

# Ein Sonderverfahren auf dem Weg zum nachhaltigen Normalfall

## Neue Entwicklungen im Thermoplast-Schaumspritzgießen

Leichte Bauteile, energiesparende Verarbeitung oder die Kombination mehrerer Prozessschritte in einem lassen sich unter einem brandaktuellen Schlagwort subsumieren: Nachhaltigkeit. Eine Technologie, die diesbezüglich vielversprechend ist, ist das Thermoplast-Schaumspritzgießen. Obwohl schon seit Jahrzehnten im Einsatz, bietet das Verfahren dank kontinuierlicher Entwicklungsarbeit noch viel Potenzial.



**Bild 1.** Die Geometrie der PFS verbessert die Homogenität der gasbeaufschlagten Schmelze © Engel

Das Thermoplast-Schaumspritzgießen (TSG), das die Engel Austria GmbH, Schwertberg/Österreich, unter dem Namen foammelt anbietet, ist eines der ältesten Sonderverfahren des Spritzgießens. Die Kommerzialisierung der zu Beginn vor allem chemischen Schäumprozesse begann in den 1950er-Jahren. Kleine Mengen Backpulver wurden der Schmelze beigemischt, um Einfallstellen am Bauteil zu vermeiden [1]. Die Bedeutung chemischer Treibmittel wuchs und führte in den 1970er-Jahren zur ersten Serienfertigung geschäumter Bauteile [2].

Heute ermöglicht die Verwendung überkritischer Fluide (hauptsächlich Stickstoff und Kohlendioxid) in physikalischen TSG-Prozessen wie beispielsweise MuCell (Anbieter: Trexel GmbH) die Herstellung mikrozellulärer Schäume mit Porendurchmessern unter 100 µm bzw. mit Zelldichten von mehr als 10<sup>9</sup> Zellen/cm<sup>3</sup>. Diese spezielle Morphologie bietet vor allem bei Impact-Anwendungen Vorteile, da die feinen Zellen als Rissstopper fungieren [3]. Obwohl das Schäumen von Polyolefinen im Spritzgießprozess eine langjährige Entwicklung durchlebt hat, sind noch viele Fragen offen. Aktuelle Entwicklungen, wie sie etwa das Institut für Polymer-Spritzgießtechnik und Prozessautomatisierung (IPIM) der Johannes Kepler Universität Linz/Österreich gemeinsam mit Engel sowie der Competence Center

CHASE GmbH verfolgt, beschäftigen sich u.a. mit Alternativen zur Gaseinbringung, den Zuständen in der Plastifiziereinheit sowie mit dem Einsatz von Industrie-4.0-Technologien.

### Verzug minimiert, Formtreue verbessert

Geschäumte Bauteile weisen einen dreischichtigen Aufbau auf. Ein poröser Kern ist von zwei kompakten Deckschichten umgeben. Dieser Aufbau bringt bereits Vorteile mit sich, da sich der Material- und Ressourcenbedarf reduziert und eine geringere Dichte möglich wird. Klassische Dichtereduktionen im TSG-Verfahren liegen bei rund 10%, wobei neue Entwicklungen in der Werkzeug- und Prozesstechnik (lokale) Dichtereduktionen von bis zu 50% erlauben [4], was das Leichtbaupotenzial dieser Technologie unterstreicht. Ein weiteres Plus für die Nachhaltigkeit ist die Recyclingfähigkeit der Leichtbaukomponenten, da die Sandwichstruktur aus einem einzigen Material besteht.

Hinsichtlich der mechanischen Leistungsfähigkeit geschäumter Bauteile ist das im Vergleich zum ungeschäumten Bauteil erhöhte Flächenträgheitsmoment und damit die erhöhte spezifische Biege-

steifigkeit durch den größeren Abstand der kompakten Randschicht von der neutralen Faser hervorzuheben. Die rissstoppenden Eigenschaften verbessern das Impact-Verhalten geschäumter Bauteile [5]. Neben den mechanischen Verbesserungen sind diesen Bauteilen auch Funktionen wie akustische oder thermische Isolation ohne weitere Bearbeitungsschritte inhärent.

