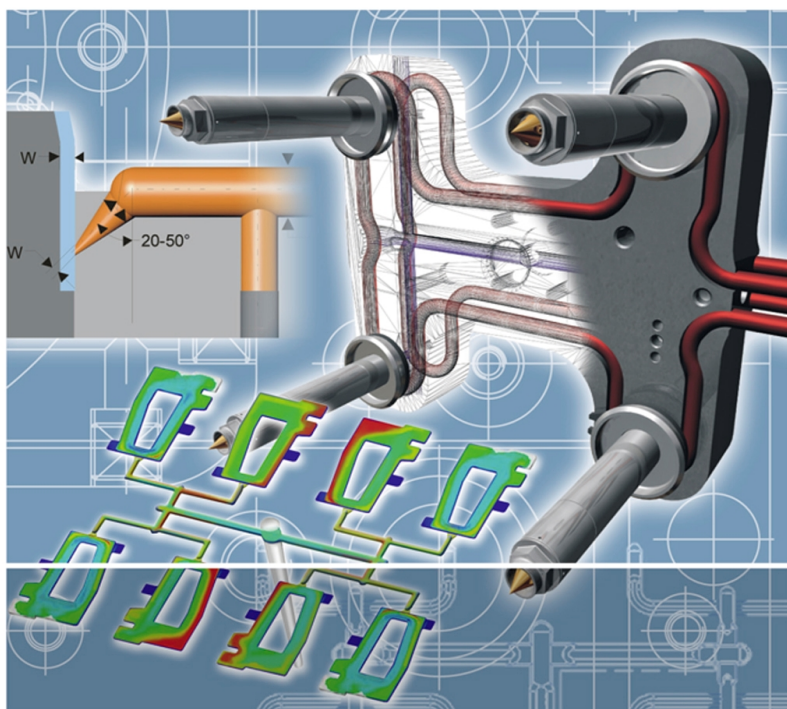


John P. Beaumont

# Auslegung von Anguss und Angusskanal

Spritzgießwerkzeuge erfolgreich einsetzen



2., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER



**bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**

## **Die Internet-Plattform für Entscheider!**

**Exklusiv:** Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

**Richtungsweisend:** Fach- und Brancheninformationen  
stets top-aktuell!

**Informativ:** News, wichtige Termine, Bookshop, neue  
Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

***Kunststoffe.de***

John P. Beaumont

# **Auslegung von Anguss und Angusskanal**

Spritzgießwerkzeuge erfolgreich einsetzen

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Der Autor:

*John P. Beaumont*

President, Beaumont Technologies Inc. ([www.beaumontinc.com](http://www.beaumontinc.com)); AIM Institute ([www.AIM.Institute](http://www.AIM.Institute))  
6100 West Ridge Road, Erie, PA 16506

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [<http://dnb.d-nb.de>](http://dnb.d-nb.de) abrufbar.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2020 Carl Hanser Verlag München

[www.hanserfachbuch.de](http://www.hanserfachbuch.de)

Lektorat: Ulrike Wittmann

Übersetzung: Dr.-Ing. Harald Sambale

Herstellung: Jörg Strohbach

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Coverrealisierung: Max Kostopoulos

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: Druckerei Hubert & Co GmbH und Co KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-46289-2

E-Book ISBN: 978-3-446-46425-4

# Inhalt

|                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Vorwort</b> .....                                                   | <b>XV</b>  |
| <b>Der Autor</b> .....                                                 | <b>XIX</b> |
| <b>1 Überblick über Angussysteme und Anschnittpositionierung</b> ..... | <b>1</b>   |
| 1.1 Angussysteme in der primären Trennebene .....                      | 1          |
| 1.2 Angussysteme in einer parallelen Trennebene .....                  | 2          |
| 1.2.1 Kaltkanalsysteme .....                                           | 2          |
| 1.2.2 Heißkanalsysteme .....                                           | 4          |
| 1.3 Kombinationen aus Heiß- und Kaltkanalsystemen .....                | 5          |
| 1.4 Gestaltung des Anschnitts .....                                    | 6          |
| <b>2 Rheologie und Fließverhalten im Spritzgießwerkzeug</b> .....      | <b>7</b>   |
| 2.1 Vergleich von laminarer und turbulenter Strömung .....             | 8          |
| 2.2 Quellströmung .....                                                | 10         |
| 2.3 Einflussfaktoren der Viskosität .....                              | 10         |
| 2.3.1 Viskositätsmodelle .....                                         | 12         |
| 2.3.2 Nicht-newtonsche Fluide .....                                    | 14         |
| 2.3.3 Temperatur .....                                                 | 17         |
| 2.3.4 Druck .....                                                      | 18         |
| 2.4 Kompressibilität der Schmelze .....                                | 18         |
| 2.5 Bestimmung der Fließeigenschaften der Schmelze .....               | 19         |
| 2.5.1 Schmelzindex (MFI) .....                                         | 19         |
| 2.5.2 Kapillar-Rheometer .....                                         | 20         |
| 2.5.3 Düsenrheometer .....                                             | 26         |
| 2.6 Fließverhalten einer Schmelze im Werkzeug .....                    | 27         |
| 2.6.1 Werkzeuge mit Fließspirale .....                                 | 27         |
| 2.6.2 Spritzgießsimulation .....                                       | 29         |
| 2.6.3 Moldometer .....                                                 | 31         |

|          |                                                                                                   |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3</b> | <b>Einfluss des Füll- und Verdichtungsvorgangs auf das Material und das Formteil .....</b>        | <b>35</b> |
| 3.1      | Einfluss der Verarbeitung auf das Fließverhalten des Materials .....                              | 35        |
| 3.1.1    | Thermisches Gleichgewicht der Schmelze – Wärmeverlust durch Wärmeleitung und Schererwärmung ..... | 35        |
| 3.1.2    | Entwicklung einer erstarrten Randschicht .....                                                    | 39        |
| 3.2      | Einflussfaktoren beim Materialabbau von Kunststoffen .....                                        | 44        |
| 3.2.1    | Übermäßige Scherbelastung .....                                                                   | 45        |
| 3.2.2    | Übermäßige Temperaturbelastung .....                                                              | 46        |
| 3.3      | Einfluss der Füllgeschwindigkeit auf den Fülldruck .....                                          | 49        |
| 3.4      | Nachdruck- oder Verdichtungsphase .....                                                           | 51        |
| 3.4.1    | Thermische Schwindung bei Abkühlen des Kunststoffs .....                                          | 51        |
| 3.4.2    | Ausgleich der volumetrischen Schwindung durch Kompensationsströmung .....                         | 52        |
| 3.4.3    | Druckverteilung während der Verdichtungsphase .....                                               | 53        |
| 3.4.4    | Einfrieren des Anschnitts .....                                                                   | 54        |
| 3.5      | Auswirkungen der Schmelzeströmung auf das Material und das Formteil ..                            | 55        |
| 3.5.1    | Schwindung .....                                                                                  | 55        |
| 3.5.1.1  | Volumenschwindung .....                                                                           | 55        |
| 3.5.1.2  | Schwindung durch Orientierung .....                                                               | 58        |
| 3.5.2    | Entwicklung von Eigenspannungen und Verzug .....                                                  | 62        |
| 3.5.2.1  | Verzug und Eigenspannungen durch ungleichmäßige Schwindung der Bauteilseiten .....                | 62        |
| 3.5.2.2  | Verzug und Eigenspannungen durch ungleichmäßige Schwindung in bestimmten Bereichen .....          | 63        |
| 3.5.2.3  | Verzug und Eigenspannungen durch ungleichmäßige Schwindung aufgrund von Orientierung .....        | 64        |
| 3.5.3    | Einfluss der Orientierung auf die physikalischen Eigenschaften ...                                | 65        |
| 3.6      | Tempern von Formteilen .....                                                                      | 65        |
| 3.7      | Zusammenfassung .....                                                                             | 66        |
| <b>4</b> | <b>Auswahl des Anspritzpunkts und Spritzgießstrategien .....</b>                                  | <b>69</b> |
| 4.1      | Überlegungen zur Auswahl des Anspritzpunkts .....                                                 | 69        |
| 4.2      | Gestaltungs- und Verfahrensrichtlinien für das Spritzgießen .....                                 | 71        |
| 4.2.1    | Bauteilgestaltung mit gleichbleibender Wanddicke .....                                            | 71        |
| 4.2.2    | Anwendung allgemeiner Richtlinien für die Gestaltung von Spritzgießteilen .....                   | 74        |
| 4.2.3    | Vermeidung der Schmelzeströmung aus dünnen Bereichen in dicke Bereiche .....                      | 75        |

