

HANSER



Leseprobe

zu

„Blasformen“

von Michael Thielen et al.

ISBN: 978-3-446-45552-8

E-Book-ISBN: 978-3-446-45856-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45552-8>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhalt

Vorwort	XI
Die Autoren	XIII
Verzeichnisse: Kurzzeichen, Abkürzungen und Formelzeichen	XV
1 Einführung	1
1.1 Hohlkörper aus Kunststoff – wozu?	1
1.2 Verfahren zur Herstellung von Hohlkörpern aus Kunststoff	1
1.2.1 Thermoplaste	1
1.2.2 Duroplaste	2
1.3 Anwendungsbereiche für blasgeformte Hohlkörper	3
1.4 Historie des Blasformens von Hohlkörpern	7
1.4.1 Entwicklung der PET-Streckblastechnologie	13
2 Extrusionsblasformen	15
2.1 Prozessablauf beim Extrusionsblasformen	15
2.2 Rohstoffe	17
2.2.1 Kunststoffe	17
2.2.2 Kunststoffe für das Extrusionsblasformen	22
2.3 Maschinentechnik	24
2.3.1 Grundsätzlicher Aufbau einer Blasformmaschine	24
2.3.2 Extruder und Schnecken	25
2.3.2.1 Glattrohrextruder	26
2.3.2.2 Nutbuchsen-Extruder	27
2.3.2.3 Gravimetrische Durchsatzregelung	31
2.3.3 Schlauchköpfe	33
2.3.3.1 Stegdornhalterköpfe	33
2.3.3.2 Pinolenköpfe	36
2.3.3.2.1 Wendelverteilerköpfe	38
2.3.4 Kontinuierliche/diskontinuierliche Extrusion	39
2.3.5 Wanddickensteuerung	43
2.3.5.1 Schwellverhalten des Vorformlings	44
2.3.6 Systeme zur Beeinflussung der radialen Wandverteilung	46
2.3.6.1 Warum radiale Wanddickensteuerung?	46
2.3.6.2 Statisch flexibler Düsenring (SFDR®)	47

2.3.6.3	Partielle Wanddickensteuerung (PWDS®)	48
2.3.6.4	Wanddicken-Lagen-Steuerung	53
2.3.7	Schließeinheiten	56
2.3.8	Steuerungen	62
2.3.8.1	IPC-Steuerung (Industrie-PC)	64
2.3.9	Kühlung	65
2.3.9.1	Schwindung und Verzug	65
2.3.10	Luft	68
2.3.11	Einzel-/Mehrfach-Kopf-Anlagen	69
2.3.11.1	Langhubmaschinen	71
2.3.12	Ein-/Doppelstationen-Maschinen	71
2.3.12.1	Kombinationen der beiden Prinzipien	72
2.3.13	Blasräder	73
2.4	Blasformwerkzeuge	76
2.4.1	Formaufbau	76
2.4.1.1	Prototyp-Formen in Gießharzaufbau	76
2.4.1.2	Prototyp-Formen mit Metalloberfläche und Gießharzhinterfütterung	76
2.4.1.3	Gegossene Prototyp-Formen aus Metallguss	77
2.4.1.4	Prototyp-Formen aus Aluminium	77
2.4.1.5	Produktionsformen	78
2.4.2	Gestaltungsrichtlinien	80
2.4.2.1	Blasformführung	80
2.4.2.2	Schneidkanten	80
2.4.2.3	Formabstützung	82
2.4.2.4	Formentlüftung	83
2.4.3	Blasformkühlung	85
2.4.3.1	Gebohrte Kühlung	86
2.4.3.2	Gefräste Kühlung	86
2.4.3.3	Eingegossene Rohrkühlung	86
2.4.4	Blasformzubehör	88
2.4.4.1	Masken	88
2.4.4.2	Spreizdorne	88
2.4.4.3	Blasdorn	89
2.4.4.4	Kalibrierdorn und Kalibrierblasdorn	90
2.4.4.5	Blasnadel	91
2.4.4.6	Schlauchschießvorrichtung	92
2.4.4.7	Abstreiferplatte	93
2.4.4.8	Kopfwerkzeug (Düse und Kern)	93
2.4.4.9	Einrichtbuchse	93
2.4.5	Prozessintegrierte Folgeverfahren	94
2.4.5.1	Nachkühlen mit einer Nachkühlform	94
2.4.5.2	Komplettbearbeitung in der Blasformmaschine	95
2.4.6	Spritzblas- und Tauchblasformen	97
2.4.7	Rechnereinsatz beim Blasformenbau	97

2.5	Folgeeinrichtungen, Peripherie, „Turnkey“	99
2.5.1	Kühlaggregate	100
2.5.2	Kompressoren	101
2.5.3	Trockner	101
2.5.4	Entbutzen	102
2.5.5	Schneidmühlen	102
2.5.6	Material-Handling	104
2.5.7	Nachkühlung	105
2.5.8	Dichtigkeitsprüfung	106
2.5.9	Füllen	107
2.5.10	Verschließen	107
2.5.11	Etikettieren	108
2.5.12	Bedrucken	108
2.5.13	Verpackung	108
2.5.14	Weitere Peripheriegeräte	108
2.6	Spezielle Verfahrensvarianten	109
2.6.1	Mehrschicht-(Multilayer)/Coextrusionsblasformen	109
2.6.1.1	Coextrusion mit Barrierschicht	110
2.6.1.2	Maschinentechnologie für Mehrschicht/Coextrusion	110
2.6.1.3	Kunststoffkraftstoffbehälter	111
2.6.2	Sheet-Forming zur Herstellung von Kraftstofftanks	116
2.6.3	3D-Blasformen	117
2.6.3.1	Unterschiedliche Maschinentechnologien	119
2.6.3.2	3D-Blasformen und Coextrusion mit Barrierschicht	125
2.6.3.3	Radiale Wanddickensteuerung	125
2.6.4	Sequenzielle Coextrusion	126
2.6.4.1	Verfahrenstechnik der sequenziellen Coextrusion	128
2.6.4.2	Maschinentechnik der sequenziellen Coextrusion	129
2.6.4.3	Produktionsziel: stabile Verarbeitungsbedingungen	130
2.6.5	Extrusionsblasformen von Wasserflaschen aus Polycarbonat	131
2.6.5.1	PC bietet Vorteile	132
2.6.5.2	Maschinentechnologie für PC-Wasserflaschen	133
2.6.6	In-Mould-Labeling	134
2.6.7	Sichtstreifenausrüstung	136
2.6.8	In-Mould-Decoration	137
2.6.9	Blow-Moulding-Foam-Technology (BFT)	138
2.6.10	Mucell	140
2.6.11	Blasformen von faserverstärkten Thermoplasten	141
2.6.12	Bottlepack-Verfahren	142
3	Streckblasformen	149
3.1	Einführung	149
3.1.1	Anforderungen aus dem Verpackungsmarkt	151
3.1.1.1	Geometrische Anforderungen	152
3.1.1.2	Physikalische Anforderungen	152
3.1.1.3	Chemische Anforderungen	152

3.1.1.4	Mikrobiologische Anforderungen	153
3.1.1.5	Ästhetische Anforderungen	153
3.2	Der Rohstoff PET	154
3.2.1	Synthese von PET	154
3.2.2	Materialeigenschaften von PET	155
3.2.2.1	Die Viskosität des Materials	157
3.2.2.2	Der Comonomer-Anteil	157
3.2.2.3	Die Feuchtigkeit des PET	158
3.2.2.4	Thermische Eigenschaften	158
3.2.2.5	Acetaldehyd-Gehalt	160
3.3	Grundlagen der PET-Streckblastechnik	161
3.3.1	Allgemeines	162
3.3.2	Spritzgießen von PET (Preforms)	164
3.3.3	Grundlagen der Herstellung von PET-Flaschen	166
3.3.3.1	Aufheizprozess	167
3.3.3.2	Verstreckprozess	169
3.4	Zweistufen-Streckblastechnik	170
3.4.1	Prozessablauf beim zweistufigen Streckblasprozess	170
3.4.1.1	Aufheizprozess	172
3.4.2	Maschinentechnik für den zweistufigen Streckblasprozess	175
3.4.2.1	Linearmaschinen	177
3.4.2.2	Rundläufermaschinen	178
3.4.3	Peripherieaggregate für die Produktion	183
3.4.3.1	Kompressoren	183
3.4.3.2	Kühler	185
3.4.3.3	Inspektionssysteme	186
3.5	Einstufen-Streckblastechnik	189
3.5.1	Einsatzgebiete für Einstufenmaschinen	189
3.5.2	Verfahrensvarianten	189
3.5.2.1	Drei-Stationen-Prinzip	190
3.5.2.2	Vier-Stationen-Prinzip	190
3.5.2.3	Optimierte Nutzung der Ausstoßleistung von Spritzgieß- und Blaskavitäten	191
3.5.2.4	Stark ovale Behälter	193
3.5.3	Spritzgießen der Preforms	193
3.5.4	Der Wärmehaushalt im Preform	195
3.5.5	Handgriffe	196
3.6	Prozesstechnologie für den PET-Verpackungsmarkt	197
3.6.1	Der Relaxationsprozess	197
3.6.2	Der Prozess für heißabfüllbare PET-Flaschen	198
3.6.2.1	Pasteurisierbare PET-Flaschen	206
3.6.3	Herstellung ovaler und flachovaler PET-Flaschen	206
3.7	Barrieretechnologien für PET-Flaschen	209

4	Andere Blasformverfahren	215
4.1	„Reciprocating-Screw“-Maschinen	215
4.2	Spritzblasformen	215
4.2.1	Pressblower-Prozess	219
4.3	Tauchblasen	220
5	Produktentwicklung	223
5.1	Produkterprobung und Prüfung	224
5.2	Blasformgerechtes Konstruieren	225
5.3	CAE, Simulationsverfahren: Prozess- und Produkt-Simulation	229
5.4	Produktentwicklung beim Extrusionsblasformen	231
5.5	Machbarkeitsanalyse Sandkasten	233
5.6	Berechnung Berstinnendruck eines Scheibenwischwasserbehälters	234
5.7	Produktentwicklung beim Streckblasformen	237
5.7.1	Der passende Preform	237
5.7.2	Produktentwicklung PET-Flaschen	241
5.7.2.1	Der Entwicklungsprozess mit seinen Randbedingungen	241
5.7.2.2	Werkzeuge der Designentwicklung	249
5.7.2.3	Auslegung spezieller Flaschen	253
5.7.2.4	Herstellen von Musterflaschen	257
5.7.2.5	Testen der Musterflaschen	258
6	Der Blasformbetrieb	269
6.1	Der Extrusionsblasformbetrieb	269
6.1.1	Von der Idee zum Produkt	269
6.1.2	Umrüsten	275
6.1.3	Layout eines Blasformprozesses	279
6.2	Der PET-Blasformbetrieb	280
6.3	Qualitätsmanagement, Umweltmanagement und Arbeitsschutz	285
6.3.1	Qualität	285
6.3.2	Qualitätsmanagement	286
7	Recycling	291
7.1	Recycling in der Extrusionblasformtechnik	291
7.1.1	Mögliche Strategien der Verarbeitung von Mahlgut	292
7.1.2	Schichtaufbauten bei Blasformteilen mit Rezyklat	293
7.1.3	Recycling in der Sechs-Schicht-Coextrusion	295
7.1.4	Aufbereitung des Materials	296
7.1.5	Materialförderung, Dosierung und Plastifizierung	296
7.1.6	Massedurchsatz	298
7.1.7	Vermeiden von Fehlstellen	300
7.1.8	Schlauchkopf, Blasformwerkzeug und Blasformprozess	300
7.2	Recycling von PET	301

8 Anhang: Trouble-Shooting-Guide Extrusionsblasformen	309
8.1 Fehler am Vorformling	309
8.2 Fehler am Blasformteil	311
Register	313

Vorwort

Das positive Feedback nach Erscheinen der ersten Auflage vor nunmehr 13 Jahren hat gezeigt, dass es einen Bedarf für das erste deutschsprachige Blasformbuch gab und gibt. Nun bleibt die Zeit nicht stehen, sodass die vorliegende zweite Auflage den Fortschritten der Technik Rechnung trägt und an vielen Stellen aktualisiert und ergänzt wurde. Sicher sind diese Fortschritte nicht so gravierend wie in anderen Bereichen der Kunststofftechnik oder anderen Industrien, aber es hat sich hier und da dennoch einiges getan, was in diesem Buch berücksichtigt wird.

Wir bedanken uns bei Dr. Klaus Hartwig, der das Kapitel „Streckblasformen“ der ersten Auflage geschrieben, an der Neuauflage aber nicht mehr mitgewirkt hat. Insofern sind wir dankbar, dass wir mit Jochen Forsthövel und Dr. Thomas Friedlaende sowie deren Kollegen auf das umfassende Fachwissen der Krones AG zurückgreifen konnten. Wir danken Markus Holbach, Jürgen Moitzheim, Dieter Rothe, Dieter Hülle und Achim Trübner der Kautex Maschinenbau GmbH für die kritische Durchsicht und viele Hinweise, Anregungen, Korrekturen und Ergänzungen im Bereich der Extrusionsblasformtechnik. Daniel Leiss (Werkzeugbau Leiss GmbH) sind wir dankbar für die Überarbeitung des Kapitels zum Werkzeugbau. Ebenso danken wir Wolfgang Bonerath und Werner Metternich (Kunststoff-Maschinen Service GmbH), Günther Kappen und Max Feuerherm (Ingenieurbüro Harald Feuerherm) und Sam Dix (Trexel) für wertvolle Hinweise und Ergänzungen. Allen Beteiligten sind wir auch für das aktuelle Bildmaterial dankbar.

Da die Zeit auch in Zukunft nicht stehen bleiben wird, freuen wir uns nach wie vor über Anregungen und Verbesserungsvorschläge.

Michael Thielen und Peter Gust, Oktober 2019

Die Autoren

Michael Thielen

Dr.-Ing. Michael Thielen ist PR-Berater, Textdienstleister sowie Gründer und Herausgeber der Fachzeitschrift „bioplastics MAGAZINE“. Der Maschinenbauingenieur hat an der RWTH Aachen die Fachrichtung Kunststofftechnik studiert und dort auch promoviert. Nach mehreren Jahren in verschiedenen Vertriebs- und Kommunikations-Aufgaben - unter anderem im Krupp Forschungsinstitut, bei Krupp Kautex Maschinenbau und SIG Plastics International - machte er sich 2003 als Berater und Publizist selbstständig. Er hat mehrere Bücher zur Blasformtechnik und zu Biokunststoffen geschrieben und in zahlreichen Vorträgen, Gastvorlesungen und Lehraufträgen an Fachhochschulen im In- und Ausland kunststofftechnisches Wissen vermittelt.



