

# Inhalt

<b>Vorwort zur 3. Auflage</b> .....	<b>V</b>
Vorwort zur 2. Auflage .....	V
Vorwort zur 1. Auflage .....	V
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und Begriffe im Thermoformen</b> .....	<b>5</b>
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
<b>3</b>	<b>Thermoplastische Halbzeuge .....</b>	<b>37</b>
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	Verarbeitungsschwindigkeit 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
<b>4</b>	<b>Heizungstechniken im Thermoformen .....</b>	<b>129</b>
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-, Quarzgut- 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
<b>5</b>	<b>Heizungen in Plattenmaschinen .....</b>	<b>159</b>
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
<b>6</b>	<b>Heizungen in Rollenautomaten .....</b>	<b>171</b>
6.1	Allgemeines .....	171
6.2	Pilotstrahlergeregelte 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
<b>7</b>	<b>Beheizen von mehrfarbigen und vorbedruckten Halbzeugen mit IR-Strahlungsheizungen .....</b>	<b>175</b>
7.1	Allgemeines .....	175
7.2	Wahl der Infrarot-Strahler .....	175
<b>8</b>	<b>Thermoformverfahren auf Plattenmaschinen .....</b>	<b>179</b>
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	Zweikammerv Verfahren (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
<b>9</b>	<b>Thermoformverfahren auf Rollenautomaten, Stanzstation mit Messerschnitt .....</b>	<b>205</b>
9.1	Prinzipieller Ablauf in der Formstation .....	205
9.2	Maschinenäusstattungen 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
<b>10</b>	<b>Thermoformverfahren auf Rollenautomaten, Form-Stanzwerkzeuge mit Scherschnitt .....</b>	<b>217</b>
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
<b>11</b>	<b>Sonderverfahren in kombinierten Form-Stanzwerkzeugen in Rollenautomaten .....</b>	<b>225</b>
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
<b>12</b>	<b>Thermoformen von durchsichtigen Teilen .....</b>	<b>233</b>
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

<b>13</b>	<b>Thermoformen von vorbedruckten Halbzeugen</b>	<b>247</b>
13.1	Allgemeines	247
13.2	Ermittlung des Zerrdrucks	250
<b>14</b>	<b>Kühlen der geformten Teile</b>	<b>255</b>
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
<b>15</b>	<b>Entformen</b>	<b>265</b>
<b>16</b>	<b>Stapeln von Teilen</b>	<b>269</b>
16.1	Allgemeines	269
16.2	Stapelung von Formteilen mit wechselnden Stapelnoppen	275
<b>17</b>	<b>Nachbearbeitung an thermogeformten Teilen</b>	<b>277</b>
17.1	Trennen, Schneiden	277
17.2	Entgraten	280
17.3	Verbinden	280
17.4	Recycling	282
<b>18</b>	<b>Stanzen von thermogeformten Teilen</b>	<b>283</b>
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
<b>19</b>	<b>Dekoration im Thermoformen .....</b>	<b>320</b>
19.1	Bilder .....	324
<b>20</b>	<b>Deformation von thermogeformten Teilen .....</b>	<b>333</b>
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
<b>21</b>	<b>Thermoformwerkzeuge .....</b>	<b>341</b>
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
<b>22</b>	<b>Temperieren von Thermoformwerkzeugen .....</b>	<b>415</b>
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
<b>23</b>	<b>Energieverbrauch des Thermoformens .....</b>	<b>443</b>
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

<b>24</b>	<b>Fehler im Thermoformen</b>	<b>469</b>
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
<b>25</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>495</b>
25.1	Weiterführende Fachliteratur	495
<b>Index</b>		<b>497</b>