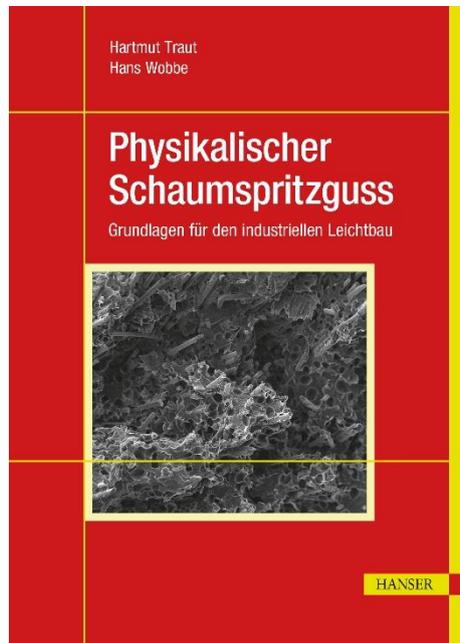


HANSER



Leseprobe

zu

Physikalischer Schaumspritzguss

von Traut Hartmut und Wobbe Hans

ISBN: 978-3-446-45406-4

E-Book-ISBN: 978-3-446-46964-8

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446454064>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Der industrielle Spritzgießprozess wird durch den Kompaktspritzguss dominiert, trotz vielfältiger vorhandener Sonderverfahren. Von diesen rückt ein Verfahren, das Schäumen von Kunststoffen, aufgrund seines Potenzials als treibende Kraft des Megatrends Leichtbau, in den Fokus.

Dabei geht es um das chemische und das physikalische Schäumen von Kunststoffen. Das letztere, das physikalische Schäumen, nimmt heute die größere Bedeutung im Anwendungsspektrum ein. Das war allerdings nicht immer so. Basierend auf einem Patent des MIT (Massachusetts Institute of Technology) verbreitete sich das physikalische Schäumen erst seit Ende der 1990er/Anfang der 2000er Jahre über die weltweit agierenden Hersteller von Spritzgießmaschinen. Die interessierten Maschinenhersteller schlossen Verträge mit dem Patentinhaber – der Firma Trexel Inc. USA – ab, und begannen mit der Vermarktung. Beide Herausgeber dieses Buches erinnern sich noch gut an diese Anfänge, da sie beide bei Vertragsunterzeichnungen agierten.

Heute steht der physikalische Schaumspritzguss an der Schwelle, neben dem etablierten Kompaktspritzguss, zu einem weiteren Standardverfahren aufzuschließen. Im Mittelpunkt unserer Betrachtungen stehen daher Antworten auf die Fragestellung, die diesem Ziel bisher im Wege standen: Warum hat sich der physikalische Schaumspritzguss nicht weiter durchgesetzt, obwohl es schon jetzt so viele herausragende Beispielanwendungen gibt, die für diese Technologie sprechen?

Wie bei der Einführung aller neuen innovativen Technologien stehen auch für den Schaumspritzguss notwendigerweise Investitionen an. Dabei denken wir hier jedoch nicht an das nötige Maschinenequipment für die Produktion. Die monetäre Bewertung, die Herstellkosten mittels Kompaktspritzgießen mit denjenigen Kosten nach dem Schaumspritzverfahren zu vergleichen, überlassen wir gerne dem Kaufmann.

Wir denken an Investitionen in die Ausbildung der Produktdesigner für die schaumspritzgerechte Bauteilkonstruktion, an Investitionen zur Formulierung entsprechender Richtlinien und Normen, an Investitionen zur Erarbeitung von Materialkarten und ähnliches. Fragen Sie hierzu die für Forschung und Ausbildung

zuständigen Hochschulen, so lautet die Antwort stets: „*Der Prozess ist doch entwickelt, worauf warten Sie? Nun ist die Industrie am Zuge!*“ Bei den oben formulierten Fragestellungen befinden wir uns offensichtlich in einer ungeklärten „Grauzone“ zwischen der Ingenieurwissenschaft und der Industrie. Doch ist die Ingenieurwissenschaft nicht eng verwoben mit der Industrie, und sollten miteinander den Dialog suchen? Bei unserem Thema ist das offensichtlich weniger der Fall.

Wir als Herausgeber haben daher beim VDI die Richtlinie 2021 initiiert, die voraussichtlich in 2022/2023 erscheinen wird, und wollen mit diesem Buch auch zu den bisher fehlenden Konstruktionsrichtlinien beitragen. Auch der letzte fehlende Bereich der Materialkarten wird besprochen. Offen gestanden ist dies jedoch das letzte fehlende Glied zum Durchbruch des Schaumspritzgießens als zweites Standardverfahren, da von den eigentlich zuständigen Materialherstellern wenige Impulse zur Problemlösung ausgehen. D.h. im konkreten, es fehlen Materialdaten, ohne die kein Teilekonstrukteur detaillierte Berechnungen anstellen kann. Verarbeiter, die konsequent und kompromisslos in die Technologie des Schaumspritzgießens einsteigen, müssen daher hinsichtlich der Materialfrage momentan eigene Arbeit investieren. Ein Wettbewerbsvorteil wird jedoch die Belohnung sein.

