

work.info

Thermoformen, Warmformen, Biegen

Inhalt

1	Vorwort	3
----------	----------------	----------

2	Werkstoffe	4
2.1	Amorphe Thermoplaste	4
2.2	Teilkristalline Thermoplaste	5

3	Werkstoffeigenschaften	6
3.1	Spannungsrisse	6
3.2	Thermische Eigenschaften	6
3.2.1	Spezifische Wärmekapazität	6
3.2.2	Wärmeleitfähigkeit	7
3.2.3	Temperaturleitfähigkeit	7
3.2.4	Feuchtigkeitsaufnahme	8
3.2.5	Reibung	8
3.2.5.1	Elektrostatische Aufladbarkeit	8
3.2.6	Schrumpfung und Schwindung	9

4	Vakuum-Thermoformen	10
4.1	Positiv- und Negativformung	12
4.2	Werkzeuge	13
4.3	Vorwärmen	13
4.4	Aufheizen des Halbzeugs	14
4.4.1	Kontakterwärmung	14
4.4.2	Konvektionserwärmung	14
4.4.3	Strahlungserwärmung	15
4.5	Orientierung – Einfluss der Extrusionsrichtung	16
4.6	Berechnung der Wanddicke von Tiefziehteilen	16
4.7	Fehlersuche beim Vakuum-Thermoformen – Verarbeitungsfehler	18

5	Warmformen	20
5.1	Warmformen mit kaschierten Materialien	21
5.2	Warmformen in der Orthopädie	21

6	Biegen	22
----------	---------------	-----------

7	Anhang	23
	Literatur	
	Notizen	

8	Rechtliche Hinweise und Beratung	25
----------	---	-----------

	SIMONA worldwide	26
--	-------------------------	-----------

1 Vorwort

Für die Formgebung haben sich in der industriellen Praxis unterschiedliche Verfahren durchgesetzt, die ständig durch Praxiserfahrungen weiterentwickelt werden. Die Verfahren kann man in das Thermoformen, Warmformen und Biegen unterteilen. Das Tiefziehen, Vakuumformen und Druckluftformen sind spezielle Thermoformverfahren [1].

Thermoplaste eignen sich besonders als Grundwerkstoffe oder Halbzeuge für die unterschiedlichen Formgebungsverfahren, da sie durch Erwärmung in den gummielastischen Zustand überführt und dann leicht verformt werden können. Nach der Abkühlung in der Form behalten die Werkstücke die in der Wärme aufgeprägte Gestalt bei. Das Formteil weist in der Regel eine größere Oberfläche auf als das Halbzeug, was mit einer Reduzierung der Wanddicke einhergeht. Dies wird bereits bei der Wahl der Wanddicke des Halbzeugs berücksichtigt [2].

Um dem Formteil die endgültige Gestalt zu verleihen, ist eine Nachbearbeitung der Kontur oder eventuell das Einbringen von Öffnungen durch mechanische Bearbeitungsmethoden notwendig. Dies geschieht heute hauptsächlich in CNC-gesteuerten Automaten, zum Beispiel auf Basis von CAD-Daten, aber auch durch Wasserstrahlzuschneidung oder Stanzprozesse.

Das Thermoformen steht bei speziellen Anwendungen in Konkurrenz zum Spritzgießen oder Blasformen. Die Vorteile des Thermoformens liegen in der Nutzung preisgünstiger Werkzeuge und Maschinen sowie in der Möglichkeit, eine Vielzahl an unterschiedlichen Kunststofftypen verarbeiten zu können. Die verwendeten Halbzeuge können über strukturierte Oberflächen oder bedruckte Seiten verfügen. Auch das Thermoformen von Mehrschichtwerkstoffen ist möglich. Sie lassen sich beispielsweise mittels der Twin-Sheet-Technik zu Hohlkörpern verformen.

Letztlich entscheidet der Preis, die Stückzahl, die Form und die benötigte Qualität über die Formgebungsmethode.

Bei der Wahl des Verfahrens sind die Werkstoff- bzw. Halbzeugeigenschaften zu berücksichtigen. Jeder Werkstoff verhält sich hinsichtlich Erweichungstemperatur, Rückstellverhalten, Rekristallisation und thermischer Dehnung anders.

2 Werkstoffe

In dieser work.info werden ungefüllte und unverstärkte Thermoplaste behandelt. Auf geschäumte oder verstärkte Thermoplaste sowie Thermoplastblends wird nicht detailliert eingegangen.

2.1 Amorphe Thermoplaste

Amorphe Werkstoffe, wie PVC-U oder PETG, zeichnen sich durch eine hohe optische Transparenz aus, wenn sie ohne Additive produziert werden.

Der praktische Einsatz erfolgt unterhalb der Glasübergangstemperatur T_G , da in diesem Bereich eine hohe Grundfestigkeit vorliegt. Dadurch ist eine mechanische Bearbeitung möglich und eine für die Nutzung als Konstruktionswerkstoff ausreichende Stabilität gegeben.

Oberhalb der Glasübergangstemperatur T_G nehmen die mechanischen Eigenschaften sehr stark ab und das Material geht in den gummielastischen Bereich über. Dies wird in Abbildung 1 deutlich. Nach Einsetzen der Erweichung nehmen die Bruchfestigkeit σ_B und der E-Modul stark ab und die Bruchdehnung ϵ_B stark zu. Der gummielastische Bereich zeichnet sich durch eine leichte Verformbarkeit des Werkstoffs aus.

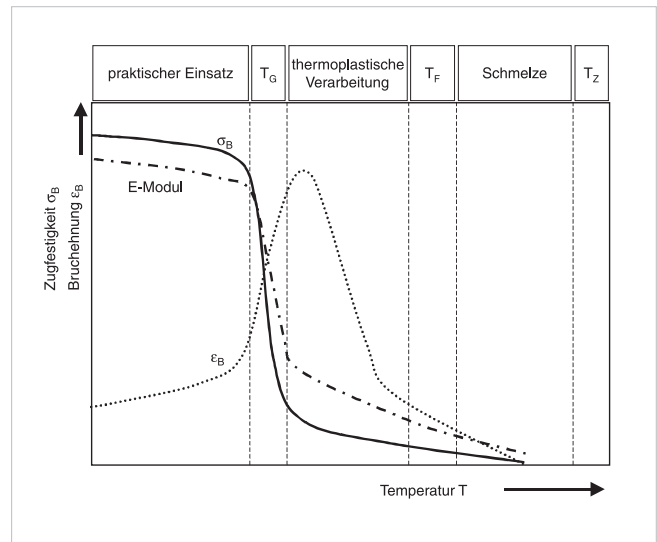


Abbildung 1: Schematische Darstellung der mechanischen Eigenschaften von amorphen Thermoplasten als Funktion der Temperatur (T_G = Glasübergangstemperatur, T_F = Schmelztemperatur, T_Z = Zersetzungstemperatur)

Bei weiterer Erwärmung folgt mit Erreichung der Schmelztemperatur T_F der plastische Bereich, in dem das Material umgeformt, das heißt extrudiert, spritzgegossen oder gepresst, wird.

Eine weitere Temperaturerhöhung führt zur Zersetzung des Thermoplasts.

2.2 Teilkristalline Thermoplaste

Teilkristalline Werkstoffe, wie PE, PP, PVDF, ECTFE oder PFA, sind in der Regel opak bis transluzent. Sie sind unterhalb der Glasübergangstemperatur T_G äußerst spröde und schlagempfindlich (Abbildung 2) und können daher in diesem Temperaturbereich auch nur unter besonderen Bedingungen eingesetzt werden.

Zwischen T_G und dem Kristallitschmelzbereich T_K fallen Bruchspannung σ_B und E-Modul leicht ab, während die Dehnung ε_B zunimmt. In diesem Temperaturbereich werden die teilkristallinen Werkstoffe in der Praxis eingesetzt oder bearbeitet.

Oberhalb der Kristallitschmelztemperatur T_K nehmen die mechanischen Eigenschaften wie Bruchspannung σ_B und E-Modul dann sehr stark ab und die Dehnung ε_B deutlich zu. In diesem Temperaturbereich werden diese Werkstoffe durch die Phasenumwandlung kristallinamorph transparent und erreichen den gummielastischen Zustand, in dem sie leicht umgeformt werden können. Erfolgt die Umformung dagegen unterhalb von T_K , so verbleiben im Formteil kristalline Bereiche, die zwar umgeformt werden, doch zu Restspannungen innerhalb der Formteilwand führen. Bei nochmaliger Erwärmung führt dies zu einer Deformation des Formteils [2].

Durch weitere Temperaturerhöhung wird der Werkstoff plastifiziert. Er schmilzt und kann somit umgeformt werden.

Weit oberhalb der Schmelztemperatur erfolgt die Zersetzung des Werkstoffs.

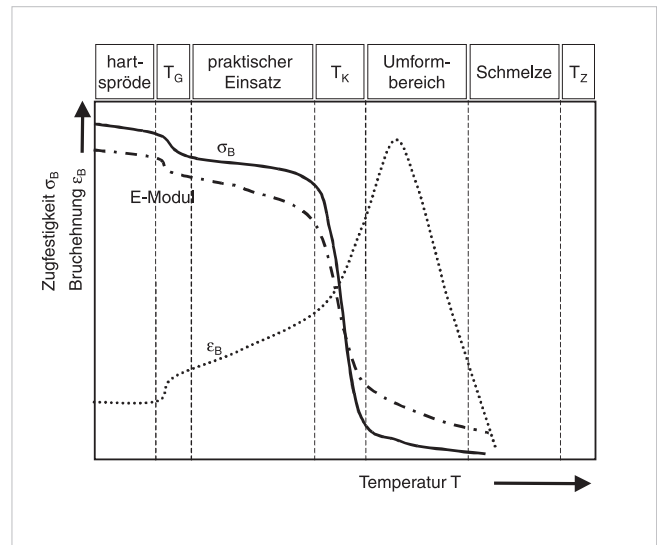


Abbildung 2: Schematische Darstellung der mechanischen Eigenschaften von teilkristallinen Thermoplasten als Funktion der Temperatur (T_G = Glasübergangstemperatur, T_K = Kristallitschmelztemperatur, T_Z = Zersetzungstemperatur)

3 Werkstoffeigenschaften

Für den Einsatz und die Verformung sind unterschiedliche Eigenschaften der Thermoplaste zu berücksichtigen. Die thermodynamischen Eigenschaften bestimmen die Verfahrensparameter und Werkzeugauslegungen sowie die Eigenschaften des Formteils.

