

Integrale Prozessauslegung und digitales Thermoformen für optimale Ressourcennutzung

Dr. Sascha Bach*, Marcus Stein, Ronald Claus von Nordheim

watttron GmbH, Dresdner Str. 172c, 01705 Freital, sascha.bach@watttron.com,

Tel.: 0351 850 73 040

1. Einleitung und Motivation

Das Thermoformen, umgangssprachlich auch als Tiefziehen bezeichnet, stellt neben dem Spritzguss ein zentrales Verfahren zur Herstellung formstabiler Verpackungen aus Folien dar. Vorrangig werden Produkte des alltäglichen Bedarfs wie Verpackungen für Lebensmittel, Pharmazeutika oder technische Produkte hergestellt. Aber auch technische Bauteile wie z.B. Gehäuse von Elektrogeräten, Verkleidungsteile von Fahrzeugen oder zunehmend auch Komponenten für die Biotechnologie, bspw. Gehäuse oder permeable Membranen.

Allein die weltweite Nachfrage nach formstabilen Kunststoffverpackungen lag im Jahr 2010 bei einem Marktvolumen von 144 Mrd. \$. Bei einer jährlichen Wachstumsrate von durchschnittlich 6% wird erwartet, dass die Nachfrage bis zum Jahr 2016 auf bis zu 200 Mrd. US\$ ansteigt (Aranca 2012). In Europa werden jährlich ca. 12 Mrd. thermogeformte Verpackungen hergestellt. Der Anteil thermogeformter Produktverpackungen lag dabei im Jahr 2011 bei ca. 10%. Durch die weltweit steigende Nachfrage nach Kunststoffverpackungen, insbesondere aber durch die ökonomisch vorteilhaften Eigenschaften des Thermoformprozesses gegenüber anderen Herstellungsverfahren der Kunststoffverarbeitung, wird erwartet, dass der Anteil thermogeformter Produktverpackungen bis zum Jahr 2019 auf ein Marktvolumen von 17 Mrd. \$ anwächst (ReportsnReports 2012 & ReportLinker 2014).

2. Stand der Technik

Der Prozess des Thermoformens zur Herstellung von Verpackungen und technischer Bauteile erfolgt gemäß Abbildung 1. Zunächst wird das Halbzeug, die Folie oder eine Platte, auf Umformtemperatur erwärmt. Bei amorphen Kunststoffen, wie bspw. PS, APET oder PMMA erfolgt die Erwärmung bis oberhalb der Glasübergangstemperatur T_g . Bei teilkristallinen Kunststoffen, wie PP oder PE wird bis in den Bereich kurz unterhalb der Schmelztemperatur erwärmt. Da der Schmelzbereich teilkristalliner Kunststoffe meist deutlich kleiner ist als der Glasübergangsbereich ist auch das nutzbare Prozessfenster (Umformtemperaturbereich) i.d.R. deutlich kleiner, was bei der Verarbeitung eine präzise und reproduzierbare Prozess-

führung erfordert. Die Erwärmung erfolgt mittels Strahlungswärme (IR-Strahler) oder Kontakt-
 heizung. Kontakterwärmung wird i.d.R. in Form-Füll- und Verschleißmaschinen eingesetzt, da
 eine Strahlungserwärmung meist zu einer starken Erwärmung des Umfeldes führt, was
 insbesondere in Lebensmittelabpackprozessen unerwünscht ist.

Direkt an die Erwärmung anschließend wird mittels Druckluft oder Vakuum in bzw. an ein
 Werkzeug geformt und abschließend abgekühlt. Die Kühlung erfolgt meist durch eine aktive
 Kühlung der Umformwerkzeuge, um möglichst schnell ein formstabiles Produkt zu erhalten
 und weiterzuverarbeiten.

