

# Einleitung

Hartmut Traut und Hans Wobbe

Spätestens durch den Megatrend Leichtbau entwickelte sich das Schaumspritzgießen zum wichtigsten Sonderverfahren neben dem konventionellen Kompaktspritzguss. Die eigentliche Entwicklung von thermoplastischen Formteilen im Spritzgießverfahren begann bereits in den 1950er Jahren. Erfahrene Maschinenbediener reduzierten Einfallstellen an den Formteilen, indem sie dem Granulat geringe Mengen an Backpulver beimischten. Das war der Beginn des chemischen Schäumens, allerdings mit dem Fokus der Problemeliminierung von Einfallstellen – an die Herstellung ganzer geschäumter Formteile dachte man damals noch nicht.

Einen starken Schub bekam der thermoplastische Schaumspritzguss (TSG) dann in den 1990er Jahren durch die am MIT (Massachusetts Institute of Technology) in Boston durchgeführten Arbeiten der „mikrozellulären Kunststoffschäume mittels Direktbegasung“. Bei der Direktbegasung handelt es sich im Vergleich zu den bis dahin eingesetzten chemischen Treibmitteln um inerte Gase, wie z.B. Stickstoff oder Kohlendioxid. Man spricht daher auch vom physikalischen Schäumen. Hierbei wird z. B. der Stickstoff unter Druck in den Bereich der Plastifizierung dosiert, in dem das Polymer bereits voll aufgeschmolzen vorliegt. Dabei spielt es eine besondere Rolle, dass das Gas im überkritischen Zustand in den geschmolzenen Kunststoff eingemischt wird. Somit kann ein Einphasengemisch erreicht werden, und das mit hervorragender Homogenität.

Das „Sonderverfahren TSG“ hat sich dann nach einiger Zeit, die auch von Anlaufschwierigkeiten geprägt war, als weitgehend „normales“ Verarbeitungsverfahren etabliert. Dazu kommen die Initiatoren vielfach direkt von den Verarbeitern, die neben der Materialersparnis auch die Vorteile in der Fertigteilproduktion kennen.

Schlossgehäuse im PKW-Bereich sind hierfür ein sehr gutes Beispiel. Die Anforderungen des Fertigteils sind dabei durch enge Toleranzen, eine Oberfläche ohne sichtbare Einfallstellen sowie Materialeinsparung geprägt. Ohne das TSG-Verfahren sind diese nicht erzielbar! Neben dem eingangs genannten Leichtbau spielt aber auch der Trend zu großflächigen, dünnwandigen Bauteilen dem Schaumspritzguss in die Karten. Heute sind vielfach erforderliche Teiledimensionen hinsichtlich Verzug ohne TSG nicht produzierbar.

Die allseits bekannten Nachteile des Schaumspritzgusses, eine nicht schlierenfreie Oberfläche des Spritzlings, sind heute gelöst. Hochglänzende Oberflächen sind über schnelle Wechsel-Temperierung zu erzielen. Auch gibt es keramikbasierte Beschichtungen am Markt, die – in der Kavität aufgebracht – einen „variothermen Effekt“ erzeugen. Mit Texturen und Narbungen versehene Bauteiloberflächen sind bereits ohne die genannten Zusatzprozesse zu fertigen.

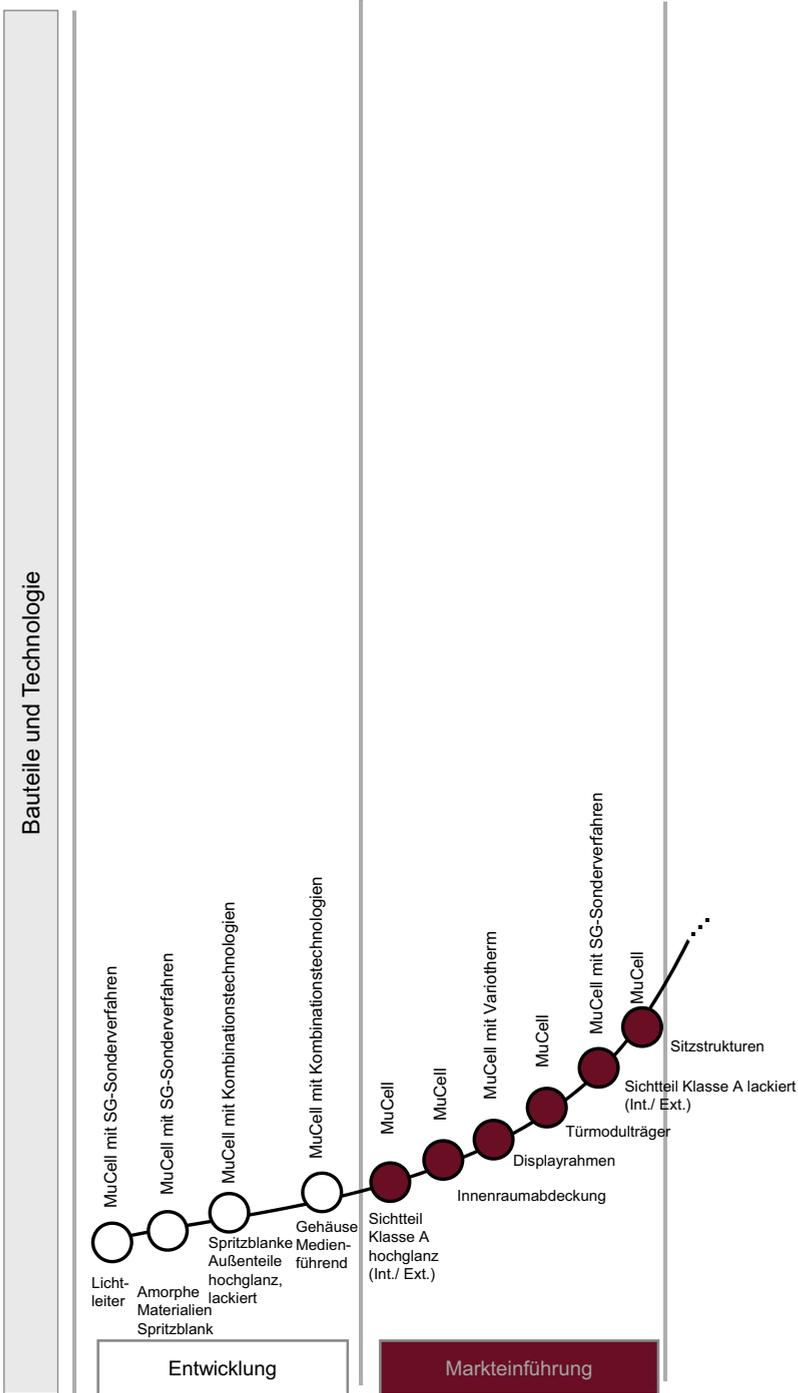
Damit sind dem Verfahren TSG heute keine Grenzen mehr auferlegt – der Weg zum Standardverfahren neben dem Kompaktspritzguss ist frei. Dies haben auch die entsprechenden Gremien erkannt und sind momentan dabei, eine Normung für geschäumte Bauteile in Form einer VDI-Richtlinie zu erarbeiten, die in 2022/2023 erscheinen wird.