Das vorliegende Buch mit seiner breiten Darstellung aller wichtigen Themenbereiche soll nicht nur dem Einsteiger ein wichtiger Ratgeber sein, sondern auch dem fortgeschrittenen Anwender des Schaumspritzgießens eine Hilfestellung bei aktuellen Fragestellungen geben.

Die Herausgeber bedanken sich ganz besonders bei den Autoren und Co-Autoren zu den einzelnen Kapiteln und Abschnitten für ihre Bereitschaft zur Mitarbeit und für ihre Ausdauer und Geduld während der langen Entstehungsphase dieses Buchprojektes. Insbesondere möchten wir an dieser Stelle Herrn Roger Kaufmann danken, der uns mit reinem Expertenwissen über die wichtigen Bereiche der Anwendung der Prozess-Simulation und des Werkzeugbaus tatkräftig unterstützte. Weiterhin sind die Herausgeber den Mitarbeitern des Carl Hanser Verlages zu großem Dank verpflichtet, für ihre Hilfsbereitschaft und großzügige Unterstützung bei der Koordination der Arbeiten im Verlag. Ein weiterer großer Dank geht an Frau Angelika Wobbe, die nicht nur die Fäden zusammenhalten musste, sondern auch die sorgfältige Durchsicht und Korrektur der Buchkapitel übernommen hat.

Siegen, *Hartmut Traut*

Hitzacker (Elbe), *Hans Wobbe*

Im Oktober 2022

Geleitwort

Was bremst Technologie? Oftmals die persönliche Risikoabwägung. Gründe hierfür sind zum einen vielleicht in der Bequemlichkeit, zum anderen in der Umsetzung des Gewohnten, des vermeidlich Bewährten, zu finden. Nicht selten ist es aber auch einfach nur Unwissenheit. Die Unwissenheit über Chancen und Risiken sowie die Unsicherheit, diese richtig zu bewerten, um eine Umsetzung zu wagen. Sich trauen und nicht zögern, um nutzenstiftende Potenziale zu heben. Häufig verhält es sich genauso, wenn es um den Einsatz der Technologie des physikalischen Schaumspritzgusses geht: „Ist das nicht alles Voodoo?“ – womit wir wieder bei der Ungewissheit und damit bei der Risikoabwägung wären.

Aber so einfach ist es dann doch nicht. Das gute robuste Engineering von Produkten, Werkzeugen, Maschinen und Prozessen basiert neben der Tiefe von Fachkenntnis auch auf dem ingenieurwissenschaftlich gesunden Menschenverstand. Also auf einem wertvollen Erfahrungsschatz eines Fachexperten, gerne auch auf dem Bauchgefühl des Fachmannes. Die gekonnte Mischung aus beidem ist im Ergebnis ein Garant, fähige und auch wirtschaftliche Fertigungsprozesse zu entwickeln, mit denen dann qualitativ hochwertige und den Anforderungen entsprechende Produkte hergestellt werden.

Und genau an dieser Stelle setzt das Werk der Herausgeber Traut und Wobbe an. Aufklären, Sicherheit herstellen, risikobewusst in die Umsetzung gehen. Die Technologie des physikalischen Schaumspritzgusses gibt es schon seit gut 20 Jahren. Zu Beginn stark reglementiert aufgrund bestehender Patente durch das Unternehmen Trexel, wodurch die Durchdringung von MuCell® auf den Produktionshallenböden entsprechend verhalten war. Durch dieses Hemmnis konnte sich das Verfahren nur langsam in der Kunststoffwelt etablieren. Hinzu kommt, dass in den Anfangsjahren das Augenmerk häufig auf die generelle Ertüchtigung der Prozesstechnologie, deren Umsetzungsmöglichkeiten und Leistungsvielfalt gelegt wurde. Nun könnte man meinen, da der Prozess steht, geht es jetzt in die Produktion. Aber bekanntermaßen beginnt die Industrialisierung einer Prozesstechnologie schon mit der Produktentwicklung. Man könnte auch sagen, der Prozess folgt dem Produkt mit seinen Anforderungen und Spezifikationen, und nicht umgekehrt. Macht

ja auch Sinn, erst das *Was* und *Wofür* zu klären, um dann daraus das *Wie* und *Womit* folgen zu lassen. Klassisch, aber bewährt – leider nicht immer in der Praxis so umgesetzt. Aber das ist ein anderes Thema...