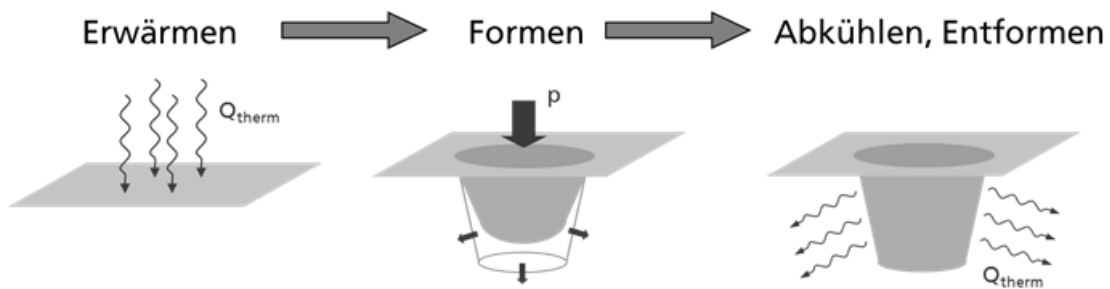


Abbildung 1 Allgemeiner Prozessablauf beim Thermoformen

Beim eigentlichen Umformvorgang, der in der Praxis häufig als Tiefziehen bezeichnet wird, kann zwischen dem sog. Negativformverfahren und Positivformverfahren unterschieden werden. Beim Negativformen wird das erwärmte Halbzeug in ein konkaves Werkzeug (Kavität) geformt, welches die Form und Maße der Außenkontur des späteren Produktes aufweist. Das geformte Teil weist daher an der Außenkontur eine entsprechende Maßhaltigkeit auf. Im Gegensatz dazu wird beim Positivformen das Halbzeug über ein (konvexes) Werkzeug geformt. Daraus resultiert eine Maßhaltigkeit an den Innenflächen des Produktes. Bei beiden Umformvarianten kommt es naturgemäß zu einer stark ungleichmäßigen Materialverteilung. Beim Negativformen dünnt der Bodenbereich je nach Umformgrad stark aus. Beim Positivformen ist der Bereich der zuerst mit der Form in Berührung kommt meist unverhältnismäßig dick und dafür die Wandbereich stark ausgedünnt. Daher wird wenn möglich mit dem sogenannten Vorstrecken gearbeitet. Im Fall des Negativformens erfolgt dies meist mithilfe eines Stempels. Dieser zieht das Material zunächst in die Kavität, anschließend wird die endgültige Ausformung mittels Druck erzielt. Dies ermöglicht bspw. bei Bechern eine ausreichend starke Materialverteilung im Bodenradiusbereich, der für die Stauchdruckfestigkeit entscheidend ist. Beim Positivformen wird mit sog. pneumatischer Vorstreckung gearbeitet. Das heißt, die Folie wird zunächst weg vom Formwerkzeug geblasen oder gesogen sodass eine Art Blase entsteht, die für eine Materialausdünnung der Bereich sorgt, die später beim Formen gegen das Werkzeug zuerst das Werkzeug berühren.

Die Material- bzw. Wanddickenverteilung (WDV) ist entscheidend für die Qualität des Formteils und dessen mechanischen, optischen, haptischen sowie funktionellen Eigenschaften (z.B. Barrierewirkung). Dabei begrenzen die Bereiche geringer Wanddicke u.a. die mechanischen und funktionellen Eigenschaften des gesamten Formteils (z.B. hinsichtlich Stauchdruckfestigkeit und Barrierewirkung). Die Wanddicke und damit die mechanischen Eigenschaften des Bauteils hängen direkt von der Halbzeugdicke ab. Der passende Zuschnitt des Ausgangsmaterials wird großflächig erwärmt, um eine Umformung zu ermöglichen. Bei der Umformung wird das Material ungleichmäßig gedehnt und damit lokal stark verjüngt. In den Bereichen großer Verformung. Um auch an diesen Stellen die geforderten Wanddicken sicherstellen zu können, wird heute das Ausgangsmaterial insgesamt i.d.R. überdimensioniert. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass bis heute ein Verfahren fehlt, mit dem einzelne Stellen des Bauteils während der Umformung gezielt beeinflusst werden können.

Eine Minimierung der Ausgangsmaterialdicke bietet jedoch erhebliches wirtschaftliches Potenzial. Die Kosten für das eingesetzte Material machen v.a. bei der Herstellung von Verpackungen den größten Anteil an den Gesamtkosten aus. Bereits eine geringfügige Materialeinsparung führt insbesondere bei großen Produktionsvolumina zu einer signifikanten Reduktion der Herstellungskosten und dadurch zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der produzierenden Unternehmen. Vor allem im Bereich der Massengüterproduktion wollen Hersteller den Einsatz von Material und Energie minimieren, um die Herstellungskosten und das Abfallaufkommen zu senken. (Begemann 2012)

3. Innovative Heiztechnologie für digitales Thermoformen

Ein durch die watttron GmbH, in Zusammenarbeit mit der TU Dresden und dem Fraunhofer IVV, entwickeltes Heizverfahren erlaubt erstmals eine definierte zonale und inhomogene Kontakterwärmung beim Thermoformen. Stand der Technik ist eine gleichmäßige Vorwärmung der Folien. Im nachgeschalteten Formprozess führt dies zu einer sehr ungleichmäßigen Materialverteilung. Bereiche im Boden der Form, die sehr stark gedehnt werden, weisen eine deutlich geringere Wanddicke auf als Bereiche der oberen Seitenwände. Dies führt zu ungünstigen Produkteigenschaften, wie geringer Stauchdruckbelastbarkeit oder verminderter Barriere der häufig für Lebensmittel genutzten Verpackungen. Bei der schon beschriebenen Stempelvorstreckung wird die Materialverteilung allerdings stark von der Stempelgeometrie, -temperatur und -oberfläche beeinflusst und ist schwierig zu steuern. Häufig entsteht so eine ebenfalls ungünstige Materialverteilung mit zu viel Wandstärke im Bodenbereich und deutlich sichtbaren Stempelmarken (Kontaktbereich des Stempels).