# 1

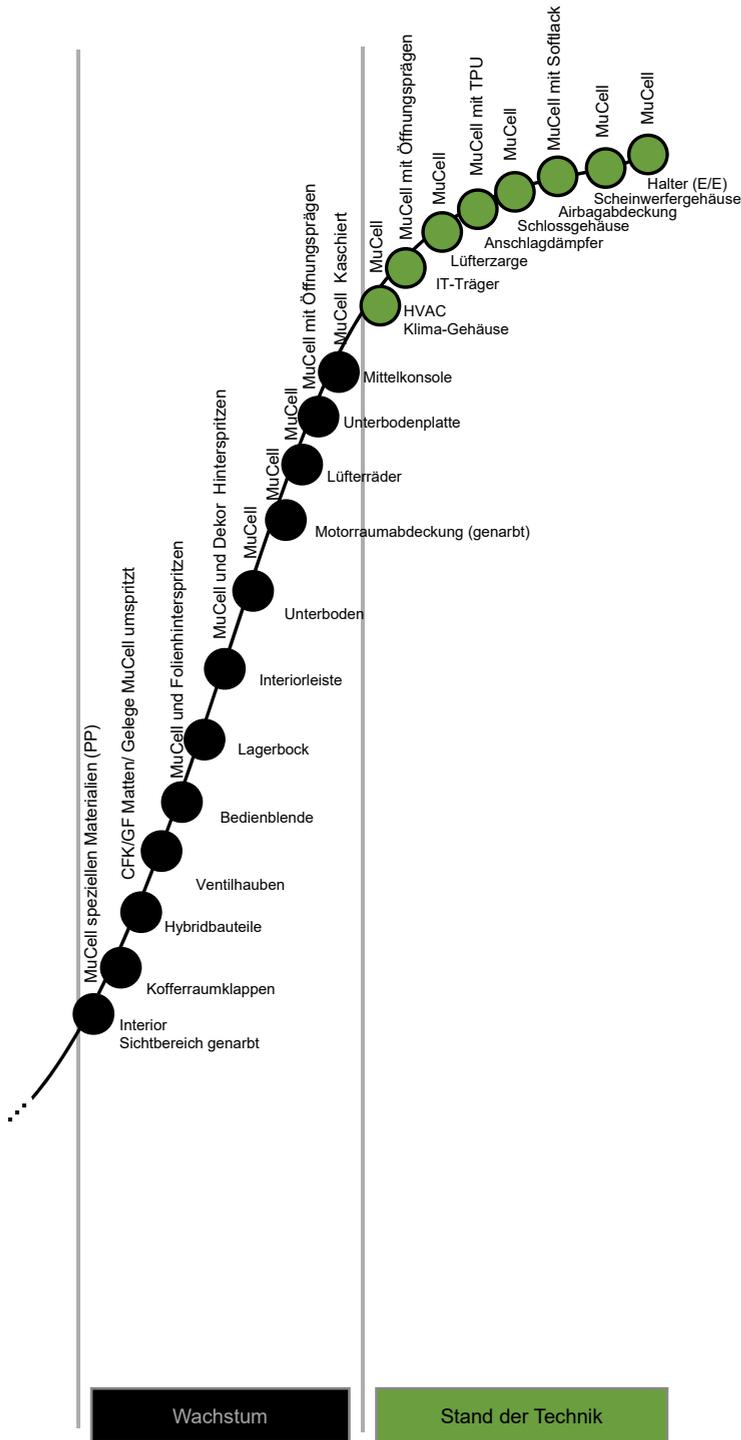
## Bedeutung des Schaumspritzgießens für den industriellen Leichtbau

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, fand der eigentliche Durchbruch des Schaumspritzgießens erst in den 1990er Jahren statt, forciert durch den von der Automobilindustrie geprägten Leichtbautrend. Damalige Entwicklungen, wie das bereits zitierte Schlossgehäuse oder auch Scheinwerfergehäuse, sind heute Stand der Technik. Ja nicht nur das, heute sind sogar alle diese Bauteile im Automobilbau geschäumt. Der Schaumspritzguss hat das Kompaktspritzgießen bei vielen Bauteilen in der Automobilindustrie als Standardverfahren ersetzt! Anhand der Technologiekurve in Bild 1.1 ist die „Entwicklungsgeschichte“ klar dargestellt.

