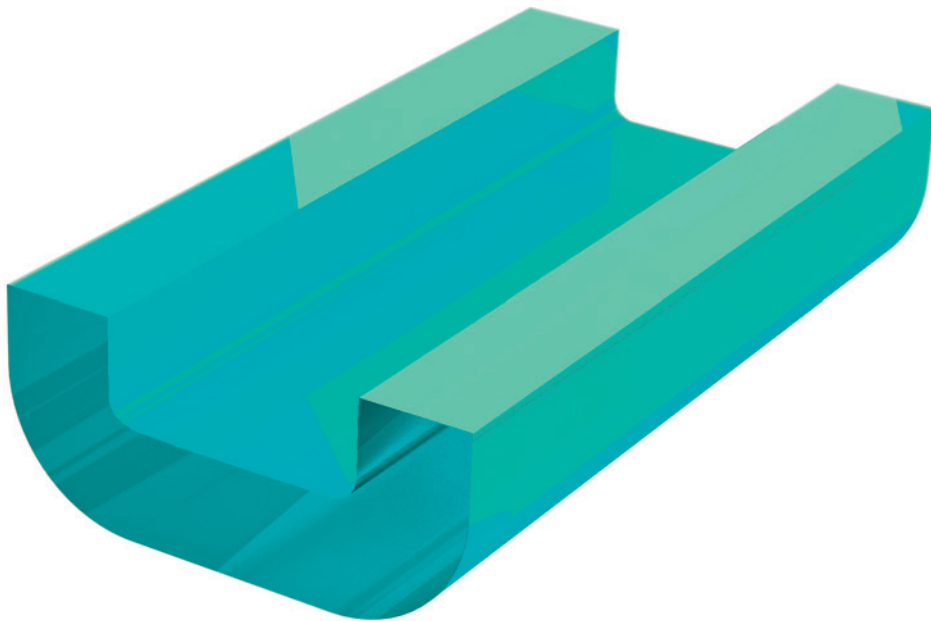


VERARBEITUNGSRICHTLINIEN

## Umformen von **PLEXIGLAS®**



## Inhalt

<b>1. Allgemeines</b> .....	<b>3</b>
1.1 Lieferform.....	3
1.2 Zuschnittgrößen und Schrumpf.....	4
1.3 Schutzfolie.....	4
1.4 Lagerung und Vortrocknung.....	4
<b>2. Erwärmen</b> .....	<b>5</b>
2.1 Umformtemperatur.....	5
2.2 Erwärmungsdauer.....	5
<b>3. Erwärmungsverfahren</b> .....	<b>6</b>
3.1 Erwärmung durch Luft.....	6
3.2 Flächige und linienförmige Erwärmung durch Infrarot-Strahlung.....	7
3.3 Kontakt-Erwärmung.....	8
3.4 Weitere Verfahren.....	8
<b>4. Umformen</b> .....	<b>9</b>
4.1 Voraussetzungen und Verhalten.....	9
<b>5. Umformverfahren</b> .....	<b>11</b>
5.1 Biegeumformen.....	11
5.2 Druckumformen.....	15
5.3 Zugdruckumformen.....	16
5.4 Zugumformen.....	16
5.5 Warmformen mit Tiefziehmaschinen.....	22
5.6 Warmformen mit Pressen.....	24
5.7 Warmformen von Rohren und Stäben.....	26
<b>6. Abkühlen</b> .....	<b>28</b>
<b>7. Werkzeuge</b> .....	<b>29</b>
7.1 Formwerkzeuge.....	29
7.2 Spannwerkzeuge.....	31

### Anmerkungen:

Für professionelle PLEXIGLAS® Verarbeiter sind außer dieser Schrift noch weitere Verarbeitungsrichtlinien erschienen zum Thema:

**Bearbeiten von PLEXIGLAS®**  
(Kenn-Nr. 311-1)

**Fügen von PLEXIGLAS®**  
(Kenn-Nr. 311-3)

**Oberflächenbehandeln von PLEXIGLAS®**  
(Kenn-Nr. 311-4)

Heimwerker finden wertvolle Hinweise zu PLEXIGLAS® in

**Tipps zur Verarbeitung von PLEXIGLAS®**  
(Kenn-Nr. 311-5)

Über Eigenschaften und Verarbeitung einiger unserer Produkte und deren Anwendungen, z. B.

- Stegplatten und Wellplatten,
- Verglasungen mit massiven Platten,
- Lärmschutzwände,
- Lichtwerbung u. a.

liegen gesonderte Druckschriften vor, die beim PLEXIGLAS® Lieferanten angefordert werden können. Bei der Verwendung unserer Produkte sind außerdem zu beachten:

- die regional gültigen Bauvorschriften und Immissionsschutzgesetze,
- zutreffende Normen, z. B. DIN 1055,
- Gewährleistungen nach VOB oder BGB,
- Berufsgenossenschafts-Richtlinien u. a.

# 1. Allgemeines

PLEXIGLAS®, das von uns weltweit erstmals hergestellte Acrylglas (Polymethylmethacrylat, PMMA) wird auch wegen seiner hervorragenden Umformbarkeit als vielseitiger Werkstoff geschätzt. Bei PLEXIGLAS® GS handelt es sich um gegossenes, bei PLEXIGLAS® XT um extrudiertes Material.

Beide PLEXIGLAS® Arten haben das für amorphe Thermoplaste typische temperaturabhängige Formänderungsverhalten: Innerhalb bestimmter Temperaturbereiche nehmen sie unterschiedliche Zustandsformen an – fest, thermoelastisch oder thermoplastisch. Ursache ist das unterschiedliche Molekulargewicht von gegossenen und extrudierten Platten, Rohren und Stäben.

Daraus resultiert ein unterschiedliches technologisches Verhalten, was insbesondere beim Umformen beachtet werden muss.

Beim Umformen interessiert vor allem der thermoelastische Bereich, in dem die Thermoplaste in einen gummi-elastischen Zustand übergehen und so beispielsweise durch Pressen, Biegen oder Streckziehen spanlos warmgeformt werden können. Die Übersicht (Abb. 1) zeigt die Zustandsbereiche von PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT bei verschiedenen Temperaturen: Gegossenes (hochmolekulares) PLEXIGLAS® GS weist in einem breiten Band höherer Temperaturen ein überwiegend thermoelastisches Verhalten auf. Umgeformte Fertigteile besitzen daher keinen nennenswerten plastischen Formungszustand und gehen nach einem erneuten Erwärmen auf Umformtemperatur in ihre ursprüngliche Ausgangsform (ähnlich einer elastischen Feder) zurück. Fehlformungen können so ohne Materialverlust korrigiert werden.

Der thermoelastische Bereich von extrudiertem (niedermolekularem) PLEXIGLAS® XT ist demgegenüber relativ schmal. Bei höheren Temperaturen wird es thermoplastisch, d.h. teigig bzw. schmelzflüssig. Da der Übergang vom thermoelastischen

zum thermoplastischen Zustand jedoch nicht scharf abgegrenzt ist, verbleibt im Formteil je nach Umformtemperatur ein mehr oder weniger großer Anteil an „eingefrorenem“ plastischen Formungszustand. Daher erreichen Fertigteile aus PLEXIGLAS® XT beim Wiedererwärmen nicht mehr ganz die ursprüngliche Ausgangsform. Die Umformung ist daher nur teilweise reversibel.

Diese GS- und XT-typischen Unterschiede gelten auch für PLEXIGLAS® Produkte für bestimmte Anwendungen, wie Soundstop (transparenter Lärmschutz), oder mit speziellen Oberflächen. Dies können kratzfest beschichtete, strukturierte, verspiegelte oder als HEATSTOP (Sonnenschutz reflektierend), Satinice (spezielle Mattierungen) oder NO DROP (Wasser spreitend) vergütete PLEXIGLAS® Sorten sein. Wo Unterschiede in der Umformbarkeit zu beachten sind, wird in dem jeweiligen Kapitel darauf hingewiesen.

Ziel dieser Broschüre ist es, zu optimalen Arbeitsergebnissen beizutragen. Sollten Sie bei der Lektüre oder während der Arbeit Fragen haben, wenden Sie sich bitte an Ihren

PLEXIGLAS® Lieferanten oder an unseren „Technischen Service“. Auch für zusätzliche Anregungen aus der Sicht des Praktikers sind wir dankbar.

### 1.1 Lieferform

PLEXIGLAS® GS stellen wir in Form von Massivplatten, Blöcken, Stäben und Rohren mit glatten oder matten bzw. satinierten (PLEXIGLAS® Satinice) Oberflächen her.

PLEXIGLAS® XT gibt es in herkömmlichem und in schlagzäh modifiziertem Acrylglas (PLEXIGLAS® Resist) als glatte, strukturierte oder matte bzw. satinierte (PLEXIGLAS® Satinice) Massivplatten, Wellplatten, Stegplatten, Spiegel, Rohre und Stäbe sowie Folien.

Farbige PLEXIGLAS® Sorten sind in der Regel völlig gleichmäßig durchgefärbt.

Ob Standardformate oder Zuschnitte: Alle unsere Palettenverpackungen sind gekennzeichnet mit Hinweisen zur Lagerung und zum innerbetrieblichen Transport.

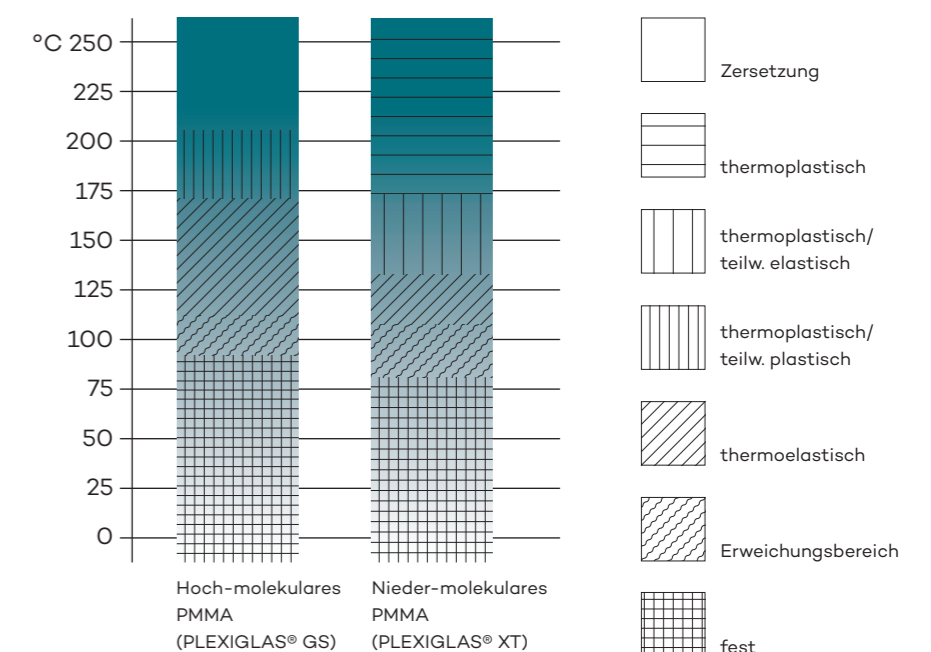


Abb. 1: Zustandsbereiche in Abhängigkeit von der Temperatur

Grundsätzlich ist es besser, PLEXIGLAS® in der Halle zu lagern. Alle unsere Platten sind durch Polyethylen-Folie geschützt, die problemlos entsorgt werden kann. Bei Lagerung im Freien ist sorgfältige zusätzliche Abdeckung zu gewährleisten.

### 1.2 Zuschnittgrößen und Schrumpfung

Beim ersten Erwärmen von PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT über die Erweichungstemperatur hinaus wird ein herstellungsbedingter einmaliger Schrumpfung des Plattenmaterials in Länge bzw. Breite ausgelöst. Diese Abmessungsveränderung ist beim vorherigen Zuschneiden der zu formenden Platten evtl. zu berücksichtigen. Bei gegossenem Acrylglas ist Länge und Breite der Platte gleichartig von diesem Schrumpfung betroffen. Bei allen extrudierten Sorten ist er hauptsächlich in Extrusionsrichtung vorhanden, kann quer dazu Null sein oder sogar in eine geringfügige Abmessungszunahme übergehen. Detaillierte Informationen sind Abb. 2 zu entnehmen.

Der Plattenschrumpfung tritt bei Verarbeitung in Tiefziehmaschinen nicht auf, macht sich jedoch beim Erwärmen der nicht eingespannten Plattenzuschnitte, z.B. bei Ofenerwärmung, bemerkbar. Gegebenenfalls ist ein Vorversuch durchzuführen.

### 1.3 Schutzfolie

Abhängig von Sorte und Dicke schützen haftende, selbsthaftende oder selbstklebende umweltschonende Polyethylen-Folien (PE) die Oberflächen unserer Platten. Normalerweise sollte der Oberflächenschutz bis zum endgültigen Einsatz des Fertigteils an

der Platte bleiben. Muss er beispielsweise vor dem Warmformen oder Verkleben entfernt werden: Platte an einer Kante gut festhalten und die Folie **ruckartig** abziehen.

Sind die Platten Witterungseinflüssen ausgesetzt, müssen alle Folien unabhängig von ihrer jeweiligen Haftungseigenschaft **innerhalb von vier Wochen** entfernt werden, da nach diesem Zeitraum die Gefahr besteht, dass die Polyethylen-Folie versprödet oder ihre Haftung sogar vergrößert wird. In beiden Fällen ist ein sachgemäßes Entfernen der Folie nicht mehr möglich und daher eine Beschädigung der Platten nicht auszuschließen.

Durch das Abziehen der Schutzfolie wird die Oberfläche von Kunststoffen statisch aufgeladen, sie zieht Staub an. **Vor dem Umformen sollte deshalb die Platte antistatisch behandelt werden, beispielsweise durch Abwaschen mit netzmittelhaltigem Wasser oder Absprühen mit ionisierter Luft.** Bei weißen und farbigen Platten aus PLEXIGLAS® GS und XT fällt herstellungsbedingt die Oberflächenqualität der beiden Plattenseiten etwas unterschiedlich aus. Die Qualitätskontrolle wird bei der Herstellung an der oberen Plattenseite durchgeführt, die für die Anwendung die Brauch-Seite darstellt. Diese Seite ist deshalb auf der Schutzfolie entsprechend gekennzeichnet.

### 1.4 Lagerung und Vortrocknung

Die meisten Kunststoffe nehmen je nach Lagerung und Klima Feuchtigkeit auf. Dies ist bei den üblichen Anwendungstemperaturen ohne Bedeutung, kann bei **extrudiertem Acrylglas** jedoch bei höheren Tem-

peraturen während der Erwärmung zur Blasenbildung führen. Deshalb empfiehlt sich ein längerzeitiges Vortrocknen in Wärmeschränken mit Luftumwälzung bei Temperaturen unterhalb der Materialerweichung. Dabei muss zwischen den von ihren Schutzfolien befreiten Platten die Luft zirkulieren können. Aus wirtschaftlichen Gründen sollte das Umformen dem Vortrocknen unmittelbar folgen. Zu beachten ist, dass die Platten bei Abkühlung unter 100 °C allmählich wieder Feuchtigkeit aufnehmen. Bei rascher, zügiger Erwärmung insbesondere durch Infrarot-Strahler kann u. U. auf ein Vortrocknen verzichtet werden. Ist dies nicht der Fall, müssen die Erwärmungsbedingungen je nach Formteil erprobt und eingestellt werden.

Beim Abkanten ist es jedoch fast immer möglich, das Vortrocknen einzusparen.

Bei PLEXIGLAS® XT Platten ist im allgemeinen ein Vortrocknen vor dem Warmformen nicht erforderlich, wenn die Schutzfolie unbeschädigt ist und die werkstoffgerechten Lagerungsbedingungen eingehalten wurden. Sind diese Voraussetzungen nicht gegeben, reicht im allgemeinen bei PLEXIGLAS® XT auch bei Scheiben mit relativ hohem Wassergehalt eine Vortrocknungszeit von 24 Stunden bei 80 °C aus.

Besonders bei PLEXIGLAS® XT sind die Plattenstapel während der Lagerung immer in die Folienverpackung einzuschlagen, um bei längerer Lagerung Verwellungen der Plattenränder als Folge von Feuchtigkeitsaufnahme zu vermindern. Im Gegensatz zu Rohren aus PLEXIGLAS® GS können bei PLEXIGLAS® XT Rohren beim Erwärmen bzw. Warmformen optische Störungen oder Blasenbildung infolge aufgenommener Feuchtigkeit entstehen. Dies ist durch Vortrocknen in einem Umluftofen bei ca. 70 °C zu vermeiden. Die nötige Trocknungszeit kann pro Millimeter Wanddicke mit ca. einer Stunde angesetzt werden.

Plattendicke				
Schrumpfung beim ersten Erwärmen auf Umformtemperatur	PLEXIGLAS® GS	PLEXIGLAS® XT		
		in Länge und Breite	in Extrusionsrichtung (in Querrichtung unwesentlich)	
	<b>alle Sorten</b>	<b>Oberfläche</b>	Gallery AR	strukturiert
		glatt	Satinice	
max. 2 %	alle Dicken	–	–	–
max. 3 %	–	≥ 3 mm	–	–
max. 6 %	–	< 3 mm	alle Dicken	alle Dicken

Abb. 2: Erwärmungsschrumpfung

## 2. Erwärmen

Grundsätzlich sollten PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT durch Luftkonvektion oder Infrarot-Strahlung möglichst kurz und mit möglichst niedrigen Formungstemperaturen erwärmt werden, um Veränderungen im Material oder im Formteil zu vermeiden. Kratzfest beschichtete Platten aus PLEXIGLAS® lassen sich im Allgemeinen nicht erwärmen bzw. warmformen (Risse-Risiko für die Beschichtung). Sie können jedoch kalt gewölbt eingebaut werden.

Bei der Ofen-Erwärmung wird auf der gesamten Platte eine gleichmäßige Temperatur als gute Formvoraussetzung sichergestellt. Bei der Verwendung von Infrarot-Strahlern zum Erwärmen auf Umformtemperaturen ist es – auch bei der Verwendung temperierter Werkzeugrahmen – zweckmäßig, die Plattenzuschnitte auf ca. 80 °C vorzuwärmen, um späterem Verziehen der Formteilstalt vorzubeugen. Infrarot-Bestrahlung erlaubt unterschiedliche Temperaturen auf der zu formenden Platte, z.B. um eine bestimmte Dickenverteilung zu erreichen.

Um zu schnelles Abkühlen und damit oberflächiges Erstarren zu vermeiden, ist es vorteilhaft, das Material direkt am Umformwerkzeug zu erwärmen.

Die Aufheizzeit nimmt mit der Materialdicke gemäß Abb. 3 zu. Zu beachten ist auch der Erwärmungsschrumpfung gemäß Abb. 2.

### 2.1 Umformtemperatur

Zum Umformen im thermoelastischen bzw. thermoplastischen Bereich sind folgende Materialtemperaturen anzustreben:

**PLEXIGLAS® GS: 160 bis 175 °C**  
**PLEXIGLAS® XT: 150 bis 160 °C**

Je nach Umformungsgrad und Umformgeschwindigkeit (siehe 4.1) sind

diese Temperaturen gegebenenfalls nach oben oder unten zu korrigieren, um die gute Optik der Oberfläche zu erhalten. In der Praxis ist es deshalb notwendig, die Erwärmungsbedingungen der Heizgeräte so einzustellen, dass möglichst die oben angegebenen Materialtemperaturen erreicht werden. Die Kontrolle der Materialtemperatur wird vorzugsweise durch berührungsloses Messen, z.B. mit dem Strahlungs-pyrometer vorgenommen.

Grundsätzlich ist es bei PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT vorteilhaft, auch Formwerkzeug, Spannrahmen bzw. Konturplatten für die Umformung zu temperieren:

**für PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT: ca. 60 bis 80 °C**

### 2.2 Erwärmungsdauer

Die Erwärmungsdauer für PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT ist in erster Linie von der Materialdicke und der Erwärmungsmethode

abhängig. Die Luftgeschwindigkeit im Wärmeschrank und der Abstand zwischen Scheibe und IR-Strahler sind weitere Faktoren. Beim Einsatz von Infrarot-Strahlern hat auch die Einfärbung der Platten aufgrund der unterschiedlichen Absorptionsgrade einen Einfluss. Das Diagramm Abb. 3 zeigt deshalb schematisch die Zeit für die Erwärmung im Wärmeschrank und durch Infrarot-Strahler in Abhängigkeit von der Materialstärke bei z.B. PLEXIGLAS® XT. Bei einseitiger Erwärmung ist sie in etwa zu verdoppeln, was jedoch nur bis 6 mm Materialdicke sinnvoll ist.

PLEXIGLAS® GS ist gegen unnötig verlängerte Erwärmungszeiten weitgehend tolerant. Bei PLEXIGLAS® XT kann übermäßige Erwärmungsdauer zum Verziehen des hängenden Zuschnitte (z.B. im Vertikalofen oder der Vakuumformmaschine) oder zu deutlicheren Abdrücken von der Unterlage (z.B. im Horizontalofen) führen.