Um die vielversprechenden Vorteile des physikalischen Schaumspritzgusses, wie z. B. Gewichtsreduktion, Minimierung von Schwindung und Verzug, Zykluszeitminimierung – um nur einige zu nennen – erfolgreich umsetzen zu können, ist es notwendig, schon in der Produktentwicklung die verfahrenstechnischen Besonderheiten zu berücksichtigen und vor allem auch umzusetzen. Die klassische Lehre des werkstoff- bzw. fertigungsgerechten Konstruierens für den Kompaktspritzguss gilt nur bedingt, bzw. muss man diese nicht mehr in der Tiefe ihrer Konsequenz beachten. Was in diesem Falle durchaus sehr zum Vorteil geraten kann, insbesondere in Bezug auf Wanddickensprünge, Einfallstellen und geometrische Maßhaltigkeit. Kurzum, es muss – besser „darf“ – anders konstruiert werden. Gleiches wirkt sich auch auf die Werkzeugkonstruktion und damit auf den Werkzeugaufbau aus. Auch hier gibt es Besonderheiten zu beachten, damit der Prozess schlussendlich erfolgreich umgesetzt werden kann.

Produkt, Werkzeug und Spritzgießmaschine: Ein untrennbarer Dreiklang, der harmonisch aufeinander abgestimmt sein muss, um eine Prozessfähigkeit im Bedarfsfall auch rund um die Uhr zu gewährleisten. Alle diese Themenbereiche werden in dem Buch angesprochen, erläutert und sinnvoll reflektiert. Durch die fachliche Kompetenz, die sich das gesamte Autorenteam über viele Jahre aufgebaut und erarbeitet hat, wird sehr schnell beim Studieren des Buches deutlich, dass die praktische Umsetzung des Beschriebenen einen sehr hohen Stellenwert hat. Basiswissen und Lösungsansätze werden ganzheitlich betrachtet. Vor- und Nachteile werden dargestellt und diskutiert.

Man darf sich an dieser Stelle lediglich fragen, warum es so lange gedauert hat, bis solch ein Standardwerk der Branche an die Hand gegeben wird. Der Bedarf „Wissensdurst“ ist da, endlich wird er gestillt.

