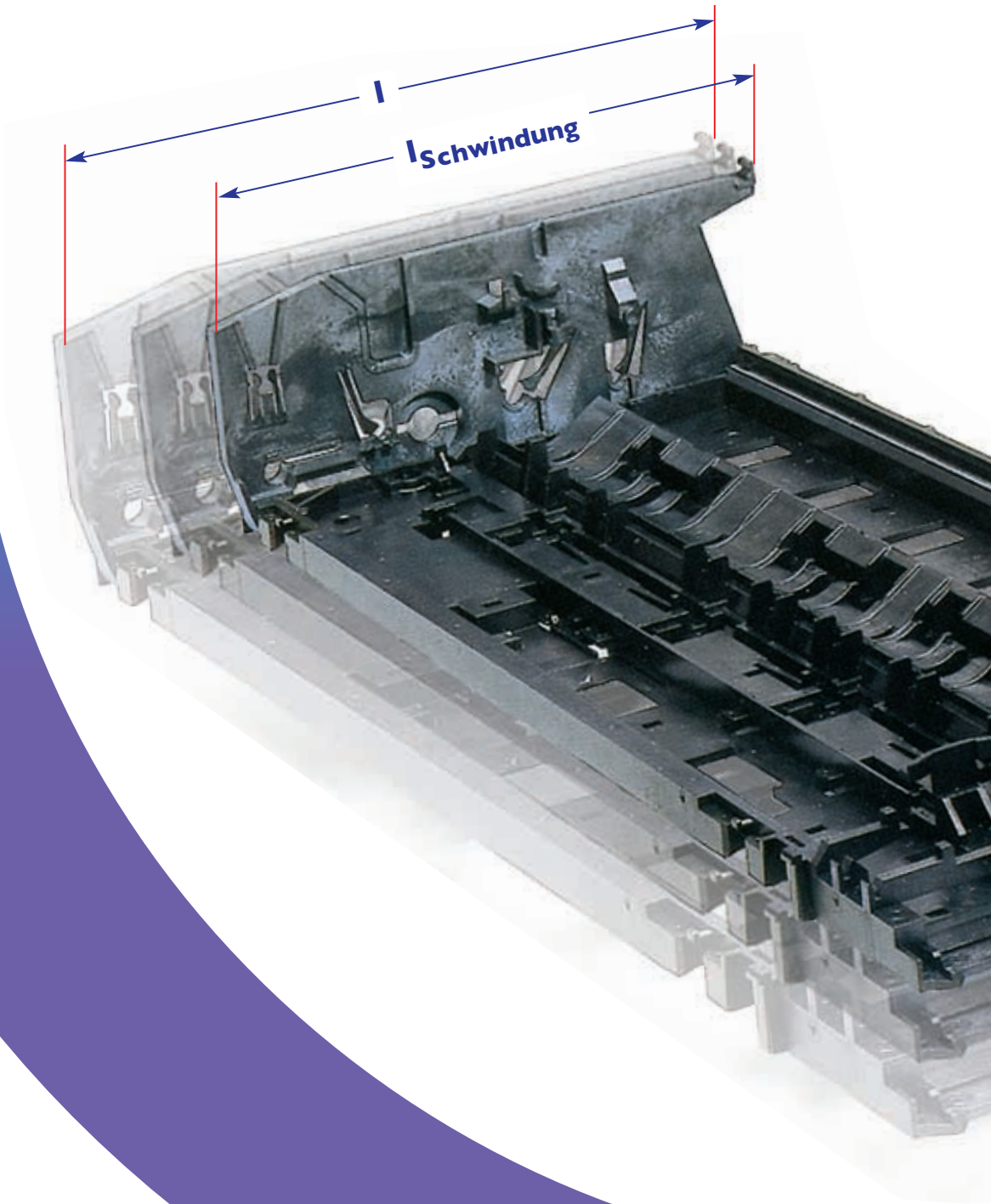
Grundlagen zur Schwindung von thermoplastischen Kunststoffen



Inhalt

1	Der Begriff „Schwindung“	2
2	Einflussgrößen bei der Schwindung	5
2.1	Werkstoff	5
2.1.1	Amorphe und teilkristalline Thermoplaste	5
2.1.2	Kristallisationsverhalten	7
2.1.3	Füllstoffe und Verstärkungsstoffe	8
2.2	Verarbeitungsprozess	9
2.2.1	Nachdruckzeit	9
2.2.2	Nachdruckhöhe	9
2.2.3	Formnestwandtemperatur	10
2.2.4	Schmelzetemperatur	11
2.2.5	Einspritzgeschwindigkeit	11
2.2.6	Entformungstemperatur	11
2.3	Formteilgeometrie	12
2.3.1	Wanddicken	12
2.3.2	Wanddickenreduzierung am Fließwegende	13
2.3.3	Rippen	13
2.4	Werkzeug	14
2.4.1	Temperierung	14
2.4.2	Anschnittart	14
2.4.3	Anschnittlage	14
3	Schwindungsrelevante Phänomene	15
3.1	Verzug	15
3.2	Eigenspannungen	17
3.3	Einfallstellen/Lunker	18
3.4	Eckenverzug	18
4	Literaturverzeichnis	18

1 Der Begriff „Schwindung“

Bei der Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen im Spritzgießprozess verändert das Formteil während der Abkühlung seine Abmessungen. Diese Maßänderungen werden unter dem Oberbegriff „Schwindung“ zusammengefasst.

Die **Schwindung** beruht auf der **Kompressibilität** und der **Wärmedehnung** der Kunststoffe. Bei der **Schwindung** von thermoplastischen Kunststoffen ändert sich das **Volumen**. Beim **Schrumpf** dagegen bleibt das **Volumen** übergeordnet konstant.

Um die gewünschten Abmessungen des Kunststoffteils zu erhalten, muss das Formnest (die Kavität) um die Schwindung des Kunststoffes vergrößert werden. Daher muss der Werkzeugkonstrukteur den schwindungsbedingten Maßunterschied zwischen der Werkzeugkavität und dem Formteil vorhersagen. Dies ist in vielen Fällen nicht einfach, da die Schwindung von einer Vielzahl von Einflussgrößen bestimmt wird.

Neben der Prozessführung (Temperaturen, Drücke) und den Werkstoffeigenschaften (p-, v-, ϑ-Verhalten, Füllstoffe, amorph, teilkristallin) beeinflussen u. a. die Steifigkeit und die Wanddicken des Formteils die Schwindung.

Obwohl die Schwindung auf der Wärmedehnung beruht, fällt die effektive Maßverkleinerung nach dem Entformen geringer aus, als bei der reinen thermischen Dehnung zu erwarten wäre.

Es wirken bei der Schwindung zusätzliche Mechanismen, die zu einer Verringerung der thermischen Kontraktion gegenüber der reinen Wärmedehnung führen. Die wichtigsten Mechanismen sind:

– Eigenspannungen, beeinflusst durch
  • Temperaturprofil während der Abkühlung
  • Formnestoberflächentemperatur

– Kristallisation bei teilkristallinen Thermoplasten, beeinflusst durch
  • Formnestoberflächentemperatur
  • Abkühlverlauf

– mechanische Schwindungsbehinderung, beeinflusst durch
  • Formzwang

Des Weiteren wird die thermische Kontraktion beeinflusst durch den thermodynamischen Prozessverlauf beim Spritzgießen, insbesondere durch

- den Druckverlauf während der Abkühlung,
- die Druckeinwirkung und die Schmelzebelastung aufgrund der Angussgestaltung und -lage,
- die Schmelzetemperatur und sonstige Verarbeitungsbedingungen.

Der Einfluss des thermodynamischen Prozessverlaufes auf das Schwindungsverhalten wird sehr anschaulich in einem Druck-(p-)Volumen-(v-)Temperatur-(ϑ-)Diagramm dargestellt.

Dieses als p-v-ϑ-Diagramm bezeichnete Schaubild kennzeichnet

- **die Kompressibilität:**
  Änderung des Volumens bei Änderung des Drucks

sowie

- **das thermische Verhalten:**
  Änderung des Volumens bei Änderung der Temperatur.

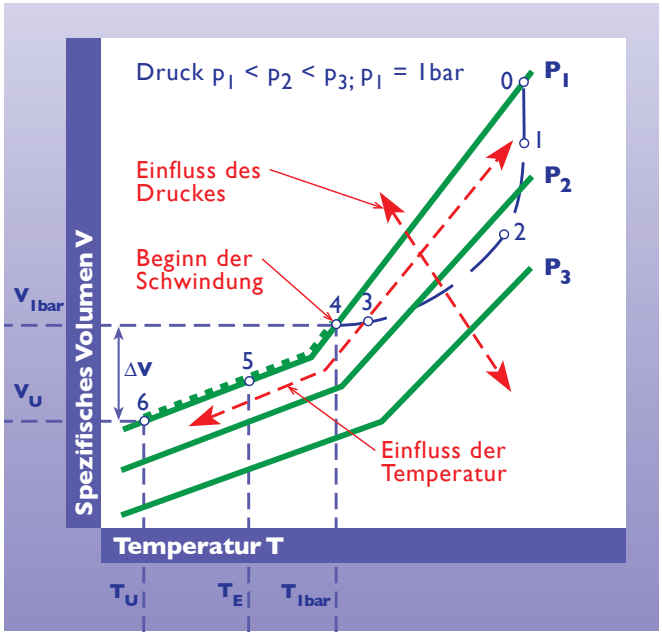


Bild 1: Schematische Darstellung eines Druck-(p-)Volumen-(v-) Temperatur-(ϑ-)Diagramms

0 → 1 volumetrische Füllung
1 → 2 Kompression
2 → 3 Nachdruckwirkung
3 → 4 Druckabbau auf Umgebungsdruck (T_{1bar})
4 → 5 Abkühlung auf Entformungstemperatur (T_E)
5 → 6 Abkühlung auf Umgebungstemperatur (T_U)

Die p-v-ϑ-Diagramme geben Informationen über die Volumenschwindung SV aus ($\Delta V = V_{1bar} - V_u$). Sie zeigen Schwindungspotenziale. Die Definition der Volumenschwindung ist im Nachfolgenden angegeben.

$$S_V = \frac{V_W - V_F}{V_W}$$

V_W: kaltes Werkzeugvolumen
V_F: Formteilvolumen

$$S_V = 1 - (1 - S_L)(1 - S_B)(1 - S_S)$$

S_L = Längsschwindung
S_B = Breitenschwindung
S_S = Dickenschwindung

Für die praktische Auslegung von Spritzgießwerkzeugen ist jedoch die **lineare Schwindung** wichtiger.

$$S_l = \frac{l_W - l_F}{l_W}$$

S_l = lineare Schwindung
l_W = kaltes Werkzeugmaß
l_F = Formteilmaß

Die **Schwindung** ist eine **relative Größe**. Ihre Angabe erfolgt in Prozent.