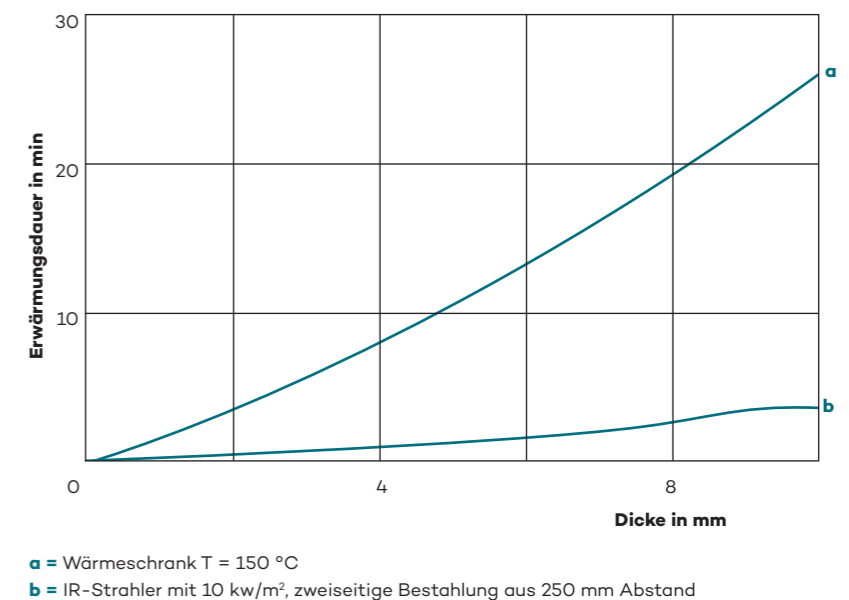


Abb. 3: Erwärmungsdauer

# 3. Erwärmungsverfahren

Erwärmungsverfahren	
<b>Erwärmung durch Luft</b>	
Horizontalöfen	<ul style="list-style-type: none"> <li>für großflächige Zuschnitte (besonders PLEXIGLAS® XT)</li> </ul>
Vertikalöfen	<ul style="list-style-type: none"> <li>gleichmäßige Erwärmung</li> <li>universell verwendbar (Tempern, Rückformen)</li> <li>bedingt auch horizontal verwendbar</li> </ul>
Gebläse	<ul style="list-style-type: none"> <li>für kleinformatische Sonderteile</li> </ul>
<b>Erwärmung durch Flächenstrahler</b>	
langwellig (Dunkelstrahler), Keramik, $\lambda = 3,5$ bis $6 \mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>kostengünstig</li> </ul>
mittelwellig Quarzglas-, Quarzglasstrahler $\lambda = 2,2$ bis $2,7 \mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>optimale Erwärmung</li> <li>schnell reagierend</li> </ul>
kurzwellig (Hellstrahler), $\lambda = 0,9$ bis $1,6 \mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>leistungsstark und schnell</li> <li>Überhitzungsrisiko durch „Pulsen“ mindern</li> </ul>
<b>Erwärmung durch linienförmige Strahler (beidseitig empfohlen)</b>	
Heizdrähte (mit Trafo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>bis ca. <math>6 \text{ mm}</math> Plattendicke</li> </ul>
Heizstäbe	<ul style="list-style-type: none"> <li>bis ca. <math>12 \text{ mm}</math></li> <li>kostengünstig</li> <li>einfache Handhabung</li> </ul>
Quarzglas	<ul style="list-style-type: none"> <li>leistungsstark bis Blockdicke</li> <li>effektivste Erwärmung</li> </ul>
<b>Erwärmung durch Kontakt</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>wenig empfehlenswert</li> </ul>

Abb. 4: Kurzübersicht der bekanntesten Erwärmungsverfahren

## 3.1 Erwärmung durch Luft

Für die Erwärmung von PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT in Form von Platten, Blöcken, Profilen oder Rohren sind Wärmeschränke mit Luftumwälzung besonders geeignet. Für die meisten Anwendungsfälle ist der **vertikale Wärmeschrank** am besten, weil hier die Platten berührungsfrei hängend erwärmt werden, oder durch das Einlegen von Rosten kleinere Plattenzuschnitte auch horizontal, ähnlich wie in einem Schubladenofer, erwärmt werden können.

Auch zum Spannungsfrei-Tempern, besonders von größeren Formteilen, ist der vertikale Wärmeschrank unentbehrlich, ebenso zum Rückformen falsch geformter Teile, insbesondere aus PLEXIGLAS® GS.

Dabei sind folgende Voraussetzungen zu beachten:

- Die Temperatur im Wärmeschrank sollte sich auf  $\pm 3^\circ\text{C}$  im Bereich

von  $60^\circ$  bis  $250^\circ\text{C}$  regeln lassen.

- Auch bei zweiseitiger Beschickung des Wärmeofens darf die Temperaturtoleranz von  $\pm 5^\circ\text{C}$  nicht überschritten werden.
- Die Luftumwälzung muss möglichst intensiv sein (Luftgeschwindigkeit  $60$  bis  $90 \text{ m/min}$ ), um eine schnelle und gleichmäßige Erwärmung zu gewährleisten.



Abb. 5: Einfahren einer aufgehängten PLEXIGLAS® Platte in den Wärmeschrank

- Eine zuverlässige Temperaturregelung bringt den Vorteil, dass Temper-Programme auch außerhalb der Arbeitszeit durchgeführt werden können.

Platten und Rohre aus PLEXIGLAS® GS und XT werden am besten hängend erwärmt, um eine gleichmäßige Durchwärmung sicherzustellen. Zugleich werden – außer an den Halterungen – Abdrücke vermieden.

Großformatige Scheiben aus PLEXIGLAS® XT sollten liegend erwärmt werden. Aufgrund ihres thermoplastischen Verhaltens besteht sonst die Gefahr, dass sie sich verziehen, dehnen oder aus der Halterung rutschen. Als Auflage sind besonders aufgeraute oder sandgestrahlte Aluminiumbleche, PTFE-beschichtete Bleche oder besondere Glasgewebe geeignet. Sie verhindern ein Festkleben des erwärmten Materials.

Kleine Zuschnitte von PLEXIGLAS® GS Blöcken können auf die Stirnseite gestellt werden. Bei größeren Abmessungen ist es vorteilhaft, die Blöcke auf eine Stoffunterlage zu legen, so dass ein gleitendes Umsetzen auf das Formwerkzeug möglich ist.

**Falls der Wärmeschrank auch für andere Zwecke verwendet wird, bitte darauf achten, dass keine Stoffe zurückbleiben, die eventuell Korrosion oder Rissbildung hervorrufen können.**

Für die teilweise Erwärmung, bspw. zum Biegen von Rohren, eignen sich vor allem Heißluftgeräte. Dabei ist allerdings darauf zu achten, dass die behandelte Materialstelle nicht überhitzt wird.

## 3.2 Flächige und linienförmige Erwärmung durch IR-Strahlung

Infrarot-Strahlung zum Erwärmen von Platten aus PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT hat den Vorteil, dass eine größere Wärmemenge pro Zeiteinheit als im Ofen übertragen werden kann. Die Heizzeit ist abhängig von Materialdicke, Einfärbung, Plattensorte sowie Art und Abstand der Infrarot-Strahler und der Wellenlänge ihrer abgegebenen Strahlung. Man unterscheidet nach den Maxima-Bereichen der Wellenlängen:

**langwellig:**  $\lambda = 3,5 \mu\text{m}$  bis  $6,0 \mu\text{m}$  (Keramik-, Dunkelstrahler)

**mittelwellig:**  $\lambda = 2,2 \mu\text{m}$  bis  $2,7 \mu\text{m}$  (Quarzglas-, Quarzglasstrahler)

**kurzwellig:**  $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$  bis  $1,6 \mu\text{m}$  (Hellstrahler, Heizlampen)

Während die **langwelligen Dunkelstrahler**, meist in Form von Keramikelementen, eine Strahlungsenergie abgeben, die das Plattenmaterial im wesentlichen von der bestrahlten Oberfläche her erwärmt, haben **kurzwellige Strahler**, insbesondere bei transparentem Material, eine größere Energiedichte und Eindringtiefe der Strahlung. In diesem Fall kann jedoch ein Teil der Energie die Platte durchstrahlen, wird also nicht aufgenommen.

Der Einsatz **mittelwelliger Strahler** ist als Optimum anzusehen und bereits Stand der Technik. Die Platte wird zum einen von außen durch die auf die Oberfläche treffende Strahlung als auch von innen durch den absorbierten Teil der Strahlung erwärmt. Transmittierte Strahlung kann durch einen Reflektor zurückgewonnen werden, was allerdings

nur bei einseitiger Bestrahlung, wie häufig bei dünnen Platten und Folien angewendet, möglich ist. Bei dicken Platten sollte auf jeden Fall eine zweiseitige Bestrahlung gewählt werden.

Mit dem Ziel noch wirtschaftlicher, d.h. schneller zu arbeiten, werden auch sogenannte „Flash“-Strahler bei der Acrylglas-Warmformung eingesetzt. Sie arbeiten kurz- bis mittelwellig und geben die Energie pulsierend an die Platten ab (auch um Überhitzung / Verbrennung zu vermeiden).

Die **flächige Infrarot-Erwärmung** von Platten aus PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT erfolgt mit Heizschirmen, auch Flächenstrahler oder Strahlergruppen genannt. Sie sind entweder in Tiefziehmaschinen eingebaut oder mobil im Betrieb angeordnet, um an unterschiedlichen Formstationen eingesetzt zu werden.

Auch bei einfachen Umform-Arbeiten ist es von Vorteil, wenn die einzelnen Heizschirm-Elemente getrennt gesteuert werden können. Damit ist gewährleistet, dass die am äußeren Rand des Schirms angebrachten Infrarot-Strahler mit höherer Leistung arbeiten, als jene in der Mitte des Heizschirms. Nur so kann eine möglichst gleichmäßige Temperatur auf der gesamten Plattenoberfläche



Abb. 6: Heizbank mit verschiedenen IR-Strahlern und abgekantetem Teil aus PLEXIGLAS®

erreicht und auch der nachteilige kühlende Einfluss des Spannungs ausgleichs werden.

Wenn einzelne Plattenbereiche auf unterschiedliche Temperaturen gebracht werden können, ist dies besonders beim Umformen aufwendig gestalteter Formteile vorteilhaft.

Durch **Abdecken einer definierten Fläche** kann z.B. der zentrale Teil der Platte von der Erwärmung ausgeschlossen werden. Gegebenenfalls werden die Strahler über dieser Fläche abgeschaltet. So kann eine Dickenverteilung entsprechend der gewünschten Formteil-Gestalt erreicht werden. Im abgedeckten Plattenbereich bleibt die ursprüngliche Dicke, d.h. Steifigkeit der Platte, ihre optische Qualität und meist auch die Planität erhalten. Dagegen erfährt der tiefgezogene Randbereich eine deutlichere Verstreckung auf geringere Dicke. Auch das Verzerren bereits aufgebrachtener Siebdrucke wird auf diese Weise verhindert.

Wenn die Platten nicht – wie üblich – in einem Formrahmen eingespannt, sondern flächig aufliegend erwärmt werden, eignet sich während des Erwärmungsvorganges eine Matte aus Glasgewebe als Unterlage, um unerwünschte Abdrücke im Material zu vermeiden.

# 4. Umformen

Zur linienförmigen Erwärmung von PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT eignen sich Heizbänke, also Vorrichtungen, die mit Heizdrähten, Heizstäben oder Quarzstäben als Wärmequellen ausgerüstet sind.

Beim linienförmigen Erwärmen vor dem Biegeumformen, meist Abkanten genannt, muss zur Beibehaltung der guten Oberflächenqualität und Transparenz von PLEXIGLAS® ein Erwärmen mit Kontakt vermieden werden. Außerdem ist das zweiseitige Erwärmen stets dem einseitigen vorzuziehen.

Kreative Möglichkeiten auch beim Abkanten bietet die oberflächenmattierte Produktgruppe PLEXIGLAS® Satinice: an der Erwärmungslinie bleibt die Satinierung erhalten bei Satinice SC, DC und Satinice, während sie bei Gallery AR in Glanz übergeht.

Weitverbreitet ist die Verwendung von **Heizdrähten**, meist aus einer speziellen Chrom-Vanadium-Legierung. Da sie mit Wechselstrom geringer Spannung gespeist werden, ist für jeden Draht ein Transformator erforderlich. Der Draht muss in der Heizbank mit Federn ständig straff gespannt sein, um im erwärmten Zustand das Durchhängen zu vermeiden, was einen unterschiedlichen Abstand zur Platte und damit ungleichmäßige Erwärmung zur Folge hätte. Bei Platten bis zu einer Dicke von ca. 6 mm ist dieses Verfahren – insbesondere bei zweiseitiger Erwärmung – anwendbar.

Vorteilhafter als Heizdrähte sind **Heizstäbe** aus Chrom-Nickel-Stahl. Da sie nur punktwise gehalten und direkt an das Stromnetz (220 Volt) angeschlossen werden, bieten sie gegenüber Heizdrähten Handhabungsvorteile. Durch entsprechendes Biegen eines längeren Heizstabes (zum Beispiel zum U) kann eine Platte auch an zwei Stellen linienförmig erwärmt werden. Die zweiseitige Erwärmung mit Heizstäben ist bei Platten bis zu einer Dicke von etwa 20 mm zu empfehlen.

Eingesetzt werden auch **Quarzglasröhren** mit einfacher oder doppelter Heizwendel. Auch sie werden mit 220 Volt betrieben. Da ihre abgegebene Heizleistung normalerweise höher ist als für Plattenkunststoffe erforderlich, muss sie heruntergeregelt werden. Dies geschieht durch Ein- und Ausschalten über ein Thermoelement oder durch die Verwendung einer Thyristor-Schaltung. Da bei Quarzglasröhren die positiven Eigenschaften eines mittelwelligen Strahlers genutzt werden können, handelt es sich um das effektivste Heizelement: Aufgrund der regelbaren Leistungsabgabe und einer entsprechenden Distanz des Strahlers zum Werkstück können alle Plattendicken – insbesondere bei zweiseitiger Erwärmung – bis hin zu Blöcken von über 50 mm Dicke linienförmig zum Abkanten bzw. Warmbiegen erwärmt werden.

### 3.3 Kontakt-Erwärmung

Die Erwärmung mit **Heizplatten** bleibt im wesentlichen beschränkt auf PLEXIGLAS® GS, teils auch PLEXIGLAS® XT und auch dies nur bei kleineren Zuschnitten. Die Plattendicke sollte 3 mm nicht überschreiten, da es sich meist um eine einseitige Erwärmung handelt. Zweiseitiges Erwärmen – z.B. in Heizpressen – ist auch deshalb

unüblich, weil dabei die gute Oberflächenqualität von PLEXIGLAS® verloren geht. Heizplatten zum Erwärmen von PLEXIGLAS® dürfen keine glatten oder polierten Oberflächen haben. Sandstrahlmattierte Aluminiumplatten und Teflon-beschichtete Platten haben sich bewährt, um Abdrücke an den aufliegenden Kunststoffen zu verringern. Grundsätzlich ist das Erwärmen auf Heizplatten **weniger empfehlenswert**, da eine gleichmäßige Wärmeverteilung nicht gegeben ist.

Auch die linienförmige Erwärmung durch Kontakt, beispielsweise mit einem Heizschwert, ist nicht zu empfehlen, da an den Biegekanten Abdrücke entstehen, die in der Regel nicht zu beseitigen sind. Daher ist in jedem Fall die kontaktfreie Erwärmung vorzuziehen (siehe 3.2).

### 3.4 Weitere Verfahren

Das **Erwärmen mit offener Flamme**, durch **hochfrequente Schwingungen** oder in **Flüssigkeitsbädern** hat sich in der Praxis **nicht durchgesetzt**. Das Erwärmen durch **Heißluftgeräte** ist **bedingt empfehlenswert**, z.B. zum Ausbessern von Formteil-Abdrücken und zum Biegen von Rohren. Dabei auftretende Materialspannungen sind zweckmäßigerweise durch Tempern zu beseitigen.

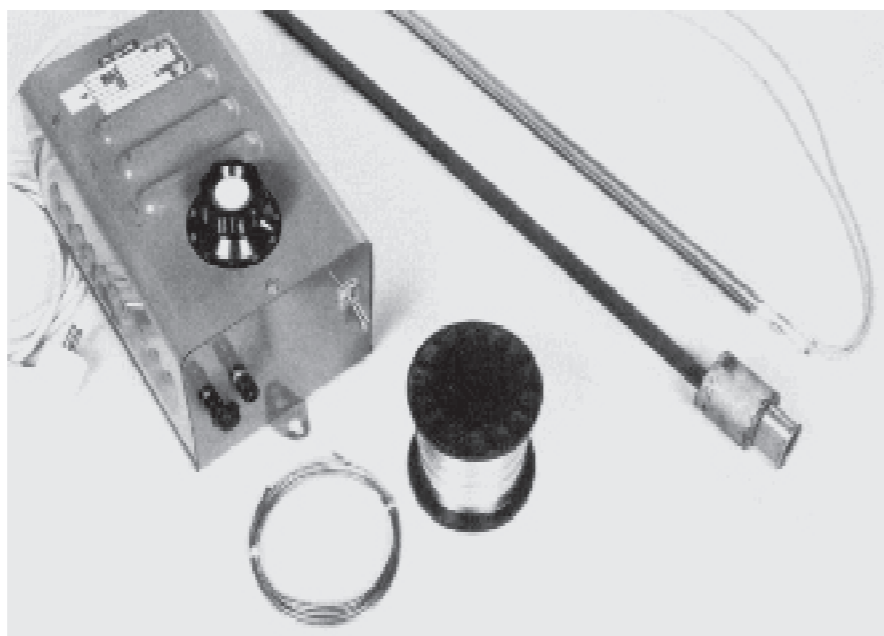


Abb. 7: Heizdrähte mit Transformator, Heizstab und Quarzglasröhre für lineares Erwärmen

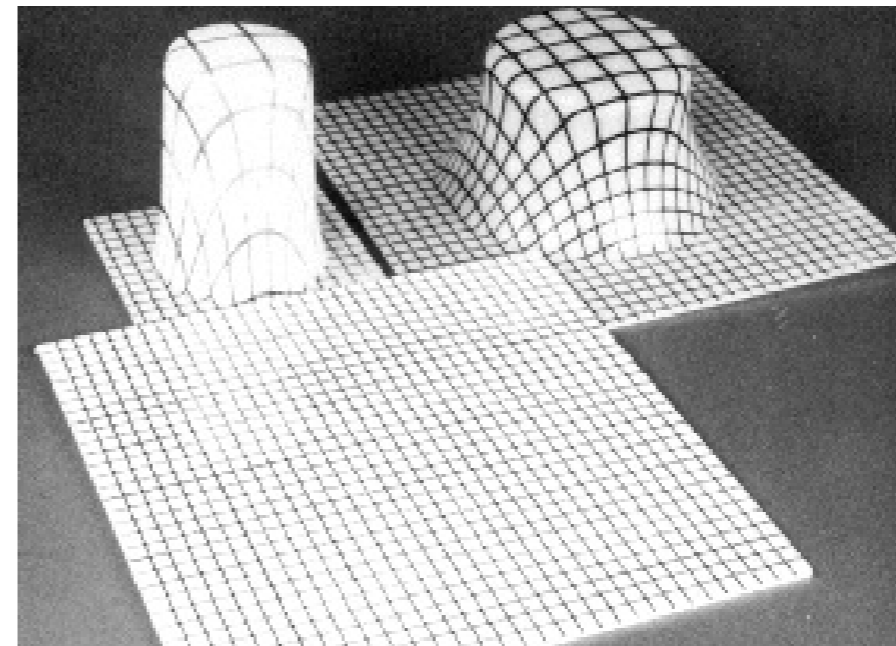


Abb. 8: Darstellung des Umformgrades mittels Raster

Beim Umformen von PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT sind

- Umformgrade (Reckungsgrade),
- Umformkräfte,
- Umformgeschwindigkeiten und
- Umformtemperaturen (siehe 2.1)

im wesentlichen abhängig von den Forderungen, die das Fertigteil in der Praxis erfüllen soll, sowie von seiner spezifischen Gestalt. Daraus resultiert eine entsprechende Gefügeänderung des Materials, die das Verhalten des Formteils beeinflusst.

Alle diese Faktoren sind weitestgehend von der Umformtemperatur abhängig, deren Einfluss jedoch sehr unterschiedlich, ja sogar gegenläufig sein kann. So werden hohe Umformgrade bei PLEXIGLAS® GS und XT bei relativ niedrigen Temperaturen erreicht: Das Umformen verläuft langsamer und zäh, die Oberflächenqualität des Halbzeugs bleibt weitgehend erhalten. Die Formspannung ist dabei relativ hoch, das Formteil weist ein entsprechend hohes Rückstellbestreben auf. Ein minimales Rückstellbestreben ist dagegen nur durch Umformen bei relativ hohen Temperaturen zu verwirklichen. In der Praxis heißt das, dass stets Kompromisse gefunden werden müssen. Die folgenden Kapitel helfen dabei.

### 4.1 Voraussetzungen und Verhalten

Der Umformgrad gibt Aufschluss über die beim Warmformen auftretende Formänderung des Halbzeugs. Bei den üblichen Formungsverfahren, also bei einachsiger (monoaxialer) oder zweiachsiger (biaxialer) Reckung, ist diese Veränderung gekennzeichnet durch eine Vergrößerung der Oberfläche bei entsprechender Verminderung der Materialdicke. Der Grad der Umformung wird definiert als Verhältnis der mittleren Materialdicke vor und nach dem Formen oder aus der Oberflächenvergrößerung. Für die biaxiale Reckung gilt:

Ein Umformgrad von beispielsweise 100 % bedeutet, dass eine quadratische Platte in Länge und Breite jeweils auf das Doppelte gereckt wird. Dabei vergrößert sich die Oberfläche von 100 % vor dem Recken auf 400 %; die Ursprungsdicke verringert sich auf ein Viertel.

In der Praxis soll meist ein möglichst gleichbleibender Umformgrad und damit eine möglichst gleichmäßige Dickenverteilung im Fertigteil erzielt werden. Dies wiederum ist abhängig von der Gestalt des Teils und der Formungsmethode (Abb. 8).

$$R = \left( \sqrt{\frac{d_0}{d_1}} - 1 \right) \cdot 100 \text{ [%]}$$

oder

$$R = \left( \sqrt{\frac{A_1}{A_0}} - 1 \right) \cdot 100 \text{ [%]}$$

R = Umform- oder Reckungsgrad in %  
d0 = Dicke vor dem Umformen  
d1 = Dicke nach dem Umformen  
A0 = Größe der Oberfläche vor dem Umformen  
A1 = Größe der Oberfläche nach dem Umformen

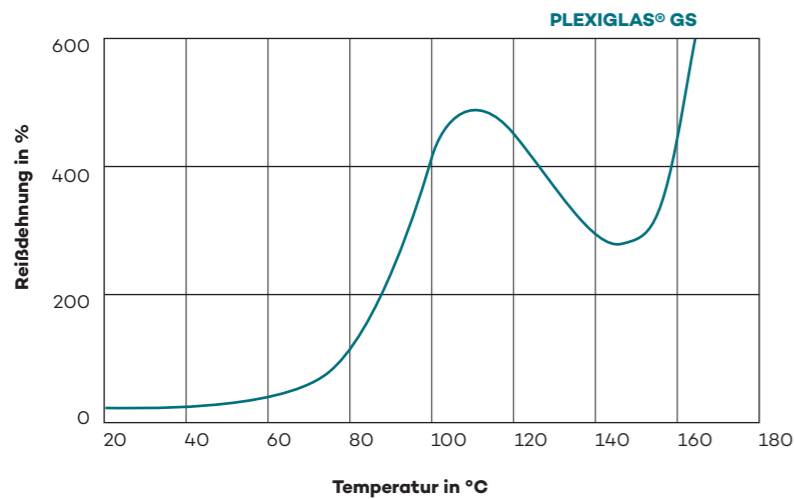


Abb. 9: Abhängigkeit des maximalen Umformgrades (Reißdehnung) von der Temperatur am Beispiel PLEXIGLAS® GS

Welcher Umformgrad für PLEXIGLAS® GS und XT maximal erreicht werden kann, ist abhängig von der Umformgeschwindigkeit, der Materialsorte und vor allem von der Umformtemperatur. Das relative Maß dafür ist die Reißdehnung als Funktion der Temperatur.