3.1 Spannungsrisse

Spannungsrisse in einem Thermoplast entstehen bei Kontakt mit speziellen Chemikalien wie Lösungsmitteln, Ölen und oxidierenden Medien bei gleichzeitiger mechanischer Belastung. Die mechanische Belastung kann durch innere Spannungen auftreten, wenn ein Werkstoff beispielsweise zu kalt verformt wurde. Im praktischen Einsatz kann es sich aber auch um Spannungen durch äußere Belastungen handeln (Druck-, Zug-, Scherbelastung). Auch Schweißnähte enthalten in der Regel erhöhte innere Spannungen. Stark verstreckte Bauteile sind auch bei idealen Thermoformprozessen spannungsrisseanfälliger als nicht oder nur wenig verformte Bauteile.

Der Spannungsrissskorrosion kann man nur begegnen, indem die Spannung reduziert (Tempern des Bauteils) oder mit weniger spannungsrissefördernden Chemikalien gearbeitet wird.

3.2 Thermische Eigenschaften

Die thermischen Eigenschaften der Thermoplaste bestimmen maßgeblich die Verarbeitbarkeit und die erreichbaren Zykluszeiten während der Verarbeitung. Die thermischen Kenngrößen sind zur Berechnung der Aufheiz- und Abkühlvorgänge von großer Wichtigkeit.

3.2.1 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität c_p ist eine thermodynamische Kenngröße, die die Wärmemenge darstellt, die zur Erwärmung eines Werkstoffs um 1 K benötigt wird. Die Wärmekapazität c_p kann aus der Änderung der Enthalpie H (Wärmeinhalt) mit der Temperatur T und aus Enthalpietabellen oder -grafiken (Abbildung 3) bestimmt werden:

$$C_p = \frac{\Delta H}{\Delta T}$$

Eine experimentelle Methode zur Ermittlung der temperaturabhängigen Wärmekapazität ist die Differential Scanning Calorimetrie (DSC). Hierbei wird eine geringe Menge (5 – 30 mg) in einem Tiegel kontrolliert erwärmt und der dazu notwendige Wärmestrom in Relation zu einer Referenzprobe gemessen.

Die Wärmekapazität amorpher Thermoplaste liegt zwischen 1 und 1,5 kJ/(kg · K) und die teilkristallinen Thermoplaste zwischen 1,5 und 2,7 kJ/(kg K).

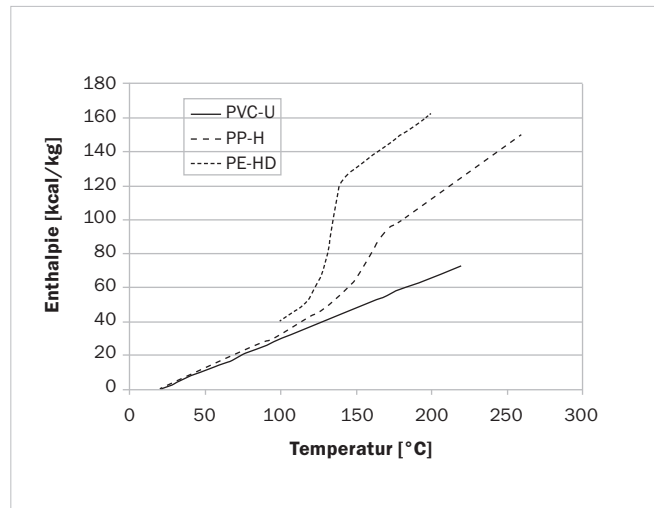


Abbildung 3: Grafische Darstellung der Enthalpie einiger Thermoplaste

3.2.2 Wärmeleitfähigkeit

Unter der Wärmeleitfähigkeit λ ist der Energietransport im Werkstoff zu verstehen. Als Messgröße dient dazu die Wärmemenge, die innerhalb einer Stunde durch einen Querschnitt von 1 m^2 bei einem Temperaturgefälle von 1 K geleitet wird.

Die Wärmeleitfähigkeit charakterisiert somit die Energiemenge, die pro Zeiteinheit durch einen Werkstoff transportiert werden kann.

Die Wärmeleitfähigkeit amorpher, nicht geschäumter oder gefüllter Thermoplaste liegt im Bereich von $0,1$ bis $0,3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und die der teilkristallinen Thermoplaste zwischen $0,2$ und $0,6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Sie ist zum Teil stark von der Temperatur abhängig und muss experimentell ermittelt werden (weitere Werte in [2]).

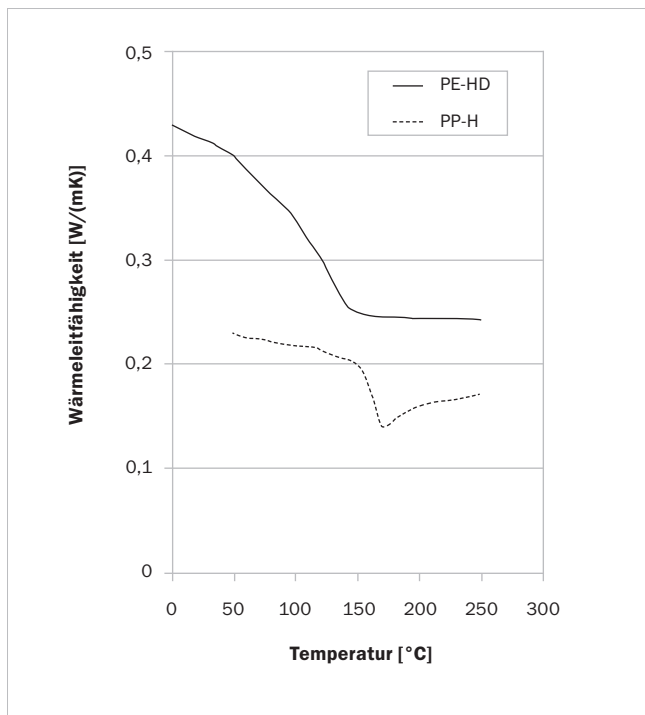


Abbildung 4: Wärmeleitfähigkeit einiger Thermoplaste als Funktion der Temperatur

3.2.3 Temperaturleitfähigkeit

Als dritte wichtige Kenngröße zur Beurteilung der Verformbarkeit von Thermoplasten ist die Temperaturleitfähigkeit a zu nennen, die ein Maß für den zeitlichen Ablauf der Wärmeleitung darstellt. Sie ist abhängig von der Wärmeleitung λ , der Dichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c_p :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$$

Für die meisten ungefüllten Kunststoffe liegt die Temperaturleitfähigkeit zwischen $0,05$ und $0,25 \text{ mm}^2/\text{s}$. Die Temperaturleitfähigkeit bestimmt die Durchwärmung einer thermoplastischen Platte durch das Aufprägen einer äußeren Temperatur durch Strahlung oder direkten Kontakt. Bei direktem Kontakt ist die Wärmeeindringzahl b (auch: Wärmeeindringkoeffizient in $\text{J}/(\text{K m}^2 \text{ s}^{1/2})$) ebenfalls von Bedeutung:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c_p \cdot \rho}$$

Mit der Kenntnis von b kann die Kontakttemperatur T_c bei Berührung zweier Körper A und B berechnet werden:

$$T_c = \frac{b_A \cdot T_A + b_B \cdot T_B}{b_A + b_B}$$

Die Kontakttemperatur T_c bestimmt den Temperaturfluss zwischen Werkzeug und Halbzeug während des Verformungsprozesses. Mithilfe von Tabelle 1 können die notwendigen Koeffizienten in Abhängigkeit von der Temperatur berechnet werden.

Tabelle 1: Koeffizienten zur Berechnung der Wärmeeindringzahl

	Koeffizienten zur Berechnung der Wärmeeindringzahl b [3]	
	$b = a_b T + b_b$ a_b	$[W \cdot S^{1/2}/m^2 \cdot K]$ b_b
PE-HD	1,41	441,7
PP-H	0,846	366,8
PVC-U	0,649	257,8

3.2.4 Feuchtigkeitsaufnahme

Kunststoffe können in Abhängigkeit des Rohstoffs, der Modifizierungen, Verarbeitungshilfsmittel und Verstärkungsstoffe geringe Mengen Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft oder durch feuchte Lagerung aufnehmen. In der Regel sind die Mengen jedoch so gering, dass dies keine Auswirkungen auf die Verformungseigenschaften der Halbzeuge hat.

Im Fall von PVC-U, PETG, elektrisch leitfähigen oder farbigen Thermoplasten können die Feuchtigkeitsmengen jedoch so hoch werden, dass sich während des Aufheizens des Halbzeugs Bläschen an der Oberfläche bilden. Die Ursache liegt im Fall der Verstärkungs- und Farbstoffe in den hygroskopischen Eigenschaften dieser Zuschlagstoffe.

Um die negativen Erscheinungen zu vermeiden, sollten diese Kunststoffe in einem Umluftofen (mit Ablufteinrichtung) vorge trocknet werden. Die Trockenbedingungen können Tabelle 2 entnommen werden. Während der Trocknung im Umluftofen ist darauf zu achten, dass die Platten senkrecht gestellt oder in Etagen angeordnet werden, um die Zirkulation der Luft allseitig zu gewährleisten. Lagern die Halbzeuge vor Feuchtigkeit geschützt, ist ein Vortrocknen in der Regel nicht erforderlich.