Ein reales Formteil kann nicht in alle drei Richtungen (Längen-, Breiten- und Dickenrichtung) gleichmäßig schwinden. Nur in Dickenrichtung besteht eine fast unbehinderte Schwindung. Der Großteil der Volumenschwindung wird daher in die Wanddickenschwindung des Formteils „verbraucht". Selbst wenn keine formtechnischen Schwindungsbehinderungen vorliegen, kommt es durch die von außen nach innen einfrierenden Formteilschichten zu einer Schwindungsbehinderung in Längen- und Breitenrichtung.

Durch die werkzeugbedingte und die innnere Schwindungsbehinderung ergeben sich üblicherweise folgende Schwindungsverhältnisse:

- **Dickenschwindung**
  $S_S = 0{,}9 - 0{,}95 * S_V$
- **Längen- bzw. Breitenschwindung**
  $S_{L/B} = 0{,}1 - 0{,}05 * S_V$

S_V = Volumenschwindung
S_S = Dickenschwindung
$S_{L/B}$ = Längs- bzw. Breitenschwindung

Die angegebenen Schwindungsverhältnisse $S_{L/B}$ berücksichtigen noch nicht die eventuell vorhandenen anisotropen Schwindungen durch Füll- und Verstärkungsstoffe.

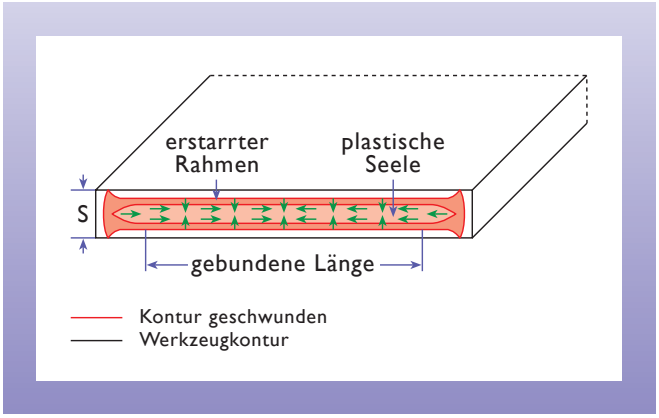


Bild 2: Innere Schwindungsbehinderung in einer abkühlenden Kunststoffplatte [4]

Da die Schwindung eine zeitabhängige Größe ist, sollte zur genauen Definition angegeben werden, zu welchem Zeitpunkt nach der Entformung aus dem Werkzeug die Schwindung gemessen wird.

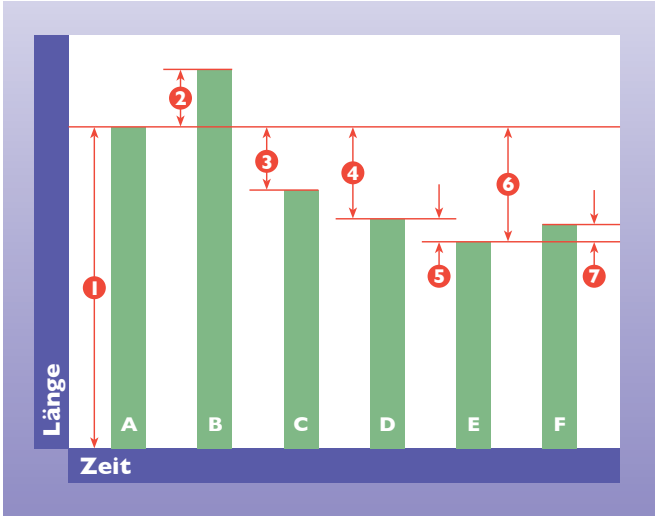


Bild 3: Zeitliche Änderung eines Formteilmaßes durch die Schwindung

1: Werkzeugmaß
2: Wärmedehnung des Werkzeuges
3: Entformungsschwindung S_E
4: Verarbeitungsschwindung S_{Ver}
5: Nachschwindung S_N
6: Gesamtschwindung S_G
7: evtl. Längenzunahme durch Konditionierung z. B. bei Polyamiden

A: kaltes Werkzeug
B: warmes Werkzeug
C: Formteil nach Entformung
D: Formteil z. B. nach 24 h in Normalklima
E: Formteil nach langer Zeit oder Wärmelagerung
F: Formteil nach Wasseraufnahme z. B. bei Polyamiden

Man unterscheidet zwischen der **Entformungsschwindung S_E**, die unmittelbar nach dem Auswerfen des Spritzgießteils gemessen wird, der **Verarbeitungsschwindung S_{Ver}** und der **Nachschwindung S_N**.

Nach DIN 16901 wird die Verarbeitungsschwindung (S_{Ver}) von technischen Kunststoffen bei der Spritzgießverarbeitung als Differenz zwischen den Maßen des kalten Werkzeuges und denen des Formteils nach 16-stündiger Lagerung im Normklima angegeben [3]. Bei längerer Lagerung, unter Einfluss von Temperatur, kann eine weitere Maßänderung, die als Nachschwindung (S_N) bezeichnet wird, auftreten.

Verarbeitungsschwindung S_{Ver}

$$S_{Ver} = \frac{l_W - l_{F1}}{l_W}$$

Nachschwindung S_N

$$S_N = \frac{l_{F1} - l_{F2}}{l_W}$$

l_{F1} = Formteilmaß vor Nachschwindung
l_{F2} = Formteilmaß nach Nachschwindung
l_w = kaltes Werkzeugmaß

Die Ursachen für die Nachschwindung liegen in der Relaxation von Eigenspannungen, Reorientierungsvorgängen und bei teilkristallinen Werkstoffen in einer möglichen Nachkristallisation.

Bei einigen Thermoplasten kann zusätzlich zur Nachschwindung eine Konditionierung (Wasseraufnahme) erfolgen. Besonders bei Polyamiden tritt dieser Effekt auf.

Bei nicht werkstoffgerechter Verarbeitung kann die Nachschwindung erheblich sein.

Als Gesamtschwindung wird bezeichnet:

Gesamtschwindung =
Verarbeitungsschwindung + Nachschwindung

2 Einflussgrößen bei der Schwindung



Bild 4: Einflussgrößen auf die Schwindung [2]

Das Zusammenspiel der Einflussgrößen ist sehr komplex. Man findet Größen, die sich gegenseitig beeinflussen und voneinander abhängig sind. So kann z. B. ein schlecht dimensionierter Anguss (Formteil) direkt die Nachdruckwirkungen (Verarbeitung) negativ beeinflussen.

Auf die Wechselwirkung zwischen den Einflussgrößen wird im Nachfolgenden nicht eingegangen. Anhand der oben genannten Einflussgrößen werden die prinzipiellen Auswirkung auf die Schwindung erklärt.

Entscheidend ist bei dieser Betrachtung, dass die Korrelation der Einflussgrößen mit der Schwindung immer mit Bezug auf die eingangs aufgeführten Mechanismen

- thermodynamischer Zustandsverlauf, Eigenspannungen und Kristallisation

gesehen wird. Hierdurch lässt sich die Abhängigkeit der Schwindung von den Einflussgrößen erklären.

2.1 Werkstoff

2.1.1 Amorphe und teilkristalline Thermoplaste

Das unterschiedliche Schwindungsverhalten der beiden Materialtypen lässt sich sehr anschaulich im p-v-ϑ-Diagramm darstellen:

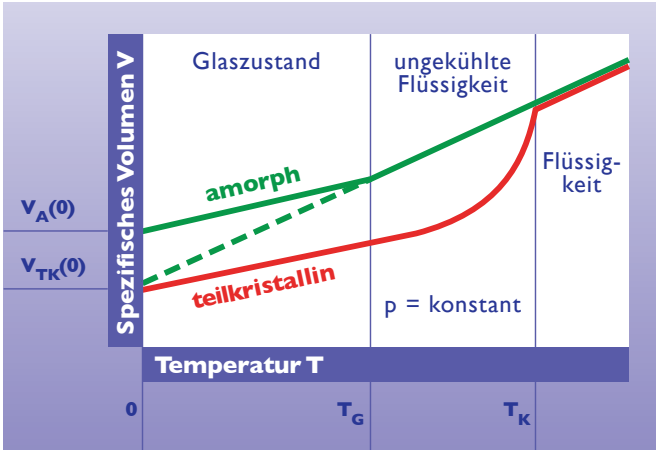
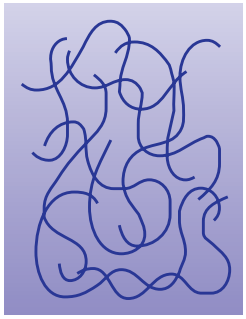


Bild 5: Qualitatives Druck-, spezifisches Volumen- und Temperatur-Diagramm (p-v-ϑ-Diagramm) für einen amorphen und einen teilkristallinen Thermoplast

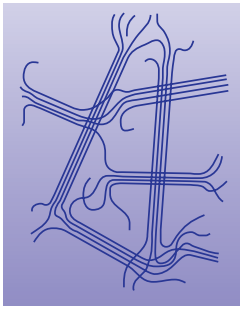
Amorphe Werkstoffe



Die grüne Kurve in Bild 5 zeigt die Abhängigkeit des spezifischen Volumens von der Temperatur eines amorphen Thermoplastes (z. B. ABS, PC).

Hierbei ist bei abnehmender Temperatur eine Unterkühlung der Schmelze festzustellen. Unterhalb der Glasübergangstemperatur T_G nimmt das Volumen weniger stark ab (geringere Steigung) und der Werkstoff befindet sich in einem Glaszustand – „unterkühlte Flüssigkeit". Das in dieser Phase vorhandene freie Volumen bleibt nahezu konstant [5].

Teilkristalline Werkstoffe



Der rote Kurvenverlauf in Bild 5 stellt den Verlauf des spezifischen Volumens in Abhängigkeit von der Temperatur für einen teilkristallinen Kunststoff (z. B. PA, PBT) dar.

Bei teilkristallinen Thermoplasten kommt es im Verlauf der Abkühlung zur Kristallisation. Bei Unterschreiten der Kristallisationstemperatur T_K gehen lineare oder nur schwach verzweigte Hochpolymere mit gleichartigen und gleichsinnig angeordneten Kettenteilen in einen Ordnungszustand geringerer freier Enthalpie über. Die Polymerketten liegen teilweise dicht gepackt parallel nebeneinander und bilden feine Kristallite, in denen – bis auf wenige Defektstellen – eine fast vollständige Ordnung besteht. Anders als bei den rein kristallinen Werkstoffen gibt es hier keinen einzelnen Kristallisationspunkt, sondern einen Übergangsbereich [5].

Die Überlagerung von fortschreitender Kristallisation und thermischer Kontraktion ergibt den parallelförmigen Kurvenverlauf im teilkristallinen Bereich. Gegenüber den rein amorphen Werkstoffen treten größere Schwindungswerte auf.

Der Einfluss des Drucks während der Abkühlung auf das spezifische Volumen ist in Bild 6 dargestellt.