In Abb. 9 wird aber deutlich, dass die maximale Reißdehnung bei Temperaturen liegt, die so niedrig sind, dass dennoch ein **optimales Umformen** aus technischen Gründen erst bei höheren Erwärmungstemperaturen möglich ist. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die **Erwärmungstemperatur** deutlich höher sein muss als die Umformtemperatur, da sich das Formteil zwischen Erwärmen und Formen bzw. während dem Formen

abkühlt. Dabei empfiehlt es sich für manche Umformungen das Material während des Umformvorgangs – unabhängig vom Umformgrad – weiter zu beheizen.

Um die Stabilität der Umformeinrichtungen sicherzustellen, ist es erforderlich, die für die Herstellung der Formteile notwendigen **Umformkräfte** zu kennen.

Welche Kräfte im Einzelfall nötig sind, hängt im wesentlichen von drei Faktoren ab:

1. dem Umformgrad, der bestimmt wird von der Gestalt des Werkstücks bzw. durch das Verhältnis von Ausgangsfläche zur Oberfläche des Fertigteils;

2. der Umformtemperatur, die je nach Dauer des Formvorgangs oder durch eine niedrige Werkzeugtemperatur mehr oder weniger stark abfallen kann;
3. der mono- oder biaxialen Reckung.

Hierzu zeigt Abb. 10 das Steifigkeitsverhalten bei höheren Temperaturen.

Die Abb. 11, die aus Abb. 10 hergeleitet ist, macht den Einfluss des Umformgrades auf die aufzuwendenden Formungskräfte bei mono- und biaxialer Reckung deutlich. Daraus lässt sich für einfache Umformarbeiten, bei denen der Verlauf des Umformgrades bekannt ist, in etwa der Kräftebedarf für die biaxiale Umformung errechnen. Bei komplizierteren Formteilen, deren Umformgrad (oder dessen Verlauf) nicht im voraus bestimmbar ist, müssen die Umformkräfte durch praktische Versuche ermittelt oder aus Modellversuchen rechnerisch abgeschätzt werden.

Die **Umformgeschwindigkeit** gibt den Wert an, mit dem das Material im thermoelastischen Bereich gedehnt bzw. gereckt werden kann, ohne dass ein Bruch durch Überschreiten der Festigkeitsgrenze entsteht.

PLEXIGLAS® GS und XT sollten grundsätzlich möglichst **schnell umgeformt** werden, um während des Formvorganges

- kurze Taktzeiten zu erreichen,
- eine stärkere Abkühlung zu vermeiden
- und Energie zu sparen.

Die Umformgeschwindigkeit sollte andererseits so **langsam sein**, dass

- die gewünschte Dickenverteilung sichergestellt ist und
- Warmbrüche am Formteil vermieden werden.

Die Umformgeschwindigkeit kann variieren zwischen

- Sekunden, z. B. bei dünnen PLEXIGLAS® Platten bzw. EUROPLEX® Folien,
- Minuten, z. B. bei den üblichen Verfahren in Vakuumformmaschinen oder
- Stunden, z. B. beim Retardationsverfahren, d. H. dem Überlegformen im Wärmeofen.

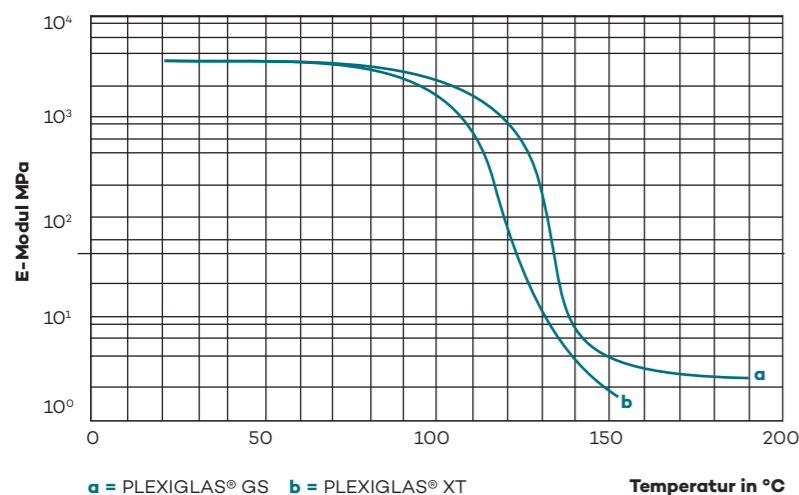


Abb. 10: Elastizitäts-Modul in Abhängigkeit von der Temperatur

Die jeweils empfehlenswerte Umformgeschwindigkeit nimmt zu von PLEXIGLAS® GS zu PLEXIGLAS® XT. Bei relativ langsamer Formung ist es für die Werkstoffe günstig, sie während des Umformens weiter zu beheizen, beispielsweise mit einem Infrarot-Strahler.

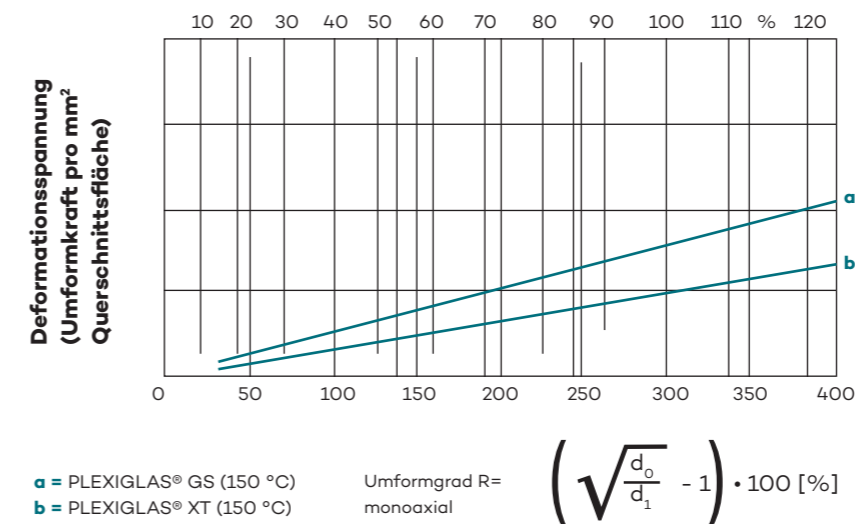
Beim Umformen von PLEXIGLAS® GS und XT orientieren sich die Moleküle in Reckrichtung. Diese Gefügeänderung beeinflusst das Materialverhalten positiv: An ihren gereckten Stellen erfahren Formteile eine Verbesserung der Reißdehnung, der Schlagzähigkeit, des Widerstandes

gegen Rissfortpflanzung und – wenn auch geringfügig – ihrer Beständigkeit gegen das Entstehen von Spannungsrissen.

Die maximal erreichbaren Verbesserungsfaktoren zeigt Abb. 12 am Beispiel von PLEXIGLAS® GS 233/OF00.

## 5. Umformverfahren

$$\text{Umformgrad R= biaxial} = \left( \sqrt{\frac{d_0}{d_1}} - 1 \right) \cdot 100 [\%]$$



a = PLEXIGLAS® GS (150 °C)  
b = PLEXIGLAS® XT (150 °C)

$$\text{Umformgrad R= monoaxial} = \left( \sqrt{\frac{d_0}{d_1}} - 1 \right) \cdot 100 [\%]$$

Abb. 11: Kräftebedarf bei mono- und biaxialer Reckung

PLEXIGLAS® GS 233/OF00				
Eigenschaften		ungereckt	70 % biaxial gereckt	Verbesserungsfaktor
Reißdehnung (+23 °C)	%	5,5	45	8
Rissfortpflanzungswiderstand	mm N/mm²	0,8	4	5
Schlagzähigkeit NKS	kJ/m²	12	30	2,5
Korrosionsspannungen gegen				
• Isopropanol	MPa	11,5	32	2,1
• Diethylenglykol	MPa	20	40	2

Abb. 12: Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch biaxiale Reckung

Die kontinuierliche Erweiterung der Anwendungsbereiche von PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT hat auch zu einer Vielfalt von Umformverfahren geführt, die eine wirtschaftliche und werkstoffgerechte Verarbeitung sicherstellen. Die

Wahl des jeweiligen Verfahrens ist abhängig von:

- Gestalt und Größe des Werkstücks,
- der erforderlichen Wanddickenverteilung,
- der Stückzahl,

- der verwendeten Materialsorte,
- den Anforderungen des Fertigteils hinsichtlich Aussehen, Maßhaltigkeit, Konturschärfe usw.
- und den zur Verfügung stehenden Anlagen, Formwerkzeugen und Hilfsmitteln.

Das Umformen von PLEXIGLAS® GS und XT ist mit einfachen Hilfsmitteln möglich und führt bei sorgfältiger Bearbeitung zu guten Ergebnissen. Für komplizierte Umformarbeiten bzw. größere Serien bietet der Markt maschinelle Einrichtungen bis hin zur computergesteuerten Anlage.

Einen Überblick über die Grundverfahren der Umformung gibt die VDI-Richtlinie 2008, Blatt 1. Die Begriffsbestimmungen für die einzelnen Umformverfahren entsprechen der DIN 8580.

### 5.1 Biegeumformen

„Biegeumformen“ bezeichnet das geradlinige Abkanten oder Abwinkeln und das Überlegformen mit Positiv- und Negativwerkzeugen. Hauptmerkmal dieser Formungsmethode ist die praktisch gleichbleibende Materialdicke in der Erwärmungszone vor und nach dem Umformen.

Beim Abkanten, dem einfachsten Umformverfahren, werden Platten aus PLEXIGLAS® wie unter 3.2 beschrieben linienförmig erwärmt, dann gewinkelt bzw. gebogen und bis zum Erkalten der Teile in der gewünschten Form fixiert. Das Abkanten erfolgt mit einer Biegeschablone oder über eine Biegekante.

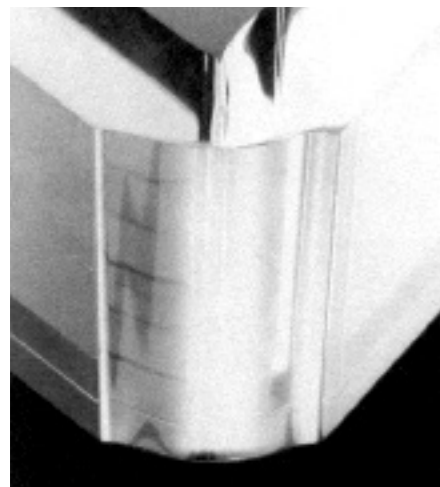


Abb. 13a: Überdehnung durch zu schmale Erwärmungszone

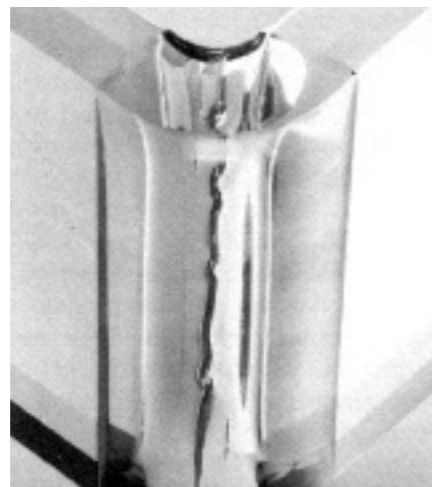


Abb. 13b: Quetschfalten durch zu kleinen Biegeradius

Beim Biegen über eine Kante darf das Material nur einseitig eingespannt werden. Nur so wird eine Reckung und damit eine stärkere Materialverminderung in der Biegezone vermieden. Außerdem ist die Formkante des Klemmprofils so abzurunden, dass die erwärmte Plattenzone damit nicht in Berührung kommt. Sonst entstehen unerwünschte Abdrücke (siehe Abb. 15).

Der **Biegeradius** soll mindestens der **doppelten Plattendicke** entsprechen. Kleinere Radien führen zu unzulässigen Spannungen oder Quetschfalten auf der Innenseite.

Durch das Biegen entsteht an der Kante bei allen durchsichtigen Kunststoffen zwangsläufig eine optische Störung. Sie wird um so deutlicher, je dicker das Material und je kleiner der Biegeradius ist. Um gute Durchsicht auch im Formbereich zu erzielen, sollte deshalb der Biegeradius möglichst groß gewählt werden.

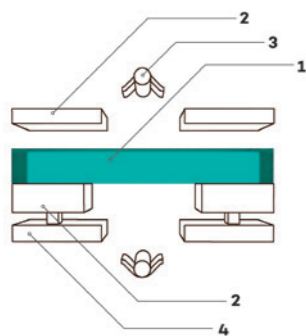


Abb. 14: Abkant-Erwärmen mit Abschattung: Schatter (2) zwischen Platte (1) und IR-Strahler (3) oben und unten; Auflage (4)

Besondere gestalterische Aspekte sind außer mit den glänzend glatten auch mit **matten** PLEXIGLAS® Platten zu erzielen. Bei PLEXIGLAS® Satinice **SC** und **DC** bleiben deren Oberflächen-Mattierungen durch ihre gegossene Struktur praktisch bei allen Warmformungen erhalten. Dagegen kann der Anwender bei den extrudierten Varianten unterschiedlichen Nutzen ziehen: Bei PLEXIGLAS® Satinice bleibt die „von innen“ kommende satinierte Oberfläche auch erhalten, während die geprägte Mattstruktur von PLEXIGLAS® Gallery® AR an der Erwärmungszone bis zum Glanz verschwinden kann, womit kreatives Design möglich wird.

Über das Abkanten hinaus gelten diese Verhaltensweisen auch für flächiges Warmformen.

Der jeweils erforderliche Biegewinkel bestimmt die jeweilige **Erwärmungsbreite**. Sie sollte im allgemeinen mindestens die **drei- bis fünffache**

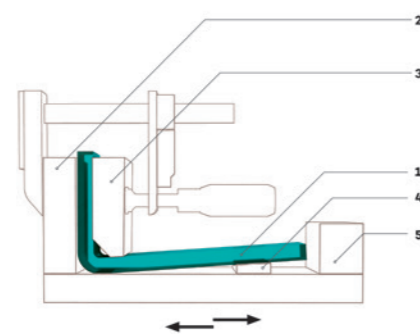


Abb. 15: Korrekturmöglichkeit des Abkantwinkels: PLEXIGLAS® (1), Biegeschablone (2), Einspannbacke, unten abgeschrägt (3), verschiebbare Winkeljustierung (4), Anschlagleiste (5)

**Plattendicke** haben. Bei einer zu schmalen Biegezone kann es zu Überdehnung bzw. Reckung des Materials kommen. Die dadurch verursachte Dickenabnahme führt zu optischem Qualitätsverlust und reduziert die Festigkeit des Formteils (siehe Abb. 13a und 13b).

Ein gleichmäßiger Übergang der Erwärmungszone in den kalten Bereich des Plattenzuschnitts vermeidet „Dehnungsschwellen“. Dazu ist es erforderlich, zwischen der Wärmequelle und der Platte eine Abschattung vorzunehmen (siehe Abb. 14).

Über den wegen des **guten Aussehens** der Abkantung empfohlenen **gleichmäßigen Übergang der Warmzone in den Kaltbereich** des Plattenzuschnitts hinaus, kann es noch weitere, kontroverse Anforderungen an das Abkantteil geben. Diese sind z.B. beeinflussbar durch die Temperaturführung der Auflage- bzw. Spannbalken (beidseitig der Heizdrähte), die an manchen Abkanteinrichtungen, wie Heizbänken, vorhanden sind.

Sieht das Design absichtlich eine sehr **„enge“ Abkantung** vor, ist diese erreichbar durch scharfe Breitenbegrenzung der Erwärmungszone, indem die **Spannbalken** gekühlt werden mit Kaltwasser-Durchfluss (besonders in der Serienfertigung). Achtung! Hierdurch entstehen Materialspannungen, die z. B. zusammen mit Lösemittel zu Rissbildung führen können.

Sind die Abkantteile für ein nachträgliches Verkleben vorgesehen, **sollten daher zur Spannungsrisss-Vermeidung** stattdessen die

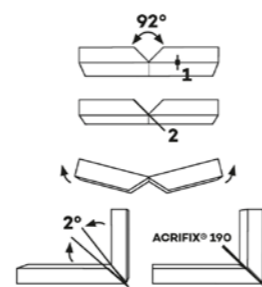


Abb. 16: Brechabkanten: ca. 0,3 mm (1), Klebeband (2)

**Spannbalken erwärmt** werden auf 60° bis 75 °C, z. B. durch in ihren Hohlraum eingesetzte Heizstäbe.

Das allen Kunststoffen eigene Rückstellverhalten ist physikalisch bedingt. Daher kann sich – abhängig von dem jeweiligen Umformverfahren – der Biegewinkel während oder nach dem Abkühlen verändern und damit von der eigentlichen Werkzeugform oder der gewünschten Gestalt abweichen. Dabei verändert sich der Biegewinkel in die Richtung, die der länger warm bleibenden Plattenoberfläche entspricht. Das heißt: Bleibt die innere Seite des Bogens länger warm, wird der Winkel kleiner, trifft dies auf die äußere Seite zu, wird der Winkel größer. Es muss also darauf geachtet werden, dass der Werkstoff der Biege- oder Abkühlshablone die spätere Formtreue des Abkantteils beeinflussen kann. Durch entsprechende Vorgaben ist für Ausgleich zu sorgen (siehe „4“ in Abb. 15).

Die Formtreue wird verbessert durch das Abkühlen beider Plattenoberflächen im zeitlichen Gleichschritt. Dies kann beispielsweise durch ein Überdecken der abkühlenden Teile mit Textilien oder Schaumstoff erreicht werden.

Abgewinkelte Teile mit kleinen Schenkellängen neigen nach dem Abkühlen zum Verziehen in der Biegeachse („Schwerteffekt“). Wärmedehnung, Schrumpf und Biegespannungen in der Abkantzone sind die Ursache. Da diese Einflüsse unterschiedlich stark sind, schwankt auch die jeweilige Abweichung. Diese Abweichung – sie kann auf einem Meter Länge mehrere Millimeter betragen – kann ausgeglichen werden

- durch eine entgegengerichtete Wölbung an der Biegeschablone und/oder
- durch kurzzeitiges vorheriges Anwärmen des gesamten Plattenzuschnitts im Ofen bei ca. 70° bis 80 °C für PLEXIGLAS® GS und XT; dadurch wird bei dem eigentlichen Aufheizen der Abkantzone und dem anschließenden Abkanten die Materialspannung und damit der „Schwerteffekt“ verringert.

**Scharfkantigkeit innen und kleine Außenradien** werden durch **eingekerbte** Abkantungen von PLEXIGLAS® erreicht, bei denen entlang der Biegekante vorher eine **V-Nut** von 90° gefräst wird. Nach dem Erwärmen mit dem Heizstab oder Heizdraht wird nur die restliche Plattendicke abgekantet. Die dadurch verringerte Stabilität des Fertigteils kann durch ein Nachkleben der eingekerbten Abkantung verbessert werden.

Eine Variation dieses Verfahrens ist (außer bei PLEXIGLAS® Resist Platten) das **„Brechabkanten“** (siehe Abb. 16): Nachdem auf der Rückseite der Biegekante ein elastisches Klebeband blasen- und faltenfrei aufgebracht wurde, wird eine V-Nut von mehr als 90° bis auf eine Materialdicke von circa 0,3 mm eingefräst und die Platte anschließend nach der Winkelinnenseite hin durchbrochen.

Danach werden die Teile im gewünschten Winkel fixiert, der verbleibende Spalt wird mit ACRIFIX® 190 aufgefüllt. Dabei wird das Fließverhalten des Klebers durch Mischen mit 3 bis 5 % VERDÜNNER 32 verbessert. Nach dem Aushärten wird das Klebe-

band entfernt und die äußere Kante gegebenenfalls leicht nachgearbeitet. Diese Methode kommt normalen Verklebungen sehr nahe, wie sie in Teil 2, Kleben, der Verarbeitungs-Richtlinien „Fügen von PLEXIGLAS®“ beschrieben sind.

Statt Fertigteile mit **sehr kleinem Querschnitt** abzukanten ist es eventuell vorteilhafter, entsprechende extrudierte Profile aus PLEXIGLAS® Formmasse zu verwenden. Kalt abzukanten ist bei Acrylglas nicht möglich. Allenfalls können die hochschlagzäh Sorten PLEXIGLAS® Resist 75 oder 100 mit größerem Radius als der doppelten Plattendicke kalt „umgebogen“ werden. Dies sollte aber nur in Ausnahmen vorgenommen werden und wird nicht empfohlen, da sich dadurch die mechanischen und optischen (Weiß-Verfärbung) Eigenschaften verschlechtern.

Platten aus PLEXIGLAS® GS und XT lassen sich jedoch **kalt wölben** und in diesem vorgespannten Zustand eingeklemmt montieren. Dabei sollten folgende minimal zulässige Kaltbiegeradien zur Vermeidung überhöhter Materialspannungen nicht unterschritten werden:

PLEXIGLAS® Variante	Minimal zulässiger Kaltbiegeradius (d = Plattendicke)
PLEXIGLAS® GS und XT (einschl. Varianten gleichartigen Substrats, wie Heatstop, Satinice, Soundstop etc.)	d x 330
PLEXIGLAS® Spiegel XT	d x 330
PLEXIGLAS® Resist 45	d x 270
PLEXIGLAS® Resist 65	d x 210
PLEXIGLAS® Resist 75	d x 180
PLEXIGLAS® Resist 100	d x 150

Beim **Überlegformen** werden Platten aus PLEXIGLAS® im Wärmeofen oder durch Infrarot-Strahler erwärmt (siehe 3.1 u. 3.2) und dann bei Positiv-Werkzeugen übergelegt bzw. bei Negativ-Werkzeugen eingelegt (siehe Abb. 17).

