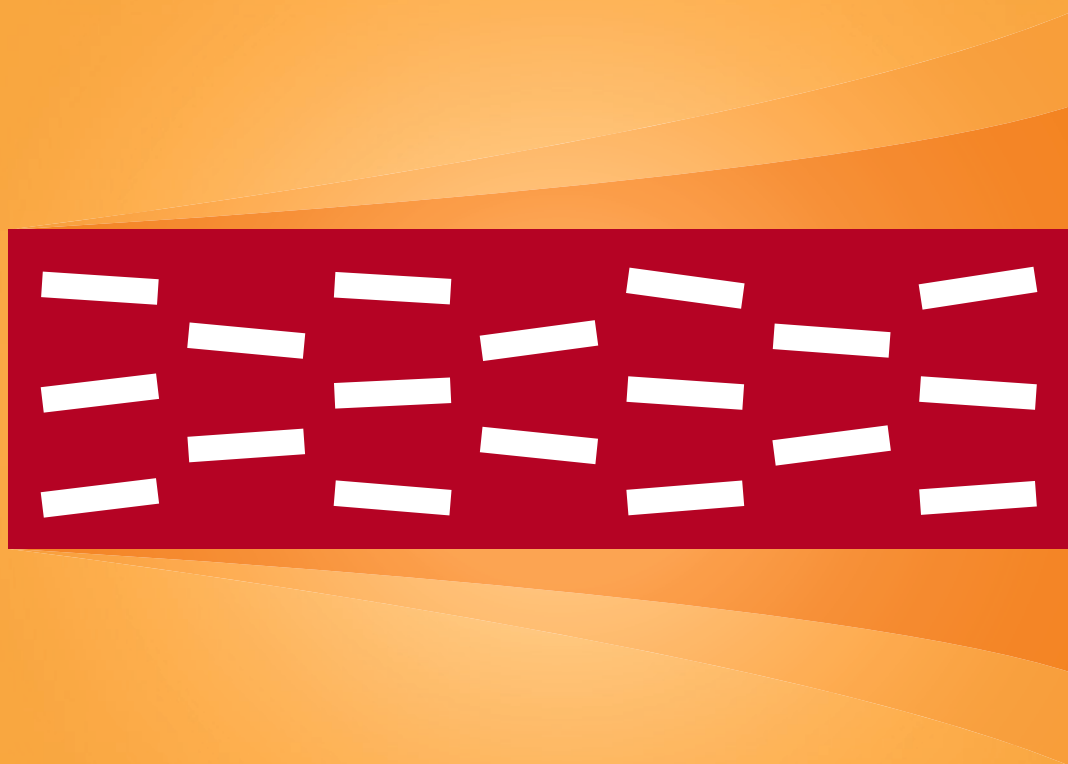
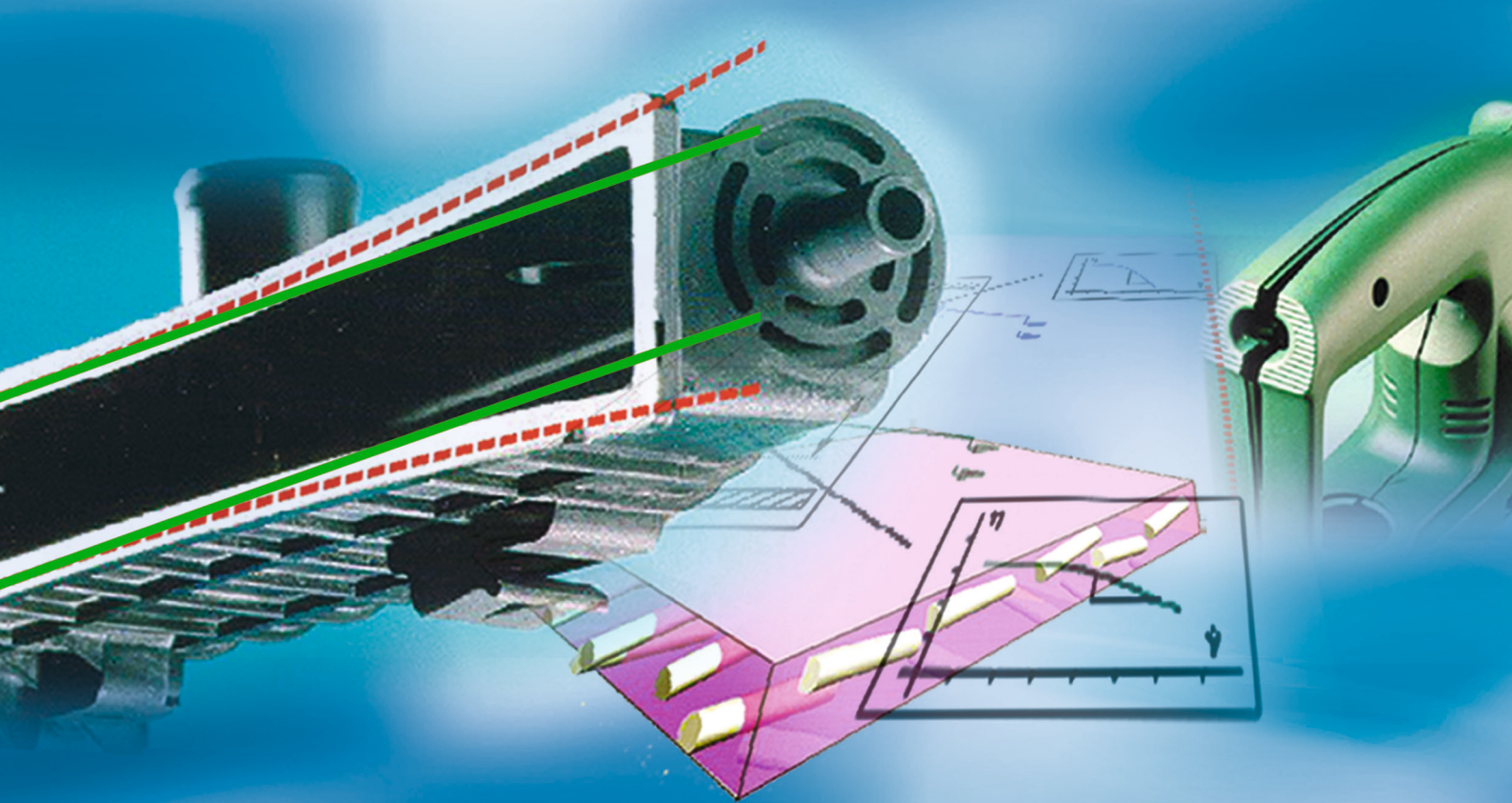