Schmalkalden, im Herbst 2022

Thomas Seul

Inhalt

| | |
|---|------------|
| Vorwort | V |
| Geleitwort | VII |
| Einleitung | XV |
| 1 Bedeutung des Schaumspritzgießens für den industriellen Leichtbau | 1 |
| 2 Das Schaumspritzgießen und seine unterschiedlichen Verfahrensvarianten | 9 |
| 2.1 Chemische versus physikalische Treibmittel | 10 |
| 2.1.1 Chemische Treibmittel | 10 |
| 2.1.2 Physikalische Treibmittel | 14 |
| 2.2 Verfahren | 16 |
| 2.2.1 Niederdruck-Spritzgießprozess | 16 |
| 2.2.2 Hochdruckverfahren | 16 |
| 2.2.3 2-Komponenten-Schaumspritzgießen (Sandwichspritzgießen) .. | 18 |
| 2.2.4 Schäumen mit physikalischen Treibmitteln | 20 |
| 2.2.4.1 Einbringung des Treibfluids im Bereich der Schnecke .. | 20 |
| 2.2.4.2 Einbringung des Treibfluids über ein Zusatzaggregat .. | 21 |
| 2.2.4.3 Einbringung des Treibfluids über eine Injektionsdüse .. | 22 |
| 2.2.4.4 Einbringung des Treibfluids über die Schnecke | 23 |
| 2.2.4.5 Einbringen des Treibfluids im Angussystem des Spritzgießwerkzeugs | 24 |
| 2.2.4.6 Einbringung des Treibfluids im Bereich des Trichters .. | 25 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.2.4.7 | Vorbeladungsverfahren | 26 |
| 2.2.4.7.1 | Vorbeladung des Granulats im Autoklaven | 26 |
| 2.2.4.7.2 | Aufschäumen durch Beladen von Formteilen im Autoklaven | 27 |
| 2.2.4.7.3 | Einbringen des Treibfluids Wasser über eine Trägersubstanz | 28 |
| 2.2.4.7.4 | Einbringen von Treibfluiden im festen Aggregatzustand | 29 |
| 3 | Definition und Merkmale des physikalischen Schaumspritzgießens | 33 |
| 3.1 | Eigenschaften von TSG-Strukturschäumen | 34 |
| 3.1.1 | Gewichtsreduktion | 35 |
| 3.1.2 | Einfallstellen | 35 |
| 3.1.3 | Formteilverzug | 36 |
| 3.1.4 | Schwindungsverhalten | 37 |
| 3.1.5 | Mechanische Eigenschaften | 37 |
| 3.1.6 | Isolationsverhalten gegen Temperaturgradienten | 38 |
| 3.1.7 | Isolationsverhalten gegen Schall | 39 |
| 3.1.8 | Ausgasung | 40 |
| 3.1.9 | Oberflächen | 40 |
| 3.2 | Herstellungsprozess von Strukturschäumen | 41 |
| 3.2.1 | Stofftransport und Mischen des Treibfluids im Matrixpolymer | 42 |
| 3.2.2 | Beladung und Aufbereitung des Einphasengemisches in der Plastifizierung | 44 |
| 3.2.3 | Aufschäumen und Fixierung des Bauteils in der Werkzeugkavität | 45 |
| 3.3 | Korrelation der Morphologie der Bauteilstruktur mit den Prozessparametern | 46 |
| 3.4 | Einfluss der Prozessparameter auf die Bauteileigenschaften | 47 |
| 3.4.1 | Einfluss der Schmelzetemperatur | 47 |
| 3.4.2 | Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit | 49 |
| 3.4.3 | Einfluss der Werkzeugtemperatur | 50 |
| 3.4.4 | Einfluss der Unterdosierung bei Teilfüllung der Kavität | 50 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.5 | Maßnahmen zur Verbesserung der Oberflächengüte | 51 |
| 3.5.1 | Technologien zur Werkzeugtemperierung | 51 |
| 3.5.2 | Werkzeugkonzepte | 55 |
| 3.5.3 | Oberflächenbeschichtungen der Kavitäten | 56 |
| 3.5.4 | Sandwich Schaumspritzgießen | 57 |
| 4 | Konstruktionsrichtlinien für geschäumte Bauteile | 59 |
| 4.1 | Gewichtsreduktion durch Schäumen | 59 |
| 4.2 | Grundlegende Designoptimierung | 62 |
| 4.3 | Wanddicke | 63 |
| 4.4 | Ausblick zur Bauteilgestaltung | 65 |
| 4.5 | Hinweise zur Werkzeugkonstruktion | 70 |
| 4.5.1 | Empfehlungen zur Entlüftung | 70 |
| 4.5.2 | Auslegung von Angusstange und Verteiler | 71 |
| 4.5.3 | Heißkanalsysteme | 74 |
| 4.5.4 | Werkzeugtemperierung | 75 |
| 4.6 | Füllbildanalyse | 75 |
| 4.7 | Konstruktionsrichtlinien für Schaumspritzgießen | 76 |
| 4.7.1 | Drei-Phasen-Modell bei der praktischen Umsetzung des Konstruierens für TSG-Bauteile | 81 |