Die Abszisse des Schaubildes veranschaulicht den Technologielebensstatus der Bauteile, angefangen vom Entwicklungsstatus bis hin zum Stand der Technik. Die Ordinate zeigt das jeweilige Fertigungsverfahren, teilweise genannt mit der zu verarbeitenden Materialkomponente (MuCell® mit TPU), teilweise als Kombinationstechnologie, wie z. B. MuCell® mit Folienhinterspritzen.



**Bild 1.1** Entwicklungskurve MuCell® Automobil-Anwendungen [Bildquelle: Trexel GmbH]



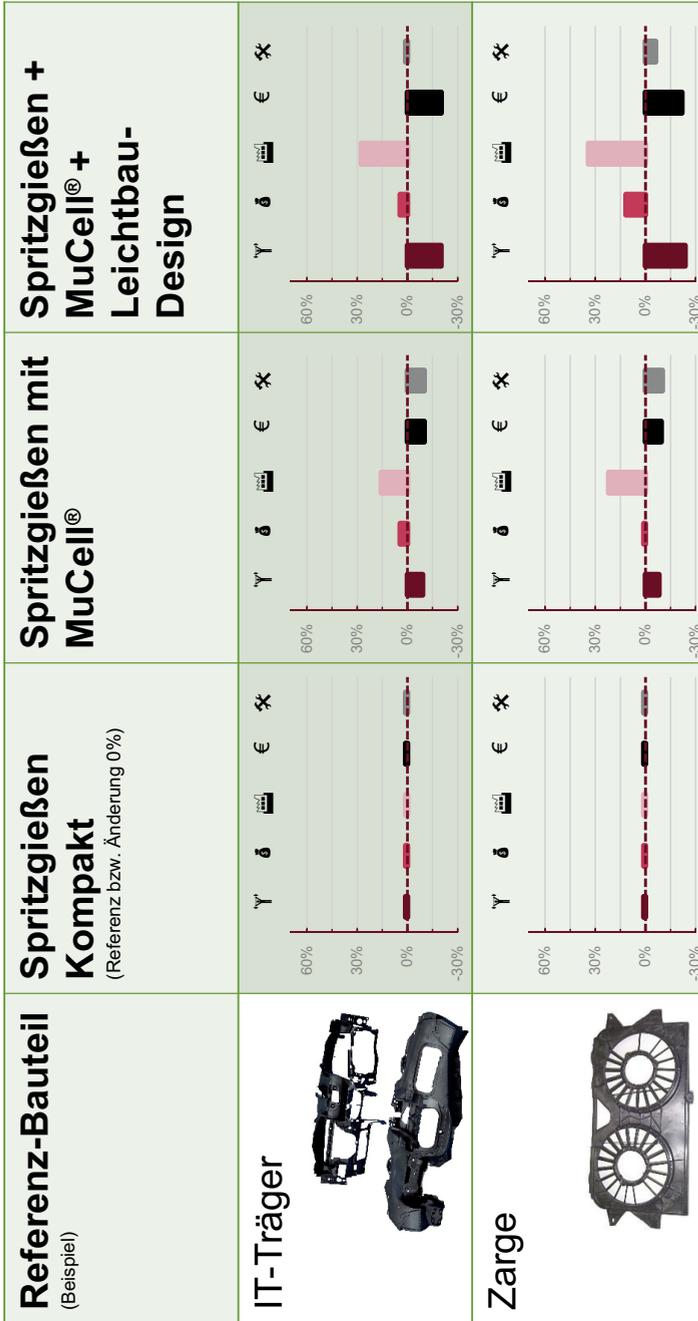
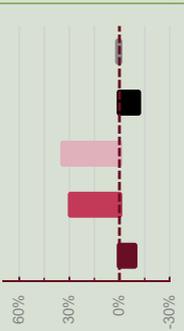
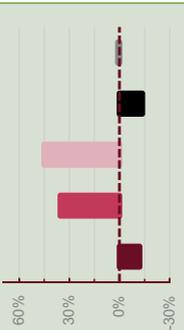
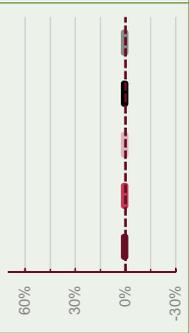
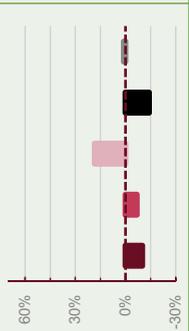
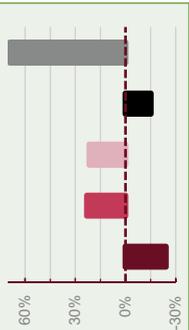


Bild 1.2 Vorteile als Stand der Technik bei TSG-Bauteilen [Bildquelle: Trexel GmbH]