Tabelle 2: Bedingungen zur Trocknung von Thermoplasten, wenn diese Feuchtigkeit absorbiert haben

	Temperatur in °C	Zeitdauer in Stunden pro mm Wanddicke
PVC-U	55	1,5 - 2
PE-EL	80	
PP-EL	100	
PVDF-EL	100	
PETG	55	

3.2.5 Reibung

Die Reibung eines Werkstoffs ist abhängig von der Oberflächenmorphologie und den Stoffeigenschaften. Kunststoffe besitzen aufgrund der geringen Oberflächenspannung in der Regel niedrige Reibungskoeffizienten bei Raumtemperatur. Diese Eigenschaften ändern sich jedoch mit der Temperatur oder entsprechenden Oberflächenmodifizierungen sowie beim Einsatz von Mehrschichtwerkstoffen. Die Reibung kann auf den Umformprozess sowohl positiv wie auch negativ wirken. Bei einer hohen Reibung zwischen Werkzeug und Halbzeug wird die Verstreckung im Kontaktbereich eingeschränkt.

Die Reibung kann durch folgende Parameter beeinflusst werden:

- Oberflächenrauigkeit des Werkzeugs
- Temperatur
- Kunststofftyp

3.2.5.1 Elektrostatische Aufladbarkeit

Kunststoffe können sich zum Beispiel durch Reibung aneinander elektrostatisch aufladen. Diese Reibungselektrizität ist unter anderem von der Luftfeuchtigkeit abhängig. Elektrostatisch aufgeladene Oberflächen sind in der Lage, beispielsweise leichte Schmutzpartikel, Staub oder Kunststoffspäne anzuziehen, die sich auf der Plattenoberfläche abscheiden. Diese Verunreinigungen werden zwischen Form und Platte liegend auf der Oberfläche mit abgebildet und können dadurch die Optik des Bauteils negativ beeinflussen. Daher ist es empfehlenswert, diese Oberflächenladung zum Beispiel mit ionisierter Druckluft oder Kohlenstoffbürsten zu entfernen und sonstige Verunreinigungen zu beseitigen.

3.2.6 Schrumpfung und Schwindung

Auch bei Kunststoffen erhöht sich das spezifische Volumen (Volumen pro kg) mit der Temperatur aufgrund der thermischen Dehnung in allen drei Dimensionen. Das Volumen der amorphen Thermoplaste vergrößert sich in der Regel quasi-linear mit der Temperatur. Kristalline Thermoplaste verhalten sich dagegen anisotrop, das heißt, ihre Eigenschaften sind von der Richtung abhängig. Oberhalb der Kristallitschmelztemperatur T_K wird eine lineare Volumenzunahme gemessen. Zwischen der Glasübergangstemperatur T_G und T_K ist die Volumenzunahme nichtlinear (siehe Abbildung 5).

In der Umformtechnik unterscheidet man zwischen Schrumpfung und Schwindung.

Als **Schrumpfung** bezeichnet man die Dimensionsänderung eines Halbzeugs nach Warmlagerung bei einer definierten Temperatur:

$$\text{Schrumpfung in \%} = \frac{\text{Abmessung vor Test} - \text{Abmessung nach Test}}{\text{Abmessung vor Test}}$$

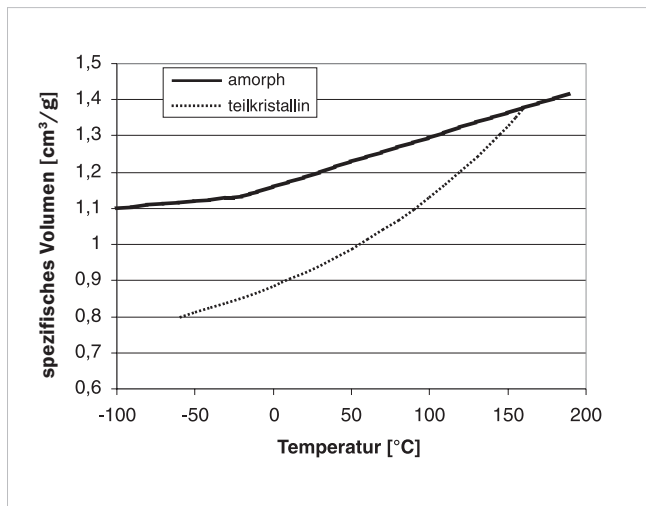


Abbildung 5: Spezifisches Volumen von amorphem und teilkristallinem PP [1]

Um den Schrumpfung während des Umformens zu bestimmen, sollte ein Halbzeug definierter Abmessungen im Umluftofen auf einer Teflonfolie, die zusätzlich mit Talkum bestreut wurde, auf die Umformtemperatur erwärmt werden. Zur Bestimmung der Anisotropien können die Schrumpfwerte in sämtlichen Richtungen und besonders in und quer zur Extrusionsrichtung gemessen werden.

Probleme hinsichtlich Faltenbildung, Ausreißen aus dem Spannrahmen oder starker Formänderung während der Erwärmung mit Kontaktheizungen können mit dem Schrumpfung bei einer zu hoch gewählten Temperatur zusammenhängen.

Die **Schwindung** bezeichnet die Differenz zwischen Werkzeugmaß und Maß des abgekühlten Formteils. Man unterscheidet zwischen der Verarbeitungsschwindung, Nachschwindung und Gesamtschwindung:

$$\text{Verarbeitungsschwindung in \%} = \frac{\text{Maß des Werkzeugs} - \text{Maß des Formteils}}{\text{Maß des Werkzeugs}}$$

Die Maße des Werkzeugs und die Maße des Formteils sollten nach 24-stündiger Abkühlung auf 23 °C gemessen werden.

$$\text{Nachschwindung in \%} = 1 - \frac{\text{Maß des Formteils nach Lagerung (Tage bis Wochen)}}{\text{Maß des Formteils nach Abkühlung (24 h)}}$$

$$\text{Gesamtschwindung} = \text{Verarbeitungsschwindung} + \text{Nachschwindung}$$

Exakte Schwindungswerte können nur experimentell mittels Thermoformwerkzeugen ermittelt werden, die eine ähnliche Kontur besitzen wie die zu fertigenden Formteile. Richtwerte unterschiedlicher Thermoplaste können Tabelle 3 entnommen werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Schrumpfung und die Schwindung auch chargenabhängig sein können.

Insbesondere bei der Nachbearbeitung der Formteile ist die Schwindung zu beachten, da das Formteil oftmals noch nicht völlig abgekühlt ist. Die Schwindung wird in der Regel von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Kunststofftyp (mit evtl. Chargenschwankungen)
- Abkühlgeschwindigkeit: hohe Kühlgeschwindigkeit bedingt geringeren Verarbeitungsschwind
- hohe Entformungstemperatur resultiert in einer höheren Schwindung
- hohe Verstreckung ergibt kleinere Schwindung
- Positivformen bedingen geringere Schwindung im Vergleich zu Negativformen
- die Extrusionsrichtung bedingt unterschiedliche Schwindung

4 Vakuum-Thermoformen

Beim Thermoformen wird bei den einstufigen Verfahren grundsätzlich zwischen dem Positiv- und dem Negativformen unterschieden. Der Thermoformprozess lässt sich hierbei in zwei Schritte, das Vorstrecken und das Ausformen, einteilen.

Das Vorstrecken kann durch mechanisches Vorstrecken durch die Form oder einen Hilfstempel sowie durch Vorblasen oder Vorsaugen geschehen. Durch das Vorstrecken wird ein ver-streckter Vorformling erzeugt, der beim Ausformen eine optimale, gleichmäßige Wanddickenverteilung besitzt.

Die Ausformung erfolgt mittels Unterdruck (Vakuumformung) oder Druckluft (Druckumformung). Die Unterstützung des Unterdrucks bei der Vakuumformung bewirkt, dass das Halb-zeug mit Atmosphärendruck an die Form gepresst wird. Der maximale Anpressdruck beträgt $1 \text{ bar} = 0,1 \text{ N/mm}^2$. Die Platte bzw. Folie wird in einen Spannrahmen, der sich über der Tiefziehform (= Werkzeug) befindet, fest eingespannt. Nach einer möglichst gleichmäßigen Erwärmung und Verstreckung wird die Luft zwischen Form und Material abgesaugt und die Platte durch den äußeren Luftdruck an die Tiefziehform angedrückt. Nach der Abkühlung kann der Formling ent-nommen werden.

Der Vorteil des Vakuumformverfahrens besteht darin, dass dünnwandige und großflächige Formteile mit einfachen Werkzeugen herzustellen sind. Dabei sind die Werkzeug-kosten ebenso wie die Investitions- und Unterhaltungskosten bedeutend geringer als beim Spritzgussverfahren. Mit diesem Verfahren ist sowohl die Fertigung in großen Serien möglich als auch die Rentabilität von kleinen Serien gewährleistet. Kleine Teile können durch Einsatz von Mehrfachformen sehr rationell gefertigt werden.

Soll die Kontur des Werkzeugs genauer abgebildet werden, so wird die Druckumformung eingesetzt, bei der das erwärmte Halbzeug mit hohem Druck ($7 \text{ bar} = 0,7 \text{ N/mm}^2$ bis $10 \text{ bar} = 1 \text{ N/mm}^2$) gegen die Form gedrückt wird.

Sämtliche SIMONA® Thermoplaste sind gut bis sehr gut mit den heute gängigen Thermoformmethoden umformbar. Als Ausnahme gelten lediglich die hochmolekularen PE-Typen PE 500 und PE 1000 sowie geschäumte Thermoplaste, welche nur bedingt geeignet sind. Verwendet werden können alle Maschinentypen. Für Platten ab 3 mm Dicke empfiehlt es sich jedoch, das Material beidseitig zu beheizen oder in einem Ofen vorzuwärmen. Die Anwärmzeit wird dadurch verkürzt und eine thermische Schädigung der Oberfläche vermieden. Weiterhin ist es empfehlenswert, durch Stützluft einem Durch-hängen des Materials und damit einer ungleichmäßigen Erwärmung vorzubeugen.