| 4.7.2 | „Design für Funktion“ – ein Plädoyer | 86 |
| 5 | Prozess-Simulation | 87 |
| 5.1 | Softwaresysteme | 87 |
| 5.2 | Simulation Viskositätsreduktion/Zellnukleierung und Zellwachstum | 88 |
| 5.2.1 | Viskositätsreduktion | 89 |
| 5.2.2 | Zellnukleierung und Zellwachstum | 90 |
| 5.3 | Vernetzung/Modellaufbau | 97 |
| 5.4 | Prozessparameter für die Simulation definieren | 101 |
| 5.5 | Ergebnisse und Interpretation | 103 |
| 6 | Polymere für das Schaumspritzgießen | 115 |
| 6.1 | Einleitung | 115 |
| 6.2 | Prüfkörper | 116 |
| 6.3 | Einfluss der Integralschaumstruktur auf die Kennwerte | 117 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.4 | Gezielte Veränderung der Eigenschaften der Schaumpolymeren | 121 |
| 6.5 | Polymere | 122 |
| 6.6 | Polypropylen (PP) | 124 |
| 6.7 | Polyamide (PA) | 125 |
| 6.8 | Polyoxymethylen (POM) | 125 |
| 6.9 | Polycarbonat (PC) | 126 |
| 6.10 | Nukleierungsmittel | 126 |
| | 6.10.1 Organische Füllstoffe | 127 |
| | 6.10.2 Anorganische Füllstoffe | 127 |
| | 6.10.3 Fasern | 127 |
| 7 | Maschinenbauliche Grundlagen der Schaumspritzgießmaschine | 129 |
| 7.1 | Einleitung | 129 |
| 7.2 | Schließeinheit | 130 |
| 7.3 | Einspritzeinheit und Plastifizierung | 133 |
| 7.4 | Sonderausstattung | 141 |
| 7.5 | Gasdosierstation | 144 |
| 7.6 | Die ideale Schaumspritzgießmaschine | 145 |
| 8 | Werkzeugtechnik für das Schaumspritzgießen | 149 |
| 8.1 | Werkzeugtechnische Grundlagen | 149 |
| | 8.1.1 Anspritzen | 149 |
| | 8.1.1.1 Prozessbetrachtung am Anspritzbereich | 150 |
| | 8.1.1.2 Prozessbetrachtung nach dem Anspritzbereich | 151 |
| | 8.1.2 Füllvorgang | 152 |
| | 8.1.3 Entlüften | 152 |
| | 8.1.4 Temperieren | 153 |
| | 8.1.5 Auswerfen | 154 |
| | 8.1.6 Überwachung | 154 |
| | 8.1.7 Werkzeugoberfläche und Beschichtung | 155 |
| | 8.1.8 Werkzeug und Schmelzeinfluss | 156 |
| 8.2 | TSG-Prozesse – Anwendung und Werkzeugtechnik | 156 |
| | 8.2.1 Niederdruck-TSG | 156 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 8.2.2 | Hochdruck-TSG mit Öffnungshub | 156 |
| 8.2.3 | Anwendungsbeispiel 1: Softtouch-Oberflächen mit Hochdruck-TSG | 159 |
| 8.2.4 | Anwendungsbeispiel 2: Hochdruck-TSG für flächige Sichtbauteile | 162 |
| 8.2.5 | Anwendungsbeispiel 3: Niederdruck-TSG | 163 |
| 9 | Anwendungsbeispiele aus dem Bereich Automotive | 165 |
| 9.1 | Einleitung | 165 |
| 9.2 | Schlossgehäuse | 168 |
| 9.3 | Türbrüstung | 170 |
| 9.4 | Scheinwerfergehäuse | 171 |
| 9.5 | Heckspoiler Unterschale | 173 |
| 9.6 | Außenspiegelhalter | 174 |
| 9.7 | Griffblende IML | 175 |
| 9.8 | Instrumententafelträger | 177 |
| 9.9 | Türverkleidung und Kartentasche | 181 |
| 9.10 | Griffhebel zur Lenksäulenverstellung | 182 |
| 9.11 | Anschlagdämpfer | 186 |
| 10 | Elektronikbauteile | 189 |
| 11 | Anwendungsbeispiele aus dem Bereich Haushalt | 195 |
| 11.1 | Wirtschaftliche Betrachtung geschäumter Thermoplastbauteile | 195 |
| 11.2 | Bodengruppe Weiße Ware | 199 |
| 11.3 | Grundplatte für Elektrowerkzeuge | 201 |
| 11.4 | Bewässerungsventil | 202 |
| 11.5 | Laufschuhsohle | 203 |
| 12 | Anwendungsbeispiele aus dem Bereich Verpackung | 205 |
| 12.1 | Margarinebecher | 207 |
| 12.2 | Joghurtbecher 200 ml und 900 g-Becher | 209 |
| 12.3 | Empfehlungen beim Einsatz von Schäumverfahren bei Dünnwand-Verpackungen | 211 |
| 12.4 | Paletten | 213 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 13 | Anwendungsbeispiele aus dem Bereich Medizintechnik | 217 |
| 14 | Ausblick | 221 |
| | Die Autoren | 223 |
| | Stichwortverzeichnis | 225 |

