

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-, 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
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	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
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 Plattenmaschinen	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 Spannrands 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 kührende 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