Das neuartige Matrix-Heizsystem der watttron GmbH hingegen erlaubt erstmals durch eine Vielzahl 5x5mm kleiner Heizkreise die Erzeugung eines definierten Temperaturprofils an der Oberfläche des Heizers. Ist das Temperaturprofil der Form angepasst kann die Material-

verteilung deutlich verbessert, die Ausgangsstärke reduziert und damit der Thermoformprozess kosten- und ressourcensparender erfolgen, wie in Abbildung 2 illustriert.

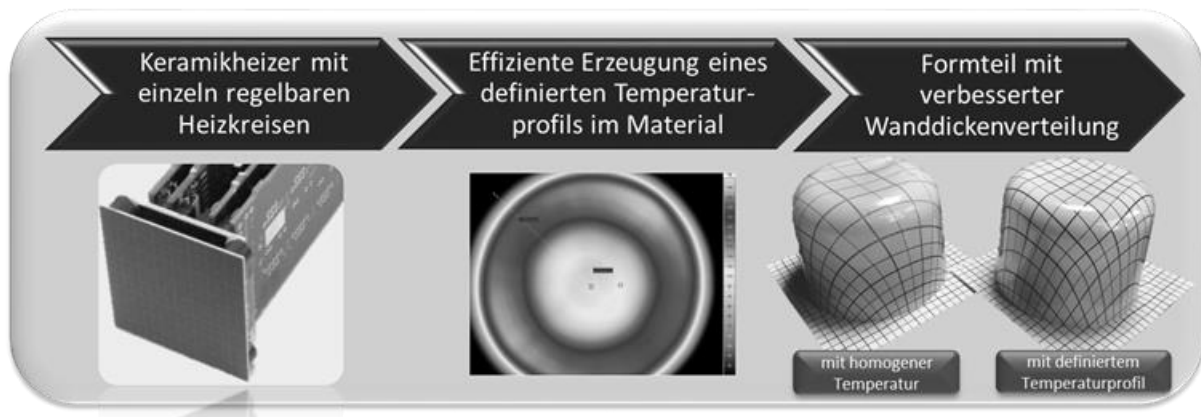


Abbildung 2 Prinzip der definiert inhomogenen Erwärmung mittels keramischem Matrixheizer

Der Matrixheizer (Abbildung 2 links) ist modular aufgebaut und kann durch eine Aneinanderreihung beliebig große Fläche erwärmen. Ein Modul weist dabei eine Grundfläche von 40x40mm auf. Weiterhin ist die erforderliche Elektronik zur Temperaturregelung der insgesamt 64 Heizkreise pro Modul bereits integriert und ermöglicht somit eine völlig dezentrale Arbeitsweise des Systems. Jeder einzelne Heizpixel besitzt einen eigenen Regelkreis, der lokal eine sehr exakte Temperaturführung ermöglicht. Da die Temperatur entsprechend auch an jedem Heizpixel separat gemessen wird, ergeben sich darüber hinaus auch weiterführende Möglichkeiten zur Prozessüberwachung. Im Falle defekter Folien oder unzureichendem Kontakts mit der Folie kann dies detektiert und protokolliert werden.

Der modulare Aufbau ermöglicht weiterhin eine einfache Wartung, da im Falle eines Defekts ein einzelnes Modul einfach ausgetauscht werden kann. Die in Abbildung 2 (rechts) gezeigten Musterbecher illustrieren vergleichend eindrücklich den Unterschied zwischen konventioneller (gleichmäßiger) und neuartiger inhomogener Erwärmung. Auch ohne Vorstreckstempel ist so eine sehr gleichmäßige, i.d.R. sogar deutlich bessere Wanddickenverteilung als mit Vorstreckung möglich. Dies ermöglicht es die Ausgangsmaterialdicke zu reduzieren, da das eingesetzte Material bestmöglich zur Erzielung der Qualitätsanforderungen genutzt werden kann.

4. Integrative Prozessauslegung am Beispiel eines thermogeformten Blisters

Das optimale Temperaturprofil der inhomogenen Erwärmung ist maßgeblich von der Geometrie des Formteils bzw. der Verpackung abhängig. Durch die Vielzahl der nun vorhandenen Stellglieder bzw. Parameter ist es zweckmäßig moderne Engineering-Methoden

zur Parametrierung des Prozesses einzusetzen. Dafür kommen FE-Methoden zum Einsatz mit deren Hilfe sich derartig komplexe thermisch-mechanische Vorgänge simulieren lassen.

Für die Bestimmung des für die jeweilige Form optimalen Temperaturprofils wurde speziell dafür durch die watttron GmbH ein Optimierungsalgorithmus entwickelt, der ausgehend vom CAD-Modell der Verpackung oder des Formwerkzeugs iterativ das Temperaturprofil berechnet, das zu einer möglichst homogenen Wanddickenverteilung führt. Dieses kann anschließend per Software auf das „digitale“, pixelbasierte Matrix-Heizsystem übertragen werden.