<p><b>Ölwanne</b></p> 			
<p><b>Unterboden</b> (Konzept mit Öffnungshub)</p> 			
<p><b>Bemerkung</b></p>	<p>Spritzgießteil nach klassischer Auslegung:          - Rippen-/ Wanddicke          - Fließwege          - Von dick auf dünn angespritzt</p> 	<p>Spritzgießteil nach klassischer Auslegung mit MuCell geschäumt:          - Leichter durch Schaumstruktur          - Produktion ohne Nachdruck</p> 	<p>MuCell ermöglicht Bauteilgestaltung mit freier topografischer Lastauslegung:          - Leichtbaudesign          - Dünnwandig          - Dick mit niedriger Dichte          - Produktionssteigerung</p> 

- Y = Gewicht
- δ = Investition
- Π = Produktivität
- € = Bauteilkosten <sup>1)</sup>
- ✂ = mechanische Kern-Eigenschaft

<sup>1)</sup> Kalkulation auf Basis eines Volumenmodells mit 300.000 Fahrzeugen pro Jahr

Die vordergründige Antwort auf den „Siegesszug“ des Schaumspritzgießens liegt dabei natürlich auf der Hand: Durch das Aufschäumen des Kunststoffes sinkt das Materialgewicht bezogen auf die gleiche Teilegeometrie. Dabei spart der Hersteller am Materialeinsatz des Polymers beim Urformprozess. Eine nähere, intensivere Betrachtung der Prozessschritte, wie wir sie später im Kapitel 3 „*Definition und Merkmale des physikalischen Schaumspritzgießens*“ detailliert erläutern, zeigt auch noch einen erheblichen Umfang an zusätzlichen Vorteilen. Dabei sind es häufig gerade diese Vorteile, die dem Anwender die Entscheidung regelrecht abnehmen, ob das Bauteil kompakt gespritzt, oder nicht doch besser als geschäumtes Bauteil ausgeführt wird!

Diese Vorteile des TSG-Prozesses sind neben der bereits genannten Gewichtseinsparung:

- eine Reduktion der Einfallstellen (in der Regel zu null)
- kaum wahrnehmbarer Verzug der Bauteile
- Produktionssteigerung durch Zykluszeitverkürzung
- Möglichkeit des dünnwandigen Leichtbaudesigns (siehe dazu detailliert Kapitel 4 „*Konstruktionsrichtlinien für geschäumte Bauteile*“)

Bild 1.2 gibt hierüber einen beispielhaften Überblick, basierend auf vier Referenzteilen aus dem Automobilbau. Zur Erklärung von Bild 1.2 wollen wir die „Ölwanne“ als drittes Bauteil – gesehen von oben – nehmen: Dabei gibt die zweite Spalte im Bild jeweils die Referenzdaten an, also das Teilgewicht, die Anlageninvestition einschließlich Werkzeug, die Produktivität, die resultierenden Bauteilkosten sowie die für die entscheidenden Stellen notwendigen mechanischen Bauteileigenschaften. Dabei ist die Referenz natürlich das klassisch kompakt gefertigte Spritzgießbauteil.

In der dritten Spalte „Spritzgießen mit MuCell®“ lassen sich nun die ersten Ergebnisse vergleichend diskutieren:

- Das Bauteilgewicht sinkt, entsprechend dem Schäumgrad.
- Die Anlageninvestition steigt im Bereich der Spritzgießmaschine. Zusätzlich wird eine Gasdosierstation benötigt.
- Die Produktivität steigt erheblich, hauptsächlich aufgrund schnellerer Fertigungszyklen.
- Die auf das Bauteil bezogenen Kosten sinken, da der reduzierte Materialeinsatz und die erhöhte Produktivität die höheren Anlageninvestitionen überkompensieren.
- Die notwendigen mechanischen Eigenschaften an den kritischen Stellen des Bauteils bleiben erhalten.

Noch interessanter für jeden Anwender wird es, sobald das Bauteildesign unter Beachtung der TSG-Konstruktionsrichtlinien (im Detail siehe im späteren Kapitel 4) als Leichtbaudesign ausgeführt wurde. Hierzu diskutieren wir nun die Darstellung in Spalte vier von Bild 1.2 „Spritzgießen + MuCell® + Leichtbaudesign“:

- Das Bauteilgewicht der Ölwanne reduziert sich weiter auf einen Wert von ca. -10%. Der Grund liegt im TSG-gerechten Leichtbaudesign.
- Die Anlageninvestition steigt leicht, auch im Vergleich zur dritten Spalte, da die Werkzeugkosten für ein solches Bauteil leicht höher liegen. Ansonsten gibt es keine Änderungen zum bereits vorher Gesagten.
- Die Produktivität steigt weiter! Wir erreichen wegen dünnerer Bauteile kürzere Kühlzeiten sowie noch schnellere Zyklen der Produktionsanlage.
- Die auf das Bauteil bezogenen Kosten sinken noch einmal, nun in Summe auf gut 10%.
- An den mechanischen Eigenschaften der festigkeitskritischen Bereiche ändert sich nichts. Die Werte sind vergleichbar mit den Werten des Kompaktspritzgusses.

Soweit zu den Vorteilen von TSG-Bauteilen, die uns täglich in der Großserienproduktion der Industrie begegnen. Auf einen weiteren, immer wieder genannten makroökonomischen Vorteil, den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck in der Produktion, möchten wir an dieser Stelle nicht weiter eingehen – wir diskutieren diese Problematik ausführlicher an einem Beispiel aus dem Bereich Automotive in Abschnitt 9.1. Es ist aber jedem klar, dass TSG dabei im Vergleich zum traditionellen Kompaktspritzguss erhebliche Vorteile bietet: Der Materialeinsatz sinkt, die Produktionseffizienz steigt, das Leichtbauteil benötigt im „späteren Lebenszyklus“ weniger Bewegungsenergie.