Peter Gust

Univ.-Prof.Dr.-Ing. Peter Gust ist Lehrstuhlinhaber der Konstruktionslehre an der Bergischen Universität Wuppertal. Nachdem er als Bereichsleiter F&E des Technologiezentrums Kunststoff der Dr. Reinold Hagen Stiftung und als Bereichsleiter in der Automobilzulieferindustrie tätig war, vertritt er seit 2009 die Konstruktionslehre im Maschinenbau an der Bergischen Universität Wuppertal. Im Rahmen seiner Promotion hat er sich vertieft mit der Prozess-Simulation des Extrusionsblasformens befasst. Ergänzend ist er als Qualitätsmanager nach DGQ und EOQ ausgebildet.



Klaus Hartwig

Dr.-Ing. Klaus Hartwig leitet das globale Innovations-Zentrum für nasse Tiernahrung bei Mars Petcare. Nach seiner Promotion an der RWTH Aachen hat er bei der KHS Corpoplast (damals Krupp/SIG) zunächst die Verpackungs-, Prozess- und Formenentwicklung und später den Geschäftsbereich Plasmabeschichtung geleitet. Anschließend war er in der Entwicklung bei Nestlé Waters in unterschiedlichen Rollen tätig bevor er zunächst das zentrale Entwicklungszentrum und später die weltweite Entwicklung für die Gruppe führte.



1

Einführung

■ 1.1 Hohlkörper aus Kunststoff – wozu?

Hohlkörper aus Kunststoffen findet man heutzutage nahezu überall. Sie finden Verwendung in der Verpackung, Lagerung, beim Transport oder bei der Führung von Flüssigkeiten oder Schüttgütern. Derartige Kunststoffhohlkörper sind beispielsweise Flaschen, Kanister, Fässer, Tanks, aber auch Rohre oder Schläuche. Bei speziellen Verpackungsgegenständen für empfindliche Güter, wie beispielsweise elektronisches Equipment, bieten Kunststoffhohlkörper den Verpackungsgütern eine besondere Schutzfunktion. Auf Grund der doppelwandigen Struktur können stabile und dennoch leichte Strukturkomponenten hergestellt werden, beispielsweise Transportpaletten, Strukturteile in Fahrzeugsitzen oder die unterschiedlichsten Arten von tafel- oder plattenartigen Bauteilen. Kunststoffhohlkörper finden sich aber auch im Spiel- und Sportbereich, bei Deko-Objekten (Deko-Früchte oder Tiere) und einer Fülle weiterer Anwendungsgebiete.

■ 1.2 Verfahren zur Herstellung von Hohlkörpern aus Kunststoff

1.2.1 Thermoplaste

Zur Herstellung von Kunststoffhohlkörpern gibt es eine ganze Reihe unterschiedlicher Verarbeitungsverfahren. Hohlkörper aus Thermoplasten können beispielsweise hergestellt werden durch:

- *Spritzgießen* von zwei Halbschalen, die dann in einem zweiten Arbeitsschritt durch Schweißen, Kleben, Clipsen, Schrauben o.ä. zu einem Hohlkörper zusammengefügt werden.
- *Schmelzkerntechnik*; dieses Verfahren verwendet einen Kern aus einer niedrig schmelzenden (beispielsweise Zinn-Wismut-)Legierung, der mit thermoplastischem Kunststoff umspritzt und anschließend bei relativ niedrigen Temperaturen durch

ein Induktionsverfahren aus dem Spritzgussteil wieder ausgeschmolzen werden kann. Auf diese Weise lassen sich anspruchsvolle Rohrleitungen mit exzellenten Innenoberflächen und komplexer Innengeometrie, hauptsächlich für die Automobilindustrie herstellen. Die Zinn-Wismut-Legierung kann nach dem Ausschmelzen erneut verwendet werden.

- *Rotationsformen*; für dickwandige Anwendungen in geringen Stückzahlen, beispielsweise große Mülltonnen, Boote (Kajaks) oder spezielle Tanks, aber auch für dekorative Objekte wie künstliche Tiere.
- *Drehen oder Fräsen aus dem Vollen*; dieses ist, zumindest theoretisch, eine Möglichkeit, Hohlkörper aus speziellen Thermoplasten herzustellen, die sich anders nicht oder nur schwierig verarbeiten lassen (zum Beispiel PTFE).
- *Extrusion*; Rohre und Schläuche, solange sie gerade sind und einen konstanten Durchmesser und konstante Wanddicke aufweisen, sind extrudierte Kunststoff-hohlkörper.
- *Faserwickeln*; mit Endlos-Faser verstärkte thermoplastische Bändchenhalbzeuge können in einem speziellen Wickelverfahren zu anspruchsvollen Strukturkomponenten verarbeitet werden.
- *Twin-Sheet-Forming*; zwei spezielle Breitschlitzdüsen produzieren zwei Schmelze-„Felle“ beispielweise in unterschiedlichen Farben. Es kommen aber auch tafelförmige, wieder erwärmte Halbzeuge zum Einsatz. Durch Schließen einer zweiteiligen Form werden die beiden Tafeln (Folien, „Felle“) miteinander verschweißt und schließlich zu einem Hohlkörper aufgeblasen [1].
- *Blasformen*; Gegenstand dieses Buches, ist eine Familie von Verfahren, die es ermöglicht, eine große Bandbreite thermoplastischer Hohlkörper in hohen Ausstoßleistungen zu produzieren.

1.2.2 Duroplaste

Der Vollständigkeit halber soll erwähnt werden, dass auch duroplastische Harze zu Hohlkörpern verarbeitet werden können. Duroplaste finden in der Regel Anwendung für technische Bauteile, große Tanks oder Silos. Sie werden häufig mit Glasfasern, Kohlenstofffasern oder anderen Verstärkungsfasern verstärkt. Es kommen Verfahren wie das Faser-Harz-Sprühen auf einen Kern, Faserwickelverfahren und das Handlaminieren als die am häufigsten verwendeten Verfahren zum Einsatz. In einem Anwendungsbeispiel werden extrusionsblasgeformte Innenbehälter (sog. Liner) aus PE-HD mit Glasfasern und ungesättigtem Polyesterharz umwickelt. Die so erzeugten druckfesten Behälter werden dann in einen spritzgegossenen Außenbehälter eingefügt und am Markt als leichtgewichtige Flüssiggasbehälter angeboten.

■ 1.3 Anwendungsbereiche für blasgeformte Hohlkörper

Durch Blasformen werden Hohlkörper aus thermoplastischen Kunststoffen mit nahezu beliebiger Geometrie gefertigt. Das sind zum Beispiel pharmazeutische Verpackungen mit Inhalten unter einem Milliliter und technische Artikel (z. B. Kunststoff-Kraftstoff-Behälter (KKB), Luftführungen im Kfz oder Öltanks) mit bis zu 10 000 l Fassungsvermögen. Die am häufigsten eingesetzten Verfahren sind das Extrusionsblasformen und das Streckblasformen, auf die in diesem Buch detailliert eingegangen wird. Während durch Streckblasformen nahezu ausschließlich Flaschen aus PET (seltener auch PEN oder PVC, neuerdings auch PLA) in hohen Stückzahlen hergestellt werden, ist das Spektrum für extrusionsblasgeformte Hohlkörper ungleich größer.

Typische Extrusionsblasteile sind Transport-, Verpackungs- und Lagerbehälter, wie Flaschen (Bild 1.1 und Bild 1.2), Dosen, Tuben, Kanister (Bild 1.3), Fässer und Lager tanks zum Beispiel für Heizöl und Chemikalien (Bild 1.4), IBC (Intermediate Bulk Container, Bild 1.5) und faltbare, thermisch isolierende Transportboxen, z. B. mit Drainagerinnen im Boden für gefrosteten Fisch. Letztere lassen sich nach Gebrauch platzsparend flachlegen und im Mehrwegsystem wiederverwenden.



Bild 1.1 Extrusionsblasgeformte Flaschen (Bild: Kautex Maschinenbau)



Bild 1.2 Extrusionsblasgeformte PC-Wasserflaschen (Bild: Kautex Maschinenbau)



Bild 1.3 Extrusionsblasgeformte Kanister (Bild: Kautex Maschinenbau)



Bild 1.4 Extrusionsblasgeformte industrielle Großverpackungen (Fässer und Lagertanks) (Bild: Kautex Maschinenbau)



Bild 1.5 Extrusionsblasgeformter Intermediate Bulk Container (IBC)
(Bild: Kautex Maschinenbau)



Bild 1.6 Extrusionsblasgeformter Kunststoffkraftstoffbehälter (KKB) (Bild: Kautex Maschinenbau)

Eine wachsende Bedeutung haben auch technische Blasformteile für Kraftfahrzeuge, wie Kunststoff-Kraftstoffbehälter (Bild 1.6), Kraftstoff-Einfüllrohre, Öl- und Wasserbehälter, Ausgleichbehälter, Spoiler, Stoßfängerträger, Kopfstützen, Armaturentafeln, Kindersitze, Faltenbälge sowie Luftführungskanäle, Ansaugleitungen und weitere Rohrleitungen im Innen- und Motorraum (Bild 1.7).

Für die Hausgeräte- und Elektronikindustrie werden unterschiedlichste Teile, wie Sprüharme für Geschirrspüler, Gerätetüren und -wände für Waschmaschinen und Computer (Bild 1.8), Entsalzergehäuse, Kondensationstrocknerbehälter, Staubsaugergehäuse- und -Auffangbehälter, Boilergehäuse, Wasserführungsteile, Fußbodenheizungselemente, Sitzschalen und Tanks für Rasenmäher etc. nach dem Extrusionsblasformverfahren gefertigt. Hinzu kommen Blasformteile für die Sport- und

Freizeitindustrie (Kajaks, Paddleboards, Ski-Boxen, Kühlboxen und -Akkus, Kleinkinderfahrzeuge, Teile für Kindertraktoren, Klettergerüste, Rutschen usw.), die Medizintechnik (z. B. Behälter für Blutdruckmessgeräte, Klistierbehälter, Infusionsflaschen, Augentropfenpipetten, Ampullen usw.) und Koffer für Werkzeuge, Videokassetten, Mikroskope, Nähmaschinen oder Laptops etc., meist mit integrierten Aufnahmevorrichtungen [2].



Bild 1.7 Extrusionsblasgeformte technische Teile (Bild: Kautex Maschinenbau)



Bild 1.8 Extrusionsblasgeformtes flaches Panel (Unterbodenverkleidung) (Bild: Kautex Maschinenbau)

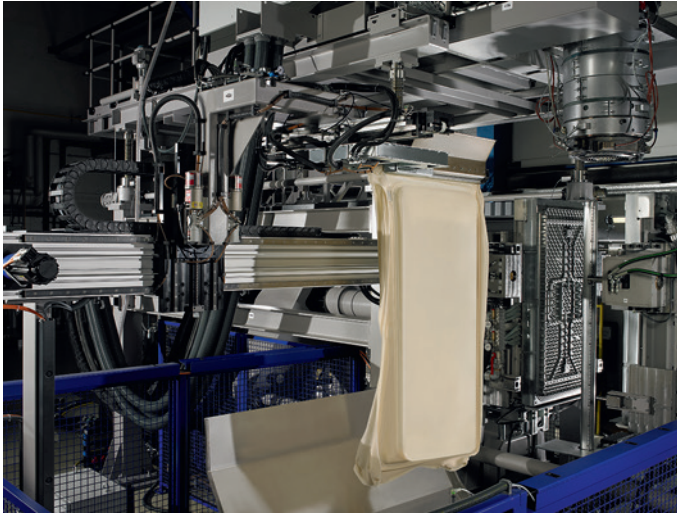


Bild 1.9 Extrusionsblasgeformtes flaches Panel (Tischplatte) (Bild: Kautex Maschinenbau)

■ 1.4 Historie des Blasformens von Hohlkörpern

[nach 10]

Das Herstellen von Hohlkörpern durch Aufblasen ist eine sehr alte Technik. Glas war der erste Werkstoff, der verblasen wurde. In Meyers Konversationslexikon sind Angaben über ein Relief in den Königgräbern von Ben Hassan zu finden, auf denen Glasbläser bei der Arbeit dargestellt sind. Das Relief ist auf 1800 v. Chr. datiert. Die älteste Glashütte wurde in Ägypten gefunden und ist ungefähr auf 1350 v. Chr. datiert. Der Entwicklungsprozess des Blasformens bis zum heutigen Stand erfolgte also in annähernd 4000 Jahren und ist noch nicht abgeschlossen.

Zum Glasblasen wird eine Glasmacherpfeife verwendet, die aus einem 100 bis 150 cm langen Eisenrohr besteht. Die Pfeife ist an einem Ende mit einem Mundstück und in der Mitte mit einem isolierten Griff versehen. Mit dieser Pfeife entnimmt der Glasmacher einen Posten Glas aus der Schmelze und bläst ihn zu einem Hohlkörper auf. Durch geschicktes Wiedererhitzen und ständiges Blasen und Rotieren kann eine große Blase erzielt werden. Diese wird durch Schwingen der Blase am Ende der Pfeife zu einem Zylinder geformt [3]. Wesentlicher Entwicklungsschritt des Glasblasens war die Verwendung von so genannten „Modeln“ – Hohlformen aus Holz. Durch diese Formen ist es möglich, größere Stückzahlen von Glasgefäßen der gleichen Gestalt und durch Einsatz mehrteiliger Modeln auch kompliziertere Geometrien zu fertigen.

Die Entwicklung der ägyptischen Kunst des Glasblasens bis zu den heute industriell eingesetzten Blasformtechniken zur Herstellung von Kunststoffhohlkörpern erfolgte im Wesentlichen angetrieben durch:

- die Markterfordernisse ökonomischer, aber auch ökologischer Art;
- die Entwicklung und wirtschaftliche Verfügbarkeit geeigneter Rohstoffe, die den Besonderheiten dieser Verarbeitungstechnik gerecht wurden und darüber hinaus neue Anwendungsbereiche erst erschlossen (z. B. im Bereich der Kunststoff-Kraftstoff-Behälter);
- die Fortschritte in den allgemeinen Maschinenbautechnologien.

