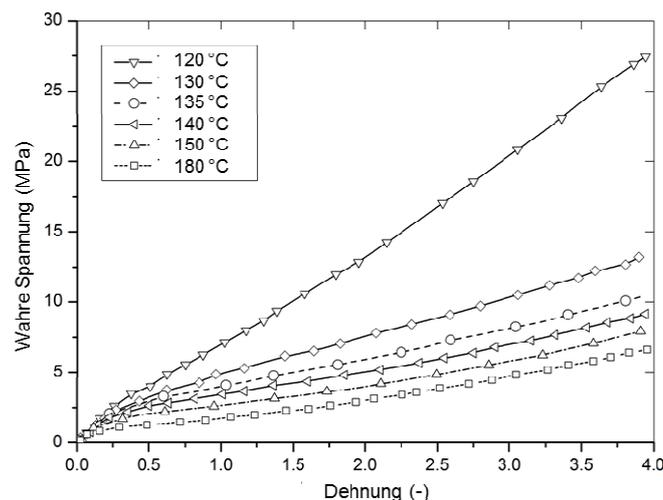


Abbildung 7 Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungskurven für Polystyrol (PS)

Mit dem Simulationsmodell ist eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Untersuchungen festzustellen (siehe Abbildung 8). Die Parametrierung der Reibwerte erwies sich bei der

Modellierung stets als schwierig, da eine messtechnische Erfassung der Reibwerte im Umformtemperaturbereich nur näherungsweise erfolgen kann. Daher wurden mit dem Modell Parameterstudien zum Einfluss der Reibung beim Formvorgang durchgeführt. Die Ergebnisse in Abbildung 8 zeigen, dass bei Annahme eines reibungsfreien Kontakts ( $\mu=0$ ) eine vom Versuch abweichende Wanddickenverteilung des Formteils insbesondere im Bodenbereich resultiert. Erst bei Reibwerten größer 0 lässt sich eine gute Übereinstimmung mit dem Versuch feststellen. Überraschenderweise weist jedoch die Höhe des Reibwertes darüber hinaus einen eher marginalen Effekt auf. Dies ist darüber zu erklären, dass bereits bei geringster Reibung die Haftkräfte ein Abgleiten an der Formwerkzeugwand unterbinden.

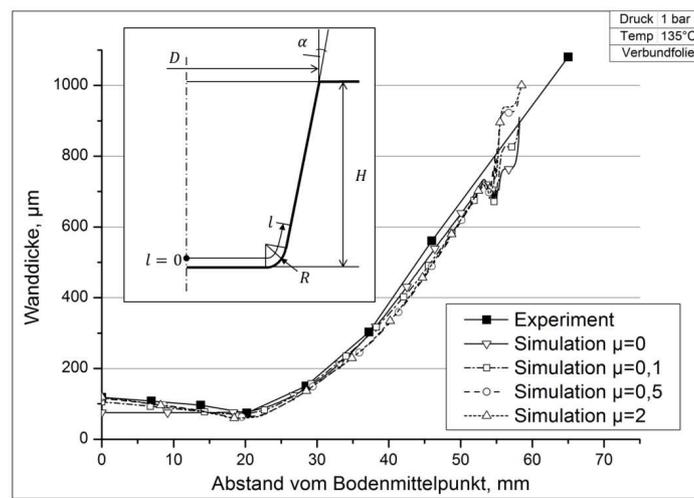


Abbildung 8 Vergleich von Simulationsergebnissen bei verschiedenen Reibkoeffizienten mit Versuchsergebnissen

Mithilfe eines entwickelten Optimierungsalgorithmus ist es unter Nutzung des Simulationsmodells möglich, ein für eine möglichst gleichmäßige Wanddicke optimales Temperaturfeld zu ermitteln. Dabei wird iterativ die lokale Temperatur solange angepasst, bis die Wanddicke des Bereiches möglichst nahe der ideal homogenen Wanddicke ist. Es zeigte sich, dass für die Ermittlung des optimalen Temperaturfeldes lediglich ca. 5 Iterationsschleifen erforderlich sind und das Simulationsmodell effizient zur Optimierung des Thermoformprozesses genutzt werden kann.

Die Ergebnisse in Abbildung 9 zeigen eine deutlich gleichmäßigere Wanddickenverteilung anhand der lokalen Dehnung bei optimiertem Temperaturfeld für das betrachtete rotations-symmetrische Formteil. Dabei konnte im kritischen Boden-Übergangsbereich die Wanddicke um mehr als 100 % erhöht werden, was zu deutlich verbesserten mechanischen Eigenschaften des Formteils führt bzw. eine Reduzierung der Ausgangsmaterialsstärke bei gleichbleibenden Eigenschaften ermöglicht.