Kehren wir noch einmal zurück auf das Bild 1.1. Insbesondere der Bereich „Entwicklung“ soll hier deutlich aufzeigen, dass TSG für sich eine Technologie ist, die heute als Standardverfahren bezeichnet werden kann. Daneben ist jedoch jedem Fachmann bewusst, dass TSG in Zusammenhang oder in Kombination mit einem anderen Prozess ein enorm großes, noch nicht ausgeschöpftes Potenzial an neuen Verfahren bietet.

Last but not least möchten wir darauf hinweisen, dass wir in diesem Buch in den meisten Kapiteln in herausgehobener Schrift Tipps und Anregungen unter dem Motto „Weniger ist mehr“ aufführen. Die Kennzeichnung beginnt jeweils mit dem Symbol einer Waage und zeigt Vorteile und interessante Aspekte des Schaumspritzgießens auf.



Wir hoffen, dass dadurch möglichst viele Leser motiviert werden, sich mit diesem innovativen Verfahren auseinanderzusetzen, sodass in Zukunft in diesem Bereich weiterentwickelt und geforscht wird – denn diese Technologie birgt, wie bereits oben erwähnt, noch so einige unentdeckte Potenziale.

# 2

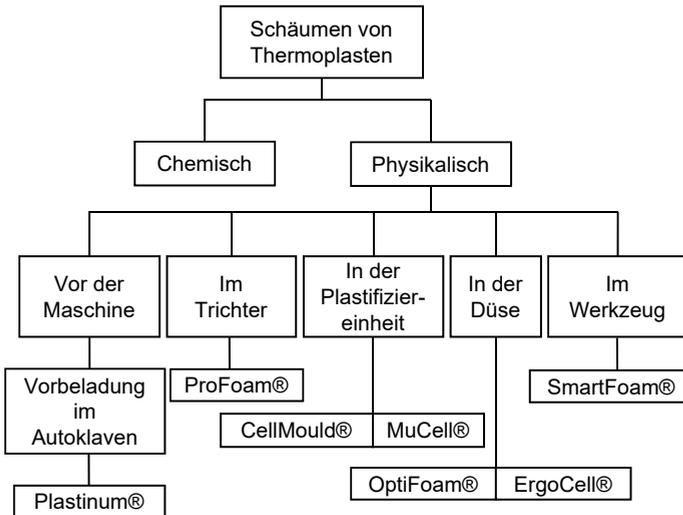
## Das Schaumspritzgießen und seine unterschiedlichen Verfahrensvarianten

In Kapitel 2 werden nicht nur die unterschiedlichen Verfahren des TSG beschrieben, sondern im übertragenen Sinne auch die Geschichte der Technologie des Schaumspritzgießens.

Wie bekannt, fing alles mit dem chemischen Schäumen an. Als erstes industriell interessantes physikalisches Schäumverfahren kam dann aber Ende der 1990er Jahre das MuCell®-Verfahren ins Spiel. Kontraproduktiv wirkte zur Verbreitung dieses Verfahrens damals jedoch die Lizenzpolitik der Firma Trexel, Patentinhaber von MuCell®. Aus diesem Grunde entwickelte sich speziell in Deutschland eine Vielzahl von Verfahrensvarianten (siehe Abschnitt 2.2.4), hauptsächlich zur Patentumgehung von MuCell®. Nach vielen Jahren änderte die Firma Trexel ihre Strategie und verzichtete auf Lizenzgebühren für den Anwender. Damit war der Weg nun frei, dass sich MuCell® in der weltweiten Spritzgießindustrie als „*das Schäumverfahren*“ durchsetzte. Kommen wir jedoch zurück auf eine Systematik des TSG.

Das Schäumen von Thermoplasten lässt sich in zwei grundlegende Verfahrensarten unterteilen. Diese ist zum einen das Schäumen mit chemischen Treibmitteln, und zum anderen das Schäumen mit physikalischen Treibmitteln. Hierbei unterscheiden sich die beiden Verfahren weniger bezüglich des eigentlichen Schäumprozesses als vielmehr nach der Art der Treibmittel und ihrer Dosierung [1]. Eine Übersicht der (zum Teil ehemals) kommerziell erhältlichen Verfahren ist in Bild 2.1 dargestellt.

Dabei ist zu beachten, dass – wie bereits eingangs gesagt – viele Verfahrensvarianten lediglich entwickelt wurden, um das MuCell® Verfahren zu umgehen. Aus diesem Grund gibt es nach der Strategieänderung von Trexel eine Vielzahl der Varianten heute nicht mehr am Markt.



**Bild 2.1** Übersicht der (zum Teil ehemals) kommerziell erhältlichen Verfahren zum Schäumen von Thermoplasten im Spritzgießen

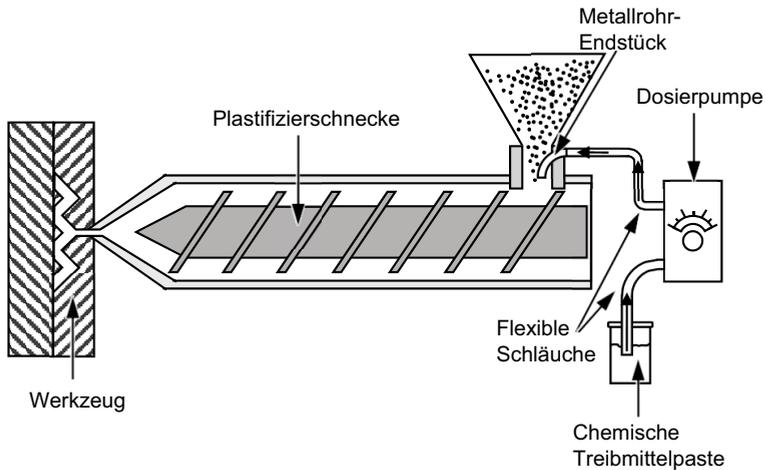
Beide Verfahrensarten weisen maschinentechnische Besonderheiten und spezifische Merkmale auf. Diese werden in den nachfolgenden Kapiteln eingehend beschrieben.