Die Formwerkzeuge müssen dabei mit weichem Stoff, z.B. Handschuhstoff, überzogen sein, um Abdrücke am Formteil auszuschließen. Sie werden auch vermieden, wenn die Erwärmungs- bzw. Umformtemperatur möglichst „niedrig“ gehalten wird. Dies kann jedoch die Formtreue des Fertigteils negativ beeinflussen, was durch Spannleisten o. ä. zu verhindern ist.

Überlegformwerkzeuge sollten grundsätzlich vorgewärmt sein, um Verwerfungen des Plattenzuschnitts zu vermeiden und gleichmäßiges Abkühlen zu ermöglichen. Dies wird auch vorteilhaft beeinflusst, wenn die freiliegende Plattenoberfläche mit

Textilien oder Schaumstoff abgedeckt wird.

Das Überlegformen wird im Allgemeinen beim einachsigen Krümmen meist zylindrischer Formgestalten angewendet, in Ausnahmefällen auch bei gering ausgebildeten sphärischen Formen mit leichter Krümmung. Dabei kann als Niederhalter ein Spannraster verwendet werden, der den gesamten Plattensaum erfasst und Faltenbildung verhindert.

Wenn es bei Positiv-Werkzeugen (d.h. konvex nach oben) schwierig ist, aufgrund des Rückstellverhaltens die Formtreue sicherzustellen, hat die Erfahrung gezeigt, dass mit weniger Aufwand in Negativ-Werkzeugen (d.h. konkav nach unten) bessere Ergebnisse zu erzielen sind.

Falls Rohre aus PLEXIGLAS® GS und XT vom Händler nicht in den gewünschten Abmessungen lieferbar sein sollten, können aus Plattenmaterial Rohre geformt werden. Das

gleiche gilt für kegelige oder konische Rohre aus PLEXIGLAS® GS und XT. Da auch hier beim Erwärmen – physikalisch bedingt – ein Schrumpfung auftritt, ist es vorteilhaft, eine Rohrformung zunächst mit einem Probestreifen vorzunehmen. Achtung: Bei extrudiertem PMMA, wie PLEXIGLAS® XT, ist der Erwärmungsschrumpfung in Länge und Breite unterschiedlich (siehe Abb. 2, Seite 4).

Beim Rohrformen muss beachtet werden, dass sich die Rohr-Enden etwas aufwölben. Um ein geradwandiges Rohr zu erhalten, muss es also nach dem Formen entsprechend gekürzt werden, d.h. der Ausgangszuschnitt sollte etwas größere Länge als benötigt aufweisen.

In der Praxis ist es schwierig, die Auswirkungen von Erwärmung und Schrumpfung auf den gewünschten Rohrdurchmesser vorab zu ermitteln und die Enden der Abwicklung bereits für die spätere V-Nut zur Verklebung anzuschragen. Deshalb ist auch diese Abmessung des Plattenzuschnitts etwas größer zu wählen, so dass die Platten-Enden nach dem Umformen zum vorgegebenen Rohrdurchmesser überlappen. Nach dem Abkühlen wird der Trennschnitt entsprechend vorgenommen, worauf sich das Verkleben der Nahtstelle anschließt.

Die Abb. 18 zeigt das Umformen eines erwärmten Zuschnitts, der mit einem Formtuch über einen Kern gewickelt wird. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass mit einem einmaligen Erwärmen und Rundformen der Endzustand erreicht wird.

Sollte dies – z.B. wegen der Abmessungen oder der vorhandenen Einrichtung – nicht möglich sein, bietet sich ein weiteres Verfahren an, das Abb. 19 zeigt. Es ist geeignet für zylindrisches wie konisches Rundformen (Hohlkegel). Dabei wird ein der Abwicklung des Hohlkörpers entsprechender Plattenzuschnitt im Wärmeofen erwärmt und die beiden Nahtkanten mit Spannstücken in einer Ebene nicht überlappend fixiert.

Bei Bedarf können nach dem Abkühlen die Nahtkanten durch einen korrigierenden Schnitt nachgebessert werden, um eine saubere Klebestelle zu gewährleisten. Dabei sollten

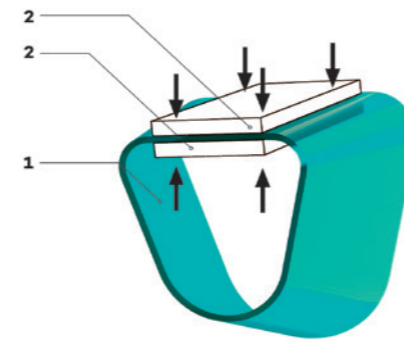


Abb. 19: Vorformen zur Herstellung eines Hohlkegels: PLEXIGLAS® GS (1), Spannstücke (2)

füllende Reaktionsklebstoffe wie ACRIFIX® 190 verwendet werden.

Ausführliche Informationen zum Kleben finden sich in den Verarbeitungsrichtlinien „Fügen von PLEXIGLAS®“.

Um eine möglichst hohe Endfestigkeit in der Klebnaht zu erreichen, das Langzeitverhalten des ausgehärteten Klebstoffs zu verbessern und eine in der folgenden zweiten Erwärmung mögliche Blasenbildung zu vermeiden, sollte das Werkstück getempert werden (siehe Verarbeitungsrichtlinien „Bearbeiten von PLEXIGLAS®“, 8 Tempert).

Bei der darauffolgenden erneuten Erwärmung auf Umformtemperatur im Wärmeofen ergibt sich durch die frei werdenden Rückstellkräfte

te – bei PLEXIGLAS® GS deutlich, bei PLEXIGLAS® XT bedingt – annähernd die gewünschte Rohrform. Verschiedene Möglichkeiten, Rohre während der Erwärmung im Ofen zu handhaben, werden unter 5.7 „Warmformen von Rohren und Stäben“ beschrieben.

## 5.2 Druckumformen

Druckumformen ist ein rein mechanischer Vorgang und insbesondere dann empfehlenswert, wenn

- die Serienstückzahl nicht ausreichend hoch für Spritzgießen ist
- hochmolekulares PLEXIGLAS® GS erforderlich ist.

Für das Umformen von PLEXIGLAS® GS und XT durch Druck ist vor allem das **Prägen** von Bedeutung. Charakteristisch dabei sind die relativ hohen Drücke, die abhängig sind vom Profil der Prägung, der Gestalt des Werkzeugs und dem Anteil des Materialvolumens, der bei der Prägung verdrängt werden muss. Zu berücksichtigen ist außerdem der Formungswiderstand der jeweiligen Materialsorte, bei PLEXIGLAS® XT geringer, bei PLEXIGLAS® GS mehr.

Vor dem eigentlichen Umformen werden hier normalerweise der

PLEXIGLAS® Zuschnitt und das Formwerkzeug auf Umformtemperatur erwärmt, um ein frühzeitiges Abkühlen während des Prägens zu vermeiden. Insbesondere beim Bearbeiten optischer Teile sollten die Prägwerkzeuge aus Stahl bestehen, die sich einwandfrei polieren lassen. Wichtig ist auch, dass die Luft an den tiefsten Stellen des Presswerkzeugs aus den Pressformen entweichen kann.

Die Abkühlung soll gleichmäßig von allen Seiten erfolgen, um Verziehen oder überhöhte Materialspannungen zu vermeiden. Bei dickwandigen Teilen verläuft – bedingt durch die geringe Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe – die Abkühlung relativ langsam. Um Zeit zu sparen und die Presse besser auszunutzen, empfiehlt es sich, mehrere verriegelbare Werkzeuge oder Vielfachwerkzeuge zu verwenden.

Eine Variante ist das **Prägen von Schriften oder Symbolen**, insbesondere für die Kennzeichnung planer Teile. Dazu wird lediglich der Prägestempel über Umformtemperatur erwärmt und in das „kalte“ Material gedrückt.

Ein spezielles Verfahren für die Herstellung besonders scharfkantiger, reliefartiger Teile – zum Beispiel Buchstaben – ist das Druckumformen des erwärmten Plattenzuschnitts mit einer im Vergleich zur Prägertiefe doppelt so dicken **Silikon-gummiplatte** (Härte: Shore A 60) in ein Negativ-Metallwerkzeug (siehe Abb. 20).

Weitere Möglichkeiten zur Gestaltung von Fertigteil-Oberflächen durch Prägen ergeben sich zum Beispiel durch

- strukturierte Bleche, Loch-Bleche u. ä. als Prägwerkzeuge,
- Hartschaumstoffe, zum Beispiel ROHACELL®, als Einlageelemente in Formwerkzeug-Flächen und mit Weichschaumstoffen (z.B. Polyurethan- oder Polyetherschaum), wobei wie beim Prägen mit der Silikon-gummiplatte verfahren wird,
- mit verschiedenen anderen Werkstoffen, wie Holz, Textilien u.a.

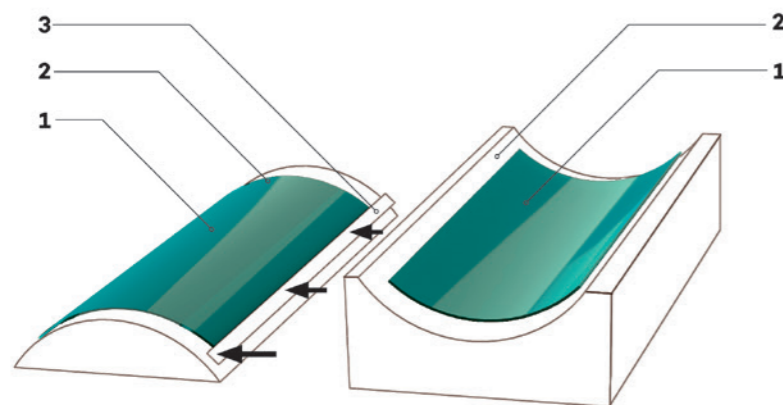


Abb. 17: Überlegformung: PLEXIGLAS® Platte (1), mit Stoff überzogene Form (2), Spannleiste (3)

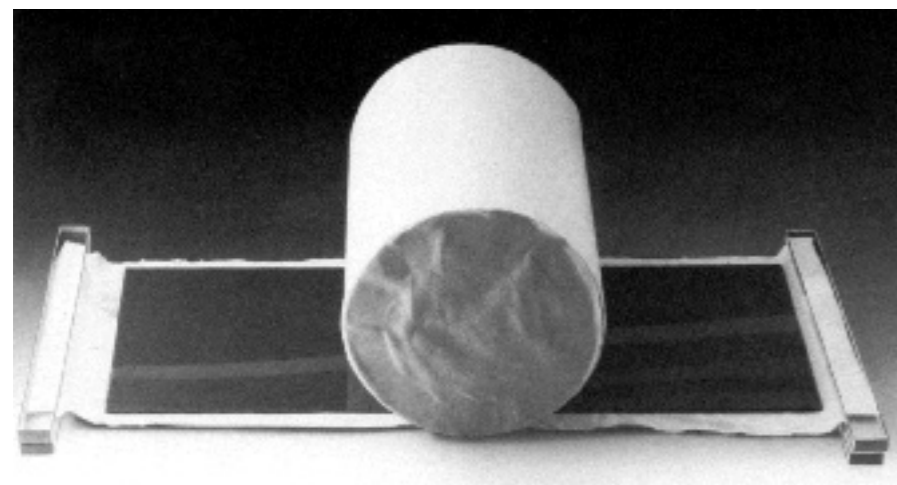


Abb. 18: Umformen einer Platte zur Rohrform durch Rollen



Abb. 20: Druckumgeformte Buchstaben aus PLEXIGLAS® GS mit Alu-Formwerkzeug und Silikon-gummiplatte



### 5.3 Zugdruckumformen

Beim Zugdruckumformen (Ziehformen) werden PLEXIGLAS® GS und XT nach dem Erwärmen mit oder ohne Negativwerkzeug durch einen Stempel oder ein Positivformwerkzeug umgeformt. Die Platten werden jedoch nicht – wie bisher beschrieben – fest eingespannt, sondern von einem **federnden** Niederhalter gehalten: Das Material kann nachgleiten, so dass die Reckung nicht allein aus dem freiliegenden Werkstoff erfolgt, sondern auch aus jenen Zonen, die unter dem federnden Niederhalter liegen. Bei ausreichender Temperatur (ca. 100 °C) der Ziehwerkzeuge lassen sich so Formteile mit annähernd gleicher Wandstärke herstellen. Verfahrensbedingt sind Abdrücke nicht vermeidbar.

Abb. 21 zeigt beispielhaft das Verfahren bei einem rotationssymmetrischen Formteil. Eventuell auftretende Abdrücke sind bei diesem Verfahren hauptsächlich auf der Innenseite zu finden. Zur **Verminderung von Stempelabdrücken** sollte die Stempeloberfläche weder rau noch hochglanzpoliert sein, sondern einen Mattglanz aufweisen.

In bestimmten Fällen folgt bei der beschriebenen Zugdruckumformung mit schleppendem Stempel ein anschließendes **Blasformen** des eingeschleppten Materials mit dann **geschlossenem** Niederhalter in ein Negativ-Formwerkzeug, bei dem sich die erwähnten Formabdrücke hauptsächlich auf der Außenseite ergeben.

### 5.4 Zugumformen

**Zugumformen** ist das Umformen von PLEXIGLAS® GS und XT durch Stempeldruck, Druckluft oder Vakuum. Dabei werden die Platten mit oder ohne Gegenwerkzeug geformt. Im Gegensatz zum Zugdruckumformen (Ziehformen), bei dem der Werkstoff durch den federnden Niederhalter lose gespannt ist, ist er beim Zugumformen (Streckformen) **fest eingespannt**. Die Formung erfolgt nur an den freiliegenden Materialteilen. Dabei kommt es je nach Gestalt des Fertigteils zu einer ganzflächigen oder zonenweisen **Verminderung der Materialdicke**.

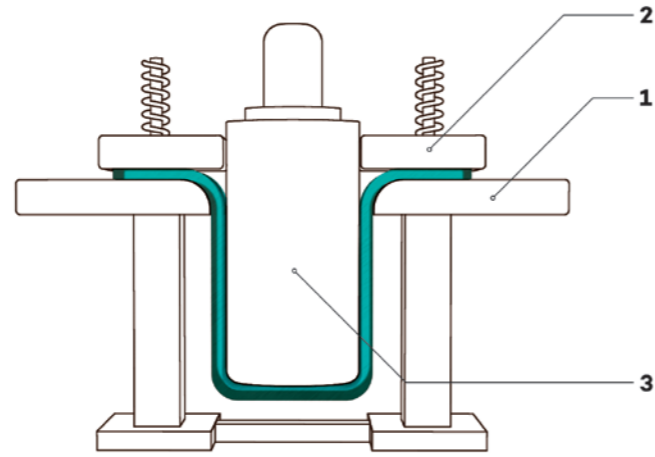


Abb. 21: Tiefziehen ohne Negativwerkzeug: federnder Niederhalter (1), Ziehring (2), Ziehstempel (3)

Das bedeutet, dass die Belastbarkeit der Fertigteile von der dünnsten Stelle abhängig ist und damit die übrigen Teile überdimensioniert sind. Dieser Nachteil wird durch **mechanisches oder pneumatisches Vorstrecken vermieden**. Deshalb können Platten geringerer Ausgangsdicke verwendet werden. Da nahezu gleiche Wandstärken auch nahezu gleiche Reckungsgrade bedeuten, ist die Materialstruktur fast einheitlich. Daher sind die Festigkeitswerte an allen Stellen des Formteils ähnlich (siehe 4.1 „Voraussetzungen und Verhalten“, Gefügeänderung).

Das Umformen mit kombinierten Verfahren ist so variabel, um beispielsweise den stärker beanspruchten Stellen im Fertigteil durch absichtlich örtlich begrenzte höhere Wanddicken zu entsprechen. Diese Verfahren verbinden im allgemeinen die Blas- oder Saugform mit der Stempelformung. Dabei wird der erwärmte Plattenzuschnitt mechanisch vorgestreckt und durch Saugen oder Blasen fertig geformt. Alle kombinierten Verfahren, die üblicherweise auf Tiefziehmaschinen möglich sind, werden im folgenden detailliert beschrieben.

Ob mechanisch oder durch Blasen bzw. Saugen geformt wird, ist abhängig von der Art des Fertigteils und der gewünschten Oberflächenbeschaffenheit. Mechanisches Strecken mit dem Stempel ist nur dann möglich, wenn das Formteil keine Abstufung aufweisen soll. Pneumatische Verfahren dagegen sind auch für komplizierte Formen und das Herstellen von Teilen mit Hinterschneidung geeignet.

Dem jeweiligen Fall entsprechend, ist zum Warmformen des erwärmten Plattenzuschnitts Druckluft oder Vakuum zu verwenden. Dem Vakuumformen sind Grenzen gesetzt, da in jedem Fall höchstens der atmosphärische Luftdruck von knapp 1 bar zur Formungsarbeit zur Verfügung steht. Bei Fertigteilen aus PLEXIGLAS® GS reicht dies nicht in allen Fällen aus für eine scharfe und gute Ausformung. Optimal ist die Vakuumformung deshalb nur bei allen PLEXIGLAS® XT Arten. In den meisten anderen Fällen sind Verfahren mit Druckluft zu empfehlen, die höhere Umformkräfte und somit bessere Ausformung ermöglichen.

Beim Streckziehen mit Stempel wird der erwärmte Zuschnitt mit einem Stempel durch einen Ziehring bzw. eine Konturplatte geformt oder eingespannt in einem Spannrahmen über ein Positiv gezogen. Bei „kaltem“ Stempel kühlt die zuerst berührte Fläche des Formlings bei der Berührung ab, so dass sich dieser Materialteil kaum mehr recken lässt. So entstehen Formteile mit starken Böden und relativ dünnen Mantelflächen, aus denen ja fast ausschließlich die Reckung kommt. Ein federnder Gegenstempel kann diesen Effekt noch verstärken.

Eine gleichmäßigere Wanddickenverteilung entsteht, wenn der Stempel auf Umformtemperatur erwärmt wird: Eine starke Abkühlung wird vermieden, das Material kann über die Stempelkante nachgleiten, so dass die Reckung nicht nur in den Seitenteilen erfolgt. Um ein gleichmäßiges Nachrutschen zu ermöglichen, sollten

die in Berührung stehenden Kanten des Formstempels stark abgerundet sein und mit Formfett, Silikonöl, Talkum oder PTFE-Spray behandelt werden.

Beim Einsatz hinterschnittener Stempel ist zu beachten, dass die Mantelfläche im unteren Bereich eine deutliche Krümmung aufweist, die erst mit zunehmender Ziehtiefe in einen Konus ausläuft. Wo ein gradliniger Kegelstumpf erforderlich ist, muss deshalb mit einem Vollstempel gearbeitet werden, an den sich das Material anlegen kann (Abb. 22).

Das Streckziehen mit Vollstempel bewirkt im allgemeinen unvermeidbare Werkzeugabdrücke am Formteil, die besonders bei transparenten Materialsorten auffallen. Oft ist deshalb statt des Vollstempels die Verwendung eines Gerüstwerkzeugs (siehe 7.1) sinnvoll, um derartige Abdrücke zu verhindern.

**Beim Streckziehen durch Blasen oder Saugen ohne Gegenform** wird der erwärmte, eingespannte Plattenzuschnitt mit Druckluft durch einen Ziehring oder einen Spannrahmen in den freien Raum geblasen oder durch Vakuum in einen Formbehälter gesaugt (Abb. 23).