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.

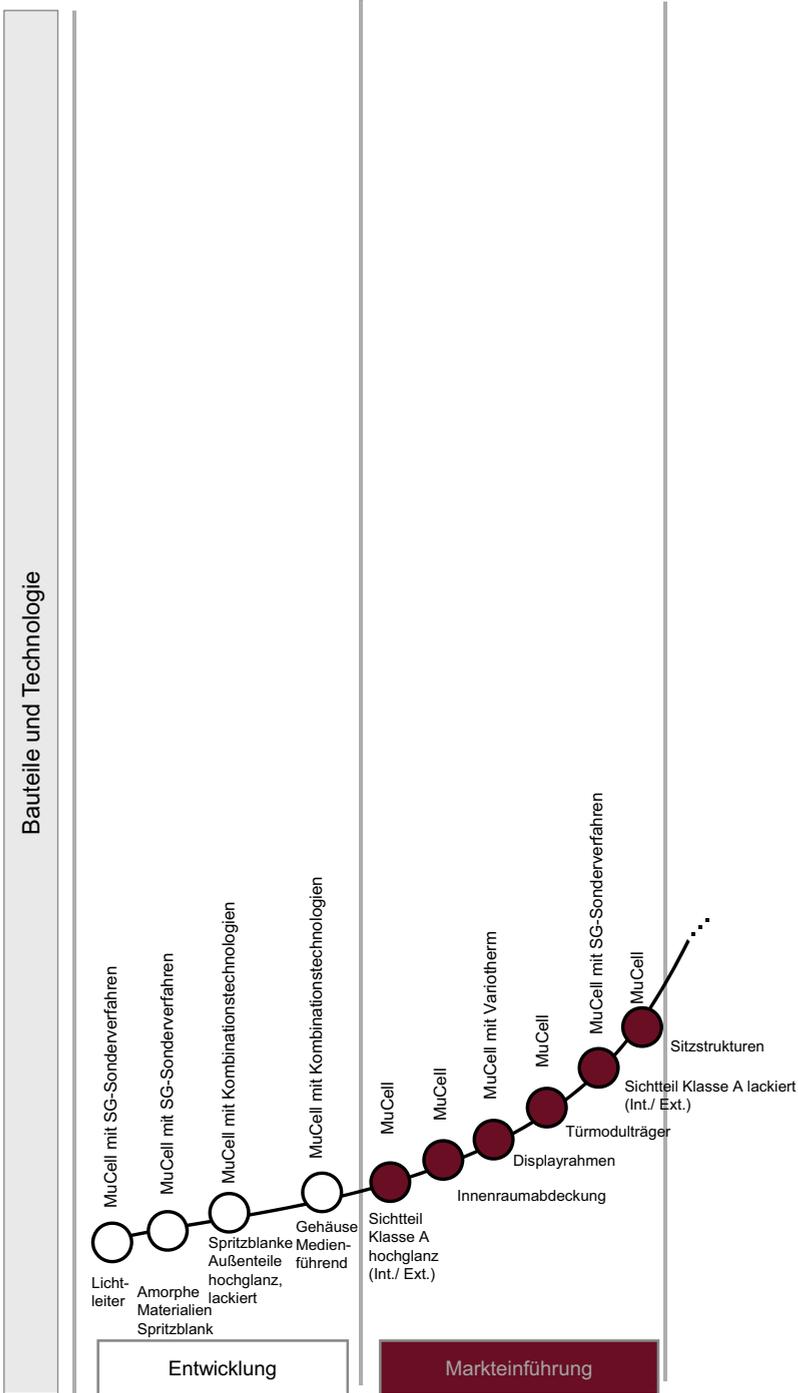
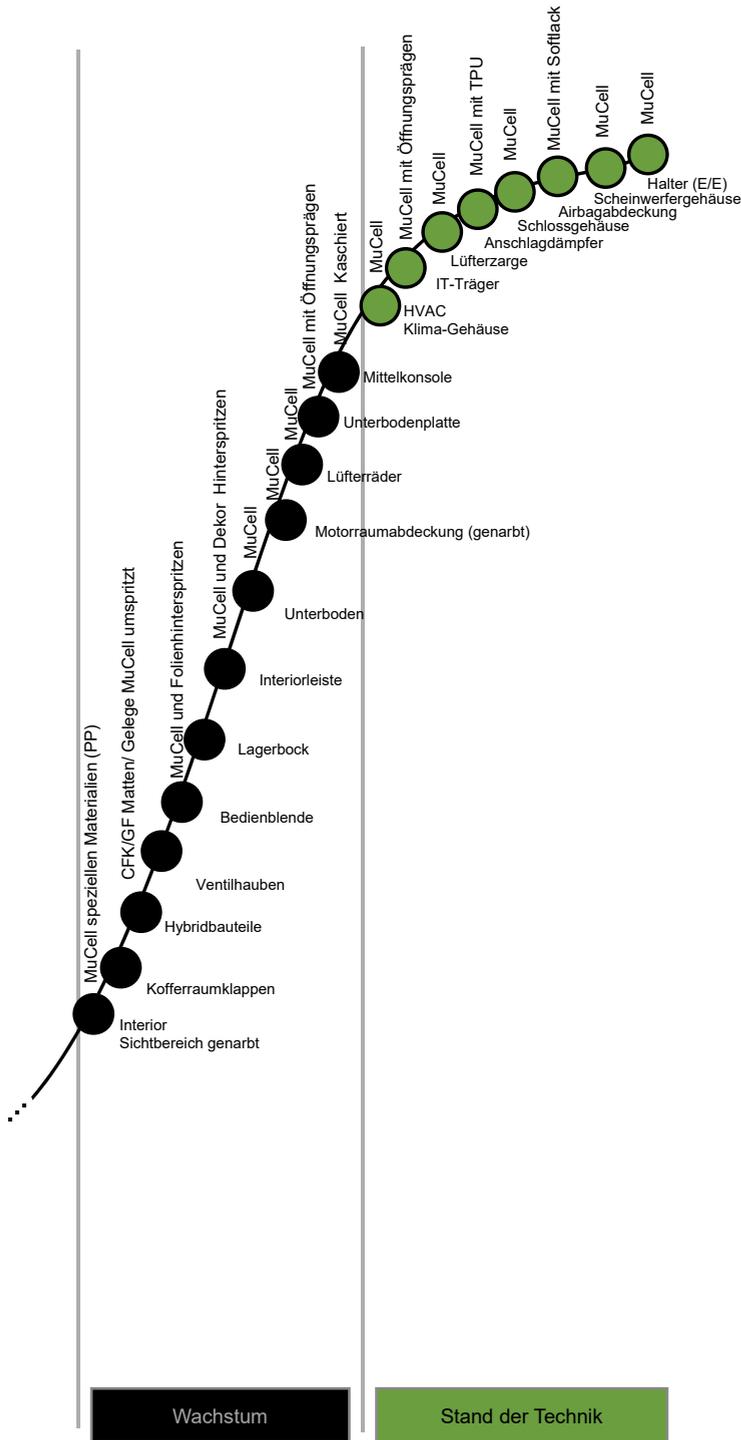