Für die Fertigung größerer Serien haben sich Automaten mit einer automatischen Halbzeugzuführung bewährt. Je nach Verwendungszweck können Maschinen mit und ohne Ober-stempel sowie mit und ohne Automatik für Zuschnittgrößen bis ca. $2 \times 6 \text{ m}$ eingesetzt werden.

Pro 1 mm Wanddicke werden für die teilkristallinen Thermo-plaste PE, PP und PVDF ca. 45 – 60 Sek. Heizzeit benötigt. Im Vergleich dazu liegt PVC bei ca. 25 Sek.

Tabelle 3: Richtwerte zum Tiefziehen von SIMONA Werkstoffen^⑦

	Name	Maximales Ver- streckungsverhältnis ①②	Schwindung in Extrusionsrichtung ^③ in %		Verarbeitungs- temperatur ^④ in °C	Werkzeugtemperatur in °C
			Formung			
			Positiv	Negativ		
PE	PE-HD / PE 100	1 : 4	2 - 3	> 3	160 - 180	50 - 70
	SIMOLIFE PE ^⑤	1 : 5				
	PE-EL	1 : 3,5				
PP	PP-H AlphaPlus [®] / PP-H / PPs / PP-C / PP-R	1 : 3	1,5 - 2,5	> 2,5	170 - 200	50 - 80
	SIMOLIFE PP	1 : 2,5				
PVC-U	PVC-CAW / PVC-LZ	1 : 4	0,5 - 1	> 1	160 - 180	< 50
	PVC-MZ-COLOR ^⑥	1 : 5				
	PVC-GLAS / PVC-GLAS-SX	1 : 4				
PETG	SIMOLUX / SIMOLIFE PETG	1 : 4	0,5 - 1	> 1	160 - 180	50 - 60
PVDF	PVDF	1 : 3	2 - 3	> 3	190 - 200	60
ECTFE ^⑧	ECTFE	1 : 3	2 - 3	> 3	250 - 260	80 - 90
CPVC	CPVC	1 : 2,5	0,5 - 1	> 1	170 - 190	50 - 70

① Verhältnis von Fläche der Platte zu Fläche des Formteils

② In Querrichtung ca. die Hälfte des Wertes

③ Oberflächentemperatur, nicht Strahlertemperatur

④ Für extreme Verstreckungsverhältnisse, speziell für Negativformung

⑤ ECTFE besitzt zwischen 170 °C und 240 °C eine sehr geringe Bruchdehnung und ist in diesem Temperaturbereich schwer zu verarbeiten.

⑥ Abhängig von dem Bedienungspersonal und der Anlage

⑦ Es handelt sich hier um experimentell ermittelte Werte mit einer Tiefzieheinrichtung der Firma Illig Typ U100 mit Keramikstrahlern.

Die Temperaturen der Oberheizung betragen 550/500/450 °C. Die Temperatur der Unterheizung betrug 400 °C.

Maschinen mit starker Heizleistung erfordern zur besseren Durchwärmung bei Plattendicken ab 6 mm eine reduzierte Heizleistung oder Intervallbeheizung.

Um eine bis an die Einspannung reichende Plastifizierung zu erreichen, ist das Abschirmen der Platte gegen Zugluft notwendig.

Naturfarbene teilkristalline Thermoplaste, wie SIMONA[®] PE-HD, PP-H natur oder PVDF, werden in der Regel bei Erreichen der Verformungstemperatur (oberhalb des Kristallschmelzbereiches) transparent.

Vorstrecken der Platte vor dem Verformen ergibt eine gleichmäßige Wanddickenverteilung. Dies wird besonders beim Positivformen erreicht.

Nach dem Vakuumformen und Erstarren der Oberfläche kann Luft (auch mit Wasserzusatz) zur weiteren Abkühlung eingesetzt werden. Eine hohe Verformungstemperatur, langsame Abkühlgeschwindigkeit und niedrige Entformungstemperatur (40 °C) sowie ein unmittelbar darauffolgender Randbeschnitt ergeben Teile mit geringem Verzug.

Je nach Formgestaltung und Verarbeitungsbedingungen beträgt die Schwindung (Differenz Formteil zu Werkzeugmaß) etwa 1% bis 3% vornehmlich in Extrusionsrichtung der Platte.

4.1 Positiv- und Negativformung

Die Entscheidung für eine Positiv- oder Negativformung hängt vom gewünschten Ergebnis der Formung ab. Die Formgenauigkeit ergibt sich bei der Positivformung beispielsweise an der Innenseite, da das Halbzeug mit seiner Innenseite an dem Werkzeug anliegt. Weiterhin wird die Werkzeugoberfläche an der anliegenden Seite recht gut abgebildet.

Die Wanddickenverteilung unterscheidet sich ebenfalls deutlich. Dort, wo sich beim Positivformen eine Dünnstelle ergibt, wird beim Negativformen eine Dickstelle erzeugt.

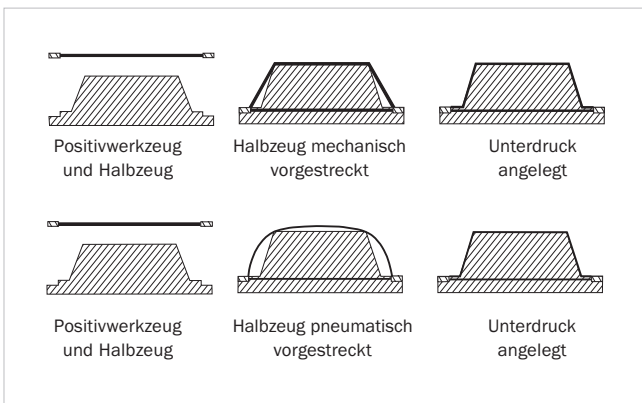


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Positivformens

Werkzeugstrukturierungen und Fertigungsdaten lassen sich sehr gut am Teil abbilden, am besten bei PP. Bei engen vorgegebenen Toleranzen muss positiv geformt werden, da beim Abkühlen das Teil auf das Werkzeug aufschumpft. Dadurch bleibt der Schwund in seiner Höhe begrenzt.

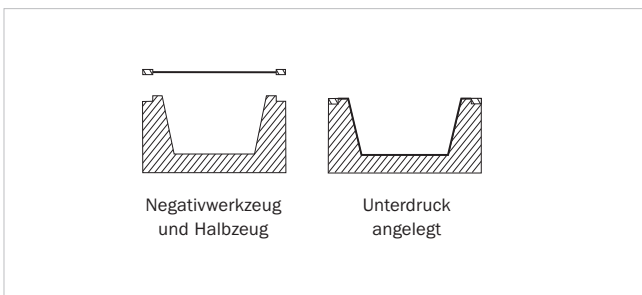


Abbildung 7a: Schematische Darstellung des Negativformens ohne mechanische oder pneumatische Vorstreckung

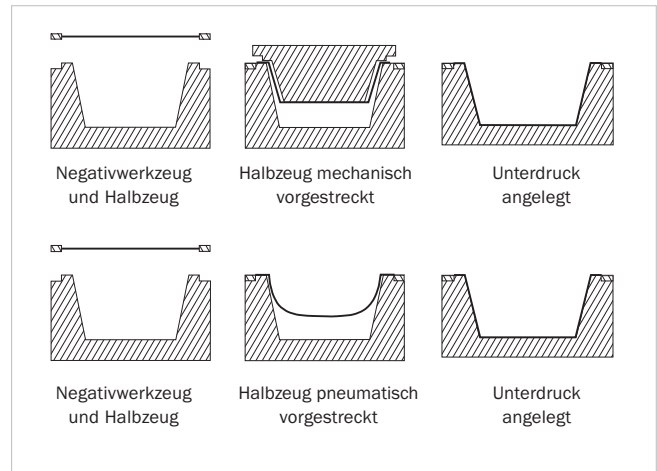


Abbildung 7b: Schematische Darstellung des Negativformens mit mechanischer oder pneumatischer Vorstreckung

Wenn das Material völlig durchplastifiziert ist, sollte es in der Werkzeugform entsprechend hoch vorgeblasen bzw. bei Negativformen vorgestreckt werden, da es sonst eventuell zu Faltenbildung kommt. Das Vorstrecken sollte etwa in der Höhe von $\frac{2}{3}$ der Höhe des Werkzeugs erfolgen. Anschließend wird das Werkzeug in die vorgestreckte Platte gefahren und der Unterdruck angelegt. An Stellen, an denen der Kunststoff am Werkzeug anliegt, ist jede weitere Verformung aufgrund der schnellen Abkühlung begrenzt.

Zum anschließenden Kühlen wird vorzugsweise Luft eingesetzt. Die Verwendung von Sprühwasser sollte erst dann erfolgen, wenn die Oberfläche genügend abgekühlt ist, damit keine Spannungen eingefroren werden. Durch diese Verarbeitungsweise ergeben sich gleichmäßigere Wanddicken und innere Spannungen werden reduziert.

Für die wirtschaftliche Fertigung von qualitativ einwandfreien Polyethylen-, PVDF- und Polypropylen-Tiefziehteilen ist ein vollständiges Auskühlen – nach Entformen der noch warmen Teile – in separaten Rahmen zur Vermeidung von Verzug unbedingt anzuraten.

Empfehlenswert ist die Auskühlung in Rahmen, die der Geometrie des Werkzeugs entsprechen. Hier können oftmals alte Werkzeuge oder Formen aus Holz verwendet werden.