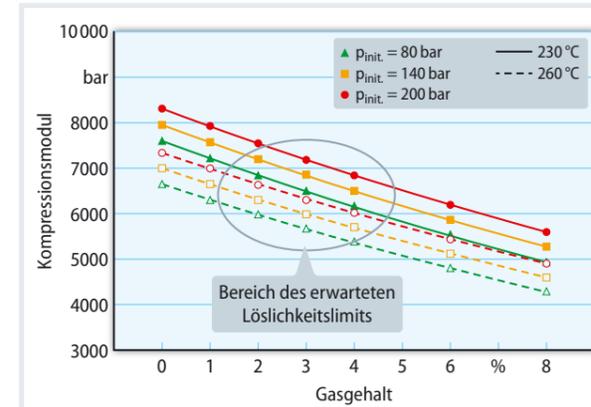
Prozesstechnisch wird durch den während der Ausformung des Bauteils herrschenden homogenen Gasdruck der Verzug minimiert und damit die Formtreue verbessert. Zudem wirken die Gase während der Verarbeitung als Weichmacher. Je nach Gas und Konzentration reduziert sich die Viskosität des Materials um bis zu 50%, was unter bestimmten Umständen die Verwendung kleinerer Maschinen erlaubt. In erster Linie ist es vor allem dieser ökologische Nutzen, der dem Schaumspritzgießen gerade im Licht aktueller energiepolitischer Entwicklungen zu noch größerer Popularität verhilft.

### Potenzial bei hoher Wirtschaftlichkeit ausschöpfen

Demgegenüber stehen Herausforderungen, die einem Durchbruch des TSG-Verfahrens als Breitentechnologie noch im Wege stehen. Zu nennen sind hier zum einen der erhöhte maschinen- und prozesstechnische Aufwand durch die Gaseinbringung in die Kunststoffschmelze, die Werkzeugbewegungen während der Ausformung des Bauteils (Negativprägen) oder die komplexere Regelung der Drücke beim Dosieren. Zum anderen geht es

**Bild 2.** Resultat der theoretischen Vorarbeit: Mit steigendem Gasgehalt in der Polymer-schmelze sinkt der Kompressionsmodul des Gemischs. Ein mögliches Löslichkeitslimit kann nicht beschrieben werden

Quelle: JKU; Grafik: © Hanser



um die Oberfläche der geschäumten Bauteile. Durch den Druckabfall hin zur Schmelzefront bilden sich bereits während des Einspritzens erste Blasen in diesem Bereich. Die Quellströmung führt dazu, dass die Blasen an die kalte Werkzeugwand befördert und dort verschert werden – dieser Effekt kann als Silberschlieren sichtbar werden. Methoden zur Vermeidung von Oberflächendefekten, wie die variotherme Werkzeugtemperierung oder das Gasgedrücktverfahren, gehen wiederum mit höheren Kosten und einem höheren technischen Aufwand einher.

Um das Potenzial des Schaumspritzgießens bei einer hohen Wirtschaftlichkeit voll auszuschöpfen, ist es notwendig, die Grundlagen der Technologie – vor allem in Bezug auf die konkreten Anwendungen – noch besser zu verstehen und neue Prozesstechniken zu entwickeln und zu testen. Genau daran arbeiten das IPIM, das ebenfalls in Linz ansässige Competence Center CHASE und Engel.

Zu den Schwerpunkten der gemeinsamen Entwicklungsarbeit gehört zum Beispiel die Frage, wie das Gas in die Kunststoffschmelze eingebracht und darin gelöst wird. Das als Treibmittel dienende Gas wird entweder physikalisch in Reinform beigemischt oder es entsteht chemisch als Abbauprodukt der thermischen Zersetzung eines Masterbatches direkt in der Kunststoffschmelze. Um eine homogene, einphasige Lösung zu erhalten, muss das Gas in einer sehr kurzen Zeit in die Schmelze eingemischt werden. Engel bietet deshalb eine gezielt für das physikalische Schaumspritzgießen entwickelte Plastifizierschnecke an (Bild 1).