In einer US-Patentschrift vom 24. Juni 1851 mit dem Titel „Improvement in Making Gutta-Percha Hollow Ware“ (Verbesserung in der Herstellung von Hohlkörpern aus Guttapercha¹) beschreibt S. T. Armstrong die Bildung eines rohrartigen Vorformlings, der durch Innendruck an eine Werkzeugwand geblasen wird [4]. Guttapercha ist ein Kautschukprodukt und wird aus dem Guttapercha-Baum gewonnen. Damit hatte die industriell genutzte Blasformtechnologie ihren Anfang genommen. Es folgten weitere Patente, die die Verarbeitung von Celluloid und Gummi zu vornehmlich technischen Artikeln und Spielzeug (Bild 1.10) beschreiben; so z. B. auch zu Weihachtsbaumkugeln, indem zwischen zwei Celluloidfolien Dampf eingeblasen wird, sodass diese erweichen und sich beim Zufahren der Form an die Kontur anlegen; die Folienränder werden hierbei verschweißt. Der Verarbeitung der damals verfügbaren Materialien waren allerdings Grenzen gesetzt. Bevor weitere Entwicklungen auf dem Gebiet der Verfahrenstechnik möglich waren, mussten neue Materialien gefunden werden, die die hohen Anforderungen an die Verarbeitbarkeit erfüllten.

Im Jahr 1835 gelang dem Chemiker Henri Viktor Regnault (1810 bis 1878) erstmals die Polymerisation von Vinylchlorid. Aber erst 1929 wurde ein Produktionsverfahren zur Herstellung von Polyvinylchlorid (PVC) durch die Firma I. G. Farben, Ludwigshafen entwickelt. 1939 wurden in Deutschland ca. 2000 t PVC produziert und auch exportiert [6]. Nach dem Zweiten Weltkrieg hatte die USA mit einer Produktion von 250 000 t PVC im Jahr 1959 Deutschland überholt.

Die Geschichte der Polyolefine begann am 27. März 1933 in den Laboratorien der ICI, als R. O. Gibson bei einer mit Ethylen und Benzaldehyd durchgeführten Reaktion (170 °C, 1400 bar) auf der Innenwandung des Autoklaven einen weißen, wachsartigen Belag entdeckte, der sich als Polyethylen erwies. Nach vielen Fehlschlägen führte erst im Dezember 1935 ein Versuch – und zwar nur dank eines undicht gewordenen Autoklaven – zur Gewinnung von 8 g Polyethylen. Die entwichene Ethylenmenge wurde durch frisches Ethylen ersetzt, das zufällig die zur Auslösung der Polymerisation richtige Sauerstoffmenge enthielt. Am 3. September 1939 lief eine

¹ Guttapercha (Guttapertja, von getah-pertcha = Milchsaft, schnellgerinnender Milchsaft von angeritzten Bäumen, z. B. *Palaquium gutta* oder Sapotaceae): thermoplastische Eigenschaften im Temperaturbereich unter 100 °C, auch vulkanisierbar ähnlich Kautschuk, chemische Formel $(C_5H_8)_n$ [4].

200 t/a-Anlage an. Dieser verlustarme Isolationswerkstoff spielte in der Radartechnik der Alliierten im Zweiten Weltkrieg eine entscheidende Rolle. Mit der Umstellung der amerikanischen Kriegsproduktion auf den zivilen Bedarf begann der einmalige Siegeszug des so genannten Hochdruckpolyethylens [7].



Bild 1.10 Babyrasseln aus Cellulosenitrat, ca. 1890 [5]

Wenige Jahre danach erzielte die inzwischen weltweit betriebene Polyolefinchemie neue bahnbrechende Erfolge. Der Phillips Petroleum Comp., der Standard Oil of Indiana und K. Ziegler vom Max Planck Institut für Kohleforschung in Essen-Mühlheim gelangen 1953 in kurzem zeitlichen Abstand die Niederdruckpolymerisation von Ethylen. G. Natta, Mailand, fand auf der Grundlage der Zieglerschen Arbeiten Wege, auch die höheren α -Olefine zu polymerisieren und durch die Wahl spezifisch wirkender Katalysatoren und entsprechender Prozessführung die sog. stereoregulierte Polymerisation von Propylen und Buten-1 durchzuführen. ICI ergänzte im Jahre 1967 das Sortiment durch das transparente Poly-4-methylpenten-1, das heute nur noch in Japan hergestellt wird.

Im Jahr 1977 berichtet die Union Carbide Corp. (UCC), dass es ihr gelungen sei, nach ihrem für PE-HD entwickelten Gasphasen-Verfahren auch ein lineares Niederdruckpolyethylen (PE-LLD) herstellen zu können. Damit gewann eine bereits seit Mitte der 1960er Jahre (DuPont Canada Sclair) und 1970 (Philips) bekannte, jedoch wenig beachtete neue PE-Produktfamilie weltweit das Interesse von Forschung und Entwicklung.

Die Weiterentwicklung des Blasformens erfolgte erst, nachdem in den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts neue Materialien zur Verfügung standen. Die Glasindustrie der USA begann, Behälter und Verpackungen aus PVC zu fertigen. Die neuen Behälter waren weniger zerbrechlich als Glas, und die US-Glasindustrie schaffte es, dass sich bis nach dem Ende des Zweiten Weltkrieges keine externe Konkurrenz auf dem Markt etablieren konnte [6]. In den Jahren von 1938 bis 1945 wurde eine Vielzahl von Patenten zum Blasformen vornehmlich von der amerikanischen Glasindustrie angemeldet. Bemerkenswert ist das US-Patent Nr. 2,260,750 mit dem Titel „Method of a Machine for Making Hollow Articles from Plastic“ von William H. Kopitke (Plax

Corp.), 1938. Es beschreibt die Herstellung eines Vorformlings und das Blasformen in erster Wärme. Für das US Army Medical Corps wurden zum erstenmal in den Jahren 1939 bis 1946 in einer industriellen Serienfertigung Kunststoffflaschen von der Firma Owens Illinois Glascorporation produziert [6]. Heute können die damals eingesetzten Verfahren dem Spritzblasen zugeordnet werden.

Die Entwicklung der Blasformtechnologie erfolgte in Europa gegen Ende der 40er Jahre und damit etwas später als in den USA. Dort lag die Entwicklung hauptsächlich in der Hand der Glasindustrie. Folglich basierten viele der neuen Techniken für die Verarbeitung der Kunststoffe auf den Techniken zur Verarbeitung von Glas. Um die Monopolstellung nicht zu gefährden, bildete die US-Glasindustrie eine in sich geschlossene Gruppe von „Kunststoffbläsern“. Somit verliefen die Entwicklungen in Europa völlig unabhängig von denen der USA. Es waren vornehmlich deutsche Ingenieure und Unternehmer, die sich als Pioniere der Blasformtechnik einen Namen machten. Hierzu zählten vor allem Protagonisten wie die Gebrüder Reinold und Norbert Hagen (Kautex Werke ab ca. 1948) (Bild 1.11), Stefan und Rainer Fischer (Fischer W. Müller ab ca. 1957), Gottfried und Horst Mehnert (Bekum ab ca. 1959), M. Rudolf (Rudolf) und Erhard Langecker (Battenfeld) [6].

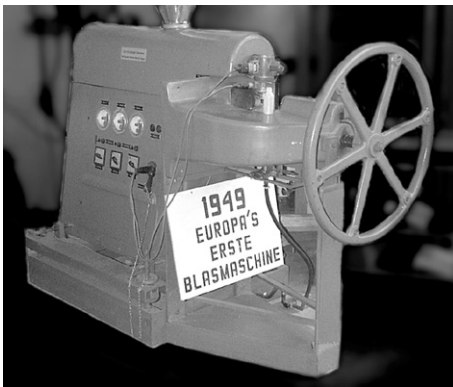


Bild 1.11 Europas erste Blasformmaschine (Bild: Kautex Maschinenbau)

Die Kautex Werke, die heute in das Unternehmen Kautex Maschinenbau GmbH und in den Kunststoffverarbeiter Kautex Textron GmbH & Co. KG übergegangen sind, waren seit ihrer Gründung in Bonn ansässig. Um 1955 überquerten die ersten Blasformautomaten der Firma Kautex den Atlantik und brachten Bewegung in die Entwicklungen in den USA [4].

Nicht weit von Bonn, in Troisdorf, ist eine Niederlassung des Dynamit Nobel-Konzerns [8]. Bereits Alfred Nobel experimentierte mit Ersatzstoffen für Kautschuk, Guttapercha und Leder auf der Basis von Nitrozellulose. Dies waren erste Ansätze zur modernen Kunststoffchemie und Kunststoffverarbeitung, die für Dynamit Nobel von besonderer Bedeutung werden sollten. 1905 produzierte das Werk Troisdorf den ersten technisch verwertbaren Kunststoff: Der Sprengstoff-Rohstoff Nitrocellu-

lose wurde zu Celluloid verarbeitet. 1923 kam die erste Spritzgießmasse der Welt auf den Markt. Die Herstellung von Kunststoff-Formteilen begann. 1930 nahm die „Rheinische Spritzguss-Werk GmbH“ (RSW) in Köln, auf die die jetzige Dynamit Nobel Kunststoff GmbH zurückgeht, die Produktion auf.

Durch die Entwicklungen bei Dynamit Nobel angeregt, konstruierten die Gebrüder Hagen die ersten Formteile aus Kunststoffplatten. Die Konstruktion war aus der Blechverarbeitung mit den Schritten Biegen und Schweißen abgeleitet. Um die Fertigung zu vereinfachen und wirtschaftlicher zu werden, entwickelten die Gebrüder Hagen 1949 die erste Extrusionsblasformmaschine, die es ermöglichte, Flaschen, Behälter und andere Hohlkörper aus Kunststoff herzustellen [9]. Merkmale der Maschine, wie z. B. die Anordnung des Blasdornes, sind noch heute in modernen Blasformmaschinen wiederzufinden. Ein Nachbau dieser Blasmuschine steht im Technikum der Dr. Reinold Hagen Stiftung, Bonn, die Dr. Reinold Hagen aus dem Erlös des Firmenverkaufs im Jahr 1988 gegründet hat. In den Folgejahren etablierten sich die blasgeformten Kunststoffverpackungen als bruchsicher und chemisch resistent. Durch Blasformen konnten wesentlich aufwändigere Geometrien erzeugt werden, als es in Metall bzw. Stahlblech möglich war [4]. Bis in die 60er Jahre wurde der größte Teil der Grundlagen, auf denen noch heute Markt und Technik für das Extrusionsblasformen aufbauen, erarbeitet [4]. Die in dieser Zeit entwickelten Verfahren und der aktuelle Stand der Technik werden im nächsten Kapitel zur Verfahrensbeschreibung des Extrusionsblasformens vorgestellt.

Einige Pioniere der Blasformtechnik sind:

- 1851: US-Patent 8,180
 - Sammlung T. Armstrong, New York, N. Y.
 - Improvement in Making Gutta-Percha Hollow Ware
- 1881: US-Patent Nr. 237,168
 - W. B. Carpenter
 - Process of, and Apparatus for, Molding Hollow Forms of Celluloid or Like Plastic Material (Bild 1.12)

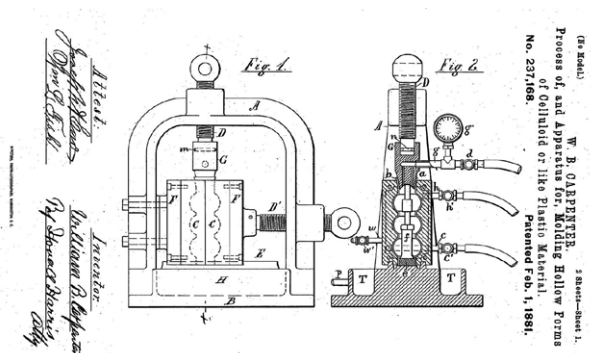


Bild 1.12 Auszug aus US Patent 237,168 (1881)

- 1913: US-Patent 1,052,081
 - E. Miltener
 - Manufacture of Handles of Plastics Material
- 1936: US-Patent 2,029,706
 - W.J. De Witt
 - Method and Apparatus for Hosiery Products
- 1940: US-Patent Nr. 2,222,461
 - W.J. De Witt
 - Hosiery Form
- 1941: US-Patent 2,260,750
 - W.H. Kopitke
 - Method of and Machine for Making Hollow Articles from Plastic
- 1942: US Patent Nr. 2,288,454
 - J.R. Hobson
 - Method of Forming Hollow Articles of Plastic Material
- 1942: US Patent Nr. 2,298,716
 - S.T. Moreland et. al.
 - Machine for Molding Thermoplastics

Eine (sicher unvollständige) Übersicht von deutschen Patent- und Gebrauchsmusterschriften gibt die folgende Liste:

- 1899: Deutsches Patent Nr. 112 770
 - Rheinische Gummi- und Celluloid Fabrik, Neckarau-Mannheim
 - Verfahren zur Herstellung geblasener Hohlkörper aus Celluloidröhren
- 1959: DE 971 333
 - Reinold und Norbert Hagen
 - Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Flaschen und ähnlichen mit einer Einfüllöffnung versehenen Hohlkörpern aus thermoplastischem Kunststoff
- 1959: DE 1 807 234
 - Gottfried Mehnert, Bekum, Gebrauchsmuster:
 - Vorrichtung zur Herstellung von Hohlkörpern aus thermoplastischem Kunststoff, wie Flaschen und anderen, mit einer Einfüllöffnung versehenen Behältern
- 1965: DE1038750
 - Reinold Hagen
 - Blasverfahren zur Herstellung von Flaschen und ähnlichen Hohlkörpern aus organischen thermoplastischen Kunststoffen sowie Vorrichtung zu deren Durchführung

- *1961*: DE1109353
 - Norbert Hagen
 - Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Flaschen und dgl. aus thermoplastischem Kunststoff
- *1965*: DE1187006
 - Gottfried Mehnert
 - Blasdüse zum Kalibrieren der aus Halsteil und Randlippe bestehenden von im Blasverfahren herzustellenden Hohlkörpern aus thermoplastischen Kunststoffen
- *1968*: DE1130151
 - Norbert Hagen
 - Verfahren beim Herstellen von Hohlkörpern, wie Flaschen aus thermoplastischem Kunststoff und Hohlform zur Durchführung desselben

1.4.1 Entwicklung der PET-Streckblastechnologie

Bei dem englischen Rohstoffhersteller ICI wurde im Jahre 1941 die gute Eignung des PET zum Herstellen und Verstrecken von Fasern für die Textilindustrie entdeckt und bis in die 50er Jahre weiterentwickelt. Seitdem ist der Verbrauch von PET als Rohstoff für die Textilindustrie bis heute auf über 29 Millionen Jahrestonnen gewachsen.