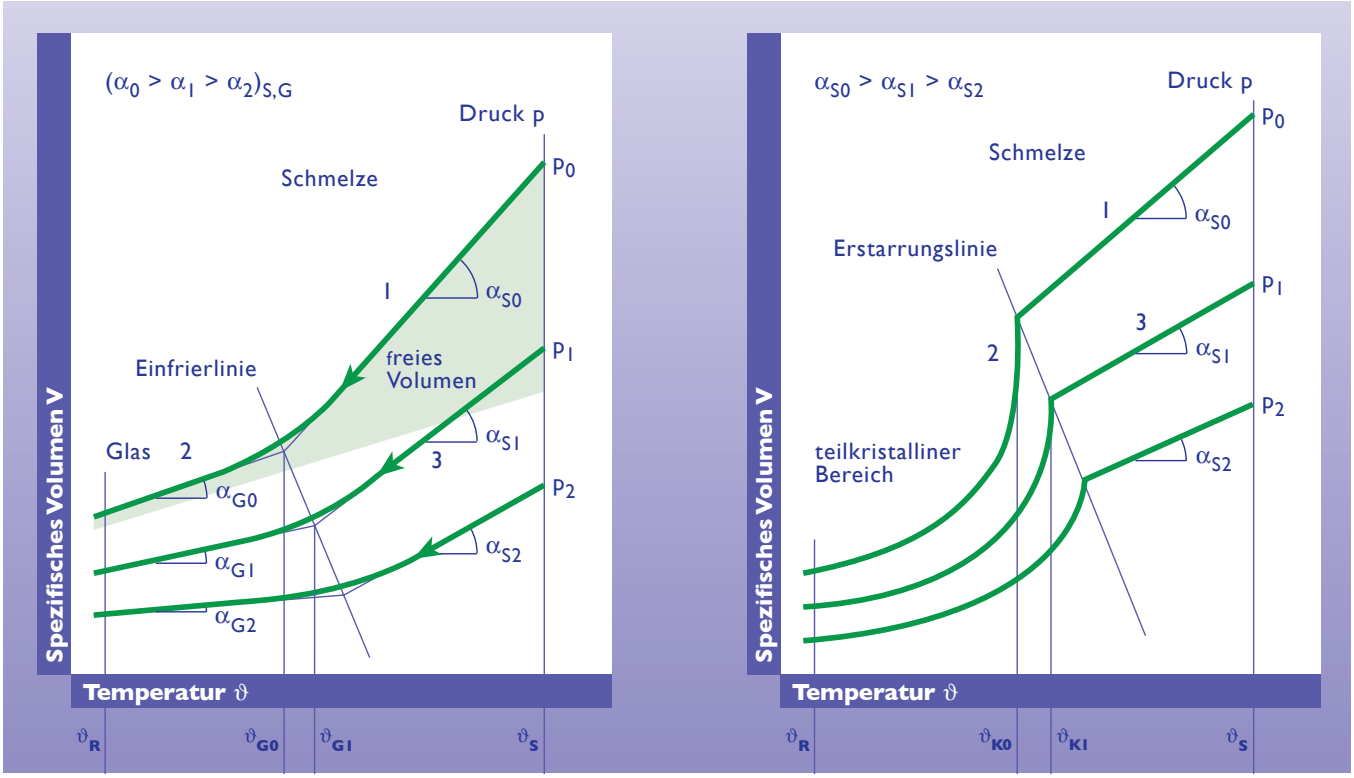


Bild 6: p-v-ϑ-Diagramme eines amorphen (links) und eines teilkristallinen (rechts) Kunststoffes bei langsamer Abkühlung unter verschiedenen Drücken p_0, p_1, p_2

Bild 6 zeigt, dass durch die größere „Packungsdichte" bei steigendem Druck die Glasübergangstemperatur ϑ_G bei amorphen Kunststoffen und die Kristallisationstemperatur ϑ_K bei teilkristallinen Kunststoffen zu höheren Temperaturen verschoben wird [5]. Das bei Raumtemperatur unter hohem Druck erreichte spezifische Volumen ist geringer als bei Atmosphärendruck. Bei Druckentlastung wird das spezifische Volumen bei Normaldruck von 1 bar angestrebt.

In Bild 7 sind für einige amorphe und teilkristalline Thermoplaste Bereiche für lineare Schwindungen angegeben. Diese Schwindungsbereiche resultieren aus dem Einfluss von Verarbeitung, Prozess, Werkzeug, Formteil (z. B. Wanddicke) und Füll- bzw. Verstärkungsstoffe. Die Schwindung der unverstärkten amorphen Thermoplaste (Bayblend®, Makrolon®, Apec®) liegt unter 1 %, die der unverstärkten teilkristallinen Thermoplaste (Polyamide) liegt über 1 %. Bei den verstärkten Werkstoffen (GF) stellt man eine erhöhte Anisotropie (Richtungsabhängigkeit) der Schwindung fest.

Amorphe Thermoplaste

S < 1 %

Relativ isotrope Schwindungswerte, daher nur geringe Verzugsneigung

Teilkristalline und verstärkte Thermoplaste

S > 1 %

Schwindung abhängig von Faser- und Molekülorientierung, daher starke Verzugsneigung

An Schwindungsmessplatten (150 x 90 x 3 mm) unter empfohlenen Verarbeitungsbedingungen ermittelt. Nachdruck ca. 500 bar.

Schwindungswerte beziehen sich auf die Produktklasse und nicht auf Einzeltypen und können nicht zur genauen Werkzeugauslegung genutzt werden.

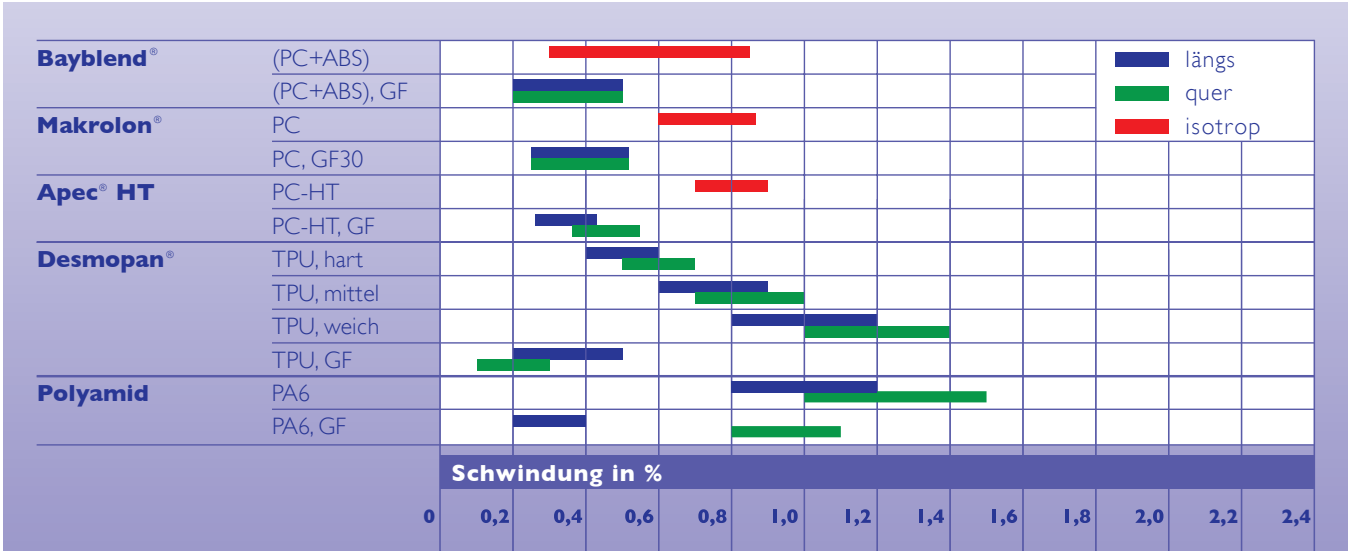


Bild 7: Schwindungsbereiche von amorphen und teilkristallinen Thermoplasten [2]

2.1.2 Kristallisationsverhalten

Bei teilkristallinen Thermoplasten kommt es im Verlauf der Abkühlung zur Kristallisation. Dieser Kristallisationsvorgang ist temperatur- und zeitabhängig. Die Abkühlgeschwindigkeit hat großen Einfluss auf Keimbildung und Keimwachstum unddamit auf das entstehende Gefüge.

Je langsamer die Abkühlung erfolgt (durch hohe Formnestoberflächentemperaturen), desto größer ist der Kristallisationsgrad – die Schwindung steigt.
Ist der Temperaturabfall zu schnell, so ist es möglich, dass Keimbildung und Keimwachstum unterdrückt werden. Das Resultat ist ein Gefüge mit niedrigem Kristallisationsgrad und damit niedriger Verarbeitungsschwindung. Es kann dann zu verstärkter Nachkristallisation und damit zu unerwünschter Nachschwindung kommen.

2.1.3 Füllstoffe und Verstärkungsstoffe

Füllstoffe mit **kugeliger Gestalt** reduzieren durch geringeres thermisches Dehnungsvermögen das Schwindungsverhalten.

Stärker als Füllstoffe mit kugeliger Gestalt beeinflussen **Glasfasern** die Schwindung. Die Glasfasern stellen eine zusätzliche interne Behinderung dar, die in Glasfaserrichtung die thermische Kontraktion behindert und so zu geringeren Schwindungswerten führt. Quer zur Orientierungsrichtung wirken die Fasern wie die oben genannten kugeligen Füllstoffe und reduzieren, wenn auch nicht im gleichen Maße, ebenfalls die Schwindung.

Tabelle 1 zeigt, dass bei Polyamid PA6 durch den Füllstoffgehalt und die Füllstoffart die Schwindung in hohem Maße beeinflusst wird.

Füllstoff	Schwindung längs/quer in %
Unverstärkt	1,0 / 1,2
Mineral	1,2 / 1,2
30 % Glasfasern	0,2 / 0,8
30 % Glaskugeln/Glasfasern	0,3 / 0,9

Tabelle 1: Einfluss des Füllstoffes auf das Schwindungsverhalten verschiedener Polyamid-PA6-Typen (Nachdruck: 500 bar)

Durch den Einsatz von Glasfasern kann die Schwindung um 50 % bis 80 % in Glasfaserrichtung reduziert werden. Allerdings ist bei mehr als ungefähr 20 % bis 25 % Glasfaserzusatz bei teilkristallinen Thermoplasten keine weitere Reduzierung des Schwindungsverhaltens festzustellen [2].

Dies ist in Bild 8 verdeutlicht. Es zeigt, wie sich mit der Variation des Glasfasergehaltes die Schwindung ändert und bei dem teilkristallinen Polyamid auf einen Grenzwert zuläuft.