### Eigens entwickelte Plastifizierschnecke

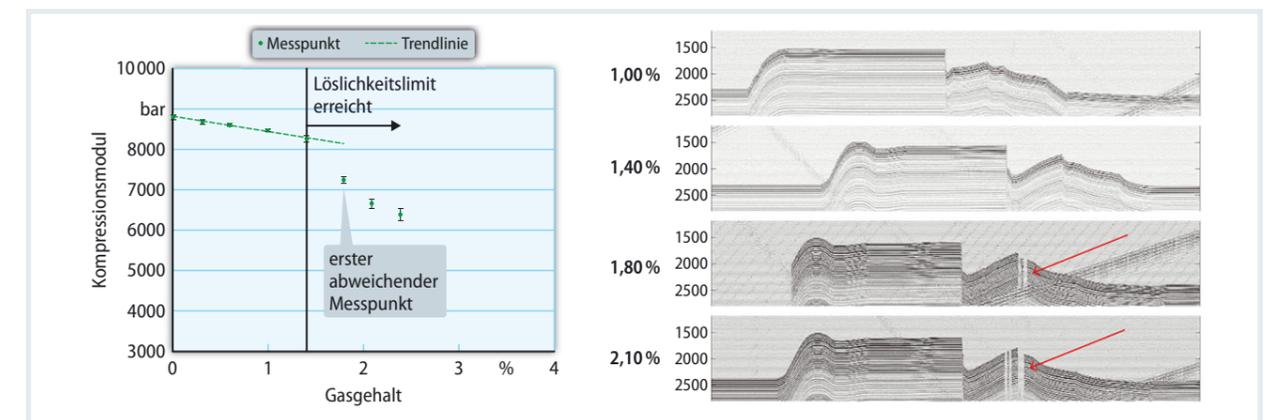
Die PFS (Physical Foaming Screw) besitzt einen Wendelscherteil, mit dem die Kunststoffschmelze bereits vor der Gaseinbringung sehr gut homogenisiert wird, was sich positiv auf eine gleichmäßige Gasverteilung auswirkt. Zudem erlaubt die

Schneckenengeometrie den Entfall der zweiten Rückströmsperre. In Verbindung mit einer neuen Werkstoffausführung, die eine verbesserte Abrasions- und Korrosionsbeständigkeit bietet, steigert die spezielle Geometrie sowohl die Produktivität als auch die Lebensdauer der Schnecke.

### Neue Methode zur Bestimmung der Löslichkeitslimits

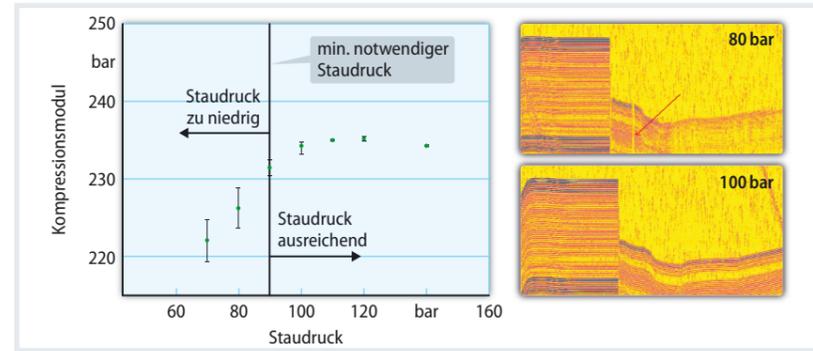
Die Gasmenge, die eine Polymerschmelze unter gewissen Prozessbedingungen aufnehmen kann, wird durch die Löslichkeit beschrieben. Viele Methoden existieren, um Löslichkeiten in statischer Form zu beschreiben. Die vorherrschende Methode ist die Verwendung sogenannter Magnetic Suspension Balances, die eine Druckkammer zur Gasbeaufschlagung in Kombination mit einer magnetisch gekoppelten, außerhalb der Druckkammer platzierten Waage aufweisen.

Die Relevanz solcher statisch ermittelten Daten für hochdynamische Schaumspritzgießprozesse darf in Frage gestellt werden, da jede Form der Bewegung, insbesondere von Schervorgängen, vernachlässigt wird. Zudem weisen statische Löslichkeitsmessungen Messdauern im Bereich von Stunden auf, wohingegen Spritzgießprozesse lediglich Sekunden bis maximal wenige Minuten für die Aufnahme des Gases in die Kunststoffschmelze erlauben. Die wissenschaftliche Literatur zeichnet ein uneinheitliches Bild, wenn es um den Einfluss der Scherung auf die Gaslöslichkeit geht. Während manche Autoren davon ausgehen, dass die Scherung die Löslichkeit nicht beeinflusst [6], »



**Bild 3.** Beispiel für eine Kompressionsmodul-Messung: Der Knick in der Kurve (linkes Bild) weist auf das Erreichen eines Löslichkeitslimits hin. Rechts: Ultraschall-Messungen während des Einspritzens zur Verifikation

Quelle: JKU; Grafik: © Hanser



**Bild 4.** Anwendung der Kompressionsmodul-Methode zur Staudruckreduktion bei Verwendung von 0,6 % Stickstoff: Im linken Bild ist der Abfall des Kompressionsmoduls bei zu geringen Staudrücken erkennbar. Rechts: Ultraschall-Messungen während des Einspritzens zur Verifikation

Quelle: JKU; Grafik: © Hanser

berichten andere von einer Erhöhung der Löslichkeit um bis zu 40% [7].