|          |                                                                                                                        |            |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.4    | Aufbau eines einfachen Strömungsmusters in der Kavität .....                                                           | 76         |
| 4.2.5    | Vermeidung von Lufteinschlüssen .....                                                                                  | 81         |
| 4.2.6    | Filmscharniere .....                                                                                                   | 83         |
| 4.2.7    | Balancierte Füllung des Werkzeugs .....                                                                                | 86         |
| 4.2.7.1  | Lage des Anschnitts innerhalb einer Kavität .....                                                                      | 86         |
| 4.2.7.2  | Mehrfachwerkzeuge .....                                                                                                | 91         |
| 4.2.8    | Gleichmäßige Werkzeug- und Schmelzetemperaturen .....                                                                  | 94         |
| 4.2.9    | Vermeidung von Fließnähten .....                                                                                       | 95         |
| 4.2.10   | Vermeidung von Fließverzögerung .....                                                                                  | 97         |
| 4.2.11   | Begrenzung der Reibungswärme der Schmelze .....                                                                        | 98         |
| 4.2.12   | Minimierung des Volumens der Angusskanäle bei<br>Kaltkanalsystemen .....                                               | 99         |
| 4.2.13   | Vermeidung übermäßiger Scherung .....                                                                                  | 100        |
| 4.2.14   | Vermeidung übermäßiger Scherspannungen, Erzeugung<br>gleichmäßiger Scherspannungen .....                               | 102        |
| <b>5</b> | <b>Systeme zur Verteilung der Schmelze im Werkzeug .....</b>                                                           | <b>105</b> |
| 5.1      | Grundlagen für die Gestaltung von Fließkanälen .....                                                                   | 105        |
| 5.2      | Übersicht des Schmelzeverteilungssystems .....                                                                         | 106        |
| 5.2.1    | Maschinendüse .....                                                                                                    | 107        |
| 5.2.1.1  | Filterdüsen .....                                                                                                      | 108        |
| 5.2.1.2  | Statische Mischer .....                                                                                                | 109        |
| 5.2.2    | Angusskegel .....                                                                                                      | 109        |
| 5.2.3    | Angussverteiler .....                                                                                                  | 110        |
| 5.2.4    | Anschnitt .....                                                                                                        | 110        |
| 5.3      | Schmelzeströmung im Schmelzeverteilungssystem .....                                                                    | 110        |
| 5.3.1    | Aufbereitung der Schmelze in der Spritzgießmaschine .....                                                              | 110        |
| 5.3.1.1  | Druckaufbau durch die Spritzgießmaschine .....                                                                         | 111        |
| 5.3.1.2  | Strömung durch ein Angusssystem .....                                                                                  | 113        |
| 5.3.2    | Einfluss der Temperatur auf die Schmelzeströmung .....                                                                 | 114        |
| 5.3.2.1  | Temperatur der Schmelze .....                                                                                          | 114        |
| 5.3.2.2  | Werkzeugtemperatur .....                                                                                               | 116        |
| 5.3.3    | Vergleich von Kalt- und Heißkanalsystemen .....                                                                        | 116        |
| 5.3.4    | Druckverlust innerhalb des Schmelzeverteilungssystems<br>(Düse, Angusskegel, Angusskanal, Anschnitt und Kavität) ..... | 116        |
| 5.4      | Simulation des Füllvorgangs .....                                                                                      | 117        |
| 5.5      | Querschnitt des Angusssystems .....                                                                                    | 119        |
| 5.5.1    | Effizienz des Angusskanals .....                                                                                       | 119        |
| 5.5.2    | Druckverlauf im Angusssystem .....                                                                                     | 120        |
| 5.5.2.1  | Vergleich der Strömung in Heiß- und Kaltkanalsystemen .....                                                            | 124        |



|          |                                                                                                                                                   |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.5.3    | Einfluss des Angussystems auf die Zykluszeit .....                                                                                                | 125        |
| 5.5.3.1  | Kühlzeit des Kaltkanalsystems und des Angusskegels ...                                                                                            | 125        |
| 5.5.3.2  | Heißkanalsysteme .....                                                                                                                            | 125        |
| 5.5.4    | Gegenüberstellung von Angussystemen mit konstantem und<br>abgestuftem Durchmesser .....                                                           | 125        |
| 5.6      | Gestaltung des Angussystems für scher- und temperaturempfindliche<br>Materialien .....                                                            | 128        |
| 5.7      | Auslegung des Angussystems .....                                                                                                                  | 129        |
| 5.7.1    | Geometrisch balancierte Angussysteme .....                                                                                                        | 129        |
| 5.7.2    | Geometrisch nicht balancierte Angussysteme .....                                                                                                  | 132        |
| 5.7.3    | Vergleich des Angussystems mit Reihenanordnung mit dem<br>geometrisch balancierten Angussystem .....                                              | <b>133</b> |
| 5.7.3.1  | Fließwegverhältnis .....                                                                                                                          | 135        |
| 5.7.3.2  | Abweichungen der Schmelzeigenschaften in<br>unbalancierten Werkzeugen .....                                                                       | 136        |
| 5.7.3.3  | Künstliche Balancierung von Angussystemen .....                                                                                                   | 136        |
| 5.7.3.4  | Reduziert ein künstlich balanciertes Angussystem<br>das Angussvolumen? .....                                                                      | 139        |
| 5.7.4    | Familienwerkzeuge .....                                                                                                                           | 143        |
| <b>6</b> | <b>Ungleichmäßige Schmelzeigenschaften in Mehrfachwerkzeugen</b>                                                                                  | <b>145</b> |
| 6.1      | Ursachen für ungleichmäßige Füllung in Mehrkavitätenwerkzeugen .....                                                                              | 146        |
| 6.1.1    | Formteilabweichungen, die durch das Angussystem entstehen ...                                                                                     | 146        |
| 6.1.2    | Formteilabweichungen, die nicht durch die Auslegung<br>des Angussystems verursacht werden .....                                                   | 149        |
| 6.2      | Auswirkungen der Ungleichgewichte .....                                                                                                           | 153        |
| 6.2.1    | Künstliche Balancierung von Angussystemen .....                                                                                                   | 159        |
| 6.3      | Scherinduzierte Abweichungen durch geometrisch balancierte<br>Angussysteme .....                                                                  | 160        |
| 6.3.1    | Entstehung und Aufteilung abweichender Schmelzeigenschaften<br>in einem Angussystem .....                                                         | 161        |
| 6.3.2    | Formteilabweichungen durch ungleichmäßige Kavitätenfüllung<br>aufgrund der Aufteilung von Schmelzeschichten in verzweigten<br>Angussystemen ..... | 163        |
| 6.3.3    | Scherinduzierte Ungleichgewichte in der Schmelze in<br>Etagenwerkzeugen .....                                                                     | 168        |
| 6.3.4    | Entstehung von Abweichungen innerhalb einer Kavität und<br>Einfluss auf Eigenspannungen und Verzug .....                                          | 169        |
| 6.3.4.1  | Verzug .....                                                                                                                                      | 175        |
| 6.3.4.2  | Kernversatz .....                                                                                                                                 | 177        |