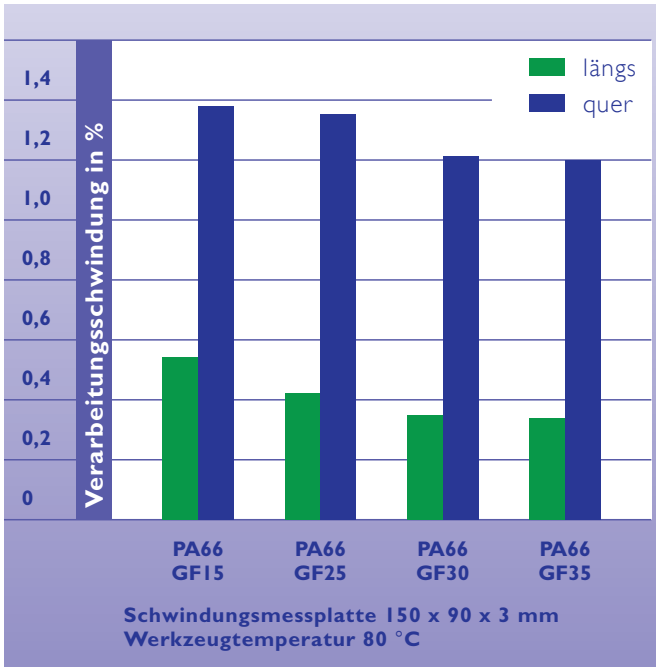


Bild 8: Einfluss des Glasfasergehaltes auf die Schwindung bei teilkristallinem Polyamid (PA66, GF)

2.2 Verarbeitungsprozess

Die qualitativen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Prozessgrößen und der Verarbeitungsschwindung sind in Bild 9 dargestellt.

Im Nachfolgenden werden die Zusammenhänge zwischen der Verarbeitungsschwindung und den Prozessgrößen näher erläutert.

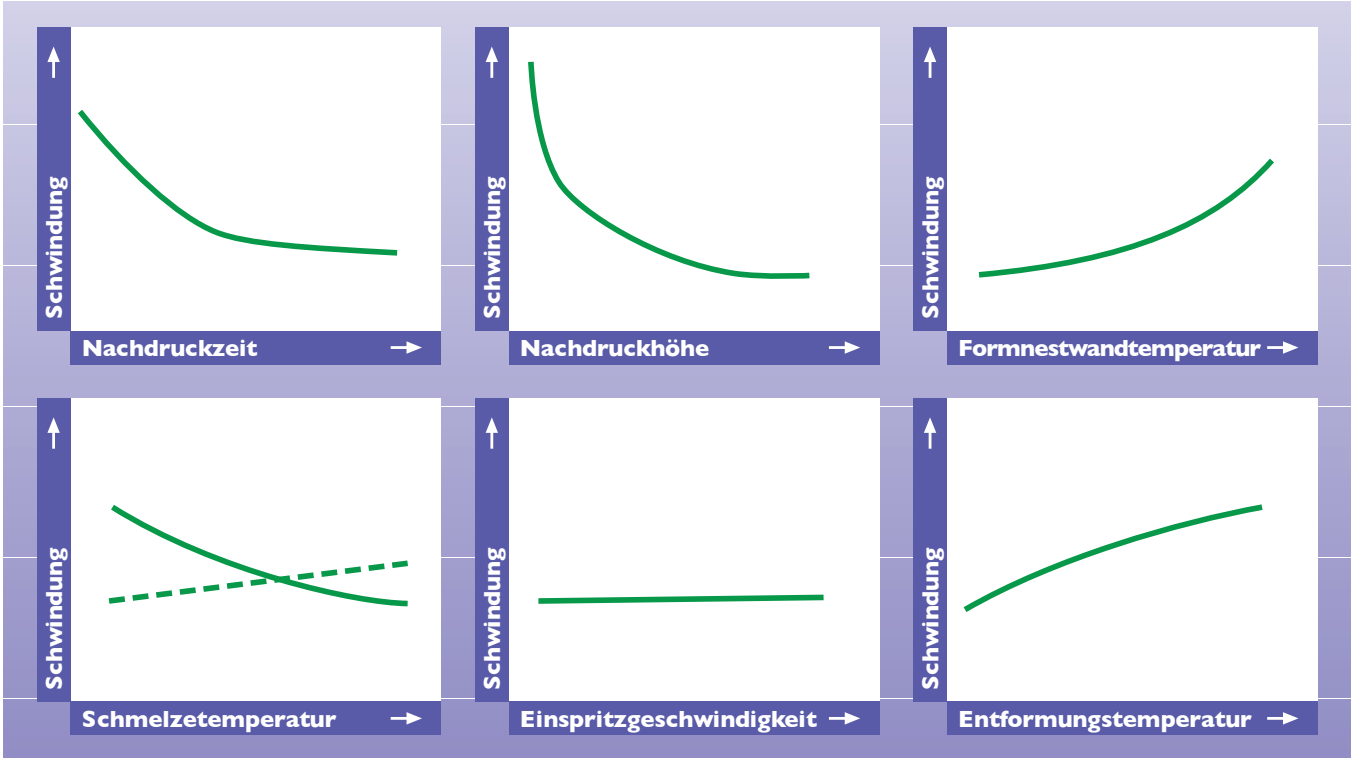
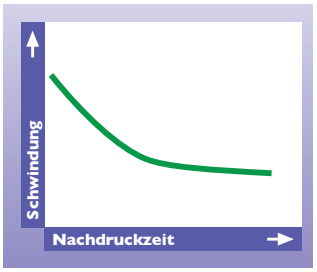


Bild 9: Einfluss der Verarbeitungsparameter auf das Schwindungsverhalten [2]

2.2.1 Nachdruckzeit

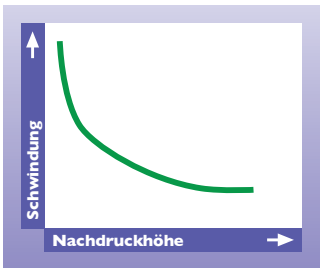


Aufgabe des Nachdruckes ist, die Schwindung des Werkstoffes durch Nachfördern von Schmelze auszugleichen. Unter Wirkung des Nachdrucks wird das Material in der Kavität komprimiert und die durch den Abkühlprozess hervorgerufene Volumenkontraktion durch nachfließende Schmelze kompensiert.

Daher hat die Nachdruckzeit einen großen Einfluss auf das Nachfördern der Schwindungskompensation. Je länger die Nachdruckzeit, desto geringer die Schwindung.

Bei amorphen Werkstoffen ist der Einfluss der Nachdruckzeit wegen des geringeren nachzufördernden Volumens etwas geringer als bei teilkristallinen Kunststoffen [1]. **Um eine ausreichende Nachdruckzeit zu gewährleisten, sollte auf einen genügend großen Anschnitt und Angussquerschnitt geachtet werden.** Der Anschnitt sollte an dickwandigen Formteilbereichen liegen.

2.2.2 Nachdruckhöhe



Sowohl bei amorphen als auch bei teilkristallinen Thermoplasten hat die Nachdruckhöhe entscheidenden Einfluss auf die Höhe der Schwindung. Je höher der wirkende Nachdruck, desto geringer ist die Verarbeitungsschwindung.

Die Beeinflussbarkeit durch den Nachdruck ist allerdings degressiv, d. h., mit zunehmendem Nachdruck wird die Schwindungsreduktion geringer.

Bei optimaler Auslegung des Angusssystems und des Formteils kann bei Erhöhung des Nachdrucks bei teilkristallinen Thermoplasten eine Verringerung der Schwindung von bis zu 0,5 % erreicht werden. Bei amorphen Werkstoffen werden aufgrund des geringeren Schwindungspotenzials nur Werte von bis zu 0,2 % erreicht [1].

Bild 10 zeigt, wie sich aufgrund der unterschiedlichen angussnahen und angussfernen Nachdruckwirkungen unterschiedliche Schwindungen einstellen.

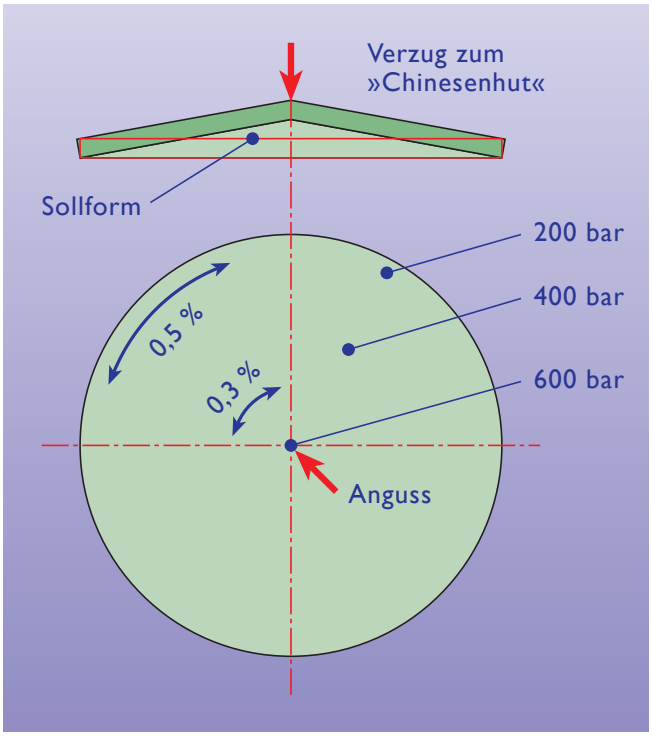
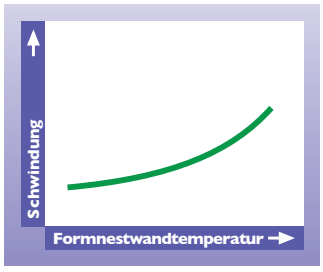


Bild 10: Unterschiedliche Nachdruckwirkung angussnah und angussfern bei einer zentral angespritzten Rundscheibe aus einem unverstärkten Thermoplast [2]

2.2.3 Formnestwandtemperatur

Die Verarbeitungsschwindung steigt mit zunehmender Formnestwandtemperatur. Beim Einfluss der Wandtemperatur überlagern sich Einflüsse, die den Strömungsprozess (Nachdruckphase), die Kristallisation und das Eigenspannungsprofil betreffen. Dies gilt besonders für teilkristalline Werkstoffe.



Die Werkzeugwandtemperatur bestimmt neben einer besseren oder schlechteren Nachdruckwirkung auch sehr entscheidend die Abkühlgeschwindigkeit (Bild 11). Eine niedrige Werkzeugtemperatur ϑ_W (40 °C) führt zu großen Abkühlgeschwindigkeiten und dadurch bei dem Polyamid in Bild 11 zu einem geringen Kristallisationsgrad. Dies führt zu einer geringen Verarbeitungsschwindung. Hohe Nachschwindung ist die Folge.

Bei hoher Werkzeugtemperatur ϑ_W (120 °C) ist der Anteil der sich direkt einstellenden Verarbeitungsschwindung größer (hoher Kristallisationsgrad). Das Nachschwindungspotenzial wird drastisch verkleinert. Bei beiden Verarbeitungstemperaturen ist die Gesamtschwindung nahezu gleich.