Von ca. 1960 an wurde die Verarbeitung von PET zu Folien und das biaxiale Verstrecken dieser Folien für die Verpackungsindustrie entwickelt. Dabei wurde festgestellt, dass die Eigenschaften der Folien durch sequentielles Verstrecken in der Längs- und anschließend der Querrichtung wesentlich verbessert werden konnten. So zeigten biaxial verstreckte Folien hervorragende mechanische Eigenschaften und eine sehr geringe Gas-Durchlässigkeit auf.

Gleichzeitig begann in den 60er Jahren der Hamburger Maschinenbauer Heidenreich & Harbeck (Vorgänger der heutigen SIG Corpoplast) mit der Entwicklung einer Hochleistungsblasmaschine zum Streckblasformen von Flaschen aus PVC für Bier.

Die Herstellung von Flaschen aus PET wurde dann in den frühen 70er Jahren bei Du Pont in den USA entwickelt und 1973 zum Patent angemeldet [11]. Wirtschaftliche Bedeutung erlangte es erst ca. 10 Jahre später in den 80er Jahren in der Getränkeindustrie. Bis zu dieser Zeit wurden kohlenensäurehaltige Erfrischungsgetränke in Glasflaschen und Dosen abgefüllt und vertrieben. Beide Materialien eignen sich aufgrund ihres spezifischen Gewichtes und der Bruchgefahr beim Glas nicht für großvolumige Behälter mit einem Volumen von über einem Liter. Durch die Verwendung von PET als Rohstoff konnten erstmals Erfrischungsgetränke in Flaschen mit einem Volumen von 2,0 l vermarktet werden. Der Erfolg des PET bei großen Volu-

men hat dann zur Substitution anderer Verpackungsmaterialien geführt. So betrug beispielsweise das mittlere Volumen von PET-Flaschen 1990 noch mehr als 1,5 l und ist bis 2004 auf unter 0,8 l gesunken. Im gleichen Zeitraum ist der Verbrauch von PET zur Herstellung von Flaschen um den Faktor 30 gestiegen und beträgt heute mehr als 14 Millionen Tonnen pro Jahr.

In 2018 wurden über 40% aller Erfrischungsgetränke und über 70% des stillen und karbonisierten Wassers in PET abgefüllt. Mit den Saft- und Fruchtsaft-, den Sport- und Energie- sowie den Tee- und Kaffeegetränken füllt die Getränkeindustrie heute über 450 Milliarden Liter in PET ab. Der Anteil des PET am gesamten Verpackungsmix für die Abfüllung von Getränken lag damit in 2008 bei fast 50% und wächst kontinuierlich [12]. Typische Liniengeschwindigkeiten in der abfüllenden Industrie betragen heute 300 bis 1000 Flaschen pro Minute.

Literatur zu Kapitel 1

- [1] *Illig, A.*: Thermoformen in der Praxis, Hanser, 1997
- [2] *Ast W.*: in: *Johannaber F.*: Kunststoffmaschinenführer, 4. Ausgabe, Hanser, 2004
- [3] Internetzugriff am 5.7.2019, <http://www.mc-bailleux.ch/glasgeschichte.htm>
- [4] *Holzmann R.*: Die Entwicklung der Blasformtechnik von ihren Anfängen bis heute, *Kunststoffe* 69(1979)10, S. 704 (urspr. Quelle dort nicht näher verzeichnet)
- [5] *DuBois, J. H.*: *Plastics History U.S.A.*, Cahners Pub. Co., Boston, 1972
- [6] *Müller, A.*: Studien zur Prozesssimulation des Blasformens, unveröffentlichte Studienarbeit am Institut für Mechanik und Regelungstechnik der Universität-Gesamthochschule Siegen, 1998
- [7] *Dominghaus, H.*: *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*, 5. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1998
- [8] Internetzugriff am 23.12.1998, <http://www.dynamit-nobel.com/deutsch/nbsp/index.html>
- [9] Internetzugriff 28.12.1998, <http://www.labtops.de/catalogue/dt/28001dt.htm> (Link zum Stand 2019 nicht mehr verfügbar, aktuellere Quellen nicht bekannt.)
- [10] *Gust, P.*: Prozess-Simulation des Extrusionsblasformens von Kunststoffhohlkörpern, Dissertation an der Universität Siegen, 2001
- [11] *Wyeth, N.; Roseveare, R. N.*: Biaxially oriented Poly(ethylene Terephthalate) Bottle, U.S. Patent, 1973; V.-Nr.: 3 733 309
- [12] Fa. Krones, persönliche Information 2019

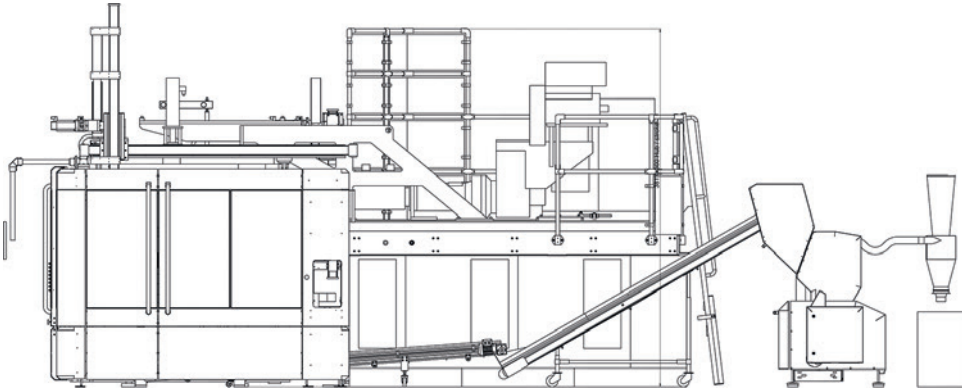


Bild 2.6 Grundsätzlicher Aufbau einer Extrusionsblasformmaschine (Bild: Kautex Maschinenbau)

2.3.2 Extruder und Schnecken

In Anlehnung an Wolfgang Löw [8]

Eine Blasformmaschine sollte im Hinblick auf die verschiedenen thermoplastischen Rohstoffe möglichst universell einsetzbar sein. Bezogen auf die am häufigsten eingesetzten Rohstoffe PE und PP ist dieser universelle Einsatz nicht mit allen Bauarten möglich; universell einsetzbar sind die Maschinen, die mit Nutbuchs-Extrudern ausgerüstet sind [8]. Generell werden in der Extrusionsblasformtechnik heute nahezu ausschließlich Einschneckenextruder eingesetzt.

An einen Extruder werden zahlreiche Forderungen gestellt [9]:

- problemloses Einziehen, Fördern und Verdichten des Materials,
- Verarbeitung von Neuware und Mahlgut (Verarbeitungsbandbreite),
- hohe Durchsätze bei ausreichender thermischer und stofflicher Homogenität,
- Erreichen und Einhalten einer optimalen Schmelztemperatur,
- möglichst geringe Veränderung der Materialeigenschaften durch Abbau,
- Abmischung verschiedener Komponenten und Additive,
- pulsationsfreier Betrieb,
- günstiges energetisches Betriebsverhalten,
- geringer Verschleiß an Schnecke und Zylinder.

Die verschiedenen quantitativen und qualitativen Zielgrößen können einander entgegenstehen. Daher sind Prioritäten zu definieren bzw. Kompromisse einzugehen. In Bezug auf Konstruktions-, Funktions- und Betriebsweise ist zu unterscheiden zwischen „konventionellen“ Glattrohretrudern und Nutbuchs-Extrudern [9].

2.3.2.1 Glattrohretruder

Die in anderen Ländern häufiger anzutreffenden Blasformmaschinen mit Glattrohr-Extrudern sind mehr oder minder auf die Verarbeitung von niedrig- bis mittelmolekularen Polyolefin-Typen beschränkt. Glattrohr-Extruder sind kostengünstiger als solche mit genuteter Einzugszone und zeigen geringeren Schneckenverschleiß. Die Energiebetriebskosten sind geringer, weil keine intensive Kühlung bzw. Temperierung der genuteten Einzugszone (s. u.) erforderlich ist. Glattrohr-Extruder (Länge $25 D$, an Blasformmaschinen seltener bis $30 D$) eignen sich durchaus für die universelle Verarbeitung von PE und PP bis zum Bereich von Rohstoffen mittleren Molekulargewichts, also niedriger bis mittlerer Schmelzeviskosität.

Sollen aber höherviskose, hochmolekulare PE- und PP-Typen verarbeitet werden, sinkt der Förderwirkungsgrad von Glattrohr-Extrudern für diese Rohstoffe meist ab; dies führt zu überhöhten Schmelzetemperaturen bei verringertem Durchsatz. Die hohen Temperaturen beeinträchtigen die Fertigungsqualität und machen die Produktion bestimmter Formteile oft unmöglich, da die Festigkeit der Schmelze stark reduziert ist. Dies hat eine unkontrollierbare Auslängung des Vorformlings zur Folge.

Glattrohr-Extruder sind also insbesondere für die Großserienfertigung von Kleinhohlkörpern aus nieder- und mittelmolekularen PP- und PE-Typen unter konstanten Extrusionsbedingungen geeignet. Antriebsseitig benötigt PP etwa die gleiche Energie wie PE, nämlich im Dauerbetrieb maximal $0,23$ bis $0,25$ kWh/kg. Beim Anfahren und bei Drehzahlsteigerungen können jedoch kurzzeitig Spitzenwerte auftreten, die etwa 25 bis 32% darüber liegen. Diese Werte beziehen sich auf die aufgenommene elektrische Wirkleistung des Antriebsmotors; Getriebe- und Drucklagerverluste sind also einbezogen. Liegen die Werte höher als angegeben, ist die Schnecke nicht optimal und leidet zu viel Scherenergie in die Schmelze, die dadurch übertemperiert wird.

Für Schneckenlängen von 25 bis $30 D$ empfiehlt sich für PP und PE der Einsatz von Dekompressionsschnecken mit üblicherweise zwei Mischteilen. Scherteile sollten vermieden werden. Als Beispiel ist in Bild 2.7 die Geometrie für eine Schnecke mit $D = 60$ mm und einer effektiven Länge von $25 D$ angegeben. Die Mischteile bestehen aus Ringen, die am Umfang acht Lücken mit je ungefähr $8,6$ mm Breite aufweisen und in die Austragszone integriert sind.

Die Maximaldrehzahl einer solchen Schnecke sollte etwa 82 bis 90 min^{-1} betragen. Je nach Material sollten etwa 80 bis 90% der Maximaldrehzahl genutzt werden. Bei normalem Gegendruck ($P_{\max} \sim 260$ bar) ist bei dieser Schnecke für PP zu erwarten, dass der Durchsatz (Q) pro Umdrehung (Q/n -Wert) für Drehzahlen $n > 50 \text{ min}^{-1}$ etwa $0,68$ bis $0,75$ kg pro Umdrehung pro Minute beträgt. Baut der Kopf höhere Gegendrucke auf, sinkt der Durchsatz dieses gegendruckempfindlichen Systems leicht um 10 bis 15% bei gleichzeitiger Erhöhung der Schmelzetemperatur.

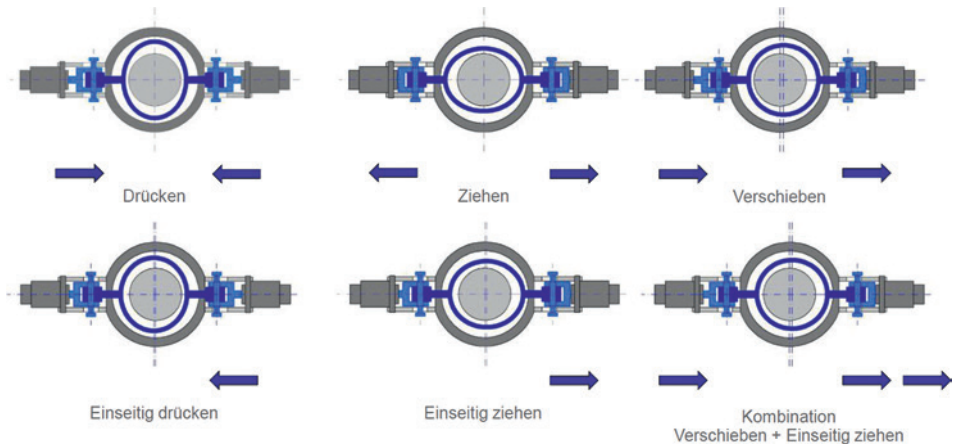


Bild 2.26 Beispielhafte Einstellungen der PWDS (Bild: Dr. Reinold Hagen Stiftung)

Eines der wichtigsten Anwendungsgebiete sind Kunststoffkraftstoffbehälter (KKB), die zum Teil sehr komplexe Formen aufweisen und aus Sicherheitsgründen und zur Materialeinsparung eine gleichmäßige Wanddickenverteilung aufweisen müssen. Bild 2.27 zeigt eine schematische Darstellung des prinzipiellen Verlaufs der Profilpunkte der Wanddickensteuerung und der zu den Verstellschrauben des SFDR korrespondierenden Längs- bzw. Recklinien bei einem KKB.