## ■ 2.1 Chemische versus physikalische Treibmittel

### 2.1.1 Chemische Treibmittel

Das Schäumen mit chemischen Treibmitteln basiert auf einer thermisch initiierten Zersetzungsreaktion des Treibmittels. Die thermische Zersetzungsreaktion kann durch eine Kombination aus sauren und basischen chemischen Treibmitteln von einer chemischen Reaktion überlagert werden [2].

Das Treibmittel wird dem Polymergranulat vor der Verarbeitung meist in fester Form, sprich als Pulver, Granulat oder Masterbatch, zugesetzt. Dies geschieht entweder schon außerhalb der Spritzgießmaschine in einem langsam fahrenden Mischer oder direkt in den Trichter der Maschine mittels einer externen Dosiereinrichtung. Auch Systeme, in denen chemische Treibmittel als flüssige Suspensionen (Pasten) dosiert werden, gehören zum Stand der Technik. Die Treibmittelsuspension wird dabei über eine Schlauchpumpe direkt unterhalb des Granulattrichters der Plastifiziereinheit zugeführt (siehe Bild 2.2).



**Bild 2.2** Dosiereinrichtung zur Dosierung flüssiger chemischer Treibmittel [3]

Nach Shutov [3] können durch die Verwendung von Masterbatches oder Pasten höhere Aufschäumgrade bzw. niedrigere Dichten erreicht werden als mit reinen Pulvern. Dies kann auf den geringeren Treibgasverlust während der Aufschmelz- und Homogenisierungsphase zurückgeführt werden, da Pasten und Konzentrate in Form von Masterbatches eine bessere Dispergierung des Treibmittels im Polymer erlauben und es somit gleichmäßiger im Polymer gelöst werden kann [3].

An chemische Treibmittel werden jedoch auch einige Anforderungen gestellt. Nachfolgend sind die wesentlichen Anforderungen aufgeführt:

- möglichst hohe Gasausbeute
- möglichst kleine Temperaturspanne zur Gasfreisetzung
- keine Schädigung des Polymers
- toxikologische Unbedenklichkeit
- keine negative Beeinflussung der mechanischen und optischen Eigenschaften des Produkts
- kostengünstig
- Zulassung einer kontrollierten Zersetzungsreaktion
- gute Lagerfähigkeit und ein gutes Handling
- keine Geruchsbelästigung der Reststoffe

Bis heute existiert jedoch kein chemisches Treibmittel, welches alle Anforderungen gleichzeitig erfüllt [4].

Zu den chemischen Treibmitteln gehören Azoverbindungen, Hydrazide, Nitrosoverbindungen, Natriumcarbonat und Stoffmischungen aus organischen Säuren

und Bicarbonat. Eine Übersicht einiger chemischer Treibmittel mit ihren Zersetzungsbereichen und Gasausbeuten ist in Tabelle 2.1 aufgelistet:

**Tabelle 2.1** Chemische Treibmittel [2]

Chemische Bezeichnung	Zersetzungsbereich [°C]	Gasausbeute [ml/g]	Hauptanteile der Gase
Natriumhydrogencarbonat	130 – 170	160 – 170	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O,
Zitronensäure und deren Derivate	190 – 230	90 – 130	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O
Azodicarbonamid (ADC)	200 – 220	280 – 320	CO <sub>2</sub> , CO, N <sub>2</sub> , (NH <sub>3</sub> )
Modifiziertes Azodicarbonamid	150 – 190	220 – 300	CO <sub>2</sub> , CO, N <sub>2</sub> , (NH <sub>3</sub> )
Toluolsulfonylhydrazid (TSH)	110 – 140	120 – 140	H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub>
Oxybis(benzolsulfohydrazid) (OBSh)	155 – 160	120 – 150	H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub>
5-Phenyl-Tetrazol (5-PT)	110 – 140	120 – 140	H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub>

Unter Wärmeeinwirkung zerfallen diese Substanzen und spalten gasförmige sowie feste Produkte ab. Um die chemische Reaktion zu initiieren, muss zunächst eine gewisse Aktivierungsenergie überschritten werden. Dies wird durch die dem Polymer im Prozess zugeführte Wärme erreicht. Hierbei muss beachtet werden, dass nur bis zu 50 % des eingesetzten Treibmittels als Gasausbeute zum Aufschäumen beitragen. Die entweichenden Fluide sind meist CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> oder H<sub>2</sub>O. Des Weiteren ist zu beachten, dass nicht die gesamte umgesetzte Gasmenge im Polymer gelöst wird. Ein Teil des Treibgases entweicht über die Werkzeugtrennfläche und die Entlüftungsbohrungen [2][3]. Ein anderer Teil der Zersetzungsprodukte verbleibt als fester Rückstand im Polymer. Dieser kann sich positiv auf die Zellnukleierung auswirken und somit zu einer höheren Zelldichte, aber auch zu negativen Effekten, wie dem Verfärben des späteren Bauteils, einer Korrosion des Werkzeugs oder auch Abbaureaktionen im Basispolymer, führen [1].