|          |                                                                                                          |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.3.4.3  | Auswirkungen auf konzentrische Teile .....                                                               | 179        |
| 6.3.5    | Alternative Theorien zur Ursache der Ungleichgewichte bei der<br>Formfüllung .....                       | 180        |
| 6.3.5.1  | Ungleichmäßige Werkzeugkühlung .....                                                                     | 181        |
| 6.3.5.2  | Werkzeugdurchbiegung .....                                                                               | 181        |
| 6.3.5.3  | Auswirkungen von Ecken an Fließkanalverzweigungen ..                                                     | 182        |
| 6.3.5.4  | Schmelzedruck als Ursache ungleichmäßiger Füllung ....                                                   | 185        |
| 6.4      | Auslegung von Angussystemen .....                                                                        | 185        |
| 6.4.1    | Bestimmung verschiedener Fließgruppen in geometrisch<br>balancierten Angussystemen .....                 | 185        |
| 6.4.2    | Scheinbar geometrisch balancierte Angussysteme .....                                                     | 188        |
| 6.5      | Auswirkungen scherinduzierter Abweichungen auf zweistufige<br>Spritzgießverfahren .....                  | 189        |
| 6.5.1    | Gas-Innendruck-Spritzgießen .....                                                                        | 189        |
| 6.5.2    | Zwei-Komponenten-Spritzgießen .....                                                                      | 192        |
| 6.5.3    | Spritzgießen von geschäumten Kunststoffen .....                                                          | 194        |
| 6.6      | Kosten durch ungleichmäßige Schmelzeigenschaften .....                                                   | 195        |
| <b>7</b> | <b>Erfolgreiches Spritzgießen trotz scherinduzierter Abweichungen<br/>der Schmelzeigenschaften .....</b> | <b>199</b> |
| 7.1      | Statische Mischer .....                                                                                  | 200        |
| 7.2      | Künstliche Balancierung .....                                                                            | 202        |
| 7.2.1    | Gleichmäßige Füllung durch Anpassung der Größen von<br>Fließkanälen und Anschnitten .....                | 202        |
| 7.2.2    | Gleichmäßige Füllung durch Anpassung der Temperaturen .....                                              | 203        |
| 7.3      | Schmelze-Rotations-Technik .....                                                                         | 204        |
| 7.3.1    | Schmelze-Rotations-Technik in Heißkanalwerkzeugen .....                                                  | 212        |
| 7.3.2    | Schmelze-Rotations-Technik in Kaltkanalwerkzeugen .....                                                  | 214        |
| 7.3.3    | Schmelze-Rotations-Technik bei Ungleichgewichten innerhalb<br>einer Kavität .....                        | 214        |
| 7.3.4    | Mehrachsige Symmetrien in der Schmelze .....                                                             | 216        |
| 7.3.5    | Verstellbares rheologisches Kontrollsystem (In-Mold Adjustable<br>Rheological Control, iMARC) .....      | 218        |
| 7.3.5.1  | 3D-Spritzgießen .....                                                                                    | 219        |
| 7.4      | Schmelze-Rotations-Technik zur Regelung zweistufiger Spritzgießverfahren                                 | 224        |
| 7.5      | Steuerung des Verzugs durch Schmelze-Rotations-Technik .....                                             | 226        |
| 7.5.1    | Entstehung des Verzugspotentials .....                                                                   | 229        |
| 7.5.2    | Kontrollierter Verzug durch Schmelze-Rotations-Technik .....                                             | 231        |
| 7.5.3    | Neue Anwendungen für das 3D-Molding .....                                                                | 234        |

|          |                                                                 |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------|------------|
| 7.6      | MeltFlipper Schmelze-Rotations-Technik .....                    | 235        |
| 7.6.1    | Wichtige Patentinformationen zum Thema MeltFlipper .....        | 235        |
| 7.6.2    | Schmelze-Rotation in Kaltkanalwerkzeugen .....                  | 236        |
| 7.6.3    | Schmelze-Rotation in Heißkanalwerkzeugen .....                  | 238        |
| 7.6.4    | Mehrachsiges Schmelzesymmetrie .....                            | 239        |
| 7.6.5    | Im Werkzeug einstellbare rheologische Regulierung (iMARCTM) ... | 241        |
| <b>8</b> | <b>Kaltkanalwerkzeuge .....</b>                                 | <b>245</b> |
| 8.1      | Angusskegel .....                                               | 247        |
| 8.1.1    | Kalter Angusskegel .....                                        | 247        |
| 8.1.2    | Heißer Angusskegel .....                                        | 253        |
| 8.2      | Kaltkanalsysteme .....                                          | 254        |
| 8.2.1    | Wichtige Überlegungen zur Bearbeitung des Kaltkanalsystems ...  | 256        |
| 8.2.2    | Dimensionierung von Fließkanälen .....                          | 257        |
| 8.2.3    | Entlüftung .....                                                | 258        |
| 8.2.4    | Auswerfen des Angussystems .....                                | 258        |
| 8.2.4.1  | Angusszieher .....                                              | 258        |
| 8.2.4.2  | Sekundäre Angusskegel .....                                     | 259        |
| 8.2.4.3  | Angusskanäle .....                                              | 260        |
| 8.2.5    | Pfropfenfänger .....                                            | 261        |
| 8.3      | Angussysteme für Dreiplattenwerkzeuge mit Kaltkanalsystem ..... | 262        |
| 8.4      | Anschnittgestaltung .....                                       | 267        |
| 8.4.1    | Stangenanguss .....                                             | 268        |
| 8.4.2    | Seitenanschnitt .....                                           | 269        |
| 8.4.3    | Bandanschnitt .....                                             | 270        |
| 8.4.4    | Filmanschnitt .....                                             | 272        |
| 8.4.5    | Ringanschnitt .....                                             | 273        |
| 8.4.6    | Schirmanschnitt .....                                           | 274        |
| 8.4.7    | Tunnelanschnitt .....                                           | 276        |
| 8.4.8    | Gebogener Tunnelanschnitt .....                                 | 278        |
| 8.4.9    | Innen liegender Tunnelanschnitt .....                           | 280        |
| 8.4.10   | Punktanschnitt .....                                            | 280        |
| 8.4.11   | Meißelförmiger Anschnitt .....                                  | 281        |
| 8.4.12   | Anschnitt mit Überlauf .....                                    | 281        |
| 8.5      | Einfluss des Anschnittdurchmessers bei Mehrfachwerkzeugen ..... | 282        |
| 8.5.1    | Untersuchung 1 .....                                            | 282        |
| 8.5.2    | Untersuchung 2 .....                                            | 283        |
| 8.5.3    | Messtoleranzen .....                                            | 286        |

|           |                                                           |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------|------------|
| <b>9</b>  | <b>Heißkanalwerkzeuge</b>                                 | <b>291</b> |
| 9.1       | Übersicht                                                 | 291        |
| 9.1.1     | Vor- und Nachteile von Heißkanalsystemen                  | 292        |
| 9.1.1.1   | Vorteile von Heißkanalsystemen                            | 292        |
| 9.1.1.2   | Nachteile von Heißkanalsystemen                           | 294        |
| 9.1.1.3   | Zusammenfassung der Merkmale verschiedener Angussysteme   | 296        |
| 9.2       | Vergleich der Heißkanalsysteme für Mehrfachwerkzeuge      | 297        |
| 9.2.1     | Außenbeheizung von Verteiler und Düsen                    | 298        |
| 9.2.2     | Extern beheizter Verteiler mit innenbeheizter Düse        | 299        |
| 9.2.3     | Innenbeheizung von Verteiler und Düse                     | 301        |
| 9.2.4     | Isoliertes Verteiler- und Düsensystem                     | 302        |
| 9.3       | Etagenwerkzeuge                                           | 303        |
| <b>10</b> | <b>Gestaltung des Fließkanals bei Heißkanalsystemen</b>   | <b>307</b> |
| 10.1      | Gestaltungsregeln für balanciertes Spritzgießen           | 308        |
| 10.2      | Querschnittsform                                          | 310        |
| 10.3      | Ecken                                                     | 311        |
| 10.3.1    | Gebohrte Fließkanäle                                      | 311        |
| 10.3.2    | Einarbeitung von Fließkanälen in zwei Platten             | 313        |
| 10.4      | Einfluss des Durchmessers                                 | 313        |
| 10.4.1    | Druck                                                     | 313        |
| 10.4.2    | Regelung des Einspritzvorgangs                            | 316        |
| 10.4.3    | Farbwechsel                                               | 317        |
| 10.4.4    | Materialwechsel                                           | 321        |
| <b>11</b> | <b>Düsen und Anschnitte für Heißkanalsysteme</b>          | <b>323</b> |
| 11.1      | Heißkanaldüsen                                            | 324        |
| 11.1.1    | Außenbeheizte Düsen                                       | 325        |
| 11.1.2    | Innenbeheizte Düsen                                       | 326        |
| 11.1.3    | Wärmeleitende Düsen                                       | 327        |
| 11.2      | Punktanschnitte                                           | 328        |
| 11.3      | Überlegungen zur Gestaltung des Anschnitts                | 331        |
| 11.3.1    | Einfrieren des Anschnitts                                 | 331        |
| 11.3.2    | Fadenbildung und Nachtropfen                              | 332        |
| 11.3.3    | Verdichtung                                               | 332        |
| 11.3.4    | Düsenspitzen für thermische Anschnitte in Heißkanalsystem | 334        |
| 11.3.4.1  | Offene Düsenspitzen                                       | 335        |
| 11.3.4.2  | Torpedodüsen                                              | 337        |