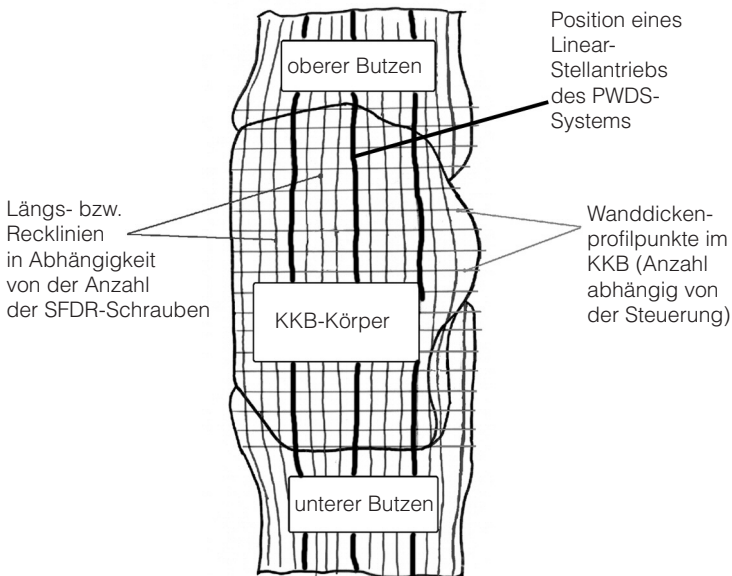


Bild 2.27 Schematische Darstellung der beeinflussbaren Profilpunkte bei einem KKB [16]

Auch industrielle Verpackungen wie Fässer oder IBCs sowie Kanister für den Gefahrguttransport (mit UN-Zulassung) werden mit PWDS hergestellt. Hier ist eine gleichmäßige Wanddickenverteilung im gesamten Blasformteil, insbesondere aber der Ausgleich des Wanddickenunterschiedes von dem Formtrennbereich und 90° hierzu (Bild 2.28 und Bild 2.29) besonders wichtig. Aufgrund des Flachlegens des Vorformlings beim Abquetschvorgang ist die Wandstärke des Artikels aufgrund des geringeren Reckweges im Bereich der Formtrennaht in der Regel dicker als in anderen Bereichen des Blasformteiles, wenn dies nicht durch den Einsatz von PWDS und SFDR entsprechend kompensiert wird (Bild 2.30). Bild 2.31 zeigt die durch Zusammenspiel von WDS, PWDS und SFDR erzeugten Düsenspaltweiten für den gesamten Vorformling eines L-Ring-Fasses [16].

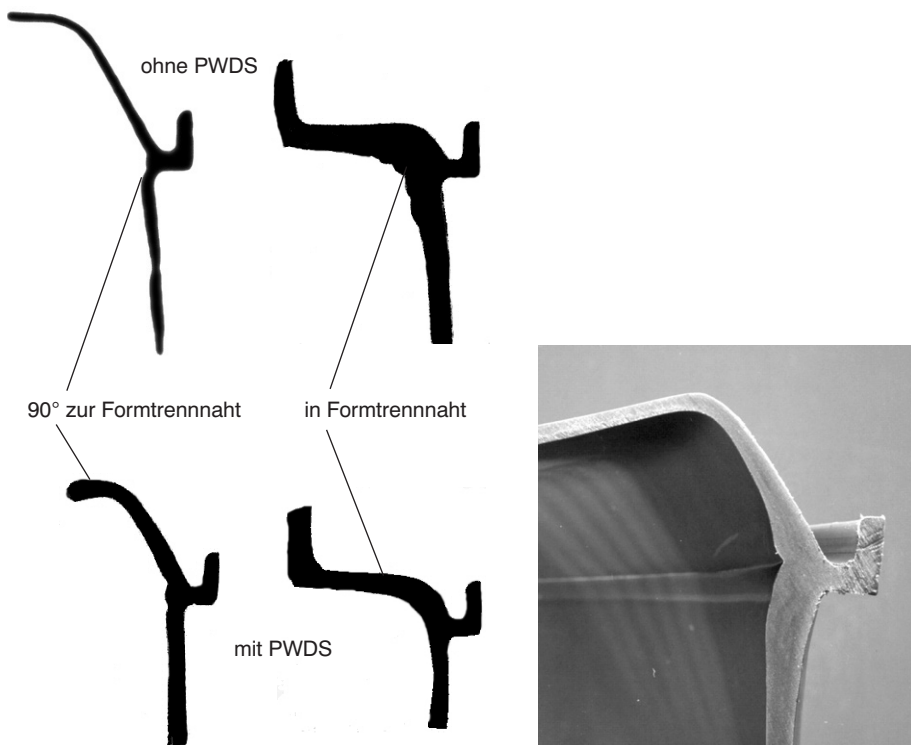


Bild 2.28 Wanddicken eines L-Ring-Fasses in der Formtrennaht und 90° dazu (Bild: Feuerherm)

position, so ist der Düsenring zentriert und die Wanddicke über den Vorformlingsumfang konstant. Mit Hilfe der beiden Hydraulikzylinder kann nun der Düsenring in jede beliebige Richtung verschoben werden, sodass sich ein exzentrischer Düsen-spalt einstellt. So kann die Wanddicke an jedem Punkt des Umfangs effektiv beeinflusst werden, und die Wanddicke des Blasformteils ist auch in Bogenbereichen gleichförmig.

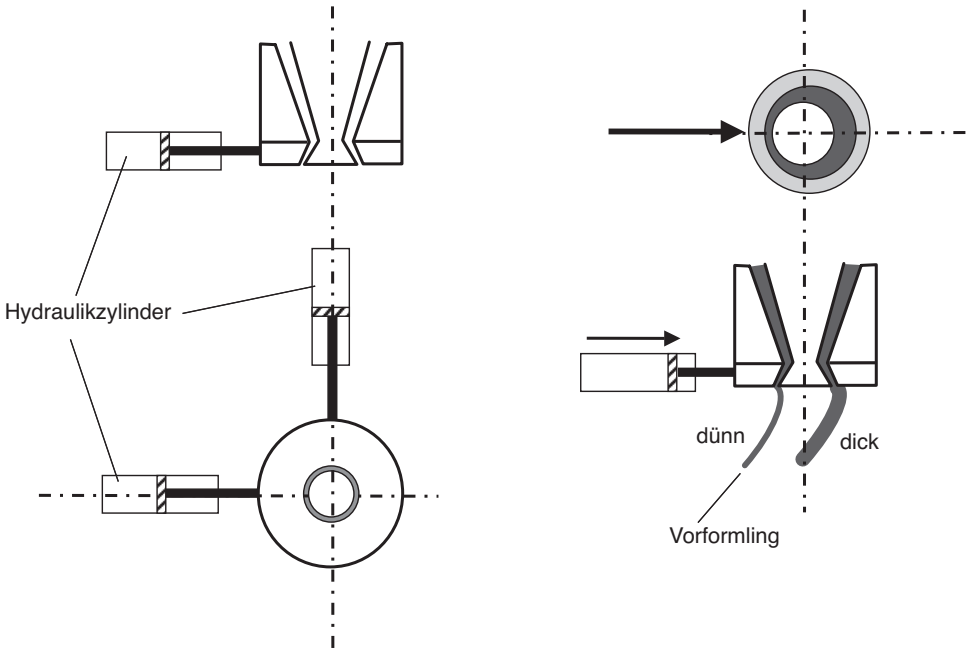


Bild 2.86 Radiale Wanddicken-Steuerung (Bild: Kautex Maschinenbau)

2.6.4 Sequenzielle Coextrusion

In Anlehnung an [37]

Eine spezielle Verfahrensvariante ist die Kombination des 3D-Blasformens mit der sequenziellen Coextrusion (SeCo) etabliert. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass zwei unterschiedliche Materialien in alternierender Folge hintereinander ausgestoßen werden. Bevorzugte Materialkombinationen für die sequenzielle Coextrusion sind je nach Einsatz-Umgebungstemperatur PP und EPDM, PA und elastomermodifiziertes PA sowie zunehmend auch PBT/TEEE. Auf diese Weise entsteht ein Vorformling mit in Extrusionsrichtung abschnittsweise unterschiedlicher Materialzusammensetzung. Dieses Verfahren wird häufig auch „Hart-weich-hart“-Verfahren genannt [40]. So können bestimmte Artikelabschnitte durch entsprechende Materialauswahl mit spezifisch erforderlichen Eigenschaften ausgestattet werden, beispielsweise für Ar-

tikel mit weichen Enden und hartem Mittelteil oder integrierten weichen Faltenbalg-Bereichen (Bild 2.87). Ein weiteres Beispiel ist die Kombination von temperaturstabilen, etwa verstärkten Kunststoffen mit unverstärkten Materialien an den Anschlussstücken. Auch der mehrfache Wechsel im Formteil ist möglich.

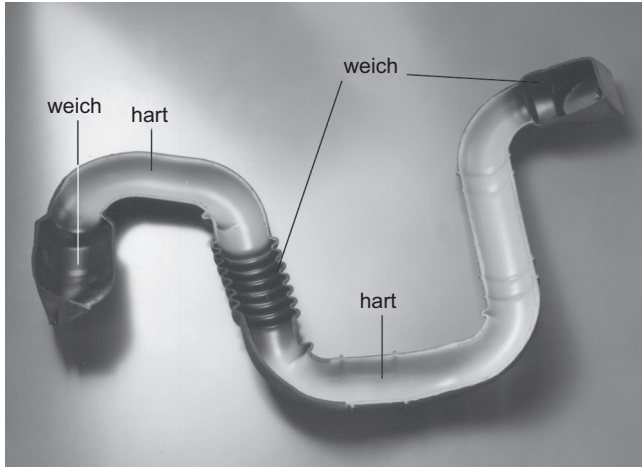


Bild 2.87 Sequenzielle Coextrusion (hart-weich-hart) (Bild: Kautex Maschinenbau)

Eine spezielle Verfahrensvariante der 3D-Blasformtechnik ist die Kombination mit der sequenziellen Coextrusion zur Erweiterung der Gestaltungsmöglichkeiten für derartige Formteile. Die Integration von Faltenbälgen in komplexe, mehrfach gekrümmte Artikel würde in der konventionellen Blasformtechnik zu Schweißnähten im Faltenbereich führen. Die gewünschte Flexibilität ist dann nur senkrecht zur Naht gegeben. Deshalb wurden diese Artikel lange Zeit – und zum Teil noch immer – mehrteilig aus Metall-, Kunststoff- und Kautschukwerkstoffen gefertigt. Sie können mittels der sequenziellen Coextrusion kosten- und zeitsparend in einem Stück hergestellt werden. Die Substitution solcher Baugruppen durch Blasformteile aus thermoplastischen Elastomerwerkstoffen (TPE) bietet eine Fülle von Vorteilen:

Neben kürzeren Zykluszeiten und geringerem Energieaufwand kann bei TPE-Teilen aufgrund ihrer verbesserten Eigenschaften die Wanddicke reduziert werden, was bei vergleichbaren Rohmaterialkosten einen unmittelbaren Kostenvorteil mit sich bringt. Hinzu kommt die einfache Rezyklierbarkeit von TPE, die keine Entsorgungsprobleme entstehen lässt.

Praktische Anwendung findet dies bei Luftführungs Kanälen im Automobilbereich, wo die weichen Enden die Dichtfunktion an den Anschlüssen übernehmen und das harte Mittelteil genügend hohe Steifigkeit gegen Deformation aufgrund des vorliegenden Unter- bzw. Überdrucks aufweisen muss. Weitere praktische Anwendungsbeispiele sind Verbindungsschläuche und Manschetten für Maschinen, Weißgeräte- oder Automobilbau mit flexiblen Rohrenden, die sowohl eine gute Abdichtung unter

■ 3.3 Grundlagen der PET-Streckblastechnik

Hinsichtlich der Prozessführung werden zwei Verarbeitungskonzepte unterschieden:

- *einstufiger Prozess* bzw. Verfahren aus erster Wärme und
- *zweistufiger Prozess* bzw. Verfahren aus zweiter Wärme.

Wie aus den Bezeichnungen bereits hervorgeht, unterscheiden sich die Prozesse prinzipiell in der Temperaturgeschichte der verarbeiteten Thermoplaste. Dieser Unterschied wird in Bild 3.6 aufgezeigt.

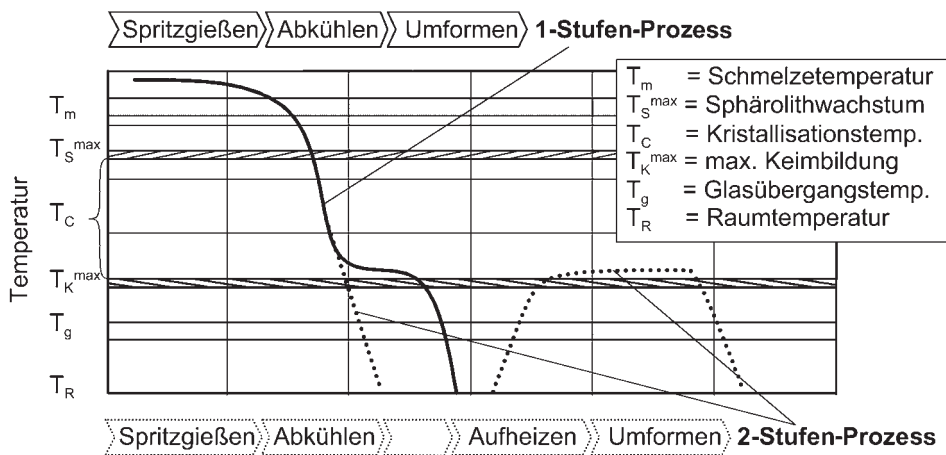


Bild 3.6 Temperaturführung im Streckblasverfahren (Bild: KHS Corpoplast)

Für beide Verfahren werden die Preforms heute fast ausschließlich im Spritzgießverfahren produziert. Hierbei wird bereits das Mundstück mit Gewinde passgenau mit sehr geringen Toleranzen hergestellt. Nach dem Einspritzen werden die Preforms schnell abgekühlt und entformt. Im einstufigen Verfahren werden diese bis in den Bereich der Umformtemperatur abgekühlt und ggf. noch zusätzlich temperiert. Im direkt anschließenden Streckblasschritt wird der Preform dann zu Flaschen ausgeformt und als fertiges Formteil unter die Glasübergangstemperatur abgekühlt. Im zweistufigen Streckblasprozess werden die Preforms nach dem Spritzgießen unmittelbar unter die Glasübergangstemperatur abgekühlt. Die Weiterverarbeitung findet meistens zu einem späteren Zeitpunkt an einem anderen Produktionsort statt. Seltener wird in so genannter „in line“-Verarbeitung die Preformproduktion direkt mittels Förderbändern an die Streckblasanlage angeschlossen.

3.3.1 Allgemeines

Die Behälterherstellung kann im einstufigen oder auch im zweistufigen Verfahren erfolgen.

Der einstufige Streckblasprozess bzw. das Verfahren aus erster Wärme unterscheidet sich nur insofern vom zweistufigen Streckblasen, als hier weder eine zeitliche noch eine örtliche Trennung der Preformherstellung und der Weiterverarbeitung zum fertigen Formteil besteht. Bild 3.7 zeigt die Verfahrensschritte des einstufigen Streckblasverfahrens.