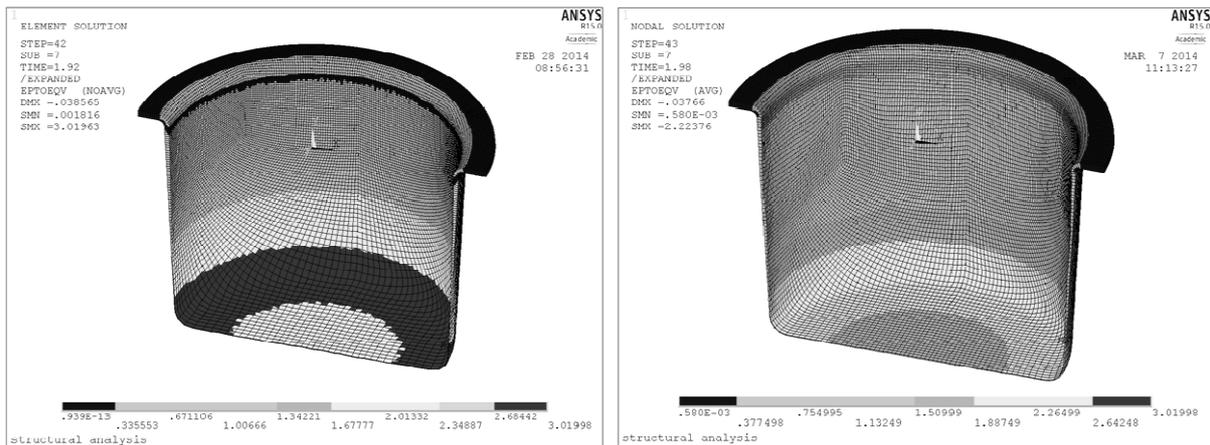


Abbildung 9 Dehnungsverteilung bei homogener Erwärmung (links) und Einsatz des optimiertem Temperaturfeld (rechts)

## 5 Zusammenfassung

Anhand der vorgestellten Beispiele wurde gezeigt, in welchem Maße aktuell Prozessmodelle zur Analyse und Optimierung von thermischen Verarbeitungsvorgängen genutzt werden können. Hauptvorteil der Simulationsrechnungen liegt in der Möglichkeit, nicht oder nur mit erheblichen Aufwand bestimmbare Prozessgrößen ort- und zeitaufgelöst ermitteln zu können. Auch wenn sich dabei aufgrund der Komplexität der Prozesse und der Vielzahl an teilweise unbekanntem Parametern nicht in jedem Fall quantitative exakte Ergebnisse erzielen lassen, so können derartige Modelle sehr effizient und kostensparend wertvolle Erkenntnisse in Bezug auf den Einfluss spezifischer Parameter und der Wechselwirkung von Parametern liefern.

Im konkreten Beispiel der Siegelprozesssimulation konnten mit dem entwickelten gekoppelten thermisch-mechanischen Modell erstmals systematische modellgestützte Untersuchungen zum Einfluss von Siegelwerkzeugparametern auf die Temperaturverteilung in der Fügezone und die vorherrschenden Packstoffbeanspruchungen vorgenommen werden.

Im dargestellten Beispiel der Thermoformprozesssimulation konnte im Rahmen der letztjährigen Forschungsarbeiten ein Modell erarbeitet werden, das die für ein neuartiges Heizsystem notwendige Ermittlung einer optimalen Temperaturverteilung in der umzuförmenden Folie ermöglicht, welche eine deutliche Verbesserung der Wanddickenverteilung des Formteils verspricht.

## 6 Ausblick

Trotz der bereits erzielten Fortschritte und positiven Ergebnissen der vorgestellten Simulationsmodelle ergibt sich noch eine Reihe von erforderlichen Weiterentwicklungen. Für das Beispiel der Siegelsimulation liegt die derzeitige Grenze der Modelle beim Beginn des Schmelzebildung und -flusses. Aufgrund der dabei auftretenden Netzverzerrungen werden mit herkömmlichen FEM-Modellen die Berechnungen bei lokal großen Verformungen insta-

bil. Abhilfe diesbezüglich ist nur durch den Einsatz alternativer Berechnungsmethoden zu erwarten. Interessante Ansätze dafür sind u.a. in /LEVY2011/ vorgestellt, wo durch den Einsatz Eulerscher Berechnungsverfahren, die zur Verschiebungsberechnung keine Knotenverschiebung und damit Netzverzerrung bedingen, und damit auch die Betrachtung des Schmelzeflusses versprechen. Kommerzielle FE-Programme unterliegen derzeit starken Entwicklungen in Hinblick auf entsprechende Berechnungsmethoden. So werden zunehmende auch netzfreie Methoden implementiert, die die Simulation sehr großer Verformungen und Fließvorgänge in Kombination mit thermischer Berechnung ermöglichen.

