

Modelltechnische Untersuchung des Verformungsablaufs vom Kübel zur Flasche

VON HEINRICH HERTEL UND WERNER SCHMID, Berlin

(Mitteilung aus dem Institut für Luftfahrzeugbau der Technischen Universität Berlin)

(Eingegangen am 22. Mai 1968)

Die im Institut für Luftfahrzeugbau der Technischen Universität Berlin entwickelte Modelltechnik ermöglicht es, den Fertigblasprozeß vom Kübel zur Flasche sichtbar zu machen. Der sich hierbei abspielende Verformungsverlauf wurde untersucht und seine Abhängigkeit von den wesentlichen Versuchsbedingungen, wie Kontaktzeit bis Vorblasbeginn, Gesamtkontaktzeit, Vorformtemperatur, dargestellt. Mit Hilfe von Wandmarkierungen im Kübel wurden die beim Fertigblasen auftretenden axialen Wege verfolgt.

Aus den Versuchen werden Schlußfolgerungen bezüglich der Wandstärkenverringerung im unteren Flaschendrittel, der Speiserwellenbildung und der Verformung in den verschiedenen Flaschenbereichen gezogen.

Das heute gebräuchlichste vollautomatische Herstellungsverfahren von Hohlgläsern ist das Speiser-Verfahren, bei dem ein vom Speiser gelieferter Glas-tropfen (etwa 1050 °C) in einer Vorform vorgeblasen wird. Es bildet sich ein schlanker — meist kegelförmiger — Hohlkörper aus, dessen Temperatur beim Entnehmen aus der Form im Mittel bei etwa 860 °C liegt. Dieser Hohlkörper — Kübel genannt — wird nun in eine zweite Form — die Fertigform — eingeschwenkt. Während des Einschwenkens gleichen sich die Temperaturen im Kübel etwas aus; die von der Vorform abgekühlte Außenzone wird von der heißeren Innenzone wieder aufgewärmt. Diese „Rückerwärmung“ ist notwendig, um die bereits erstarrte Kübelrandzone wieder in den zähflüssigen Zustand zu bringen, der für die weitere Verarbeitung erforderlich ist. Die Rückerwärmung ist möglich, da die Wärmeabgabe des Kübels an die Umgebung vom Öffnen der Vorform bis zum Schließen der Fertigform geringer ist als die von innen nachströmende Wärme. Üblicherweise wird die Zeit zwischen dem Öffnen der Vorform und dem Schließen der Fertigform als Rückerwärmungszeit bezeichnet, obwohl mit dem Schließen der Fertigform die Rückerwärmung nicht beendet ist. Sie findet auch während des Fertigblasens statt, da hierbei nicht sofort an allen Stellen das zähflüssige Glas mit der Fertigform in Berührung kommt.

Beim Vorblasen ist demnach eine Flüssigkeit mit ausgeprägtem Temperatur- und Zähigkeitsgradienten in einer Form eingeschlossen, die nur Bewegung in vornehmlich axialer Richtung erlaubt. Die von unten eingepreßte Luft drückt ähnlich einem Kolben das über der Luftblase liegende Glas in die Höhe, wobei auch Materialbereiche außerhalb der Luftsäule wegen der Zähigkeitsbedingten Reibung mitbewegt werden. Man hat es mit einem Fließvorgang zu tun, der sich durch Fließfiguren, wie sie von TRIER [1] bei Glas mit Stufenkolben und Blasenspur erzeugt wurden, charakterisieren läßt. Demgegenüber hat das Fertigblasen nichts mehr mit einem solchen Fließvorgang gemeinsam.

Der zähflüssige, einseitig geschlossene Hohlkörper dehnt sich anfänglich durch die einströmende Blasluft nach allen Richtungen unbehindert aus. Diese Verformung des Kübels wird rasch durch die Gestaltung der Fertigform gesteuert und begrenzt. Man hat es in der Fertigform nicht mehr mit einem Fließvorgang, sondern mit einem Verformungsvorgang zu tun. Ziel der vorliegenden Arbeit soll es sein, diesen Verformungsablauf zu schildern und seine Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen darzulegen.

1. Modelltechnik

1.1. Modellstoff

Ebenso wie bei den Untersuchungen zum Vorblasen [2, 3] wurde auch zur Untersuchung des Verformungsablaufes Kübel—Flasche die im Institut für Luftfahrzeugbau unter Leitung von Prof. H. HERTEL entwickelte Modelltechnik angewandt. Als Modellstoff diente die von REINHARDT [2] gefundene Harz-Kombination (Modellstoff G) (Firma Sachse, Berlin), bestehend aus neutralem Ketonharz, wasserfreiem Terpentinharz, Schellack und Rizinusöl. Dieser Stoff ist von brauner Farbe, also nicht transparent wie das in [3] verwendete Clophen A 60. Dafür jedoch wird die beschriebene Harzmischung bei Raumtemperatur fest, so daß es mit diesem Stoff im Gegensatz zum Clophen A 60 möglich ist, den gesamten Fertigungsprozeß vom Tropfen bis zur Fertigflasche zu simulieren. Ähnliche Versuche mit Modellstoffen wurden z. B. auch von BRÉ [4] durchgeführt.

1.2. Modellbedingungen

Wiederum wird in erster Linie, wie schon in [2, 3], Übereinstimmung bezüglich der Abhängigkeit der Zähigkeit von der Temperatur zwischen Glas und dem Modellstoff gefordert, und zwar in dem interessierenden Bereich von $\approx 10^4$ bis 10^9 g/cm s (P) [5]. Diese Abhängigkeit für den Modellstoff und für grünes Flaschenglas ist in Bild 1 dargestellt. Weiter gelten die schon in [3]

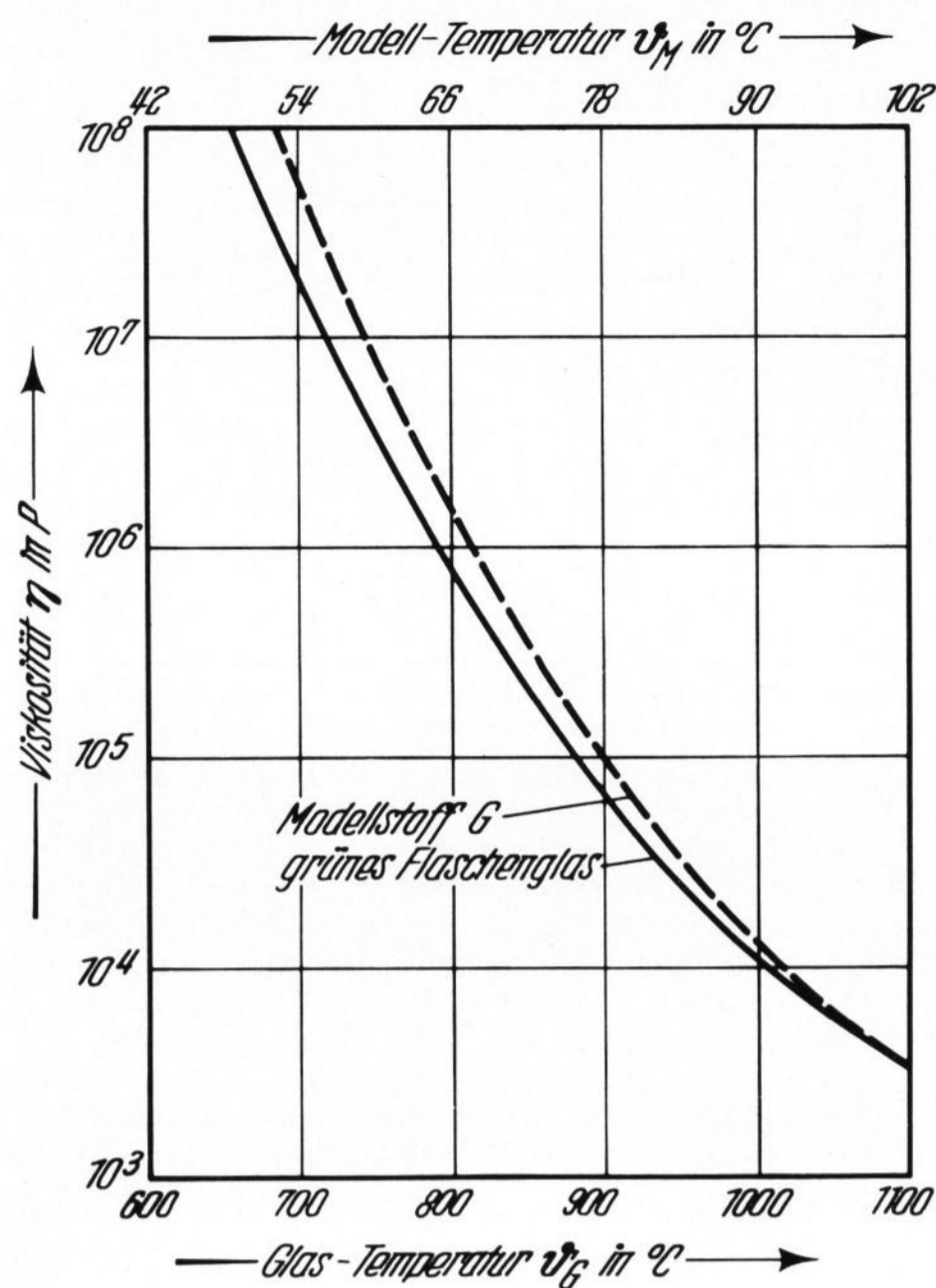


Bild 1. Viskositäts-Temperatur-Verlauf für grünes Flaschenglas und Ketonharz bei modellähnlichen Temperaturen.

aufgeführten Modellbedingungen in dimensionsloser Darstellung [6]:

$$\left(\frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{\vartheta_3 - \vartheta_1}\right)_{\text{Original}} = \left(\frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{\vartheta_3 - \vartheta_1}\right)_{\text{Modell}}, \text{ konstanter Temperatur-Maßstab, (1)}$$

$$\left(\frac{a_s \tau_s}{D^2}\right)_{\text{Original}} = \left(\frac{a_s \tau_s}{D^2}\right)_{\text{Modell}}, \text{ Fourier-Zahl, (2)}$$

$$\left(\frac{a_w \tau_w}{b^2}\right)_{\text{Original}} = \left(\frac{a_w \tau_w}{b^2}\right)_{\text{Modell}}, \text{ Fourier-Zahl, (3)}$$

und $\tau_s = \tau_w$ (4), mit a = Temperaturleitfähigkeit, ϑ = Temperatur in °C, τ = Kontaktzeit in s, b = Wandstärke der Vorform in mm, außerdem zur Erfassung des Wärmeübergangs Flüssigkeit—Wand in der Vorform:

$$\left(\frac{\alpha D}{\lambda}\right)_{\text{Original}} = \left(\frac{\alpha D}{\lambda}\right)_{\text{Modell}}, \text{ Biot-Zahl, (5)}$$

mit α = Wärmeübergangszahl, D = Durchmesser des Kübels und λ = Wärmeleitzahl.

Wegen der Schwierigkeit, diese Gleichungen aufeinander abzustimmen, wurde wie in [3] experimentell eine Angleichung des zeitlich veränderlichen Temperaturprofils im Modellstoff an die von TRIER [7, 8] bei grünem Flaschenglas ermittelten Temperaturverteilungen durchgeführt. Dies erfolgte durch Variation der Kühltemperatur des die doppelwandige Form durchströmenden Kühlmediums und durch Veränderung der Durchflußmenge des Kühlmediums und damit Veränderung der abgeführten Wärmemenge [9]. Die Kühltemperatur kann hierbei nur in den Temperaturgrenzen $\vartheta_K = 50$ bis 35 °C variiert werden, da die Wandtemperatur wie im Originalfall weder zu heiß noch zu kalt sein darf, da auch beim Modellstoff die bei Glas bekannten Phänomene, wie Kleben an der Wand bzw. Kälterisse, auftreten.

1.3. Zuordnung der Versuchszeiten Modellversuch—Originalvorgang

Die für den gesamten Fertigungsprozeß wesentlichen Zeiten sind:

1. Kontaktzeit bis Vorblasbeginn τ' : Darunter wird die Zeitspanne vom Einfall des Tropfens in die Vorform bis zum Beginn des Vorblasens verstanden.

2. Gesamtkontaktzeit τ : Sie setzt sich zusammen aus τ' und der reinen Vorblaszeit τ_B . Die beste Übereinstimmung zwischen Original- und Modelltemperaturverteilung ergab sich für folgende Versuchsbedingungen:

$$\vartheta_k = 45 \text{ °C, Zeitfaktor } f_\tau = \frac{(\tau_2 - \tau_1)_M}{(\tau_2 - \tau_1)_G} = \frac{\tau_{\text{Modell}}}{\tau_{\text{Glas}}} \approx 3,8.$$

3. Rückerwärmungszeit τ_R : Sie ist definiert als Zeitspanne vom Öffnen der Vorform bis zum Schließen der Fertigform. Modelltechnisch läßt sich der während der Rückerwärmungszeit stattfindende Temperaturengleich im

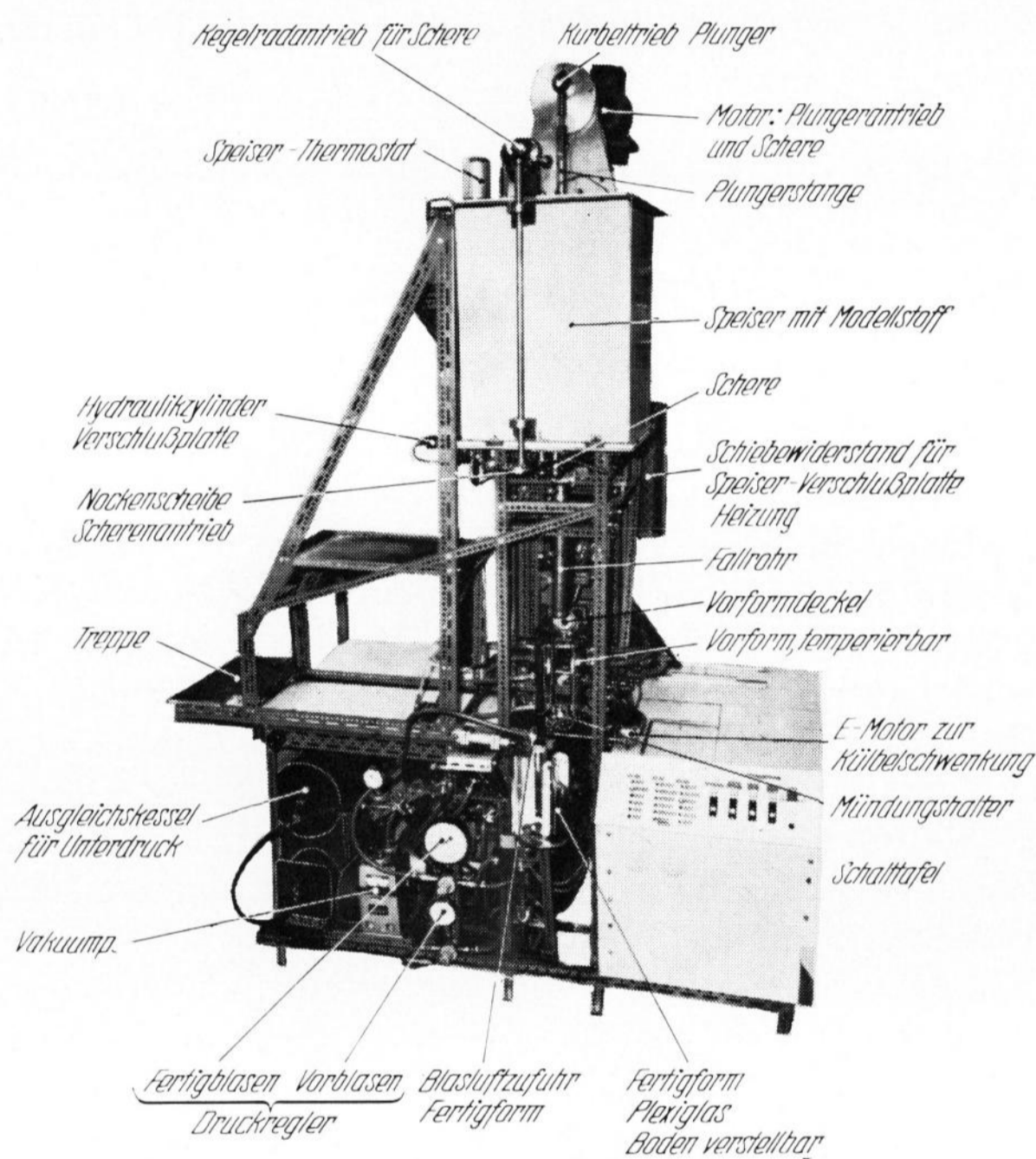


Bild 2. Versuchsanlage zur Untersuchung des Verformungsablaufes Kübel—Flasche im Modell.

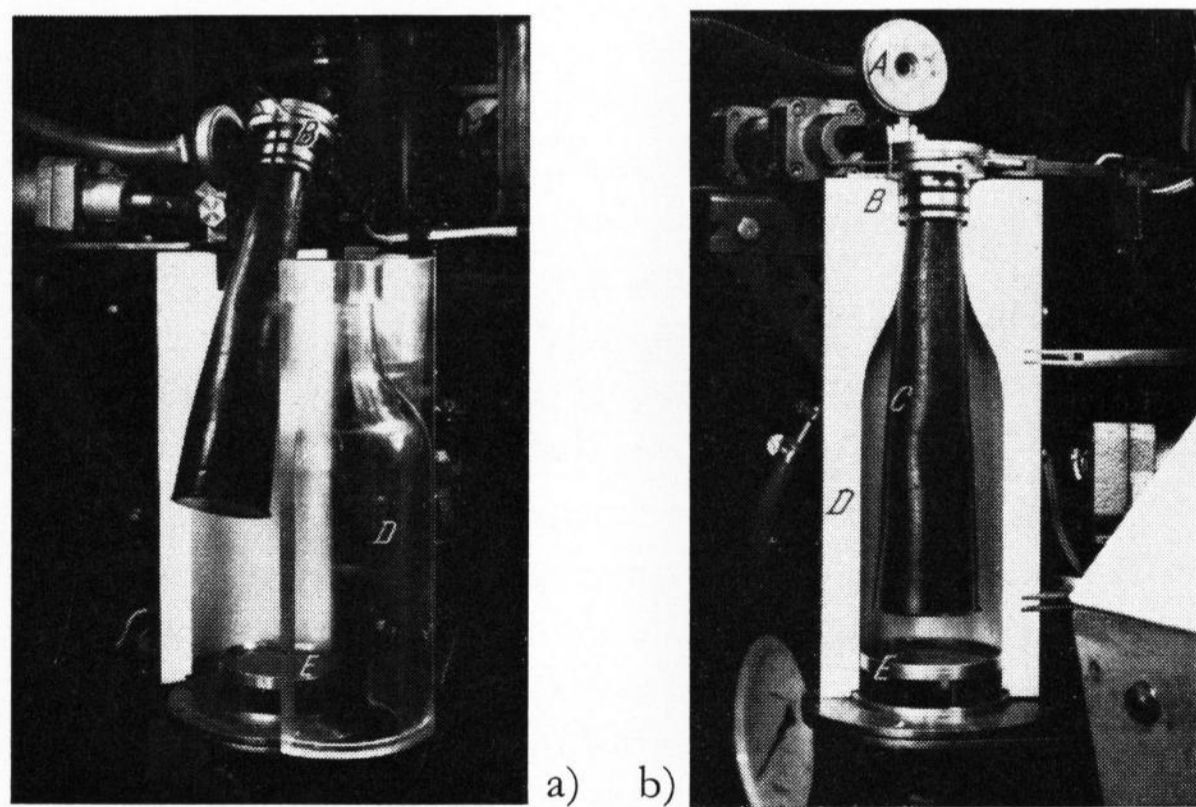


Bild 3. Einschwenken des Kübels in die Fertigform, a) Kübel beim Einschwenken, b) Kübel in der Fertigform.