Verzugsverhalten von faserverstärkten Spritzgussteilen

Technische Information





■ Das Schwindungsverhalten unverstärkter und glasfaserverstärkter Thermoplaste unterscheidet sich deutlich.

■ Die für unverstärkte Kunststoffteile geltenden Konstruktionsregeln zur Verzugsminimierung haben bei einer Glasfaserverstärkung nur noch eingeschränkte Gültigkeit. Der dominante Einflussfaktor ist hier die Faserorientierung.

■ Um schon während der Konstruktionsphase einen möglichen Verzug berücksichtigen oder das Verzugverhalten von Prototypen optimieren zu können, müssen die Ursachen und Mechanismen der Faserorientierung sowie deren Auswirkung auf das Schwindungsverhalten bekannt sein. Aus diesem Verständnis lassen sich Konstruktionsregeln und Maßnahmen zur Verzugsminimierung ableiten.

Weicht ein Formteil von seiner Sollgestalt ab, weist es z.B. verwölbte Flächen, Kanten oder Winkeländerungen auf, dann spricht man von Bauteilverzug. Ausgelöst wird dieser Verzug durch lokale Unterschiede in der Schwindung, hervorgerufen beispielsweise durch Anisotropien des Materials oder Inhomogenitäten in der Temperaturverteilung.

Zunächst eine Begriffsklärung: Während der Abkühlung im Werkzeug schrumpft oder schwindet ein Kunststoff. Für den Werkzeugmacher stellt die Schwindung die Längenänderung des gesamten Formteils dar. Aus den beschriebenen Überlegungen wird aber deutlich, dass das Formteil keineswegs gleichmäßig schwindet, sondern diese Gesamtlängenänderung die Summe aller lokal unterschiedlichen Schwindungen ist. Im Weiteren wird der Begriff der Schwindung deshalb immer als lokale Dimensionsänderung eines örtlich begrenzten Teilbereiches des Bauteils verwendet. Abb. 1 erläutert den Zusammenhang zwischen inhomogener Schwindung und Formänderung.

Die gängigen Konstruktionsregeln zur Minimierung von Formteilverzug und die üblichen Gegenmaßnahmen beim Einfahren eines neuen Werkzeuges beziehen sich in erster Linie auf unverstärkte Materialien. So wird teilweise erheblicher konstruktiver und werkzeugtechnischer Aufwand betrieben, um die „Todsünde“ bei der Kunststoffformgebung, die Materialanhäufung, zu vermeiden. Durch Mehrfachanbindungen wird versucht, das Druckgefälle im Formteil minimal zu halten. Ferner ist der erhebliche Einfluss der Werkzeugkühlung auf den Verzug bekannt, weniger Beachtung findet der Einfluss der Molekülorientierung, die auch nur bei sehr nachgiebigen, vor allem flachen Teilen von Bedeutung ist.

Für verstärkte Formteile gibt es dagegen einen dominanten Einflussfaktor, die Faserorientierung, während Druck- und Temperaturverlauf, ja selbst die Kristallisation nur eine untergeordnete Bedeutung haben.

Damit sind die bekannten Konstruktionsregeln zur Verzugsminimierung nur eingeschränkt gültig, gleichzeitig rücken ganz andere Zusammenhänge in den Vordergrund.

Im Folgenden werden der Mechanismus der Faserorientierung während der Füll- und Nachdruckphase und seine Auswirkung auf das Formteil dargestellt. Aus dem Verständnis der Vorgänge im Material lässt sich eine Reihe von Regeln zur weitgehenden Vermeidung von Verzug ableiten.

Schwindungsverteilung

Die mechanischen Eigenschaften von Glas und Thermoplasten unterscheiden sich um Größenordnungen. Eine Glasfaser ist ca. 40 mal steifer als der sie umgebende Kunststoff, dabei beträgt die Wärmedehnung nur ca. 1/30. Entsprechend dem Fasergehalt setzt sich das Verbundverhalten der Formmasse aus den Kennwerten der Komponenten zusammen. Der Einfluss der Faser wirkt vor allem in Faserrichtung, quer dazu überwiegen die Eigenschaften des Kunststoffs (Abb. 2).

Da die Fasern während der Verarbeitung eine Orientierung erhalten, sind die Eigenschaften des verarbeiteten Materials nicht mehr homogen. Vielmehr gibt es eine über die Formteillfläche und die Wanddicke

lokal unterschiedliche richtungsabhängige Steifigkeits- und Schwindungsverteilung. Dieses anisotrope Materialverhalten tritt bereits bei kleinen Fasergehalten (10 Gew. %) deutlich in Erscheinung.

Schmelzeffluss und Faserorientierung

Wenn Kunststoffschmelze durch den Anschnitt in die Kavität strömt, beginnt sie sich radial auszubreiten. Weil der Umfang der Fließfront dabei größer wird, erfährt die Schmelze eine Dehnung quer zur Ausbreitungsrichtung. Die Faserorientierung infolge dieser Dehnströmung ist so ausgeprägt, dass es weitgehend ohne Bedeutung ist, welche Orientierung die Fasern vorher (im Angussverteiler/Anschnitt) hatten.