|           |                                                                                |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 11.3.5    | Düsen mit mechanischem Verschluss .....                                        | 338        |
| 11.3.5.1  | Fließeinschränkungen in Nadelverschlussdüsen .....                             | 341        |
| 11.3.5.2  | Sequentielle Nadelverschlussdüsen .....                                        | 343        |
| 11.3.5.3  | Steuerung der Bewegung der Ventlnadel beim<br>sequentiellen Spritzgießen ..... | 345        |
| 11.3.6    | Anschnitte mit thermischem Verschluss .....                                    | 351        |
| 11.3.7    | Heiße Seitenanschnitt .....                                                    | 352        |
| 11.3.8    | Düsen mit mehreren Spitzen .....                                               | 353        |
| 11.4      | Besondere Düsenanordnungen .....                                               | 354        |
| <b>12</b> | <b>Thermische Auslegung von Heißkanalsystemen .....</b>                        | <b>357</b> |
| 12.1      | Heizelemente .....                                                             | 357        |
| 12.1.1    | Heizwendeln .....                                                              | 358        |
| 12.1.2    | Heizbänder .....                                                               | 359        |
| 12.1.3    | Rohrheizkörper .....                                                           | 359        |
| 12.1.4    | Heizpatronen .....                                                             | 360        |
| 12.1.5    | Wärmerohr-Technik .....                                                        | 361        |
| 12.2      | Temperaturregelung .....                                                       | 362        |
| 12.2.1    | Thermoelemente .....                                                           | 362        |
| 12.2.2    | Temperaturregler .....                                                         | 363        |
| 12.3      | Leistungsbedarf .....                                                          | 364        |
| 12.4      | Thermische Isolation von Heißkanalsystemen .....                               | 365        |
| 12.5      | Temperaturregelung am Anschnitt .....                                          | 369        |
| 12.5.1    | Anschnittheizung .....                                                         | 371        |
| 12.5.2    | Anschnittkühlung .....                                                         | 371        |
| <b>13</b> | <b>Mechanische Aspekte beim Betrieb von Heißkanalsystemen .....</b>            | <b>373</b> |
| 13.1      | Montage und Leckage .....                                                      | 373        |
| 13.1.1    | Auslegung des Systems .....                                                    | 375        |
| 13.1.2    | Bearbeitung und Montage von Heißkanalsystemen .....                            | 380        |
| 13.2      | Verformung des Werkzeugs und der Maschine .....                                | 385        |
| 13.3      | Vorgehensweisen bei der Inbetriebnahme .....                                   | 388        |
| 13.4      | Farb- und Materialwechsel .....                                                | 388        |
| 13.5      | Anschnitte .....                                                               | 389        |
| 13.5.1    | Angussrest .....                                                               | 390        |
| 13.5.2    | Verstopfung .....                                                              | 390        |
| 13.5.3    | Verschleiß .....                                                               | 390        |
| 13.6      | Wartung .....                                                                  | 391        |

|           |                                                                                    |            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>14</b> | <b>Vorgehensweise bei der Gestaltung des Angusssystems – Zusammenfassung .....</b> | <b>393</b> |
| 14.1      | Anzahl der Anschnitte .....                                                        | 393        |
| 14.2      | Position des Anschnitts am Bauteil .....                                           | 393        |
| 14.2.1    | Ästhetik .....                                                                     | 393        |
| 14.2.2    | Einfluss auf Schwindung, Verzug und Eigenspannungen .....                          | 394        |
| 14.2.2.1  | Orientierung .....                                                                 | 394        |
| 14.2.2.2  | Volumenschwindung in einzelnen Bauteilbereichen .....                              | 394        |
| 14.2.2.3  | Ungleichmäßige Füllung .....                                                       | 395        |
| 14.2.3    | Strukturelle Aspekte .....                                                         | 395        |
| 14.2.3.1  | Spannungen im Anschnittbereich .....                                               | 395        |
| 14.2.3.2  | Fließorientierung .....                                                            | 396        |
| 14.2.4    | Anspritzen an schwer zugänglichen Stellen .....                                    | 396        |
| 14.3      | Anordnung der Kavität .....                                                        | 396        |
| 14.4      | Material .....                                                                     | 397        |
| 14.5      | Freistrahlbildung .....                                                            | 397        |
| 14.6      | Dicke und dünne Bereiche des Spritzgießteils .....                                 | 397        |
| 14.6.1    | Volumenschwindung .....                                                            | 397        |
| 14.6.2    | Fließverzögerung .....                                                             | 398        |
| 14.7      | Anzahl der Kavitäten .....                                                         | 398        |
| 14.8      | Produktionszahlen .....                                                            | 398        |
| 14.9      | Präzisionsspritzgießen .....                                                       | 398        |
| 14.10     | Farbwechsel .....                                                                  | 399        |
| 14.11     | Materialwechsel .....                                                              | 399        |
| 14.12     | Einmahlen von Angüssen .....                                                       | 400        |
| 14.13     | Dicke der Spritzgießteile .....                                                    | 400        |
| 14.13.1   | Dünnwandige Spritzgießteile .....                                                  | 400        |
| 14.13.2   | Dickwandige Spritzgießteile .....                                                  | 400        |
| 14.14     | Größe des Spritzgießteils .....                                                    | 401        |
| 14.15     | Erfahrung der Mitarbeiter .....                                                    | 401        |
| 14.16     | Handhabung nach dem Spritzgießen .....                                             | 401        |
| 14.17     | Spannungsprobleme im Bauteil und im Anschnitt .....                                | 402        |
| 14.18     | Kombination von Heißkanal- und Kaltkanalsystemen .....                             | 402        |
| 14.19     | Zweistufige Spritzgießverfahren .....                                              | 402        |

|           |                                                                                      |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>15</b> | <b>Fehlerbehebung</b>                                                                | <b>403</b> |
| 15.1      | Diagnose der Strömungsgruppen                                                        | 403        |
| 15.1.1    | Scherinduzierte Ungleichgewichte in geometrisch<br>balancierten Angussystemen        | 404        |
| 15.1.2    | Abweichungen im Werkzeug                                                             | 405        |
| 15.1.3    | Kühlwirkung                                                                          | 405        |
| 15.1.4    | Heißkanalsysteme                                                                     | 406        |
| 15.1.5    | Zusammenfassung der Versuchsergebnisse                                               | 406        |
| 15.1.6    | Anwendung der Diagnose der Strömungsgruppen                                          | 407        |
| 15.2      | Leitlinien zur Problembehandlung beim Spritzgießen                                   | 410        |
| 15.3      | Prozessentwicklung beim Spritzgießen                                                 | 448        |
| 15.3.1    | Der Spritzgießprozess                                                                | 449        |
| 15.3.1.1  | Werkzeugkühlung                                                                      | 449        |
| 15.3.1.2  | Schließeinheit – Anfangseinstellungen                                                | 451        |
| 15.3.1.3  | Spritzeinheit – Anfangseinstellungen                                                 | 453        |
| 15.3.1.4  | Füllzeit-Scan – Bestimmung des Volumenstroms                                         | 455        |
| 15.3.1.5  | Verdichtungs-Scans – Bestimmung des Verdichtungs-<br>drucks und der Verdichtungszeit | 462        |
| 15.3.1.6  | Bestimmung des Schmelzepolsters, der Kühlzeit<br>und der Zykluszeit                  | 467        |
| 15.3.2    | Prozessüberwachung und Prozessdokumentation                                          | 469        |
| 15.4      | Liste amorpher und teilkristalliner Kunststoffe                                      | 474        |
|           | <b>Index</b>                                                                         | <b>477</b> |

# Vorwort

Qualitätsmanagement-Methoden wie Six Sigma legen großen Wert darauf, Grundlagen kritisch zu überprüfen, um mögliche Probleme zu identifizieren und zu eliminieren, bevor sie den Herstellungsprozess negativ beeinflussen. Bei der Werkzeuggestaltung zur Herstellung eines spritzgegossenen Kunststoffteils ist das Angusssystem eine der wichtigsten und einflussreichsten Komponenten. Es zeigt sich jedoch auch, dass das Angusssystem wahrscheinlich die am häufigsten unterschätzte und missverstandene Komponente des Spritzgießwerkzeugs ist. Daher sollten gerade qualitätsbewusste Kunststoffverarbeiter das Angusssystem kritisch überprüfen.

Das Angusssystem beginnt mit der Düse der Spritzgießmaschine und setzt seinen Weg durch das Werkzeug fort durch den Anguskegel, die Anguskanäle und den Anschnitt. Zwar befindet sich die Schmelze nur für Sekundenbruchteile in diesen Strömungskanälen. Dennoch herrschen dort extremere Bedingungen als bei fast allen anderen Kunststoffverarbeitungsvorgängen. Die Schergeschwindigkeit im Anschnitt liegt häufig über  $100\,000\text{ s}^{-1}$  und örtlich begrenzt können die Schmelztemperaturen in stark gescherten Schichten plötzlich um  $200\text{ °C}$  ansteigen, mit einer Geschwindigkeit von über  $1000\text{ °C/s}$  pro Sekunde. Die Auswirkungen dieser extremen Bedingungen auf die Schmelze sind noch nicht eindeutig geklärt. Die meisten Methoden zur Bestimmung der Werkstoffeigenschaften sind nicht einmal annähernd in der Lage, das Verhalten der Schmelze unter diesen extremen Bedingungen zu bestimmen. Die Viskosität in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit wird in der Regel bei Schergeschwindigkeiten von maximal  $10\,000\text{ s}^{-1}$  gemessen, DSC-Daten bei weniger als  $32\text{ °C/min}$ . und  $pVT$ -Daten bei weniger als  $3\text{ °C/min}$ . Die Einschränkungen bei der Bestimmung der Werkstoffeigenschaften sowie Schwierigkeiten bei der Modellierung führen dazu, dass Simulationsprogramme für den Spritzgieß- und Strömungsprozess immer noch Probleme haben, die extrem inhomogenen asymmetrischen Schmelzeigenschaften genau vorherzusagen, die in einer Verzweigung eines Fließkanals entstehen. Die Herausforderung, mit diesen Bedingungen richtig umzugehen, wurde allgemein unterschätzt.