Eine optimale Gasausbeute kann vor allem durch eine gezielte Anpassung des Temperaturverlaufs erzielt werden. Aber auch die Verweilzeit, der Druck und die Schmelzfestigkeit des Polymers nehmen Einfluss auf die Gasausbeute [2].

Es werden exotherme und endotherme chemische Treibmittel unterschieden. Exotherme Treibmittel setzen bei ihrer Zersetzungsreaktion Energie in Form von Wärme frei, sodass das System unter Umständen zusätzlich gekühlt werden muss. Nach dem Start der Zersetzungsreaktion ist diese bei exothermen Treibmitteln nicht mehr durch den Verarbeitungsprozess kontrollierbar. Der Vorteil liegt hierbei im vollständigen Abbau des Treibmittels und somit einer guten Gasausbeute. Die gängigsten exothermen Treibmittel sind: Azodicarbonamide (ADC), Toluolsulfohydrazid (TSH), Tetrazole und Oxybis(benzolsulfohydrazid) (OBSh) [4].

# Stichwortverzeichnis

## Symbole

2K-Schaumspritzgießen *18*  
3D-Effekt *208*

## A

Abbaurrate *220*  
Abkühlgeschwindigkeit *61*  
Additive *13*  
Adsorption *43*  
Aluminiumwerkzeug *156, 175*  
Angussgestaltung *72*  
Angussystem *151*  
Anlageninvestition *7*  
Anspritzpunkt *60, 78*  
Anspritzung  
– kaskadiert *151*  
AquaCell®-Verfahren *28*  
Auswerfer *154*  
Autoklav *26, 27*

## B

Barrierebeschichtung *208*  
Barrierebeschriftung *208*  
Bauteilauslegung *88*  
– topologische *167, 171, 177, 192*  
Bauteildesign *7*  
Bauteildichte *37, 117*  
Bauteilfestigkeit *127*  
Bauteilgeometrie *99*  
Bauteilqualität *168*  
Bauteilverzug *112, 201*

Befestigungselement *66*  
Biegeversuch *117*  
Bindenähte *76, 87, 105, 150*  
Biokompatibilität *218*  
Blasendichte *94*  
Blasendurchmesser *108*  
Blasenstruktur  
– Homogenität *136*  
Blasenwachstum *88*  
– Geschwindigkeit *92*  
Boundary-Layer-Mesh *97*  
Bruchdehnung *118*

## C

Cadmould *87, 89, 95*  
Cellmould®-Verfahren *21, 140*  
Class-A-Oberflächen *155*  
CO<sub>2</sub>-Bilanz *166*  
CO<sub>2</sub>-Fußabdruck *173, 206, 221*  
CO<sub>2</sub>-Label *165*  
Copolymere *122*  
Core Back *94*

## D

Dämpfungseigenschaft *186*  
Designfreiheit *209*  
Designleitfaden  
– TSG Bauteile *59*  
Dichteabnahme *59*  
Dichtereduktion *110*  
Dichteverteilung *109, 110, 158*

Diffusion 44  
 Dimensionsstabilität. 192  
 DIN 16742 146  
 Direktbegasung XV  
 Dolphin-Verfahren 179  
 Dosiereinrichtung  
 – extern 10  
 Dosierverhalten 136  
 Dreiplattenform 73  
 Druckkammerschleuse 139  
 Dünnwandbauteil 101  
 Dünnwandtechnik 196  
 Dünnwand-Verpackungen 211  
 Durchstoßversuch 117, 120

## E

Einfallstellen 35, 59, 112, 173, 214  
 Einphasengemisch 42, 44, 134  
 Einspritzdruck 107, 207  
 Einspritzeinheit 133  
 Einspritzgeschwindigkeit 49, 87,  
 142  
 Elektro-Bauteil 189  
 Entgasungsschnecke 134  
 Entlüften 61, 66  
 Entlüftung 70, 100, 152  
 ErgoCell<sup>®</sup>-Verfahren 21  
 Etagenwerkzeug 74, 182  
 Expansion 161

## F

FEM-Berechnung 186  
 Flammschutz 189  
 Fließfaktor 60, 77  
 Fließfront 65  
 Fließhilfe 212  
 Fließweg 184  
 Fließwegende 104  
 – Dünnstellen 105  
 Fließweg-Wanddicken-Verhältnis 60, 80,  
 151, 185  
 Formteil  
 – Verzug 36

Formteilkfüllung  
 – balancierte 212  
 Fülldruck 84  
 Füller 126  
 Füllstoffe 65, 91, 125

## G

Gasausbeute 12  
 Gasdiffusionsgleichung 92  
 Gasdosierstation 6, 15, 25, 144  
 Gehäusebauteil 190  
 Gewichtsreduktion 35, 106, 169, 194  
 Gewichtsreduzierung 196  
 – durch Dichtereduzierung 207  
 Glasfaser 125  
 Glasfaseranteil 112  
 Gastemperatur 89  
 Grundwanddicke 182

## H

Haut-Kern-Verhältnis 19  
 Heißkanal 98  
 Heißkanaldüse 97, 150  
 Heißkanalsystem 74  
 Herstellkosten 195, 196  
 Hochdruckprozess 16  
 Hochdruck-TSG-Verfahren 157, 159  
 Homopolymere 122

## I

Implantat  
 – geschäumt 217  
 Inertgas 15, 33  
 In-Mould-Verfahren 40, 209  
 Integralschaum 34, 37