4.2 Werkzeuge

Als Werkstoffe für den Werkzeugbau werden hauptsächlich Holz (Prototypenbau), Aluminium, Gießharzformstoffe sowie Schichtpressstoffe verwendet. Die Wahl eines Werkstoffs für den Formenbau wird bestimmt durch die

- geforderte Qualität der zu fertigenden Tiefziehteile (z. B. Oberflächenqualität)
- Stückzahl der Formungen
- günstige Verarbeitbarkeit
- Wärmeleitfähigkeit
- Verschleißfestigkeit
- Kosten.

Bei der Herstellung der Werkzeuge müssen die Schwundmaße der Thermoplaste und die Extrusionsrichtung der Platten berücksichtigt werden.

Eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs bzw. gekühlte Formen erhöhen die Wirtschaftlichkeit und ergeben gleichmäßigere Verformungsbedingungen.

Gleichmäßige Serien und kurze wirtschaftliche Taktzeiten erreicht man mit temperierten Werkzeugen.

Sandgestrahlte Oberflächen haben den Vorteil, dass die Luft beim Vakuumtiefziehen restlos abgesaugt werden kann und keine Luftnester entstehen können. Die Vakuumböhrungen sollten nicht größer als 1 mm sein, für Polyolefine am besten unter 0,8 mm, da sie sonst von dem Material im plastischen Zustand zu stark abgebildet werden können. Es empfiehlt sich, die Formen mit einem Trennmittel (Talkum, Teflonspray, Wachs, Seife) zu überziehen. Beim Positivverfahren können aufgrund der möglichen Vorstreckung der erwärmten Platte in der Regel etwas gleichmäßigere Wanddicken erzielt werden.

Die Kantenradien können bei Polypropylen und PETG relativ scharf sein. Die minimalen Radien bei der angegebenen Verformungstemperatur entsprechen etwa der Plattendicke. Bei PE-HD, PVC und PVDF empfehlen wir größere Kantenradien (etwa 2 – 3 mal Plattendicke).

Die Anwendung von Positivformen erfordert bei teilkristallinen Werkstoffen (PE, PP, PVDF, ECTFE) eine Konizität von 5° bis 10°, bei amorphen Thermoplasten (PVC, PETG) von ca. 5°. Bei Negativformen ist dies nicht notwendig, da sich beim Abkühlen das Tiefziehteil von der Form trennt.

4.3 Vorwärmen

Um die Maschinenbelegung zu optimieren (Taktzeiten erhöhen), empfehlen wir, die Platten in einem Umluftofen bis knapp unter den Erweichungsbereich (PE-HD 110 °C, PP 125 °C, PVC 50 – 55 °C, CPVC 70 – 80 °C, PETG 60 – 70 °C, PVDF 140 °C, ECTFE 140 °C) vorzuwärmen. Beim Aufheizen sollte man mit reduzierter Heizleistung arbeiten. Dabei wird die Plattenoberfläche weitestgehend geschont. Diese Arbeitsweise zahlt sich in längerer Lebensdauer der Teile aus.

Ein bis in den Rand gehendes Plastifizieren ist unbedingt erforderlich, um starken Verzug der Tiefziehteile zu vermeiden. Wir empfehlen dringend, die Tiefziehmaschine nach allen Seiten gegen Zugluft abzuschirmen.

4.4 Aufheizen des Halbzeugs

Die Erwärmung des Halbzeugs ist einer der wichtigsten Verfahrensschritte beim Thermoformen. Das Halbzeug soll zum Thermoformen kostengünstig, das heißt mit wenig Energie in kurzer Zeit, auf die erforderliche Umformtemperatur aufgeheizt werden. Generell sollte darauf geachtet werden, dass eine gleichmäßige Erwärmung des Halbzeugs erfolgt. Nur in speziellen Fällen kann es sein, dass eine Temperaturungleichheit Vorteile beim Thermoformen hat.

Beim Erwärmen ist das Verarbeitungsfenster, bestehend aus unterer und oberer Verformungstemperatur, zu berücksichtigen. Verarbeitungstemperaturen sind werkstoffabhängig und können Tabelle 3 entnommen werden. Die Erwärmung muss so gesteuert werden, dass sich die Temperatur des Halbzeugs innerhalb dieses Verarbeitungsfensters befindet. Ein Temperaturgradient innerhalb der Wanddicke ist in der Praxis nicht zu vermeiden. Es muss jedoch sorgfältig darauf geachtet werden, dass das Halbzeuginnere die untere Temperaturgrenze überschritten hat, um Spannungen im Formteil zu vermeiden.

Bei einer sehr hohen Strahlertemperatur wird beispielsweise die Oberfläche des Halbzeugs zu schnell und hoch erwärmt, sodass bereits eine Zersetzung oder sonstige Eigenschaftsänderung der Oberfläche eintritt. Das Halbzeuginnere kann aufgrund der geringen Wärmeleitung der Oberflächentemperatur nicht folgen und besitzt für die Verformung eine zu geringe Temperatur. Folge ist das Einfrieren von Spannungen und durch die Überbeanspruchung der Oberfläche eine Beeinträchtigung der Langzeitstabilität des Formteils.

Zu welchem Zeitpunkt die optimale Temperaturverteilung im Halbzeug vorliegt, hängt in erster Linie von den thermodynamischen Eigenschaften des verwendeten Halbzeugs und der Erwärmungsmethode ab.

Eine exakte Berechnung der Heizparameter ist in jedem Fall sehr kompliziert und aufwändig, da sämtliche thermodynamischen Eigenschaften von Halbzeug, Werkzeug und Heizeinrichtung ermittelt werden müssen.

Praktikabler ist es, die Parameter mit dem jeweiligen Halbzeug und Werkzeug experimentell zu ermitteln. Mit einem kontaktlosen Temperaturmessgerät (IR-Thermometer) oder Temperaturmessstreifen lässt sich die Oberflächentemperaturverteilung bestimmen. Auch die Temperaturverteilung der Heizstrahler kann mit diesen Hilfsmitteln ermittelt werden.

4.4.1 Kontakterwärmung

Bei der Kontakterwärmung wird die Halbzeugplatte auf eine beheizte Platte mit Trennfolie (Teflonfolie) und Gegenlage zur Verbesserung des Kontakts oder zwischen zwei beheizte Platten mit jeweiliger Trennfolie gelegt und so lange in dieser Position belassen, bis das Halbzeug die Kontakttemperatur der Heizplatten erreicht hat. Die Erwärmung erfolgt durch reine Wärmeleitung in der Platte. In der Praxis sollte auf eine gleichmäßige Temperaturverteilung der Heizplatten geachtet werden, um Temperaturspitzen, die das Halbzeug übermäßig beanspruchen, zu vermeiden.

4.4.2 Konvektionserwärmung

Unter der Konvektionserwärmung versteht man die Erwärmung der Halbzeuge im Umluftofen, der auf die Umformtemperatur aufgeheizt ist. Diese Methode wird beispielsweise bei dicken PETG-Platten angewandt, die anschließend streckgeformt werden.

4.4.3 Strahlungserwärmung

Die Strahlungserwärmung ist eine Wechselwirkung zwischen einer elektromagnetischen Strahlungsquelle und einer Oberfläche, die diese Strahlung in Form von Wärme absorbiert. Die Strahlung wird durch ihre Wellenlänge charakterisiert. Kunststoffe absorbieren Strahlung vorwiegend im Infraroten (IR-Bereich), im Wellenlängenbereich von 0,8 μm bis 10 μm .

Die Absorption von Strahlung hängt von der Dicke, der Farbe des Kunststoffes und der Wellenlänge der Strahlungsquelle ab. Wird bereits in der Oberfläche nahezu die gesamte Strahlungsenergie absorbiert, so findet in dem Wellenlängenbereich keine direkte Erwärmung des Platteninneren statt. Liegt die Wellenlänge zwischen 1 μm und 1,4 μm , so beträgt die Eindringtiefe der Strahlung mehrere Millimeter. Wellenlängen oberhalb 2,5 μm erwärmen in erster Linie die Oberfläche, sodass die Erwärmung einer dickeren Platte aufgrund der schlechten Wärmeleitung unter Umständen sehr lange dauern kann.

In der Praxis existiert kein Strahler der monomodal, das heißt nur mit einer Wellenlänge, strahlt. Die handelsüblichen Strahlerquellen emittieren im gesamten IR-Bereich und besitzen je nach Typ ihr Strahlungsmaximum bei unterschiedlichen Wellenlängen (Abbildung 8).

Es ist gut zu erkennen, dass der Keramikstrahler ein sehr breites Wellenlängenspektrum besitzt und somit auch den Bereich abdeckt, in dem die meisten Kunststoffe ein hohes Absorptionsvermögen besitzen.

Hellstrahler besitzen dagegen ein sehr ausgeprägtes Strahlungsmaximum, sodass die Hauptenergie zwischen 0,5 μm und 2 μm emittiert wird. Das ist gerade der Bereich, in dem die Eindringtiefe sehr hoch ist und somit die Absorption ein Minimum besitzt. Damit wird erreicht, dass die Aufheizung nicht allein durch Wärmeleitung von der Oberfläche ins Innere geschieht sondern durch die eindringende Strahlung die Platte im Inneren direkt erwärmt wird.