Die Einflüsse dieser extremen Schmelzebedingungen im Fließkanal werden gerade erst erforscht. Eine der wichtigsten Erkenntnisse ist, dass die Kombination aus laminarer Strömung und hoher Scherung im Randbereich des Fließkanals zu extrem inhomogenen Schmelzeigenschaften führt. Die Schmelztemperatur kann um  $200\text{ °C}$  abweichen, die Viskositäten in der Mitte und am Rand des Strömungskanals können um den Faktor 100 auseinander liegen. Dies führt zu signifikant asymmetrischen Schmelzeigenschaften, wenn die Schmelze durch eine Verzweigung im Angusssystem oder in die Kavität fließt. Die Schmelzeigenschaften, die im Fließkanal entstanden sind, verschlechtern das Füllverhalten und die mechanischen



Eigenschaften, die Schrumpfung und das Verzugsverhalten. Diese Faktoren sind in der Spritzgießindustrie kaum bekannt und ihre dramatischen Auswirkungen werden selten richtig eingeschätzt. Der Einfluss kann bei zweistufigen Injektionsverfahren wie der Gasinjektionstechnik, der Mehrkomponententechnik oder dem MuCell-Verfahren besonders deutlich auftreten.

Wie bereits erwähnt, besteht das Angussssystem aus der Düse, der Spritzgießmaschine, dem Angusskegel, den Angusskanälen und dem Anschnitt. Jede dieser Komponenten kann einen wesentlichen Einfluss sowohl auf den Prozess als auch auf das Formteil haben. Zu den beeinflussten Prozessparametern gehören das Füll- und Verdichtungsverhalten, die Einspritzgeschwindigkeit, die Schließkraft und Zykluszeit. Zu den Auswirkungen auf das Teil gehören Größe, Gewicht, mechanische Eigenschaften und Unterschiede in diesen Merkmalen zwischen Teilen, die in verschiedenen Kavitäten eines Mehrfachwerkzeugs hergestellt werden.

Obwohl das Angussssystem einen erheblichen Einfluss auf den Spritzgießprozess hat, werden seine Komponenten in der Regel mangelhaft gestaltet im Vergleich zum Zeit- und Kostenaufwand, der für andere Komponenten eines Werkzeugs oder einer Spritzgießmaschine betrieben wird. Dieses Buch schließt die Lücke, die entstanden ist, weil andere Veröffentlichungen auf dem Gebiet des Spritzgießens in der Regel nur kurz auf die Gestaltung des Angusssystems und dessen Bedeutung eingehen. Insbesondere muss angesprochen werden, dass Informationen über Kaltkanäle fehlen. Über Heißkanalsysteme sind zwar recht viele Informationen verfügbar, diese sind jedoch in der Regel stark durch die Sichtweise der Unternehmen, die diese Systeme verkaufen, beeinflusst. Es gibt über 50 kommerzielle Anbieter von Heißkanalsystemen, aber kein einziges Unternehmen, das Kaltkanalsysteme anbietet. Dies führt dazu, dass Kaltkanalsysteme meistens eher als uninteressant dargestellt werden.

Als Beweis für das mangelnde Verständnis für Angussysteme kann gelten, dass die erheblichen Auswirkungen der scherinduzierten Ungleichgewichte beim Schmelzefluss durch das Angussystem nicht dokumentiert oder eindeutig geklärt waren, als ich im Jahr 1997 den ersten Zeitschriftenartikel über dieses Phänomen veröffentlichte. Zum ersten Mal wurde es offensichtlich, dass als „natürlich balanciert“ bezeichnete Angussysteme erhebliche Ungleichgewichte verursachen. Es stellte sich heraus, dass in den meisten geometrisch balancierten Angussystemen Ungleichgewichte im Füllvorgang auftreten. Nahezu die gesamte Spritzgießindustrie hatte dieses Phänomen sowohl bei Kalt- als auch bei Heißkanalwerkzeugen übersehen. Darüber hinaus berücksichtigten die branchenüblichen Software-Programme zur Füllsimulation die scherinduzierten Ungleichgewichte nicht. Daher vermittelten sie den Anwendern den falschen Eindruck, dass diese Angussysteme einheitliche Schmelze-, Füll- und Verdichtungsbedingungen gewährleisten. Das Problem existiert heute immer noch und sollte bei der Verwendung von Analyse-Programmen berücksichtigt werden.

Von besonderem Interesse ist die Entwicklung, das Angussystem nicht nur als notwendige Verbindung zwischen Spritzeinheit und der Werkzeugkavität zu betrachten, sondern als wesentliches Instrument des Verarbeitungsprozesses. Neuartige Methoden der Schmelzerotation wie MeltFlipper® und iMARC™ führen zum Konzept des 3D-Spritzgießens.

Dieses Buch liefert eine unabhängige Betrachtung von Heiß- und Kaltkanalsystemen, ohne ein Urteil zu fällen, welches System sich am besten für eine bestimmte Anwendung eignet. Stattdessen behandelt es die entscheidenden Fragen zur Auslegung. Die *ersten Kapitel* schaffen eine Grundlage für die Gestaltung von Angussystemen durch Erläuterung der rheologischen Eigenschaften der Kunststoffschmelze. Darüber hinaus wird der Einfluss der Gestaltung des Angussystems und der Anschnittposition auf das Formteil beschrieben. *Kapitel 4*

beschreibt wichtige Strategien für die Gestaltung des Angussystems und der Anschnittposition, die entscheidend für das erfolgreiche Spritzgießen sind. *Kapitel 5* gibt einen Überblick über das gesamte Schmelzeversorgungssystem, während in *Kapitel 6 und 7* die Entstehung scherinduzierter Ungleichgewichte und Lösungen dafür beschrieben werden. Die *Kapitel 5, 6 und 7* behandeln Fragen, die sowohl für Heiß- und Kaltkanalsystemen gelten. Dabei werden grundlegende Probleme der Fließkanalgeometrie mit der Schmelzerheologie verknüpft. *Kapitel 8* konzentriert sich auf die Gestaltung von Kaltkanalsystemen einschließlich spezieller Leitlinien für Fließkanäle und eine Vielzahl von Gestaltungsmöglichkeiten für Anschnitte. In den *Kapiteln 9 bis 13* werden die Gestaltung von Heißkanal-Systemen und deren einzigartige Fähigkeiten und Herausforderungen genau betrachtet. *Kapitel 14* gibt einen Überblick über den Prozess der Gestaltung und der Auswahl eines Angussystems. Das letzte Kapitel bietet einen umfangreichen Leitfaden zur Fehlerbehebung mit Beiträgen von John Bozzelli und David Hoffman.

Diese zweite Auflage enthält in allen 15 Kapiteln zahlreiche Aktualisierungen und neue Abbildungen. Die *Kapitel 6 und 7* enthalten zusätzliche Informationen und Beispiele zum besseren Verständnis der entscheidenden scherbedingten Schmelzeschwankungen, die in den Angussystemen aller Spritzgießwerkzeuge auftreten. Autodesk Moldflow-Analysen und damit verbundene Erläuterungen wurden hinzugefügt, um die Komplexität dieses Phänomens besser zu verstehen. In den *Kapiteln 9 bis 12* werden sämtliche Aspekte von Heißkanalsystemen behandelt, einschließlich der Auslegung von Verteilerblöcken, Düsen, Düsen spitzen, Nadelverschlusssdüsen und der Betätigung von Nadelverschlüssen. Der *Abschnitt 15.3* „Prozessentwicklung beim Spritzgießen“ wurde von Dave Hoffman vom American Injection Molding Institute (AIM Institute) verfasst und neu hinzugefügt.

Dieses Buch soll dem Leser helfen, ein besseres Verständnis für die entscheidende Rolle zu entwickeln, die das Angussystem beim Spritzgießen spielt. Es ist zu hoffen, dass dieses Verständnis dazu führt, dass Werkzeuge schneller in Betrieb genommen werden können, dass sich die Produktqualität verbessert, die Produktivität steigt, die Kundenzufriedenheit sich erhöht und Qualitätsziele eingehalten werden können.