- A = Deckel mit Blasluftzufuhr,
- B = Mündungshalter,
- C = Kübel aus Ketonharz,
- D = Plexiglasform der Fertigflasche,
- E = Boden (in der Höhe verstellbar).

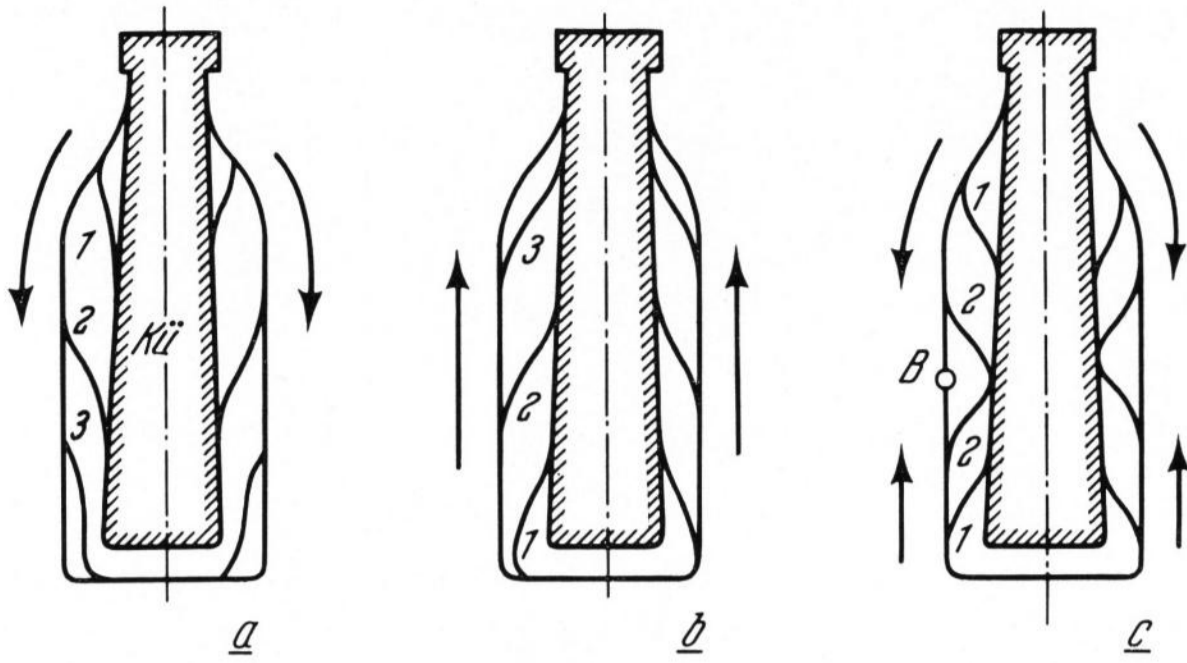


Bild 4. Möglicher Verformungsablauf vom Kübel zur Flasche.

Glas sowie die mechanische Deformation des Kübels durch Umschwenken und Längen schlecht erfassen. Infolge größeren spezifischen Gewichtes langt sich Glas wesentlich stärker als der verwendete Modellstoff. Der Einfluß unterschiedlicher R ckerwarmungszeiten auf den Verformungsvorgang wurde deshalb nicht untersucht. Vielmehr wurde darauf geachtet, die R ckerwarmung stets konstant zu halten, um diesen Einfluß zu eliminieren.

4. Fertigblaszeit τ_F : Sie ist die Zeitspanne vom Schließen bis zum Ende des Verformungsablaufes. Diese Zeitspanne wird entscheidend beeinflusst von der Temperaturverteilung im Kübel nach Beendigung der R ckerwarmung und durch die Höhe des Blasdruckes p_F .

Hiermit ist eine Möglichkeit gegeben, die Fertigblaszeit zu variieren. Zweckmäßigerweise wurde die Fertigblaszeit $\tau_{F,Modell} = \tau_{F,Glas}$ verwendet. Dabei wurde von Werten der Literatur [10, 11] ausgegangen. Der notwendige Blasdruck betrug $p_F \approx 0,6$ at . Mit diesen Werten konnten gute Modellflaschen geblasen werden.

1.4. Versuchsanlage

Bild 2 zeigt die Versuchsanlage. Es handelt sich dabei um eine programmgesteuerte Maschine, die nach dem Blas-Blas-Verfahren ähnlich wie die R7-Maschine [12] arbeitet. Der Modellstoff wird in dem doppelwandigen und damit temperierbaren Speiser auf der Tropfentemperatur von $\vartheta_a = 92^\circ C$ gehalten. Plunger und Schere werden mechanisch angetrieben und sind über ein Kegelradgetriebe in ihrem Bewegungsablauf verkoppelt. Eine heizbare Platte — hydraulisch bewegt —  ffnet und verschließt den Speiser. Diese Platte ist notwendig, da im Modellversuch kein Dauerbetrieb möglich ist. Der Tropfen fällt durch ein teflonbeschichtetes Führungsrohr in die temperierte Vorform aus Messing, wird mit Hilfe einer Vakuumanlage in den Mündungshalter gesaugt und nach Beendigung der Kontaktzeit vorgeblasen. Vorform, Pegel und Vorformdeckel werden pneumatisch bewegt. Der Mündungshalter mit dem vorgeblasenen Kübel wird mit Hilfe eines Elektromotors mit stufenlos regelbarem Getriebe umgeschwenkt. Das Kübel wird genau wie bei der Roirant-R7-Maschine um 180° in die Fertigform eingeschwenkt. Dieser Vorgang ist in Bild 3 dargestellt. Die Fertigform besteht aus Plexiglas, um das Beobachten des Verformungsablaufes vom Kübel zur Flasche zu ermöglichen. Der Boden der Fertigform kann in der Höhe verstellt werden, um die K ubellange zu variieren.

Mit dieser vollautomatisch arbeitenden Versuchsanlage wurde die Voraussetzung zur Untersuchung des

Verformungsablaufes Kübel-Flasche geschaffen. Denn nur mit einer solchen Anlage ist es möglich, die für derartige Untersuchungen notwendige Anzahl von K ubeln gleicher geometrischer Abmessungen und gleicher Temperaturverteilungen herzustellen.

2. Ziel der Untersuchungen

Der Verformungsablauf vom Kübel zur Flasche kann sich — rein  berlegungsmaig — nach drei verschiedenen Arten vollziehen (Bild 4):

1. Die sich aufweitende K ubelkontur legt sich zuerst im Bereich der Flaschenmündung an. Von hier aus breitet sich der fertig geblasene Flaschenteil von oben nach unten aus, so daß sich der Punkt des spätesten Wandkontaktes in Bodennähe befindet (Bild 4a).

2. Der Vorgang verläuft umgekehrt wie unter 1. beschrieben. Das erste Anliegen findet im Bodenbereich statt, der späteste Kontakt im Mündungsbereich (Bild 4b).

3. Der Aufweitungspro des Kübels setzt sowohl im Mündungsbereich als auch im Bodenbereich ein, so daß die Stelle des spätesten Wandkontaktes im Flaschenmittelteil liegt. Bei diesem Verformungsablauf kann es in der Nähe des Punktes B (Bild 4c) zur Faltenbildung kommen. Ergeben sich mehrere Stellen späten Wandkontaktes, dann handelt es sich um eine Variante des hier beschriebenen Verformungsablaufes.

Zweck der am Institut für Luftfahrzeugbau durchgeführten Untersuchungen war es nun festzustellen, wie sich die Verformung wirklich abspielt und unter welchen Voraussetzungen es zu den Verformungsmöglichkeiten 1., 2. oder 3. kommt. Dabei sollten die wichtigsten Einflußgrößen untersucht werden. Dazu kommt die Feststellung des zeitlichen Verformungsablaufes. Ausgeklammert wurde das Problem der Formgestaltung von Vor- und Fertigform. Dieses Problem ist zu vielgestaltig

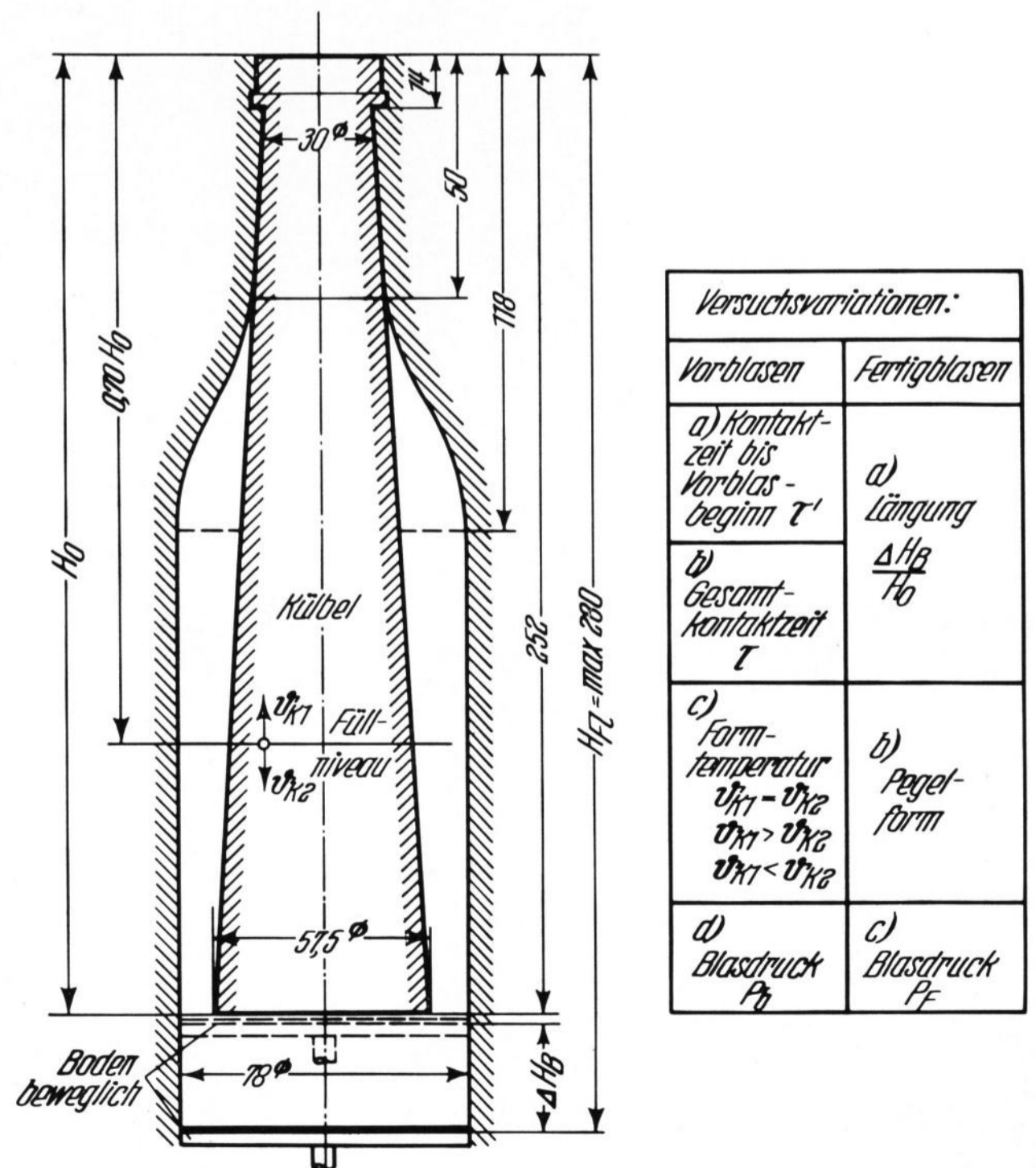


Bild 5. Verwendete Kübel- und Fertigform und Versuchsvariationen.

$\tau' = 4,5$ bis 18 s, $\tau = 12$ bis 70 s, $\vartheta_{k1}/\vartheta_{k2} = 35$ bis $50^\circ C$, $p_b/p_F = 0$ bis $1,5$ atü.

und erfordert jahrelange praktische Erfahrung, so daß es angebracht scheint, derartige weitergehende Untersuchungen erst nach der Erforschung der Grundlagen anzuschneiden. Als Fertigform wurde daher willkürlich eine Form mit ausgeprägtem Schulterbereich genommen, die nach Größe und Gestaltung einer 0,7 l-Weinflasche entspricht. Bild 5 zeigt die verwendete Kübel- und Fertigform sowie die Zusammenfassung der wesentlichsten Versuchsvariationen. Im Mündungsbereich wurde die Flasche mit einem Ring versehen, um das Herausgleiten des Kübels aus dem Mündungshalter zu vermeiden.

3. Einflußgrößen

3.1. Kontaktzeit bis Vorblasbeginn τ'

Die Kontaktzeit bis Vorblasbeginn τ' scheint als wesentlichste Einflußgröße des Flaschenblasens nicht nur das Vorblasen, sondern auch das Fertigblasen zu beeinflussen. Denn während der Kontaktzeit wird nur der Tropfenteil des Kübels gekühlt. Der Blasteil bildet sich aus dem heißen Material, das dem Innern des Tropfens entquillt. Damit wird sich ein Temperaturgefälle in Achsrichtung einstellen, das um so ausgeprägter ist, je länger τ' wird. Während der Rückerwärmungszeit τ_R wird dieses Temperaturgefälle zwar reduziert, jedoch nicht ausgeglichen; es macht sich auch beim Fertigblasen bemerkbar. Wegen der geringeren Zähigkeit des Blasteils gegenüber dem Tropfenteil wird es auch zu stärkerem Aufweiten des Kübels im Bodenbereich kommen, so daß aller Voraussicht nach der Verformungsablauf am Boden der Flasche beginnen und nach oben wellenförmig verlaufen wird. Inwieweit der Kübelboden als „Einspannung“ wirkt, muß im Versuch geklärt werden.

3.2. Gesamtkontaktzeit τ

Außer der Kontaktzeit bis Vorblasbeginn τ' ist auch die Gesamtkontaktzeit τ von Bedeutung für den Verformungsablauf. τ setzt sich wie folgt zusammen:

$$\tau = \tau' + \tau_B + \Delta\tau, \quad (6)$$

mit τ_B = Blaszeit Vorform und $\Delta\tau$ = Zeit bis Öffnen der Form.

τ_B kann über die Höhe des Blasdruckes variiert werden; $\Delta\tau$ bedeutet eine zusätzliche Wartezeit bis zum

Öffnen der Vorform. Eine Verlängerung von τ wirkt sich ausgleichend auf die Temperaturverteilung aus, da das stärkere Temperaturgefälle im Blasteil auch einen schnelleren Ausgleich bedingt, als dies im schon kälteren Tropfenteil der Fall ist. Damit jedoch gleichen sich die Temperaturen im Tropfen- und Blasteil etwas aus. Geringere Temperaturunterschiede im Kübel jedoch werden sich auch beim Fertigblasen bemerkbar machen.

3.3. Vorformtemperatur

Ebenso wie durch die Kontaktzeiten τ' und τ wird auch durch die Intensität der Vorformkühlung die Temperaturverteilung im Kübel beeinflusst. Bekanntlich wird die Vorform und die Fertigform in der Praxis mit Luft gekühlt, wobei die Form durch eine oder mehr Düsen angeblasen wird [13]. Die Kühlung der Vorform kann nun einmal nur unter dem Gesichtspunkt eines optimalen Verformungsablaufs Kübel-Flasche gesehen werden [14]. Es ist zu klären, auf welche Weise sich die günstigste Kühlung im Hinblick auf Vor- und Fertigblasen erreichen läßt. Außerdem ist es von Bedeutung zu wissen, wie sich durch Variation der örtlichen Kühlintensität der Verformungsablauf verändert.

3.4. Einfluß des Kübeldurchmessers auf den Verformungsablauf

Üblicherweise wird das Kübel aus fertigungstechnischen Gründen als Kegelstumpf mit maximalem Durchmesser in Höhe des Kübelbodens ausgebildet. Es erhebt sich nun die Frage, ob bei Annahme einer konstanten Zähigkeit der Kübelteil mit größerem Durchmesser schneller und leichter aufgeweitet werden kann als der Kübelteil mit geringerem Durchmesser. Diese Frage soll durch theoretische Überlegungen geklärt werden.