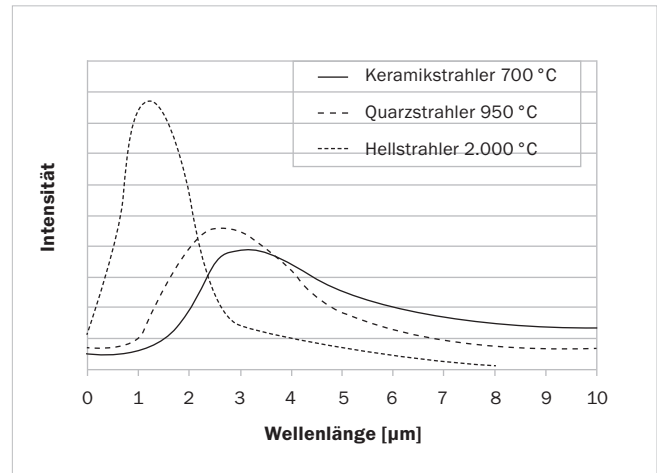


Abbildung 8: Strahlungscharakteristik unterschiedlicher handelsüblicher IR Strahler

Mit zunehmender Strahlungstemperatur verschiebt sich das Strahlungsmaximum zu kürzeren Wellenlängen. Die in ein Halbzeug einzubringende Energie ist ebenfalls von der Strahlertemperatur abhängig, die die Taktzeiten erheblich verkürzen kann.

Neuere Strahler mit dem Strahlungsmaximum bei 1 μm (Halogenstrahler) sollen eine noch schnellere Aufheizphase gewährleisten [4]. Es gibt hier jedoch physikalische Grenzen der Wärmeübertragung in Form der Absorptionscharakteristik des Kunststoffes. Hellstrahler sind daher nicht in jedem Fall einsetzbar, da sie die Oberfläche bereits zu stark erwärmen und das Platteninnere der Temperatur nicht folgen kann. Als Folge einer zu starken Erwärmung kann die Halbzeugoberfläche nachhaltig geschädigt werden. Die Schädigung beeinflusst die Lebensdauer und die Farbkonstanz in negativer Weise, insbesondere bei Bewitterung.

4.5 Orientierung – Einfluss der Extrusionsrichtung

Der Schrumpftest ist geeignet, um die Orientierung bzw. die Verstreckung der Makromoleküle in einem Halbzeug zu bestimmen. Hohe Orientierungen, wie sie in der Regel in Extrusionsrichtung vorliegen, beeinflussen die Faltenbildung ganz erheblich. In Extrusionsrichtung der Platten ist die Schwindung im Allgemeinen wesentlich höher als in Querrichtung. Bei Mehrfachwerkzeugen mit Segmenten im gleichen Abstand oder bei Formen, die Segmente enthalten, welche länger als breit sind und sich mehrfach wiederholen (Abbildung 9), sollte die Extrusionsrichtung parallel zu der Länge der Segmente angeordnet sein, um eine Faltenbildung zu vermeiden. Dies wird umso wichtiger, wenn die Richtung quer zur Extrusion einen negativen Schrumpf besitzt.

Als Faustregel kann dienen: Längsrichtung der Platte = Längsorientierung des Tiefziehteiles. Für spezielle Tiefziehenanwendungen empfehlen wir den Einsatz von PVC-T.

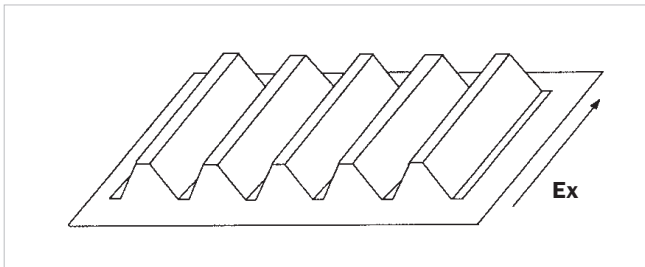


Abbildung 9: Bei Formteilen mit ausgeprägter Orientierung sollte die Extrusionsrichtung des Halbzeugs in Richtung der Längsorientierung der Einzelsegmente ausgerichtet sein.

4.6 Berechnung der Wanddicke von Tiefziehteilen

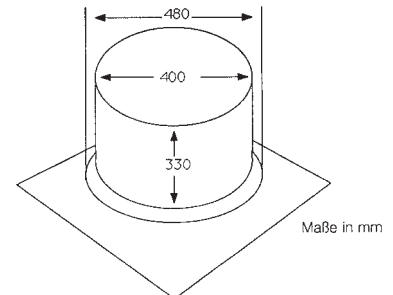
Das Tiefziehverhältnis wird aufgefasst als Quotient aus Oberfläche der Grundplatte (O_1) zu Oberfläche des verstreckten Teiles (O_2).

Unter der Voraussetzung einer möglichst gleichmäßigen Wanddickenverteilung werden nachfolgend zwei Rechenbeispiele gegeben.

Rundbehälter

Vorgegeben:

Tiefziehrahmen mit Maske	$D_1 = 48 \text{ cm}$
Zylinder	$D_2 = 40 \text{ cm},$ $h = 33 \text{ cm}$
Gewünschte Wanddicke	$s_1 = 3 \text{ mm}$



Gesucht:

Ausgangswanddicke	$s_2 = x \text{ mm}$
-------------------	----------------------

Lösung:

Oberfläche der Grundplatte	$O_1 = r^2 \pi = 24^2 \pi$	$= 1.809 \text{ cm}^2$
Mantel	$M = D_2 \pi h = 40 \pi \cdot 33$	$= 4.147 \text{ cm}^2$
Oberfläche des verstreckten Teils	$O_2 = O_1 + \text{Mantel}$	$= 5.956 \text{ cm}^2$

Verstreckungsverhältnis $s_1 : s_2 \approx O_1 : O_2 \approx 1 : 3,3$

Fazit:

Um am Formteil eine Wanddicke von 3 mm zu erhalten, müssen mindestens 10 mm dicke Platten eingesetzt werden.

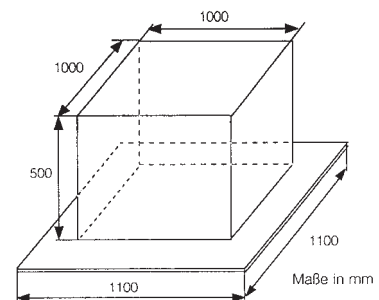
Viereckbehälter

Vorgegeben:

Tiefziehrahmen mit Maske	$= 1,1 \cdot 1,1 \text{ m}^2$
Viereckbehälter	$= 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,5 \text{ m}^3$
Ausgangswanddicke	$s_2 = 5 \text{ mm}$

Gesucht:

Wanddicke des fertigen Teils	$s_1 = x \text{ mm}$
------------------------------	----------------------



Lösung:

Oberfläche der Grundplatte	$O_1 = 1,1 \cdot 1,1 \text{ m}^2$	$= 1,21 \text{ m}^2$
Mantelfläche	$M = 4 \cdot 1,0 \cdot 0,5 \text{ m}^2$	$= 2,00 \text{ m}^2$
Oberfläche des verstreckten Teils	$O_2 = O_1 + M$	$= 3,21 \text{ m}^2$

Verstreckungsverhältnis $s_1 : s_2 \approx O_1 : O_2 \approx 1 : 2,5$

Fazit:

Die Wanddicke am Tiefziehteil wird nicht mehr als ca. 2 mm betragen (es sollte zur Sicherheit mit 1,5 mm gerechnet werden).

4.7 Fehlersuche beim Vakuum-Thermoformen – Verarbeitungsfehler [5]

	Unschärf	Keine Formberührung	Abschreckmarken	Wulst am Rand	Unsaubere Oberfläche	Luftfeinschlüsse	Wölbung	Blasen	Dünnstellen	Ungleiche Wandstärke	Falten	Materialaufriss bei Formkontakt	Material haftet am Werkzeug	Risse im Ziehteil	Weißbruch	Faltenbildung beim Aufheizen	Ziehteil formt sich zurück	Ziehteil verbogen	Ziehteil instabil	Material erwärmt sich ungleichmäßig
Mögliche Ursache																				
Material zu heiß			x			x		x	x		x	x								
Material zu kalt	x	x										x								
Zu warm entformt	x						x										x	x		
Zu kalt entformt														x	x					
Trennmittel evtl. notwendig												x	x							
Zu viel Trennmittel					x															
Vakuum zu früh			x								x	x								
Vakuum zu spät											x									
Vakuum zu schnell											x									
Vakuum zu langsam	x	x		x																
Zu geringes Endvakuum	x	x																		
Vakuum nicht ausgeschaltet													x							
Vakuum zu früh abgeschaltet	x																			
Zu früh abgekühlt	x	x																		
Nicht / zu wenig vorgeblasen			x						x	x		x								
Zuviel vorgeblasen							x		x	x	x									
Material berührt Form bei Erwärmen										x	x					x				
Material hängt durch beim Heizen										x	x									
Kein Hochhalter											x									
Kein Niederhalter									x	x	x									
Niederhalter nicht ausgespiegelt	x																			x
Zu lange gekühlt															x					
Taktzeit zu langsam	x																			
Luftzug	x																			x
Entformluft unregelmäßig							x						x	x	x					
Form fährt zu schnell rein									x											
Form fährt zu schnell raus													x	x	x					
Zu spät abgekühlt				x																
Stellenweise abgekühlt														x					x	
Material zu schnell erwärmt								x				x								
Spannrand zu spät abgetrennt																			x	
Teile verkantet																			x	
Material nicht gereinigt					x															
Kein / zu langsamer Oberstempel									x											
Oberstempel zu klein									x											
Oberstempel zu groß									x											
Zu rauher Oberstempel									x											
Oberstempel zu früh									x											
Oberstempel zu kalt									x											
Oberstempel nicht zentrisch										x										