So entstehen Werkstücke guter optischer Qualität, da kein Kontakt zwischen Materialoberfläche und Formwand stattfindet, also auch keine Abdrücke entstehen können, und nicht örtlich unterschiedlich abgekühlt wird. Das Verfahren ergibt Formteile mit kuppelförmigen Oberflächen. Ihre Gestalt stellt sich entsprechend der Geometrie des Spannrahmens praktisch von selbst ein. Eine Auswahl möglicher Grundrissformen zeigt Abb. 24

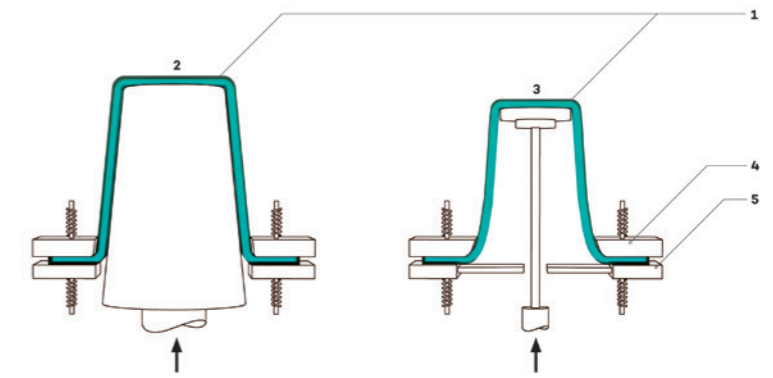


Abb. 22: Warmformung mit hinterschnittenem Stempel bzw. Vollstempel: PLEXIGLAS® (1), Vollstempel (2), hinterschnittener Stempel (3), Ziehring (4), Niederhalter (5)

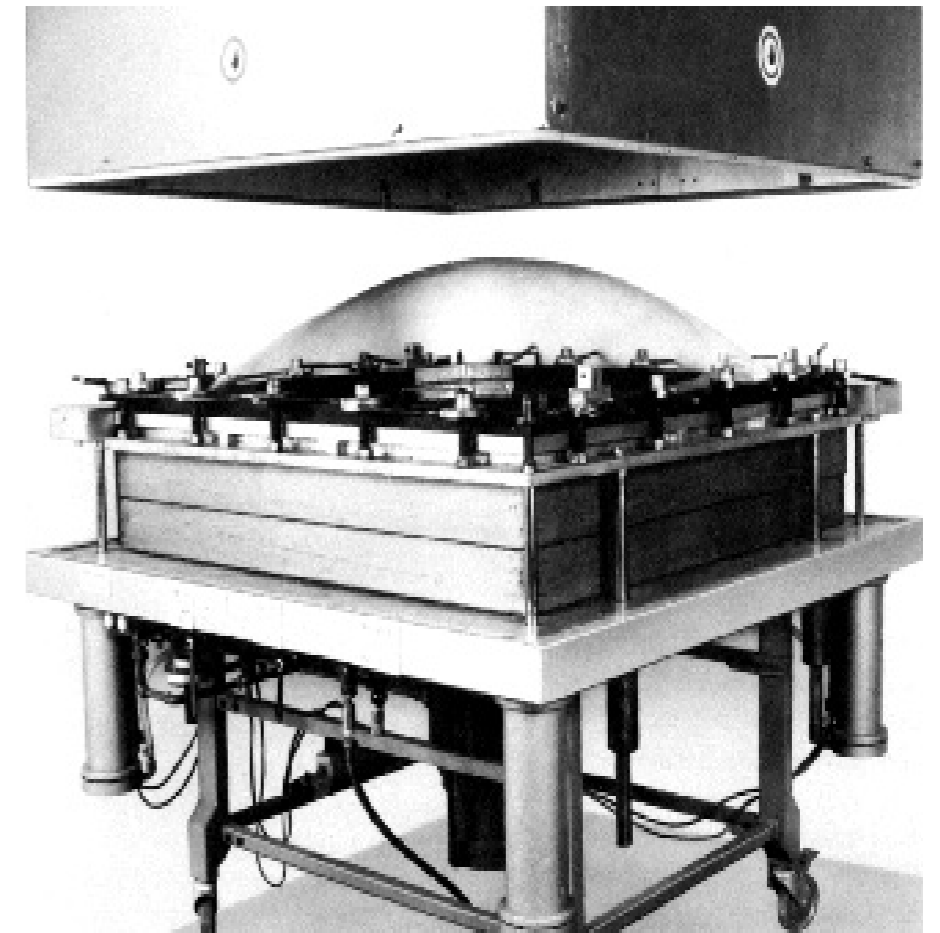


Abb. 23: Blasformen einer Lichtkuppel ohne Gegenform

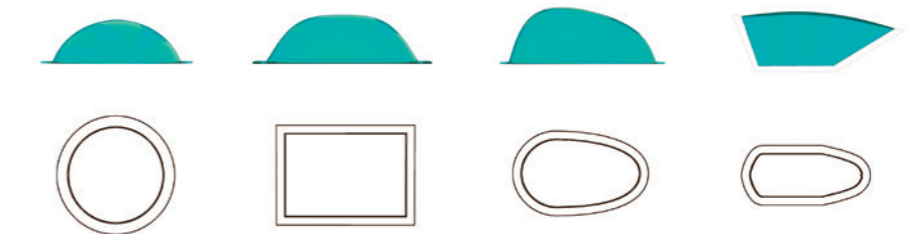


Abb. 24: Beispiele von Grundrissformen und die daraus entstehenden Seitenkonturen

Die gewünschte Höhe bzw. Tiefe wird durch Veränderungen des Drucks bzw. des Vakuums erzielt. Als Höhenmarkierung kann dabei eine Schablone aus weichem, wärmeisolierendem Material verwendet werden, das optische Störungen am Formteil ausschließt. Weitere Möglichkeiten sind die automatische Regulierung des Drucks bzw. des Vakuums durch eine Lichtschranke oder einen Näherungsschalter, die die Zuluft über ein Elektromagnetventil steuern. Diese etwas aufwendigere berührungslose Steuerung erweist ihre Vorteile insbesondere in der Serienfertigung.

Wird der gleichmäßig erwärmte Plattenzuschnitt wie beschrieben umgeformt, ergibt sich eine **Dickenverteilung**, die umgekehrt zur Ziehtiefe steht. Abb. 25 zeigt diesen Zusammenhang. Bezogen auf z. B. eine frei geblasene Halbkugel mit den Maßen

**Plattendicke:**  $s_1 = 8 \text{ mm}$   
**Kuppeldurchmesser:**  $d = 1000 \text{ mm}$   
**Kuppelhöhe:**  $h = 350 \text{ mm}$

lässt sich wie folgt die Scheiteldicke ermitteln: Aus Kuppelhöhe und Durchmesser wird das Verhältnis  $h/d = 0,35$  berechnet. Von diesem Wert auf der  $h/d$ -Achse geht man waagrecht bis zum Schnittpunkt mit der Kurve. Von diesem Schnittpunkt lotet man nach unten auf die  $s_2/s_1$ -Achse. Dort erhält man den Wert  $s_2$  zu  $s_1 = 0,55$ , aus welchem sich durch Einsetzen der Ausgangsplattendicke  $s_1 = 8 \text{ mm}$  eine Scheiteldicke  $s_2 = 4,4 \text{ mm}$  ergibt.

Die Maß- und Konturengenauigkeit bzw. die Reproduzierbarkeit der Formung mittels Streckziehen durch Blasen und Saugen ohne Gegenform sind für die meisten Anwendungsfälle, zum Beispiel die Herstellung von Lichtkuppeln, ausreichend. Das trifft insbesondere dann zu, wenn der Spannrand später gleichzeitig als Einbaurende verwendet wird. Die Formwerkzeuge dafür können relativ einfach sein. Für das Blasen wird eine stabile Grundplatte mit Spannrahmen verwendet. Ein Klemmwulst sorgt für gute Abdichtung. Zum Spannen der erwärmten Platten eignen sich mechanische oder pneumatische Hebelspanner. Ihre Anzahl richtet sich nach der Größe des zu

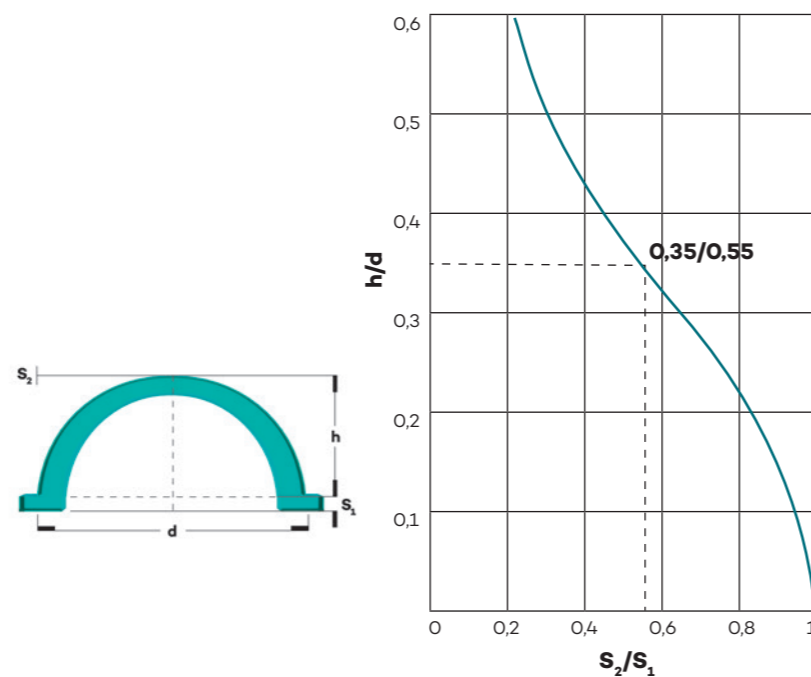


Abb. 25: Dickenverteilung einer blasgeformten Halbkugelschale

fertigenden Teils, der Steifigkeit des Spannrahmens, dem erforderlichen Gesamtdruck und der Belastbarkeit der einzelnen Spanner. Ein Beispiel aus der Praxis:

Für eine „normale“ 3 bis 6 mm dicke Lichtkuppelschale aus PLEXIGLAS® XT gelten in etwa folgende Voraussetzungen:

**Stichhöhe:** **ca. 25 % der Netto-Breite bzw. des Netto-Durchmessers an der Kuppelbasis**

**Reckungsgrad:** **ca. 16 %, biaxial im Zenit**

**Materialdicke:** **ca. 75 % im Zenit verglichen mit der Ausgangsdicke**

**Erwärmungstemperatur:** **150 bis 160 °C im Wärmeschrank bzw. durch Infrarot-Heizung**

Da sich zwischen Blastisch und Kuppelschale kurzzeitig Drücke von nur ca. 0,01 bis 0,03 MPa aufbauen, ist der Oberrahmen des Formwerkzeugs gegen „Abblasen“ sicher, wenn sein Haltedruck auf einen Blasdruck von ca. 0,05 MPa (0,5 kp/cm<sup>2</sup>) bezogen ist.

Für ein vorgegebenes Nennmaß der Kuppel bzw. des Formwerkzeugs ist dann die Haltekraft der mechanischen oder pneumatischen Spanner im ungünstigsten Fall, z. B. für ein Kuppelformteil mit flach-ebenem Rand, zu berechnen nach der Formel:

$$F_H = \frac{P_{\max} \cdot A \cdot L \cdot 1000}{U_K}$$

$F_H$  = Haltekraft pro Spanner (N)  
 $P_{\max}$  = max. Blasdruck (MPa)  
 $A$  = Nennfläche (m<sup>2</sup>)  
 $U_K$  = Kuppelumfang (m)  
 $L$  = Spannerabstand (mm)

Ein Beispiel:  
 Eine Lichtkuppel 2000 x 1000 mm hat 2 m<sup>2</sup> Nennfläche und 6 m Kuppelumfang.

Aus der Gleichung ergibt sich, dass bei ca. 450 mm seitlichem Abstand Spannelemente von je ca. 75 kN = 7500 N = 750 kp Haltekraft empfehlenswert sind.

(Über die zweckmäßige Ausbildung von Spann- und Klemmflächen siehe 7.2.)

Beim Blasen ist zu beachten, dass die einströmende Druckluft **nicht direkt** auf den erwärmten Plattenzuschnitt trifft. Dann käme es zu örtlich unterschiedlicher Abkühlung und – als Folge – zu einer optischen Störung oder Fehlformung. Daher sind Prallbleche, Siebe oder Stofflagen an der Einlassöffnung anzubringen, die den Luftstrom umlenken oder verteilen. Beim Auflegen der erwärmten Scheibe ist – um unerwünschte Abkühlung zu vermeiden – zu beachten, dass auch die Grundplatte vorher erwärmt bzw. mit Stoff ausgelegt oder mit isolierendem Material, z. B. Schaumstoff, abgedeckt wird.

Beim **Warmformen mit Vakuum** müssen die Vakuumlöcher gleichmäßig im Formbehälter verteilt sein, um einseitige Abkühlung durch den entstehenden Luftstrom zu verhindern. Beim Formen von großen Teilen sollte vor die Vakuumpumpe ein Vorratsbehälter geschaltet werden, damit auch große Volumen möglichst schnell abgesaugt werden können.

Das **Streckziehen durch Blasen und Saugen mit Negativ-Werkzeugen** ergibt Formteile mit unterschiedlichen Wanddicken: Je nach Gestalt des Formwerkzeugs wird ein Teil des erwärmten Materials sehr schnell die Wand des Werkzeugs berühren und durch das damit verbundene Abkühlen nicht mehr verstreckt. Die weitere Formung ist dann nur noch aus den freiliegenden Teilen heraus möglich. Bei extremen Hinterschneidungen oder Ausbuchtungen kann es dabei in diesen Zonen zu hohen Umformgraden und damit zu geringen Wanddicken kommen. Abb. 26 macht dies deutlich am Beispiel der Dickenverteilung einer geblasenen Leuchtenabdeckung mit Hinterschneidungen aus PLEXIGLAS® GS oder XT.

**Die höchsten Reckungsgrade liegen an den Stellen vor, die vom Flächenmittelpunkt des ebenen Ausgangszuschnitts am weitesten entfernt sind.** Eine gleichmäßigere Wandstärke lässt sich auch durch örtlich begrenzte und gesteuerte Abkühlung der Zonen höchsten Reckungsgrades erreichen. Dies erfordert große Erfahrung. Die Ecken lassen sich allerdings nicht mehr scharfkantig ausformen, es sei denn, es werden Spezialwerkzeuge eingesetzt, die Drücke bis zu

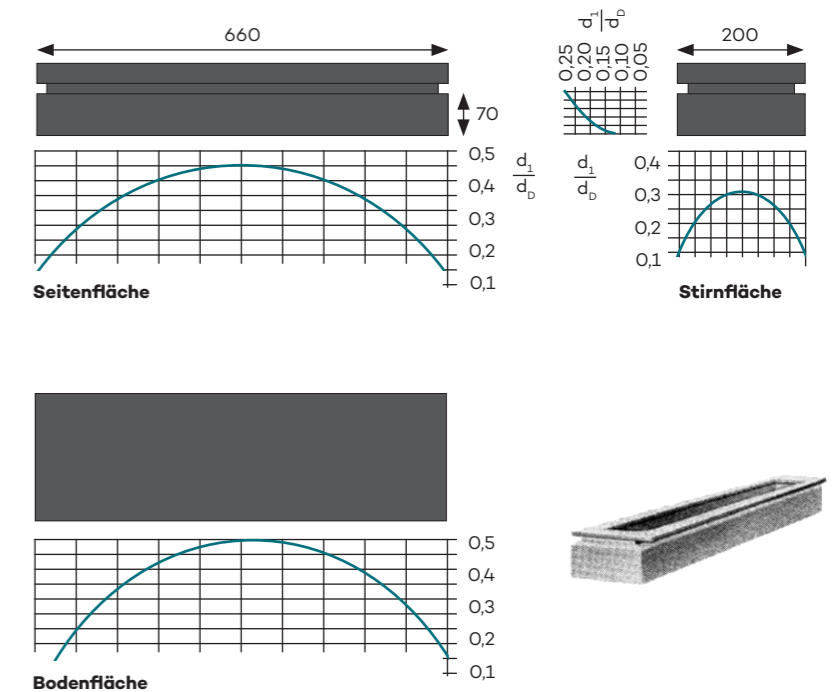


Abb. 26: Dickenverteilung einer blasgeformten, hinterschnittenen Leuchtenabdeckung aus PLEXIGLAS® GS oder XT ( $d_0$  = Ausgangsdicke,  $d_1$  = Enddicke)

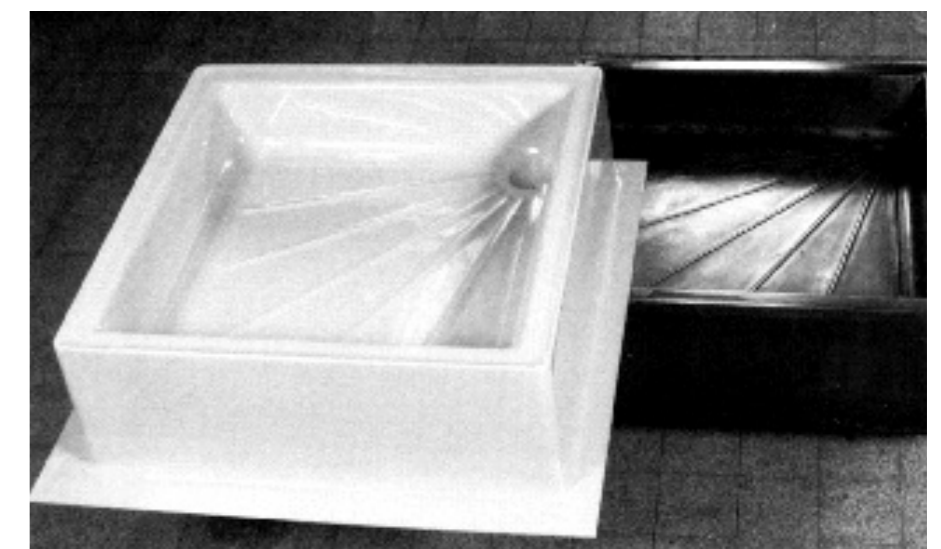


Abb. 27: Duschwanne: Positiv-Formwerkzeug und Formteil

15 bar ermöglichen. Bei derartig hohen Kräften sind die Formwerkzeuge nur noch mit hydraulischen Pressen sicher abzudichten. Die für die jeweilige Formung erforderliche Leistung der Presse lässt sich über die notwendige Schließkraft als Produkt aus Grundfläche und spezifischem Blasdruck errechnen.

Bei diesem Verfahren sollten die Formwerkzeuge aus Aluminiumguss oder Stahl hergestellt werden und auf ausreichende Sicherheit berechnet und geprüft sein. Überdruckventile sollten jede Überlastung verhindern.

Zum konturscharfen Ausformen sind an den extremen Stellen Lüftungskanäle oder Bohrungen anzubringen. Es empfiehlt sich, den Deckel oder die Grundplatte auf den unteren Pressentisch und das Formwerkzeug am Pressenjoch zu montieren. So werden Verschmutzungen und ein Durchhängen des erwärmten Zuschnitts in das Formwerkzeug vermieden.

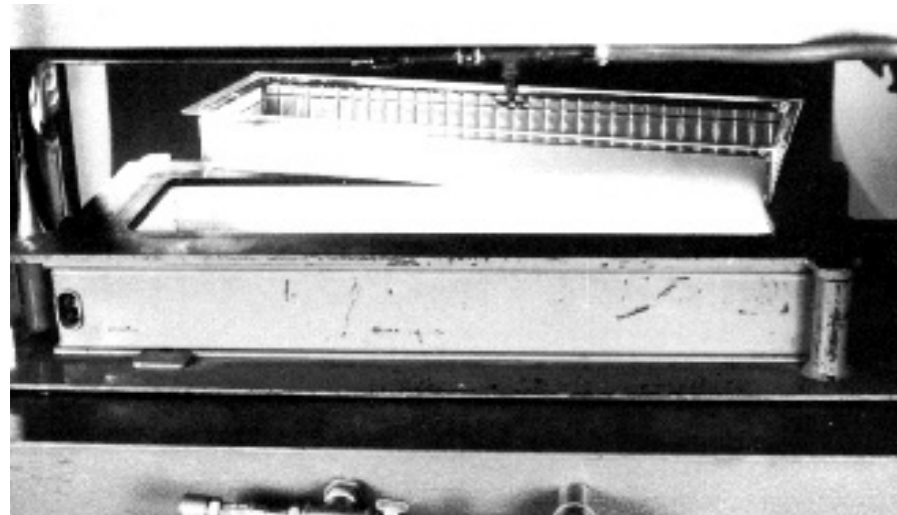


Abb. 28: Leuchtenwanne: Negativ-Formwerkzeug und Formteil

Punkte zu legen. Das Vakuumverfahren weist gegenüber dem Blasformen noch einen verfahrenstechnischen Vorteil auf: Da der gesamte Verformungsquerschnitt praktisch frei liegt, lässt sich die Platte in eingespanntem Zustand durch Infrarot-Strahlung erwärmen. Das geschieht im allgemeinen durch Flächenstrahler, die über das Werkzeug oder die Formmaschine gefahren oder geschwenkt werden. Beim Negativ-Werkzeug sind Maßgenauigkeit und Formwerkzeug-abdrücke auf der Gebrauchsseite.

Das **Blasformen in ein Negativ-Werkzeug mit mechanischer Vorstreckung** hat den Vorteil, dass sich auch hinterschnittene Formteile herstellen lassen (Abb. 29). Um besonders hohe Ziehverhältnisse erreichen zu können, ist es möglich, das erwärmte Material durch einen federnden Niederhalter beim Vorziehen nachrutschen zu lassen, wie beim Zugdruckumformen unter 5.3 beschrieben. Das erwärmte Plattenmaterial wird mit dem Stempel vorgestreckt und anschließend durch Druckluft in seine endgültige Form gebracht. Dabei werden zunächst die Seitenpartien gedehnt und dann die übrigen Stellen, die am Stempel angelegen haben. Auf diese Weise lässt sich eine nahezu gleichmäßige Wanddicke erreichen. Die Dickenverteilung ist abhängig von der Vorstreckung durch den Stempel. Die Werkzeuge, besonders der Stempel, müssen gut angewärmt sein, um keine Störungen durch Abkühlen zu verursachen.

Der Verfahrensablauf beim Blasformen in ein Negativ-Formwerkzeug mit mechanischer Vorstreckung ist nach Abb. 29:

- a) Ausgangsstellung,
- b) Mechanische Vorstreckung,
- c) Endformung mit Druckluft,

wobei aufeinander folgt:

- Erwärmen des PLEXIGLAS® Platten Zuschnitts,
- Auflegen auf das Formwerkzeug und Spannen mit festem oder federndem Niederhalter,
- Vorstrecken und am Ende des Vorstreckvorgangs Verschließen des Werkzeugs mit dem Niederhalter,
- Fertigformen mit Druckluft,

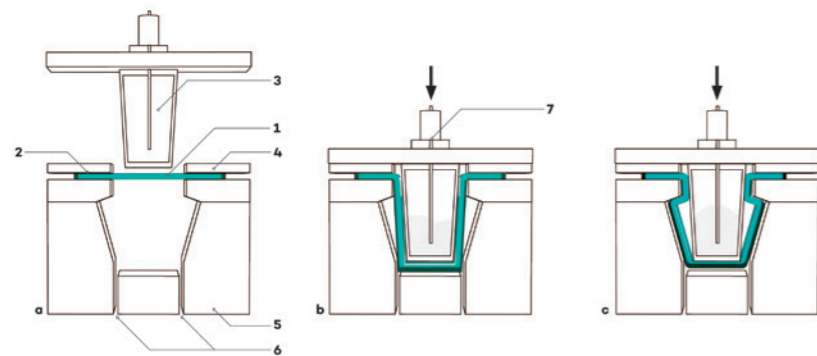


Abb. 29: Blasformen in ein Negativ-Formwerkzeug mit mechanischer Vorstreckung: PLEXIGLAS® (1), Dichtungsrand (2), Stempel (3), Spannrahmen (4), Negativ-Formwerkzeug (5), Entlüftungskanäle (6), Druckluftanschluss (7)

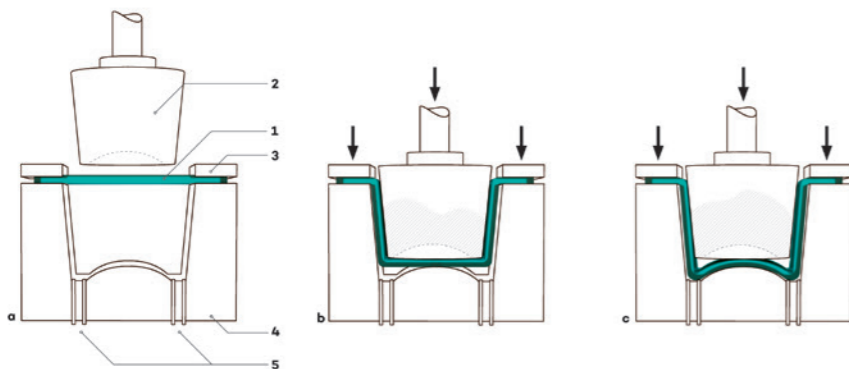


Abb. 30: Saugen in ein Negativ-Formwerkzeug mit mechanischer Vorstreckung: PLEXIGLAS® (1), Stempel (2), Spannrahmen (3), Negativ-Formwerkzeug (4), Absaugkanäle (5)

Beim **Warmformen mit Positiv- oder Negativ-Werkzeugen** gilt grundsätzlich, dass das Positiv-Werkzeug die gleiche Gestalt hat wie das Fertigteil, während das Negativ-Werkzeug ein „Abguss“ des Fertigteils ist (siehe Abb. 27 und 28).

Die **Warmformung durch Saugen (Vakuumformen) in eine Negativform** unterscheidet sich kaum von

dem besprochenen Verfahren des Blasformens. Der Blasdeckel kann hier durch einen Spannring oder -rahmen ersetzt werden. Formwerkzeug und Spannelemente können schwächer sein, so dass man auch ohne hydraulische Pressen auskommt. Analog der Lage der Entlüftungskanäle beim Blasverfahren sind die Saugbohrungen beim Vakuumverfahren an die entferntesten

- Abkühlen auf ca. 60° bis 70 °C,
- Entformen.

Beim **Saugformen in ein Negativ-Werkzeug mit mechanischer Vorstreckung** gilt im wesentlichen das gleiche wie beim Blasformen. Durch die geringere Druckdifferenz von max. 1 bar sind jedoch nur einfachere Formteile ohne starke Hinterschneidungen möglich.

Die Abb. 30 zeigt den Formungsablauf mit

- a) Ausgangsstellung,
- b) Mechanische Vorstreckung,
- c) Endformung durch Saugen (Vakuum).

Beim Streckziehen durch Blasen und Saugen in Positiv-Formwerkzeuge gilt verfahrenstechnisch das gleiche wie beim Umformen mit Negativ-Formwerkzeugen. Die exakte Werkzeugform ist jedoch in diesem Fall die Nichtgebrauchsseite, d.h. auf der Gebrauchsseite entstehen keine Formabdrücke. Auch bilden sich hier die dünnsten Stellen meist an den Flächen und Seiten des Fertigteils, während sie bei Negativ-Werkzeugen in der Regel an den Kanten und Rändern auftreten. Welches Umformverfahren schließlich anzuwenden ist, muss von Fall zu Fall entsprechend den Anforderungen an das Fertigteil entschieden werden.

Gegenüber dem Streckziehen in Negativ-Formwerkzeuge hat das **Saugformen auf Positiv-Formwerkzeugen mit mechanischer Vorstreckung** den Vorteil, dass das Werkzeug gleichzeitig als Stempel für die Vorstreckung dient. Abdrücke können außerdem nur auf einer Oberfläche auftreten. Den Verfahrensablauf zeigt Abb. 31:

- a) Ausgangsstellung,
- b) Mechanische Vorstreckung,
- c) Endformung durch Saugen (Vakuum).

Wo die Vakuumkräfte nicht ausreichen, lässt sich die gleiche Umformung auch mit Druckluft durchführen. In beiden Fällen ist darauf zu achten, dass die Werkzeuge gut angewärmt (siehe 2.1) sind, und die Saug- bzw. Entlüftungskanäle an den richtigen Stellen der Formwerkzeuge liegen.

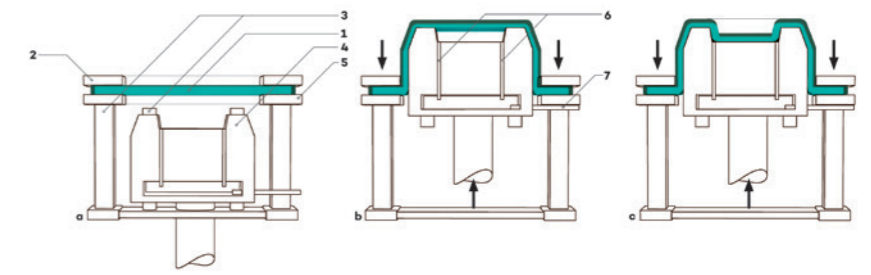


Abb. 31: Saugen auf ein Positiv-Formwerkzeug mit mechanischer Vorstreckung: PLEXIGLAS® (1), Spannrahmen (2), Stützrohre (3), Positiv-Formwerkzeug (4), Werkzeugrahmen (5), Saugkanäle (6), Vakuumanschluss (7)

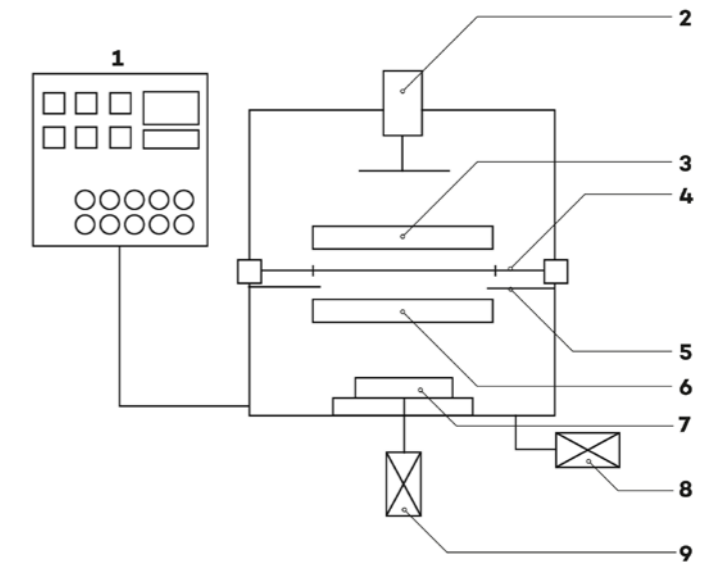


Abb. 32: Schema einer Tiefziehmaschine: Schaltschrank (1), Oberstempel (2), Oberheizung (3), Spannrahmen (4), Fensterplatte (5), Unterheizung (6), Werkzeuggestisch mit Formwerkzeug (7), Druckluft (8), Vakuum (9)

	Tiefziehmaschine	Separate Formstation
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ober- und Unterheizung</li> <li>• universell einsetzbar</li> <li>• Ablauf der Umformschritte steuerbar</li> <li>• exakte Temperaturregelung</li> <li>• kurze Taktzeit</li> <li>• evtl. automatische Beschickung bzw. Entnahme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Günstig in der Anschaffung</li> <li>• Eigenbau möglich</li> <li>• anpassungsfähig an die jeweilige Aufgabenstellung</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anschaffungspreis hoch</li> <li>• hohe Umrüstzeit bei häufigem Wechsel der Werkzeuge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• meist nur für wenige Werkzeuge</li> <li>• Handsteuerung oder niedriger Automatisierungsgrad</li> <li>• meist nur Oberheizung oder ohne Heizung (seperat)</li> </ul>

Abb. 33: Vergleich Tiefziehmaschine mit Formstation

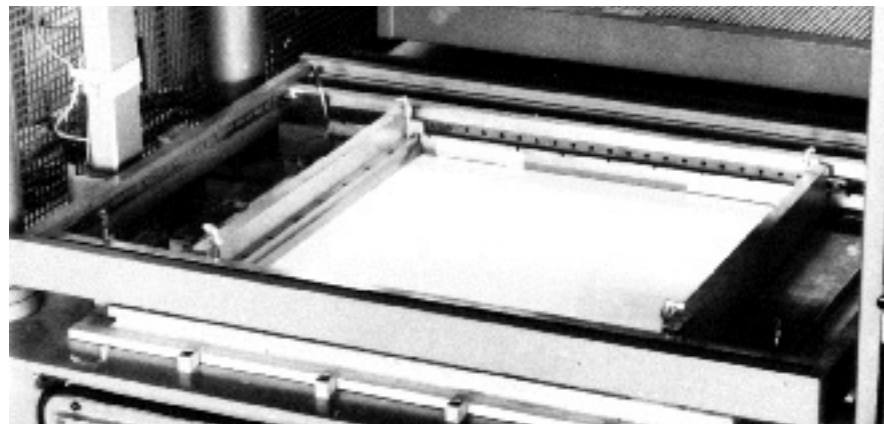
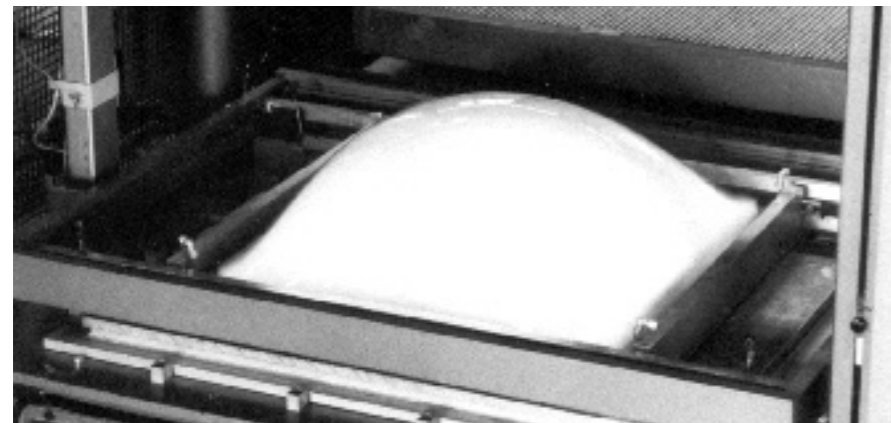


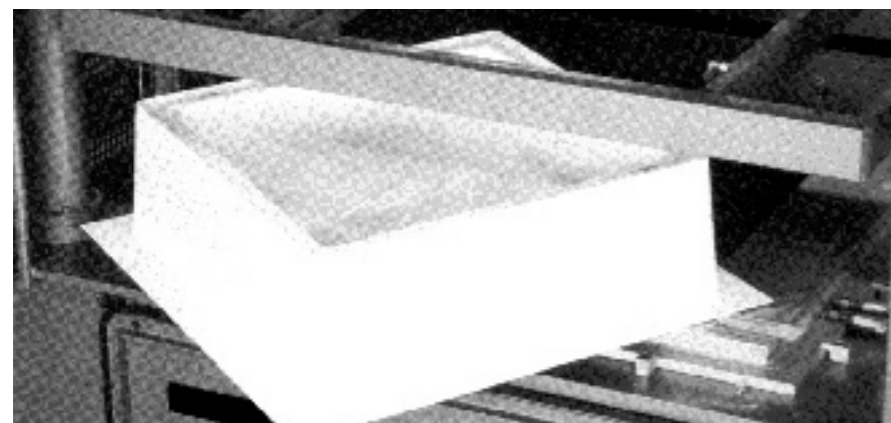
Abb. 34: Ablauf der Warmformung einer Duschwanne in einer Tiefziehmaschine  
a: Eingespannter Plattenzuschnitt aus PLEXIGLAS® GS SW



b: Beim Vorblasen



c: Nach dem Vakuumformen



d: Entnahme des Formteils

### 5.5 Warmformen mit Tiefziehmaschinen

Mit Platten aller Arten von PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT können auf Tiefziehmaschinen, auch als Thermoform- oder Vakuumformmaschinen bezeichnet, alle bereits beschriebenen Zugumformverfahren durchgeführt werden. Anders als separate Formstationen sind Tiefziehmaschinen universell einsetzbar und haben den Vorteil, dass in der Regel sämtliche Abläufe automatisiert werden können, d.h. stets gleichartige Produkte zu erzielen sind.

Nahezu alle Tiefziehmaschinen besitzen eine Ober- und meist auch eine Unterheizung. Die Infrarot-Strahler werden über einen Steuerschrank einzeln oder in Gruppen auf die jeweils erforderliche Strahlungsleistung eingestellt, die Temperaturverteilung der Platte wird der jeweiligen Formwerkzeug-Geometrie angepasst. Je nach Ausführung kann die Temperatur an der Plattenoberfläche mit einem berührungslosen Infrarot-Strahlungspyrometer gemessen werden, der meist in der Oberheizung eingebaut ist. Ist diese Messmöglichkeit nicht gegeben, wird die Plattentemperatur über die Erwärmungszeit gesteuert.

Die Abb. 32 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Tiefziehmaschine (ihre Vor- und Nachteile fasst die Tabelle Abb. 33 zusammen).

Über den Druckluftanschluss kann die erwärmte Platte bei Bedarf vorgeblasen, also ballonartig gewölbt werden, bevor der Werkzeugtisch mit dem Formwerkzeug in diese Blase hochfährt. Man erhält so besonders bei hohen Werkzeugen eine gleichmäßigere Dickenverteilung. Durch die automatische Steuerung ist die Höhe der Blase bei jeder Umformung gleich. Die eigentliche End-Formung wird mit Vakuum durchgeführt.

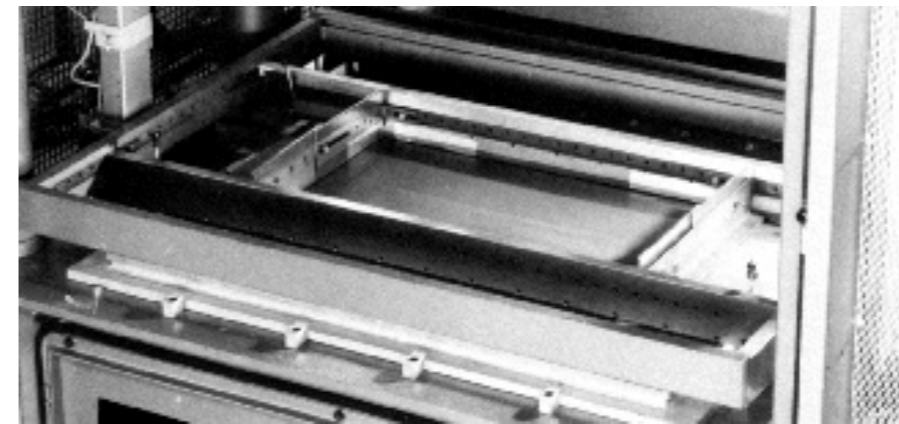
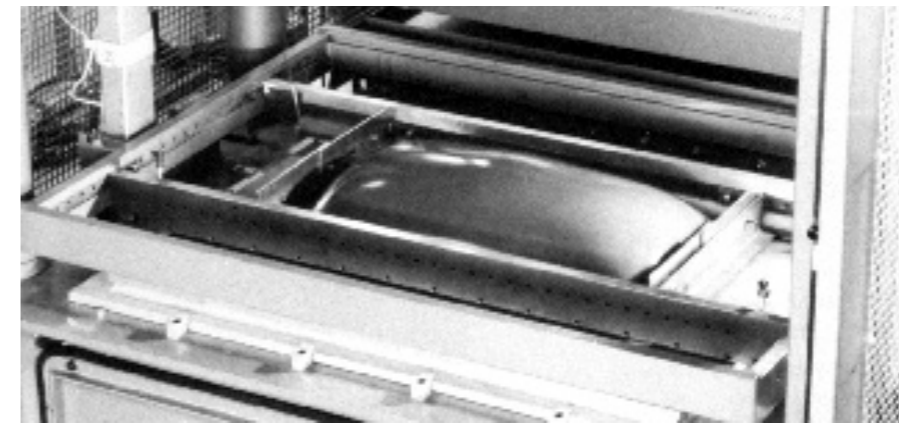
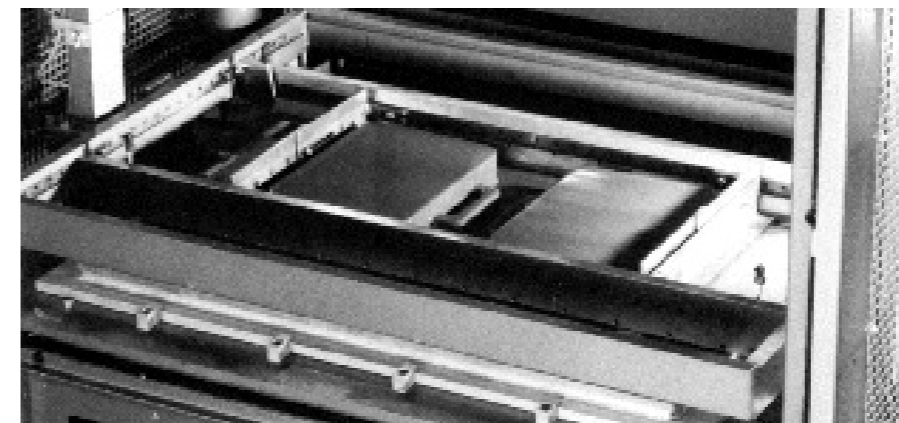


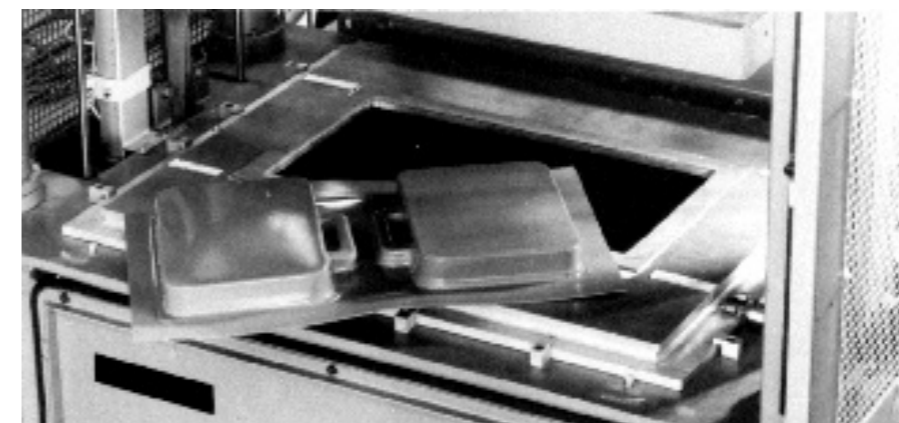
Abb. 35: Ablauf der Warmformung eines Kofferformteils in einer Tiefziehmaschine  
a: Eingespannter Plattenzuschnitt aus PLEXIGLAS® XT



b: Beim Blasen



c: Nach dem Vakuumformen



d: Entnahme des Formteils

Der Oberstempel kann ebenfalls

- als Werkzeughalter,
- zur Aufnahme von Vorrichtungen für das mechanische Vorstrecken (z.B. Prallplatte) genutzt oder
- mit zusätzlichen Werkzeugen zum evtl. erforderlichen Nach-Stempeln (von oben auf das Formteil) versehen werden.

Der zeitliche Ablauf und die Folge der einzelnen Verfahrensschritte können mit Hilfe der Steuereinrichtungen automatisiert werden, so dass

- Heizzeiten und Umformtemperaturen,
- Vorstrecken mit Luft (Blashöhe),
- Vakuumverzögerung,
- Wirkdauer des Vakuums,
- Kühlzeiten und
- Entformungsvorgänge

reproduzierbar sind.

Die Abbildungen 34, 35 und 36 zeigen als Beispiele dieses üblichen Formvorgangs auf einer Tiefziehmaschine das Warmformen von Massivplatten aus PLEXIGLAS® GS SW (Duschwanne), PLEXIGLAS® XT (Koffer) und PLEXIGLAS® Resist (Wandkasten).

In manchen Fällen, z.B. bei komplizierten Formarbeiten, ist es sinnvoll, „Prallplatten“ am Oberstempel der Tiefziehmaschine einzusetzen. (Röhm-Patent DE-A 3516467). Dadurch wird eine Höhenbegrenzung und somit eine breitere Formgestalt der Druckluftblase erreicht, das Einfahren des Formwerkzeugs erleichtert und eine bessere Wanddickenverteilung des Formteils sichergestellt (siehe Abb. 37).

Einen weiteren Vorteil bieten Tiefziehmaschinen, die mit einer Zweistufen-Klemmung (Röhm-Patent Nr. DE 3410550C 2) und einem temperierbaren Spannrahmen ausgerüstet sind. Sie stellen bei der Herstellung von Formteilen einen verzugsfreien Einspannrand sicher.

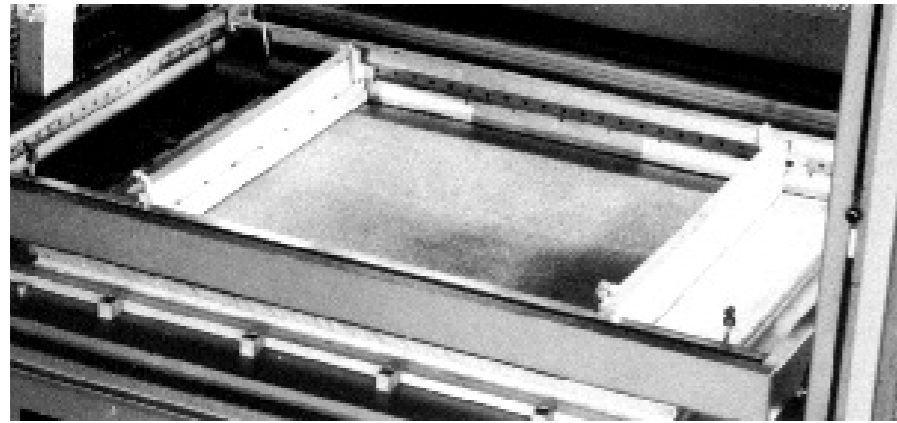


Abb. 36: Ablauf der Warmformung eines Wandkastens in einer Tiefziehmaschine  
a: Eingespannter Plattenzuschnitt aus PLEXIGLAS® Resist

Bei der sonst üblichen Warmformung kann sich der Einspannrand des Formteils während der Abkühlung unkontrolliert verziehen. Ursachen sind Temperaturunterschiede zwischen der Klemmzone und dem freiliegenden Bereich des Plattenzuschnitts sowie der eingeschränkten Wärmeausdehnung bzw. -kontraktion.

Die Zwei-Stufen-Klemmung dagegen erlaubt eine weitgehend ungehinderte Wärmeausdehnung des Einspannrahmens, da in der ersten Stufe – zu Beginn der Erwärmung – der Zuschnitt vom Spannrahmen nur lose gehalten wird. Zugleich erwärmt der temperierte Spannrahmen den Einspannrand und verringert so den Temperaturunterschied zum freiliegenden, durch die Infrarot-Strahler erwärmten Plattenbereich. Erst in der zweiten Stufe – wenn sich der Zuschnitt vor Erreichen der Erweichungstemperatur weitgehend entspannt hat – erfolgt die feste Klemmung.

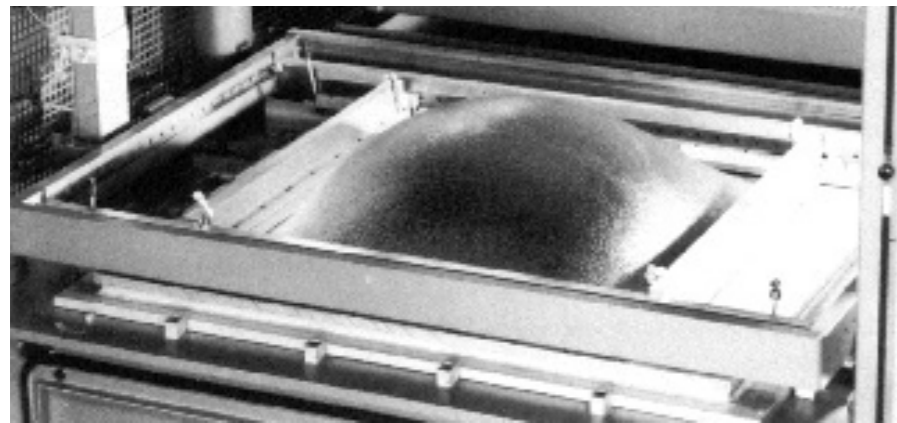
Folgende Spannrahmentemperaturen haben sich dabei bewährt:

**PLEXIGLAS® GS: 80 °C**  
**PLEXIGLAS® XT: 75 °C**

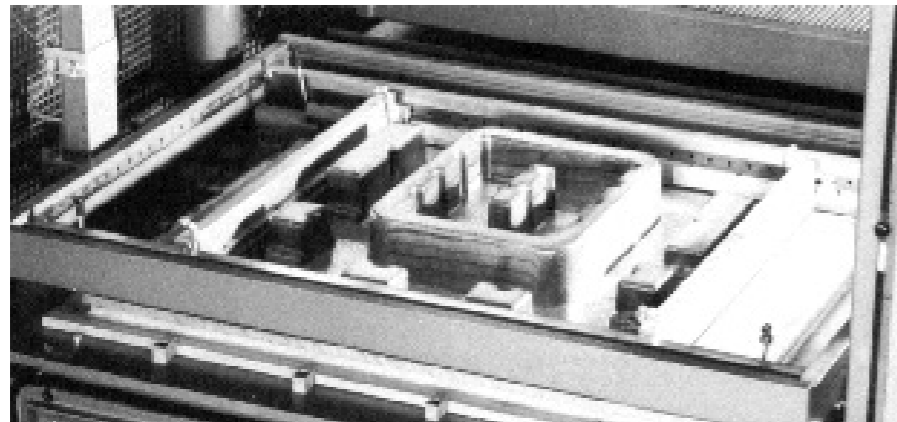
### 5.6 Warmformen mit Pressen

Als separate Formstation werden zur Umformung der Zuschnitte aus PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT in der Praxis häufig Pressen verwendet. Das diesem Umformen vorausgegangene Erwärmen der Zuschnitte erfolgt meist separat an anderem Ort.

Besonders für das Umformen von großen Teilen und bei hohen Blasdrücken können erhebliche Spann- oder Umformkräfte nötig werden, die eventuell von Tiefziehmaschinen, d.h. Vakuumformmaschinen, nicht mehr aufgebracht werden. Hier müssen Pressen entsprechender Leistung eingesetzt werden. Meist handelt es sich dabei um hydraulische, in manchen Fällen auch um mechanische Anlagen. Diese Pressen sind in der Regel universell einsetzbar, da eine Vielzahl von Formwerkzeugen verwendet werden kann. Sie eignen



b: Beim Vorblasen



c: Nach dem Vakuumformen



d: Entnahme des Formteils

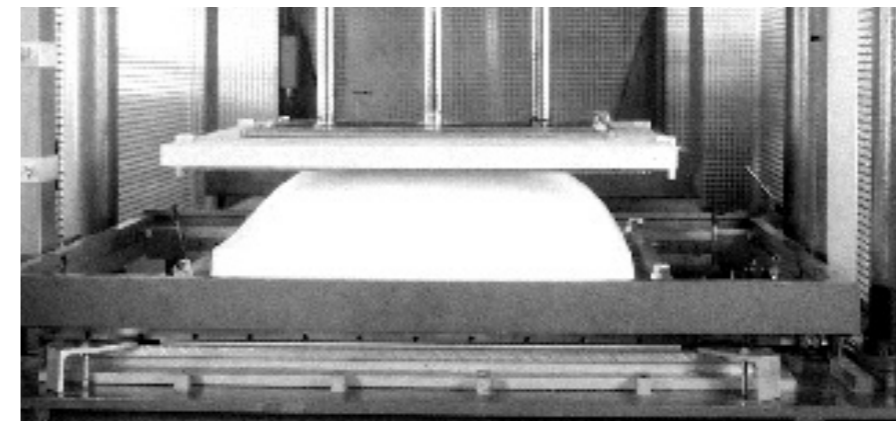


Abb. 37: Vorblasen gegen Prallplatte

sich vor allem für häufig wechselnde, unterschiedliche Arbeitsprogramme und Verfahren und erlauben im Gegensatz zu Tiefziehmaschinen eine fast beliebige Veränderung der Zuschnitte. Weitere Vorteile der hydraulischen Pressen gehen aus ihrer jeweiligen Bauart hervor:

- beweglicher Pressentisch mit hohen Drücken,
- bewegliches Pressenjoch für hohe Drücke,
- pneumatische oder hydraulische Stempel am Tisch und/oder Joch,
- zusätzliche Zuführung von Druckluft und/oder Vakuum am Tisch und/oder Joch,
- Möglichkeit der Erwärmung in der Presse durch beweglichen

oder hochschwenkbaren Infrarot-Heizschirm,  
• teilbare Pressentische, d.h. die einzelnen Tischteile lassen sich gesondert oder nach gegenseitiger Verriegelung gemeinsam betätigen.

Die maximale Presskraft hängt ab von der Größe des zu formenden Teils und dem Umformverfahren. Bei Tischgrößen von 3000 mm x 1000 mm beispielsweise liegt sie zwischen 1000 bis 2000 kN. Die Druckhöhe sollte sich durch einen automatischen Druckbegrenzer (Hochdruckkontaktschalter) einstellen lassen. Für die möglichst schnelle Umformung empfiehlt sich eine zweistufige Hydraulik. Die Niederdruckstufe sorgt dabei für

schnelles Schließen der Presse, die zweite Stufe erzeugt die erforderlichen Spann- und Formdrücke. Bei Serienfertigung sollte der Umformprozess automatisch ablaufen.

Soweit es sich nicht um reine Druckluftumformung handelt, sind neben der Tischhydraulik weitere hydraulische Formwerkzeuge für die eigentliche Umformung erforderlich. Sie können auf dem Tisch oder am Joch montiert werden.

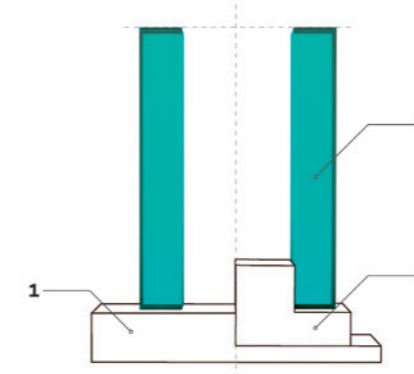


Abb. 38: Stehende Erwärmung: Unterlage (1), PLEXIGLAS® Rohr (2), Zentrierkern (3)

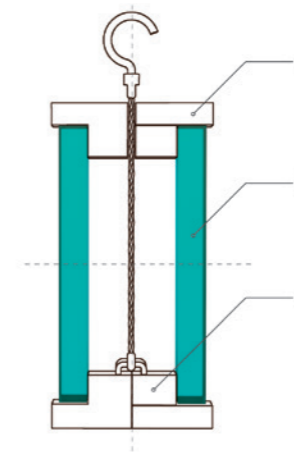


Abb. 39: Hängende Erwärmung mit Zentrierscheiben: Zentrierscheibe durchbohrt, lose (1), PLEXIGLAS® Rohr (2), Zentrierscheibe mit Aufhängung (3)

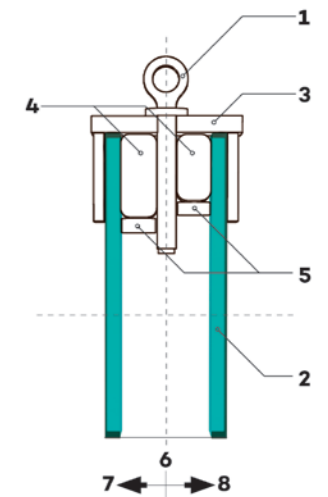


Abb. 40: Hängende Erwärmung mit Haltemuffe: Gewindeschraube mit Aufhängeöse (1), PLEXIGLAS® Rohr (2), Haltemuffe, glockenförmig (3), Gummiblock angeklebt an Klemmscheibe (4), Klemmscheibe mit Gewinde (5), Befestigung (6): lose (7), geklemmt (8)

## 5.7 Warmformen von Rohren und Stäben

Unter **Biegen ohne Stützen (freies Biegen) von Rohren** aus PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT wird das Abwinkeln von Rohren ohne innere oder äußere Wandstütze, also ohne innere Füllung oder äußere Biegeschablone verstanden.

Beim Erwärmen im Ofen stehen dem Verarbeiter drei Möglichkeiten der Fixierung des gummi-elastisch werdenden Rohrteils zur Verfügung:

- **Stehend** auf glatter Unterlage oder Zentriertisch, wenn die Rohrlänge nicht wesentlich größer als der Rohrdurchmesser und die Wanddicke nicht zu gering ist (siehe Abb. 38).
- **Hängend** und mit **Zentrierscheiben an beiden Rohrenden**, wenn die Rohre dickwandig sind und ihre Länge das Dreifache des Durchmessers nicht übersteigt (siehe Abb. 39).
- **Hängend** und mit **glockenförmiger Haltemuffe** am oberen Rand, wenn die Rohre sehr lang und dünnwandig sind (siehe Abb. 40).

Der kleinstmögliche Warm-Biegeradius hängt dabei vom Rohrdurchmesser (d) und zum Teil auch von der Wanddicke ab. Die Tabelle gibt Richtwerte, welche minimal zulässigen Biegeradien beim **freien** Biegen von PLEXIGLAS® Rohren zwischen 10 und 60 mm Außendurchmesser möglich sind. Solange diese Radien nicht unterschritten werden, wird sich beim Biegen der Kreisquerschnitt nur unwesentlich zu einem Oval verformen.

Bei größeren Radien wird diese Veränderung hervorgerufen durch die am Außenbogen entstehende Zugspannung, die der Druckspannung am Innenbogen entgegenwirkt. Wird dabei eine bestimmte Grenzspannung überschritten, kann das Rohr sogar knicken.

Diese Erfahrungswerte bedeuten bei Rohren aus PLEXIGLAS® XT, dass sich das **Erwärmen in einem sehr engen Temperaturbereich** bewegen muss, der unter den jeweils vorliegenden Erwärmungsbedingungen zu ermitteln ist.

Für Arbeiten, die eine hohe Winkelgenauigkeit erfordern, sollte eine Lehre oder Biegeschablone verwendet werden. Durch eine entsprechende Winkelvorgabe wird die Tatsache berücksichtigt, dass sich der Rohrwinkel beim Erkalten noch etwas aufweitet (siehe 5.1).

Rohrdurchmesser (mm)	Minimal zul. Biegeradius (mm)
10	80
20	100
30	120
40	150
50	190
60	250

Bei Rohr-Krümmern, deren Radius kleiner sein muss, wird empfohlen, zwei Halbschalen aus Plattenmaterial warm zu formen und zusammen zu kleben. Das gilt besonders bei größeren Abmessungen.

Zu einer exakten Ausformung führt das **Warmformen mit einer äußeren Wandstütze** am Innen- und Außenbogen durch eine Biegelehre, die der ovalen Verformung des Rohrquerschnitts entgegenwirkt (siehe Abb. 41).

Um das bereits erwähnte Einknicken zu vermeiden, kann auch das **Biegen mit einer inneren Stütze** vorgenommen werden. Die Verwendung beispielsweise von Sand, Gips, Schlammkreide und anderen pulverförmigen Materialien, wie beim Biegen von Metallrohren üblich, ist bei transparenten Rohren nicht möglich, da es da bei zu unerwünschter Mattierung der inneren Rohrwand kommt.

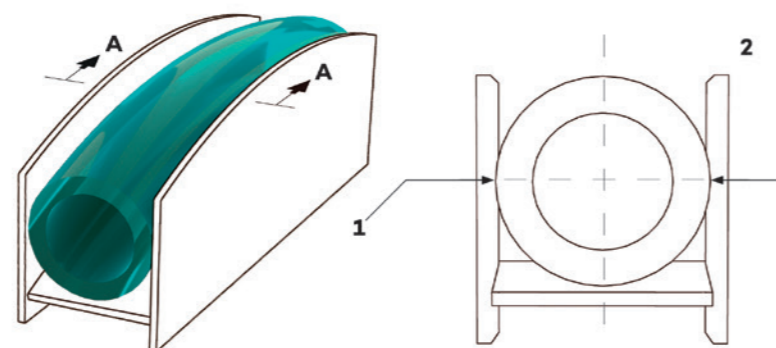


Abb. 41: Warmformen eines PLEXIGLAS® GS / XT Rohres in einer Biegelehre: Seitliche Abstützung (1), Schnitt A – A (2).

Daher dürfen zur inneren Stützung der Rohre nur Materialien verwendet werden, die die Brillanz der Rohrwerkstoffe möglichst wenig verändern.

Als Innenstützen können

- Rundgummi,
- gummiummantelte Metallspiralen

oder

- ineinandergesteckte Gummischläuche

verwendet werden. Diese elastischen Innenstützen können nach dem Warmbiegen und Erkalten des PLEXIGLAS® Rohres im allgemeinen problemlos aus dem Krümmer wieder herausgezogen werden, wenn die Innenstütze vorher leicht talkumiert wurde.

Eine wesentliche Voraussetzung ist dabei, dass die Stützen genau dem Innendurchmesser des Rohres entsprechen. Im allgemeinen gelingt es dann, den beim freien Biegen erreichbaren Minimalradius (siehe obige Tabelle) noch um ein Drittel zu reduzieren. Dann müssen jedoch unter Umständen deutliche Formabdrücke auf der Innenseite des Rohrbogens hingenommen werden.

Schließlich kann auch versucht werden, ein Rohr mit geringerem Durchmesser als benötigt, jedoch mit etwas größerer Wanddicke, zu verwenden, und das Rohr in einem zweiteiligen Hohlformwerkzeug (siehe Abb. 42), das die gewünschten Krümmer-Maße aufweist, aufzublasen (siehe auch weiter unten **Aufweiten mit Druckluft**).

Eine wenig gebräuchliche, aber mögliche Formungsart ist das **Aufdornen und Aufschrupfen** von Rohren: Bei dieser **Verbindungsart** – dies gilt hauptsächlich für PLEXIGLAS® GS, weniger für PLEXIGLAS® XT – durch „Schäften“ wird das eine Rohr-Ende auf Umformtemperatur gebracht, aufgedornt, d.h. im Durchmesser vergrößert, und dann über das zweite Rohr geschoben. Der Dorn kann aus Hartholz, Metall oder Kunststoff sein. Das Abziehen des Dorns nach dem Abkühlen ist u. U. schwierig; die Erwärmung auch des Dorns vor der Formung erleichtert das Abziehen.

Die große Reibung zwischen Rohr-Innenwand und Dorn begrenzt die mögliche Vergrößerung des Durchmessers. Er kann jedoch um ca. das Dreifache der Wandstärke aufgeweitet werden. Die Aufweittiefe (Schafthöhe) erreicht ihr Maximum beim 1,5-fachen des Rohrdurchmessers.

Durch das anschließende **Aufschrupfen** lassen sich sehr genau passende Verbindungen herstellen: Das aufgeweitete Rohr wird über ein Rohr mit Originalquerschnitt geschoben und mit einer Heißluftdusche örtlich erwärmt, so dass es aufschumpft.

Gleiches gilt auch für das Aufziehen auf andere Körper. Dabei darf der Kernumfang nicht kleiner sein als der ursprüngliche innere Rohrumfang. Da die aufgeschumpften Rohre Spannung hohen, kann das Einwirken aggressiver Medien zu Rissbildung führen. Nachtempern zur Spannungsverminderung ist hier unbedingt erforderlich (siehe Verarbeitungs-Richtlinien Bearbeiten von PLEXIGLAS®, 8 Temp.).

In manchen Fällen sind Rohrkörper mit eckigem Querschnitt erforderlich. **Sie können durch das Aufweiten der Rohre mit Spreizvorrichtung** umgeformt werden. Verwendet werden hier vornehmlich Rohre aus PLEXIGLAS® GS, die nach dem Erwärmen auf Umformtemperatur mit einer mechanischen Spreizvorrichtung zu eckig paralleler oder konischer Form aufgeweitet werden.

Das **Aufweiten von Rohren mit Druckluft** entspricht dem Zugumformen von Platten mit Negativform

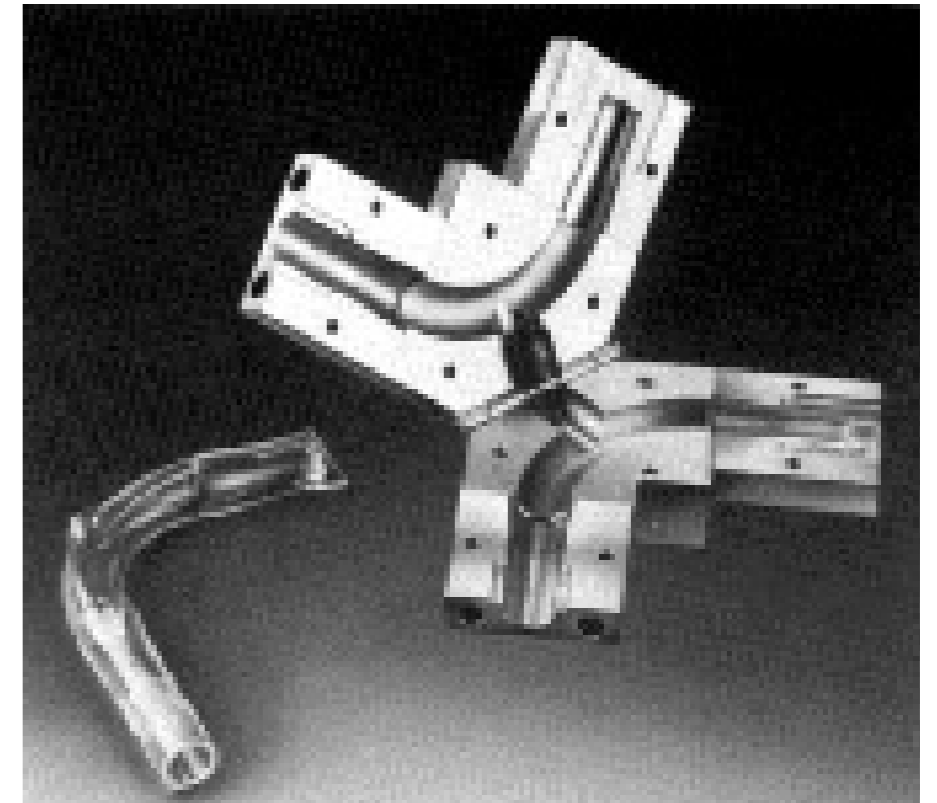


Abb. 42: Druckluft-Formwerkzeug für Rohrkrümmer

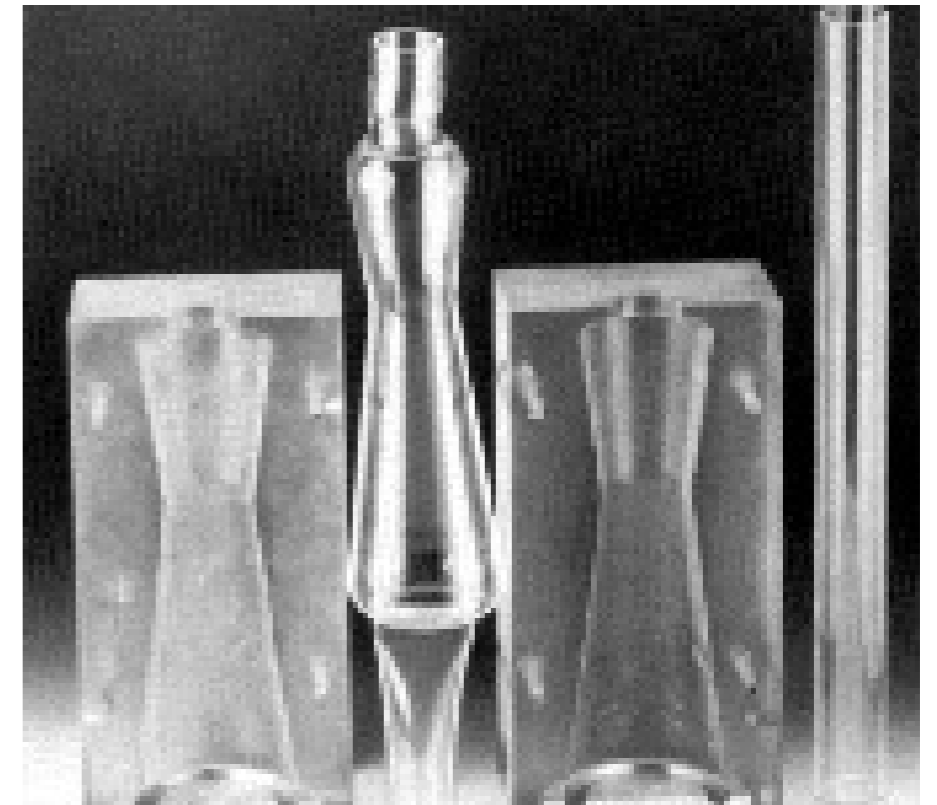


Abb. 43: Formwerkzeug zum Aufweiten von Rohren mit Druckluft

und wird vor allem für die Herstellung von Zwei- oder Dreifachen des ursprünglichen Durchmessers möglich (siehe Abb. 43). Die Werkzeuge müssen die dabei auftretenden Formungsdrücke sicher aufnehmen. Bei komplizierten Teilen sollten die Formen beheizt werden.

zum Zwei- oder Dreifachen des ursprünglichen Durchmessers möglich (siehe Abb. 43).