Während die Schmelze die Kavität füllt, stellt sich gleichzeitig in Dickenrichtung ein Strömungsprofil ein. In der Mitte ist die Strömungsgeschwindigkeit am größten, am Rand geht sie wegen der Haftung an der kalten Werkzeugwand bis auf Null zurück. Dadurch ist die Schmelze einer Scherung ausgesetzt, die letztlich für den Fließwiderstand und damit für den Fülldruck verantwortlich ist.

Über die Wanddicke ist die Scherung des Materials jedoch nicht gleichmäßig, vielmehr gibt es in Wandnähe eine ausgeprägte Scherschicht, während die Schmelze in der Mitte eher blockartig strömt (sog. „Quellströmung“) und kaum geschert wird. Ein Schmelzepartikel, der in der Mittelschicht sehr schnell vorwärts strömt, wird schließlich an der fontänenartigen Fließfront in Wandnähe gelenkt und gerät dadurch in den Einfluss der Scherung.

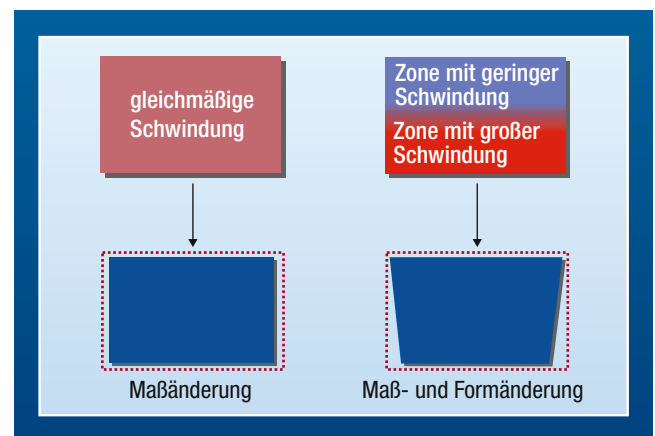


Abb. 1: Homogene und inhomogene Schwindung

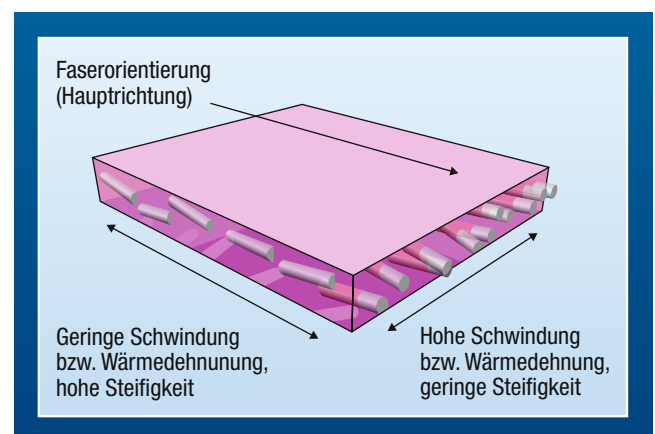


Abb. 2: Bauteilausschnitt (mit Glasfasern)

Die Fasern werden durch eine Überlagerung der beiden Mechanismen Scherung (Abb. 3) und Dehnung (Abb. 4) orientiert.

In der Kavität überlagern sich beide Mechanismen (Abb. 5, links). Ein Schmelzevolumen, das gerade über den Anschnitt in die Kavität vorge-
drungen ist, erhält zunächst eine sehr ausgeprägte Querorientierung.
Es strömt dann mit der Quellströmung in der Mitte der Kavität in Rich-
tung Schmelzefront, wobei es praktisch keinerlei Umorientierung
erfährt, d.h. die Fasern liegen weiterhin quer zur Strömungsrichtung.
An der Schmelzefront wird das Schmelzevolumen an die Wand umge-
lenkt und gerät dabei in die Scherströmung, welche die Fasern in
Fließrichtung ausrichtet. Durch die beiden Mechanismen ergeben sich
also drei Schichten über die Formteilmwanddicke mit jeweils um 90°
verdrehten Hauptfaserrichtungen. In Schlißbildern sind diese klar
erkennbar.

Das mechanische Verhalten des Formteils hängt jetzt von der Dicke
dieser Schichten und dem jeweiligen Grad der Orientierung ab. An
Stellen, bei denen die Randschichten dominieren, ist das Formteil in
Fließrichtung steifer als quer dazu. Außerdem behindern die Fasern
hier die Schwindung in Fließrichtung. Wegen der besonderen Anschau-
lichkeit sind im Folgenden meist die über die Formteilmwanddicke
gemittelten Hauptorientierungen dargestellt.