In Anlehnung an den Schubspannungssatz von NEWTON, der den Fließvorgang beschreibt und der die Proportionalität zwischen der Schubspannung (τ) und der Gleitgeschwindigkeit aufzeigt, muß auch für die Verformung eine Beziehung zwischen der Zugspannung (σ) und der Dehnungsgeschwindigkeit bestehen. Diese Gesetzmäßigkeit wurde von KÖRBER und EICHINGER [15, 16] aufgestellt. Danach gilt:

$$\sigma_g = 3 \eta_m \frac{\partial \delta_g}{\partial t}, \quad (7)$$

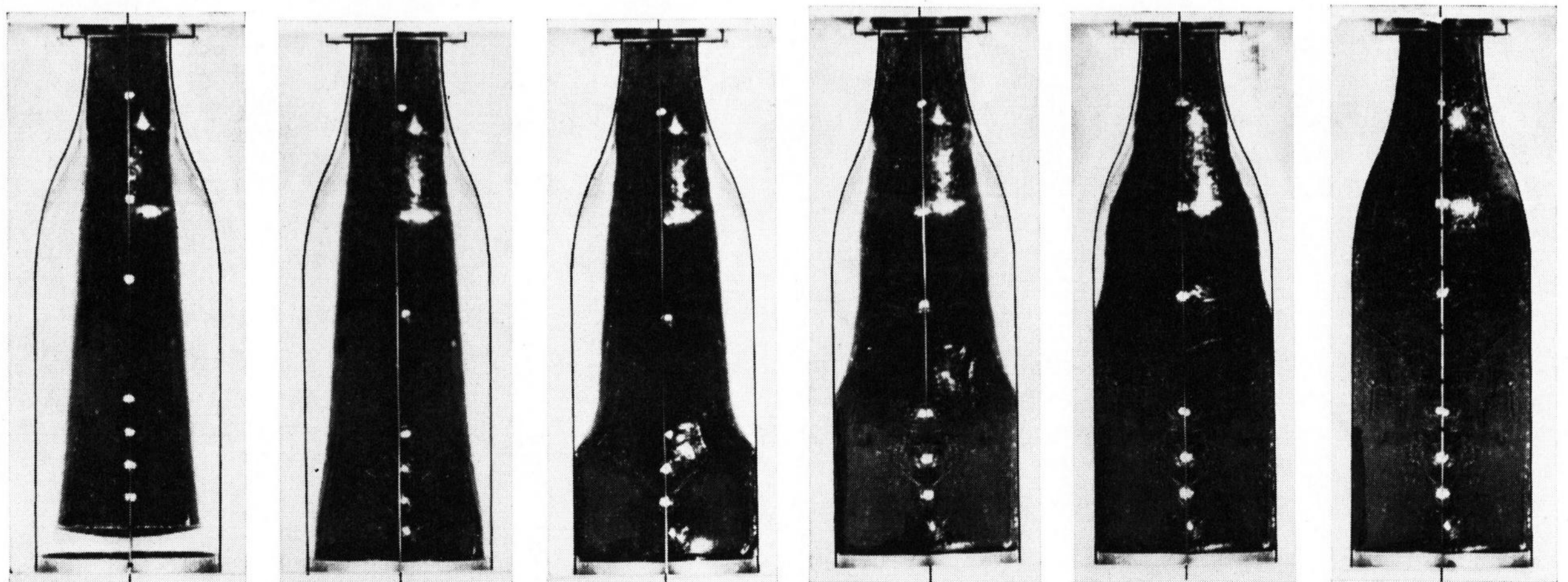


Bild 6. Verformungsablauf in sechs Schritten.

$\vartheta_a = 92^\circ\text{C}$, $\vartheta_k = 45^\circ\text{C}$.

$$\sigma_g = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_y \sigma_z + 3 \tau_{x,y}^2} \quad (8)$$

$$\partial \delta_g = \sqrt{\frac{2}{3} (\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2) + \frac{1}{3} \gamma_{x,y}^2} \quad (9)$$

mit σ_g = Vergleichsspannung, η_m = mittlere dynamische Zähigkeit in P, $\partial \delta_g / \partial t$ = Formänderungsgeschwindigkeit, $\tau_{x,y}$ = Schubspannung in der x,y-Ebene und $\gamma_{x,y}$ = Winkelabweichung.

Vereinfachend läßt sich die Vergleichsdehnung $\partial \delta_g$ als eine Zunahme des jeweiligen Kübelumfanges (U) ansehen, so daß $\partial \delta_g$ wird:

$$\begin{aligned} \partial \delta_g &= dU/U, \\ \frac{\partial \delta_g}{\partial t} &= \frac{dU}{U} \frac{1}{dt} = \frac{(U + dU) - U}{U} \frac{1}{dt} \\ &= \frac{-2\pi(r + dr) - 2\pi r}{2\pi r} \frac{1}{dt} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \delta_g}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{dr}{dt}$$

dr/dt entspricht dabei der Geschwindigkeit der Radiuszunahme r von R_{FI} bis R , während r der jeweilige Radius des sich ausweitenden Kübels ist.

Damit ist also:

$$\sigma_g = 3 \eta_m \cdot \frac{1}{r} \frac{dr}{dt}$$

oder

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\sigma_g \cdot r}{3 \eta_m} \quad (11)$$

Die Vergleichsspannung wird dem im Inneren des Kübels herrschenden Druck p_F entsprechend angenähert $\sigma_g = p_F$.

Damit wird:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{p_F \cdot r}{3 \eta_m} \quad (12)$$

Das bedeutet, daß $\frac{dr}{dt} \approx r$ wird. Also wird das Material um so schneller fließen, je größer der Radius des Kübels ist. Zum anderen wird sich das Kübel im Bereich maximaler Durchmesser zuerst aufweiten, da es hier schon bei geringerem Druck zur Verformung kommt als dies bei kleinen Kübeldurchmessern der Fall ist. Der Innendruck p_F durchläuft jedoch alle Werte von 0 bis p_F (atü), da er sich im Innern des Kübels bekanntlich erst aufbauen muß. Der Kübelboden wiederum wird voraussichtlich stützend wirken, so daß in seiner unmittelbaren Nähe die Aufweitungsgeschwindigkeit geringer sein wird.

4. Versuchsdurchführung

4.1. Beschreibung

Die in der Vorform nach dem beschriebenen Arbeitsablauf (Tropfenfall-Einsaugen-Vorblasen) gefertigten Kübel aus Modellstoff erhalten in der Vorform kurz nach Beendigung des Blasprozesses weiße Kontrastpartikel aus Styropor eingepreßt. Damit können die Verformungswege in Achsrichtung festgestellt werden.

Nach dem Öffnen der Vorform wurde das Kübel in die Fertigform eingeschwenkt, wobei die Rückerwärmungszeit bei allen Versuchen 5 s betrug.

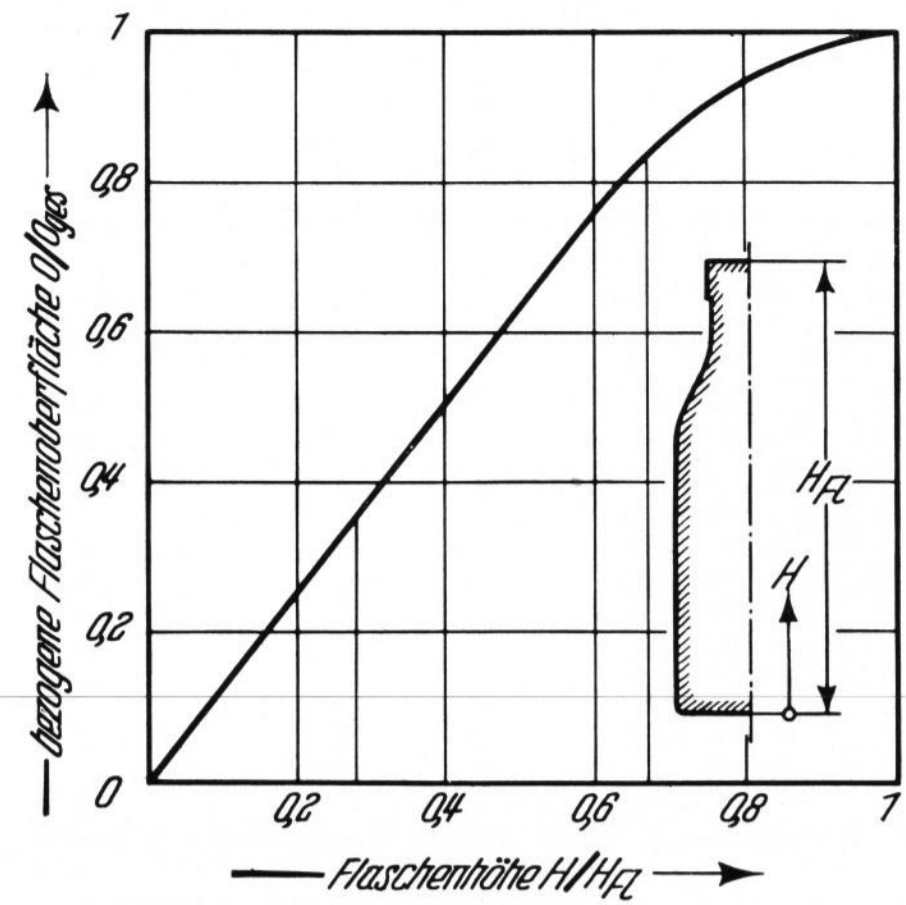


Bild 7. Abhängigkeit der Flaschenoberfläche von der Flaschenhöhe H/H_{FI} .

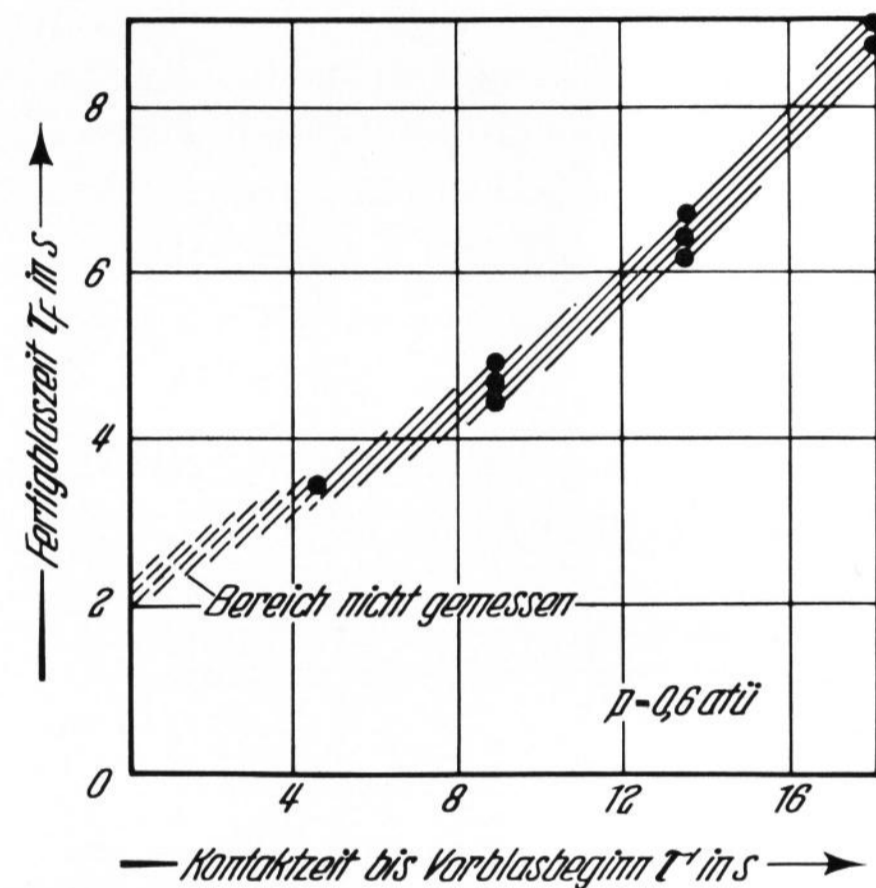


Bild 8. Abhängigkeit der Fertigblaszeit von der Kontaktzeit bis Vorblasbeginn.

$$\vartheta_a = 92^\circ\text{C}, \vartheta_k = 45^\circ\text{C}.$$

$$\text{Blasstufe: Vorform } \tau_{\text{Glas}} \approx \frac{\tau_{\text{Modell}}}{3,8},$$

$$\text{Fertigform } \tau_{\text{Glas}} = \tau_{\text{F Modell}}.$$

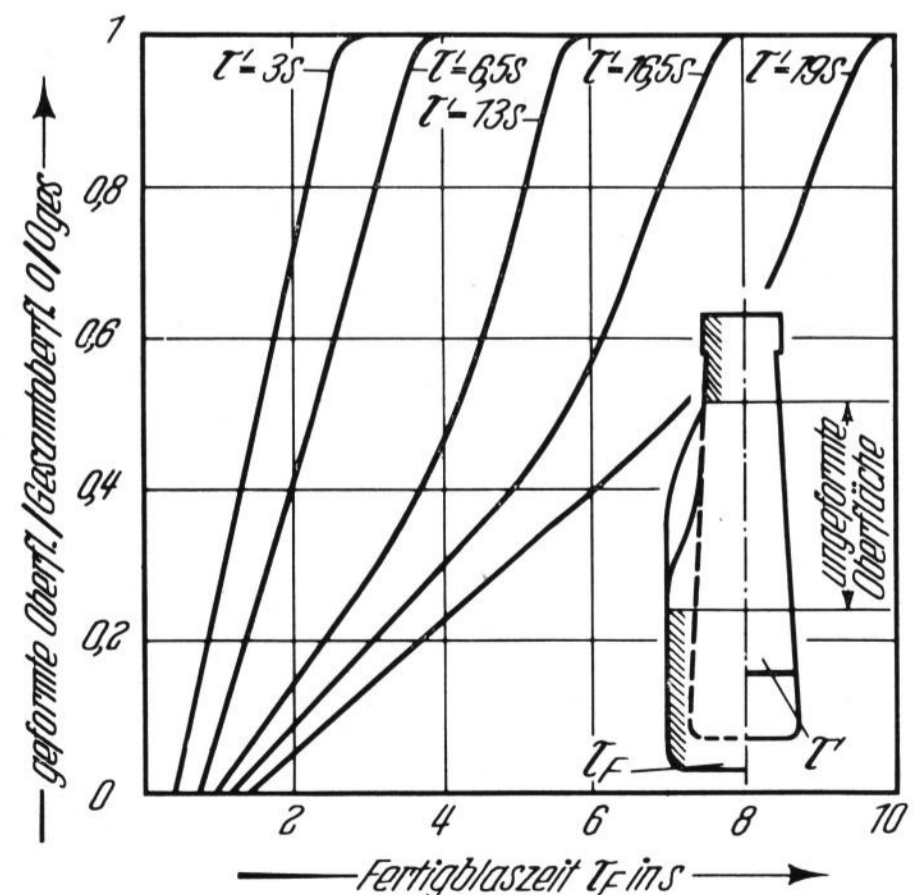


Bild 9. Zeitlicher Ablauf des Fertigblasens, Variation der Kontaktzeit.

$$\vartheta_{k1} = \vartheta_{k2} = 45^\circ\text{C}, \tau'_{\text{Glas}} = \frac{\tau'_{\text{Modell}}}{3,8}.$$

Folgende Versuchsvariationen wurden durchgeführt (Bild 5):

- τ' : von 4,5 bis 18 s,
- τ : von 12 bis 60 s,
- Kühltemperatur Vorform $\vartheta_k = 45^\circ\text{C}$ konst. Vorform verschieden temperiert mit $\vartheta_{k1} = 36^\circ\text{C}$, $\vartheta_{k2} = 49^\circ\text{C}$,
- Längung des Kübels von 10 mm bis 30 mm (Flaschenhöhe 272 mm),
- Pegellänge 5 mm bis 10 mm.

Jede Versuchsserie bestand aus acht Einzelversuchen mit gleichen Versuchsbedingungen. Die sich ergebenden Werte wurden durch Mittelwertbildung gefunden. Dabei wurden ausgewertet: 1. Radiale und axiale Verformungswege durch fotografische Serienaufnahmen (Robot) unter Verwendung eines Teleobjektivs zur Verringerung axialer Verzerrungen und 2. Zeitaufnahmen mit elektrischer Stopuhr.

Bild 6 (S. 398) zeigt den Verformungsablauf in sechs Schritten vom sich in der Fertigform längenden Kübel bis zur fertig geblasenen Flasche. Die weißen Kontrastpunkte längs der Achse heben sich deutlich ab. Nach den Filmaufnahmen wurden die Konturen des sich verformenden Kübels herausgezeichnet und ausgewertet.

4.2. Grafische Darstellung des Verformungsverlaufes

Zur Verdeutlichung des Verformungsvorganges soll eine grafische Darstellung gewählt werden, die das

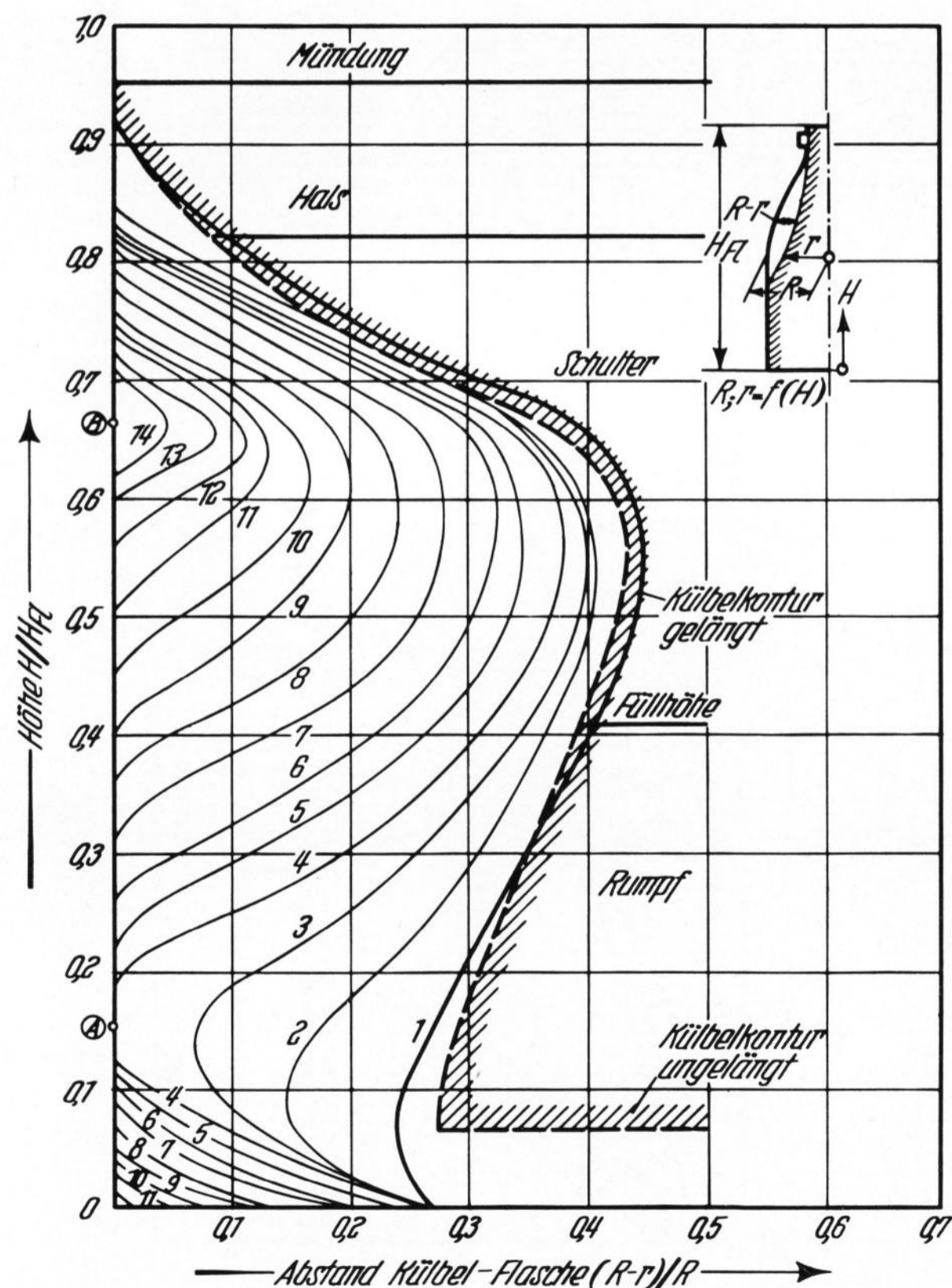


Bild 10. Anlegen des Kübels an die Formwand, Kontaktzeit $\tau' = 4,5$ s.