Bild 1.1 Entwicklungskurve MuCell® Automobil-Anwendungen [Bildquelle: Trexel GmbH]



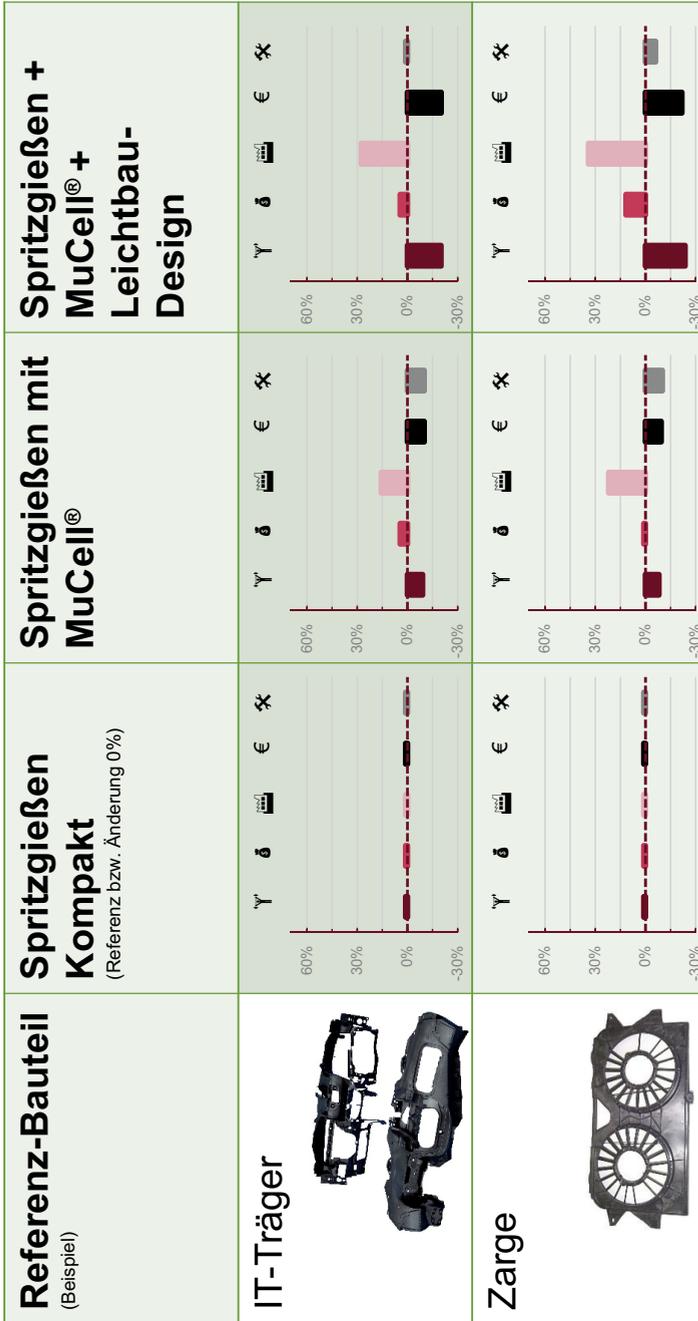
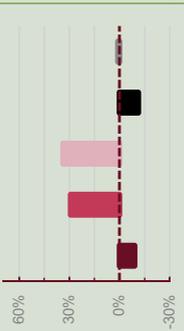
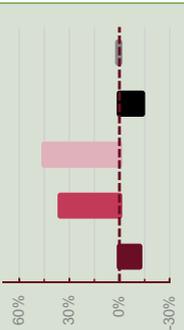
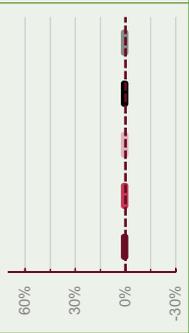
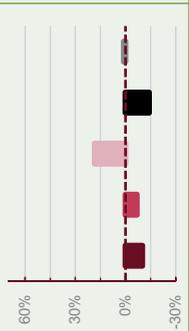
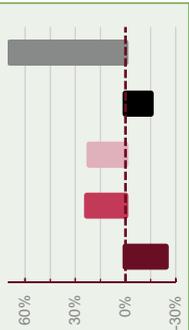