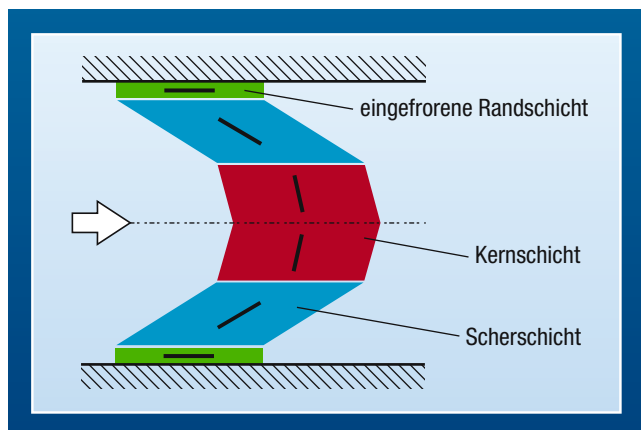


Abb. 3: Scherströmung

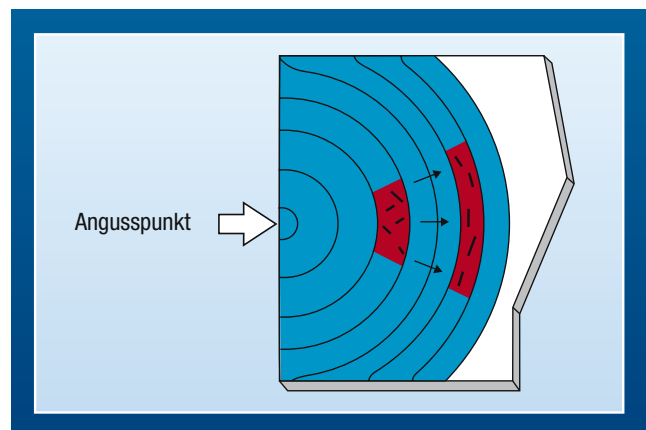


Abb. 4: Dehnströmung

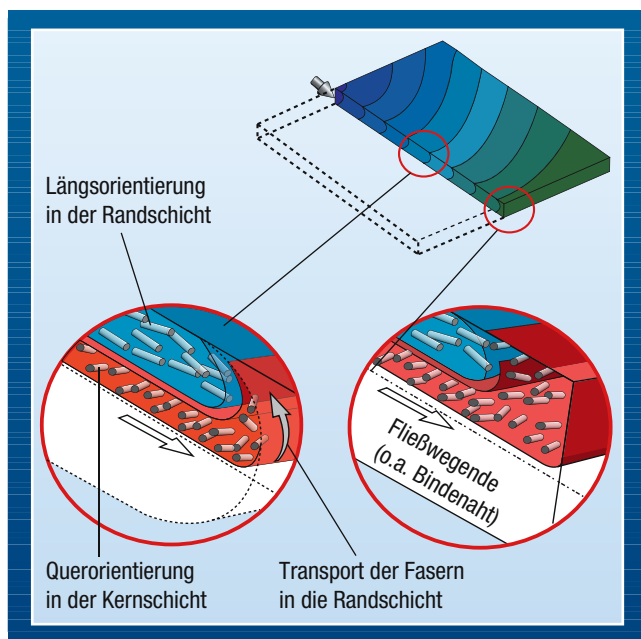


Abb. 5: Faserorientierung in einer Platte

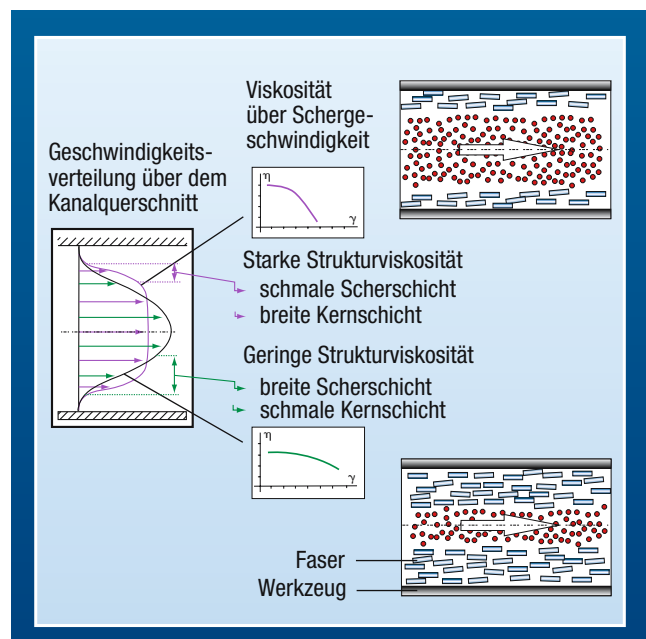


Abb. 6: Strukturviskosität und Schichtenaufbau

Faserorientierung als Verzugsursache

Die Faserorientierung oder die Schichtenbildung allein ist noch nicht zwangsläufig ein Auslöser für Verzug. Erst wenn sich die Orientierung (Orientierungswinkel und -grad) von Ort zu Ort ändert, kommt es lokal zu Unterschieden in der Schwindung und damit zu Eigenspannungen und möglicherweise zu Deformationen. Ursachen für solche unterschiedlichen Orientierungen können sein:

- Strömungsumlenkungen während der Füllphase
- Orientierungseffekte am Fließwegende (Abb. 9)
- Bindenähte
- Anschnitte

Ursache, Auswirkung und Abhilfe werden im Folgenden ausführlich behandelt. Dabei liegt das Augenmerk auf technischen Kunststoffen (PA und PBT), also solchen mit dominanter Randschicht.

Strömungsumlenkungen während der Füllphase

Es muss das Ziel sein, im ganzen Formteil eine einheitliche Faserausrichtung zu erhalten, damit angesichts der großen Schwindungsunterschiede längs und quer zu den Fasern ein möglichst gleichmäßiges Schwindungsverhalten erreicht wird. Von Bedeutung ist allein die Orientierung bei vollständig gefüllter Kavität, nicht die in einer Teilfüllung. Auf die endgültige Orientierung haben sowohl die Fließgeschichte als auch die zuletzt stattfindenden Schmelzebewegungen der Nachdruckphase einen wichtigen Einfluss.

Ein anschauliches Beispiel hierzu zeigt Abbildung 7: Wird eine rechteckige Platte unter Missachtung der Teilesymmetrie angespritzt, so ergibt sich bei 90 % Formfüllung zunächst noch ein symmetrisches Orientierungsbild. In der letzten Füllphase, wenn die Schmelze nur noch den rechten Bereich der Kavität füllen muss, wird allerdings die Faserorientierung bzw. der Grad der Orientierung in den bereits gefüllten Bereichen noch einmal geändert.