Fehler an Form, Maschine, Material oder Gestaltung

	Unschärf	Keine Formberührung	Abschreckmarken	Wulst am Rand	Unsaubere Oberfläche	Luftschlüsse	Wölbung	Blasen	Dünnstellen	Ungleiche Wandstärke	Falten	Materialaufriss bei Formkontakt	Material haftet am Werkzeug	Risse im Ziehteil	Weißbruch	Faltenbildung beim Aufheizen	Ziehteil formt sich zurück	Ziehteil verbogen	Ziehteil instabil	Material erwärmt sich ungleichmäßig
Mögliche Ursache																				
Form zu kalt		x	x									x		x						
Form zu heiß						x	x										x	x		
Form zu glatt				x		x														
Form zu rau					x				x			x	x	x						
Nicht konisch											x		x	x						
Form mit Hinterschnitt													x							
Zu scharfe Kanten und Ecken			x						x		x	x		x						
Keine Entlüftung/ Absaugung													x	x	x					
Formenbrett zu hoch, keine Dichtung	x																			
Form hohl, zu großes Absaugvolumen	x																			
Keine / zu geringe Absaugung	x	x					x													
Keine Absaugung auf Fläche		x	x			x	x				x									
Ungleiche Absaugung, Lochverteilung		x		x			x	x	x											
Absaugung zu groß									x		x									
Form schmutzig					x															
Verstreckung zu groß (Ziehrand klein)	x								x			x								
Zu großer Ziehrand											x									
Segmentabstand zu klein									x											
Spannrahmen zu groß											x				x					
Spannrahmen zu klein	x								x			x								
Spannrahmen nicht dicht	x																			
Spannrahmen nicht ausgespiegelt	x															x				x
Undicht (Dichtgummi)	x																			
Heizung ungleichmäßig								x			x	x				x		x		x
Heizung zu intensiv								x				x								
Tisch zu langsam oder zu schnell			x							x		x	x	x	x					
Vakuumpfilter verschmutzt	x	x																		
Material falsch gelagert (senkrecht)																				x
Material zu dünn gewählt									x											x
Materialstärke ungleichmäßig		x								x										
Fremdeinschlüsse im Material					x															
Material einseitig gereckt				x												x		x		
Zu großer Schrumpfung													x	x						
Enger Verformungsbereich	x	x						x				x								
Material hält keine Wärme		x																		
Verstreckungsverhältnis ungünstig									x									x		
Verrippung anbringen																				x
Wände zu senkrecht											x			x						
Zu scharfe Ecken											x			x						
Versteifungen einformen																				x

5 Warmformen

Es ist das Erwärmen auf der Tiefziehmaschine und das Verstrecken durch Vakuum vom Erwärmen im Ofen und Verformen mittels Stempel und Matrize bzw. Blasen mit Überdruck zu unterscheiden. Im Gegensatz zum Thermoformen, bei dem der Werkstoff eingespannt und ein- oder doppelseitig bei hoher Strahlertemperatur erwärmt wird, findet die Erwärmung für das Warmformen wesentlich schonender im Umluftofen statt.

Auch beim Warmformen wird das thermoplastische Halbzeug bis in den gummielastischen Bereich erwärmt, um die Umformkräfte und die Restspannungen im Bauteil nach der Abkühlung gering zu halten.

Zur Formgebung wird das zugeschnittene und erwärmte Halbzeug um die Form gelegt und durch Unterdruck oder mechanisch auf oder in der Form gehalten bis es so weit abgekühlt ist, dass es eine ausreichende Steifigkeit besitzt.

Um die Maßhaltigkeit der Formteile zu gewährleisten, sollten Voruntersuchungen direkt mit dem Serienwerkzeug oder mit einem in der Form vergleichbaren Werkzeug durchgeführt werden. Weiterhin sollte die Umformtemperatur experimentell bestimmt werden, da die Charakteristik der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur sehr unterschiedlich ausfallen kann. Deutlich wird dies am Beispiel von PVC-U. Die Reißdehnung von PVC-U besitzt bei 135 °C ein Minimum, sodass, abhängig von der Form, auch eine Temperatur außerhalb des für PVC-U gängigen Temperaturbereiches von 110 °C bis 140 °C zum Thermoformen geeignet sein kann.

SIMONA bietet speziell für das Warmformen Halbzeuge wie SIMONA® PE-HD an, die durch die besonderen Produktionsbedingungen Schrumpfwerte aufweisen, die der Warmformung entgegenkommen.

Das benötigte Plattenformat sollte unter Berücksichtigung der Schrumpfwerte zugeschnitten werden. Eine zusätzliche geringe Längenzugabe ist empfehlenswert, da in jedem Falle nachgearbeitet werden muss.

Die Plattenabschnitte werden am besten in einem gut regelbaren Umluftofen erwärmt. Die Thermoplastplatten sollten waagrecht auf Etagenböden eingelegt werden, um die allseitige Erwärmung zu gewährleisten.

Als Anhaltswerte für die Temperatur der zu formenden Platten gelten:

■ PE-HD	125 – 150 °C
■ PP-H	160 – 190 °C
■ PP-C	160 – 175 °C
■ PVC-U	110 – 140 °C
■ CPVC	140 – 160 °C
■ PETG	140 – 170 °C
■ PVDF	175 – 200 °C
■ ECTFE	260 – 270 °C
■ PFA-M	310 – 325 °C
■ PFA	320 – 340 °C

Höhere Temperaturen sind bei Beobachtung der Oberfläche und Messung der Oberflächentemperatur möglich, um die Taktrate zu erhöhen.

Die Erwärmungsdauer hängt von der Temperatur im Umluftofen, dem Bewegungsgrad der umgebenden Warmluft, der Wanddicke der anzuwärmenden Platte und nicht zuletzt von der Kunststoffsorte ab. Als Richtwerte für den Werkstattgebrauch haben sich bewährt:

■ Polyolefine und PVDF	Erwärmungszeit in Minuten: 6 mal Plattendicke (mm)
■ PVC	Erwärmungszeit in Minuten: 3 mal Plattendicke (mm)
■ PETG	Erwärmungszeit in Minuten: 3 mal Plattendicke (mm)

Es ist darauf zu achten, dass die Platten zum Warmformen an allen Stellen gleichmäßig durchgewärmt sind (Sichtprobe). Hierdurch wird die Gefahr des Rückstellens nach dem Formen beim Abkühlen vermindert. Ein Kriterium bei naturfarbenen Werkstoffen ist die vollständige Transparenz des Materials.

Die Auswahl des Formwerkstoffes richtet sich nach der gewünschten Lebensdauer und den Beanspruchungen, also der Anzahl der vorgesehenen Formungen sowie der Oberflächenqualität des fertigen Teiles. Das Formwerkzeug kann aus Gips, Gießharz, Holz, Kunststoff oder aus Metall hergestellt werden. Bei einer Gipsform sollte jedoch auf eine möglichst geringe Restfeuchte geachtet werden, da ansonsten ein Abschrecken auf dem Werkzeug erfolgt.

Im Allgemeinen arbeitet man mit zwei Werkzeughälften (Matrize und Patrize). Gelegentlich wird eine Werkzeughälfte durch ein Tuch ersetzt, der erwärmte Zuschnitt damit über einen Kern gewickelt und bis zum Erkalten festgehalten.

5.1 Warmformen mit kaschierten Materialien

SIMONA® Linerwerkstoffe sind allesamt thermoformbar. Sie können mit verschiedenen Arten der Warmverformung verarbeitet werden. Dies sind bevorzugt:

- unter Vakuum tiefziehen
- via Positiv-/Negativwerkzeug „tiefpressen“ (ggf. mit Vakuumunterstützung)
- warmverformen, zum Beispiel bördeln

Die bevorzugt im Rahmen eingespannte Platte wird im Wärmeluftofen auf etwa 175 °C erwärmt (für kaschiertes PVDF, Temperatur kann für andere Thermoplaste abweichen). Um eine kurze Verweilzeit (3 bis 4 min/mm) zu erreichen, empfiehlt sich ein Ofen mit Umluft und Temperaturen um 200 °C. Die Zeit zwischen Entnahme der Platte aus dem Ofen und Verformen sollte gering gehalten werden. Beim Blasen ist die Verwendung von vorgewärmter Luft vorteilhaft.

Auf diese Weise werden stretchkaschierte PVDF-Platten zu Klöpperböden und anderen Teilen mit einem geringen Streckverhältnis verarbeitet. Verstreckverhältnisse bei Stretch bis maximal 1:1,4 sind erreichbar. Stretchkaschierte Platten dürfen nur einseitig beheizt werden, wenn Strahler verwendet werden.

Das Stretchgewebe ist zwar dreidimensional verstreckbar, aber die Wanddickenverteilung kann aufgrund der unterschiedlichen Oberflächentemperatur nicht so gleichmäßig ausfallen wie bei unkaschierten Platten.

Druck- und Vakuumformverfahren, wie sie häufig zur Ausformung von Klöpperböden angewendet werden, sind mit SIMONA® ECTFE ebenfalls möglich. Die Glasgewebekaschierung von SIMONA® ECTFE ist für die Anwendung ausreichend multiaxial verstreckbar, auch wenn hier das Verstreckverhältnis kleiner als bei Stretchkaschierungen ausfällt. Mit gewebekaschierten Platten sind generell nur abgeminderte Verstreckungsgrade erreichbar. Die angegebenen Werte dienen nur als Richtwerte und können in Abhängigkeit von Maschinen- und Werkzeuggegebenheiten variieren.

Tabelle 4: Tiefziehparameter von ECTFE

	Beidseitige Erwärmung	Einseitige Erwärmung
Oberheizung in °C	450 – 550 (je nach Zone)	–
Unterheizung in °C	400	400
Heizzeit in Sek/mm Plattenstärke	45 – 50	100

ECTFE weist im Temperaturbereich zwischen 170 °C und dem Schmelzbereich eine stark reduzierte Dehnfähigkeit auf. Umformversuche in diesem Bereich führen speziell bei kleinen Radien oder komplizierter Formgebung zu Rissbildung oder Sprödbbruch. Unter Beachtung dieses Umstands lassen sich übliche Verfahren wie Warmbiegen, Bördeln und Abkanten problemlos durchführen.

Für das Druckformen von kaschierten Platten werden diese optimalerweise im Umluftofen auf 180 °C temperiert. Die Umformwerkzeuge sollten dabei mindestens 80 °C heiß sein.