## Danksagungen

Zuallererst möchte ich meiner Frau Betty danken, die meine verschiedene beruflichen Bestrebungen, zu denen auch dieses Buch gehört, im Laufe vieler gemeinsamer Jahre mit unendlicher Geduld unterstützt hat.

Weiterhin gelten mein Dank und meine Anerkennung John Bozzelli, Dave Hoffman und John Kleese, die direkt oder indirekt zu den Inhalten dieses Buchs beigetragen haben. Zuerst möchte ich John Bozzelli (Injection Molding Solutions) und Dave Hoffman (American Injection Molding Institute) für ihre herausragenden Beiträge im Kapitel 15 danken. Der Beitrag von John Bozzelli, ein umfangreicher Leitfaden zur Fehlerbehebung, enthält eine Fülle von Informationen, die auf seiner langjährigen internationalen Erfahrung beruhen. Dave Hoffmans Beitrag „Prozessentwicklung beim Spritzgießen“ bietet einen praktischen Leitfaden für die Ersteinrichtung eines Spritzgießprozesses. Darüber hinaus enthält der Teil dieses Buches, der sich Heißkanalsystemen widmet, Material von John Klees (ehemals Klees Enterprise). Für seine Bereitschaft, diese Informationen zur Verfügung zu stellen, bin ich sehr dankbar.

Darüber hinaus möchte ich mich bei den ehemaligen Studenten bedanken, die bei der Recherche, der Bearbeitung und den Darstellungen in diesem Buch geholfen haben. Mein besonderer Dank geht an Scott Cleveland, Amanda Neely, Mason Myers und Kory Slye sowie an meinen Sohn Alex Beaumont. Ferner bedanke ich mich bei den Unternehmen Incoe und Husky, die sowohl technische Informationen als auch eine Reihe von Bildern zu den Kapiteln über Heißkanalsysteme in diesem Buch beigetragen haben.

März 2020, John Beaumont

## Der Autor

John Beaumont ist Gründer und Geschäftsführer von *Beaumont Technologies* und des *American Injection Molding-Instituts*. Im Jahr 2015 wurde er in die *Plastics Hall of Fame* aufgenommen. Seine früheren Verdienste in der Industrie waren in Positionen als technischer Manager für die Firma *Moldflow US* und leitender Ingenieur für *Ciba Vision Corporation*. John Beaumont ist auch Professor Emeritus an der *Penn State University* welcher er 1989 beitrug, um das *Plastics Engineering Technology*-Programm zu unterstützen. Er hat eine Reihe an Patenten die die Industrie beeinflusst haben erfunden. Am meisten bekannt einige Patente die in Beziehung zu *In-mold Rheological Control*-Methoden stehen; bekannt als *Melt-Flipper®* und *Thermaflo™*, welche Methoden für die Zuordnung der Spritzgieß-Parameter eines Polymers umfassen. Er ist Autor mehrerer Bücher über Spritzgießen, als auch einiger Forschungsarbeiten. John Beaumont war ebenso der Gründer und Direktor des *Plastics CAE Centers* an der *Penn State University*, ist ein Mitglied der *Plastics Pioneers* und ein *SPE* Anhänger.





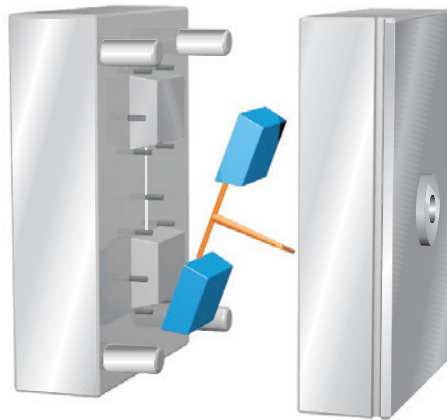
# Überblick über Angusssysteme und Anschnittpositionierung

In vielen Fällen hängt die Anschnittposition von der Werkzeuggestaltung ab. Idealerweise sollte die Anschnittposition jedoch so festgelegt werden, dass sie den Anforderungen des Spritzgießbauteils entspricht. Anschließend sollte das Werkzeug so ausgelegt werden, dass die gewünschte Anschnittposition realisiert werden kann. Der Anspritzpunkt und die Auslegung des Anschnitts werden entscheidend davon beeinflusst, ob der Angusskanal entlang der primären Trennebene des Werkzeugs (also der Trennebene, in der sich die Kavität befindet) verläuft oder nicht.

Dieses Kapitel liefert nur eine kurze Einführung zu den grundlegenden Arten von Angusskanälen und deren Einfluss auf die Gestaltung und die Positionierung des Anschnitts. Einzelheiten dazu werden in den folgenden Kapiteln dieses Buches dargestellt.

## ■ 1.1 Angusssysteme in der primären Trennebene

In der Kunststoffindustrie herrschen Werkzeuge vor, bei denen sowohl das Angusssystem als auch die Kavität in der primären Trennebene liegen. An der primären Trennebene öffnet sich das Werkzeug, um das spritzgegossene Bauteil und den Anguss zu entformen. In Zweiplattenwerkzeugen befinden sich die Angusskanäle in der primären Trennebene. Das Material, das sich im Angusssystem befindet, wird in jedem Spritzgießzyklus abgekühlt und aus dem Werkzeug ausgeworfen. Die Kunststoffschmelze wird durch das Angusssystem und den Anschnitt in die Kavität eingespritzt. Anschließend wird die Schmelze im Werkzeug abgekühlt. Sobald das Material erstarrt, öffnet sich das Werkzeug und der Anguss und das Bauteil werden an der primären Trennebene entformt. Das Bild 1.1 zeigt die Lage des Angusssystems innerhalb des Werkzeugs und den Auswerfvorgang in der primären Trennebene. Zu beachten ist, dass das Bauteil und der Anguss in der gleichen Trennebene geformt und ausgeworfen werden.



**Bild 1.1** Geöffnetes Zweiplatten-Werkzeug, während die Formteile und der Anguss ausgeworfen werden

Nachdem das Formteil und der Anguss ausgeworfen sind, schließt sich das Werkzeug wieder. Dabei bildet sich ein Fließkanal, der von der Maschinendüse bis zur Kavität verläuft. Da dieser Fließkanal sich in der gleichen Trennebene wie die Kavität befindet, kann das Spritzgießteil nur am Rand angespritzt werden. Bei Tunnelanschnitten befindet sich der Anspritzpunkt in geringem Abstand vom Bauteilrand (siehe Abschnitt 8.4.7).

## ■ 1.2 Angussysteme in einer parallelen Trennebene

Eine zweite Möglichkeit besteht darin, dass das Angussystem nicht in der Trennebene des Werkzeugs, sondern parallel dazu verläuft. Diese Angussysteme können in Kaltkanal- oder Heißkanalwerkzeugen verwendet werden.

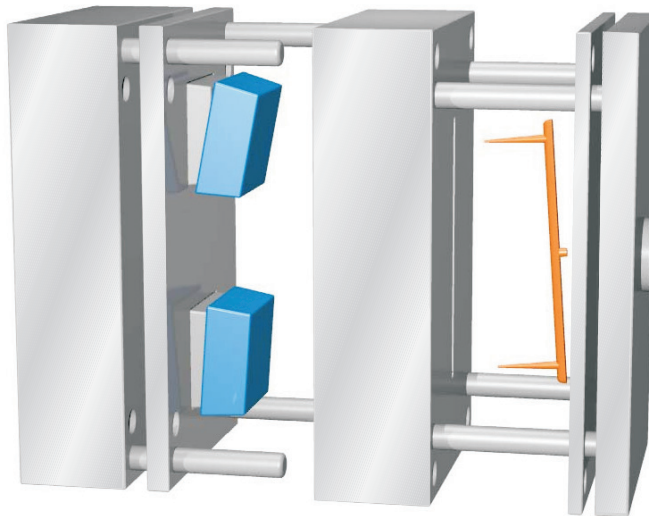
### 1.2.1 Kaltkanalsysteme

In einem Dreiplatten-Kaltkanalwerkzeug verläuft der Angusskanal in einer zweiten Trennebene, also außerhalb der Trennebene, in der das Spritzgießbauteil geformt wird. Die beiden Trennebenen liegen parallel zueinander und werden durch eine oder mehrere Werkzeugplatten voneinander getrennt. Der Angusskanal und die Kavität werden durch einen sekundären Angusskegel verbunden. Der sekundäre Angusskegel durchquert die Werkzeugplatte und verbindet die Kavität mit einem Anschnitt. Sekundärverteiler sind normalerweise parallel zur Öffnungsrichtung des Werkzeugs und im rechten Winkel zum Angusskanal angeordnet.