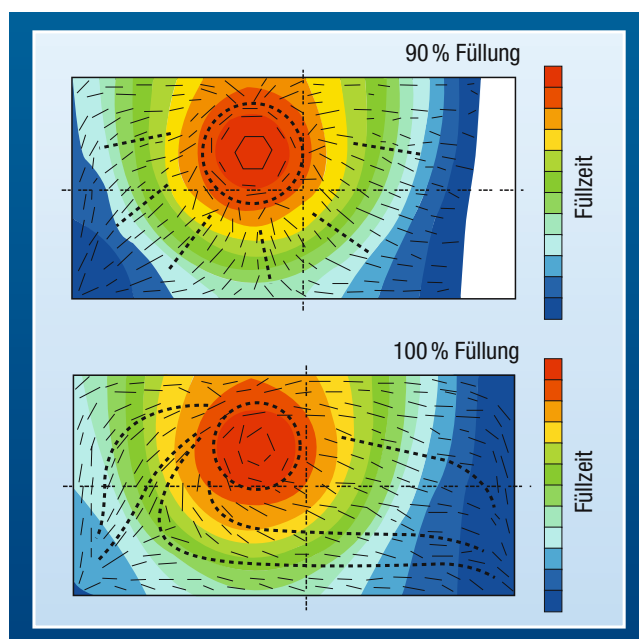


Abb. 7: Außermittigte Anspritzung einer Platte

Die Wahl des Anschnittpunktes ist also von entscheidender Bedeutung und sollte stets so erfolgen, dass die Schmelze möglichst ohne große Richtungsänderungen die Kavität füllen kann. Hierfür gelten folgende Regeln (Abb. 8):

- Eine Symmetrie sollte, sofern möglich, bei der Teilekonstruktion erzeugt und bei der Wahl der Anspritzstelle berücksichtigt werden.
- Bei länglichen Teilen sollte die Füllung in Bauteillängsrichtung erfolgen.
- Besitzt das Bauteil zwei Längsachsen (Abb. 8b), so liegt der beste Angusspunkt im Schnittpunkt dieser Achsen.

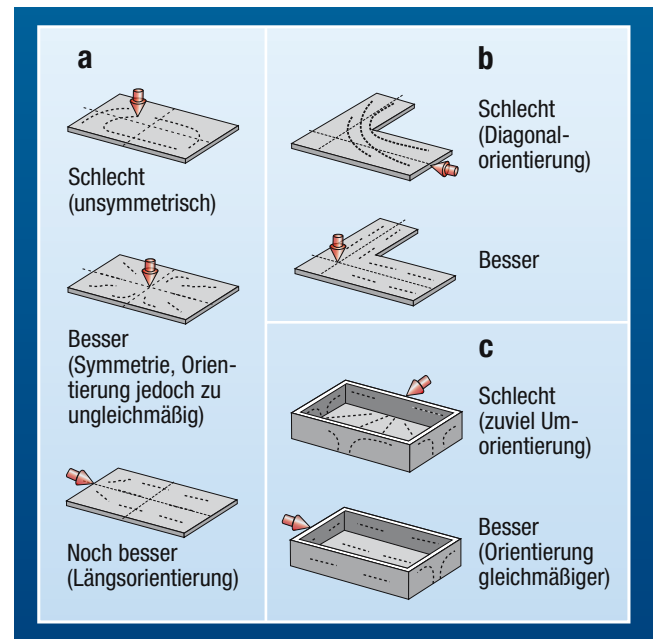


Abb. 8: Angussposition und Faserorientierung

Orientierungseffekte am Fließwegende

Die massivste Störung im Orientierungsbild geht i.d.R. vom Fließwegende aus (Abb. 9). Unmittelbar vor dem Füllende werden noch querorientierte Fasern aus der Kernschicht in die Randschicht gelenkt. Wegen der fehlenden Scherung kommt es jedoch nicht mehr zu einer Umorientierung. Die Orientierung am Fließwegende ist auf einer Länge von ca. 5 x Wanddicke einheitlich quer zur Hauptfließrichtung.

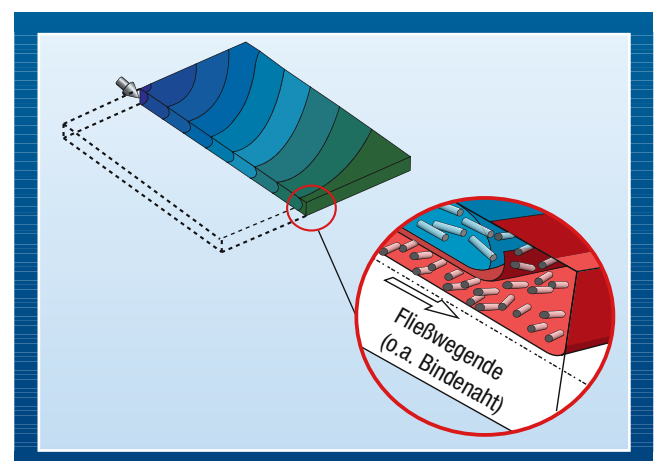


Abb. 9: Orientierungseffekte am Fließwegende

Ein Fließwegende ist nicht beschränkt auf den zuletzt gefüllten Bereich. Jede Stelle, wo die Schmelze zum vorzeitigen Stillstand kommt (z.B. in querstehenden Rippen) weist ein vergleichbares Orientierungsbild auf. Letztlich bedeutet dies, dass Fasern in Randnähe immer parallel zur Kante liegen (Randeffekt!).

Ist das Fließwegende ein hochgezogener Rand (Abb. 10), so führt die unterschiedliche Schwindung von Boden und Rand zu einer Verwölbung. Diese Umorientierung wird u.U. noch dadurch verstärkt, dass

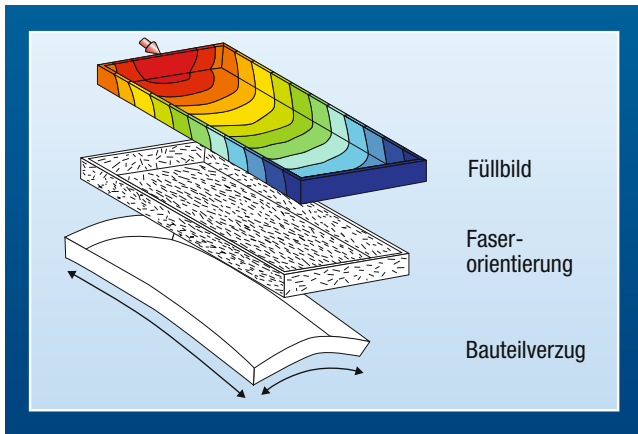


Abb. 10: Verzug am Ende des Fließweges

die Fließfront die Kante nicht auf ganzer Breite zeitgleich erreicht und der Schmelzestrom im letzten Moment noch parallel zur Kante verläuft. Hierdurch wird die Breite des im Vergleich zum Boden umorientierten Bereiches i.d.R. vergrößert. An einer seitlich durch Wände bzw. Rippen verstärkten Platte lassen sich folgende Fälle unterscheiden:

■ Paralleles Fließwegende

Wenn die Fließfront zeitgleich auf ganzer Breite gegen die Werkzeugwand läuft, gibt es keine Querströmung und daher nur einen schmalen umorientierten Streifen. Die Schwindungsunterschiede an Rippenober- und -unterseite und damit auch der Verzug sind dann besonders groß (Abb. 11 a).