Eine homogene Materialverteilung muss jedoch nicht zwingend ein Optimum hinsichtlich der Stauchdruckbelastbarkeit darstellen. Daher wurde der Optimierungsansatz erweitert und die Optimierung des Temperaturprofils an den geforderten Produktanforderungen orientiert. Dieser integrale Ansatz erlaubt es nun ein hinsichtlich der Stauchdruckbelastbarkeit optimales Temperaturprofil zu berechnen.

Dieses Konzept soll im Folgenden anhand einer Beispielverpackung demonstriert werden. Es handelt sich dabei um eine Blisterverpackung für ein technisches Produkt (siehe Abbildung 3), hergestellt aus GPET einem typischen Packstoff für technische Produkte. Diese weist als Besonderheit einen vergleichsweise hohen Umformgrad (Verhältnis aus Grundfläche zu geformter Fläche) auf. Eine derartige Verpackung im Thermoformverfahren herzustellen ist bislang ausschließlich im Positivformverfahren oder im Negativformverfahren mit Stempelunterstützung möglich. Auch dann ist jedoch aufgrund der beschriebenen technologischen Nachteile dieser Verfahren eine Ausgangsmaterialdicke von 800µm erforderlich, um eine optisch und haptisch ansprechende Verpackung zu erhalten.

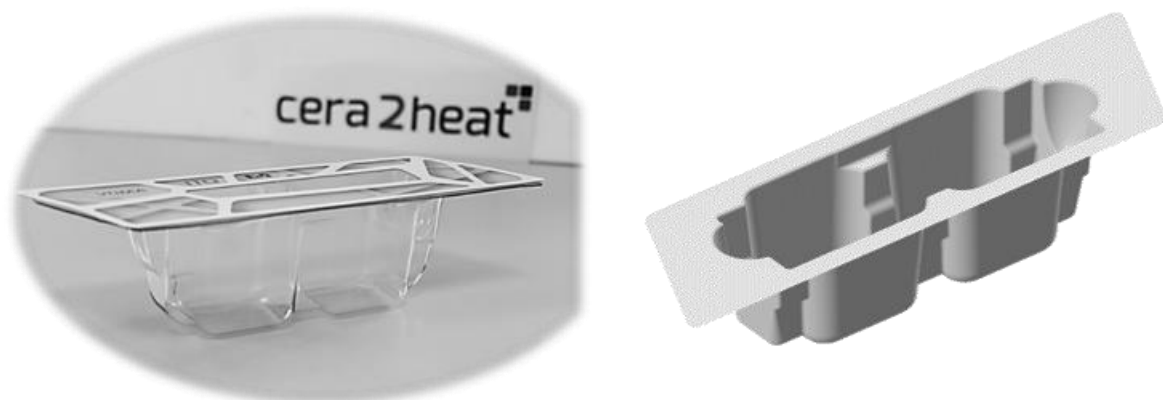


Abbildung 3 Blisterverpackung für technische Produkte

Mithilfe der neuartigen digitalen Heiztechnologie des Matrix-Heizsystems der watttron GmbH ist es erstmal möglich eine solche anspruchsvolle Geometrie im Negativformverfahren ohne

Vorstreckstempel herzustellen. Bei der Negativformung ohne Vorstreckstempel und mit konventioneller gleichmäßiger Folienvorwärmung resultiert nicht nur eine sehr schlechte Materialverteilung (wie in Abbildung 4 links ersichtlich), sondern es bildet sich zusätzlich in der Mitte des Blisters eine Falte.

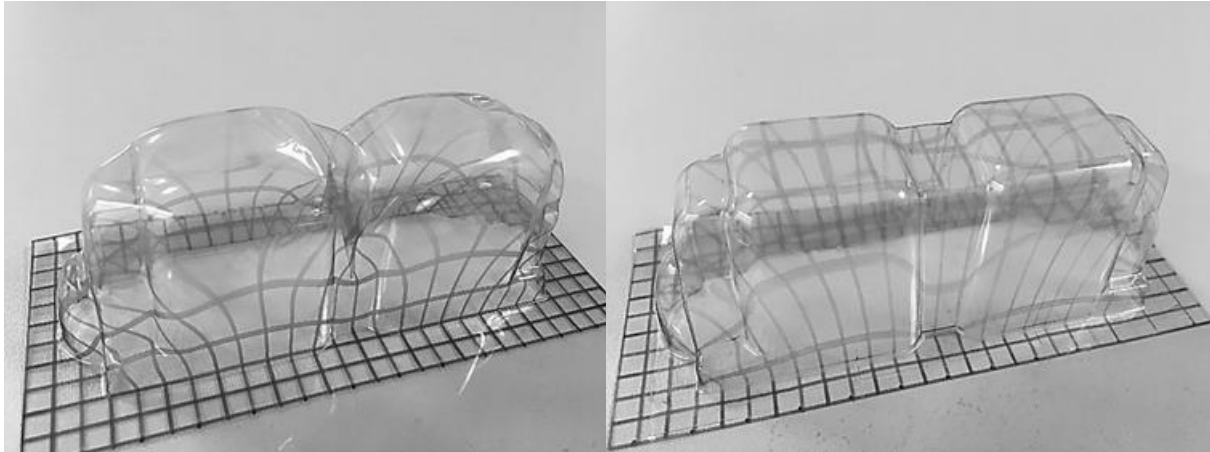


Abbildung 4 Thermogeformter Blister hergestellt im Negativformverfahren mit konventioneller, gleichmäßiger Erwärmung (links) und mit neuartiger inhomogener Erwärmung (rechts)