$\vartheta_W \uparrow \rightarrow V_{Abkühl} \downarrow \rightarrow S_{Ver} \uparrow$

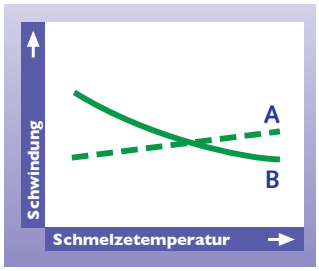
$\vartheta_W \downarrow \rightarrow V_{Abkühl} \uparrow \rightarrow S_{Ver} \downarrow$

ϑ_W = Werkzeugtemperatur
$V_{Abkühl}$ = Abkühlgeschwindigkeit
S_{Ver} = Verarbeitungsschwindung



Bild 11: Schwindung in Abhängigkeit von der Formnestoberflächentemperatur aus unverstärktem Polyamid PA6

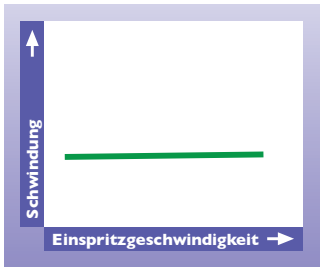
2.2.4 Schmelzetemperatur



Auch die Schmelzetemperatur hat einen Einfluss auf das Schwindungsverhalten. Hierbei gibt es zwei entgegengerichtete Wirkungen. Zum einen führt eine erhöhte Schmelzetemperatur zur einem erhöhten thermischen Kontraktionspotenzial der Formmasse (Schwindungsvergrößerung, A). Zum anderen bewirkt eine erhöhte Schmelzetemperatur eine Verringerung der Schmelzeviskosität und somit eine bessere Druckübertragung und damit eine Schwindungsreduktion (B). Im Regelfall wird der Kurvenverlauf B gemessen und beobachtet.
Die verbesserte Druckübertragung überwiegt gegenüber dem Kontraktionspotenzial. Bei ungünstigen Wanddickenverhältnissen und schlechter Druckübertragung kann man aber durch eine Erhöhung der Massetemperatur erhöhte Schwindungen feststellen (Einfallstellen, Kurvenverlauf A) [1].

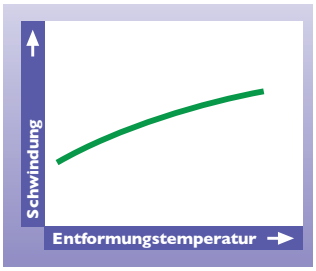
Insgesamt sollte die Einstellung und Einhaltung einer konstanten Schmelzetemperatur die Basis für Optimierungsversuche mit den übrigen Prozessparametern sein.

2.2.5 Einspritzgeschwindigkeit



Auf die Gesamtschwindung hat die Einspritzgeschwindigkeit praktisch keinen Einfluss. Offensichtlich heben sich die gegenläufigen Auswirkungen, z. B. auf die Orientierung und Umorientierung oder auf die Schererwärmung und die Druckverteilung, gerade auf.

2.2.6 Entformungstemperatur (längere Kühlzeit, längerer Formzwang)



Je länger das Formteil im Werkzeug verbleibt, desto länger ist die Kühlzeit und umso niedriger ist schließlich die Entformungstemperatur. Durch die längere Verweilzeit im Werkzeug erhöht sich die Dauer des aufgeprägten Formzwanges. Besonders bei teilkristallinen Thermoplasten stellt man bei niedrigeren Entformungstemperaturen geringere Verarbeitungsschwindungen fest.

Bei höheren Entformungstemperaturen (kürzere Kühlzeit) kommt es zu einem stärkeren Anstieg der Temperaturen in den äußeren Formteilschichten. Es findet eine „quasi Warmlagerung“ statt. Diese führt zum Abbau von Eigenspannungen und zum Anstieg der Schwindung. [6]

2.3 Formteilgeometrie

2.3.1 Wanddicken

Mit einer Variation der Formteildicke ändern sich quantitativ alle anderen Einflussgrößen auf die Schwindung (wie z. B. Nachdruckwirkung, Abkühlgeschwindigkeit).

Bei gleichen Masse- und Werkzeugtemperaturen kühlt ein dünneres Formteil schneller ab. Damit stehen allen thermisch bedingten Vorgängen (z. B. Kristallisation, Abkühleigenspannungen) kürzere Zeiten „zur Verfügung". Aufgrund der Änderung aller Randbedingungen mit der Wanddicke ist eine Aussage bezüglich des Dickeneinflusses nur schwer möglich [4].

Dennoch lassen sich prinzipielle Zusammenhänge zwischen der Schwindung und der Formteilwanddicke aufzeigen.

Die Bilder 12 und 13 zeigen die Abhängigkeit der Schwindung von der Wanddicke bei teilkristallinen und amorphen Thermoplasten. Besonders bei den unverstärkten teilkristallinen Thermoplasten (Bild 12 links) zeigt sich ein großer Einfluss der Wanddicke auf die Schwindung. Hier führt die größere Wanddicke zu einer langsameren Abkühlung und somit zu günstigeren Kristallisationsbedingungen. Der Kristallisationsgrad ist höher, die Schwindung daher ebenfalls.

Die Bilder verdeutlichen, dass die Schwindungsunterschiede bei unterschiedlichen Wanddicken in einem Kunststoffformteil groß sein können. Treten unterschiedliche Schwindungen auf, kann es zu Verzug kommen. Dies ist bei teilkristallinen Thermoplasten stärker ausgeprägt als bei amorphen Thermoplasten (Bild 13).

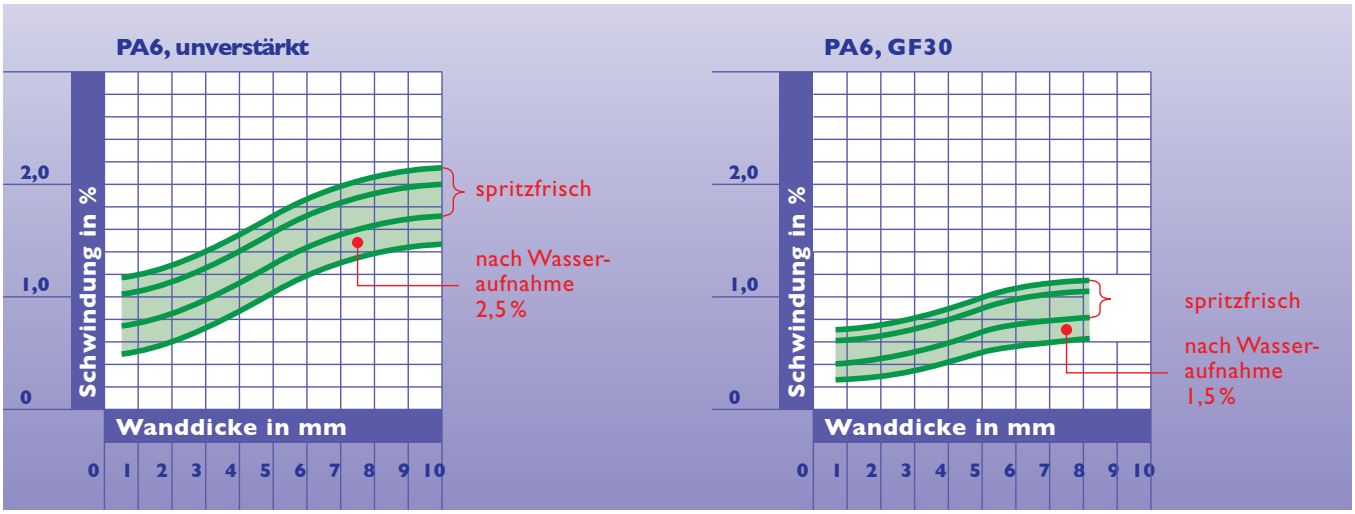


Bild 12: Abhängigkeit der Schwindung von der Wanddicke bei teilkristallinen Thermoplasten

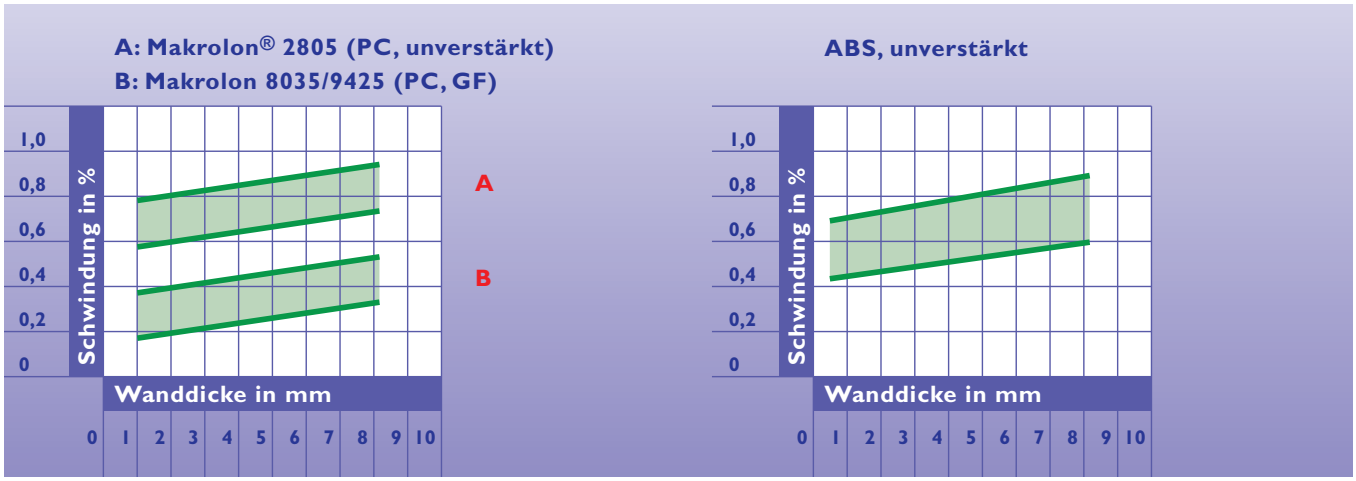


Bild 13: Abhängigkeit der Schwindung von der Wanddicke bei amorphen Thermoplasten

2.3.2 Wanddickenreduzierung am Fließwegende

Wie Bild 14 zeigt, ist die Nachdruckwirkung angussfern geringer als angussnah. Hieraus resultiert die größere Schwindung angussfern. Aus diesem Grund ist es oft sinnvoll, die Wanddicke angussfern (am Fließwegende) zu reduzieren. Durch die Wanddickenreduzierung liegt so in den angussfernen Bereichen ein geringeres „Schwindungspotenzial" vor, sodass die Schwindungsunterschiede zu den angussnahen Bereichen ausgeglichen werden.