Nach dem Spritzgießen wird der Preform bis in den Umformtemperaturbereich (vgl. Bild 3.6) abgekühlt und entformt. Je nach Maschinenkonzept wird er anschließend zur thermischen Konditionierung in eine weitere Station oder direkt in das Umformwerkzeug transportiert. Die thermische Konditionierung ist bei großen bzw. komplexen Formteilen erforderlich, da hier ein fein abgestimmtes Temperaturprofil im Preform zur Beeinflussung der Materialverteilung im Blasprozess notwendig ist. Die Konzepte zur thermischen Konditionierung unterscheiden sich je nach Maschinenhersteller und nach dem zu verarbeitenden Material. Die konventionelle Technik ist die berührungslose Temperierung über Heizbänder, Bild 3.7 (a). Der Wärmeaustausch findet hier ausschließlich über Wärmestrahlung statt. Bei einer weiteren Methode wird der Preform in einem Konditionierwerkzeug mittels Innendruck gegen die Werkzeugwand gedrückt, Bild 3.7 (b). Der Wärmeaustausch findet durch Wärmeübergang in der Kontaktfläche statt. Das Konditionierwerkzeug wird durch getrennte Ölkreisläufe temperiert.

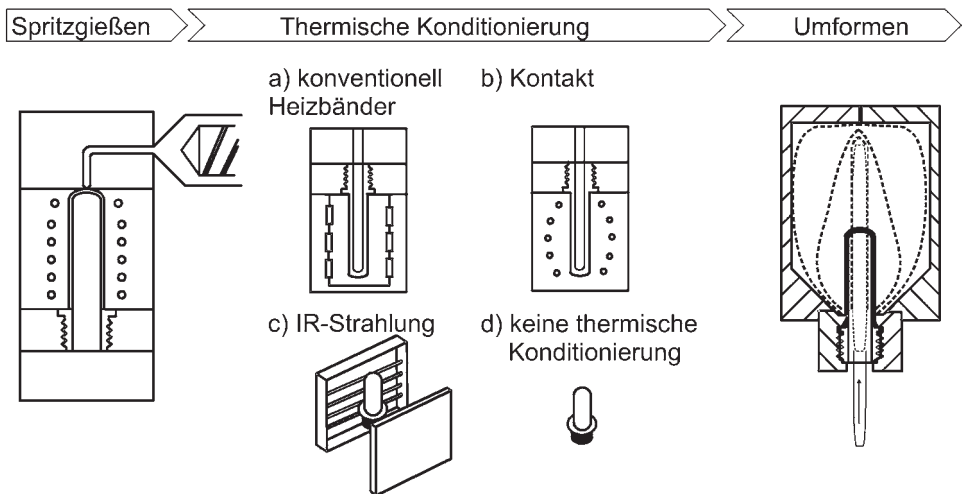


Bild 3.7 Verfahrensschritte des einstufigen Streckblasverfahrens (Bild: KHS Corpoplast)

7

Recycling

Kunststoffe haben einen hohen wirtschaftlichen Wert und sollten nicht „einfach weggeworfen“ werden. Das Recycling von Kunststoffen wird immer wichtiger. Auch die Verbrennung von Kunststoffabfällen sollte möglichst als letzter Schritt in Betracht kommen. „In Kunststoffen steckt geliehene Energie.“ [1] Gerade blasgeformte Kunststoffteile führen nach ihrem Gebrauch meist zu sehr voluminösem Abfall und sollten deshalb auch nicht auf Mülldeponien landen. Grundsätzlich sollten alle Möglichkeiten, Kunststoffabfälle wieder zu verwerten, ausgeschöpft werden. Dies gilt für den Blasformprozess genau wie für alle anderen Kunststoffverarbeitungstechnologien.

■ 7.1 Recycling in der Extrusionsblasformtechnik

In Zusammenarbeit mit Martin Balzer

Bei der Blasformtechnik fallen verfahrensbedingte Abfälle (Butzen, Ausschussteile, Teile vom Anfahren der Maschine) nach einem Zerkleinerungsschritt in Form von Mahlgut an, die mit einem gewissen Anteil von Ausgangsmaterial gemischt und dem Verarbeitungsprozess wieder zugeführt werden.

Ausgangsmaterial kann dabei Neuware, Recyclingware aus anderen Prozessen oder ein Gemisch aus beiden sein. D.h. die Prozessabfälle setzen sich aus verschiedenen Anteilen, die unterschiedlich oft verarbeitet wurden, zusammen. Diese Zusammensetzung ist vom Gesamtgehalt an Prozessabfällen im Artikel abhängig (Bild 7.1 und Bild 7.2).

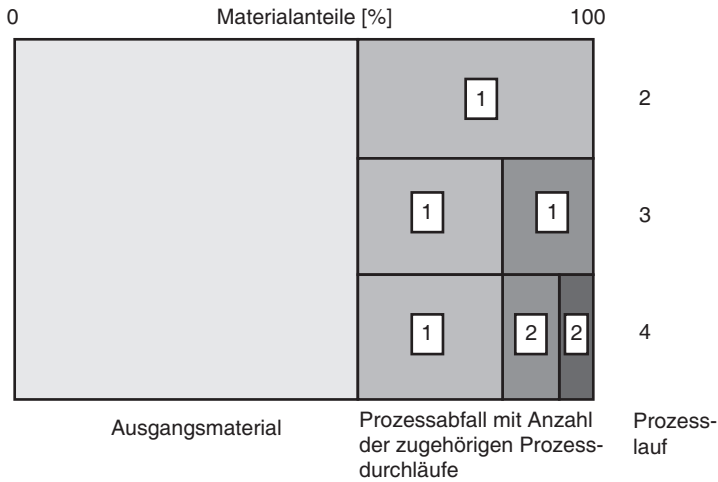


Bild 7.1 Materialzusammensetzung bei mehreren Durchläufen (60% Ausgangsmaterial, 40% Mahlgut) (Bild: Kautex Maschinenbau)

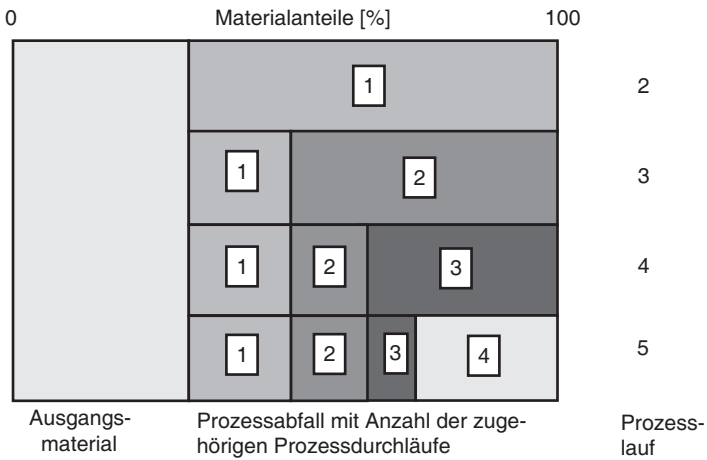


Bild 7.2 Materialzusammensetzung bei mehreren Durchläufen (30% Ausgangsmaterial, 70% Mahlgut) (Bild: Kautex Maschinenbau)

7.1.1 Mögliche Strategien der Verarbeitung von Mahlgut

Während bei 40% Abfall der Anteil mit nur einem Prozessdurchlauf unabhängig von der Gesamtzahl der Prozessdurchläufe überwiegt, hat bei 70% ungefähr die Hälfte dieses Mahlguts stets mindestens drei, das Material thermisch und mechanisch belastende Durchläufe erfahren. Nicht jedes Material verträgt diese Belastungen bezüglich der Verarbeitbarkeit gleich gut. Standardkunststoffe sind generell weniger empfindlich [2]. Bei scherempfindlichen Materialien (zum Beispiel techni-

■ 5.5 Machbarkeitsanalyse Sandkasten

Für die Firma Big-Spielwarenfabrik, Fürth, ist eine Machbarkeitsanalyse für das Blasformen eines Sandkastens durchgeführt worden [12]. Der Sandkasten soll in einem Stück geblasen werden, wobei die Unterseite halbschalenförmig ist. Diese wird vom Oberteil getrennt und als Abdeckung für den Sandkasten genutzt (Bild 5.6).

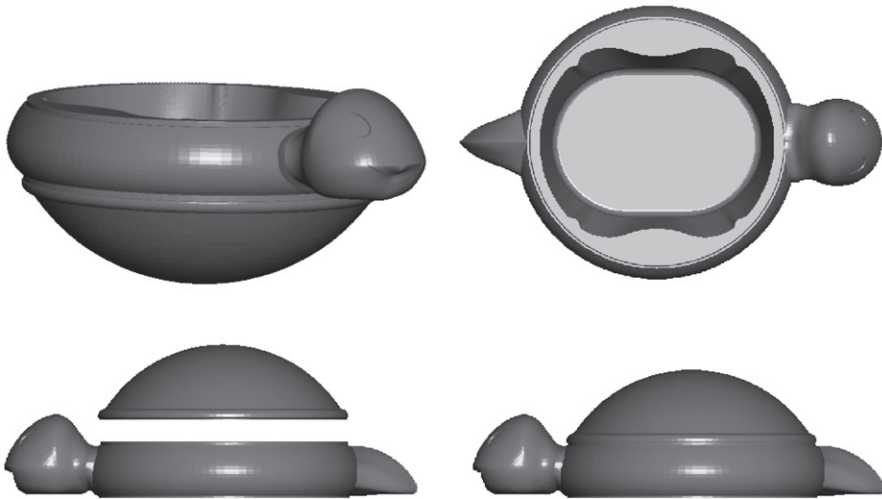


Bild 5.6 Geometrie des Blasteils (*oben*) und Zusammenbau des blasgeformten Sandkastens (*unten*)

Restriktion für die Fertigung des Sandkastens ist die Größe der zur Verfügung stehenden Maschinen. Es soll überprüft werden, ob der Sandkasten als im Vergleich zu den aktuellen Produkten sehr großes Bauteil auf einer der vorhandenen Maschinen gefertigt werden kann. Forderung ist dabei, dass der Sandkasten eine genügende Stabilität besitzt und mehrere Kinder gleichzeitig im Sandkasten spielen können.

Als Erstes wird eine Simulationsstudie mit konstanter Eingangswanddicke durchgeführt. Die Eingangswanddicke wird so gewählt, dass die minimale Wanddicke am aufgeblasenen Artikel einen Grenzwert nicht unterschreitet. Ausgehend von dieser ersten Simulation, wird dann mit den Wanddickensteuerungsverfahren die Wanddicke an den Stellen, wo sie den Minimalwert weit übersteigt, verringert. Ergebnis ist das zur Fertigung des so optimierten Blaskörpers notwendige Materialvolumen. In Bild 5.7 ist das Ergebnis dieser Simulationsstudie zu sehen.

Als Endergebnis ergibt sich, dass das erforderliche Materialvolumen zu hoch ist und die Wanddicken in den seitlichen Sitzflächen des Sandkastens zu dünn sind. Zur Verbesserung muss das CAD-Modell überarbeitet werden, um die Aufblasverhält-

nisse entsprechend zu beeinflussen. So ist es möglich, das Verhältnis von dickster zu dünnster Wandstärke zu verringern und so den Materialverbrauch, bei gleichzeitiger Erhöhung der Wanddickenminima, zu reduzieren.

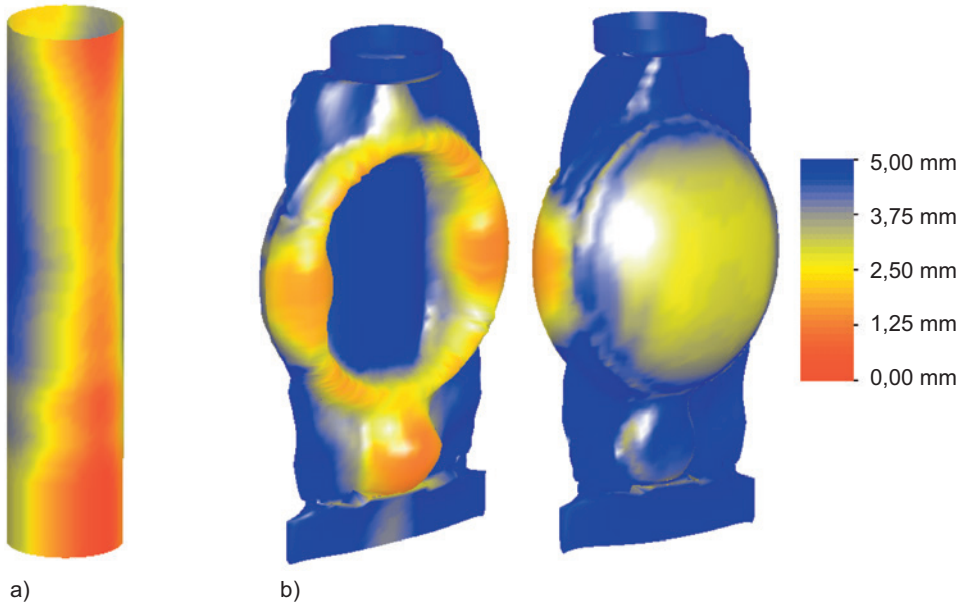


Bild 5.7 Simulationsstudie mit angepasster Eingangswandstärke
a) Vorformling, *b)* aufgeblasener Artikel in Vorder- und in Rückenansicht

Durch Einsatz der Simulation wurde der Entschluss gefasst, nicht ohne Änderungen den Bau eines Prototypenwerkzeugs zu veranlassen. Dieses Beispiel zeigt den Vorteil, die Simulation „früh“ in der Produktentwicklung einzusetzen. Die sehr hohen Werkzeugkosten für den Bau eines Prototypenwerkzeugs in dieser Größe konnten eingespart werden. Bei dem hohen Risiko, den Artikel in der vorliegenden Geometrie nicht fertigen zu können, ist der finanzielle Aufwand für die Simulation von ca. $\frac{1}{15}$ der Werkzeugkosten als sehr gering zu werten.