Diese Falte entsteht aufgrund des schmalen Steges in der Mitte der Form. In die beiden breiteren Kammern des Blisters formt sich somit jeweils eine Blase, die dann in der Mitte zusammentreffen und die Falte bilden. Bereits dies lässt sich unter Nutzung der Simulationsmethoden frühzeitig erkennen (siehe Abbildung 5). Anhand der aufgedruckten Gitterlinien deutlich in Abbildung 4 links zu erkennen ist jedoch auch die starke Verzerrung im Bodenbereich des Blisters und damit eine sehr schlechte Materialverteilung. Das im Gegensatz dazu mit der Matrix-Heiztechnologie durch inhomogene Erwärmung hergestellte Muster auf der rechten Seite in Abbildung 4 zeigt jedoch deutlich die Verbesserung. Die Materialverteilung ist nahezu homogen und das trotz des großen Umformverhältnisses. Weiterhin konnte diese Materialverteilung mit lediglich 600 µm Ausgangsmaterialstärke, im Gegensatz zu 800 µm beim Original erzielt werden, also ca. **25 % weniger Material**.

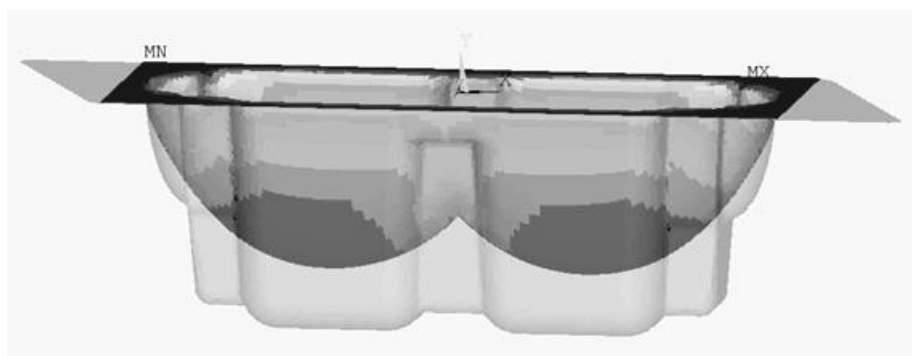


Abbildung 5 Simulation des Thermoformprozesses des Blisters mit gleichmäßiger Folienvorwärmung, die zur Faltenbildung führt

Der Einsatz der Technologie in Kombination mit modernen Simulationsmethoden ermöglicht aber erstmals über die reine Verbesserung der Wanddickenverteilung hinaus einen gesamtheitlichen, integrativen Ansatz zur Optimierung thermogeformter Produkte. Dieser hat nicht nur zum Ziel die Wanddickenverteilung zu gleichmäßigen, sondern diese gezielt unter Beachtung spezifischer Produkthanforderungen zu optimieren. Wie bereits diskutiert stellt die Stauchfestigkeit ein wesentliches Qualitätsmerkmal thermogeformter Verpackungen dar, da diese häufig während Transport oder im Verkaufsregal übereinandergestapelt werden und dabei nicht einknicken dürfen. Die Wanddickenverteilung hat auf die Stauchbelastbarkeit einen wesentlichen Einfluss. So wirken sich insbesondere Dünnstellen im bodennahen Wandbereich negativ auf die Belastbarkeit aus.

Abbildung 6 veranschaulicht den Ablauf einer integrativen Optimierung des Prozesses einer thermogeformten Verpackung hinsichtlich des Qualitätskriteriums Stauchbelastbarkeit. Im ersten Schritt wird in Form einer Belastungsanalyse der Einfluss der Wanddicke auf das Bauteil bzw. die Verpackung analysiert bzw. mit einem entsprechenden Optimierungsalgorithmus die belastungsoptimale Wanddickenverteilung ermittelt.