In Bezug auf die Thermoformsimulation besteht insbesondere weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich effizienter Methoden zur Materialcharakterisierung und -modellierung. Zwar ermöglichen die vorhandenen Verfahren prinzipiell die Ermittlung der erforderlichen Materialdaten, jedoch sind häufig noch rekursive Parameteranpassungen erforderlich, die einen uneingeschränkten Einsatz derartiger Modelle im industriellen Umfeld erschweren. Dahingehend wird in aktuellen Forschungsarbeiten an der Weiterentwicklung von Charakterisierungsverfahren gearbeitet. Auch werden die vorhandenen Modelle aktuell erweitert, sodass beispielsweise bei Einsatz eines Vorstreckstempels und für die zweite Verfahrensvariante des Positivformens die simulationsgestützte Temperaturfeldoptimierung genutzt werden kann.

## Literatur

- /BACH 2012/ BACH, S., MAJSCHAK, J.-P.: Möglichkeiten und Grenzen der Simulation thermischer Verarbeitungsvorgänge in der Verpackungstechnik am Beispiel des Wärmekontakt- und Ultraschallsiegelns, Tagungsband der VVD 2012, Dresden, 2012
- /BACH 2014/ BACH, S.: Finite-element-simulation of sealing and thermoforming processes, IPI International Packaging Institute Event Simulation – Added Values for Design of Packages and Processes, 30. Oktober 2014, Neuhausen (Schweiz)
- /BACH 2010/ BACH, S., THÜRLING, K., MAJSCHAK, J.-P.: Analysis and modelling of the heating and sealing behaviour of polymer films during ultrasonic sealing, proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference Polymeric Material, Halle, 2010
- /EHR 2003/ EHRENSTEIN, G.W., RIEDEL, G., TRAWIEL, P.: Praxis der Thermischen Analyse von Kunststoffen. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2003
- /DONG 2006/ DONG, Y., LIN, R.J.T., BHATTACHARYYA, D.: Finite Element Simulation on Thermoforming Acrylic Sheets Using Dynamic Explicit Method, Polymers & Polymer Composites, Vol. 14, No. 3, 2006
- /KÜC 2006/ KÜCHLER, W., NEUMANN, T., Otto, C.: Abschlussbericht zum BMBF-Projekt Dünne Folien – Beitrag der Technischen Universität Dresden, 2006

- /LEVY2011/ LEVY, A., CORRE, S.L., POITOU, A.: A level set based approach for the finite element simulation of a forming process involving multiphysics coupling: Ultrasonic welding of thermoplastic composites, European Journal of Mechanics, Vol. 30, 2011, p.p. 501-509
- /MAUE 2001/ MAUERMANN M.: Untersuchung zum Parametrisieren eines Vorganges der Nahtbildung. Diplomarbeit, TU Dresden, Professur für Verarbeitungsmaschinen und Verarbeitungstechnik, 2001
- /MARW 1996/ VAN MARVICK, J. P.; MICHAELI, W.: Automation of the Thermoforming Process by a Wall Thickness Closed-Loop Control, Soc. of Plastics Engineers (SPE). ANTEC'96, Indianapolis, 5.-10. May 1996, Conference Handbook, 863 – 868
- /MEKA 1994/ MEKA, P., STEHLING, F.: Heat Sealing of Semicrystalline Polymer Films. I. Calculation and Measurement of Interfacial Temperatures: Effect of Process Variables on Seal Properties, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 51, p.p. 89-103, 1994
- /NIED 1990/ NIED, H.F., TAYLOR, C.A., DELORENZI, H.G.: Three-Dimensional Finite Element Simulation of Thermoforming, Journal of Polymer Engineering and Science, Vol. 30, No. 20, 1990
- /POT 2004/ POTENTE, H.: Fügen von Kunststoffen – Grundlagen, Verfahren, Anwendung, Carl Hanser Verlag, München, 2004
- /SCHR 2014/ SCHREIB, I., JÄHNCHEN, R., BUNK, N.: Abschlussbericht zum AiF-Projekt „Analyse und Modellierung des Einflusses der Siegelwerkzeugprofilierung auf die Nahtqualität von Verpackungen beim Wärmekontaktsiegeln“, Kurztitel „Siegelwerkzeuggestaltung“, Förderkennzeichen 17015N, Dresden 2014
- /STEIN 2013/ STEIN, M., BACH, S., CLAUS, R., MAJSCHAK, J.-P.: Improvements in Heating for Thermoforming Processes – A Simulation Study, 26th IAPRI Symposium on Packaging, Espoo, 10th-13th June 2013
- /SONG 2000/ SONG, Y., ZHANG, K.F., WANG, Z.R., DIAO, F.X., YAN, Y.N., ZHANG, R.J.: Coupled Thermo-Mechanical Analysis for Plastic Thermoforming, Journal of Polymer Engineering and Science, Vol. 40, No. 8, 2000
- /THRO 2008/ THRONE, J.-L.: Understanding Thermoforming, Hanser Verlag, 2008