**Bild 1.2** Dreiplatten-Kaltkanalwerkzeug mit sekundärem Angusskegel, der die Kavitäten mit Schmelze versorgt

Während des Spritzgießens erstarrt die Schmelze im Angusskanal und in der Kavität. Anschließend öffnet sich das Werkzeug an beiden Trennebenen. Das Bauteil wird an der primären Trennebene ausgeworfen, der Angusskanal (mit Sekundärverteiler und Anguss) wird an der zweiten Trennebene ausgeworfen (siehe Bild 1.3).



**Bild 1.3** Geöffnetes Dreiplatten-Kaltkanalwerkzeug; die Formteile werden an der ersten Trennebene, der Anguss an der zweiten Trennebene ausgeworfen



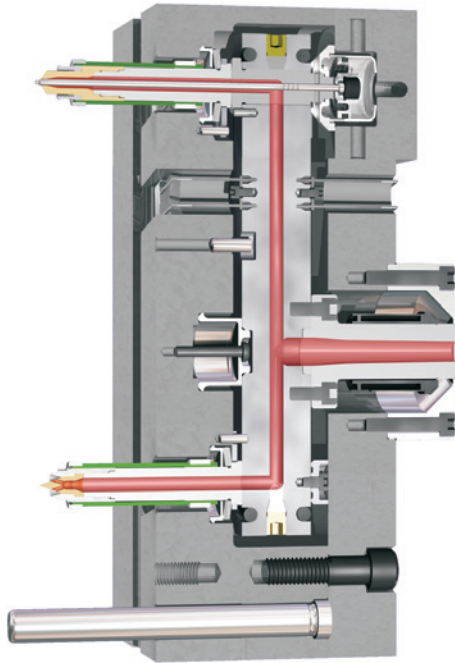
Diese Werkzeuge werden als Dreiplatten-Kaltkanalwerkzeuge bezeichnet. Die Begriffe Zweiplatten- und Dreiplatten-Kaltkanalwerkzeuge beziehen sich auf die Mindestanzahl von Werkzeugplatten, die erforderlich sind, um das Bauteil und den Anguss zu entformen. Bei Zweiplatten-Kaltkanalwerkzeugen werden Bauteil und Anguss zwischen der ersten und zweiten Platte geformt und ausgeworfen. Bei Dreiplatten-Kaltkanalwerkzeugen wird das Bauteil zwischen der ersten und zweiten Platte geformt und entfernt, Angussverteiler und Anguss werden zwischen einer dritten Platte und der zweiten Platte, die zur Bauteilformung dient, geformt und ausgeworfen.

Diese Werkzeugbauweise kommt zum Einsatz, wenn der Anschnitt nicht am Bauteilrand liegen soll. Sie wird meistens für Spritzgießteile genutzt, bei denen in der Bauteilmitte angespritzt werden soll.

### 1.2.2 Heißkanalsysteme

Eine zweite Variante von Werkzeugen, bei denen das Angussystem parallel zur Trennebene angeordnet ist, sind Heißkanalwerkzeuge. Sie bieten die gleiche Flexibilität wie Dreiplattenwerkzeuge mit Kaltkanalsystem. Anders als beim Kaltkanalsystem bleibt jedoch der Kunststoff, der sich im Angussystem befindet, im geschmolzenen Zustand und wird zwischen den Spritzgießzyklen nicht ausgeworfen. Die Auslegung von Heißkanalsystemen ist komplexer als die von Kaltkanalsystemen. Die Auslegung und die Unterschiede zu Kaltkanalsystemen werden in Kapitel 9 behandelt.

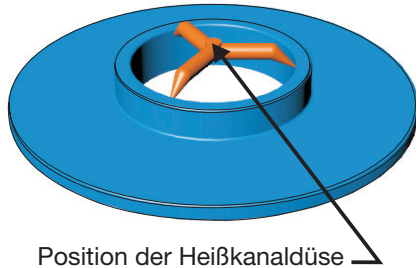
Das Bild 1.4 zeigt zwei Varianten eines Heißkanalsystems. Die Schmelze fließt durch einen heißen Verteiler, der normalerweise parallel zu den Aufspannplatten der Spritzgießmaschine verläuft. Die Schmelze wird aus dem Verteiler durch eine Düse in die Kavität eingespritzt. Dabei muss insbesondere darauf geachtet werden, dass die Wärme des Verteilers und der Düse nicht auf die gekühlte Kavität übergeht. Anders als bei Kaltkanalwerkzeugen bleibt der Kunststoff im Heißkanalsystem geschmolzen und wird nicht bei jedem Zyklus ausgeworfen. Diese Werkzeuge bieten – wie die Dreiplattenwerkzeuge mit Kaltkanalsystem – mehr Anspritzmöglichkeiten als Zweiplattenwerkzeuge mit Kaltkanalsystem.



**Bild 1.4** Extern beheiztes Heißkanalsystem mit Darstellung der Verteiler und Düsen. Die Abbildung zeigt zwei Düsenarten: die obere Düse verfügt über eine Verschlussdüse, die untere hat eine konventionelle offene Düse (Bild: Husky)

## ■ 1.3 Kombinationen aus Heiß- und Kaltkanalsystemen

Häufig enthalten Werkzeuge Angussssysteme, die sich sowohl in der primären Trennebene befinden als auch parallel dazu angeordnet sind. Dies trifft vor allem auf Heißkanalwerkzeuge zu. Dabei versorgt das Heißkanalsystem das in der primären Trennebene liegenden Kaltkanalsystem. Das Bild 1.5 zeigt als Beispiel ein flaches, ringförmiges Bauteil, das in einem Zweifachwerkzeug hergestellt wird. Die Heißkanaldüse führt die Schmelze einem Kaltkanalsystem zu, das sich in der Mitte des Bauteils befindet. Das Kaltkanalsystem führt strahlenförmig zu den Anschnitten am inneren Rand des Bauteils.



**Bild 1.5** Rundes Formteil mit innenliegendem Anguss, der mit einer Heißkanaldüse versorgt wird

## ■ 1.4 Gestaltung des Anschnitts

Angusssysteme in der Trennebene weisen Einschränkungen bei der Lage des Anschnitts auf, bieten aber eine große Flexibilität bei der Anschnittgestaltung. Dreiplattenwerkzeuge mit Kaltkanalsystemen sind auf Punktanschnitte beschränkt, die es ermöglichen, den Anguss vom Bauteil abzutrennen, wenn sich das Werkzeug öffnet. Bei Angusssystemen in der Trennebene können ähnliche Anschnitte verwendet werden, um eine automatische Abtrennung während der Werkzeugöffnung zu erreichen – dies ist jedoch nicht unbedingt erforderlich. Angusssysteme in der Trennebene gewährleisten, dass der Anschnitt in der Trennebene liegt. Dies eröffnet flexible Gestaltungsmöglichkeiten, wie Band-, Film-, Tunnel- oder Seitenanschnitte. Diese Anschnitte erlauben es auch, den Anguss am Bauteil zu belassen. Dies kann die Handhabung im Anschluss an den Spritzgießvorgang erleichtern. Breitere Anschnitte können verwendet werden, um die Schergeschwindigkeit und Scherbelastung in der Anschnittregion während der Füllphase zu verringern oder um Fließvorgänge in der Kavität zu verbessern. Anschnitte mit einem größeren Durchmesser können die Verdichtung des Bauteils verbessern.

Die oben beschriebene Kombination aus Heiß- und Kaltkanalsystem erweitert die Anschnittmöglichkeiten. Diese Kombination ist beispielsweise erforderlich bei zylinderförmigen Teilen, bei denen ein Schirmanschnitt erwünscht ist (siehe Bild 8.31 in Kapitel 8). Dabei versorgt die Heißkanaldüse den Schirmanschnitt, der wiederum die Kavität versorgt. Die genannten Anschnittformen und zusätzliche Anschnittmöglichkeiten – wie Nadelverschlussdüsen und Kaltkanalsysteme mit automatischer Angussabtrennung werden in den Kapiteln 8 und 11 vorgestellt.

Bei fast allen Heißkanalsystemen kommen Anschnitte mit kleinem Querschnitt zum Einsatz, alternativ können jedoch auch Nadelverschlussdüsen und Seitenanschnitte verwendet werden.

In diesem Kapitel wird die Rheologie von Schmelzen und das Fließverhalten von Kunststoffen in einem Werkzeug in Grundzügen vorgestellt. Die Rheologie ist ein gut etabliertes Wissenschaftsgebiet, dennoch ist das Fließverhalten von Polymerschmelzen in einem Werkzeug wissenschaftlich nicht vollständig geklärt. Die Rheologie von Polymerschmelzen ist einigermaßen komplex und unterliegt Einflüssen wie Scherung, Temperatur und Druck, konvergierender und divergierender Strömung, elastischen Effekten, Dehnaviskositäten usw. Da dies kein Fachbuch über Rheologie ist, gibt dieses Kapitel nur einen einführenden Überblick über einige der Themen, die für Spritzgießer und Werkzeughersteller wichtig sind. Einige der späteren Kapitel knüpfen an diese Einführung an.