Aufgrund dieser Diskrepanz hat das IPIM eine neue Messmethode entwickelt, die es ermöglicht, die Gaslöslichkeit unter dynamischen Bedingungen – inline im Spritzgießprozess – zu beschreiben. Aus-

gangspunkt der theoretischen Vorarbeit war die Sanchez-Lacombe Zustandsgleichung (1) zur Beschreibung des pVT-Verhaltens [8] und in weiterer Konsequenz des Kompressionsmoduls  $K$  von Polymer-Gas-Gemischen (2):

$$\bar{p}^2 + \bar{P} + \bar{T} \left[ \ln(1 - \bar{p}) + \left(1 - \frac{1}{r}\right) \bar{p} \right] = 0 \quad (1)$$

$$K = -\frac{\Delta p}{\Delta V} V_0 \quad (2)$$

Mit steigendem Gasgehalt in der Schmelze sinkt der Kompressionsmodul des Gemischs (**Bild 2**). Ein mögliches Löslichkeitslimit – die statische Löslichkeit von Stickstoff in Polypropylen beträgt abhängig von Druck und Temperatur ca. 2 bis 4% [9] – kann jedoch nicht beschrieben werden.

Aus diesem Grund wurden Versuche auf einer Spritzgießmaschine durchgeführt. Der Kompressionsmodul charakterisiert die Volumenänderungen infolge eines Druckanstiegs. Dieser Zustand kann auch im Schneckenorraum hergestellt werden, indem eine an der Plastifiziereinheit angebrachte Verschlussdüse zu Beginn des Einspritzvorgangs für kurze Zeit geschlossen bleibt, um das Material zu komprimieren. Druckanstieg und Volumenkontraktion können durch die maschineninterne Sensorik erfasst und ausgewertet werden.

Folgende Gedankenschritte seien an dieser Stelle kurz umrissen: Gase weisen einen um etwa den Faktor 10 niedrigeren Kompressionsmodul als Polymerschmelzen auf. Solange das Gas in der Schmelze gelöst werden kann, senkt dieses den Kompressionsmodul des Gemischs mo-

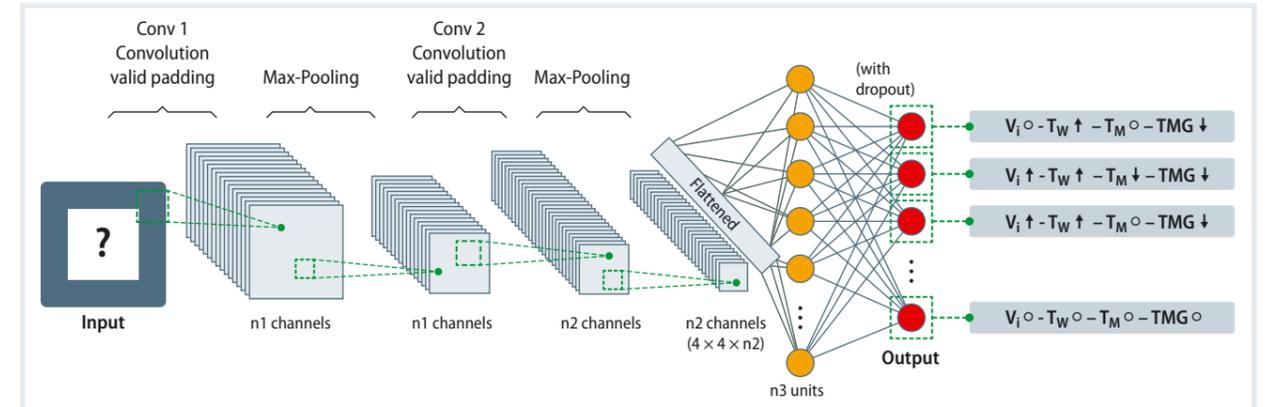
derat. Bei Überschreiten des Löslichkeitslimits liegt das Gas als separate – und weit stärker komprimierbare – Phase vor, die den Kompressionsmodul des Gemischs drastisch sinken lassen sollte. Erwartet wurde also ein Knick in der Kompressionsmodul-Kurve bei Erreichen des Löslichkeitslimits.