■ 5.6 Berechnung Berstinnendruck eines Scheibenwischwasserbehälters

Der Wasserbehälter für die Scheibenreinigungsanlage eines Kfzs hat ein Volumen von 2 l und eine Einfüllöffnung an der Oberseite, die blastentechnisch als verllorener Kopf ausgebildet ist (Bild 5.8). Zur Durchführung einer Simulationsstudie [12] wird als Erstes, ausgehend von einem 3D-CAD-Modell, das Netz für das Werkzeug gene-

Register

Symbole

3D-Blasformen 117
3D-CAD 230
3D-Druck 257

A

AA (Acetaldehyd) 160
Abflammvorrichtung 102
Abfüllbetrieb 281
Abfüller 183
Abfülllinie 197, 280
Abfüllmaschinen 107
Ablaufsteuerung 62
Abquetschen des Vorformlings 57
Abquetschkante 228
Abquetschlinien 228
Absorber 210
Abstreiferplatte 93
Abzugsbereich 167
Acetaldehyd 160
Acrylnitril 211
Akku 39
alkoholhaltige Kraftstoffe 115
Alterung 197
amorph 19
Ampullen 219
Anblasen 232
Angebotsklärung 270
Anlagenkonzept 273
Anwendungsbereiche 3
Arbeitsluft 183
Arbeitsschutz 289
artikelabhängige Teile 277
Artikeldurchmesser 229

Artikelentnahmevorrichtung 41
Artikelgeometrie 76
Artikeloberfläche 83
Artikelqualität 186
Artikelvolumen 76
Aseptische Abfüllung 198
Ästhetische Anforderungen 153
Aufblasdruck 57
Aufblasluft 68, 226
Aufheizprozess 167, 172
Aufstellbedingungen 184
Auftragsabwicklung 269
Ausformprozess 175
Ausgleichsphase 164
Ausgleichstation 193
Ausgleichszeit 196
Ausgleichszeiten 173
Auspuffen 171
Ausschussteile 291
Ausstoßgeschwindigkeit 41
Ausstoßleistung 279
Automobilindustrie 275
Automobilzulieferer 269
axiale Wanddickensteuerung 235
Azetaldehyd 305

B

Bajonettverschluss 277
Balancierung 165
Bandsäge 108
Barex 209
Barriere 31, 110, 263
Barriereanforderungen 152
Barriereigenschaften 202
Barriereextruder 31

Barrierematerial 31
 Barriertechnologien 209
 Bauteilverhalten 237
 Bedeutung 287
 Bedrucken 108
 Beflammverfahren 108
 Befüllbarkeit 262
 Behälterdesign 242
 Bemusterung 257
 Benzin-Einfüllstutzen 117
 Berstdruck 231, 261
 Berstinnendruck 232, 234
 Betreiber-Modell 281
 biaxiale Deformationen 150
 biaxiale Umformung 155
 Bier 150, 206
 Bildverarbeitungssystem 186
 Bio-PET 149
 Blasdorn 15, 68, 89
 Blasdornschnellwechselblöcke 277
 Blasform 76
 Blasformbetrieb 269, 288
 Blasformgerechtes Konstruieren 225, 244
 Blasformkühlung 85
 Blasformmaschine 24
 Blasformsimulation 232
 Blasformwerkzeug 15, 24, 57, 228
 Blasformwerkzeuge 76
 Blasformwerkzeugen 231
 Blasformzubehör 88
 Blaskopf 15
 Blasluft 68, 183
 Blasnadel 15, 91, 226
 Blasnadeln 68
 Blasposition 41
 Blasrad 178
 Blasräder 73
 Blasstation 170, 177
 Blasvorgang 203
 Blow-and-Drop 133, 215
 Bodenfreiheit 259
 Bodengestaltung 245, 247
 Bottlepack 142
 Bruchfestigkeit 151
 Bumper 249

Butzen 15, 102, 291
 Butzenabfall 228
 Butzenabstreiferplatte 93
 Butzenbereich 235
 Butzengewicht 224
 Butzenvortrennung 81

C

CAE 229
 CAE-Methoden 232
 CAE-Werkzeuge 229
 CD-R 276
 Celluloid 8
 Cellulosenitrat 9
 Champagnerboden 247, 248
 Chargenwechsel 54
 CHDM 154
 Chemische Anforderungen 152
 Circular Economy 149
 Coextrusionsschweißnähten 81
 Converter 269, 280
 Copolymer-Anteil 157
 Coronaverfahren 108
 Custom-Blowmolder 269
 Cyclohexan-Dimethanol 154

D

Defekte 188
 Degradation 101
 Dehndefomation 45
 dehnungsinduziert 202
 dehnungsinduzierte Kristallisation 155
 Dehnverfestigung 155, 157
 Dehnviskosität 22
 Dekorfolie 137
 Dellen 188
 Deming-Circle 286
 Deming-Zyklus 286
 Depolymerisation 306
 Designflexibilität 189
 Dichtesäule 263
 Dichte-Waagen 263
 Dichtigkeitsprüfung 106

Digitalisieren und Flächenrückführung 230
 Dimethylterephthalat 154
 DIN EN ISO 9001 288
 Disketten 276
 diskontinuierliche Köpfe 39
 Divergierende (außenkonische) Düsen 44
 Doppelstationen-Maschinen 71
 Dorn 43, 176, 178
 Dornhubkalibrierung 90
 Dosierphase 164
 Drehen 2
 Drei-Komponentenmischer 104, 105
 Drei-Platten“-Schließeinheit 58
 Drei-Stationen-Maschine 190
 Druckentlastung 171
 Druckfestigkeit 151
 Druckluft 101
 Druckluftkreis 68
 Drucksensor 188
 Druckverlust 184
 DSD – Gelber Sack 294
 Durchflussquerschnitte 87
 Durchhängeeffekt 44
 durchkontaktiert 226
 Duomere 19
 Duroplaste 2, 19
 Düse 43
 Düsendurchmesser 46, 228
 Düsenschwellen 45, 142

E

Echtzeitfähigkeit 64
 Eigenspannung 202
 Eigenspannungen 66, 169
 Eindringtiefe 159
 Eineinhalb-(1,5)-Stufen-Maschinen 189
 eingefrorenen Orientierungen 156
 Einrichtbuchse 93
 Einspritzvolumen 165
 Einstufenprozess 189
 Einstufen-Streckblastechnik 189
 einstufiger Prozess 161
 Elastomere 19
 elektrisch leitfähige 125

Energie 291
 Entbutzen 102
 Entformungshilfe 90
 entlüftet 83
 Entlüftungsschlitze 83
 Entnahmeroboter 166
 Entwicklungskonzept 230
 Erfrischungsgetränke 150
 erste Wärme 161, 189
 EtherCAT 63
 Ethernet-IP 63
 Ethylenglykol 154
 Ethylen-Vinylalkohol 110
 Ethylvinylalkohol 211
 Etikett 134
 Etikettieren 108
 EVOH 110, 211
 Excell-Verfahren 119
 Extruder 24, 25
 Extruderdrehzahl 39
 Extrudernicken 41
 Extrusion 2
 Extrusionsblasformbetrieb 269
 Extrusionsblasformen 15
 exzentrischen Öffnungen 88

F

Falltest 109, 263
 Falten 188
 Farbmasterbatch 104
 Farbpigmente 54
 farbstichig 210
 Farbtemperatur 164
 Farbwechselzeiten 37
 faserverstärkte Thermoplaste 141
 Faserwickeln 2
 FCKW 100
 Fehlerbehebung 223, 288
 Fehlerdiagnose 62, 229
 Fehlerentstehung 223
 fehlerhafte Vorformlinge 186
 Fehlerverhütungsmaßnahmen 288
 Fehlervermeidung 231, 289
 FEM 230

FEM-Analyse 252
 Ferndiagnose 62
 Fernzugriff 62
 Fertigblasdruck 169
 Fertigung 230
 Festphasenkondensation 154
 Feuchtigkeit 101, 158
 Feuchtigkeitsgehalt 204
 FIFO 39
 Filtrierung 300
 First-In - First-Out 39
 Flaschen 142, 149
 Flaschenboden 169
 Flaschengeometrie 166
 Flaschenmündung 164
 Flasche-zu-Flasche-Recycling 213
 Fließkanal 46
 Fließkanalgeometrie 44
 Fließtemperatur 20
 Fließvorgänge 156
 Fließwiderstand 33
 Flotation 304
 Fluorieren 112, 113
 FMEA 288
 FMEA (Failure-Mode-Effect-Analysis) 288
 Folgeeinrichtungen 99
 Förderbänder 108
 Fördermengenschwankungen 53
 Forderungen 285
 Förderwirkungsgrad 28
 Formabstützung 82
 Formänderungszustand 230
 Formaufspannplatten 56
 Formdruck 163
 Formentlüftung 83
 Formkontur 184
 Formschieber 78
 Formstation 163
 Formverriegelung 179
 Fourier-Beziehung 87
 Fo-Zahl 87
 Fräsen 2
 Fruchtsäfte 198, 210
 FTIR-Kristallinitätsgradmessung 263
 Füllen 107

Füller 197
 Füllstandsüberwachung 136

G

Gebläse 174
 Gesamtschwindung 65
 Geschmacksneutralität 151
 Gestaltungsfreiheit 151
 Gestaltungsmöglichkeiten 153
 Getränke 150
 Getränkeindustrie 170
 Gewindebereich 167
 Glanz 151
 Glasblasen 7
 Glasfasern 2
 glasfaserverstärkte Kunststoffe 141
 Glasübergangsbereich 155
 Glasübergangstemperatur 19, 158, 200
 Glasverpackungen 149
 Glaszustand 19
 Glattrohretruder 26
 Gleitmittel 54
 Glykolyse 306
 Grat 102
 gravimetrisch 104
 gravimetrische Dosierung 297
 Gravimetrische Durchsatzregelung 31
 Griffstabilität 261
 Guttapercha 8

H

Haftvermittler 110, 294
 Haltezeit 170
 Handgriffe 196
 Hart-weich-hart 126
 Haushaltschemikalien 150
 Heatset-Prozess 202
 Hefe 153
 heißabfüllbar 152
 heiß abfüllbare Flaschen 253
 Heißabfüllung 153, 158, 199, 253
 Heißkanaldüse 166
 Heißkanalverteiler 165

Heizstation 164
 Heizung 170, 172
 Heizvorgang 203
 Heliumtest 107
 Herzkurvenkopf 36
 Hilfsdorne 88
 Hinterschnitte 245
 Historie 7
 Hochdruck-Kompressor 183
 Hohlkörper 1
 Horizontal-Blasformmaschinen 124
 Hotfill 254
 Hotfill-Boden 255
 Hubtischanlagen 278
 Hülsen 176, 178
 Hydrolyse 101, 158, 306
 Hydrophile Polymere 101
 Hydrozyklon 304
 Hygieneanforderungen 285
 hygroskopisch 164

I

IATF 16949 288
 Industrial-Ethernet 63
 Industrie-PC 64
 induzierte Kristallinität 202
 Infrarotabsorption 259
 Infrarot-Durchlaufofen 133
 Infrarot-Sensoren 188
 Inline-Fluorierbetrieb 83
 Inline-Fluorierung 113
 In-Mould-Decoration 137
 In-Mould-Labeling 134
 Innendruck 152, 261
 Innenkühlung 67, 203
 Inspektionssysteme 186
 Intervall-Blasen 69
 intramolekulare Fehlstellen 157
 intrinsische Viskosität 157, 184
 IPA 210
 IPC-Steuerung 64
 IR-Strahlung 150
 Isophthalsäure 210

J

Just-In-Sequence 276
 Just-In-Time 275

K

Kaffee 150, 157, 198
 Kalibrierblasdorn 90
 Kalibrier-Blasdorn 133, 226
 Kalibrierdorn 90
 Kanten 244
 Kanüle 219
 Karbonisierungsgrad 206
 Karussell 175
 Karussellbetrieb 178
 Kavitäten 164
 Keel-Tool-Verfahren 231
 Keime 153
 Kennzahlensystem 289
 Kerben 188
 Kette 178
 Kniehebelsystem 59
 Kohlensäurehaltige Erfrischungsgetränke
 157
 Kohlensäurepermeation 211
 Komplettbearbeitung 95
 Kompressor 183
 Kompressorauslegung 185
 Kompressoren 101
 Kondenswasser 65
 Konditionieren im Spritzgießwerkzeug 190
 Konditionierstation 190
 Konditionierung 163
 Konditionierwerkzeug 162
 „kontakt-transparente“ Flaschen 218
 Kontinuierliche/diskontinuierliche Extrusion
 39
 kontinuierlichen Extrusion 41
 Konturen 169
 konvergierende (innenkonische) Typen 44
 Kopfwerkzeug 93
 Kopfwerkzeuge 44
 Körperpflegemittel 150
 Korrekturfaktor 279

Kosmetika 150
 Kostenvorteile 151
 Kraftstofftanks 111
 Kraftstoff-Einfüllrohr 124
 Kratzer 188
 kristalline Bereiche 200
 Kristallinität 168, 263
 Kristallinitätsgrad 157
 Kristallisation 164
 Kristallisationsgrad 155
 Kristallisationsgeschwindigkeit 204
 Kristallitschmelztemperatur 20
 Kristallstruktur 200
 Kristallstrukturen 156
 Kristallwachstumsgeschwindigkeit 156
 Kugelumlaufspindel 60
 Kühlaggregate 100
 Kühler 185
 Kühlkammer 109
 Kühlleistung 186
 Kühlmitteltemperatur 87
 Kühlrohre 76
 Kühlrohrkäfig 77
 Kühschild 172
 Kühlung 65, 100
 Kühlwasser 100
 Kühlzeit 40, 65, 170
 Kundenanforderungen 287
 Kundenforderungen 286
 Kundenzufriedenheit 289
 Kunststoffabfälle 291
 Kunststoffhohlkörper 1
 Kunststoffkraftstoffbehälter 111
 Kunststoffverarbeiter 280
 kurvengesteuert 179

L

Lackieren 211
 Ladeluft-Rohre 117
 Lagerbedingungen 174
 lamellar 200
 Langhubmaschinen 71
 langwellig 174

Layout eines Blasformprozesses 279
 Lebensmittel 150
 Leichtgewichtigkeit 151
 Leitaggregat 283
 Leitungsvolumen 184
 Lightweight-Flaschen 261
 Limonen 305
 Linearmaschinen 175, 177
 Logos 169
 Losgrößen 275
 Lösungsansätze 287
 Luft 68
 Luftdruck 68
 Lüfter 164
 Luftfördergeräte 103
 Luftförderstrecke 284
 Luftführungskanälen 117

M

Machbarkeitsanalyse 233, 270
 MagnaMike 259
 Mahlgut 29, 291, 306
 Mahlgut (Regenerat) 102
 Maschinentechnik 149, 175
 Masken 88
 Masterbatch 104
 Materialblends 210
 Material-Handling 104
 Materialkreisläufe 296
 Meeresspiegel 184
 Mehrfach-Blasformen 69
 Mehrfachköpfe 69
 Mehrfachproduktion 70
 mehrschichtiger Wandaufbau 293
 Mehrschicht-(Multilayer)/Coextrusionsblasformen 109
 Melt-Flow-Index 20
 Membran 219
 Memory-Effekt 17, 44
 Metalldetektoren 103
 Methanolyse 306
 Methode FMEA (Failure-Mode-Effect-Analysis) 286
 Mikrobiologische Anforderungen 153