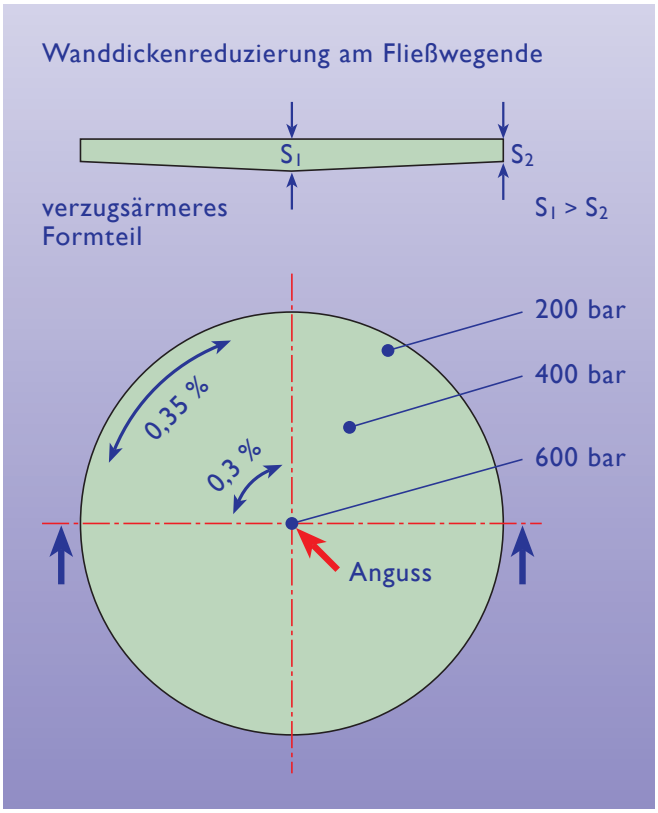


Bild 14: Geringe Verzugsneigung durch Wanddickenreduzierung am Fließwegende einer zentral angespitzten Rundscheibe aus einem unverstärkten Thermoplast

2.3.3 Rippen

Rippen können die Schwindung von Formteilen und hier besonders die Gleichmäßigkeit der Schwindung stark beeinflussen. Rippen sollen zur Einhaltung eines gewissen Rippen-Grundwanddicke-Verhältnisses dünner ausgeführt werden als die Grundwand, auf der sie angebunden werden. Aufgrund der oben geschilderten Zusammenhänge zwischen der Schwindung und der Wanddicke schwinden die Rippen im Allgemeinen weniger stark (sie „bleiben länger") als die übrigen Formteilmaße, die Folge kann Verzug sein.

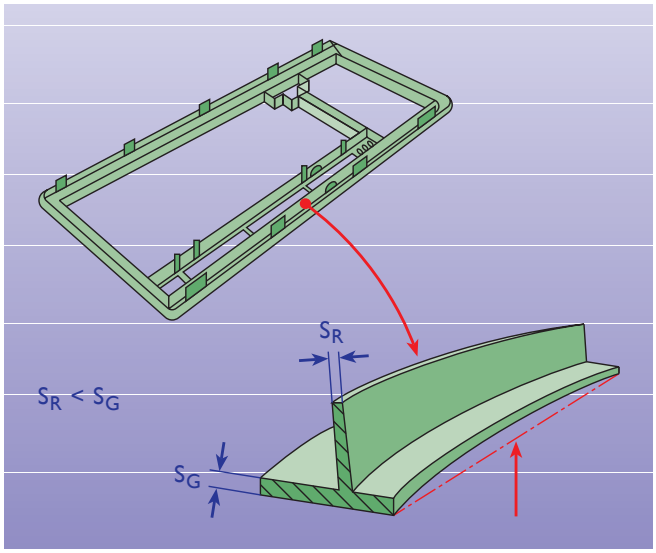


Bild 15: Verzug durch Rippen-Grundwanddicken-Unterschiede [2]

2.4 Werkzeug

2.4.1 Temperierung

Unterschiedliche Temperierung in verschiedenen Formteilbereichen führt zu unterschiedlicher Schwindung und damit zu unterschiedlichen Formteileigenschaften (Bild 16).

Bei unterschiedlicher Werkzeugtemperatur auf der Innen- und Außenseite bzw. der Düsen- und Auswerferseite des Formteils schwindet der Kunststoff auf der heißeren Seite stärker. Es kommt während dieser ungleichmäßigen Abkühlung zu einer Verschiebung des Temperaturprofiles in der erstarrenden Schmelze und damit zu unterschiedlichen Schwindungspotenzialen und zu unterschiedlichen Abkühlspannungen. Es stellt sich eine Art Bimetall-Effekt ein.

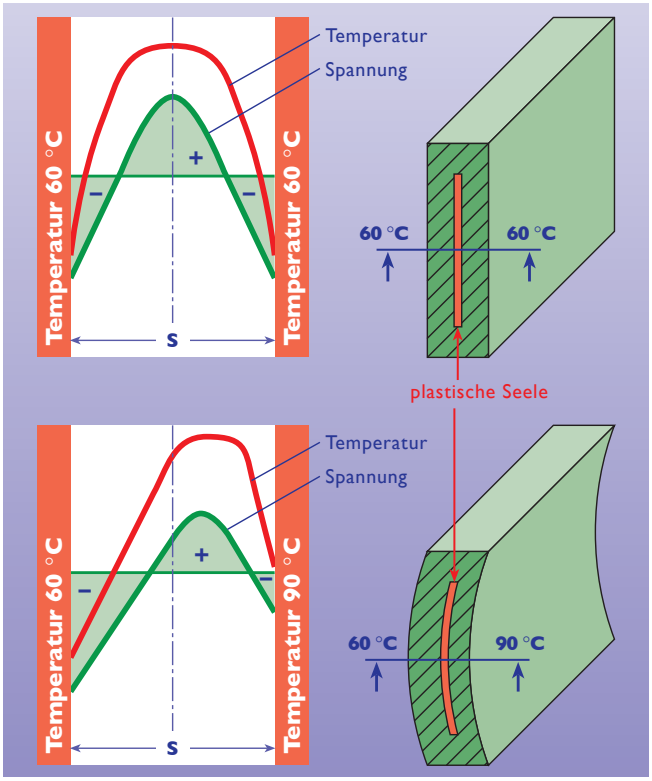


Bild 16: Verzug als Folge unterschiedlicher Werkzeugtemperierung

Aufgrund der sich einstellenden unsymmetrischen Spannungsverteilung (Bild 16 unten) kann es zum Verzug des Formteils kommen.

Daher sollte auf eine gleichmäßige Werkzeugwandtemperatur im Spritzgießwerkzeug geachtet werden. Der Einfluss der Werkzeugtemperierung ist bei unverstärkten Thermoplasten deutlich größer als bei z. B. glasfaserverstärkten Thermoplasten.

Bei Letztgenannten überwiegt der Einfluss der Verstärkungsstoffe auf die Schwindung (Kap. 2.1.3).

2.4.2 Anschnittart

Unterschiedliche Formteilgeometrien erfordern oft unterschiedliche Arten der Anbindung.

Im Hinblick auf die Schwindung gilt für jede Angussart (Film-, Punkt-, Tunnelanguss usw.), dass durch die Konstruktion des Angusses optimale Voraussetzungen zu schaffen sind, um die Schwindung durch eine gute Nachdruckwirkung (Nachdruckhöhe und -zeit) beeinflussen zu können.

So bietet der in Bild 17 dargestellte Tunnelanguss mit Stauboden nur dann optimale Voraussetzungen für eine gute Nachdruckwirkung (Schwindungsbeeinflussung), wenn der Stauboden optimal (kunststoff- und formteilbezogen) ausgeführt ist.

Die ungünstig ausgeführte Version reduziert nicht nur die Nachdruckwirkung, sondern bewirkt zusätzlich auch eine erhöhte thermische und mechanische Belastung der Schmelze während des Einspritzvorganges.

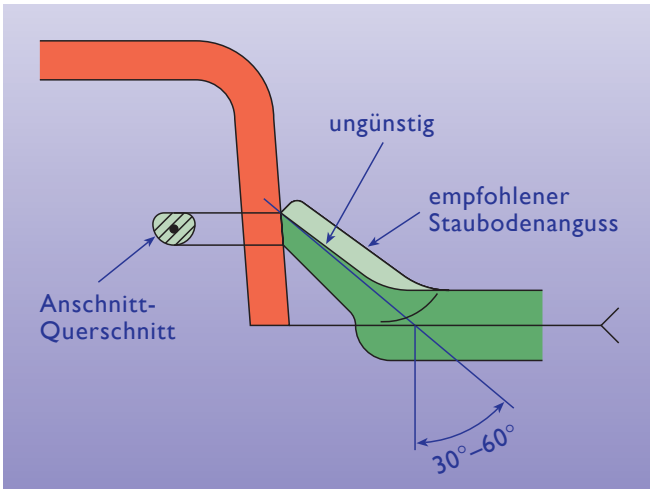


Bild 17: Empfohlene Ausführung eines Tunnelangusses [2]

2.4.3 Anschnittlage

Der Anschnitt sollte aus schwindungsrelevanter Sicht immer an der Stelle größter Wandstärke angeordnet sein. Hierdurch ist eine optimale Voraussetzung geschaffen, um Schwindungsunterschiede durch Wanddickenvariation auszugleichen.

3 Schwindungsrelevante Phänomene

Die große Anzahl der Einflussgrößen ist die Ursache für die Vielzahl der auftretenden Schwindungseffekte, wie sie in Bild 18 dargestellt sind.

Auf den nachfolgenden Seiten sind einige dieser Phänomene näher beschrieben.