Gesamtkontaktzeit: $\tau = 12$ s, $\vartheta_a = 92^\circ\text{C}$, $\vartheta_k = 45^\circ\text{C}$.

(A) = Stelle des ersten Wandkontaktes,

(B) = Stelle des spätesten Wandkontaktes.

Wesentliche dieses Ablaufes stärker zur Geltung bringt. So ist es zum Beispiel wichtig zu wissen, wie groß die von der Kübelwand zurückzulegenden Verformungswege bis zur Fertigflaschenform mit anwachsender Höhe H werden. Damit wird nach dem jeweiligen Abstand $s = R - r$ gefragt. Wird dieser Abstand auf den ebenfalls mit H veränderlichen Flaschenradius bezogen, dann erhält man eine Darstellung, bei der 1. die Kontur der Fertigform zur Ordinate des Diagramms wird. Fällt die Kübelkontur nämlich mit der Fertigformkontur zusammen, dann wird $s = R - r = 0$. Damit können die beiden Konturen auf eine Kurve reduziert werden. 2. wird bei dieser Darstellung infolge der dimensionslosen Auftragung von $(R-r)/R = f(H/H_{Fl})$ der Vergleich verschiedenartiger Kübel- und Flaschenkonturen vereinfacht und 3. kann der interessierende Abstand zwischen Kübel und Fertigflasche auf einfache Weise beliebig gedehnt werden. Auf die weiteren Einzelheiten soll in Abschnitt 5. eingegangen werden.

4.3. Oberfläche = f (Flaschenhöhe)

Zur Erfassung des Verformungsgrades ist es notwendig, eine Bezugsgröße zu seiner Definition zu bestimmen. Das kann mit Hilfe der Höhe H^* (siehe Bild 14) geschehen, oder der Verformungsgrad wird als Verhältnis der bereits fertig geformten Oberfläche zu der Gesamtoberfläche der Fertigflasche definiert. Diese Möglichkeit erschien günstiger, da in dieser Form auch die 3. Variante des in Abschnitt 2. beschriebenen Verformungsablaufes erfaßt werden kann, bei dem sich die Verformung vom Mündungsbereich und Bodenbereich ausdehnt. Den Zusammenhang zwischen der vom Boden aus ansteigenden Höhe H/H_{Fl} und der Flaschen-Mantelfläche der für die Modellversuche verwendeten Fertigform (Bild 5) liefert Bild 7. Nach linearem Anstieg im Rumpfbereich ergibt sich wegen der Durchmesserabnahme im Schulterbereich die gezeichnete Kurvenkrümmung.

5. Versuchsergebnisse

5.1. Zusammenhang zwischen Kontaktzeit τ' und Fertigblaszeit τ_F

Anwachsende Kontaktzeit bis Vorblasbeginn τ' bedeutet längere Kühlzeit des heißen Glaspöfens und damit Anstieg der Zähigkeit. Bei konstanter Rückwärmungszeit muß demnach ein zähflüssigeres Kübel fertiggeblasen werden: τ_F steigt an. Diese Abhängigkeit ist in Bild 8 in Form eines Streubandes dargestellt. Für $\tau' = 0$ ergibt sich theoretisch ein endlicher Wert für τ_F , da auch bei sofortigem Vorblasen eines Glaspöfens zum Kübel eine gewisse Zeit zum Fertigblasen erforderlich wäre. Mit wachsender Kontaktzeit τ' steigt die Fertigblaszeit progressiv an, um für einen Grenzwert von τ' asymptotisch nach ∞ zu streben. Das bedeutet, daß für eine Kontaktzeit τ' , bei der noch ein Kübel geblasen werden kann, dennoch mit dem angelegten Fertigblasdruck von $p_F = 0,6$ atü keine Flasche mehr zustande gebracht wird.

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf des einzelnen Blasprozesses, dann ergibt sich Bild 9. Es zeigt den mit der Fertigblaszeit τ_F anwachsenden Anteil des fertig geblasenen Oberflächenabschnitts zur Gesamtoberfläche der Flasche für die untersuchten Vorformkontaktzeiten τ' . Während sich bei geringen Kontaktzeiten τ' ein gleichmäßiges Anlegen des Materials an der Fertigform ein-

stellt, ändert sich dieses Verhalten für längere Kontaktzeiten: die Kurven für $\tau' = 3,5$ bis $6,5$ s werden nahezu Geraden; die Kurven für höhere Kontaktzeiten zeigen einen Knick. Dieser Knick im Kurvenverlauf bedeutet, daß bei langen Kontaktzeiten die Verformung anfangs verzögert abläuft und bei Überschreiten eines bestimmten, mit τ' veränderlichem Verformungsgrad der Anblasvorgang beschleunigt wird.

Mitursache für diesen Sachverhalt wird die verlängerte Rückerwärmungszeit des noch nicht anliegenden Materialbereichs sein, die besonders bei langen Kontaktzeiten und daraus folgender langer Kühlzeit der Kübelaußenzone für den Verformungsablauf von Bedeutung wird. Die für alle Kontaktzeiten beobachtete Verzögerung bei der Bildung des letzten geformten Oberflächenanteils ($O/O_{ges} = 0,95$ bis 1) rührt von dem Luftpilster her, das ganz zum Schluß aus der Fertigform gedrückt werden muß.

5.2. Verformungsablauf bei Variation der Kontaktzeit τ'

5.2.1. Kurze Kontaktzeit τ'

Entsprechend der unter 4.2. beschriebenen Darstellungsweise wurde im Bild 10 für eine extrem kurze Kontaktzeit von $\tau' = 4,5$ s der Verformungsablauf aufgezeichnet. Die Kübelkontur, bezogen auf die Kontur der Fertigflasche, erscheint in Bild 10 als Kurve a) (durch Schraffur hervorgehoben). Die geringere Kübellänge gegenüber der Flaschenlänge bedingt den Kurvenverlauf bei $H/H_F = 0,074 \cong$ Längung $\Delta H_B = 20$ mm. Die Kurve mündet bei $H/H_{FI} = 0,94$ in die Ordinate ein, da im Bereich der Mündung Kübelform und Flaschenform zusammenfällt.

Das Kübel ist infolge der geringen Abkühlzeit in der Vorform von niedriger mittlerer Viskosität und damit leicht verformbar.

Der Kübeldurchmesser verringert sich während der Längung — es ergibt sich die Kurve b). Kurz vor dem Aufsetzen des Kübels auf dem Formboden wird mit dem Fertigblasen begonnen. Die Kübelkontur a) verändert sich über die Zwischenstufen 1 bis 14 zur Ordinate des Diagramms, wobei die Stelle ersten Wandkontaktes A bei $0,13 H/H_{FI}$ und die Stelle spätesten Wandkontaktes B bei $0,67 H/H_{FI}$ liegen.

Wie ersichtlich ist, läuft der Verformungsvorgang entsprechend der 3. Variante des in Abschnitt 2 geschilderten möglichen Vorganges ab, wobei allerdings der vom Boden aus nach oben ablaufende Aufweitungsprozeß wesentlich ausgeprägter erscheint als der von oben nach unten verlaufende.

5.2.1.1. Bodenbereich

Die Versuche zeigten deutlich die verformungshemmende Wirkung des Kübelbodens. Diese Wirkung ist voraussehbar, da es ohne Zweifel leichter ist, einen ringförmigen Kübelabschnitt ohne Boden aufzuweiten, als einen, der einseitig noch von einem Boden zusammengehalten wird. Dabei spielt es keine wesentliche Rolle, daß auch der Boden selbst zähflüssig und verformbar ist. Beobachtungen von EITEL an Glas zeigen ebenfalls eine derartige Wirkung des Bodens [17]. Zum anderen bewirkt der angelegte Innendruck eine beschleunigte Kübellängung bis zum Aufsetzen auf dem Fertigformboden. Während der hierbei verstreichenden geringen

Zeitspanne wird der Bodenbereich des Kübels nur wenig aufgeweitet. Nach dem Aufsetzen jedoch bewirkt auch noch die Reibung Kübelboden-Formboden eine Verlangsamung des radialen Aufweitungsprozesses am Boden. Es kommt zu dem in Bild 10 eingetragenen Verlauf im Bereich des Diagramm-Ursprungs und damit auch zur Lage des Punktes A bei $H = 0,13 H_{FI}$. Dieser geschilderte Verformungsprozeß im Bodenbereich kann durch die Wahl der Zeitspanne zwischen Beginn der Kübellängung und Einsetzen des Fertigblasens variiert werden. Prinzipiell jedoch wird der Punkt A nie mit dem Koordinaten-Ursprung zusammenfallen.

5.2.1.2. Rumpfbereich

Das höhere Temperaturniveau des Kübel-Blasteils gegenüber dem Tropfenteil, verbunden mit der Durchmesserzunahme in Richtung Kübelboden, bewirken die gegenüber dem Schulterbereich höhere Aufweitungsgeschwindigkeit dr/dt . Dazu kommt, daß wegen der Wahl von Kübel- und Flaschenform die radialen Wege, die von dem zähflüssigen Material zurückzulegen sind, mit wachsender Höhe H/H_{FI} größer werden, um im Schulter- und Halsbereich wieder abzunehmen. Aus dem Bild 10 geht hervor, daß die Stelle spätesten Wandkontaktes mit der Fertigform dort liegt, wo auch der maximale Abstand Kübel-Flasche auftritt; in diesem Fall bei $H/H_{FI} = 0,67$.

5.2.1.3. Halsbereich

Entsprechend dem niedrigen Temperaturniveau des Hals- und Mündungsbereiches sowie des geringen Kübeldurchmessers ergibt sich auch eine langsame Aufweitung in diesem Abschnitt. Wegen der geringen Wege, die zurückzulegen sind, kommt es jedoch trotzdem zusammen mit dem Rumpfbereich zum Wandkontakt.

5.2.1.4. Verformung in axialer Richtung

Mit Hilfe der in das Kübel eingedrückten Kontrastpunkte konnte beobachtet werden, daß das Material nicht nur während der Kübellängung sondern auch während des Fertigblasprozesses in axialer Richtung wandert. Diese axiale Verformung, abhängig von der Fertigblaszeit, ist in Bild 11 für die extrem kurze Kontaktzeit von $\tau' = 4,5$ s aufgetragen.

Aus Bild 11 kann für jede Zeit zwischen $t = 0$ (s) und $t = \tau_F$ (s) die jeweilige Höhe H/H_{FI} von Kübelpartikeln

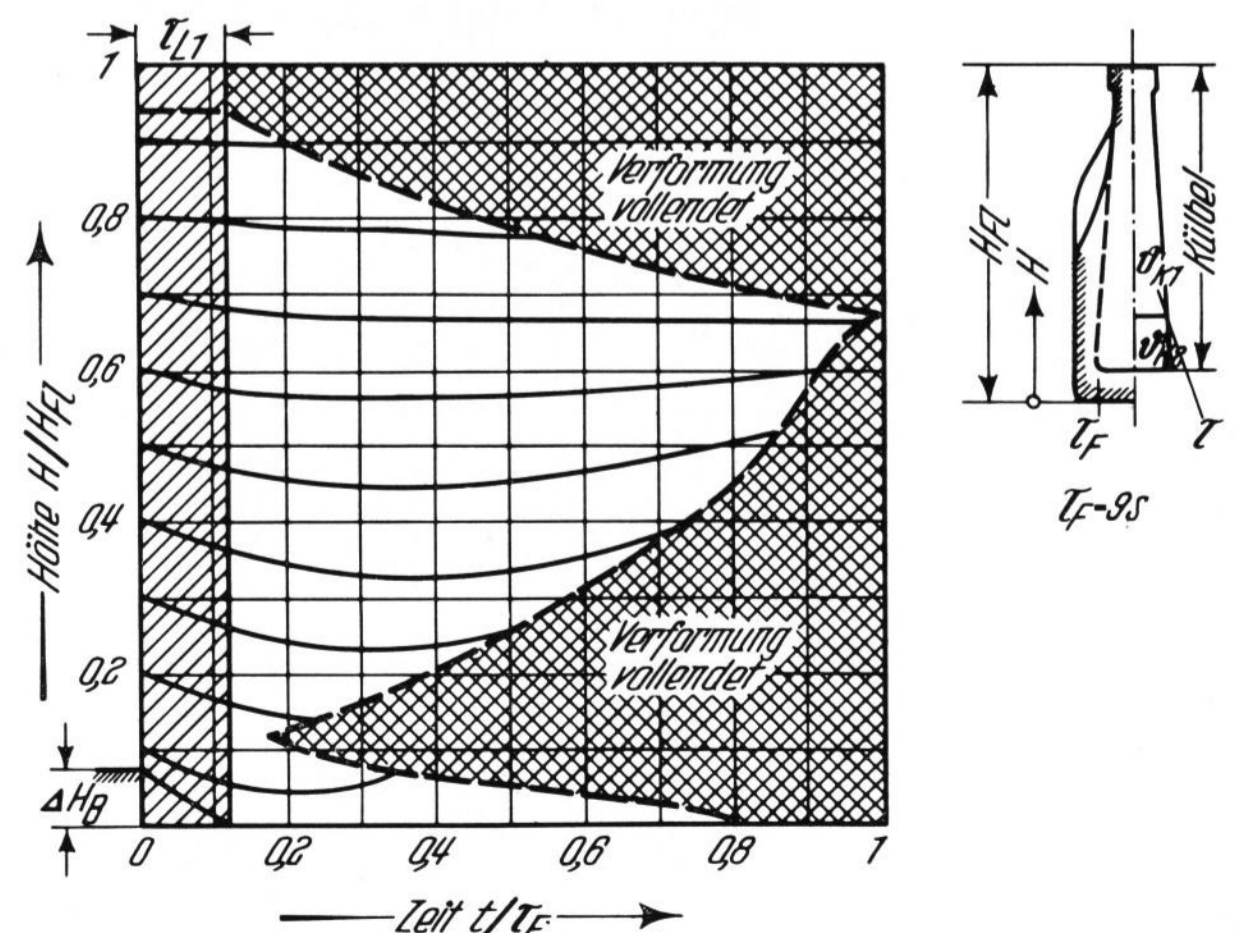


Bild 11. Zeitlicher Verformungsablauf in axialer Richtung.

$$\vartheta_{K1} = \vartheta_{K2} = 45^\circ\text{C}, \vartheta_a = 92^\circ\text{C},$$

$$\tau' = 4,5 \text{ s} \cong \tau_{\text{Glas}} = 1,2 \text{ s},$$

$$\tau_F = \tau_{F \text{ Glas}} = 3,5 \text{ s}.$$

mit den Ausgangshöhen ($t = 0$ s) $H = 0,1 H_{Fl}; 0,2 H_{Fl}; 0,3 \dots 1 H_{Fl}$ entnommen werden. Damit wird jedoch auch etwas über die axialen Wege dieser Partikel ausgesagt. Bild 11 zeigt weiterhin die für jede Ausgangshöhe H/H_{Fl} des Kübels zutreffende Fertigblaszeit t auf: Eine Grenzkurve unterteilt das Diagramm in einen Verformungsbereich und in einen Bereich mit abgeschlossener Verformung (schraffierter Bereich). Man erkennt deutlich, daß es bei $H/H_{Fl} = 0,13$ nach $t = 0,17 \tau_F$ zum ersten Wandkontakt kommt (dieser Punkt entspricht Punkt A) (Bild 10), daß die Verformung in einer Höhe von $H = 0,67 H_{Fl}$ entsprechend Punkt B (Bild 10) abgeschlossen wird ($t/\tau_F = 1$), daß beim Einsetzen des Fertigblasens der Boden des bereits gelangten Kübels noch $\Delta H_B = 0,03 H_{Fl}$ vom Flaschenboden entfernt war und die Zeit zum Zurücklegen dieser Distanz $\tau'_i \approx 0,1 \tau_F$ betrug und daß sich im Bereich des Bodens der Aufweitungsprozeß $t = 0,8 \tau_F$ verzögert.

Alle diese Symptome des Fertigblasprozesses mit $\tau' = 4,5$ s sind schon aus Bild 10 bekannt, jedoch ohne die Zuordnung der Zeit.

Die Kurven, aus denen die axialen Verformungswege zu entnehmen sind, enden an der beschriebenen Grenzkurve. Sie weisen übereinstimmend ein Minimum auf. Daraus geht hervor, daß das Material des sich ausdehnenden Kübels während des Fertigblasens zuerst noch in Richtung auf den Flaschenboden und dann nach einer von der Höhe H/H_{Fl} abhängenden Zeit in entgegengesetzter Richtung — also zur Mündung hin — gedrückt wird.