Zur Ausbildung von Flanschflächen werden Linerrohre umgebördelt. Die kerbfreien Schnittkanten werden mittels Heißluftfön, Öl- oder Glycerinbad auf Temperaturen im Schmelzbereich erwärmt. Die Formwerkzeuge sind auf 80 °C vorzuwärmen.

Für weiterführende Informationen zu kaschierten Materialien und deren Verarbeitung kontaktieren Sie bitte unser Technical Service Center (tsc@simona.de).

5.2 Warmformen in der Orthopädie

Für die Herstellung von Orthesen und Prothesen werden SIMOLIFE Produkte ebenfalls nach Erwärmen der Platten warmverformt. Das Tiefziehen solcher Prothesen und Orthesen wird in der Produktbroschüre SIMOLIFE detailliert beschrieben.

6 Biegen

Neben dem vollständigen Erwärmen und Umformen kann auch eine Erwärmung einzelner Bereiche erfolgen, beispielsweise um Kanten oder Winkel herzustellen. Die linienförmige Biegezone einer Platte kann auf verschiedene Arten ein- oder doppelseitig erwärmt werden:

- berührungslos
- mit Strahlern (Infrarot oder Quarzstrahler)
- mit Glühdrähten oder Heizstäben
- mit einem Warmluftgebläse
- durch direkten Kontakt
- von flächigen Heizelementen

Nach einer ausreichenden Erwärmung wird die Kunststoffplatte im vorgesehenen Winkel gebogen und arretiert, bis das Material wieder abgekühlt und fest geworden ist (Anblasen mit Druckluft beschleunigt die Abkühlung).

Als Mindestbiegeradius kann die doppelte Wanddicke der Platte angenommen werden.

7 Anhang

Literatur

- [1] James L. Throne, Joachim Beine: Thermoformen, Hanser Verlag München Wien 1999
- [2] Adolf Illig: Thermoformen in der Praxis, Hanser Verlag München Wien 1997
- [3] Georg Menges: Werkstoffkunde Kunststoffe, Hanser Verlag München Wien 1990
- [4] W. Daum: Halogenstrahler verbessern das Warmformen, Kunststoffe 84 (1994), Bd. 10, S. 1433 – 1436
- [5] Siegfried Sailer: Fehlersuche bei der Vakuumformung, Sonderdruck aus dem Kunststoff-Berater, Heft 11/1967, Heilbronn – Sontheim

8 Rechtliche Hinweise und Beratung

Rechtliche Hinweise

Mit Erscheinen einer neuen Ausgabe verlieren frühere Ausgaben ihre Gültigkeit. Die maßgebliche Version dieser Publikation finden Sie auf unserer Website www.simona.de.

Alle Angaben in dieser Publikation entsprechen dem aktuellen Stand unserer Kenntnisse zum Erscheinungsdatum und sollen über unsere Produkte und mögliche Anwendungen informieren (Irrtum und Druckfehler vorbehalten). Es erfolgt somit keine rechtlich verbindliche Zusicherung von bestimmten Eigenschaften der Produkte oder deren Eignung für einen konkreten Einsatzzweck.

Die einwandfreie Qualität unserer Produkte gewährleisten wir ausschließlich im Rahmen unserer Allgemeinen Geschäftsbedingungen und im dort genannten Umfang.

Für Anwendungen, Verwendungen, Verarbeitungen oder den sonstigen Gebrauch dieser Informationen oder unserer Produkte sowie die sich daraus ergebenden Folgen übernehmen wir keine Haftung. Der Käufer ist verpflichtet, die Qualität sowie die Eigenschaften der Produkte zu kontrollieren. Er übernimmt die volle Verantwortung für Auswahl, Anwendung, Verwendung und Verarbeitung der Produkte und den Gebrauch der Informationen sowie die Folgen daraus. Etwa bestehende Schutzrechte Dritter sind zu berücksichtigen.

Jede Vervielfältigung dieser Publikation sowie die zusammenhanglose Nutzung einzelner Inhalte aus dieser Publikation sind untersagt und werden verfolgt. Ausnahmen hiervon bedürfen in jedem Fall unseres schriftlichen vorherigen Einverständnisses.

Beratung

Unsere anwendungstechnische Beratung erfolgt nach bestem Wissen und basiert auf Ihren Angaben sowie dem uns aktuell bekannten Stand der Technik. Die Beratung stellt keine Zusicherung von bestimmten Eigenschaften dar und begründet kein selbstständiges, vertragliches Rechtsverhältnis.

Wir haften nur für Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit, in keinem Fall aber für die Richtigkeit und Vollständigkeit Ihrer Angaben sowie der hierauf basierenden Ergebnisse unserer Beratung. Unsere Angaben entbinden Sie nicht von der Pflicht der eigenen Prüfung.

Änderungen aufgrund neuer Erkenntnisse und Bewertungen bleiben vorbehalten.

Unsere Mitarbeitenden des Technical Service Centers und des Customer Service beraten Sie gerne zur Verarbeitung und dem Einsatz von thermoplastischen Halbzeugen sowie zur Verfügbarkeit unserer Produkte.

Technical Service Center
Phone +49 (0) 67 52 14-587
tsc@simona.de

Customer Service
Phone +49 (0) 67 52 14-926
sales@simona.de

SIMONA worldwide

SIMONA AG

Teichweg 16
55606 Kirm
Germany
Phone +49 (0) 67 52 14-0
Fax +49 (0) 67 52 14-211
mail@simona.de
www.simona.de

PRODUCTION SITES

Plant I
Teichweg 16
55606 Kirm
Germany

Plant II
Sulzbacher Straße 77
55606 Kirm
Germany

Plant III
Gewerbestraße 1-2
77975 Ringsheim
Germany

SIMONA Plast-Technik s.r.o.
U Autodílen č.p. 23
43603 Litvinov-Chudeřín
Czech Republic

**SIMONA ENGINEERING PLASTICS
(Guangdong) Co. Ltd.**
No. 368 Jinou Road
High & New Technology Industrial
Development Zone
Jiangmen, Guangdong
China 529000

SIMONA AMERICA INC.
101 Power Boulevard
Archbald, PA 18403
USA

**Boltaron Inc.
A SIMONA Company**
1 General Street
Newcomerstown, OH 43832
USA

SALES OFFICES

SIMONA S.A.S. FRANCE
43, avenue de l'Europe
95330 Domont
France
Phone +33 (0) 1 39 35 49 49
Fax +33 (0) 1 39 91 05 58
mail@simona-fr.com
www.simona-fr.com

SIMONA UK LIMITED
Telford Drive
Brookmead Industrial Park
Stafford ST16 3ST
Great Britain
Phone +44 (0) 17 85 22 24 44
Fax +44 (0) 17 85 22 20 80
mail@simona-uk.com
www.simona-uk.com

SIMONA AG SWITZERLAND
Industriezone
Bäumlimattstrasse 16
4313 Möhlin
Switzerland
Phone +41 (0) 61 8 55 90 70
Fax +41 (0) 61 8 55 90 75
mail@simona-ch.com
www.simona-ch.com

**SIMONA S.r.l. SOCIETÀ
UNIPERSONALE**
Via Volontari del Sangue 54a
20093 Cologno Monzese (MI)
Italy
Phone +39 02 250 85 1
Fax +39 02 250 85 20
commerciale@simona-it.com
www.simona-it.com

**SIMONA IBERICA
SEMIELABORADOS S.L.**
Doctor Josep Castells, 26-30
Polígono Industrial Fonollar
08830 Sant Boi de Llobregat
Spain
Phone +34 93 635 41 03
Fax +34 93 630 88 90
mail@simona-es.com
www.simona-es.com

SIMONA Plast-Technik s.r.o.
Paříkova 910/11a
19000 Praha 9 - Vysočany
Czech Republic
Phone +420 236 160 701
Fax +420 476 767 313
mail@simona-cz.com
www.simona-cz.com

SIMONA POLSKA Sp. z o.o.
ul. Wrocławska 36
Wojkowice k / Wrocławia
55-020 Żórawina
Poland
Phone +48 (0) 71 3 52 80 20
Fax +48 (0) 71 3 52 81 40
mail@simona-pl.com
www.simona-pl.com

OOO "SIMONA RUS"
Projektiruemy proezd No. 4062,
d. 6, str. 16
BC PORTPLAZA
115432 Moscow
Russian Federation
Phone +7 (499) 683 00 41
Fax +7 (499) 683 00 42
mail@simona-ru.com
www.simona-ru.com

SIMONA FAR EAST LIMITED
Room 501, 5/F
CCT Telecom Building
11 Wo Shing Street
Fo Tan, Hong Kong
China
Phone +852 29 47 01 93
Fax +852 29 47 01 98
sales@simona-hk.com
www.simona-cn.com

**SIMONA ENGINEERING PLASTICS
TRADING (Shanghai) Co. Ltd.**
Unit 1905, Tower B, The Place
No. 100 Zunyi Road
Changning District
Shanghai
China 200051
Phone +86 21 6267 0881
Fax +86 21 6267 0885
shanghai@simona-cn.com
www.simona-cn.com

SIMONA INDIA PRIVATE LIMITED
Kaledonia, Unit No. 1B, A Wing
5th Floor, Sahar Road
Off Western Express Highway
Andheri East
Mumbai 400069
India
Phone +91 (0) 22 62 154 053
sales@simona-in.com

SIMONA AMERICA INC.
101 Power Boulevard
Archbald, PA 18403
USA
Phone +1 866 501 2992
Fax +1 800 522 4857
mail@simona-america.com
www.simona-america.com

**Boltaron Inc.
A SIMONA Company**
1 General Street
Newcomerstown, OH 43832
USA
Phone +1 800 342 7444
Fax +1 740 498 5448
info@boltaron.com
www.boltaron.com



SIMONA AG

Teichweg 16
55606 Kirn
Germany

Phone +49 (0) 67 52 14-0
Fax +49 (0) 67 52 14-211
mail@simona.de
www.simona.de