■ Zusammenfluss in Rippenmitte

Wenn die Schmelze rechts und links etwas voreilt, kommt es zu einem punktförmigen Zusammenfließen in der Rippenmitte. An dieser Stelle gibt es die größte Inhomogenität in der Orientierung. Die Deformation entartet zu einem deutlichen Knick (Abb. 11 b).

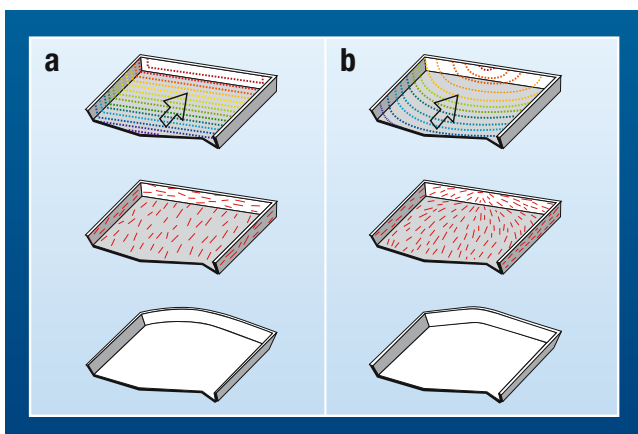


Abb. 11: Füllung und Verzug eines Deckels

■ Seitlicher Zusammenfluss

Idealerweise sollte die Schmelze in den Ecken zusammenfließen. Durch die Strömungsumlenkung sind auch Teile des Bodens querorientiert und Schwindungsunterschiede an Rippenober- und -unterseite nicht so ausgeprägt (Abb. 12 a).

Am besten lässt sich dieser Verzug umgehen, indem quer zur Strömungsrichtung verlaufende Rippen und Wände schon in der Konstruktionsphase vermieden werden. Hierzu ist es erforderlich, frühzeitig die Lage des Angusspunktes festzulegen. Sind querstehende Wände unvermeidbar, so gibt es folgende Möglichkeiten, den Verzug zu minimieren (Abb. 13):

■ Konterrippe am Fließwegende vorsehen

Auf Ober- und Unterseite liegen gleiche Schwindungen vor (bis 100 % Verbesserung).

■ Fließwegende segmentieren

Die Einschnitte im Rand verhindern, dass die Druckspannungen von einem Segment auf das nächste übertragen werden. Das Formteil verliert aber an Steifigkeit (bis 20 % Verbesserung).

■ Fließwegende falten

Durch die mäanderförmige Gestaltung wird ebenfalls die Übertragung von Druckspannungen (so wie in einem Faltenbalg) behindert. Zusätzlich tritt an jeder Umlenkung Kantenverzug auf, der sich hier positiv auswirkt (bis 100 % Verbesserung).

■ T-förmige Fließhilfe

Mit einer T-förmigen Fließhilfe wird unter dem Fuß des zuletzt gefüllten Randes eine Querorientierung unterstützt, so dass die Schwindung in diesem Bereich gleichmäßiger und der Verzug geringer ist (Abb. 12 b; bis 70 % Verbesserung).

Unbedingt abgeraten werden muss von dem Versuch, das Formteil durch weitere, innenliegende querstehende Rippen zu stabilisieren (Abb. 14). Jede dieser Rippen stellt ein Fließwegende dar und führt zu Querorientierung mit der Folge verstärkter Deformation. Außerdem ist das Teil aufgrund der versteifenden Wirkung der Rippen noch schwieriger gerade zu biegen. Sind innenliegende Rippen unvermeidbar, sollten sie zumindest diagonal angeordnet werden.

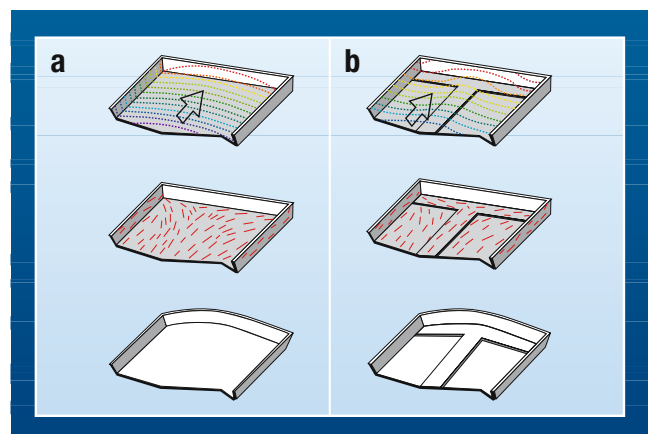


Abb. 12: Füllung und Verzug eines Deckels

Bindenähte

Eine Bindenaht stellt das Fließwegende zweier Schmelzeströme dar und führt zu den schon beschriebenen Umorientierungen. Wenn die beiden Fronten exakt parallel aufeinandertreffen, wird sich wieder ein schmaler Bereich (ca. 5 x Wanddicke) mit einer Orientierung quer zur Bewegung der Schmelzefronten finden. Diese lokale Störung ist eher klein und führt nur zu etwas unterschiedlicher Schwindung in der Ebene.