Bild 1.2 Vorteile als Stand der Technik bei TSG-Bauteilen [Bildquelle: Trexel GmbH]

| | | | |
|--|---|--|--|
| <p>Ölwanne</p>  |  |  |  |
| <p>Unterboden (Konzept mit Öffnungshub)</p>  |  |  |  |
| <p>Bemerkung</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
- € = Bauteilkosten¹⁾
- ✂ = mechanische Kern-Eigenschaft

1) 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 CO₂-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.

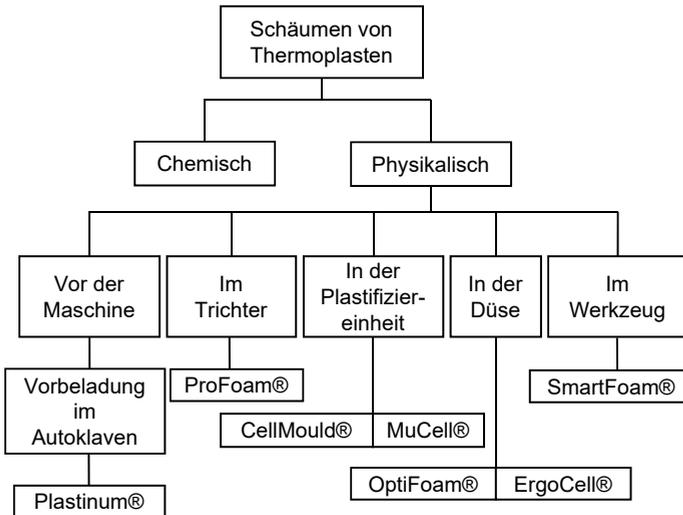


Bild 2.1 Übersicht der (zum Teil ehemals) kommerziell erhältlichen Verfahren zum Schäumen von Thermoplasten im Spritzgießen

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).

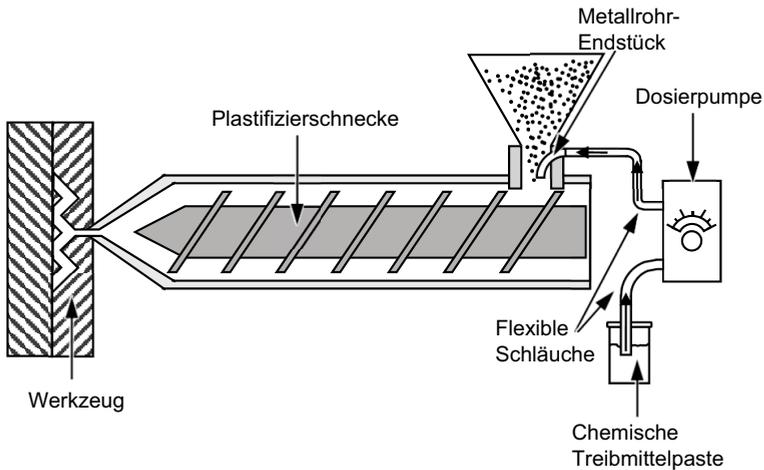


Bild 2.2 Dosiereinrichtung zur Dosierung flüssiger chemischer Treibmittel [3]

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 ₂ , H ₂ O, |
| Zitronensäure und deren Derivate | 190 – 230 | 90 – 130 | CO ₂ , H ₂ O |
| Azodicarbonamid (ADC) | 200 – 220 | 280 – 320 | CO ₂ , CO, N ₂ , (NH ₃) |
| Modifiziertes Azodicarbonamid | 150 – 190 | 220 – 300 | CO ₂ , CO, N ₂ , (NH ₃) |
| Toluolsulfonylhydrazid (TSH) | 110 – 140 | 120 – 140 | H ₂ O, N ₂ |
| Oxybis(benzolsulfohydrazid) (OBSh) | 155 – 160 | 120 – 150 | H ₂ O, N ₂ |
| 5-Phenyl-Tetrazol (5-PT) | 110 – 140 | 120 – 140 | H ₂ O, N ₂ |

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 CO₂, N₂ oder H₂O. 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*
CO₂-Bilanz *166*
CO₂-Fußabdruck *173, 206, 221*
CO₂-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[®]-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*