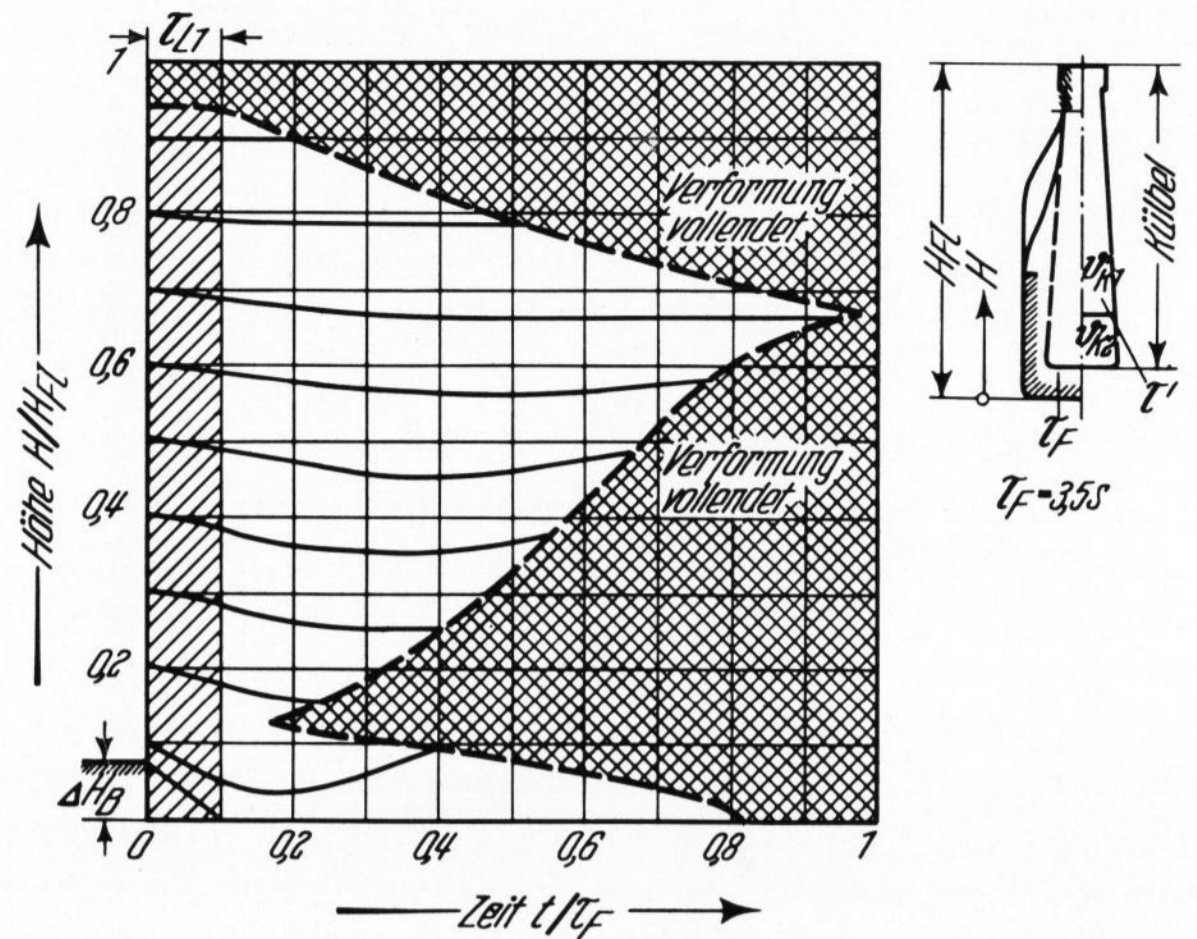


Bild 13. Zeitlicher Verformungsablauf in axialer Richtung.
 $\vartheta_{k1} = \vartheta_{k2} = 45^\circ\text{C}$, $\vartheta_a = 92^\circ\text{C}$,
 $\tau' = 18 \text{ s} \approx \tau_{\text{Glas}} = 4,8 \text{ s}$, $\tau_F = \tau_{\text{FGlas}} = 9 \text{ s}$.

Das axiale Verformungsverhalten wird wie folgt erklärt:

a) Die Abwärtsbewegung ($H \rightarrow 0$) ist aus der axialen Bewegung infolge der Kübellängung zu erklären, die durch das Einsetzen des Blasdruckes kräftig unterstützt wird. Dazu kommt, daß der sich stark aufweitende Kübelbereich Material von dem weniger verformten Gebiet „abzieht“.

b) Die Aufwärtsbewegung ($H \rightarrow H_{Fl}$) läßt sich an Hand des Verformungsablaufs, wie er in Bild 10 geschildert wird, erklären. Da es wegen der in Abschnitt 3.1., 3.3. und 3.4. gemachten Aussagen zu dem in Bild 10 dargestellten Ablauf mit den Kübelkonturen 1 bis 14 kommen muß, ergibt sich auch eine nach oben auf die zähflüssige Wand wirkende Kraft p_{ax} . Der Innendruck p_F , der stets senkrecht auf der Wand steht, kann in p_{ax} und p_{rad} aufgespalten werden. Bei Umkehrung des Verformungsablaufes jedoch, wie dies im Bereich $H/H_{Fl} = 1$ bis $0,67$ (Punkt B) der Fall ist, muß auch eine nach unten gerichtete axiale Bewegungsrichtung einstellen. Dies läßt sich an Bild 11 ebenfalls ablesen.

5.2.2. Lange Kontaktzeit τ'

5.2.2.1. Verformung — Konturverlauf

Der Verformungsablauf, wie er sich bei langer Abkühlzeit des Tropfenteils einstellt, ist in Bild 12 dargestellt. Gegenüber kurzer Kontaktzeit ergibt sich folgende Veränderung der physikalischen Gegebenheiten: 1. allgemeine Temperaturverringerung und damit Zähigkeitserhöhung im Kübel, 2. größerer Temperaturunterschied zwischen Tropfen- und Blasteil, 3. größere Wandstärke im Kübeltropfenteil [3] und 4. geringere Wandstärke im Blasteil [3].

Trotz dieser Unterschiede verläuft der Aufweitungsprozeß ganz ähnlich wie der in Bild 10 dargestellte Prozeß für kurze Kontaktzeiten. Die Stellen des ersten bzw. des spätesten Wandkontaktes befinden sich nahezu in derselben Höhe; der Verformungsverlauf im Hals- und im Bodenbereich verläuft gleich. Nur im Bereich der Vorform-Füllhöhe und des unteren Rumpfbereiches zeigt sich die aus der langen Kontaktzeit resultierende Veränderung. Wegen des ausgeprägten Zähigkeitsgefälles sowie der Wandstärkenverringerung in der Umgebung der Füllhöhe wird der Kübelblasteil kräftig

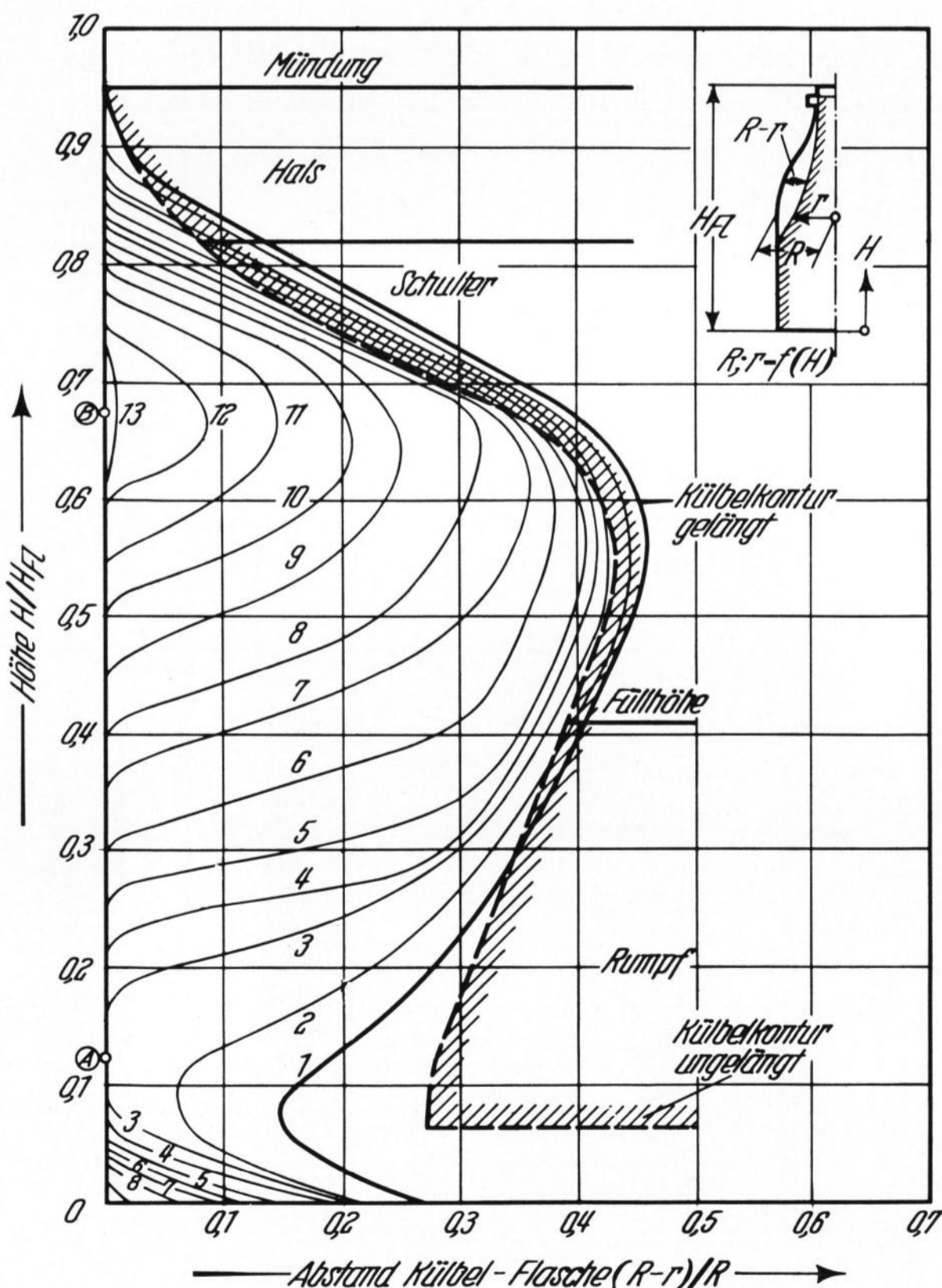


Bild 12. Anlegen des Kübels an die Formwand, Kontaktzeit $\tau' = 18$ s.

Gesamtkontaktzeit: $\tau = 26$ s, $\vartheta_a = 92^\circ\text{C}$, $\vartheta_k = 45^\circ\text{C}$.

(A) = Stelle des ersten Wandkontaktes,

(B) = Stelle des spätesten Wandkontaktes.

aufgeweitet, während dies im darüberliegenden Tropfenteil nicht der Fall ist. Das hat eine starke Richtungsänderung der Konturlinien im Bereich $H = (0,25 \text{ bis } 0,4) H_{FI}$ zur Folge: Der Winkel β zwischen Konturverlauf und Fertigform, unter dem die Konturlinie in die Ordinate einmündet, nimmt zu.

5.2.2.2. Verformung axial; zeitlicher Ablauf

Größere Zähigkeit des Kübels, zusammen mit der dickeren Kübelwand im Tropfenteil, bedeuten bei Einhalten eines konstanten Blasdruckes natürlich eine Verlangsamung des Verformungsablaufes. Dies geht bereits aus Bild 9 hervor. τ_F wächst auf 9 s an. Auch der zeitliche Ablauf des Fertigblasprozesses verändert sich — wie Bild 9 zeigt — mit wachsender Kontaktzeit: Es ergibt sich gegenüber Bild 11 eine andere Grenzkurve zwischen dem Bereich, in dem sich die Verformung abspielt und dem Bereich mit abgeschlossener Verformung (Bild 13).

Weiter folgt aus der unter 5.2.1.4. ausgeführten Erklärung der axialen Aufwärtsbewegung sowie dem Konturverlauf in Bild 12 eine stärkere, nach oben wirkende Kraft für den Bereich $H = (0,12 \text{ bis } 0,68) H_{FI}$, als dies bei geringer Kontaktzeit τ' der Fall ist. Andererseits folgt aus dem größeren Temperaturunterschied zwischen Tropfenteil und Blasteil, der sich wegen der langen Abkühlzeit einstellt, eine starke Längung des heißeren Blasteils und eine weniger ausgeprägte im Tropfenteil. So ist es zu erklären, daß die Kurven $H/H_{FI} = f(t/\tau_F)$ mit dem Ausgangspunkt $H/H_{FI} = 0,1$ bis $0,3$ eine starke Krümmung aufweisen, da sowohl die axiale Abwärtsbewegung infolge Kübellängung als auch die axiale Aufwärtsbewegung des Konturverlaufes und des angewachsenen Winkels α ausgeprägter sind als bei geringen Kontaktzeiten. Der Grenzfall ist: Wird τ' noch weiter gesteigert, dann wächst der Winkel β zwischen Ordinate und Kontur solange weiter an, bis die Luft eine „Tasche“ gebildet hat und durchbricht. Die Gefahr eines derartigen Bruches ist für diesen Flaschenbereich zwischen $H/H_{FI} = 0,2$ bis $0,3$ am größten.

5.3. Variation der Gesamtkontaktzeit τ

Nach Definition setzt sich die Gesamtkontaktzeit τ zusammen aus der Kontaktzeit bis Vorblasbeginn τ' , der Vorblaszeit τ_B und einer zusätzlichen Wartezeit $\Delta\tau$, die bis zum Öffnen der Vorform vergeht.

Mit der Veränderung der Gesamtkontaktzeit τ kann zum einen die Temperatur des vorgeblasenen Kübels und zum anderen die Temperaturdifferenz zwischen Tropfenteil und Blasteil variiert werden. Dabei entsprechen: Lange Kontaktzeit $\tau \cong$ verringerte Temperaturdifferenz, angewachsene Zähigkeit und umgekehrt.

Variiert wird die Gesamtkontaktzeit über den Blasdruck p_B , d. h. über die Vorblaszeit τ_B und über die Wartezeit $\Delta\tau$. Es ist nun von Interesse zu wissen, ob durch Verlängerung der Kontaktzeit τ ein ausgeglichener Verformungsablauf zustande kommt, da eine derartige Verlängerung bekanntlich von der praktischen Seite her unerwünscht ist und deshalb nach Möglichkeit vermieden werden sollte. Zum Vergleich wurden in Bild 14 die Ergebnisse der Versuche mit verlängerter Kontaktzeit τ zusammen mit den bereits bekannten Ergebnissen aus den Bildern 10 bis 13 aufgezeichnet. Aufgetragen ist in Bild 14 der bereits zurückgelegte radiale Weg $\Delta s/s$ über der Höhe. Es werden fünf Kurven miteinander verglichen, die demselben Fertigblasstadium entsprechen, d. h. der bereits ausgeblasene Rumpfteil reicht bis H^* .

Für lange Kontaktzeit bis Vorblasbeginn gilt Kurve a). Sie wird charakterisiert durch starke Kübeldehnung bis $0,3 H_{FI}$; steiler Abfall zwischen $0,3 H_{FI}$ und $0,4 H_{FI}$, Auftreten negativer Werte infolge Kübellängung bei $0,6 H_{FI}$, verbunden mit Durchmessererringerung. Der Mündungs- und Halsbereich ist dabei erst bis $0,88 H_{FI}$ fertiggeblasen.

Wird die Kontaktzeit bis Vorblasbeginn verringert, dann ergeben sich die Kurven b) und c) bis e). Die Tendenz zu ausgeglichenerer Verformung über das ganze Kübel ist wegen der verringerten Temperaturgefälle einleuchtend. Bei konstanter Kontaktzeit τ' , jedoch ver-

Bild 14. Radiale Aufweitung des Kübels in Abhängigkeit von der Höhe für $H^* = 0,2 H_{FI}$.

Längung $H_B/H_0 = 0,069$,
 $\vartheta_a = 92^\circ\text{C}$, $\vartheta_k = 45^\circ\text{C}$.

Kurve a: $\tau' = 18 \text{ s}$, $\tau = 26 \text{ s}$,
 Kurve b: $\tau' = 9 \text{ s}$, $\tau = 17 \text{ s}$,
 Kurve c: $\tau' = 4,5 \text{ s}$, $\tau = 12 \text{ s}$,
 Kurve d: $\tau' = 4,5 \text{ s}$, $\tau = 24 \text{ s}$,
 Kurve e: $\tau' = 4,5 \text{ s}$, $\tau = 60 \text{ s}$.