In der Realität werden die Schmelzefronten jedoch fast immer unter einem Winkel aufeinandertreffen (Abb. 15), so dass ausgehend vom Punkt der ersten Berührung eine seitliche Strömung in den noch nicht gefüllten Bereich einsetzt. Auf die Faserorientierung hat dies einen gravierenden Einfluss. Im Bereich der ersten Berührung findet sich eine breite, querorientierte Zone, die in Richtung Fließwegende immer schmaler wird.

Damit ist auch die Schwindung sehr unterschiedlich und es kommt in diesem Bereich zu Verzug.

Durch eine geeignete Wahl der Anschnittposition sollte unbedingt vermieden werden, dass sich in langen Stegen Bindenähte befinden. Günstiger ist es in dem gezeigten Beispiel, sie in die Ecken der Aussparung zu verschieben.

Wenn dies nicht möglich ist, sollte gegebenenfalls durch Fließhilfen die Bindenaht stumpf geformt werden.

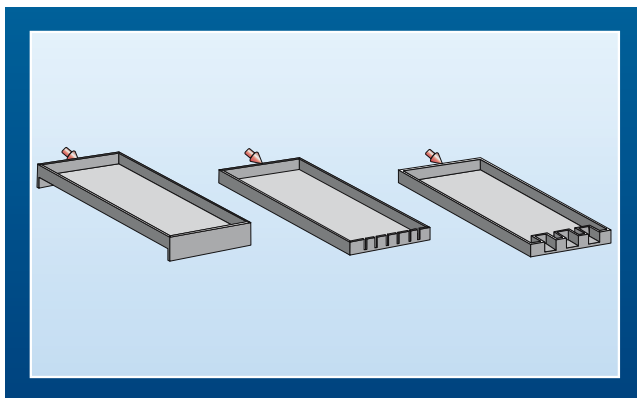


Abb. 13: Konstruktive Maßnahmen

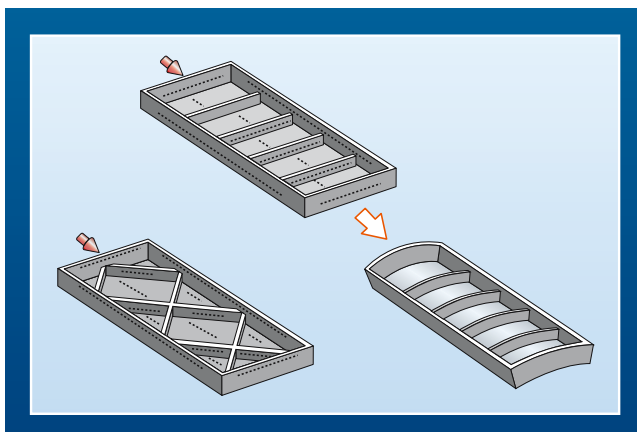


Abb. 14: Verzug eines verrippten Bauteils

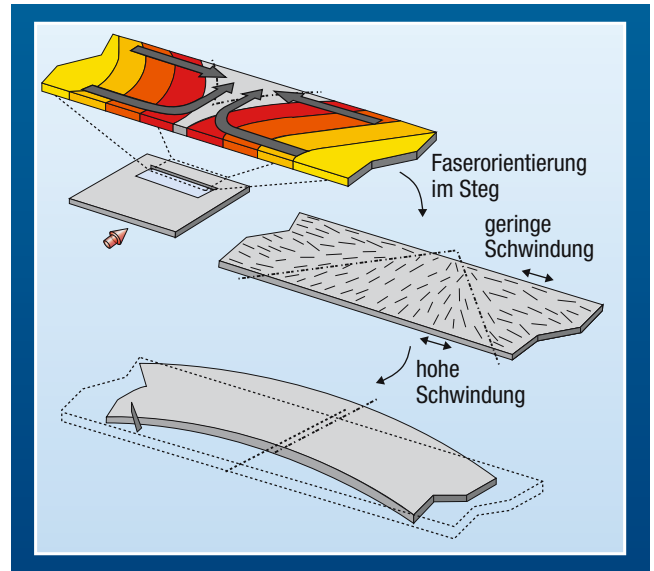


Abb. 15: Bindenähte als Verzugsauslöser

Anschnitte

Um den Anguss (Ausnahme: Film- oder Schirmanguss) liegt eine radiale Strömung vor. Daher wird sich entsprechend auch eine punktsymmetrische Orientierungsverteilung einstellen. In einem sonst einheitlich orientierten Formteil stellt die Angussstelle deshalb eine Störung dar. Die genaue Form des Anschnitts (Tunnel, Band, Kegel etc.) ist dabei ohne große Bedeutung.

Der Einfluss des Anschnitts ist in Abbildung 10 zu erkennen. Das Orientierungsbild der Seitenwand, in der der Anguss liegt, ähnelt dem am Fließwegende. In beiden Fällen liegen die Fasern an der Oberkante der Wand parallel zu dieser, also quer zur Orientierung im Boden. Damit ergibt sich ein ähnliches Verzugsverhalten. Die Deformation ist in Angussnähe jedoch kleiner, da der Orientierungsgrad hier generell geringer ist als am Fließwegende.

Die Position des Anschnitts lässt sich sehr gezielt auch zur Manipulation des Formteilverzugs einsetzen (Abb. 16). Je nachdem ob der Anschnitt auf der Innen- oder auf der Außenseite der Ecke platziert ist, ändert sich der Verzug der beiden Schenkel des abgebildeten Teils.