Mineralwässer 150
 minimierter Materialeinsatz 232
 Mischungsverhältnisses Neumaterial/
 Regenerat 54
 Mittenabstand 70, 279
 Modell 76
 Molekülorientierungen 45, 197
 Montagehilfen 278
 Morphologie 166
 Motorölkammer 136
 Mülldeponien 291
 Multischneidkupplungen 277
 Mundstück 43

N

Nachbearbeitung 95
 Nachdruck- 164
 Nachdruckbausteine 164
 Nachkühlen 94, 164
 Nachkühlform 94
 Nachkühlung 105
 Nachkühlvorrichtung 67
 Nachkühlvorrichtungen 105
 Nachschwindung 65
 Nadelverschlussdüse 165
 Nanopartikel 210
 Natronlauge 262
 Nebenzeiten 94
 Neckring 167
 Neck-to-neck 74
 Nullserienteile 274
 Nutbuchsen-Extruder 25, 27

O

Oberflächenkühlung 168
 Oberflächenqualität 294
 Oberflächentexturen 68
 Oberflächenunregelmäßigkeiten 188
 Ofen 174
 Offline-Fluorierung 113
 opak 210
 Optimierungsziele 230
 Ovalbeheizung 168

ovale Flaschen 218, 256
 Ovalisierung 254

P

Paletten 108
 Panelless Designs 255
 Panel-load 261
 Partielle Wanddickensteuerung (PWDS) 48
 Pasteurisation 198, 206
 Pasteurisierbare PET-Flaschen 206
 PC-Steuerung 62
 PEF 149
 PEF (Polyethylenfuranoat) 209
 PEN 209, 211
 Peressigsäure 153
 Peripherie 99
 Peripherieaggregate 183
 Permeabilität 210
 Permeationsbarriere 209
 Peroxid 153
 PET 13, 149
 Petaloid-Boden 246, 247
 PET-Flakes 304
 PET-Flaschen 149, 166
 PET-Mehrwegflaschen 156
 Pflichtenheft 271, 274
 Physikalische Anforderungen 152
 Pigmentierung 104
 Pinolenkopf 36
 Pioniere der Blasformtechnik 11
 Placo-Verfahren 119
 Plasmopolymerisation 116
 Plastifizierphase 165
 Polyacrylnitril 209
 Polycarbonat 131
 Polyethylen-Naphthalat 209
 Polyethylenterephthalat 149
 Polykondensation 154
 Polyolefine 8
 Polyolefinverarbeitung 29
 Portionsverpackungen 142
 Post-Consumer-Scrap 294
 Preferential-Heating 193
 Preform 149

Preformachse 167
 Preformauslegung 238
 Preformgeometrie 166
 Preformgestaltung 166
 Preformkuppe 167
 Preforms 164
 Preformtemperatur 174
 Preformzuführung 175
 Pressblower-Prozess 219
 Produktentwicklung 223, 286
 Produkterprobung 224
 Produktgewicht 224
 Produktidee 230
 Produktionsformen 76, 78
 Produktionsleistung 164, 171
 Produktionsleistungen 149
 Produktionsprozess 230
 Produktionstechnik 149
 Produktlebenslauf 223
 Produktprüfung 224
 Produktsicherheit 285
 Produkt-Simulation 229, 230, 237
 ProfiNet 63
 Projektleitung 270
 projizierte Fläche 57
 projizierten Artikeloberfläche 280
 Prototyp-Formen 76
 Prozessabfälle 291
 Prozessablauf beim Streckblasen 150
 Prozessautomatisierung 95
 Prozessdatenerfassung 62
 Prozessfähigkeit 186
 Prozesskontrolle 289
 Prozessoptimierung 231
 prozessorientierte Organisationsform
 286
 Prozess-Simulation 229, 230
 Prozess- und Produkt-Simulation 230
 Prozesszeit 171
 Prüfrichtlinien 224
 Prüfverfahren 230
 Puffer 197, 283
 PVC 9

Q

QFD 287
 Qualität 186
 Qualitätskontrolle 286
 Qualitätsmanagement 285, 286
 Qualitätsmerkmalen 287
 Qualitätsphilosophien 286
 Qualitätsplanung 286
 Qualitätssicherung 106
 Quality-Function-Deployment 287
 Quarzglasstrahler 174
 Quarzrohrstrahler 164
 Quetschnaht 57

R

Radiale Wanddickensteuerung 125
 Radmaschinen 73
 Rapid-Product-Development 229
 Rapid-Prototyping 230
 Rapid-Prototyping-Modell 231
 Rapid-Tooling 229, 231
 Rechneinsatz 97
 Reciprocating-Screw 215
 Reckgrade 43
 Reckstange 150, 163, 169, 179
 Recycling 291
 Regenerat 29
 Regenerataufbereitung 54
 Reinigungs- 150
 Relaxation 200, 206
 Relaxationsprozess 197
 relaxiert 156
 Restentleerbarkeit 294
 Restfeuchte 165
 Restriktion 233
 Rezykatschicht 295
 Rezyklieren 212
 rheologische Balancierung 165
 Rillenflaschen 197
 Ringwulst 219
 Roboter 166
 Rohrkühlung 86
 Rohstoffe 17

Rollensortierer 175
 Rotary-Wheel-Machine 73
 Rotationsformen 2
 Rundläufermaschinen 175, 178
 Rundumverteilung 35, 43
 Rundungsradien 230
 Rüsthilfen 278
 RWDS 125

S

Saft 157
 Säfte 206
 Sagging 22, 41, 44, 142
 Sandkasten 233
 Sandwich-Struktur 138
 Sauerstoff 152
 Sauerstoff- 211
 Saugblasen 120
 Saugförderanlagen 104
 Scavenger 210
 Schalenkühlungen 86
 Schalldämpfer 171
 Schaumschicht 138
 Scheibenwischwasserbehälter 234
 Scherdeformation 45
 Scherung 165
 Schimmel 153
 Schlauchkopf 15, 24
 Schlauchköpfe 33
 Schlauchschließebleche 93
 SchlauchschließeVorrichtung 92
 Schlauchzubringer 41
 Schließeinheit 24
 Schließeinheiten 56
 Schließgeschwindigkeit 59
 Schließhubkalibrierung 90
 Schließkraft 57, 177
 Schlitzdüsen 83
 Schmelzfiltrierung 300
 Schmelzespeicher 194
 Schmelzestabilität 41
 Schmelzeverteiler 70
 Schmelzindex 20
 Schmelzkerntechnik 1

Schmelzphasenkondensation 154
 Schnecken 25
 Schneckengeometrie 165
 Schneidkante 57
 Schneidkanten 80
 Schneidkantengeometrie 82
 Schneidkantengestaltung 81
 Schneidkantenlänge 57
 Schneidmühlen 102
 Schnellspannring 277
 Schnellwechselsysteme 277
 Schrumpf 65, 135, 157, 227
 Schrumpfwerte 227
 Schubschneckenmaschine 215
 Schüttdichten 103
 Schüttgewichtsschwankungen 298
 Schwalltopf 89
 Schwelleffekt 45
 Schwellfaktoren 46
 Schwellverhalten 44
 Schwindung 65, 227
 Schwitzen 69
 Sechs-Achsen-Roboter 41, 120
 Sechs-Schicht-Coextrusion 114
 SeCo 126
 Segmentsgewichtsverteilung 266
 Seitenbelastung 261
 Sekundärstrahlung 174
 Selar 81, 112, 114
 Sequenzielle Coextrusion 126
 Serienprüfung 289
 Sheet-Forming 116
 Shelf-life 209
 Shuttle-Maschinen 73
 Sichtstreifen 136
 Sicken 226
 Side-load 261
 Siebe 300
 Silowechsel 54
 Simulation 229, 230, 234
 Simulationsprogramm 235
 Simulationsverfahren 229
 SIOX 211
 Sleeve-Etikettierung 135
 Sollbruch 219

Spannungsrissbildung 152
 Spannungsrisskorrosion 133, 218, 246
 Speicherkopf 39
 Speicherkopf-Verfahren 40
 speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)
 62
 Speiseöl 157
 Speiseöle 150
 spez. Volumen 159
 sphärolithischen Überstrukturen 156
 spherolitische Kristallinität 200
 Spiralförderer 104
 Sportgetränke 198
 Spraycoating 212
 Spreizdorne 88
 Spreizen 88
 Spritzblasformen 215
 Spritzgießen 1
 Spritzgießen der Preforms 193
 Spritzgießen von PET 164
 Spritzgießkavität 216
 Spritzgießmaschine 164
 Spritzgießverfahren 150
 Spritzgusswerkzeugen 231
 Spritzling 149
 SPS-Steuerungen 62
 Stabilität 233
 Stahlschneidkanten 80
 Standard-Prozess 201
 Standfestigkeit 248
 Standring 245
 Stapellast 260
 Stark ovale Behälter 193
 Statisch flexibler Düsenring (SFDR) 46, 47
 Staub 103
 Stegdornhalterkopf 33
 Stegdornhalterköpfe 33
 Stellgrößen 232
 Stereolithografie 257
 Sterilisation 153
 sterilisiert 198
 Sterilraum 198
 Steuerungen 62
 Stillwasser-Boden 249
 Strahler 164

Strahlereinstellung 172
 Strahlerkästen 172
 Strahlerröhren 172
 Strahlertemperatur 159
 Strahlertemperaturen 174
 Strahlung 164
 Strahlungspyrometer 173
 Strahlungsspektrum 159
 Strahlungswärme 159, 171
 Strainer 33
 Streckblasen 150
 Streckblasformen 149
 Streckblasverfahren 149
 Stress-Cracking 133
 Stress-Crack-Resistance 262
 Stützluft 35, 92
 Stützring 167
 Synthese von PET 154
 Systemlieferanten 275

T

Tauchblasen 220
 Taupunkt 87
 Technikums-Maschine 257
 Tee 150, 198
 teilkristallin 19
 Temperaturänderungen 54
 temperaturinduziert 202
 Temperaturprofil 167
 Temperaturregelung 173
 Temperieraggregat 183
 Temperieraggregate 101
 Temperprozess 133
 Terephtalsäure 154
 Textilien 137
 Thermische Eigenschaften 158
 thermische Schädigung 164
 thermische Trennung 166
 Thermoplaste 17
 tiefkalter Luft 69
 tie molecules 156, 200
 Topload 260
 Topload-Test 242
 Torpedo 33

Touch Screen 65
 Transluzenz 157
 Transmissionsspektrum 158
 transparent 156
 Transparenz 210,
 Transportdorn 178
 Transportelemente 177
 Treibmittel 138
 Trockenluftschleiergeräte 108
 Trockenluftschleiergeräten 69
 Trocknen 164
 Trockner 101, 165
 Tuben 142, 219
 turbulente Strömung 87
 Turnkey 99
 Twin-Sheet-Forming 2, 116

U

Übergabestation 178
 Überlappende Herzkurve 37
 Umgebungstemperatur 174
 Umkehrspülung 69
 Umrüsten 275
 Umweltmanagement 285
 Umweltschutz 289
 unpolare Werkstoffe 108
 Unterdruck 204, 253
 USB-Stick 63
 USB-Sticks 276

V

Vakuum 254, 261
 Vakuumbeschichtungstechnologie 211
 Value Engineering 274
 Verarbeitungsschwindigkeit 65
 Verarbeitungstemperaturfenster 22
 Verbindungsmoleküle 156, 200
 Verfahrensschritte 16
 Verfahrensschritte des Extrusions-
 blasformens 15
 verlorener Kopf 75, 226
 Verpackung 108
 Verpackungsdesign 241

Verpackungsmarkt 151
 Verschleiß der Mühlenmesser 54
 Verschließen 107
 Verschlüsse 107
 Verschlussgewinde 164
 Verstärkungsfasern 2
 Verstärkungsrippen 226
 Verstreckprozess 169
 Verstreckverhältnis 229
 Verstreckverhältnisse 43
 Verstreckvorgang 203
 Verzug 65
 Vier-Finger-Spreizvorrichtung 89
 Vier-Stationen-Maschine 190
 Virtual-Prototyping 229
 viskoelastische Verhalten 44
 Viskosität 22, 157
 Viskositätsänderungen 54
 Viskositätskurve 166
 Visualisierung 63
 vollelektrische Maschinen 59
 vollelektrische Schließenheit 59
 Volumen 260
 Volumenschwund 197
 Volumenschwindigkeit 166
 volumetrisch 104
 volumetrische Dosierung 297
 Vorblasdruck 163, 169
 Vorblasen 92
 Vorblasluft 68
 Vorformling 15, 149, 215, 228, 235
 Vorformlingsdurchmesser 229
 Vorformlingsmanipulator 120
 V-Profil 283

W

Waagen 108
 Wanddicke 43, 188, 225, 226
 Wanddicken 231
 Wanddicken-Lagen-Steuerung 53
 Wanddickenmesssystem 188
 Wanddickensteuerung 43, 225
 Wanddickensteuerungssysteme 46
 Wanddickensteuerungsverfahren 232

Wanddickenvergleich 236
Wanddickenverteilung 166, 202, 259
Wärmebehandlung 199
Wärmekapazität 159
Wärmeleitfähigkeit 159
Wärmeleitung 164
Wärmeübergang 169
Warzenverschluss 277
Wasser 157
Wasserbad 106
Wasserflaschen 131
Weißbruch 157
Weithalsbehälter 218
Wellenlänge 164
Wendelverteilerköpfe 38
Wendung 176
Werkzeugkühlung 166
Werkzeugtemperatur 166
Wertschöpfungskette 281
Wiederverschließbarkeit 151
Wirtschaftlichkeit 183

Z

Zangenschließeinheiten 58
Zeit-Temperatur-Verschiebungsgesetz
155
zentralen Anströmung 35
zentriert 43
Zerkleinerungsschritt 291
Zersetzungstemperatur 20
Zielgrößen 231
Zitrusfrüchte 160
Zugbänder 246
Zuhaltekraft 57
Zwangsförderung 28
Zweistufen-Streckblastechnik 170
zweistufig 150
zweistufiger Prozess 161
zweite Wärme 161
Zykluszeit 65, 87, 165
Zykluszeitreduzierung 69
Zylindertemperaturen 165