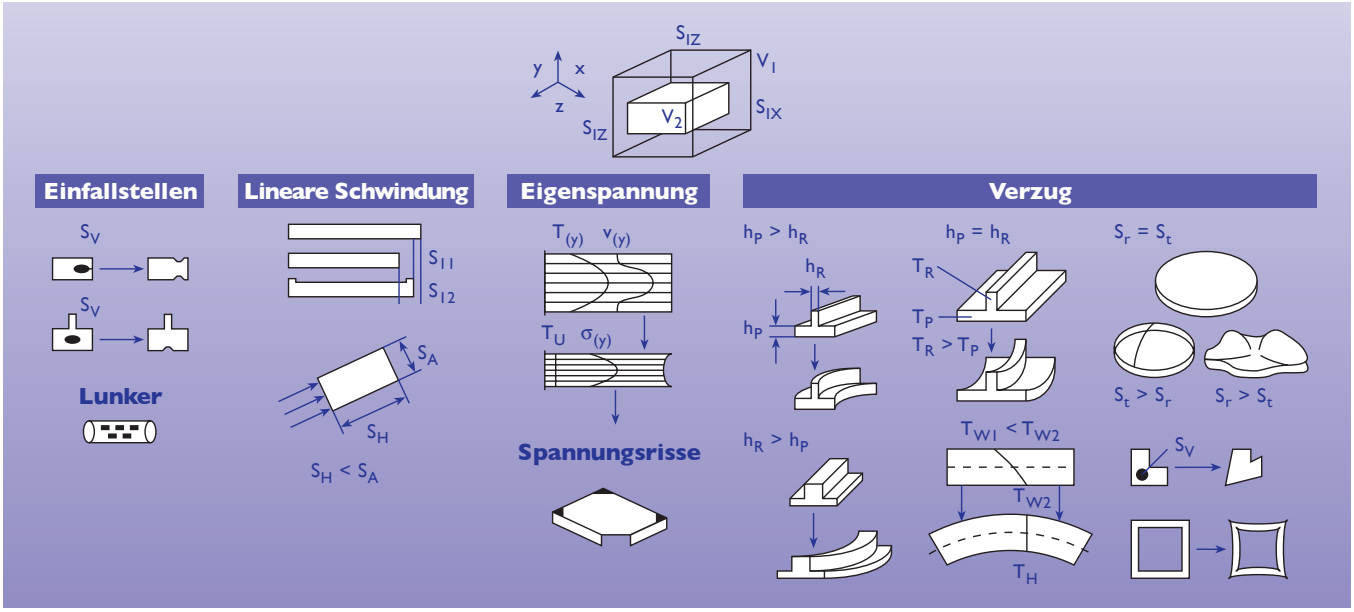


Bild 18: Schwindungs- und Verzugsphänomene [1]

3.1 Verzug

Verzug entsteht immer als Folge von Schwindungsunterschieden. Dies können z. B. sein:

- Schwindungsdifferenzen längs und quer zur Fließrichtung bei glasfaserverstärkten Werkstoffen
- Schwindungsdifferenzen aufgrund unterschiedlicher Formteilwanddicken
- Schwindungsdifferenzen aufgrund örtlich unterschiedlicher Werkzeugtemperaturen
- Schwindungsdifferenzen aufgrund lokal unterschiedlicher Nachdruckwirkungen

Durch ihr großes Schwindungspotenzial ist bei teilkristallinen Kunststoffen der Verzug im Allgemeinen größer als bei amorphen Kunststoffen (Kap. 2.1.1). Bild 19 zeigt ein Formteil, das aus drei verschiedenen Kunststoffen hergestellt wurde:

Zu erkennen ist in Bild 19, dass bei den teilkristallinen Werkstoffen der Verzug größer ist als bei dem amorphen PC mit 30 % GF. Die Ursache hierfür ist, dass das Schwindungspotenzial und der Unterschied im richtungsabhängigen Schwindungsverhalten bei den teilkristallinen PA und PBT größer ist und damit der Verzug stärker ausfällt.

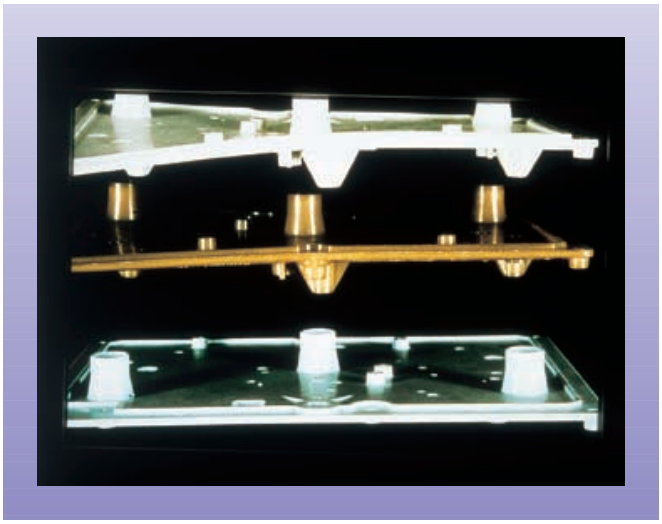


Bild 19: Verzug einer Trägerplatte aus verschiedenen Thermoplasten [2]
– PBT, GF30 (oben)
– PA6, GF30 (Mitte)
– PC, GF30 (unten)

In Bild 20 ist der prinzipielle Verzug einer zentral angebundenen Rundplatte aus glasfaserverstärktem Thermoplast dargestellt. Hierbei sind unterschiedlich auftretende Verzugsvarianten möglich.

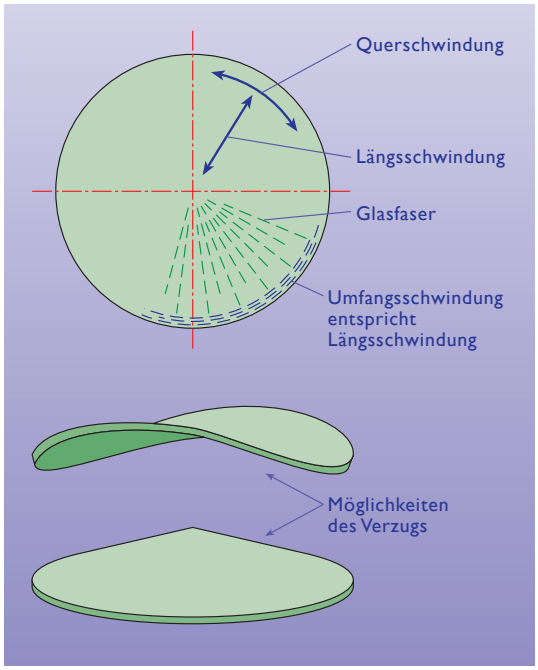


Bild 20: Verzug einer Rundplatte aus glasfaserverstärktem Thermoplast [2]

Bild 21 zeigt, dass bei gleichen Geometrien und Anbindungen unterschiedliches Verzugsverhalten zwischen verstärkten und unverstärkten Werkstoffen auftreten kann.

Bei glasfaserverstärkten Kunststoffen überwiegen die orientierungsbedingten Schwindungseinflüsse. Wanddickeneinflüsse wirken sich weniger stark aus.

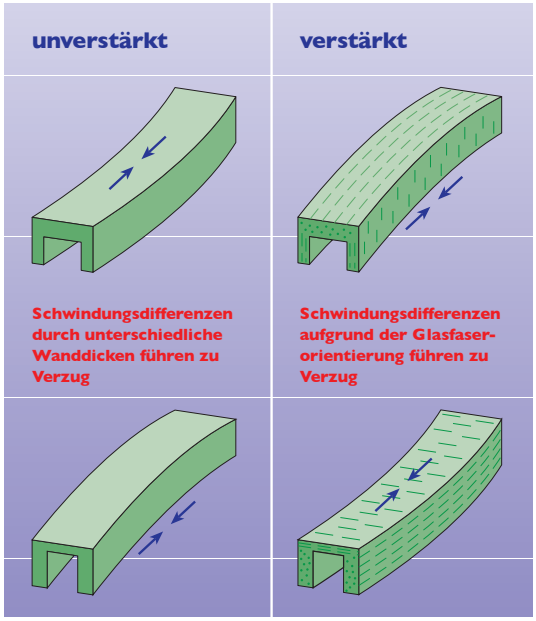


Bild 21: Unterschiedliches Schwindungsverhalten bei unverstärkten und verstärkten Thermoplasten [2]

Auch bei gleichmäßiger Ausrichtung der Glasfaser kann es zu Verzug kommen (Bild 22). Ein Grund hierfür kann das Umlegen der Glasfasern am Fließwegende und die damit verbundene Schwindungsdifferenz zwischen dem Mittelteil der Platte und dem Plattenende sein.

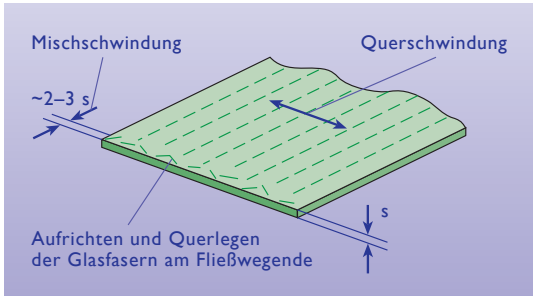


Bild 22: Glasfaserorientierung am Fließwegende [2]

Ist die Eigensteifigkeit der Platten zu gering (Wanddicke), kommt es zu Verzug. Durch Änderung der Geometrie lässt sich der Verzug reduzieren (Bild 23).

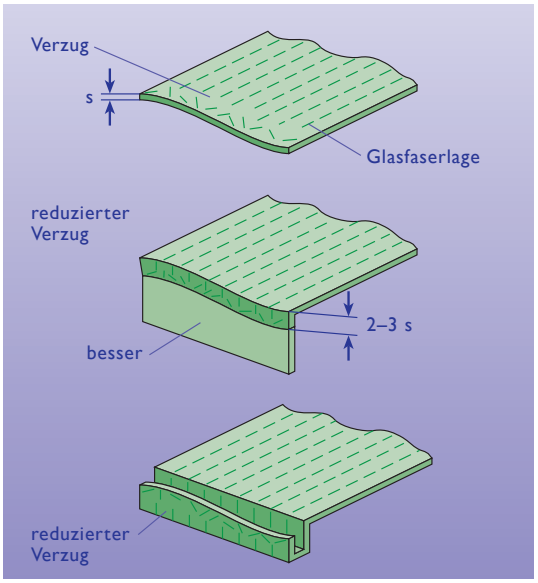


Bild 23: Verzugsreduzierung bei ebenen Platten [2]

Die Bilder 24 und 25 zeigen, wie durch eine Anschnittänderung die Glasfaserlage verändert und der Verzug bei einer Waffeleisenabdeckung aus PBT, GF30 verringert wurde.

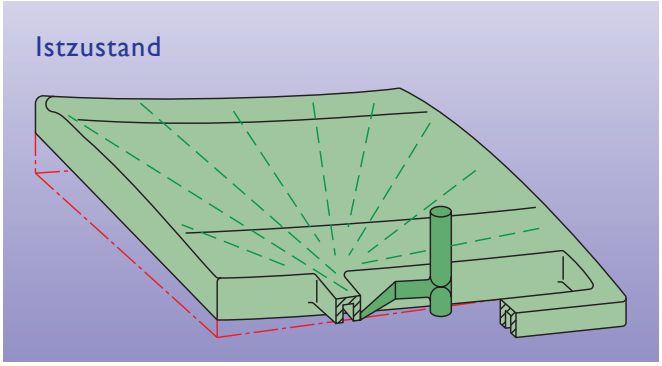


Bild 24: Verzug durch ungünstige Glasfaserlage [2]

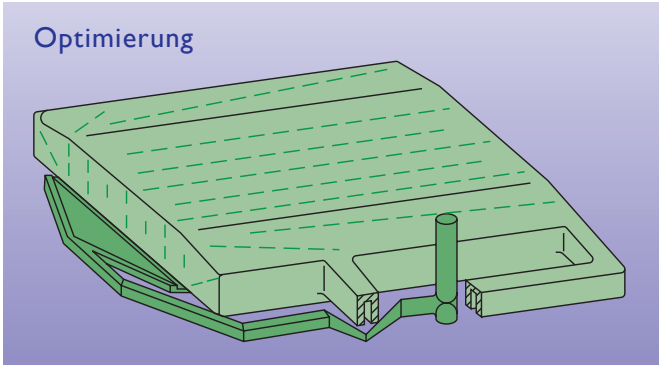


Bild 25: Angussverlegung führt zur Glasfaser-Längsorientierung und so zur Verzugsreduzierung [2]

3.2 Eigenspannungen

Durch Formschluss im Spritzgusswerkzeug werden bestimmte Dimensionsänderungen des Formteils verhindert. Diese Behinderung wirkt von außen auf das Formteil und wird daher als **externe** Kontraktionsbehinderung bezeichnet. Daneben ist ebenfalls eine **interne** Kontraktionsbehinderung festzustellen.