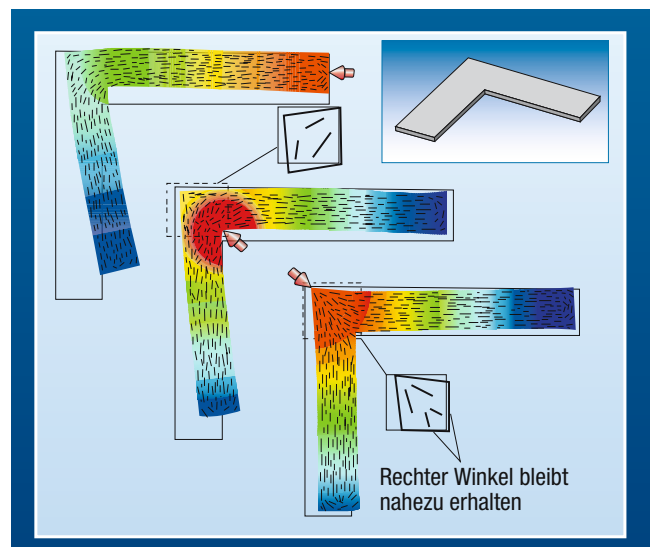


Abb. 16: Anpritzung und Verzug eines Winkels

Matrixmaterial beeinflusst Verzug

Eine einfache Möglichkeit, das Verzugsniveau zu reduzieren, ist die Verwendung von schwindungsreduzierten Formmassen, wie sie von BASF angeboten werden, z.B. als Ultradur® S. Die thermoplastische Matrix besteht dabei aus einem Blend mit einer amorphen Phase, wodurch die Volumenschwindung verringert ist. Dies wirkt sich vor allem auf die Querschwindung aus, während die Längsschwindung nahezu unverändert bleibt. Dadurch ist der verzugsauslösende Unterschied von Längs- und Querschwindung von vornherein deutlich gering. Den größten Erfolg wird der Einsatz solcher Materialien immer dann haben, wenn der Orientierungsgrad im Teil sehr hoch ist.

Simulation des Formteilverzugs

Mittels numerischer Simulationsverfahren auf der Basis finiter Elemente lässt sich das Füllverhalten auch bei komplexen Spritzgussteilen sehr zuverlässig vorhersagen. Eventuelle Lufteinschlüsse und Bindenähte können erkannt und Fülldrücke und Schließkräfte abgeschätzt werden.

Verzugsberechnungen erlauben noch keine derartigen quantitativen Aussagen. Bei unverstärkten Formmassen lassen sich wegen der Vielzahl der Einflussparameter (Druck- und Temperaturgeschichte, Molekülorientierung, Kristallisation etc.) bestenfalls qualitative Vorhersagen über die Art des Verzugs erzielen. Wegen des dominanten Einflusses der Fasern sind Verzugsberechnungen bei faserverstärkten Materialien deutlich zuverlässiger. Hierzu ist allerdings zusätzlich die Berechnung der Faserorientierung erforderlich.

Das Potenzial solcher Simulationsrechnungen besteht weniger in der genauen Vorhersage einer Werkzeugkorrektur als vielmehr im Vergleich verschiedener Konstruktions- oder Anspritzvarianten. So lassen sich Verzugsauslöser finden und Optimierungsschritte bewerten.

Um zu einem verzugsarmen Bauteil zu gelangen, ist der Freiraum erforderlich, die als sinnvoll erkannten Veränderungen an Anschnitt und Formteilgeometrie auch umzusetzen. Dieser Freiraum ist jedoch in einem fortgeschrittenen Stadium der Entwicklung oft nicht mehr vorhanden. CAE-Techniken, wie die Verzugsanalyse, müssen deshalb bereits in einer frühen Entwicklungsphase eingesetzt werden.

Zusammenfassung der Konstruktionsregeln

- Versuchen, die Orientierungsverteilung sich vorzustellen
- Einheitliche Fließrichtung (= Orientierungsrichtung) anstreben
- Längliche Teile in Längsrichtung anspritzen
- Symmetrie anstreben und/oder betonen
- Rippen oder Wände quer zur Fließrichtung vermeiden
- Querorientierung am Fließwegende und entlang von Rändern berücksichtigen
- Fließwegende in Ecken positionieren
- Möglichst stumpfe Bindenähte anstreben (Festigkeit beachten!)
- Bindenähte auf freien Stegen vermeiden bzw. in die Ecken verlegen.
- Freiraum für Veränderungen vorhalten.

Ausgewählte Produktliteratur:

- Ultramid® – Hauptbroschüre
- Ultramid® – Sortimentsübersicht
- Ultradur® – Hauptbroschüre
- Ultradur® – Sortimentsübersicht
- Ultraform® – Hauptbroschüre
- Ultraform® – Sortimentsübersicht
- Ultrason® – Hauptbroschüre
- Ultrason® – Sortimentsübersicht
- Ultramid®, Ultradur® und Ultraform® – Verhalten gegenüber Chemikalien
- Ultrason® – Verhalten gegenüber Chemikalien

Zur Beachtung

Die Angaben in dieser Druckschrift basieren auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Sie befreien den Verarbeiter wegen der Fülle möglicher Einflüsse bei Verarbeitung und Anwendung unseres Produktes nicht von eigenen Prüfungen und Versuchen. Eine Garantie bestimmter Eigenschaften oder die Eignung des Produktes für einen konkreten Einsatzzweck kann aus unseren Angaben nicht abgeleitet werden. Alle hierin vorliegenden Beschreibungen, Zeichnungen, Fotografien, Daten, Verhältnisse, Gewichte u. Ä. können sich ohne Vorankündigung ändern und stellen nicht die vertraglich vereinbarte Beschaffenheit des Produktes dar. Etwaige Schutzrechte sowie bestehende Gesetze und Bestimmungen sind vom Empfänger unseres Produktes in eigener Verantwortung zu beachten. (Mai 2014)

Besuchen Sie auch unsere Internetseiten:

www.plasticsportal.com (Welt)

www.plasticsportal.eu (Europa)

Die einzelnen Produktauftritte finden Sie unter:

www.plasticsportal.eu/Produktname

z.B. www.plasticsportal.eu/ultraform

Broschürenanforderung:

PM/K, F204

Fax: +49 621 60-49497

Bei technischen Fragen zu den Produkten

wenden Sie sich bitte an den Ultra-Infopoint:

