

Illig (Hrsg.)
Peter Schwarzmann

Thermoformen in der Praxis



3., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

HANSER



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

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

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Die Internet-Plattform für Entscheider!

Exklusiv: Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

Richtungsweisend: Fach- und Brancheninformationen
stets top-aktuell!

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

Kunststoffe.de

Illig (Hrsg.)
Peter Schwarzmann

Thermoformen in der Praxis

3., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Der Herausgeber:

ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG, Robert-Bosch-Straße 10, 74081 Heilbronn, Deutschland

Der Autor:

Peter Schwarzmann, ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG, Heilbronn, Deutschland

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

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

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

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

© 2016 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Herstellung: Jörg Strohbach

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: Hubert & Co GmbH, Göttingen

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-44403-4

E-Book-ISBN: 978-3-446-44948-0

Vorwort zur 3. Auflage

Die Ergänzung der Übersetzungen Englisch, Französisch, Chinesisch, Russisch mit Spanisch, die Weiterentwicklung im Thermoformen, die Nachfrage für mehr Information zur Werkzeugtechnik, führten zu einer in wesentlichen Teilen überarbeiteten und erweiterten 3. Auflage. Die ursprüngliche Zielsetzung des Buches wurde durch den Autor, Herrn Peter Schwarzmann, konsequent weitergeführt.

Heilbronn, im Juni 2015

ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG

■ Vorwort zur 2. Auflage

Der Erfolg der 1. Auflage, die auch in die Sprachen Englisch, Französisch, Chinesisch und Russisch übertragen wurde, die umfangreichen technologischen Veränderungen in der Thermoformung und neue Anwendungen führten zu einer in wesentlichen Teilen überarbeiteten und erweiterten 2. Auflage. Die ursprüngliche Zielsetzung des Buches wurde durch den Autor, Herrn Peter Schwarzmann, konsequent weitergeführt.

Heilbronn, im Oktober 2008

ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG

■ Vorwort zur 1. Auflage

Die Fertigungsverfahren der Thermoformung werden in der industriellen Produktion in einem vor wenigen Jahrzehnten noch nicht für möglich gehaltenen Ausmaß angewandt. Neben den traditionellen Gebieten, der Vakuumformung von Platten für Displays, Kühlschränke oder Automobilteile hat sich das Thermoformen bei der Druckluftformung von Verpackungen einen bedeutenden Marktanteil erobert.

Ständig verbesserte Thermoplaste erlauben mit modernsten Maschinen und Werkzeugen eine Steigerung der Mengenleistung bei gleichzeitig erhöhter Präzision der Formteile. Das ursprünglich mehr handwerkliche Thermoformen hat sich als Fertigungsverfahren etabliert, das wissenschaftliche Erkenntnisse der Werkstoffkunde, der Mess- und Regelungstechnik konsequent nutzt. Die Reproduzierbarkeit der Verfahrensparameter erlaubt den Einsatz des Verfahrens in Hochleistungsanlagen für den industriellen Einsatz. Neben zahlreichen Zeitschriftenveröffentlichungen werden die Grundlagen des Thermoformens seit Jahrzehnten in Lehrgängen der ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG vermittelt. Es fehlt jedoch eine zusammenfassende Darstellung der Grundlagen und Verfahren, die gleichzeitig den Studierenden und den bereits in der Praxis stehenden Ingenieuren und Technikern eine Einführung in das Fachgebiet ist und das Grundwissen zur vertieften Behandlung von Einzelfragen vermitteln kann. Die aufgezeigte Lücke mit der genannten Zielsetzung zu schließen, ist das Anliegen des Buches »Thermoformen für die Praxis«. Neben den Thermoplasten werden alle Verfahrensschritte beim Thermoformen, die wesentlichen Maschinentypen und Grundlagen für den Bau von Formen und Werkzeugen umfassend geschildert und mit Praxisbeispielen erläutert. Die Entstehungsgeschichte dieses Buches ist eng mit der 50-jährigen Firmengeschichte der Firma ILLIG verbunden. Dementsprechend ist eine Vielzahl von Anregungen und Erfahrungen eingeflossen, für deren umfassende Darstellung dem Autor, Herrn Peter Schwarzmann mein besonderer Dank gilt. Für die kritische Durchsicht des Manuskriptes, zahlreiche Verbesserungsvorschläge und Ergänzungen danke ich dem langjährigen Leiter der Entwicklung und Konstruktion bei ILLIG, Herrn Günther Kiefer und Herrn Prof. Dr. Günther Harsch. Herausgeber und Autor hoffen, dass »Thermoformen für die Praxis« die Einarbeitung in das Thermoformen erleichtert und bei der Lösung von Problemen eine nützliche Hilfe ist.

Heilbronn, im Januar 1997

Adolf Illig

Inhalt

Vorwort zur 3. Auflage	V
Vorwort zur 2. Auflage	V
Vorwort zur 1. Auflage	V
1 Einführung	1
2 Grundlagen und Begriffe im Thermoformen	5
2.1 Verfahrensablauf	5
2.2 Positiv- und Negativformung	6
2.3 Vakuum- und Druckluftformung	8
2.3.1 Unterschiede zwischen Vakuum- und Druckluftformung ...	8
2.3.2 Einsatz für Druckluftformung	9
2.4 Umformdruck, Ausformdruck, und Ausformschärfe	10
2.5 Vorblasen, Vorsaugen, Druckausgleich, Belüften	12
2.6 Schreckmarken und Markierungen	13
2.6.1 Schreckmarken an positiv geformten Teilen	13
2.6.2 Schreckmarken an negativ geformten Teilen	17
2.6.3 Ursachen für Schreckmarken	19
2.6.4 Möglichkeiten für die Reduzierung der Schreckmarken ...	19
2.6.5 Folgen der Schreckmarkenbildung	20
2.6.6 Nutzen der typischen Wanddickenverteilung in Schreckmarken bei Verschlüssen von Klappverpackungen	21
2.6.7 Schlussfolgerung mit Bezug auf Schreckmarken	22
2.6.8 Markierungen	22
2.7 Faltenbildung beim Thermoformen	23
2.7.1 Ablauf der Faltenbildung bei Positivformung	24
2.7.2 Faltenbildung bei Negativformung	27
2.7.3 Faltenbildung auf Oberflächen	28

2.8	Der Werkzeugsatz	28
2.9	Formfläche, Einzugsfläche, Spannrand	29
2.10	Niederhalter, Hochhalter	30
2.11	Umform- und Verstreckungsverhältnis	32
2.12	Entformschrägen	33
2.13	Entlüftungsquerschnitte	34
2.14	Wanddickenberechnung	34
3	Thermoplastische Halbzeuge	37
3.1	Aufbau und Struktur der Thermoplaste	37
3.2	Aufnahme von Feuchtigkeit im Halbzeug	38
3.3	Verhalten beim Aufheizen	40
3.4	Ausdehnung und Durchhang	41
3.5	Umformtemperaturbereiche	43
3.6	Reibverhalten beim Thermoformen	44
3.7	Ausformschärfe	46
3.8	Verarbeitungsschwindung beim Thermoformen	47
3.9	Der freie Schrumpf von Halbzeugen	53
3.10	Einfluss der Spannungen im extrudierten Halbzeug	57
3.11	Statische Aufladung	61
3.12	Das viskoelastische Verhalten der Thermoplaste beim Thermoformen	62
3.13	Verhalten beim Kühlen	63
3.14	Toleranzen von Halbzeugen	64
3.15	Herstellungsverfahren für thermoplastische Halbzeuge	65
3.16	Tabelle für den Thermoformer	68
3.17	Thermoplaste für das Thermoformen	73
3.17.1	Polystyrol (PS)	73
3.17.2	Schlagfestes Polystyrol (PS-HI)	74
3.17.3	Styrol-Butadien-Styrol-Blockcopolymer (SBS)	75
3.17.4	Orientiertes Polystyrol (OPS)	76
3.17.5	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS)	77
3.17.6	Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Copolymer (ASA)	78
3.17.7	Styrol-Acrylnitril-Copolymer (SAN)	79
3.17.8	Polyvinylchlorid (PVC-U)	80
3.17.9	Polyethylen hoher Dichte (PE-HD)	80

3.17.10	Polypropylen (PP): Detaillierte Vorstellung	82
3.17.11	Extrudiertes Polymethylmethacrylat (PMMA ex)	97
3.17.12	Gegossenes Polymethylmethacrylat (PMMA g)	98
3.17.13	Polykarbonat (PC)	100
3.17.14	Polyamid (PA)	101
3.17.15	Polyethylenterephthalat, PET: Detaillierte Vorstellung	102
3.17.16	Polysulfon (PSU)	109
3.17.17	EPE und EPP-Schaumfolien	110
3.17.18	Biokunststoffe im Thermoformen	111
3.17.18.1	Abbaubare Kunststoffe aus erneuerbaren Rohstoffen	112
3.17.18.2	Nicht abbaubare Bio-Kunststoffe	118
3.17.19	Mehrschicht-, Barriere- und Verbundhalbzeuge	119
3.17.20	Sonstige Halbzeuge	128
3.17.21	Markennamen	128
4	Heizungstechniken im Thermoformen	129
4.1	Strahlungsheizungen	129
4.1.1	Prinzip der Wärmeübertragung durch Infrarotstrahlung ...	129
4.1.2	Durch Strahlung übertragbare Wärmemenge	131
4.1.3	Gleichmäßiges Beheizen mit Strahlungsheizungen	137
4.1.4	Keramik-, Quarzglas- und Hellstrahler im Vergleich	143
4.2	Reproduzierbarkeit von Heizergebnissen der Strahlungsheizungen	147
4.2.1	Beurteilung der Reproduzierbarkeit	147
4.2.2	Kompensation der nicht beeinflussbaren Außeneinflüsse auf den Heizprozess	151
4.2.3	Leistungsstellung und Temperaturregelung von Heizungen	151
4.3	Kontaktheizungen	153
4.4	Konvektionsheizungen	155
4.5	Mindestheizzeit, effektive Heizzeit und Verweilzeit	155
4.5.1	Einfluss der Heizzeit auf das Thermoformverhalten	155
4.5.2	Positive Auswirkung der Verweilzeit	156
4.5.3	Negative Auswirkung der Verweilzeit	157
5	Heizungen in Plattenmaschinen	159
5.1	Grundlagen der isothermengeregelten Heizung	160
5.1.1	Fachbegriffe	160
5.1.2	Details zur Temperaturregelung von Keramikstrahlern ...	162
5.1.3	Vorteile von Pilotstrahlern geregelten Heizungen	163

5.2	Joystickteilung des Heizbildes	164
5.3	Mehrstellungsschaltung	165
5.4	Strahlertemperaturregelung mit überlagerter Prozent-Stellung	168
5.5	IR-Messeinrichtung zur Temperaturmessung oder Steuerung von Heizungen	169
6	Heizungen in Rollenautomaten	171
6.1	Allgemeines	171
6.2	Pilotstrahlergeregelt Heizungen in Rollenautomaten	172
6.2.1	Heizung mit Temperatur-Längsreihenregelung	172
6.2.2	Heizung mit Temperatur-Gesamtfeldregelung	173
6.2.3	Heizung mit Querreihen-Regelung	174
7	Beheizen von mehrfarbigen und vorbedruckten Halbzeugen mit IR-Strahlungsheizungen	175
7.1	Allgemeines	175
7.2	Wahl der Infrarot-Strahler	175
8	Thermoformverfahren auf Plattenmaschinen	179
8.1	Positivformung	180
8.1.1	Positivformung mit mechanischem Vorstrecken	180
8.1.2	Positivformung mit Vorblasen	181
8.1.3	Positivformung mit Vorblasen gegen ein Brett	184
8.1.4	Positivformung mit Vorsaugen und Abrollen der Blase auf das Formwerkzeug	185
8.1.5	Positivformung mit Vorsaugen in eine Glocke	186
8.1.6	Einsatz von Eckenblasdüsen bei der Positivformung	187
8.2	Negativformung	188
8.2.1	Negativformung ohne Vorstreckstempel	188
8.2.2	Negativformung mit Vorstreckstempel	189
8.3	Positiv-Negativ-Formung	191
8.4	Zweikammerverfahren (3K-Verfahren)	192
8.5	Twinsheetformung	193
8.5.1	Allgemeine Regeln für die Twinsheetformung auf Serien-Thermoformmaschinen	194
8.5.2	Verfahrensablauf Twinsheetformung, UA-Maschine mit Handbeschickung	195
8.5.3	Maschinenvarianten für die Twinsheetformung	198

8.6	Klebekaschieren	200
8.6.1	Allgemeines	200
8.6.2	Kaschierverfahren	201
9	Thermoformverfahren auf Rollenautomaten, Stanzstation mit Messerschnitt	205
9.1	Prinzipieller Ablauf in der Formstation	205
9.2	Maschinenausstattungen mit Auswirkung auf die Formungsverfahren	209
9.3	Auswahl des richtigen Formungsverfahrens und des Werkzeugaufbaus	210
9.4	Hinweise für die Beeinflussung der Wanddickenverteilung	211
10	Thermoformverfahren auf Rollenautomaten, Form-Stanzwerkzeuge mit Scherschnitt	217
10.1	Kinematik der Form und Stanzstation	217
10.2	Die Besonderheiten einer mechanischen Kurvensteuerung	219
10.3	Ablaufdiagramm einer Formstation mit Form und Stanzwerkzeug mit Negativformung	220
10.3.1	Die Formluftreduzierung	221
10.3.2	Niederhalter-Steuerung	221
10.4	Ablaufdiagramm einer Formstation mit Form und Stanzwerkzeug mit Scherschnitt für Positivformung	223
11	Sonderverfahren in kombinierten Form-Stanzwerkzeugen in Rollenautomaten	225
11.1	Auskleiden von formstabilen Behältern	225
11.2	Etikettieren im Formwerkzeug (In-Mould-Labeling IML)	227
11.3	Form-Stanzwerkzeug für randlose Formteile	230
11.4	Thermoformen von Hohlboden-Bechern	231
11.5	Thermoformen mit Form und Gegenform	232
12	Thermoformen von durchsichtigen Teilen	233
12.1	Allgemeine Regeln für das Formen von durchsichtigen Teilen	233
12.2	Besonderheiten beim Formen auf Plattenmaschinen	235
12.3	Besonderheiten beim Formen auf Rollenautomaten	236
12.4	Verfahrensbeispiele - Herstellen von durchsichtigen Teilen	240
12.5	Besondere Herstellverfahren für durchsichtige Teile	245

13	Thermoformen von vorbedruckten Halbzeugen	247
13.1	Allgemeines	247
13.2	Ermittlung des Zerrdrucks	250
14	Kühlen der geformten Teile	255
14.1	Die Entformtemperatur	255
14.2	Einflüsse auf die Kühlzeit	256
14.3	Kühlen mit dem Formwerkzeug	257
14.4	Kühlen mit Luft	258
14.4.1	Stand der Technik beim Kühlen mit Luft in Platten- maschinen	259
14.4.2	Reduzierung der Werkzeugtemperatur in Verbindung mit kälterer Kühlluft	261
15	Entformen	265
16	Stapeln von Teilen	269
16.1	Allgemeines	269
16.2	Stapelung von Formteilen mit wechselnden Stapelnoppen	275
17	Nachbearbeitung an thermogeformten Teilen	277
17.1	Trennen, Schneiden	277
17.2	Entgraten	280
17.3	Verbinden	280
17.4	Recycling	282
18	Stanzen von thermogeformten Teilen	283
18.1	Messerschnitt	283
18.2	Scherschnitt	291
18.3	Vergleiche von Messer- und Scherschnitt	298
18.4	Einflussfaktoren auf das Stanzen	301
18.5	Engelshaarbildung	302
18.5.1	Verringerung der Engelshaarbildung beim Messerschnitt	307
18.5.2	Verringerung der Engelshaarbildung beim Scherschnitt in Form- und Stanzwerkzeug	307
18.6	Unsaubere Schnitte – Bartbildung	309

18.7	Stanzkräfte	311
18.8	Schlussfolgerung	313
18.8.1	Messerschnitt-Stanzwerkzeuge für separate Stanzstation ..	313
18.8.2	Scherschnitt-Stanzwerkzeuge für separate Stanzstation ...	314
18.8.3	Form-Stanzwerkzeuge mit Messerschnitt	315
18.8.4	Form-Stanzwerkzeuge mit Scherschnitt	315
18.9	Verwandte Schneidverfahren	316
19	Dekoration im Thermoformen	320
19.1	Bilder	324
20	Deformation von thermogeformten Teilen	333
20.1	Nachweis der Einflüsse auf die Deformation	333
20.2	Einfluss von Dickstellen	335
20.3	Einfluss der Spannungen im Halbzeug	335
20.4	Deformation von einem etikettierten Formteil	336
20.5	Deformation des Spannrandes eines rechteckigen Formteils	336
20.6	Deformation bei anisotroper Schwindung	337
20.7	Schlussfolgerung, Ursachen für Deformation	339
20.8	Tipps und Hinweise in Bezug auf Deformation	339
21	Thermoformwerkzeuge	341
21.1	Begriffe und Definitionen	341
21.2	Werkstoffe für das Formsegment	342
21.3	Hilfe für die Werkstoff- bzw. Variantenwahl für ein Werkzeug	346
21.4	Positiv- oder Negativ-Formung?	347
21.5	Auslegung der Formfläche	348
21.6	Verarbeitungsschwindung: Wer liefert den Wert?	352
21.7	Bestimmen der Halbzeuggröße	353
21.8	Der Unterbau	354
21.8.1	Prinzipskizzen für Werkzeugaufbauten	357
21.8.2	Verstellbare Unterbauten für Plattenmaschinen	361
21.8.3	Unterschied zwischen Festformat- und verstellbarem Unterbau	362
21.9	Gestaltungsdetails für Thermoformwerkzeuge	363
21.9.1	Seitenwandschrägen	363

21.9.2	Oberflächenrauheit	364
21.9.3	Radien	367
21.9.4	Werkzeugentlüftung, Abluftquerschnitte	368
21.9.5	Hohlräume	372
21.9.6	Werkstoffe für Vorstreckstempel	372
21.9.7	Vorstreckstempel-Konturen für Negativformung	374
21.9.8	Vorstreckstempel für Positivwerkzeuge	378
21.10	Werkzeuge mit Hinterschnitt	379
21.10.1	Entformen von Hinterschnitten ohne Losteile	379
21.10.2	Losteile (Schieber) zum Entformen von Hinterschnitten ...	379
21.11	Werkzeuggestaltung für flache Formteile mit geringer Verstreckung	380
21.12	Werkzeuge für das Formen von durchsichtigen Teilen	381
21.13	Werkzeuge für Twinsheetformung	383
21.14	Werkzeuge für Filmscharniere und Schnappverschlüsse	389
21.15	Form-Stanzwerkzeuge mit Messerschnittschnitt in Rollenautomaten	395
21.16	Form-Stanzwerkzeuge mit Scherschnitt in Rollenautomaten	398
21.17	Präventive Instandhaltung von Formwerkzeugen	411
22	Temperieren von Thermoformwerkzeugen	415
22.1	Allgemeines	415
22.1.1	Begriffe beim Temperieren	415
22.1.2	Einflüsse der Werkzeugtemperatur	416
22.1.3	Wann kann die Werkzeugtemperierung entfallen?	416
22.2	Temperiermedien	417
22.3	Werkstoffe für temperierbare Thermoformwerkzeuge	418
22.4	Varianten der Kühlkreisläufe	418
22.4.1	Beispiele für Kreisläufe in Thermoformmaschinen	419
22.5	Kühlverfahren	421
22.6	Der Kühlbedarf eines thermogeformten Teils	422
22.6.1	Das Enthalpie-Diagramm	422
22.6.2	Enthalpie-Tabellen	423
22.6.3	Erforderliche Kühlleistung eines Werkzeugs	424
22.7	Auslegung der Temperierung eines Formwerkzeugs	424
22.7.1	Zu kühlende Materialmenge (Materialdurchsatz)	425
22.7.2	Erforderliche Kühlleistung während der Produktion	426
22.7.3	Kühlwasserbedarf für die Werkzeugkühlung	427
22.7.4	Erforderliche Kontaktfläche für das Kühlwasser	427

22.7.5	Gesamtlänge der Kühlkanäle	429
22.7.6	Wassergeschwindigkeit	429
22.7.7	Resultierender Druckabfall im Werkzeug	430
22.7.8	Druckabfall beim Anschließen des Formwerkzeugs in der Maschine	432
22.8	Druckabfall in der Maschinenverrohrung	434
22.9	Druckabfall im gesamten Temperierkreislauf	435
22.10	Prüfung der Förderleistung des angeschlossenen Temperier- oder Kühlgeräts	436
22.11	Beurteilen des Prüfergebnisses	437
22.12	Konstruktive Auslegungsmöglichkeiten bei der Wärmeübertragung	438
22.13	Der Einfluss der Luftkühlung auf die Werkzeugkühlung	438
22.14	Präventive Instandhaltung	439
23	Energieverbrauch des Thermoformens	443
23.1	Allgemeines	443
23.2	Spezifischer Energieverbrauch im Thermoformen	444
23.3	Der Anteil der Energiekosten an den Herstellkosten von Ziehteilen ..	447
23.4	Möglichkeiten zur Reduzierung des spezifischen Energieverbrauchs	450
23.4.1	Energie sparen mit elektrischen Antrieben	452
23.4.2	Reduzierung des Energieverbrauchs für die Druckluft- formung	454
23.4.3	Reduzierung des zu füllenden Volumens mit Druckluft, die Formluftreduzierung	455
23.4.4	Einfluss des Druckniveaus	456
23.4.5	Reduzierung des Energieverbrauchs beim Heizen	460
23.4.6	Kosten einsparen mit neuen Vakuumpumpen	463
23.4.7	Kurze Kühlzeiten reduzieren Energiekosten	463
23.4.8	Isolieren von Verrohrungen?	465
23.4.9	Einsatz von Freiluftkühlern anstelle von Kältemaschinen mit Kompressor	465
23.4.10	Zeitversetzter Heizungsstart senkt Strompreis	465
23.4.11	Nutzung der Energieabsenkung für längere Stillstandzeiten	466
23.4.12	Nutzung der Maschinengrundeinstellung	466
23.4.13	Regelmäßige Wartung	466
23.4.14	Die dynamische Prozessoptimierung	467
23.4.15	Die Energieverbrauchsanzeige	467
23.4.16	Energieverbrauchsmessungen in der Produktion	467

24	Fehler im Thermoformen	469
24.1	Gestaltungsfehler am Formteil	469
24.2	Fehler am Halbzeug	474
24.3	Auswahl der richtigen Thermoformmaschine	476
24.4	Fehler beim Aufstellen der Thermoformmaschine	477
24.5	Fehler am Thermoformwerkzeug	477
24.6	Fehler beim Einfahren von neuen Thermoformwerkzeugen	479
24.7	Fehler bei Bemusterungen	480
24.8	Fehler bei der Beheizung mit Infrarotstrahlern	480
24.9	Leitungsquerschnitte für Luft und Vakuum	481
24.10	Verhindern von Falten	482
24.11	Fehlersuche beim Thermoformen	483
25	Literaturverzeichnis	495
25.1	Weiterführende Fachliteratur	495
Index	497

1

Einführung

Unter Thermoformen versteht man das Umformen von thermoplastischem Halbzeug bei erhöhter Temperatur zu Formteilen.

Thermoformen, wird auch Warmumformen und in der Umgangssprache auch als Tiefziehen bezeichnet.

Die Darstellung in Bild 1.1 zeigt den prinzipiellen Ablauf in einem Thermoformprozess mittels Vakuumformung.

Die Verfahrensschritte sind dabei:

- das Erwärmen des Halbzeugs auf seine Umformtemperatur im elastoplastischen Bereich,
- die Formgebung mit Hilfe eines Thermoformwerkzeugs,
- das Abkühlen unter Formzwang auf eine Temperatur, bei der das Formteil formstabil ist und
- das Entformen des formstabilen Formteils.

Die Wanddicke des Fertigteils ergibt sich über das Verstreckungsverhältnis zwischen der erzeugten Fläche zur Ausgangsfläche. Die Wanddickenverteilung des geformten Teils wird hauptsächlich vom Formwerkzeug und dem Formungsverfahren bestimmt.

Die Ausformschärfe, das heißt die Abbildegenauigkeit der Werkzeugkontur, wird im Wesentlichen bestimmt von der temperaturabhängigen Festigkeit des Halbzeugs während des Umformens und dem effektiven Anpressdruck zwischen Halbzeug und Werkzeugoberfläche.

Die Kühlung des geformten Teils erfolgt in der Regel von der einen Seite durch Kontakt mit dem Formwerkzeug und von der anderen Seite durch freie oder erzwungene Luftkühlung.

Meistens schließen sich noch Nachbehandlungen an, wie Beschneiden, Schweißen, Kleben, Heißsiegeln, Lackieren, Metallisieren oder Beflocken.

Das Thermoformen wird oft auch als Warmformen oder Tiefziehen bezeichnet. Auch die Begriffe Vakuumformen oder Druckluftformen werden verwendet. Damit wird zugleich auf die Ausformung mittels Vakuum bzw. Druckluft hingewiesen.

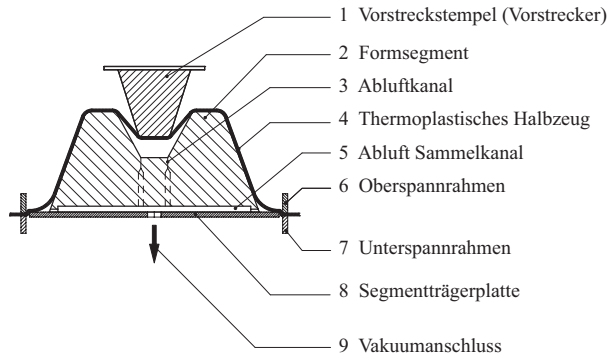


Bild 1.1 Prinzipskizze Warmumformen

Vor- und Nachteile des Thermoformens

Ein Herstellverfahren hat nur dann Erfolg, wenn die produzierten Teile kostengünstiger und in gleicher Qualität oder in besserer Qualität bei gleichen Kosten hergestellt werden können. Es gibt Anwendungsbereiche, bei denen das Spritzgießen oder das Blasformen in Konkurrenz zum Thermoformen stehen. In der Verpackungstechnik ist das Thermoformen meist konkurrenzlos, außer wenn Karton oder Papier als alternative Verpackungswerkstoffe eingesetzt werden.

Die wesentlichen Vorteile des Thermoformens sind:

- Extrem dünnwandige Formteile, z.B. Verpackungen, können aus Halbzeugen mit hoher Schmelzviskosität hergestellt werden, während solche Teile im Spritzgießverfahren Granulat mit sehr niedriger Schmelzviskosität erfordern oder eventuell gar nicht herstellbar sind.
- Kleinste Thermoformteile haben etwa die Größe der Verpackung einer Tablette oder einer Knopf-batterie. Große Formteile, wie z.B. Gartenteiche, erreichen Größen von 3 bis 6 m Länge. Formteilgrößen von mehreren Quadratmetern sind problemlos herstellbar, weil Formteilgröße und Halbzeugdicke verfahrensbedingt nicht begrenzt werden.
- Zum Einsatz kommen Halbzeuge mit Dicken zwischen 0,05 bis 15 mm, bei Schäumen bis 60 mm.
- Der Einsatz von mehrschichtigen Halbzeugen erlaubt die Herstellung von Formteilen mit kombinierten Eigenschaften in Bezug auf Biege- oder Reißfestigkeit, Oberflächenglanz, Softtouch, Antirutschverhalten, Siegelbarkeit, UV-Beständigkeit, Barriereigenschaften, Einarbeitung von Mahlgut in einer Schicht unter-

halb der Oberfläche, Einarbeitung von Schichten mit Fasern usw. Bei schlechter Haftung der Einzelschichten werden Zwischenschichten als Haftvermittlungsschichten eingesetzt.

- Im Thermoformverfahren können Schäume, faserverstärkte Materialien, textilkaschierte Thermoplasten als auch vorbedruckte Halbzeuge verarbeitet werden.
- Das verfahrensbedingte Verstrecken verbessert die mechanischen Eigenschaften der geformten Teile als Folge der Orientierung.
- Thermoformwerkzeuge sind aufgrund des einseitigen Formkontakts kostengünstiger als z. B. Spritzgießwerkzeuge, welche die Wanddicke über zweiseitigen Formkontakt abbilden müssen.
- Bei kleinen Stückzahlen sind die günstigen Werkzeugkosten ein Vorteil des Thermoformens. Bei großen Stückzahlen liegt der Vorteil des Thermoformens bei den erreichbaren minimalen Wanddicken und dem hohen Ausstoß der Thermoformmaschinen.
- Modular gebaute Thermoformmaschinen erlauben die Anpassung an die geforderte Ausstoßleistung.
- Abfälle, wie Stanzgitter oder Spannränder, werden eingemahlen und in den Verarbeitungskreislauf bei der Halbzeugherstellung wiederverwendet.

Beim Thermoformen werden Halbzeuge als Folien und Platten eingesetzt, die über ein Urformverfahren aus Granulaten oder Pulvern hergestellt werden. Dies bedeutet Zusatzkosten beim Ausgangsmaterial gegenüber dem Spritzgießen.

Verfahrensbedingt hat das Halbzeug beim Thermoformen nur auf einer Seite Kontakt mit dem Thermoformwerkzeug. Das Formteil wird daher nur auf einer Seite die Kontur des Formwerkzeugs exakt abbilden. Die Kontur der Gegenseite ergibt sich aus der resultierenden Verstreckung.

Zukünftige Entwicklungen

Das Thermoformen gilt in der Kunststoffverarbeitung als der Bereich mit dem größten Wachstum. Das gilt sowohl für technische Formteile als auch für Verpackungen.

- Das Thermoformen als Verfahren mit großem handwerklichen Geschick und viel Erfahrung ist zur Zeit im Umbruch zu einem prozessgeregelten Verfahren.
- Sensorik in Verbindung mit Regelungstechnik erlauben den Thermoformprozess zu automatisieren.
- Die Verwertung von Produktionsabfällen, das Einmahlen und Beimischen zu Neuware sind längst Stand der Technik.
- Biokunststoffe werden immer preisgünstiger. Das Thermoformverfahren ist prädestiniert, um diese Materialien insbesondere für dünnwandige Verpackungen einzusetzen.

- Die Verwendung von mehrschichtigen Halbzeugen erlaubt die Herstellung von Teilen mit sehr breiten Anforderungsspektrum.
- In lohnintensiven Ländern geht der Trend zur Automatisierung, der Integrierung der Nachbearbeitung und der Produktivitätssteigerung weiter.

2

Grundlagen und Begriffe im Thermoformen

■ 2.1 Verfahrensablauf

Der Thermoformprozess besteht aus den Einzelschritten:

1. **Heizen** des Halbzeugs auf Umformtemperatur
2. **Vorformen** des beheizten Halbzeugs durch Vorstrecken
3. **Ausformen** des Formteils
4. **Kühlen** des Formteils
5. **Entformen** des Formteils

Heizen

Siehe Kapitel 4 »Heizen von thermoplastischen Halbzeugen«.

Vorformen

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten für das Vorformen, z. B.:

- Vorstrecken durch Vorblasen, d. h. Bilden einer Blase mit Druckluft
- Vorstrecken durch Vorsaugen, d. h. Bilden einer Blase mit Vakuum
- Mechanisches Vorstrecken mithilfe eines Vorstreckstempels, auch Oberstempel oder Vorstrecker genannt
- Mechanisches Vorstrecken mit Hilfe der Form selbst
- Kombination der oben aufgezählten Vorstreckmöglichkeiten

Ausformen

Beispiele für das Ausformen:

- Ausformen mit Vakuum (Vakuumformmaschinen)
- Ausformen mit Druckluft (Druckluftformmaschinen oder Vakuumformmaschinen mit verriegelten Formwerkzeugen)

- Ausformen mit Druckluft und Vakuum (Druckluftformmaschinen mit zusätzlichem Vakuumanschluss oder Vakuumformmaschinen mit verriegelten Formwerkzeugen)
- Ausformen durch Prägen. Das Prägen erlaubt das beidseitige Abformen von Werkzeugkonturen. Einsatz für geschäumte Halbzeuge, seltener für das Prägen und Kalibrieren von Rändern.

Kühlen

Kühlmöglichkeiten des geformten Teiles, je nach Maschinentyp:

- Kühlung durch Kontakt mit dem Formwerkzeug (meist einseitig)
- Kühlung mittels Luft in verschiedenen Varianten:
 - Luft wird von der Umgebung angesaugt (Normalfall)
 - Kühle Luft wird kundenseitig den Gebläsen zugeführt
 - In den Luftstrom wird Wassersprühnebel eingeblasen; das Verdampfen des Sprühnebels im Luftstrom kühlt die Luft ab. Bei Luftgeschwindigkeiten von ca. 10 m/s und einer Entfernung des Gebläses vom Formteil von ca. 1,5 m kühlt die Luft um ca. 10 °C ab.
(Hinweis: Bei zu hohen Luftgeschwindigkeiten werden die Formteile nass, weil die Zeit für das Verdampfen des Wassersprühnebels nicht ausreicht.)
- Freies Abkühlen an der Luft, wenn ohne Formwerkzeug geformt wird.

Entformen

Wenn der thermoplastische Kunststoff bis unterhalb seiner Erweichungstemperatur erkaltet ist, d. h. steif genug ist, wird entformt.

■ 2.2 Positiv- und Negativformung

Positivformung (Bild 2.1, a):

- Abformung der Außenkontur der Form (vereinfachte Definition)
- Die Rückstellkräfte im Halbzeug und die Ausformkräfte wirken in die gleiche Richtung.

Negativformung (Bild 2.1, b):

- Abformung der Innenkontur der Form (vereinfachte Definition)
- Die Rückstellkräfte im Halbzeug und die Ausformkräfte wirken gegeneinander.

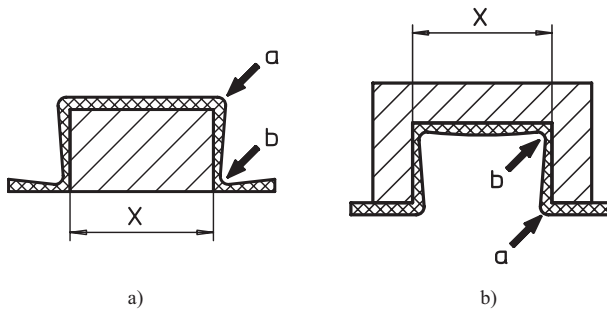


Bild 2.1 Positiv- und Negativformung
 a) Positivformung (schematisch)
 b) Negativformung (schematisch)
 X = vom Formwerkzeug abgeformtes Maß

Tabelle 2.1 Vergleich positiv und negativ geformtes Teil

Merkmal	Positiv geformtes Teil	Negativ geformtes Teil
Abformgenauigkeit des Formteils	an der Innenseite	an der Außenseite
Bemaßung (beim Zeichnen)	an der Innenseite	an der Außenseite
Dicke Randbereich	Rand durch Verstreckung ausgedünnt	Rand bleibt praktisch unverstreckt, Wanddicke gleich Ausgangsdicke
Dickste Stelle*	am Boden	am Rand
Dünkste Stelle*	am Rand (Übergang zur Seitenwand)	am Boden (Übergang zur Seitenwand)
Gefahr der Faltenbildung	an den Ecken zum Rand	keine Faltenbildung

* wenn ausgeformt ohne Vorformen, bei relativ geringem Verstreckungsverhältnis

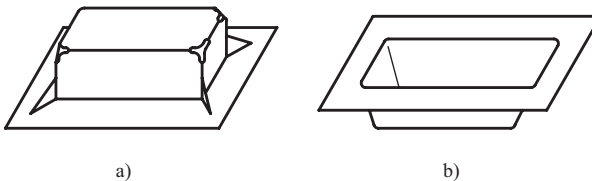


Bild 2.2 a) Positiv geformtes Teil mit Falten zum Rand und Schreckmarken an den Ecken am Übergang vom Boden zu den Seitenwänden
 b) Negativ geformtes Teil ohne Falten und einem ringsum gleichmäßig dicken Rand

■ 2.3 Vakuum- und Druckluftformung

Je nach dem zur Verfügung stehenden Umformdruck beim Thermoformen, spricht man von Vakuum- oder von Druckluftformung.

Beim Vakuumformen wird mit der Vakuumpumpe das beheizte und bei Bedarf vorgeformte Halbzeug auf die Oberfläche des Formwerkzeuges gesaugt. Somit entsteht ein Umformdruck entsprechend der Differenz aus atmosphärischem Druck und dem durch die Vakuumpumpe erzeugten Unterdruck, d. h. von max. ca. 1 bar (100 000 Pa).

Beim Druckluftformen wird das beheizte Halbzeug mit Druckluft gegen die Oberfläche des Werkzeuges gepresst. Dafür braucht es einen abgedichteten Druckluftraum, in welchem Druckluft – als Formluft einströmen kann.

In Bezug auf den max. Umformdruck (auch Druck der Formluft) gibt es verschiedene Stufen: bis 2,5 bar, 6 bis 8 bar und Sondermaschinen bis ca. 200 bar.

2.3.1 Unterschiede zwischen Vakuum- und Druckluftformung

Tabelle 2.2 Vergleich Vakuum- und Druckluftformung

Merkmal	Vakuumformung	Druckluftformung	Bemerkung
Umformtemperatur des Halbzeuges	höher	geringer	bei gleicher Ausformschärfe, Differenztemperatur ca. 20 °C
Durchhang	höher	geringer	bedingt durch die temperaturabhängige Festigkeit des Halbzeuges
Reibung zwischen Halbzeug und Vorstreckstempel	höher	geringer	Reibung erhöht sich bei höherer Halbzeugtemperatur
Reibung zwischen Halbzeug und Formwerkzeug	höher	geringer	Reibung erhöht sich bei höherer Halbzeugtemperatur
Erforderliche Umformkraft	geringer	höher	bedingt durch die temperaturabhängige Festigkeit des Halbzeuges. Achtung Sonderfälle: APET, CPET, geringste Umformkraft bei einer bestimmten Temperatur!
Ausformschärfe	geringer	höher	bei gleicher Umformtemperatur
Wanddickenverteilung	schlechter	günstiger	pauschale Aussage
Schreckmarken	höher	geringer	aufgrund der Reibung/Haftreibung
Temperaturbeständigkeit des Formteils	geringer	höher	je höher die Umformtemperatur, desto geringer die Restspannungen im beheizten Halbzeug, desto höher die Temperaturbeständigkeit
Kühlzeit	höher	geringer	aufgrund der Umformtemperatur
Taktzeit	länger	kürzer	aufgrund der Kühlzeit

Tabelle 2.2 Vergleich Vakuum- und Druckluftformung (*Fortsetzung*)

Merkmal	Vakuum- formung	Druckluft- formung	Bemerkung
Abluftbohrungen im Formwerkzeug	größere Einzel-Querschnitte	kleinere Einzel-Querschnitte	Beispiel Bohrungen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ für PSHI: 0,8 / 0,5 mm, ▪ für PP: 0,6 / 0,3 mm. Beispiel für Schlitze: <ul style="list-style-type: none"> ▪ für PSHI: 0,5 / 0,3 mm, ▪ für PP: 0,3 / 0,2 mm.
Werkzeugkosten	geringer	höher	Unterschiede: Glocke für Druckluftformung, Größe und Summe der Abluftbohrungen und -schlitze, Stabilität des Formwerkzeuges insgesamt.
Werkzeuggewicht	geringer	höher	Aufgrund der Druckluftglocke
Zuhaltkraft der Maschine	geringer	höher	Wenn das Formwerkzeug keine Verriegelung hat
Energieverbrauch für die Ausformung	geringer	höher	pauschale Aussage für »normal gebaute« Werkzeuge. Mit gezielten Lösungen kann der Energieverbrauch für die Druckluftformung sehr stark reduziert werden.
Herstellkosten für kleine Stückzahlen	geringer	höher	pauschale, tendenzielle Aussage
Herstellkosten für große Stückzahlen	höher	geringer	pauschale, tendenzielle Aussage

Wenn die Qualität sowohl mit Vakuum- als auch mit Druckluftformung erreicht werden kann und die entsprechenden Maschinen zur Auswahl stehen, entscheidet die Berechnung der Produktherstellkosten des zu formenden Teiles, ob mit Vakuum oder mit Druckluft geformt werden soll.

2.3.2 Einsatz für Druckluftformung

Verpackungsteile

- Generell, Artikel welche in großen Stückzahlen hergestellt werden müssen, wie z. B. Becher, Deckel, Trays, Verpackungseinlagen usw.
- Für Halbzeuge welche bei Vakuumformung in Verbindung mit hohen Anforderungen an Klarsichtigkeit, Wanddickenverteilung oder Ausformschärfe problematisch sind:
 - PP wegen seiner geringen Schmelzefestigkeit (Durchhang),
 - OPS wegen seines geringen Umformtemperaturbereichs,
 - APET wegen seiner schlechter werdenden Transparenz und Ausformbarkeit bei höherer Umformtemperatur.
- Für vorbedruckte Folien, wegen der geringeren Druckbildverzerrung bei geringerer Umformtemperatur.

Technische Teile

- Teile, welche eine sehr hohe Ausformschärfe (extrem kleine Radien) haben müssen und das Halbzeug sich mit Vakuum nicht so scharf ausformen lässt, wie z. B. Polycarbonat, gegossenes Acrylglas.
- Für besonders hohe Ansprüche an die Oberflächenqualität der geformten Teile.
- Generell, wenn die Ausformkraft mit Vakuum nicht ausreicht.

Schlussfolgerung

Mit Druckluftformung können die Grenzen des Machbaren höher gesetzt werden. Druckluftformung braucht immer die aufwendigeren Werkzeuge, hat aber immer den Vorteil der kürzeren Taktzeit.

Der Energieverbrauch im Druckluftformen ist meist höher als in der Vakuumformung. Ein über die Werkzeugtechnik realisierbarer minimaler Druckluftverbrauch, erlaubt die Erhöhung des Drucks der Formluft, was gleichzeitig eine Reduzierung der Umformtemperatur des Halbzeuges zulässt. Ob ein erhöhter Aufwand im Werkzeug mit dem Ziel weniger Druckluft zu verbrauchen sich lohnt, muss der Energieverbrauch berechnet werden.

Für kleine Stückzahlen ist das Vakuumformen aufgrund der einfacheren Werkzeuge günstiger – vorausgesetzt, dass die realisierbare Formteilqualität stimmt.

Bei großen Stückzahlen sind die Formteilerstellkosten meist günstiger als bei Vakuumformung. Für eine eindeutige Aussage müssen die Formteilerstellkosten miteinander verglichen werden.

■ 2.4 Umformdruck, Ausformdruck, und Ausformschärfe

Der Umformdruck in einer Maschine mit Vakuumformung entspricht der Differenz zwischen dem atmosphärischen Druck auf der einen Seite des Halbzeugs und dem Unterdruck, den die Vakuumpumpe auf der anderen Seite des Halbzeugs erzeugt. Der atmosphärische Druck beträgt in Meereshöhe ca. 1 bar (100 000 Pascal) und reduziert sich mit jedem weiteren 1000 m Höhe oberhalb des Meeresspiegels um ca. 0,1 bar. Mit einer neuwertigen Vakuumpumpe beträgt somit der Umformdruck (in Meereshöhe) ca. 1 bar. Auf 1 m² Formfläche wirken also bei Vakuumformung ca. 10 000 daN Umformkraft. Dies entspricht dem Gesamtgewicht von ca. zehn Kleinwagen.

Der Ausformdruck als Anformdruck des Halbzeuges auf die Wände des Formwerkzeugs resultiert aus dem Umformdruck und der Rückstellspannung im Halbzeug während des Ausformens.

Im Formwerkzeug gilt an den in Bild 2.3 mit (+) gekennzeichneten Stellen:

Resultierender Ausformdruck = Umformdruck + Rückstellspannung im Halbzeug

An den in Bild 2.3 mit (-) gekennzeichneten Stellen gilt:

Resultierender Ausformdruck = Umformdruck - Rückstellspannung im Halbzeug

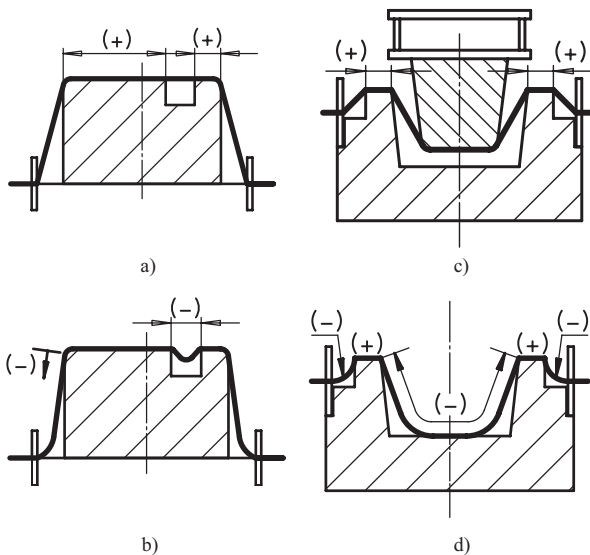


Bild 2.3 Schematische Darstellung des resultierenden Ausformdrucks als Summe von Umform- und Rückstellkraft eines Halbzeugs

a) und b) Positivformwerkzeug

c) und d) Negativformwerkzeug

(+) Flächen am Werkzeug, an denen bei der Formung die Rückstellkräfte im Halbzeug und die Ausformkräfte in die gleiche Richtung wirken

(-) Flächen am Werkzeug, an denen bei der Formung die Rückstellkräfte im Halbzeug und die Ausformkräfte gegeneinander wirken

Die erreichte Ausformschärfe in einem bestimmten Bereich eines Teiles hängt im Wesentlichen ab von der Kunststoffart, der Umformtemperatur und vom resultierenden Ausformdruck.

■ 2.5 Vorblasen, Vorsaugen, Druckausgleich, Belüften

Vorblasen

Vorblasen (Bild 2.4) heißt Vorstrecken des Halbzeugs durch Bilden einer Blase mit Überdruck. Der Vorblasdruck beträgt in den meisten Maschinen maximal 0,03 bar.

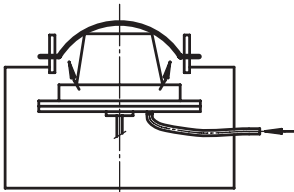


Bild 2.4

Vorformen durch Vorblasen (ist nicht in allen Thermoformmaschinen gegeben)

Vorsaugen

Vorsaugen (Bild 2.5) heißt Vorformen des Halbzeugs durch Bilden einer Blase mit Vakuum.

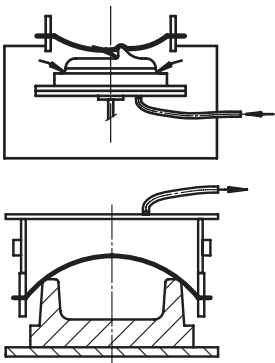


Bild 2.5

Vorformen durch Vorsaugen (ist nicht in allen Thermoformmaschinen gegeben)

oben: Vorsaugen in einen Blaskasten

unten: Vorsaugen in eine Glocke

Druckausgleich

Sobald die Kühlzeit nach dem Formvorgang beendet ist, wird, bevor eine Entformung mit Entformluft beginnt, der Formdruck (Vakuum oder Druckluft) ausgeschaltet und sofort anschließend ein Druckausgleich zum atmosphärischen Druck vorgenommen. Dies ist Voraussetzung für einen reproduzierbaren Ablauf des Entformvorgangs. Beim Entformen von Teilen aus großvolumigen oder großflächigen Formwerkzeugen muss während der Entformungsbewegung in den entstehenden Zwischenraum Luft (Entformluft) geblasen werden, damit durch die Werkzeugbewegung kein Unterdruck zwischen Formteil und Werkzeug entsteht und sich das