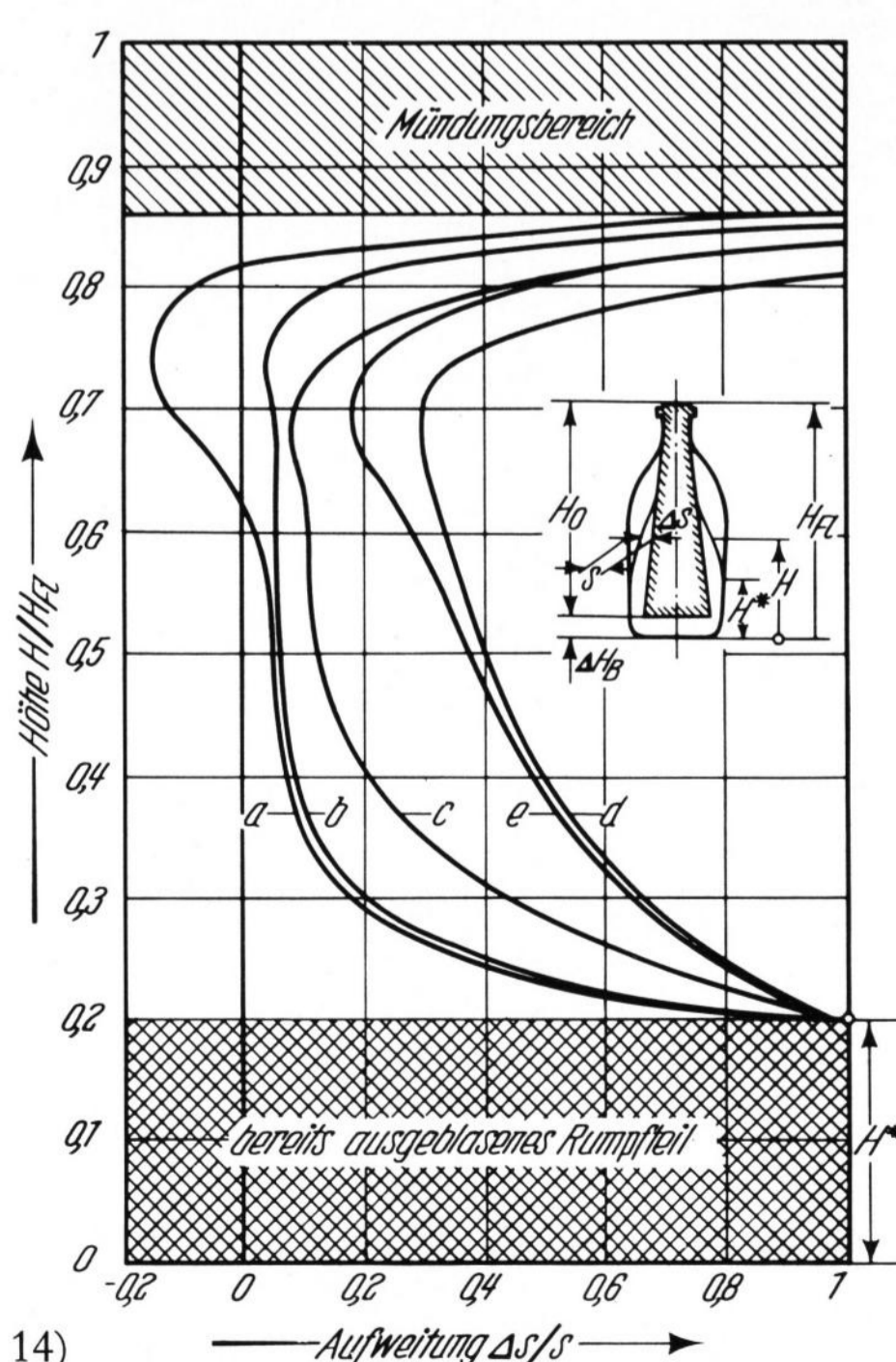
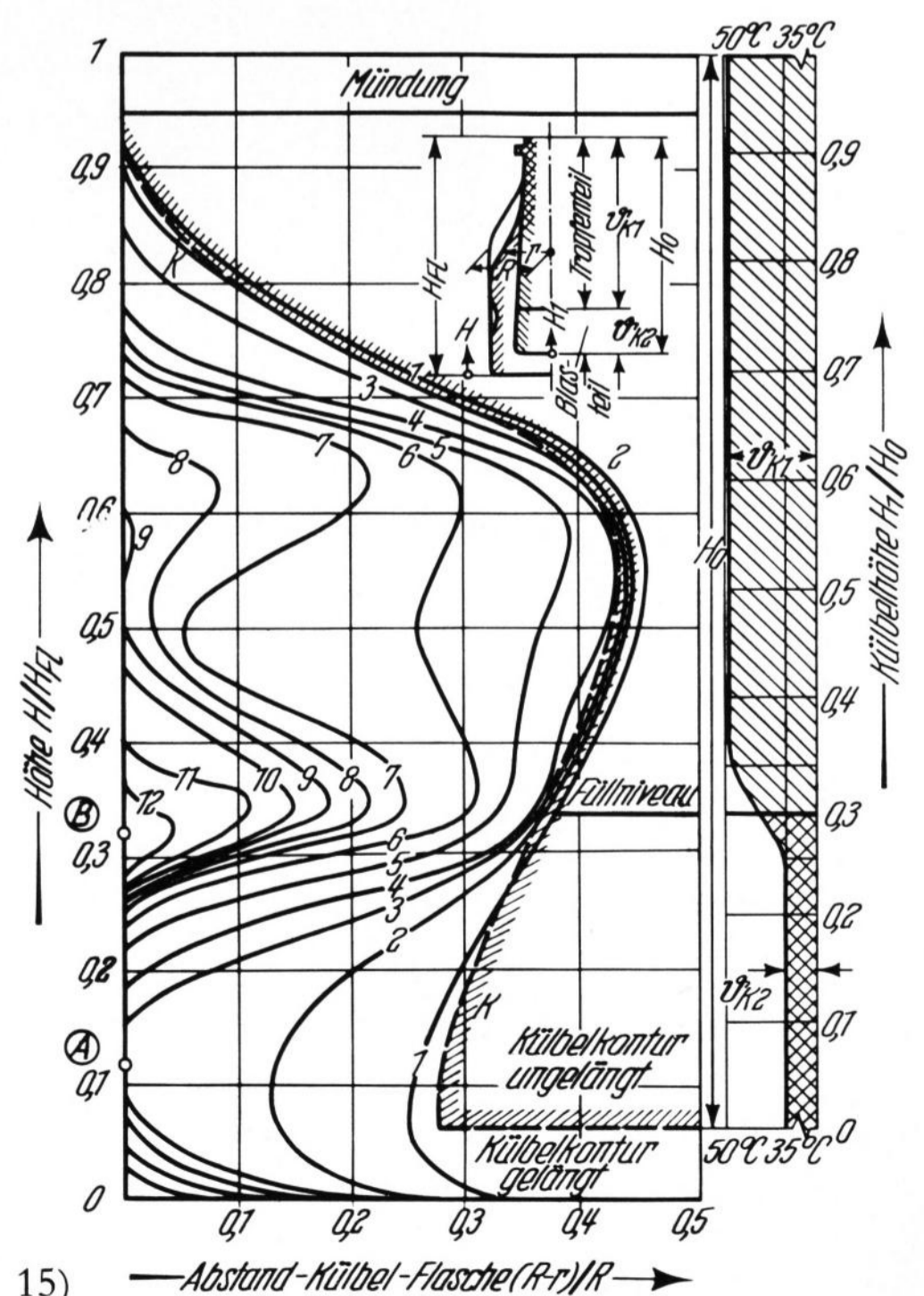


Bild 15. Konturen des sich aufweitenden Kübels bei unterschiedlicher Kühlung von Tropfen und Blasteil.

$\vartheta_a = 92^\circ\text{C}$, $\tau' = 13 \text{ s}$, $\tau = 22 \text{ s}$,
 Vorformtemperatur:
 $\vartheta_{k1} = 49^\circ\text{C} \cong \vartheta_{\text{Glas}} = 650^\circ\text{C}$,
 $\vartheta_{k2} = 36^\circ\text{C} \cong \vartheta_{\text{Glas}} = 550^\circ\text{C}$.
 (A) = Stelle des ersten Wandkontaktes,
 (B) = Stelle des spätesten Wandkontaktes.



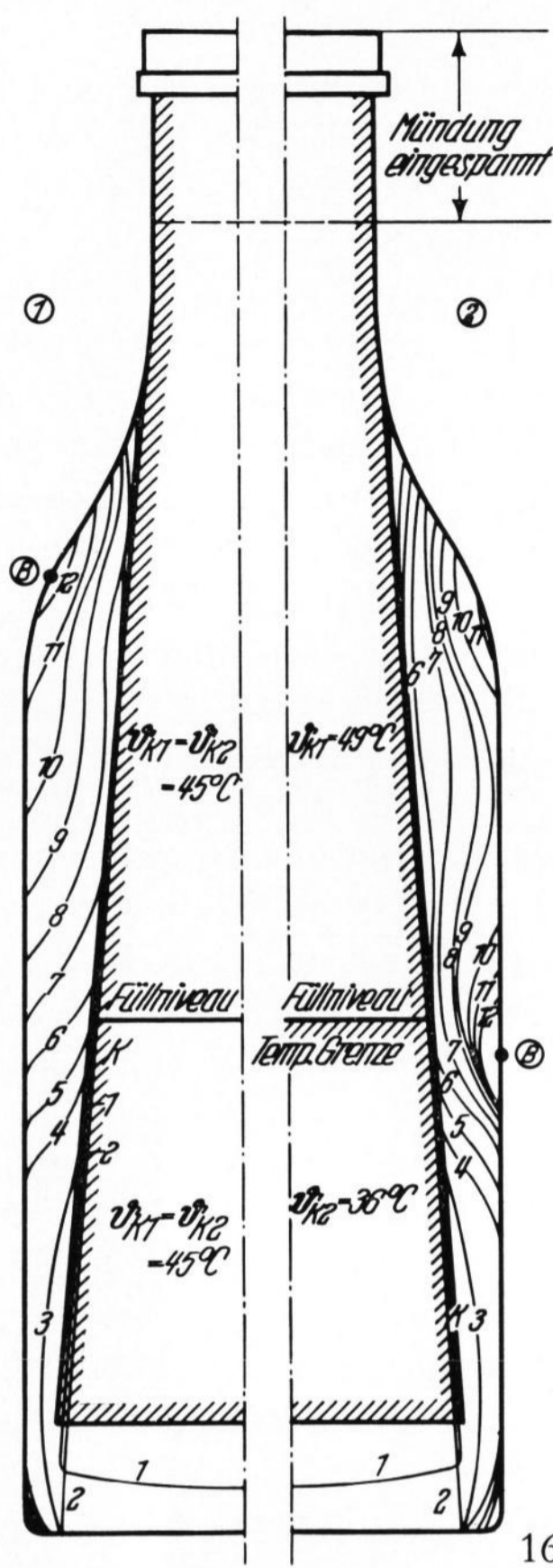
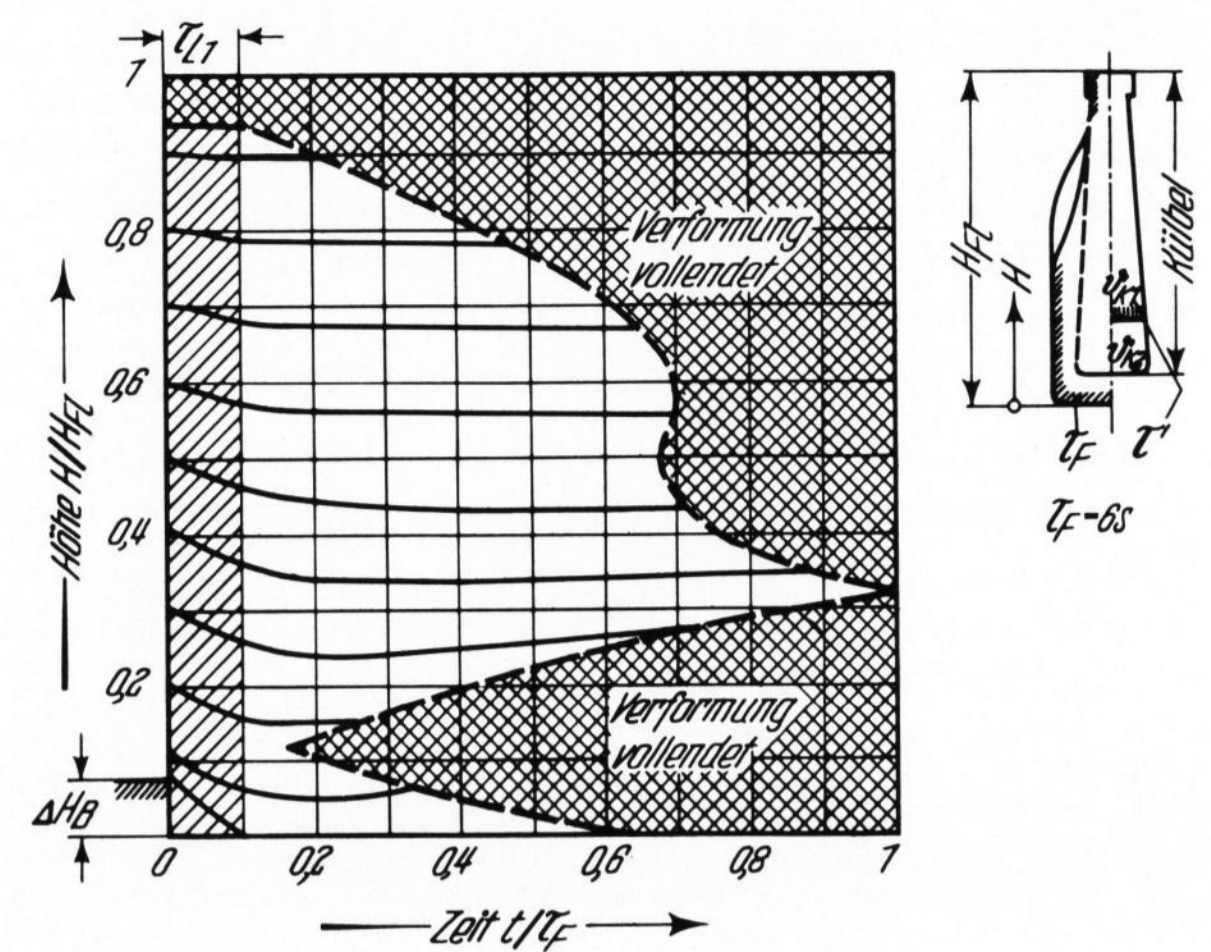


Bild 17. Zeitlicher Verformungsablauf in axialer Richtung.

$$\begin{aligned} \vartheta_{k1} &= 49^\circ\text{C}, \vartheta_{k2} = 36^\circ\text{C}, \\ \vartheta_a &= 92^\circ\text{C}, \\ \tau' &= 12\text{ s} \cong \tau'_{\text{Glas}} = 3,2\text{ s}, \\ \tau_F &= \tau_{F\text{Glas}} = 6\text{ s}. \end{aligned}$$

Bild 16. Axiale Verformung in Abhängigkeit von der Blaszeit und der Vorformkühlung.

$$\begin{aligned} \vartheta_a &= 92^\circ\text{C}, \tau' = 9\text{ s}, \tau_F = 4,5\text{ s}, \\ \vartheta_k &= 49^\circ\text{C} (650^\circ\text{C}), 45^\circ\text{C} (630^\circ\text{C}), \\ &36^\circ\text{C} (550^\circ\text{C}). \end{aligned}$$



17)

Bild 15 zeigt die Konturen des sich ausweitenden Kübels für die beiden Kühltemperaturen $\vartheta_{k1} = 49^\circ\text{C}$; $\vartheta_{k2} = 36^\circ\text{C}$, wobei die Trennung zwischen ϑ_{k1} und ϑ_{k2} in der Höhe der Fülllinie geschah. Zur Veranschaulichung der so entstandenen Verteilung der Vorformkühltemperatur ist in Bild 15 ein Hilfsdiagramm $\vartheta_k = f$ (Höhe H_1 /Kübelhöhe) eingetragen, das besonders den Übergang zwischen ϑ_{k1} und ϑ_{k2} aufzeigt. Der Konturverlauf bei derartiger Kühlung weicht beträchtlich von dem aus den Bildern 10 und 12 bekannten Verformungsablauf ab.

5.4.1. Boden- und Rumpfbereich

Eine grundsätzliche Änderung des Aufweitungsprozesses in diesem Bereich gegenüber den Bildern 10 und 12 ist nicht feststellbar. Kübellängung und Verformung der Bodenzone spielt sich genauso ab wie bei einheitlicher Kühlung. Die Stelle ersten Wandkontaktes (Punkt A) liegt mit $H = 0,12 H_{F1}$ nahezu in gleicher Höhe.

5.4.2. Bereich Füllniveau = oberer Rumpfabschnitt

Anders verhält es sich in diesem Bereich: Die geringere Temperaturdifferenz zwischen Tropfentemperatur ϑ_a und Kühltemperatur ϑ_{k1} bewirkt nach der Rückerwärmungszeit geringere Zähigkeit, also auch geringeren Verformungswiderstand des Kübelmaterials

änderlicher Gesamtkontaktzeit, ergeben sich die Kurven c) bis e). Es erstaunt nun, daß es bei ansteigender Kontaktzeit τ offensichtlich zu einem Blasprozeß mit gleichmäßigster Verformung kommt (Kurve d), der bei weiterem Anwachsen der Gesamtkontaktzeit wieder ungleichmäßig wird.

Ursache hierfür ist, daß bei anwachsender Gesamtkontaktzeit das ganze vorgeblasene Kübel mehr und mehr abgekühlt wird, so daß der Fließwiderstand zunimmt. Die Temperaturunterschiede zwischen Tropfen- und Blasteil werden dabei immer weiter ausgeglichen. Bei einem so weit abgekühlten Kübel muß angenommen werden, daß nun die Form des Kübels eine steigende Rolle spielt. Da σ_g dem Radius umgekehrt proportional ist, bewirkt also der größere Fließwiderstand im oberen Schulter- und Halsbereich den Verlauf der Kurve e).

Für die Flasche muß es nun um so günstiger in bezug auf Faltenbildung und weiterer Abkühlung [18] sein, je gleichmäßiger sich das Kübel ausdehnt. Im Falle von Bild 14 entspräche dies dem Konturverlauf d). Hieraus geht demnach hervor, daß die optimale Gesamtkontaktzeit τ nicht mit der kürzest möglichen Kontaktzeit zusammenfällt. Wird dieses Optimum überschritten, dann wird der Verformungsverlauf wieder ungleichmäßiger.

5.4. Einfluss der Vorformtemperatur

Um die Frage zu klären, wie sich ungleichmäßige Vorformkühlung auf den Verformungsverlauf auswirkt, wurde die Vorform unterschiedlich temperiert. Dabei wurde der Kübel-Blasteil stärker gekühlt als der Tropfenteil, um damit eine Angleichung der Temperatur von Blasteil und Tropfenteil anzustreben.

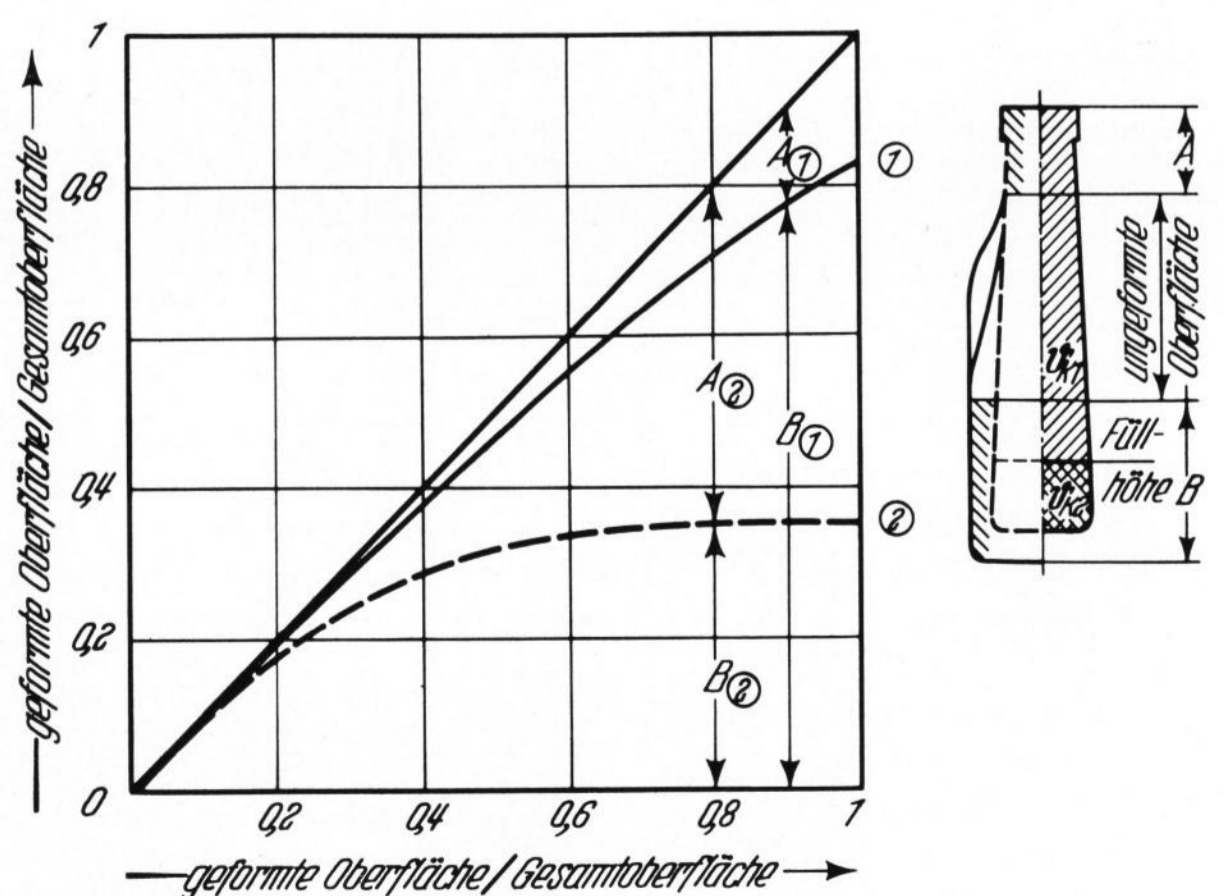


Bild 18. Aufteilung der geformten Flaschenoberfläche beim Fertigblasprozess.

$$\textcircled{1} \vartheta_{k1} = \vartheta_{k2} = 45^\circ\text{C}, \textcircled{2} = \vartheta_{k1} > \vartheta_{k2} (\vartheta_{k1} = 49^\circ\text{C}, \vartheta_{k2} = 36^\circ\text{C}).$$

oberhalb des F llniveaus, als dies bei den bisher betrachteten Versuchsbedingungen der Fall war. Das wiederum bedeutet größere Aufweitungsgeschwindigkeit dr/dt . Unterhalb des F llniveaus erweitert sich das Kölbel wegen des in 5.4. geschilderten Durchmesserinflusses trotz verringerter Kühltemperatur ϑ_{k2} schnell auf: Es ergibt sich in Höhe Füllniveau eine Zone verringerter Temperatur und damit geringerer Ausdehnungsgeschwindigkeit, die während der Verformung deutlich gegenüber dem darüber und darunter liegenden Bereich zurückbleibt. Es kommt hier zum spätesten Wandkontakt zwischen Kölbel und Fertigform.

5.4.3. Hals- und Mündungsbereich

Nach einer zweiten Zone beschleunigter Aufweitung in der Höhe $H = 0,5 H_{FI}$ nimmt die Ausdehnungsgeschwindigkeit mit ansteigendem H wegen des abnehmenden K lbeldurchmessers (entsprechend Abschnitt 3.4.) wieder ab, so daß es im Bereich des maximalen Abstandes Kölbel-Flasche zu einer zweiten „Stelle späten Wandkontaktes“ kommt ($H \approx 0,6 H_{FI}$). Der Verformungsvorgang im Mündungsbereich entspricht wiederum dem bereits in den Abschnitten 5.2. und 5.3. geschilderten Vorgang.

Zur Veranschaulichung des grundsätzlich verschiedenen Verformungsablaufes bei gleichmässiger und ungleichmässiger Vorformkühlung sind in Bild 16 die von fotografischen Reihenaufnahmen abgezeichneten Originalverl ufe dargestellt. Der Einfluß der Temperaturgrenze auf den Fertigblasprozeß — im rechten Bild aufgezeichnet — ist sehr deutlich zu erkennen.

5.4.4. Zeitlicher Ablauf — axialer Verformungsverlauf

In Bild 17 sind entsprechend den Bildern 11 und 13 die axialen Wege, abhängig von der Blaszeit, angegeben. Außerdem erscheint wieder die Grenzkurve zwischen Verformungsbereich und Bereich mit abgeschlossener Verformung, die gleichzeitig anzeigt, nach welcher Zeit das K lbelmaterial in jeder beliebigen Flaschenhöhe an der Formwand anliegt. Man ersieht aus dem Diagramm die verschobene Lage der Stelle B sowie die veränderte Grenzkurve. Wiederum kommt es zu axialen Verformungen in positiver und negativer Richtung.

5.5. Vergleichende Betrachtung

Die Versuche haben gezeigt, daß sich erstaunlicherweise der rein geometrische Ablauf der Verformung bei Variation der Kontaktzeiten τ' und τ nur geringfügig ändert, solange nur die Kühltemperatur über das ganze Kölbel konstant war. Dagegen reagiert der Verformungsablauf sehr stark auf unterschiedliche Vorformtemperaturen. Während bei den Versuchen mit den extremen Kontaktzeiten $\tau' = 4,5$ s und $\tau' = 18$ s die Stelle ersten und spätesten Wandkontaktes nahezu unabhängig von der so variierten Abkühlzeit in derselben Höhe H/H_{FI} verblieb, ändert sich das stark bei den Versuchen mit unterschiedlicher Vorformtemperatur ϑ_k . Diese Tatsache wurde in Bild 18 zusammengefaßt: Der von oben nach unten verlaufende Aufweitungsprozeß formt den in Bild 18 als A bezeichneten Anteil der Flaschenoberfläche. Analog dazu bildet der von unten nach oben fortschreitende Ablauf den Oberflächenanteil B. Kurve ①

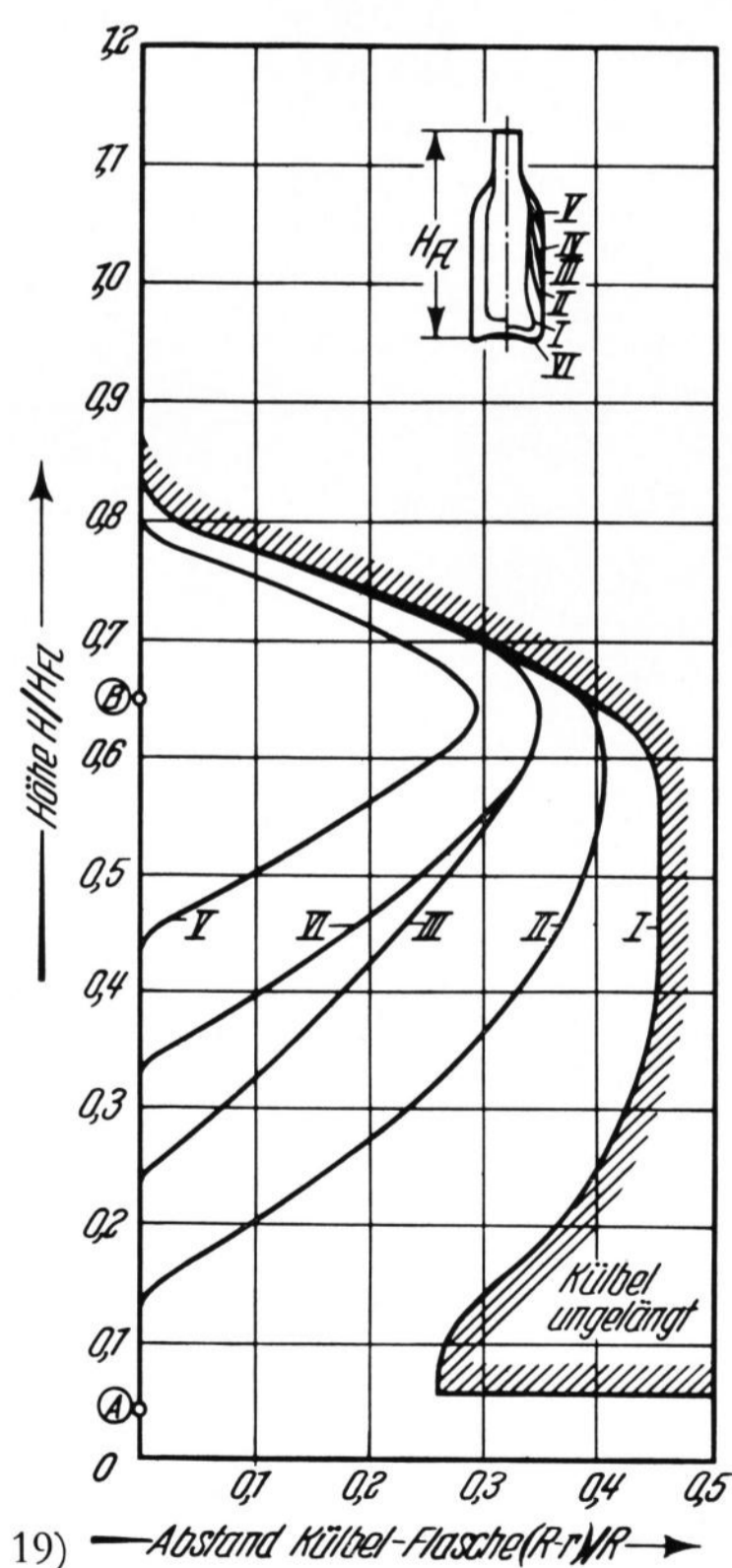
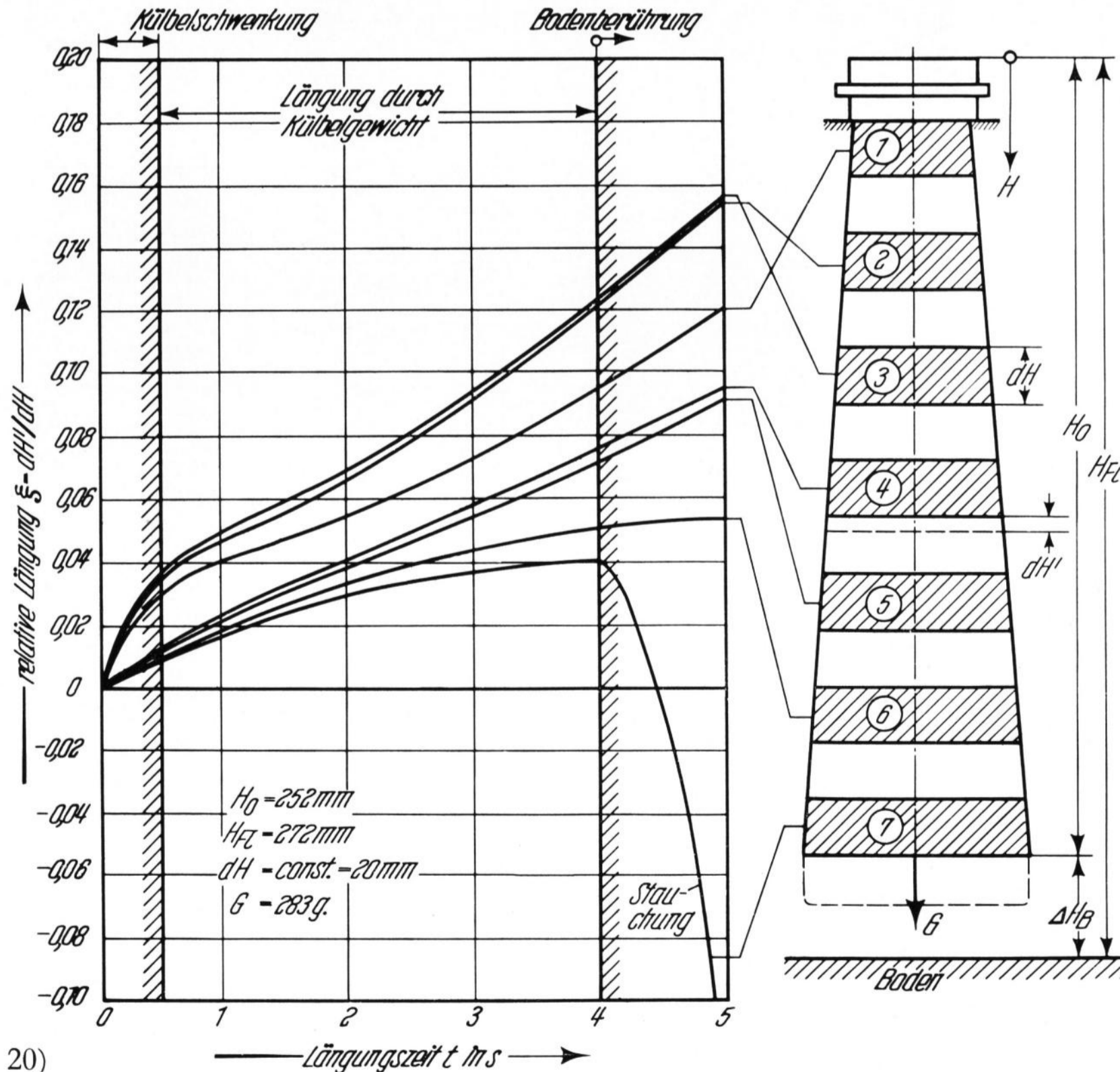


Bild 19. Fertigblasen von Glas nach GIEGERICH: Anlegen des K lbels an die Formwand.



Kontaktzeiten: $\tau_{Glas} = 0,8$ s, $\tau_{Glas} = 5$ s.

(A) = Stelle des ersten Wandkontaktes,
(B) = Stelle des spätesten Wandkontaktes.

Bild 20. Relative Dehnung definierter K lbelringe als Funktion der Längung und der Zeit.

$\tau' = 4,5$ s, $\tau = 24$ s, $\vartheta_s = 92$ °C, $\vartheta_k = 45$ °C.

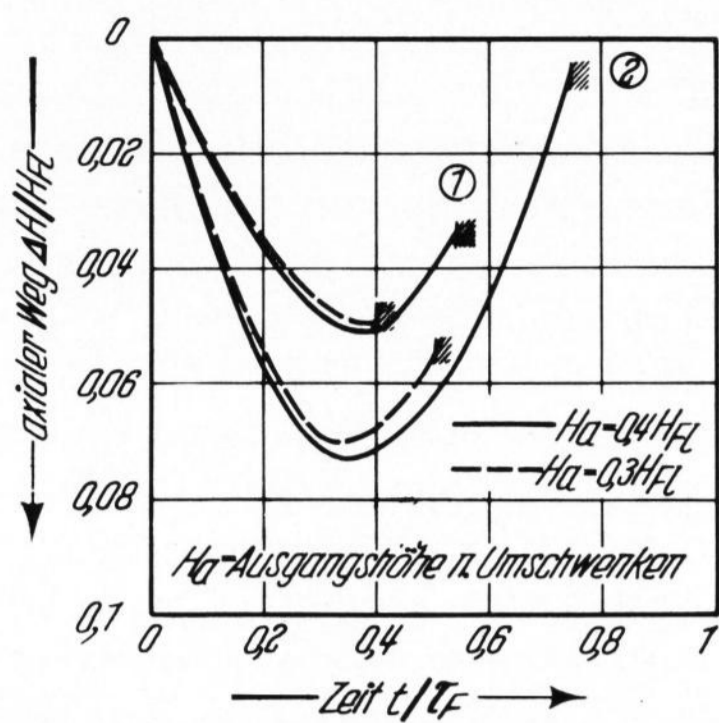


Bild 21. Axiale Wege im Verformungsablauf Kübel—Flasche. Vergleich von $H_a = 0,3 H_{Fl}$ und $H_a = 0,4 H_{Fl}$.

$$\vartheta_a = 92^\circ\text{C}, \vartheta_k = 75^\circ\text{C}.$$

$$\textcircled{1} \tau' = 4,5 \text{ s}, \tau_F = 3,5 \text{ s},$$

$$\textcircled{2} \tau' = 18 \text{ s}, \tau_F = 9 \text{ s}.$$

gilt dabei für konstante Kühltemperatur $\vartheta_{k1} = \vartheta_{k2}$; Kurve ② für $\vartheta_{k1} \neq \vartheta_{k2}$. Es ist ersichtlich, daß für $\vartheta_{k1} = \vartheta_{k2}$ 83% der gesamten Flaschenoberfläche von der von unten nach oben verlaufenden „Welle“, dagegen für $\vartheta_{k1} \neq \vartheta_{k2}$ in diesem Fall nur 35% der Gesamtoberfläche von dieser nach oben laufenden „Welle“ geformt wurde. (Dieser Wert von 35% gilt selbstverständlich nur bei den gewählten Versuchsbedingungen.)

Zum Vergleich der hier beschriebenen Modelluntersuchungen mit Untersuchungen von GIEGERICH wurde in Bild 19 der in [8] aufgezeichnete Verformungsablauf eines Kübels zur Fertigflasche in dimensionsloser Darstellung angegeben. Damit wird der Vergleich zu den Modelluntersuchungen erleichtert.

Der von GIEGERICH angegebene Verformungsverlauf wurde dadurch gewonnen, daß die Lageveränderung gewisser Anhaltspunkte im Glas während des Fertigblasens beobachtet wurde. Um dieses Beobachten jedoch möglich zu machen, mußte das Kübel in verschiedenen Anblasstadien der Fertigform entnommen werden. Die Übereinstimmung der so gewonnenen Konturen während des Fertigblasens mit den in diesem Bericht beschriebenen ist zufriedenstellend.

6. Schlußfolgerungen

Die hier beschriebenen Modellversuche haben vor allem den Einfluß aufgezeigt, den ungleichförmige Vorformkühlung auf den Verformungsverlauf haben kann. Bei Verlängerung der Kontaktzeit τ' innerhalb definierbarer Grenzen ergibt sich kaum eine wesentliche Veränderung des Dehnungsprozesses beim Fertigblasen. Der Verformungsvorgang läuft kontinuierlich von der Höhe $H = 0,15 H_{Fl}$ von unten nach oben ab. Die Gefahr der Faltenbildung, die in erster Linie im Bereich des spätesten Wandkontaktes besteht, wird durch die hier am stärksten auftretende Dehnung der ursprünglichen Kübelwand wieder vermindert. Dagegen kann es im Falle ungleichförmiger Vorformkühlung schon im unteren Flaschenteil zur Faltenbildung kommen. Ungleichmäßige Dehnung in radialer und axialer Richtung sind demnach in erster Linie auf ungleichmäßige Vorformkühlung zurückzuführen. Ebenso die beim Fertigblasen auftretende Faltenbildung. Gleichmäßiger Verformungsablauf von unten nach oben setzt demnach auch eine gleichmäßig temperierte Vorform voraus.