Messungen an der Maschine bestätigten dieses Verhalten (**Bild 3**). Zur Verifikation: Unterbrechungen der Ultraschall-Signale bei hohen Gasgehalten weisen auf ungelöste Gasbläschen hin. Eine neue sehr prozessnahe Messmethode zur Bestimmung der Löslichkeitslimits auf Basis des Kompressionsverhaltens war geboren.

### Ein weitverbreitetes Missverständnis

Neueste Erkenntnisse auf Basis dieser Messmethode räumen mit einem weitverbreiteten Missverständnis auf. Im Zuge der Messung von Löslichkeitslimits mit Stickstoff und Kohlendioxid an der Spritzgießmaschine konnte gezeigt werden, dass die Gase nicht vollständig in der Kunststoffschmelze gelöst, sondern zu einem Gutteil lediglich fein verteilt sind. In der oben angesprochenen sehr kurzen Interaktionszeit zwischen Schmelze und Gas liegt es also an der intensiven eingebrachten Scherung, ein möglichst homogenes Kunststoff-Gas-Gemisch herzustellen [10].

Mithilfe der Kompressionsmodul-Methode sind neben Materialcharakterisierungen auch Prozessoptimierungen möglich. Wirtschaftlich besonders interessant ist die automatische Reduktion des Staudrucks auf das technisch notwendige Minimum, die den Verschleiß und den Energieverbrauch deutlich verringert und das Förderverhalten verbessert. Diese Entwicklung fußt auf dem Umstand, dass sich Gase bei zu geringen Drücken nicht im Material lösen und dadurch als separate Phase vorliegen. Beim Auftragen des Kompressionsmoduls bei konstanter Gasbeladung über den Staudruck wird daher erneut ein starker Abfall der Kurve erwartet, was tatsächlich im Experiment zu erkennen ist. Ultraschall-Messungen bestätigen auch diese Methode (**Bild 4**). Der Kompressionsmodul hat sich damit als wichtiges Werkzeug zur Prozessoptimierung und zur Verbesserung des Prozessverständnisses in der Schäumtechnologie erwiesen.



**Bild 5.** Künstliche Intelligenz hält ins Schaumspritzgießen Einzug: Schematische Darstellung des Convolutional Neural Networks und dessen Outputs für Parameteranpassungen Quelle: JKU; Grafik: © Hanser

Zukünftig wird die Spritzgießmaschine den minimal nötigen Staudruck automatisch ermitteln und einstellen können. Schon heute ist intelligente Assistenz ein wichtiges Thema beim Thermoplast-Schaumspritzgießen. Mit „iQ weight control“, in vielen chemischen und physikalischen foamelt- und MuCell-Schaumspritzgießprozessen bereits erfolgreich im Einsatz, werden eine verbesserte Prozessstabilität und ein konstantes Bauteilgewicht erzielt. Die Software aus dem „inject 4.0“-Programm von Engel passt beim Schaumspritzgießen Schuss für Schuss das Einspritzprofil und den Umschaltzeitpunkt an die aktuellen Bedingungen an und gleicht damit äußere Einflüsse, wie Chargenschwankungen und Änderungen von

Umgebungsbedingungen, vollautomatisch und in Echtzeit aus.

### Schäumen mit künstlicher Intelligenz

Ein noch größeres Potenzial für die Optimierung von Schäumprozessen eröffnet die künstliche Intelligenz (KI). Konkret arbeiten die drei Entwicklungspartner am Einsatz von Convolutional Neural Networks zur Optimierung von Bauteiloberflächen im TSG-Verfahren. Ziel ist, für unbekannte Prozesse optimierte Prozesseinstellungen zu finden, ohne aufwendige Versuche durchführen zu müssen.