Zur Erklärung der Phänomene bei der internen Behinderung kann das Erstarrungsmodell nach STITZ [4] herangezogen werden.

Bild 26 zeigt die Zerlegung der Formteilwanddicke in Schichten.

Wegen des über der Wanddicke vorliegenden Temperaturprofils (A) weisen die Schichten unterschiedliches Schwindungspotenzial auf. Betrachtet man die Schichten entkoppelt, könnten sie aufeinander abgleiten und daher unterschiedlich stark kontrahieren (B).

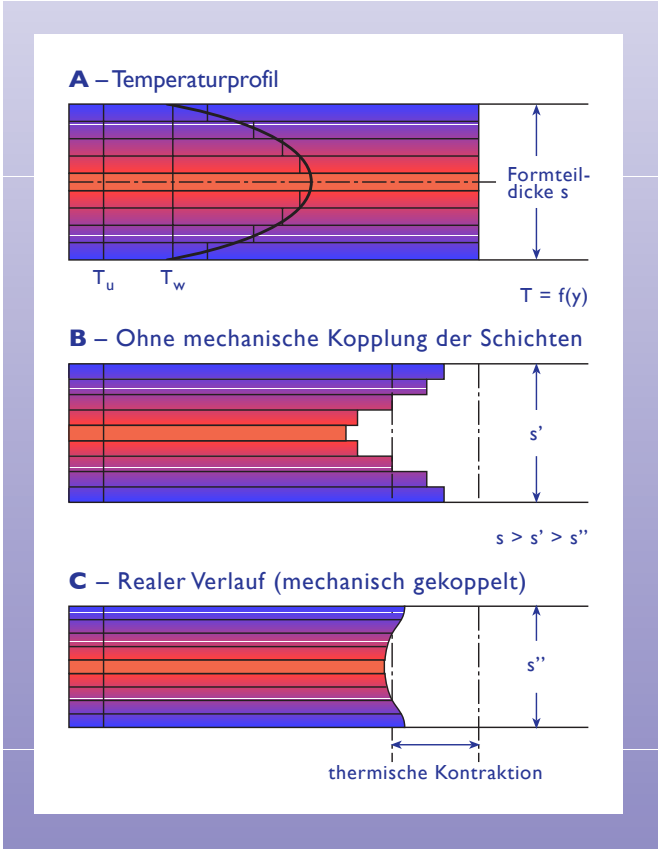


Bild 26: Thermische Kontraktion im Schichtenmodell [4]

Da die Schichten aber miteinander gekoppelt sind, wird dadurch ein Abgleiten untereinander verhindert.
Die inneren Schichten werden gedehnt und die äußeren Schichten werden gestaucht (C).

Aufgrund dieser Kopplung wird für die inneren Bereiche die thermische Kontraktion in Längs- und Querrichtung erschwert. Da kein Widerstand in Dickenrichtung der Deformation besteht, erfolgt die Volumenabnahme hauptsächlich in einer Abnahme der Dicke.

3.3 Einfallstellen/Lunker

Bei Einfallstellen führt die Volumenkontraktion zu lokalen Vertiefungen auf der Formteiloberfläche, da die erstarrte Randschicht noch nicht stabil genug ist, um die inneren Kontraktionskräfte aufzunehmen.

Sie treten hauptsächlich dort auf, wo ein heißer Schmelzekern bei gleichzeitig dünner Randschicht vorliegt. Die Kontraktionskräfte werden umso größer, je größer der Schmelzekern im Vergleich zum Gesamtquerschnitt wird. Dies ist z. B. bei Rippen der Fall, da hier auf der den Rippen zugewandten Seite eine schlechtere Wärmeabfuhr vorliegt (Bild 27 oben).

Lunker sind Vakuolen im Inneren des Formteilquerschnittes. Sie entstehen, wenn die erstarrte Randschicht den Kontraktionskräften widersteht und sich die inneren Schichten bei weiterer Abkühlung von den äußeren lösen (Bild 27 unten).

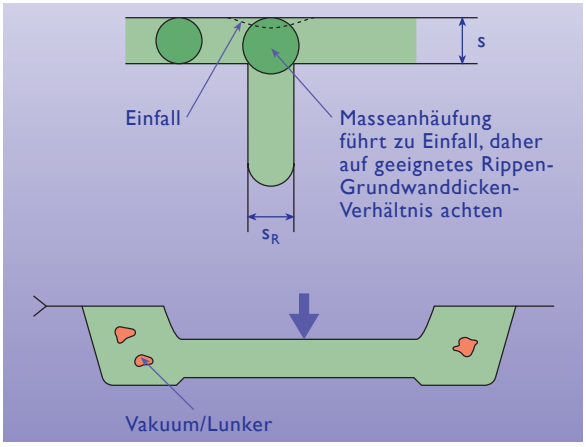


Bild 27: Lunker und Einfallstellen als Schwindungsphänomen [2]

3.4 Eckenverzug

Das als Eckenverzug bekannte Phänomen ist ebenfalls auf die Schwindung zurückzuführen. Durch ungleichmäßiges Abkühlen in den Ecken schwindet die Innenseite stärker (Bild 28). Die Folge sind Spannungen und Kräfte, die zum Eckenverzug führen.

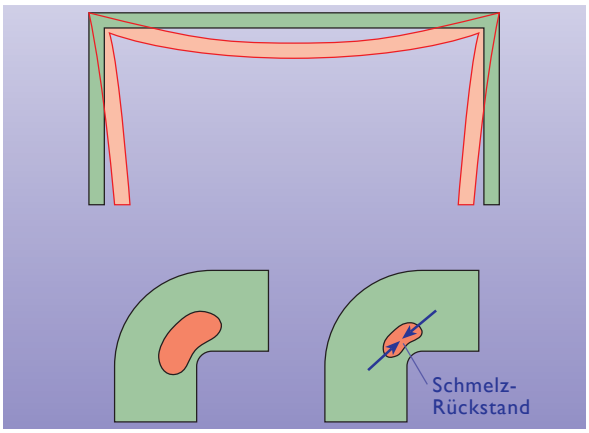


Bild 28: Eckenverzug durch ungleichmäßiges Abkühlverhalten

4 Literaturverzeichnis

[1] Pötsch, H. G.: Prozesssimulation zur Abschätzung von Schwindung und Verzug Thermoplastischer Spritzgussteile. Dissertation RWTH Aachen, 1991

[2] Covestro Deutschland AG – Leverkusen

3] N. N:. DIN 50014, Normklimate – Klimate und ihre technische Anwendung. Juli 1985

[4] Stitz, S.: Analyse der Formteilbildung beim Spritzgießen von Plastomeren als Grundlage für die Prozesssteuerung. Dissertation RWTH Aachen, 1973

[5] Zöllner, O.: Prozessgrößen beim Spritzgießen von Thermoplasten als Produktionskostenfaktor. Vortrag SKZ Würzburg, Bayer AG, 1993

[6] Hoven-Nievelstein, W. B.: Die Verarbeitungsschwindung thermoplastischer Formmassen. Dissertation RWTH Aachen, 1984

Typischer Wert
Die angegebenen Werte sind typische Werte. Sofern nicht ausdrücklich schriftlich mit uns vereinbart, stellen sie keine garantierten Werte oder Produktspezifikation im Sinne einer vereinbarten Beschaffenheit dar. Die angegebenen Werte können durch Werkzeuggestaltung, die Verarbeitungsbedingungen oder durch die Einfärbung des Produkts beeinflusst werden. Die angegebenen Eigenschaftswerte wurden, soweit nicht anders angegeben, an genormten Prüfkörpern bei Raumtemperatur ermittelt.

Es liegt außerhalb unserer Kontroll- und Einflussmöglichkeiten, in welcher Art und Weise und zu welchem Zweck Sie unsere Produkte, technischen Unterstützungen sowie Informationen (unabhängig ob mündlich, schriftlich oder anhand von Produktionsbewertungen erhalten), einschließlich vorgeschlagener Formulierungen und Empfehlungen, anwenden und/oder einsetzen. Daher ist es unerlässlich, dass Sie unsere Produkte, technischen Unterstützungen und Informationen sowie Formulierungen und Empfehlungen eigenverantwortlich daraufhin überprüfen, ob sie für die von Ihnen beabsichtigten Zwecke und Anwendungen auch tatsächlich geeignet sind. Eine anwendungsspezifische Untersuchung muss mindestens eine Überprüfung auf Eignung in technischer Hinsicht sowie hinsichtlich Gesundheit, Sicherheit und Umwelt umfassen. Derartige Untersuchungen wurden nicht notwendigerweise von Covestro durchgeführt.
Der Verkauf aller Produkte erfolgt – sofern nicht schriftlich anders mit uns vereinbart – ausschließlich nach Maßgabe unserer Allgemeinen Verkaufsbedingungen, die wir Ihnen auf Wunsch gerne zusenden. Alle Informationen und sämtliche technische Unterstützung erfolgen ohne Gewähr (jederzeitige Änderungen vorbehalten). Es wird ausdrücklich vereinbart, dass Sie jegliche Haftung (Verschuldenshaftung, Vertragshaftung und anderweitig) für Folgen aus der Anwendung unserer Produkte, unserer technischen Unterstützung und unserer Informationen selbst übernehmen und uns von aller diesbezüglichen Haftung freistellen. Hierin nicht enthaltene Aussagen oder Empfehlungen sind nicht autorisiert und verpflichten uns nicht. Keine hierin gemachte Aussage darf als Empfehlung verstanden werden, bei der Nutzung eines Produkts etwaige Patentansprüche in Bezug auf Werkstoffe oder deren Verwendung zu verletzen. Es wird keine konkludente oder tatsächliche Lizenz aufgrund irgendwelcher Patentansprüche gewährt.

Zum Schutz von Gesundheit, Sicherheit und Umwelt beachten Sie bitte vor Verarbeitung unserer Produkte das betreffende Sicherheitsdatenblatt (MSDS) und sonstige Produktkennzeichnungen.

Covestro Deutschland AG
Business Unit Polycarbonates
D-51365 Leverkusen

plastics@covestro.com
www.plastics.covestro.com