So komplex das Feld der Rheologie auch ist, die Wissenschaft und das Verständnis des Fließverhaltens von Polymerschmelzen in einem Werkzeug erreicht eine noch höhere Komplexität. Im Wesentlichen haben wir es mit einem heißen, geschmolzenen, hochkomplexen Fluid zu tun, das durch ein gekühltes Werkzeug strömt, während die Schmelzeschichten gleichzeitig fließen und erstarren. Die thermischen Randbedingungen der Schmelze ändern sich ständig entlang ihres Fließwegs und über den Querschnitt des Fließwegs. In den äußeren Schichten, die sich in unmittelbarer Nähe des Werkzeugs befinden, treten eine hohe Scherung und Erwärmung durch Reibung auf. Im Kontrast dazu erstarrt die Schmelze beim direkten Kontakt mit dem kalten Werkzeugstahl nahezu sofort. Bei diesem nahezu sofortigen Erstarren können die Abkühlgeschwindigkeiten bis zu 1000 °C pro Sekunde erreichen. Direkt innerhalb dieser erstarrten Bereiche befindet sich der Bereich mit der höchsten Scherung. Studien haben gezeigt, dass die Schmelzetemperaturen dort um mehr als 1000 °C höher sein können als die Schmelzetemperatur in der Mitte des Fließkanals. Diese Aussagen werden in diesem Buch gemacht, obwohl es heute noch keine Technik gibt, mit der sich die Temperaturschwankungen in einem fließenden Schmelzstrom messen lassen, daher können sie nicht bewiesen oder widerlegt werden. Diese Aussagen zur Temperatur basieren auf Simulation, auf mathematischen Modellen, auf physikalischen Grundgesetzen sowie auf den Auswirkungen, die in nachfolgenden Fließkanälen und in Kunststoffbauteilen nachgewiesen werden können. Dies hat eine gewisse Ähnlichkeit mit Schwarzen Löchern in der Astronomie – wir haben sie noch nicht im Weltraum gesehen, aber aufgrund ihres Einflusses auf ihre Umgebung wissen wir, dass sie existieren. Die Herausforderungen und Erkenntnisse, die mit dem Fließverhalten in einem Werkzeug zusammenhängen, sind Gegenstand dieses Buches.

Die Rheologie beschäftigt sich mit dem Verformungs- und Fließverhalten von Materie. Sie untersucht also das komplexe Fließverhalten von Polymeren, Pasten oder Suspensionen – während die Strömungslehre sich mit der Untersuchung von einfacheren Fluiden wie Wasser, zahlreichen Ölen oder Luft beschäftigt.

Die Abschnitte 2.1 bis 2.6 dieses Kapitels behandeln die wichtigsten Aspekte der Rheologie von Kunststoffen und deren Bedeutung für die Verarbeitung von Kunststoffen. Dazu gehören:

- Den Unterschied zwischen laminarer und turbulenter Strömung
- Die Berechnung der Reynolds-Zahl
- Die Quellströmung
- Die Viskosität von Kunststoffen
- Faktoren, die die Viskosität beeinflussen
- Viskositätsmodelle
- Kompressibilität der Schmelze
- Fließverhalten von Kunststoffschmelzen
- Berechnung der Viskosität

## ■ 2.1 Vergleich von laminarer und turbulenter Strömung

Aufgrund der relativ hohen Viskosität der Polymere kann davon ausgegangen werden, dass während des Spritzgießens laminare Strömung auftritt. Dies gilt sogar dann, wenn die Schmelze durch Punktanschnitte mit geringem Querschnitt strömt. Das laminare Strömungsverhalten ermöglicht Verfahren wie das Mehrkomponenten-Spritzgießen.

Als turbulente Strömung wird der Zustand bezeichnet, in dem das Fluid in einem Kanal verwirbelt und vermischt wird. Dieser Zustand ist für Kühlmittel in den Kühlkanälen eines Werkzeugs sehr wünschenswert, da er die Effizienz der Wärmeübertragung vom Werkzeug auf das Kühlmittel erhöht. Der Gegensatz dazu wird als laminare Strömung bezeichnet, dabei fließt das Fluid in verschiedenen Laminaten oder Schichten und vermischt sich nicht. Ob turbulente oder laminare Strömung auftritt, hängt von der Viskosität des Fluids und seiner Geschwindigkeit ab. Dies lässt sich leicht feststellen, indem man die Reynoldszahl (Re) berechnet.

$$\text{Re} = \frac{\text{Strömungsgeschwindigkeit} \times \text{Durchmesser}}{\text{kinematische Viskosität}} \quad (2.1)$$

Dabei gilt:

$$\text{kinematische Viskosität} = \frac{\text{dynamische Viskosität}}{\text{Dichte der Schmelze}} \quad (2.2)$$

$$\text{Strömungsgeschwindigkeit} = \frac{\text{Durchsatz}}{\text{Fläche}} \quad (2.3)$$

Turbulenz beginnt bei einer Reynoldszahl von 2300 und der Übergang zur vollständigen Turbulenz findet bei einer Reynoldszahl von 4000 statt. Da eine stark turbulente Wasserströ-

mung im Kühlsystem eines Werkzeugs als ideal für eine optimale Wärmeübertragung betrachtet wird, ist bei der Auslegung des Kühlsystems eine Reynoldszahl von etwa 10 000 anzustreben. Damit soll nicht nur sichergestellt werden, dass Turbulenzen auftreten, sondern auch, dass die Wärmeabfuhr durch ein hohes Maß an Turbulenzen optimiert wird.

Für die meisten Polymerschmelzen liegt die berechnete Reynoldszahl während des Spritzgießens deutlich niedriger. In den meisten Fällen ist die Reynoldszahl selbst bei kleinen Anschnitten niedriger als 10. Daher ist zu erwarten, dass das Fließverhalten von handelsüblichen Thermoplasten im den Angusskanälen, im Anschnitt und in der Kavität eines Spritzgießwerkzeugs immer laminar ist. Turbulenz sollte eigentlich nie auftreten. Der Begriff Turbulenz wird jedoch oft falsch verwendet, um die Ursache von Fehlern in Spritzgießformteilen zu beschreiben. Ein Beispiel für die Berechnung der Reynoldszahl für ein ABS-Harz, das durch einen kleinen Anschnitt mit einem Durchmesser von 1 mm fließt, ist im Folgenden aufgeführt:



### BEISPIEL

Gegeben ist ein Heißkanalsystem mit vier Kavitäten. Die Anschnitte haben einen Durchmesser von 1 mm. Jede Kavität hat ein Volumen von 8 cm<sup>3</sup>. Die Spritzgießmaschine spritzt das Material mit einer Einspritzgeschwindigkeit von 32 cm<sup>3</sup>/s ein. Daraus ergibt sich eine Füllzeit von 1 s pro Kavität und ein Durchsatz von 8 cm<sup>3</sup>/s in jedem Anschnitt.

Die Schergeschwindigkeit am Anspritzpunkt ist:

$$\dot{\gamma} = \frac{32 Q}{\pi d^3} = \frac{32 \times 8 \text{ cm}^3 / \text{s}}{\pi \times 0,1^3} = 81\,528 \text{ s}^{-1} \quad (2.4)$$

Dies ist für die meisten Materialien eine relativ hohe Schergeschwindigkeit.

- Durchsatz/Anschnitt = 8,0 cm<sup>3</sup>/s = 8,0 × 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>/s
- Durchmesser des Anschnitts = 1,0 mm = 0,0010 m
- Querschnittsfläche pro Anschnitt = 0,783 mm<sup>2</sup> = 7,83 × 10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>
- Dynamische Viskosität = 8 Pa s = 8 kg/m s

$$\text{Strömungsgeschwindigkeit im Anspritzpunkt} = \frac{8,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s}}{7,83 \times 10^{-7} \text{ m}^2} = 10,22 \text{ m/s}$$

$$\text{kinematische Viskosität} = \frac{8 \text{ kg/m} \times \text{s}}{890 \text{ kg/m}^3} = 0,008989 \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\text{Re} = \frac{10,22 \text{ m/s} \times 0,001 \text{ m}}{0,008989 \text{ m}^2 / \text{s}} = 1,14$$

Dieser Wert der Reynoldszahl ist ein kleiner Bruchteil des Wertes von 2300, der erforderlich ist, damit Turbulenzen auftreten.