Das am IPIM entwickelte und trainierte Convolutional Neural Network (CNN) kann in seiner jetzigen Form (**Bild 5**) Bau-

teile ihren Prozesseinstellungen zuweisen und somit Empfehlungen über Parameteranpassungen erteilen. Die Automatisierung der Bauteil-Ablichtung soll zukünftig zu einem autonomen Optimierungsmechanismus führen. In Korrelation mit den Einstellparametern kann das System zukünftig Abweichungen vom Sollprozess automatisch entgegenwirken. Die unterschiedlichsten prozess-, software- und maschinenseitigen Entwicklungen leisten wichtige Schritte auf dem Weg zu einer modernen Schäumtechnologie, die das volle Nachhaltigkeitspotenzial ausschöpft. Auf diese Weise wird dem TSG-Verfahren sein Ruf als Sonderverfahren mehr und mehr genommen. ■

## Die Autoren

**Dr. Clemens Kastner** ist Postdoc am Institut für Polymer-Spritzgießtechnik und Prozessautomatisierung (IPIM) an der Johannes Kepler Universität in Linz/Österreich und Projektleiter im Competence Center CHASE in Linz; clemens.kastner@jku.at

**Dipl.-Ing. Wolfgang Kienzl** ist Produktmanager Technologien bei der Engel Austria GmbH in Schwertberg/Österreich; wolfgang.kienzl@engel.at

**Dipl.-Ing. Eva Kobler** ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am IPIM der Johannes Kepler Universität und im Competence Center CHASE in Linz; eva\_maria.kobler@jku.at

**Univ.-Prof. Dr. Georg Steinbichler** ist Vorstand des IPIM und Leiter der I4.0-Pilotfabrik LIT Factory auf dem Gebiet der Kunststofftechnik an der Johannes Kepler Universität in Linz; georg.steinbichler@jku.at

## Service

### Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/onlinearchiv](http://www.kunststoffe.de/onlinearchiv)

## Schaumspritzgießen seit 1914

Das Thermoplast-Schaumspritzgießen fußt auf Methoden, die ursprünglich abseits des Spritzgießens entwickelt wurden. Die ersten geschäumten Produkte auf Polymerbasis erreichten bereits 1914 den Markt [11] und waren aus Naturkautschuk gefertigt. Dabei kam häufig Ammoniumcarbonat zum Einsatz, das unter Zugabe von Säure jene Gase freisetzt, die den Schäumprozess ermöglichen. Auf dieser Basis entwickelten sich in den darauffolgenden zwei Jahrzehnten zwei bis heute eingesetzte Prozesse: Dunlop und Talalay. Dunlop basiert auf dem physischen Einmischen von Luft in Kombination mit einem Gelliermittel (oftmals Natriumhexafluorosilicat) in die Kunststoffschmelze. Talalay verwendet Sauerstoff als Abbauprodukt von Wasserstoffperoxid [12] und ist damit sowohl in Bezug auf den Schäummechanismus als auch die diskontinuierliche Prozessführung vergleichbar mit modernen chemischen Schaumspritzgießprozessen. Einen Meilenstein bildet geschäumtes Polystyrol. Das erste diesbezügliche Patent von Carl Georg Munters und John Gudbrand Tandberg stammt aus dem Jahr 1932 [13]. 1947 zog The Dow Chemical

Company mit einem Extrusionsprozess nach. Eine Mischung aus Polystyrol, Nukleierungsmittel und flüchtigen Flüssigtreibmitteln erlaubte die Herstellung größerer geschäumter Teile. Das Material ist heute unter dem Namen Styrofoam geschützt. Bereits vier Jahre später entwickelte die BASF ein Verfahren zur Herstellung expandierbarer Polystyrol-Partikel (EPS), wobei hier das Treibmittel bereits bei der Polymerisation beigegeben wird. Das Schäumen von Polyolefinen schlug erst mehr als ein Jahrzehnt später auf. Auch hier wurden der Schmelze schon zu Beginn Gase beigemischt. Frederick L. Johnston patentierte 1941 zwei unterschiedliche Prozesse [14]. Beim ersten wird Stickstoff in einer Druckkammer in einer Polyethylen-Schmelze gelöst, während beim zweiten mit thermischer Zersetzung eines Treibmittels gearbeitet wird. Beide Prozesse weisen bereits starke Ähnlichkeit zu den heutigen physikalischen und chemischen Schäumprozessen im Spritzgießen auf, obwohl bis zur Anwendung von Kohlendioxid weitere vier Jahre vergingen [15].