## K

Kaltkanalanguss 71  
 Kavität 76  
 Keimbildung 90  
 – heterogene 46

Kennwerte 115, 116  
Kohlenstoffdioxid 15  
Kombinationstechnologie 1  
Kompaktspritzguss 36, 49, 55, 76, 131  
Korrosion 13  
Kriechgeschwindigkeit 120  
Kriechverhalten 117  
Kühlzeiten 7  
Kunststoffe  
– biobasierte 205  
– funktionalisiert 220  
Kunststoffimplantat 217  
Kunststoffverpackungen 205

## L

Leichtbau 165  
Leichtbaudesign 7  
Leichtbaueigenschaft  
– stoßdämpfende 204  
Lippengeometrie  
– asymmetrisch 212  
Lunker 151

## M

Massachusetts Institute of Technology  
XV  
Maßgenauigkeit 192  
Maßhaltigkeit 173, 210  
Masterbatch 11, 33  
– Zersetzungsprozess 33  
Matrixpolymer 42, 127  
Mehrkavitätenwerkzeug 151  
MeltFlipper® 72  
Mikrosphären  
– expandierbare 29  
Mischgeometrie 137  
Mischzone  
– Geometrie 44  
Moldex3D 87, 89, 91, 103, 111  
Moldflow 87, 94  
Monomere 122  
MuCell®-Verfahren 20, 66, 87, 138

## N

Nachdruck 72, 101, 156  
– Umschaltpunkt 102  
Nadelverschlussdüse 14, 22, 74, 141  
Niederdruckprozess 16  
Niederdruckverfahren 130  
Nukleierung 87  
– heterogene 126  
– homogene 46  
Nukleierungsmittel 14  
– heterogenes 125  
Nukleierungsrate 90

## O

Oberflächendefekt 155  
Oberflächenspannung, 92  
OptiFoam®-Verfahren 22

## P

Plastifizieraggregat 99  
Plastifiziereinheit 150  
Plastifizierung 133  
Platinum®-Verfahren 26  
Plattenaufspannmaß 131  
Plattendurchbiegung 130  
Polyamid 125, 163  
Polymer  
– geschäumt 115  
– Verarbeitungstemperatur 13  
Polymerblend 122  
Polymerlegierung 122  
Polypropylen 124, 211, 213  
post blow 75, 211  
ProFoam®-Verfahren 25, 138

## R

Randschichtdicke 35, 37, 48, 117  
Recycling 221  
Recyclingsystem 206  
Rippendesign 64  
Rückstromsperre 20, 140

**S**

Sandwich-Schaumspritzguss 57  
 Schallisolation 39  
 Schaummorphologie 47  
 Schäumprozess  
 – Simulation 97  
 Schaumstruktur 117, 136  
 – homogene 158  
 – mikrozellulare 213  
 Schließkraft 107, 131, 200  
 Schmelzfestigkeit 160  
 Schmelztemperatur 47, 48  
 Schneckenengeometrie 134, 140  
 Schraubdom 68, 70, 176  
 Schubschnecke 140  
 Schwindung 37  
 – volumetrische 112  
 Schwindungsverhalten 18  
 Sichtbauteil 160  
 Silberschlieren 29, 40, 51, 151  
 SmartFoam®-Verfahren 24  
 Soft-Touch-Oberfläche 179  
 Sorption 44  
 Sperring 140  
 Spritzgießmaschine  
 – holmlose 132  
 Spritzgussparameter 101  
 Standard-Mischschnecke 129  
 Startgaskonzentration 102  
 Steifigkeit 158  
 Stoßfestigkeit 215  
 Strukturschaum 33

**T**

Teildesign 63  
 Teilegeometrie 6  
 Temperierung  
 – dynamische 56  
 topologisches Design 86  
 TPE-Oberflächen 159  
 TPU 204, 218  
 Treibfluid  
 – überkritisch 20

Treibhausgas 206  
 Treibmittel 9  
 – chemisch 10  
 – endotherm 13  
 – exotherm 12  
 – physikalisch 14  
 – überkritisch 89  
 Treibmitteldosierstation 20  
 Trexel  
 – Richtlinien 87  
 Trockeneis 15  
 TSG  
 – im Reinraum 218  
 – Systematik 9  
 TSG-Verfahren  
 – mit Öffnungsbewegung 132  
 – Standard 132, 146

**U**

überkritischer Bereich 43  
 UCC-Prozess 14, 16  
 UL-Regel 189  
 Umschaltpunkt 106  
 Urformprozess 6

**V**

VDI-Richtlinie 2021 VI, XVI, 146, 204  
 Verbundwerkstoff 196  
 Verstärkungstoff 127  
 Verzugsminimierung 172  
 Viskositätsreduzierung 77, 88  
 Vorbeladungsverfahren 26  
 Vorkammerbuchse 154  
 Vortrocknung 126

**W**

Wanddicke 63, 64, 184, 196  
 – nominal 65  
 Wärmeisolation 39  
 Wechseltemperierung 51, 173  
 Werkzeug  
 – expandierbar 17

- Innendruck *50*
- Wandtemperatur *50*
- Werkzeugaufspanfläche *146*
- Werkzeugaufspanplatte *134*
- Werkzeugbeschichtung *155*
- Werkzeuggeometrie *18*
- Werkzeuginnendruck *191*
- Werkzeugkühlung *75*
- Werkzeugtemperatur *153*

## Z

- Zelldichte *12, 15, 109*
- Zellkoaleszenz *46*
- Zellnukleierung *12*
- Zellorientierung *33*
- Zellwachstum *46, 78, 88*
- Zugversuch *117*
- Zykluszeit *16, 18, 63*
- Zykluszeitreduzierung *192*