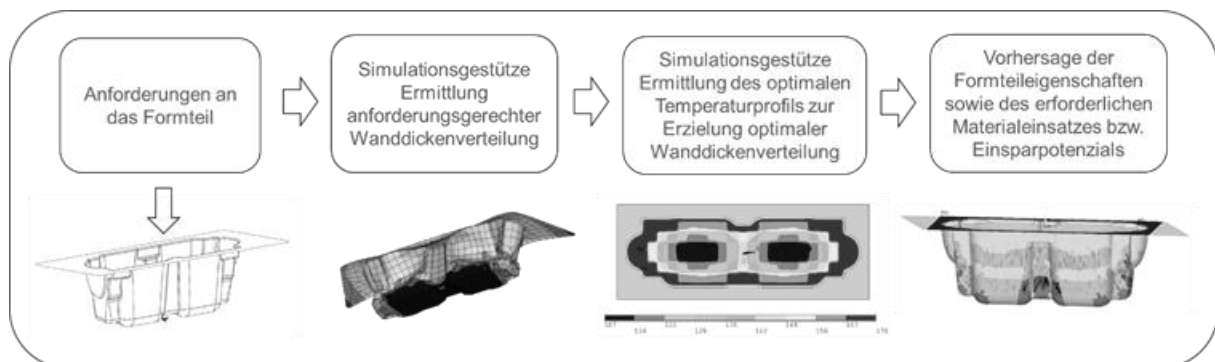


Abbildung 6 Ablauf zur integrativen Auslegung und Optimierung thermogeformter Verpackungen und Formteile

Anschließend wird für diese Wanddickenverteilung das erforderliche Temperaturprofil berechnet. Abschließend kann in dieser straight-forward Methodik die effektive Wanddickenverteilung und die damit mögliche Stauchbelastbarkeit für eine bestimmte Ausgangsfolienstärke vorausgesagt und durch Abgleich mit dem Ist-Stand ein Verbesserungspotenzial abgeleitet werden. Ist eine Mindestbelastbarkeit bekannt bzw. kann diese definiert werden, kann bereits in Schritt 1 die Optimierung so erfolgen, dass diese Stauchbelastbarkeit bei minimaler Materialausgangsstärke erreicht wird. Somit wird eine bestmögliche Ressourcennutzung möglich.

Prinzipiell können auch andere Qualitätskriterien, wie bspw. Permeabilität so Berücksichtigung finden, wenn diese im direkten Zusammenhang mit der Wanddickenverteilung stehen.

Für den konkreten Fall der Blisterverpackung wurde zunächst für eine schlechte Wanddickenverteilung (Ausgangswanddickenverteilung – siehe Abbildung 7) das Stauchverhalten simuliert. Daher ist dabei nicht zwingend die maximale Kraft beim Stauchen der Verpackung relevant, sondern der Punkt des ersten Einknickens, häufig gekennzeichnet durch ein erstes lokales Kraftmaximum.

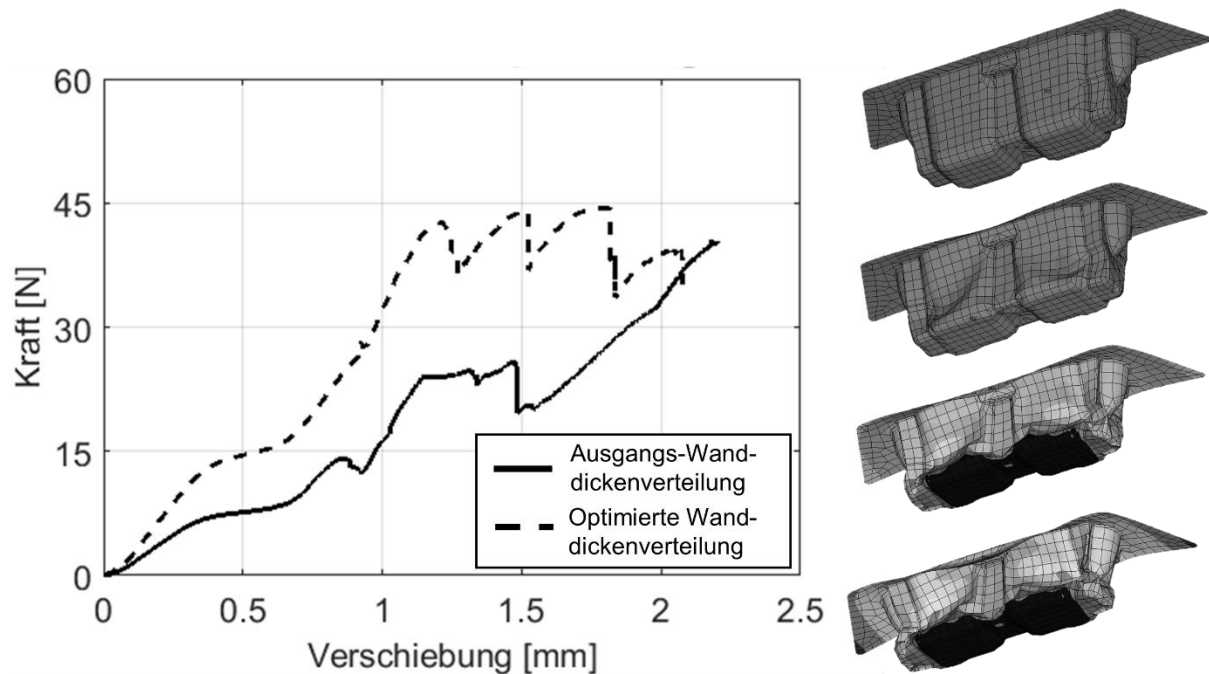


Abbildung 7 Simulierte Stauchdruckbelastung und resultierende Stauchkraftkurven (links) für Ausgangswanddickenverteilung und optimierte Wanddickenverteilung

Durch eine Optimierung der Wanddickenverteilung konnte im konkreten Fall die Stauchbelastbarkeit in etwa verdoppelt werden und damit die Widerstandsfähigkeit der Verpackung deutlich erhöht werden. Dies zeigt sich auch deutlich an gestauchten Mustern, hergestellt mit den unterschiedlichen Wanddickenverteilungen in Abbildung 8.