Die Werkzeuge müssen die dabei auftretenden Formungsdrücke sicher aufnehmen. Bei komplizierten Teilen sollten die Formen beheizt werden.

Entsprechend den Rohrdurchmessern sind besondere Spann- bzw. Abdichtvorrichtungen zu verwenden (siehe 5.1). Die erwärmten Rohre sollten beim Einlegen in Richtung der Rohrachse unter leichter Zugspannung stehen, um ein Einsinken der Rohrwände oder das Durchhängen der Rohre zu vermeiden. Für lange Rohre empfiehlt es sich, das Werkzeug so zu bauen, dass das erwärmte Rohr senkrecht im Formwerkzeug hängt. Ist das nicht der Fall, kann es zu Fehlformungen kommen, oder die Rohrwände kleben – besonders bei PLEXIGLAS® XT Rohren – aneinander fest.

## 6. Abkühlen

Während des Abkühlens bleiben Formteile aus PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT fest eingespannt und unter dem Einfluss der Formungskräfte bis das Formteil eine ausreichende Formstabilität erreicht hat. Dies ist der Fall, wenn

**PLEXIGLAS® GS: 70 °C**  
**PLEXIGLAS® XT: 60 °C**

unterschreiten.

**Wichtig ist, dass möglichst der gesamte Querschnitt des Formteils die jeweilige Temperatur erreicht hat.**

Die Abkühlung sollte gleichmäßig erfolgen, um Abkühlspannungen gering zu halten. Da dicke Teile aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Acrylglas nur langsam abkühlen, sollten sie nach dem Entformen mit weichen Tüchern oder mit für den jeweiligen Fall geeigneten Wärmeisolierungen abgedeckt werden, um den Einfluss von Zugluft zu verhindern und um eine dem Tempern ähnliche Wirkung zu erzielen.

Beim Abkühlen verkleinert sich das Formteil nach der vorausgegangenen Wärmedehnung. Diese Abmessungsveränderung darf nicht behindert werden, um Materialspannungen zu vermeiden. Sofern durch das Aufschumpfen des Formteils auf das Formwerkzeug Spannungen entstehen könnten, sollte unmittelbar bei Erreichen der Formstabilität entformt werden, das heißt eventuell noch kurz vor Erreichen der o.a. Temperaturen. Bei

**Rund- und Vierkantstäbe** aus PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT werden unter Verwendung äußerer Stützen ähnlich warm geformt wie Rohre. Dabei beschränkt sich das Umformen im allgemeinen auf das **Biegen bzw. Abwinkeln**. Bei Profilstäben mit rechteckigem oder quadratischem Querschnitt gelten die gleichen Empfehlungen wie bei Platten. Kreisförmige Querschnitte verhalten sich wie Rohre mit Innenstützen. Auch hier sollten grundsätzlich möglichst große Biegeradien gewählt werden, um stärkere Veränderungen in der Biegezone zu vermeiden. Sollen PLEXIGLAS®

PLEXIGLAS® ist die Gefahr des Einreißen der Formteile groß, wenn bei zu langem Abkühlen auf dem Formwerkzeug durch Aufschumpfen zu hohe Spannungen entstehen.

Exaktheit und Planität des Werkstücks können nach dem Entformen je nach Formteillart und -gestalt durch die Wahl des Abkühlverfahrens positiv beeinflusst werden, beispielsweise durch:

- Lagern auf einer ebenen Unterstüzung mit geringer Auflagefläche und gleichmäßigem Zugang der Raumluft für gleichmäßiges und verzugsfreies Abkühlen. Dieses Verfahren wird bei unkomplizierten Formteilen am häufigsten angewendet (Abb. 44).
- Freies Lagern auf einer ebenen Fläche aus isolierendem Material mit zusätzlichen örtlichen Einspannungen oder Gewichtbelastungen, um einen gestaltbedingten Verzug nach dem Auskühlen zu verhindern. Beispielhafte Anwendungen sind Leuchtenabdeckungen und Badewannen, Lichtkuppeln und Lichtwerbeanlagen (Abb. 45).
- Platzieren der Formteile auf wärmeisolierender Unterlage und Abdecken mit isolierenden Stofflagen, um ein langsames, gleichmäßiges Abkühlen sicherzustellen. Können die Formteile beim Abkühlen gestapelt werden, müssen zwischen die einzelnen Werkstücke ebenfalls isolierende Stoffe gelegt werden. Dieses Verfahren ist in der Regel bei dickwandigen Teilen empfehlenswert (Abb. 46).

Vierkantstäbe in der Längsachse warm **gedreht/verdrillt** werden, kann dies oft vorteilhaft zwischen Spannfutter und Reitstock einer Drehbank ausgeführt werden.

Hin und wieder werden für bestimmte Aufgaben **gereckte Rundstäbe** aus PLEXIGLAS® GS benötigt, beispielsweise zum Herstellen von **Recknieten**. Dies geschieht nach Erwärmen eines Rundstabes auf Umformtemperatur durch Einspannen z.B. in eine Drehbank, wobei der Stab mit Spannfutter und Support auf max. 70 % Längenzunahme monoaxial gereckt wird.

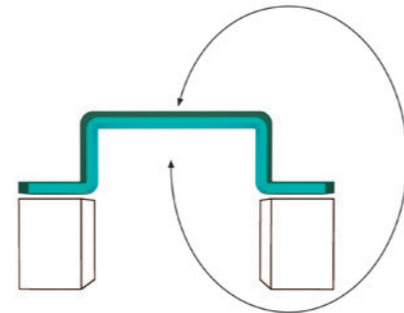


Abb. 44: Freies, planes Lagern von Formteilen

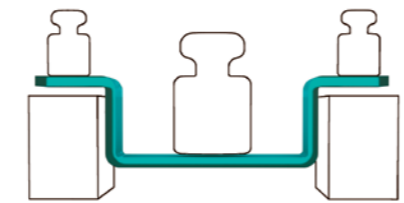


Abb. 45: Freies, gewichtsbelastetes Lagern von Formteilen

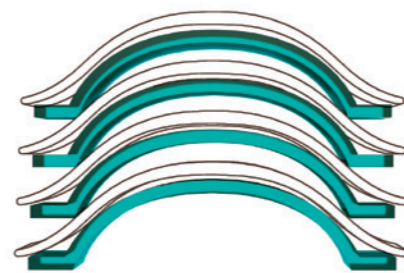


Abb. 46: Gestapeltes, wärmeisoliertes Lagern von Formteilen

## 7. Werkzeuge

### 7.1 Formwerkzeuge

Das Umformen von PLEXIGLAS® GS und PLEXIGLAS® XT ist mit einfachen Werkzeugen möglich. Für die Herstellung von Formwerkzeugen eignen sich Holz, Schichtpressstoffe, Metalle oder Gießharze. Entscheidend für die Wahl sind die

- mechanische Beanspruchung,
- erforderliche Lebensdauer,
- Maßhaltigkeit,
- Wärmeleitfähigkeit,
- Bearbeitbarkeit,
- das Gewicht sowie
- die Material- und Herstellkosten.

Die mechanische Beanspruchung ist beim Streckziehen durch Druckluft in Negativwerkzeugen sehr hoch. Die Werkzeuge sollten hier vorwiegend aus Stahl oder Aluminium hergestellt werden und auf die jeweilige Belastung berechnet und geprüft sein. Bei weniger starken Belastungen können Gießharze eingesetzt werden, bei einfachen Überlegformungen ohne besondere mechanische Beanspruchung auch Formwerkzeuge aus Holz oder Kunststoff.

Die Lebensdauer der Formwerkzeuge wird bestimmt von der Stückzahl der zu formenden Teile und der jeweiligen mechanischen und thermischen Belastung.

Die Formungsart – positiv oder negativ – bestimmt die erforderliche Maßtoleranz des Formwerkzeugs. Beim Abkühlen von PLEXIGLAS® GS und XT verursacht der hohe Wärmeausdehnungskoeffizient von Acrylglas eine merkliche Schwindung. Die Formwerkzeuge müssen also mit einer entsprechenden Übergröße hergestellt werden. Die Schwindung beträgt je nach Formwerkzeug-Werkstoff zwischen 0,5 % und 0,8 %, um die das Formwerkzeug größer ausgelegt werden muss als die Nenabmessung des Formteils.

Um die Formteile besser entformen zu können, sollten Positiv-Formwerkzeuge je nach Werkzeughöhe eine Entformungsschräge von 1° bis 3° aufweisen. Bei Negativ-Formwerk-

zeugen ist dies im allgemeinen nicht erforderlich, da die Abkühlung bereits zu einem Ablösen vom Formwerkzeug führt.

Bei der Beschreibung der einzelnen Umformtemperaturen (siehe 2.1) wurde bereits darauf hingewiesen, dass je nach Verfahren unterschiedliche **Formwerkzeug-Temperaturen** notwendig sein können. Zur genauen Temperaturführung in Formwerkzeugen aus Metall (Wärmeleitung!) können Heiz- und Kühlkanäle eingebaut werden.

Die Oberfläche des Fertigteils wird außer von den gewählten Umformtemperaturen auch von der Oberfläche des **Formwerkzeugs beeinflusst**. Besteht direkter Kontakt zwischen Zuschnitt und Formwerkzeug, müssen die Werkzeugoberflächen deshalb sauber geschliffen bzw. mattpoliert (nicht hochglanzpoliert) sein. Wenn dies vom Werkstoff her nicht möglich ist, können schleif- und polierfähige Lacke oder Gießharze verwendet werden.

Sollten sich beim Umformen Luftpolster zwischen Werkzeug- und Formteiloberfläche bilden, sind

Entlüftungsbohrungen anzubringen. Ihre Abmessungen müssen sehr klein sein (Durchmesser 0,5 bis 1,0 mm), um Spuren am Formteil zu vermeiden. Damit sich das Luftpolster schnell abbaut, werden diese Entlüftungen von der Rückseite des Formwerkzeugs zu einem größeren Durchmesser aufgebohrt (siehe Abb. 47).

**Formwerkzeuge aus Holz** sind zweckmäßig bei kleinen Stückzahlen und geringer Belastung während der Umformung. Kleine Werkzeuge werden aus massivem Holz hergestellt, größere Formen mit abwickelbaren Oberflächen – wie zylindrische oder konische Formen – aus Hartfaserplatten oder Sperrholz. Bei größeren Serien oder stärkerer Beanspruchung ist die Verwendung von Schichtpressstoffen empfehlenswert. Da die poröse Oberfläche des Holzes Abdrücke am Formteil verursachen würde, wird sie verspachtelt und feingeschliffen oder – besser – mit weichem, dehnbarem Stoff (Handschuhstoff) überzogen.

Holzwerkzeuge sind preiswert herzustellen, leicht auszubessern und zu ändern. Bei Einzelfertigung oder Kleinserien ist ihre geringe Wärme-

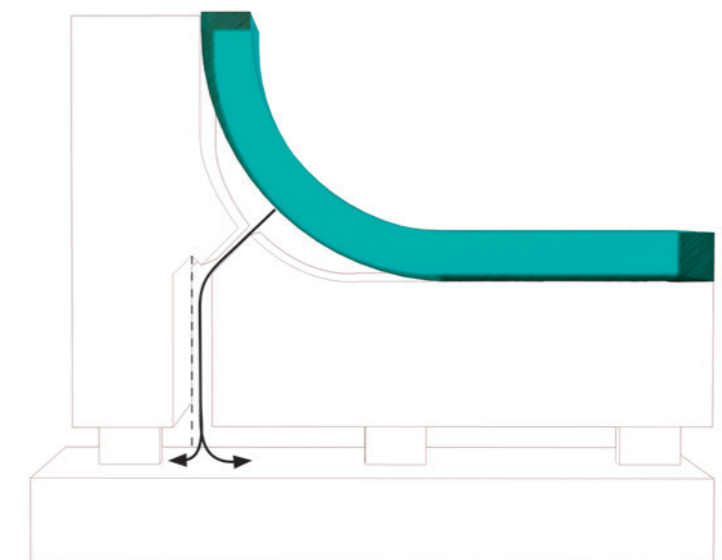


Abb. 47: Entlüftungsbohrung an Formwerkzeug

leitfähigkeit von Vorteil. Nachteilig sind die nicht sehr hohe Belastbarkeit und die Neigung zum Reißen und Verziehen.

**Formwerkzeuge aus PLEXIGLAS® GS** dürfen nur kurzzeitig den Umformtemperaturen des Zuschnitts und den mechanischen Umformbelastungen ausgesetzt werden. Die Verwendung von PLEXIGLAS® GS ist sinnvoll, wenn beispielsweise zur Darstellung komplizierter Umformvorgänge ein transparentes Werkzeug erforderlich ist, z.B. für Studien oder kleine Probserien. Die geringe Wärmeleitfähigkeit lässt das zu formende Material nicht so schnell auskühlen, seine spiegelglatte Oberfläche kann jedoch beim Umformen Luftpolster einschließen, die zu optischen Störungen führen.

**Formwerkzeuge aus Metall** sind gegossen – es handelt sich meist um Aluminium-Legierungen – oder aus Halbzeugen zusammengesetzt. Metallwerkzeuge werden bei großen Stückzahlen verwendet. Eine Hochglanzpolitur kann zu Formabdrücken (Pickel) führen. Besser ist eine mattglänzende Oberfläche.

Die Vorteile von Metallwerkzeugen:

- große Genauigkeit und Oberflächengüte,
- Steuerung der Oberflächentemperatur durch Einbau von Heizelementen,
- beschleunigtes Auskühlen durch eingebaute Kühlung und
- allgemein lange Haltbarkeit.

Neben den massiven, vollflächigen Formwerkzeugen können zur Herstellung einfacher, meist transparenter Formteile guter optischer Qualität auch sog. **Gerüstwerkzeuge** verwendet werden. Das Gerüst besteht im allgemeinen aus Metallrohren, -Stäben oder Flacheisen. Sie bilden die Gestaltülle des Formteils, die Flächen zwischen den Stäben bleiben offen. So stützt sich das auf Umformtemperatur erwärmte Material auf dem Gerüst ab, die übrigen Bereiche bleiben abdruckfrei.

Abb. 48 zeigt schematisch einige Gerüstwerkzeuge. Je nach Ausschnittgröße der Konturplatte können Formen mit rechten Win-

keln aber auch mit Flanken unterschiedlicher Winkelgröße hergestellt werden (Beispiel 2 in Abb. 48). Gutes Aussehen, Planität und Beibehaltung der ursprünglichen Plattendicke auf der ebenen Hauptfläche des Formteils werden bei Erwärmung mit Infrarot-Strahlern erreicht, wenn diese Fläche – in Beispiel 3 der Abb. 48 mit ---- gekennzeichnet – beispielsweise mit einem Aluminium-Blech während der Erwärmung abgedeckt wird. Dann erfolgt das Tiefziehen nur aus den umliegenden Zuschnittsbereichen.

**Umformwerkzeuge aus Kunststoff-Gießmassen** werden vorwiegend aus Epoxid-Harzen (EP) hergestellt. Vorteilhaft dabei ist, dass nach dem Gießen das spangebende Bearbeiten entfällt bzw. auf ein Minimum beschränkt ist. Bei der Verarbeitung von Kunststoff-Gießmassen sind folgende Maßnahmen empfehlenswert:

- Zumischung von Füllstoffen zur Kostenreduzierung,
- Einarbeiten von Verstärkungen, z.B. Lamine aus Glasfasergewebe, zur Verbesserung der Festigkeit und
- Einmischen von Metallpulver, z.B. Aluminiumpulver, um die Wärmeleitfähigkeit des Formwerkzeugs zu erhöhen, was Umformvorteile bedeuten kann, z.B. geringere Taktzeiten.

Es gibt eine Reihe von Techniken, mit denen sich die unterschiedlichen Anforderungen an das Formwerkzeug erfüllen lassen. Entsprechende Informationen gehen die Hersteller von Gießharzen. Einfache Gießwerkzeuge kann auch der Laie herstellen, wenn er die Vorschriften der Gießharz-Lieferanten beachtet.

Im Gegensatz zu Epoxid-Harzen haben ungesättigte Polyesterharze (UP) bei der Herstellung von Umformwerkzeugen den Nachteil, dass ihre Dauergebrauchstemperatur von der Umformtemperatur der umzuformenden Kunststoffe überschritten wird. Dies führt – neben starker Geruchsbelästigung – zu maßverändernden Erweicherscheinungen.

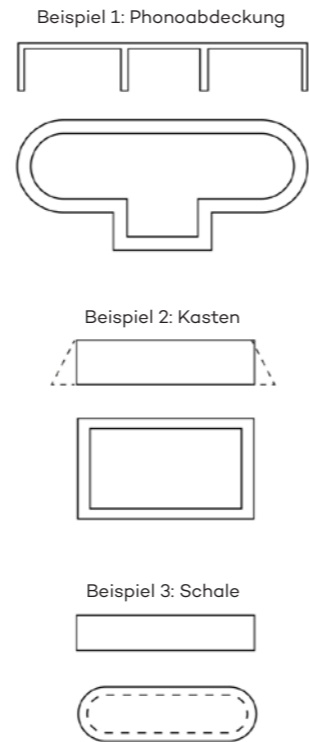


Abb. 48: Verschiedene Gerüstwerkzeuge

Für Modelle oder Prototypen werden auch **Formwerkzeuge aus Gips** verwendet. Aufgrund ihrer geringen mechanischen Festigkeit sind entsprechende Verstärkungen mit einzugießen.

Als **Umformhilfsmittel** werden auf exponierten Stellen häufig Formfette, Silikonöl, Talkum oder PTFE-Beschichtungen aufgetragen. Diese Hilfsmittel erfordern in der Regel nach dem Umformen an den betroffenen Formteiloberflächen eine sorgfältige Reinigung, um gute Haftung zu gewährleisten, wenn dort nachträglich weitere Behandlungen wie Lackieren, Kleben, GF-UP-Verstärkungen usw. folgen.

## 7.2 Spannwerkzeuge

Zum Umformen müssen Platten aus PLEXIGLAS® GS und XT fest oder federnd auf das Werkzeug gespannt werden, je nach Umformverfahren. Bei pneumatischen bzw. Vakuum-Umformverfahren muss außerdem eine ausreichende Abdichtung zwischen Blas-/Saugraum und dem zu formenden Materialzuschnitt durch den Spannrahmen oder die Spannflächen sichergestellt werden.

Für Umformungen, bei denen nur geringe Zugkräfte auf das eingespannte Material einwirken, können die Spannflächen glatt oder leicht aufgeraut sein. Bei größeren Zugkräften würde das jedoch zu hohe Spannkraften erfordern. Deshalb sollten die Spannflächen je nach Verfahren so ausgebildet werden, dass sie das Material während des Umformens mit einem möglichst geringen Aufwand an Spannelementen bzw. Spannkraften ausreichend festklemmen. Gleichzeitig sollten sie, wo es erforderlich ist, für eine gute Abdichtung sorgen. Eine Auswahl aus der Vielzahl der Möglichkeiten, mit denen Spannflächen gestaltet werden können, zeigt die Abb. 49.

Die notwendigen Spannkraften werden entweder durch hydraulische Pressen oder durch mechanisch, pneumatisch oder hydraulisch wirkende Spannelemente aufgebracht. (Abb. 50).

Für die Zugdruckumformung (s. 5.3) und einige kombinierte Umformverfahren sind federnde Spannelemente notwendig. Diese Elemente sollen möglichst so konstruiert sein, dass sich die Spannkraft je nach Bedarf regulieren lassen. Das kann stufenweise durch Verwendung verschieden starker Federn geschehen, stufenlos durch Vorspannen der Federn oder durch elektronische Regelung.

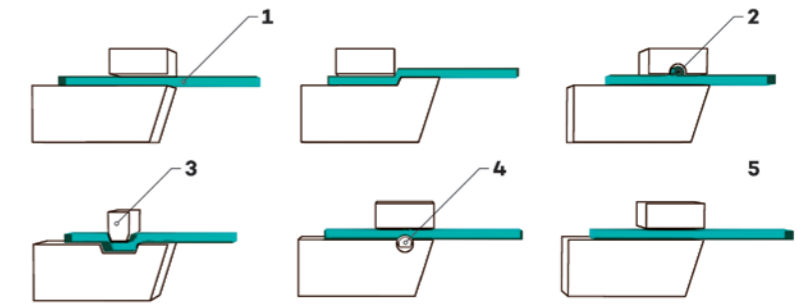


Abb. 49: Ausbildung von Spannflächen: PLEXIGLAS® Zuschnitt (1), eingelöteter Stahldraht (2), Spannrahmen (3), Rundgummi (4), vorwiegend für Zugdruckumformungen, bei denen das Material nachrutschen muss (5)



Abb. 50: Spannelemente für mechanische oder pneumatische bzw. hydraulische Betätigung



---

**POLYVANTIS GmbH**

Riedbahnstraße 70  
64331 Weiterstadt  
Deutschland

**[www.plexiglas.de](http://www.plexiglas.de)**  
**[www.polyvantis.com](http://www.polyvantis.com)**

® = registrierte Marke

Polymethylmethacrylat (PMMA)-Halbzeuge von POLYVANTIS werden auf dem europäischen, asiatischen, afrikanischen und australischen Kontinent unter der registrierten Marke PLEXIGLAS®, auf dem amerikanischen Kontinent unter der registrierten Marke ACRYLITE® vertrieben, jeweils eingetragene Marke der Röhm GmbH, Darmstadt, oder ihrer verbundenen Unternehmen.

Zertifiziert nach DIN EN ISO 9001 (Qualität) und DIN EN ISO 14001 (Umwelt)

Unsere Informationen entsprechen unseren heutigen Kenntnissen und Erfahrungen nach unserem besten Wissen. Wir geben sie jedoch ohne Verbindlichkeit weiter. Änderungen im Rahmen des technischen Fortschritts und der betrieblichen Weiterentwicklung bleiben vorbehalten. Unsere Informationen beschreiben lediglich die Beschaffenheit unserer Produkte und Leistungen und stellen keine Garantien dar. Der Abnehmer ist von einer sorgfältigen Prüfung der Funktionen bzw. Anwendungsmöglichkeiten der Produkte durch dafür qualifiziertes Personal nicht befreit. Dies gilt auch hinsichtlich der Wahrung von Schutzrechten Dritter. Die Erwähnung von Handelsnamen anderer Unternehmen ist keine Empfehlung und schließt die Verwendung anderer gleichartiger Produkte nicht aus.

**Ref-Nr. 311-2** 07/24 (de)