Eine weitere Verbesserung des Aufweitungsprozesses wäre durch verringerte Abkühlung des Kübelbodens zu erreichen. Damit ließe sich ein schnelles Anlegen des Materials im Bereich des Fertigformbodens erreichen — die Verformung könnte über eine größere Flaschenhöhe kontinuierlich von unten nach oben ablaufen. Die Gefahr der Falten- und Ribbildung am Boden wäre vermindert.

7. Bildung der Speiserwelle

7.1. Einfluß der axialen Dehnung durch Kübellängung

Es ist einleuchtend, daß das Kübelmaterial dort am meisten gestreckt und damit in seiner Wandstärke reduziert wird, wo die größten Unterschiede bezüglich der axialen Dehnung benachbarter „Kübelringe“ auftreten. Axiale Streckung tritt in erster Linie während der Kübellängung auf. Mit Hilfe der in das Kübel eingedrückten Kontrastpunkte wurde deshalb die Längung des Kübels beobachtet. Bild 20 zeigt die am Modellkübel ermittelten Werte. Da nicht so sehr die Gesamtdehnung sondern vielmehr die lokale Dehnung der einzelnen Kübelringe interessiert, wurde die relative Dehnung einzelner Segmente $\xi = dH'/dH$ aufgetragen. Bild 20 gilt für kurze Kontaktzeit, also wenig zähflüssigem Kübel bei einer Längungszeit von 4 s. Überraschenderweise zeigt sich, daß es nicht am Kübelblasteil mit seiner — gegenüber dem Tropfenteil — höheren Temperatur zur stärksten Längung kommt, sondern im Halsbereich. Die Entstehung der dünnen Flaschenwand im gesamten unteren Flaschendrittel kann demnach nicht damit begründet werden, daß das Kübelmaterial sich hier wegen seiner geringeren Zähigkeit stärker dehnt. Denn infolge des von unten nach oben ansteigenden Kübelgewichts findet eben die hauptsächlich Längung im Halsbereich statt, an dem sowohl beim Umschwenken als auch beim reinen Aushängen die maximalen Kräfte wirken.

Anders mag es in dem lokal sehr eng begrenzten Bereich der reinen Wellenbildung sein, der nach den Versuchen an der Vorform ursächlich mit der dort auftretenden Luftringbildung und der daraus folgenden, örtlichen Temperatursteigerung (infolge schlechten Wärmekontaktes mit der Formwand) sowie geometrischen Wandstärkenverringerung zusammenhängt. Hier wird aller Voraussicht nach tatsächlich eine begrenzte, verstärkte Dehnung des Materials auftreten, die zwar geringfügig ist, jedoch zur Speiserwellenbildung ausreicht.

7.2. Axiale Verformung während des Fertigblasens

Die axiale Aufwärtsbewegung des Materials in der Nähe der Fertigformwand — ersichtlich aus den Bildern 11, 13, 17 und erklärt in Abschnitt 5.2.1.4., Seite 401 — führt nun zu einer völlig anderen Erklärung der Wandstärkenverringerung im unteren Flaschendrittel: Nicht infolge Dehnung durch Umschwenken und Kübellängung ergibt sich eine Reduzierung der Wandstärke, sondern durch die von unten nach oben ablaufende Verformung und der daraus resultierenden axialen Aufwärtsbewegung. So sind als Beispiel in Bild 21 die axialen Wege zweier „Wandpartikel“ mit den Ausgangshöhen $H_a = 0,3 H_{Fl}$ und $H_a = 0,4 H_{Fl}$ miteinander verglichen. Bild 21 zeigt, daß ein Partikel der

Höhe $0,3 H_{Fl}$ während des Fertigblasens bis zur Höhe $0,25 H_{Fl}$ absinkt, ein Partikel der Höhe $H_a = 0,4 H_{Fl}$ jedoch wieder bis $0,37 H_{Fl}$ hochgedrückt wird. Das bedeutet jedoch eine Dehnung um die Differenz: $0,02 H_{Fl}$, und zwar durch den an dieser Stelle nach oben wirkenden Innendruck.

Die Dehnung beginnt demnach bei Punkt A (Bilder 10 und 12) und pflanzt sich nach oben fort. Der das Kübel ausweitende Innendruck scheint gleichsam das an der Fertigform anliegende Material von unten nach oben „auszuwalzen“, wobei die erreichbare Wanddickenverringerung der Zähigkeit des Materials entspricht. Eine derartige, von unten nach oben wirkende axiale Kraftwirkung erklärt auch das in der Praxis beobachtete Längerwerden der Flasche während des Fertigblasens.

8. Zusammenfassung

Mit Hilfe der im Institut entwickelten Modelltechnik wurde der Fertigblasprozeß der Flaschenherstellung nach dem Speiserverfahren untersucht. Durch Variation der auf das Fertigblasen einwirkenden Versuchsbedingungen: Kontaktzeit mit der Vorform bis Vorblasbeginn τ' , Gesamtkontaktzeit mit der Vorform τ sowie Ungleichförmigkeit der Vorformtemperatur konnte festgestellt werden, daß eine Veränderung der Kontaktzeiten τ' und τ beim Aufweitungsprozeß sich hauptsächlich im Bereich der Kübelfüllhöhe bemerkbar macht — damit wird auch die Intensität der Speiserwellenbildung beeinflußt —, der rein geometrische Verformungsablauf jedoch im wesentlichen gleich bleibt und ungleichförmige Temperierung der Vorform den Ablauf der Verformung vom Kübel zur Flasche dagegen wesentlich verändert. Daraus ergibt sich die große Bedeutung der Vorformkühlung auf den Fertigblasprozeß.

Weiter haben die Versuche gezeigt, daß die Bildung der Wandstärkenverringerung im unteren Flaschendrittel durch den, das zähflüssige Glas nach oben in Richtung Mündung schiebenden Innendruck zustande kommt und nicht durch das intensivere Dehnen dieses Kübelabschnittes während der Kübellängung. Dies geht aus den Aufzeichnungen des radialen und axialen Verformungsablaufes hervor.

Die Durchführung der Arbeit wurde durch eine Sachbeihilfe der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), Köln, und des Bundeswirtschaftsministeriums, Bonn, ermöglicht. Für diese Unterstützung danken die Autoren bestens.

9. Formelzeichen

a = Temperaturleitfähigkeit in mm^2/s

- b = Wandstärke der Vorform in mm
- Bi = Biot-Zahl
- D = Durchmesser des Kübels in mm
- Fo = Fourier-Zahl
- f_τ = Zeitfaktor
- G = Kübelgewicht in kp
- H = laufende Höhe (Ursprung Flaschenboden) in mm
- H_0 = Kübelhöhe in mm
- H_{Fl} = Flaschenhöhe in mm
- H^* = an der Formwand anliegender Bereich in mm
- H_1 = laufende Höhe (Ursprung Kübelboden) in mm
- ΔH = Höhendifferenz in mm
- ΔH_{Bo} = Abstand Kübel—Flaschenboden in mm
- dH = Höhe eines Kübelringes in mm
- dH' = Längung eines Kübelringes in mm
- O = Oberfläche in mm^2
- O_{ges} = Gesamtoberfläche der Fertigflasche in mm^2
- p = Innendruck in kp/mm^2
- p_{ax} = axialer Anteil von p in kp/mm^2
- p_{rad} = radialer Anteil von p in kp/mm^2
- r = r-Koordinate in mm
- R = Kübelradius in mm
- R_{Fl} = Radius der Fertigflasche in mm (Funktion der Höhe)
- s = $R - r$ = Abstand der Fertigform — jeweilige Kübelkontur in mm
- Δs = differentieller Weg in mm
- t = Zeitkoordinate in s
- U = Kübelumfang in mm (Funktion der Höhe)
- dU = Umfangänderung $U_2 - U_1$ in mm
- α = Wärmeübergangszahl in $cal/mm^2 s \text{ grad}$
- β = Winkel: Konturverlauf — Fertigform in $^\circ$
- $\partial \delta_g$ = differentielle Vergleichsdehnung
- $\partial \delta_g / \partial t$ = Formänderungsgeschwindigkeit in s^{-1}
- η = dynamische Zähigkeit in P
- ϑ = Temperatur in $^\circ C$
- λ = Wärmeleitzahl in $cal/mm s \text{ grad}$
- ξ = dH'/dH relative Längung
- σ_g = Vergleichsspannung in kp/mm^2
- τ = Gesamtkontaktzeit in s
- τ' = Kontaktzeit bis Vorblasbeginn in s
- τ_R = Rückerwärmungszeit = Gesamtlängungszeit in s
- τ_{L1} = Längungszeit während des Fertigblasens in s
- $\Delta \tau$ = Zeitspanne Vorblasen (Ende) bis Vorform (Öffnen)

Indizes

- a = definierter Ausgangsort
- (A) = Stelle des ersten Wandkontaktes
- (B) = Stelle des spätesten Wandkontaktes
- B = Vorblasen
- Bo = Boden
- F = Fertigblasen
- Fl = Fertigflasche
- G = Glas
- K = Kübel
- k = Kühlmedium
- L = Längung
- M = Modell
- O = Original
- R = Rückerwärmung
- S = Stoff
- W = Wand
- x, y, z = Koordinaten
- 1, 2, 3 = definierte Orte

10. Literatur

- [1] TRIER, W.: Zähigkeitsverteilung und Fließen des Glases in Vorformen. Glastechn. Ber. **32 K** (1959) H. II, S. 17 bis 25.
- [2] REINHARDT, H. P.: Modellverfahren zur Untersuchung der Fließvorgänge bei der Herstellung von Flaschen, angewandt auf die Vorgänge in Vorformen von Speiserblasmaschinen. Glas-Email-Keramo-Techn. **18** (1967) S. 77 – 87, 127 – 133, 165 – 172.
- [3] SCHMID, W.: Modelltechnische Untersuchung der Fließvorgänge in Flaschen-Vorformen. ILTUB-Ber. 67/6.
- [4] BRÉ, M.: Etude rhéologique des parasions effectuée sur modèle. Silicates ind. **28** (1963) S. 135 – 140. [Ref. Glastechn. Ber. **33** (1965) S. 105.]
- [5] OLDEKOP, W.: Theoretische Betrachtungen über die Zähigkeit von Gläsern. Glastechn. Ber. **30** (1956) S. 8 bis 14.
- [6] KLINKENBERG, A. und MOOY H. H.: Dimensionless groups in fluid friction, heat and material transfer. Chem. Engng. Progr. **44** (1948) Nr. 1, S. 17 – 36.
- [7] TRIER, W.: Temperaturverteilung und Wärmefluß im Glas in Vorformen von Hohlglasmaschinen. Glastechn. Ber. **33** (1960) S. 449 – 456.
- [8] GIEGERICH, W. und TRIER, W.: Glasmaschinen. Aufbau und Betrieb der Maschinen zur Formgebung des heißen Glases. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1964. [Ref. Glastechn. Ber. **37** (1964) S. 225.]
- [9] UNGER, L.: Bestimmung des Wärmehaltes und der mittleren Temperatur von Flaschen während des Formgebungsprozesses. Glastechn. Ber. **32** (1959) S. 153 bis 157.
- [10] GIEGERICH, W.: Über theoretische Grundlagen der vollautomatischen Flaschenherstellung. Glastechn. Ber. **33** (1960) S. 441 – 449.

- [11] GIEGERICH, W.: Ergebnisse und Probleme der maschinellen Flaschenfertigung. Glastechn. Ber. 30 (1957) S. 299 – 308.
- [12] RECKZIEGEL, E.: Bericht über die Roirant-R 7-Maschine. (Fachauschußvortrag.) [Ref. Glastechn. Ber. 35 (1962) S. 305.]
- [13] GIEGERICH, W.: Wärmetechnische Probleme der Gestaltung von Glasformen. Glastechn. Ber. 23 (1950) S. 161 bis 169.
- [14] WILLE, R.: Methoden der Formenkühlung an Glasverarbeitungsmaschinen. Glastechn. Ber. 23 (1955) S. 351 bis 359.
- [15] GELEJ, A.: Bildsame Formung der Metalle in Rechnung und Versuch. Berlin: Akademie-Verl. 1960.
- [16] KÖRBER, F. und EICHINGER, A.: Die Grundlagen der bildsamen Verformung. Mitt. Kaiser-Wilhelm-Inst. Eisenforsch. 22 (1940) S. 57 – 80.
- [17] EITTEL, W.: Studien über Strömungsvorgänge bei der vollautomatischen Glasverarbeitung im Feeder- und Kipp-Prozeß. Glastechn. Ber. 11 (1933) S. 201 – 205.
- [18] STRAUB, F.: Einige Ursachen der thermischen Riß- und Sprungbildung bei Glas. (Fachauschußvortrag.) [Ref. Glastechn. Ber. 34 (1961) S. 593.] (48030)

DK 662.612:533.6.011:666.1.031.24

Modelluntersuchungen an U-Flammenwannen

Teil III: Aufenthaltszeitverteilungen*)

Von RUDOLF BRÜNING, Karlsruhe

(Mitteilung aus dem Institut für Gastechik, Feuerungstechnik und Wasserchemie der Universität Karlsruhe (TH))

(Eingegangen am 24. Mai 1968)

Die Zielsetzung der vorliegenden Modellversuche und die Frage, inwieweit man deren Ergebnisse auf Großausführungen übertragen darf, sowie der Aufbau des im Maßstab 1:8 angefertigten Modells und der Versuchsanlage wurden bereits in den Teilen I und II [1, 2] erläutert. Es werden nun noch einige Einzelheiten ergänzt, welche für die folgenden Versuche von Bedeutung sind.

In dem vorliegenden Bericht wird die Messung der Aufenthaltszeitverteilungen erörtert. Diese Größen sind für den Konstrukteur eines Industrieofens von großer Bedeutung, da er genügend Zeit für die Mischung und Reaktion des Brennstoffs und die Wärmeabgabe des Rauchgases gewährleisten muß. Die Verweilzeiten der einzelnen Volumenelemente im Reaktionsraum streuen allerdings sehr, weil sie mit unterschiedlicher Geschwindigkeit die verschiedensten Wege zurücklegen, weshalb die Durchschnittsaufenthaltszeit bestimmt wird. Da die Volumenelemente nach dem in Teil I [1] beschriebenen Strömungsverlauf die Ofenlänge mindestens zweimal durchfließen, ist eine im Vergleich zu Öfen mit nichtumgelenkten Flammen relativ hohe Aufenthaltszeit zu erwarten.

1. Literaturübersicht und theoretische Grundlagen

In den letzten Jahren wurde mehrfach versucht, als Hilfsmittel zur Beurteilung des Wärmeaustauschs Aufenthaltszeitverteilungen der Rauchgase im Ofenraum zu bestimmen. Ein Verfahren zur Messung der Aufenthaltszeiten in Wassermodellen wurde von ZENKNER [3] angegeben, der das Modell einer querbeheizten Glasschmelzwanne untersuchte. Er ermittelte vor allem Aufenthaltszeitverteilungen bei verschiedenen Anordnungen und Impulsen des Zerstäuberstrahls und mehreren Höhen des Ofenraums. Daneben wurden einige Mischungsfelder ausgemessen, um Flammenlänge und Flammenform zu bestimmen. Die Ergebnisse von ZENKNER werden zum Vergleich mit den Werten der U-Flammenwanne herangezogen.

Ein Verfahren zur Messung der Aufenthaltszeitverteilungen an einem Ofen im Betriebszustand wurde von BEÉR und LEE [4] angegeben. Man mischt der Verbrennungsluft so lange Argon zu, bis eine konstante Konzentration am Meßpunkt erreicht ist. Sodann wird der Argonzusatz abgeschaltet und gleichzeitig ein Zeitsteuergerät in Gang gesetzt, das zwanzig Probeflaschen nacheinander zu bestimmten vorprogrammierten Zeiten füllt. Diese Proben werden einzeln analysiert, und man erhält Konzentrationsabfallkurven, welche nach einer Normierung mit der Ausgangskonzentration c_0 die Summenkurven der Aufenthaltszeitverteilung liefern.

Das Verweilzeitspektrum kontinuierlich durchströmter Reaktionsräume läßt sich formelmäßig entweder durch statistische Überlegungen oder durch Aufstellung von Bilanzgleichungen [5, 6] erfassen. In der Literatur wurde meist die letztere Methode, die anschaulicher ist, näher diskutiert.

Für zwei ideale Grenzfälle des Verweilzeitverhaltens können exakte mathematische Lösungen für den Konzentrationsverlauf am Ofenausgang in Abhängigkeit von der Zeit angegeben werden, einmal für den Fall der Kolbenströmung und andererseits für den homogenen Reaktor.

Bei Kolbenströmung nimmt man an, daß Volumenelemente, welche zum gleichen Zeitpunkt in den Reaktionsraum eintreten, mit konstanter und gleichförmiger Geschwindigkeit auf parallelen Bahnen hindurchfließen und zum gleichen Zeitpunkt austreten, d. h. die Aufenthaltszeit aller Volumenelemente ist gleich. Für die Summenkurve der Aufenthaltszeit gilt:

$$\frac{c}{c_0} = k(t) = \begin{cases} 1 & \text{für } 0 \leq t < S/u \\ 0 & \text{für } t > S/u \end{cases} \quad (1)$$

Der aus dieser Gleichung resultierende Kurvenverlauf ist in Bild 1a dargestellt.

Eine exakte Kolbenströmung ist allerdings bei NEWTONSchen Flüssigkeiten nicht zu erwarten, da durch Zähigkeitseinflüsse und Diffusion immer eine Mischung in Längsrichtung auftritt. Man erhält dadurch etwa den in Bild 1b dargestellten Kurvenverlauf.

Im Fall des homogenen Reaktors wird vorausgesetzt, daß durch vollständige Vermischung im gesamten Reaktionsraum die gleiche Konzentration herrscht. Sofern der Zulauf zum Reaktor die Konzentration c_0 hat und die mittlere theoretische Verweilzeit im Reaktor definiert ist als Quotient aus dem Reaktorvolumen v und dem Volumenstrom \dot{V} ,

$$T = v/\dot{V}, \quad (2)$$

*) Auszug aus der von der Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Universität Karlsruhe (TH) genehmigten Dissertation des Verfassers.