Abbildung 8 Verpackungsmuster nach Stauchdruckprüfung: links mit Ausgangswanddickenverteilung, rechts mit optimierter Wanddickenverteilung

Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung der simulativ vorhergesagten Wanddickenverteilungen mit den experimentell ermittelten Werten. In Abbildung 9 auf der rechten Seite sind dazu die Wanddickenprofile längs (rechts oben) und quer (rechts unten) des Blisters dargestellt.

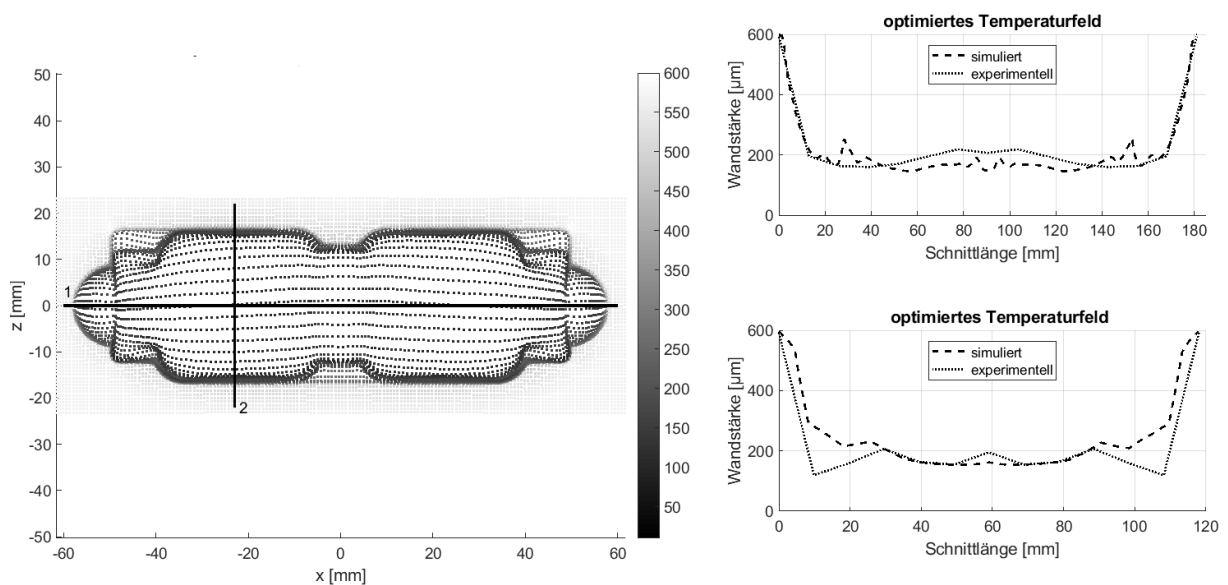


Abbildung 9 Vergleich experimentelle und simulierte Wanddickenverteilung bei optimiertem Temperaturfeld

Neben der guten Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation wird weiterhin die sehr gleichmäßige Wanddickenverteilung die durch die inhomogene Erwärmung möglich ist

deutlich. Dies wird verstärkt, wenn homogene Erwärmung mit inhomogener Erwärmung direkt verglichen wird, wie in Abbildung 10 erfolgt. Sowohl Längs- als auch Querschnittsprofile der Wanddickenverteilungen (Abbildung 10 rechts) zeigen eine deutliche Reduzierung der Wandstärke im Bodenbereich. Im oberen Wandbereich hingegen ist die Wand vergleichsweise dick. Im Falle der inhomogenen Erwärmung (optimiert) wird gezielt aus diesem Bereich durch Einsatz höherer Vorwärmtemperaturen mehr Material aus diesem Bereich gezogen, sodass im kritischen Bodenbereich und bodennahen Wandbereich deutlich größere Wandstärken möglich sind.

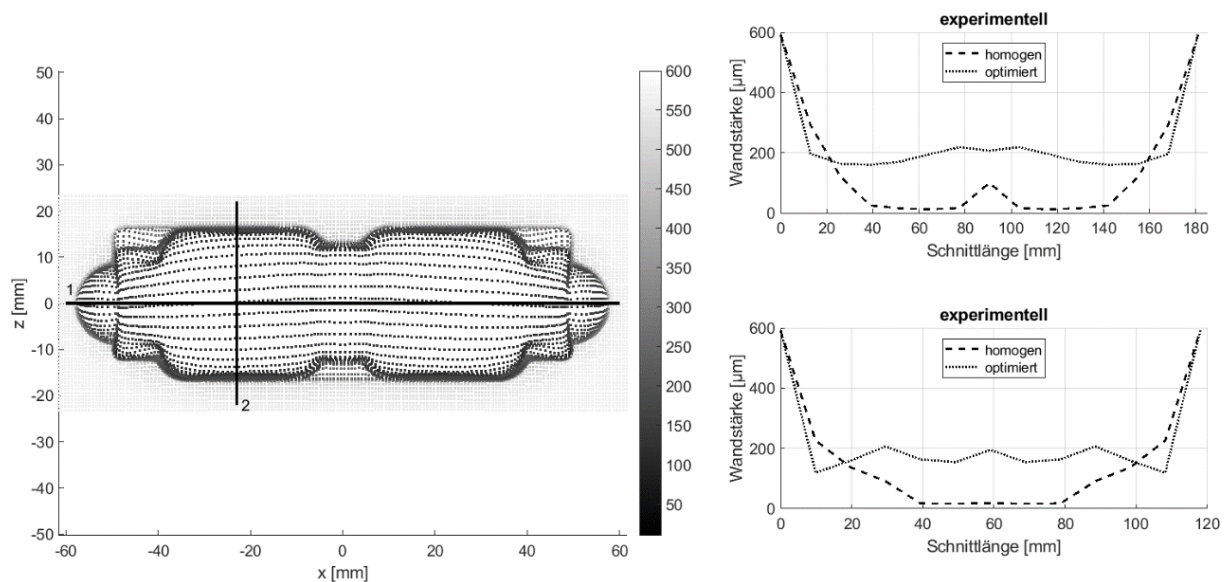


Abbildung 10 Experimentell ermittelte Wanddickenverteilung im Vergleich von homogener und optimierter Temperaturverteilung beim Vorwärmen

Die Wanddicken liegen bei inhomogener Erwärmung im Bodenbereich im Bereich von 200 µm, im Vergleich zu ca. 20 µm bei homogener Erwärmung, ca. um die Faktor 10 höher.

5. Zusammenfassung

Am Beispiel einer Blisterverpackung wurde das Potenzial der inhomogenen Erwärmung beim Thermoformen unter Nutzung der Matrix-Heiztechnologie der watttron GmbH aufgezeigt. Für den konkreten Fall konnte eine Vervielfachung der Wandstärke in den kritischen Bereichen des Blisters im Vergleich zur homogenen Erwärmung nachgewiesen werden. Dies ermöglichte eine Reduzierung der Wanddicke um 25% von vormals 800µm auf lediglich 600µm. Weiterhin wurde gezeigt dass mit dieser Technologie erstmals eine durchgängige Optimierung thermogeformter Bauteile und Verpackungen möglich ist. Mithilfe speziell entwickelter Optimierungsalgorithmen ist es nun möglich von der Anforderung, im konkreten Fall der Stauchbelastbarkeit, auf eine optimale Prozessführung (Temperaturverteilung) und damit

optimalen Umformergebnis zu schließen. Durch den durchgängig simulationsbasierten und größtenteils automatisierten Ansatz ist diese Methodik sehr effizient und kann bereits im Entwicklungsprozess realisiert werden. Der Vergleich zwischen Simulation und experimentellen Ergebnissen zeigte, dass die Güte der Vorhersagbarkeit sehr hoch ist. Damit können nicht zuletzt kosten- und personalintensive Erprobungen auf ein Minimum reduziert werden und bereits im Gestaltungsprozess der Verpackungen und Bauteile Qualitätskriterien berücksichtigt bzw. optimiert werden.

Mit Einsatz dieser neuartigen Technologie in Verbindung mit den modernen Optimierungsverfahren zur integrativen Verpackungs- und Prozessoptimierung ist es möglich den Einsatz an Verpackungsmaterial optimal und angepasst an die entsprechenden Anforderungen der Verpackung zu gestalten. Aus der Reduktion des Materialeinsatzes resultiert nicht nur ein erhebliches wirtschaftliches Einsparpotenzial beim Einsatz dieser Technologie, es ermöglicht zudem eine ressourcenschonende und umweltschonende Erfüllung der Verpackungsaufgabe.

6. Quellen:

Aranca (2012): Aranca Report 'Packaging Industry: A Review', released at the ASSOCHAM Packaging Summit, 17.10.2012

Begemann, M. (2012): Neue Verfahrensvarianten erweitern Absatzmärkte, Kunststoffe 10, 130-133

ReportsnReports (2012): Internetseite: <http://www.prnewswire.com/news-releases/packaging-dominates-thermoformed-plastics-market-projected-to-grow-at-4-cagr-through-2017-151339105.html>, Abruf: 12.01.15

ReportLinker (2014): <http://www.reportlinker.com/p0870821-summary/Thermoformed-Plastics-Technologies-and-Global-Markets.html>