

DK 539.4.014:666.17

Spannungs- und Dehnungsuntersuchungen an Hohlgläsern unter statischer und dynamischer Beanspruchung

Von GÜNTHER SCHÖNBRUNN, Darmstadt

(Mitteilung aus der Staatlichen Materialprüfungsanstalt und dem Institut für Werkstoffkunde der Technischen Hochschule Darmstadt)

(Eingegangen am 20. November 1972)

Zur Bestimmung der Spannungsverteilung an Hohlgläsern bei statischer und dynamischer Beanspruchung wurden fünf verschiedene Hohlgläser herangezogen. Axialdruck (Stapeldruck) und Berstdruck wurden bestimmt, sowie Dehnungsmessungen unter Innendruck und Axialdruck durchgeführt. Die gemessenen Spannungsverteilungen geben die Stellen höchster Beanspruchung wieder. An drei Flaschentypen

wurde die Auswirkung verschiedener Schlagkörper auf die Ausbildung der Longitudinal- und Transversalwellen in Hohlgläsern untersucht. Schlaguntersuchungen zeigten außerdem den Einfluß der Größe des Schlagkörpers, seiner Masse und seiner Geschwindigkeit auf, so daß Rückschlüsse auf Bruchursachen an Hohlgläsern gezogen werden können.

Stress and expansion measurements on hollow glass ware under static and dynamic loading

Stress distributions in five types of hollow ware were determined under static and dynamic loading. Axial compression and bursting pressure were measured and also dimensional changes under internal and axial compression pressure. The measured stress distributions show the positions of highest stress. The effect of various impacting bodies

on the production of longitudinal and transverse waves was studied in three types of bottle. Impact investigations showed the influence of the impacting body, particularly its mass and velocity and the results permit some conclusions to be drawn about the origins of fractures in hollow ware.

Études des contraintes et des dilatations intervenant dans le verre creux sous l'effet de sollicitations statiques et dynamiques

On se sert d'objets en verre creux de cinq types différents pour déterminer la distribution des contraintes sous l'effet de sollicitations statiques et dynamiques. La pression axiale (pression d'emmagasinage) et la pression d'éclatement sont déterminées et l'on effectue des mesures de dilatation sous pression interne et axiale pression. La mesure de la distribution des contraintes révèle les endroits de sollicitation maxi-

male. L'influence du choc de différents objets sur la formation d'ondes longitudinales et transversales dans le verre creux était étudiée sur trois types de bouteilles. Des essais de choc montrent l'influence de l'objet percutant, de la masse et de la vitesse, ce qui permet de tirer des conclusions quant aux causes des fractures dans les objets en verre creux.

1. Versuchsmaterial

Als Versuchsmaterial standen folgende Hohlgläser zur Verfügung:

- leichtgewichtige, weiße Milchflaschen (0,5 l);
- weiße Limonaden-Einweg-Flaschen (0,7 l);
- leichtgewichtige Einweg-Marmeladengläser (385 cm³);
- leichtgewichtige, mehreckige Saftflaschen (1 l);
- 1/1-Sektflaschen.

Sämtliche Gläser waren von Angehörigen des Institutes in der Glashütte am kalten Ende des Kühlrofens entnommen worden, so daß das gesamte Versuchsmaterial ohne Oberflächenschäden für die Untersuchungen vorlag.

2. Bestimmung der Axiallast (Stapeldruck)

Die Messung der Belastbarkeit in axialer Richtung erfolgte an jeweils 50 Proben je Sorte. Die Höchstlast wurde auf 6000 bzw. 3000 kp begrenzt. Zur gleichmäßigen

Druckverteilung wurden der Boden und die Mündung durch eine Kunststoffplatte abgedeckt. Die Ergebnisse (Tabelle 1) dieser Versuche waren für die nachfolgenden Untersuchungen wichtig, um eine Überbelastung bei den Dehnungsmessungen zu vermeiden.

Tabelle 1. Belastbarkeit der Proben in axialer Richtung

	Anzahl je Sorte: 50 Stück			
	Milchflasche (0,5 l)	Limonadenflasche (0,7 l)	Saftflasche (1 l)	Marmeladenglas (385 cm ³)
Begrenzte Höchstlast in kp	3000	6000	3000	3000
Größtwert in kp	2520	6000	3000	1417
Kleinstwert in kp	380	1220	1400	532
Anzahl der nicht gebrochenen Proben	keine	16	5	keine

Tabelle 2. Innendruckfestigkeit bei den leichtgewichtigen Milchflaschen (0,5 l)

Anlieferungszustand:	Mittelwert	\bar{X}_{50}	in at	7,1
	Standardabweichung	S	in at	2,0
	Größtwert; Kleinstwert		in at	13,0; 3,0
Simulatorbeanspruchung, 5 min (trocken):	Mittelwert	\bar{X}_{50}	in at	5,7
	Standardabweichung	S	in at	1,8
	Größtwert; Kleinstwert		in at	10,0; 2,5
Simulatorbeanspruchung, 5 min (naß):	Mittelwert	\bar{X}_{50}	in at	5,7
	Standardabweichung	S	in at	1,7
	Größtwert; Kleinstwert		in at	8,5; 3,0

Tabelle 3. Innendruckfestigkeit bei den 0,7-l-Limonadenflaschen

Form Nr.	Mittelwert \bar{X}_{15} in at
0	22,4
2	14,5
7	12,3
8	23,9
10	33,0
14	28,6

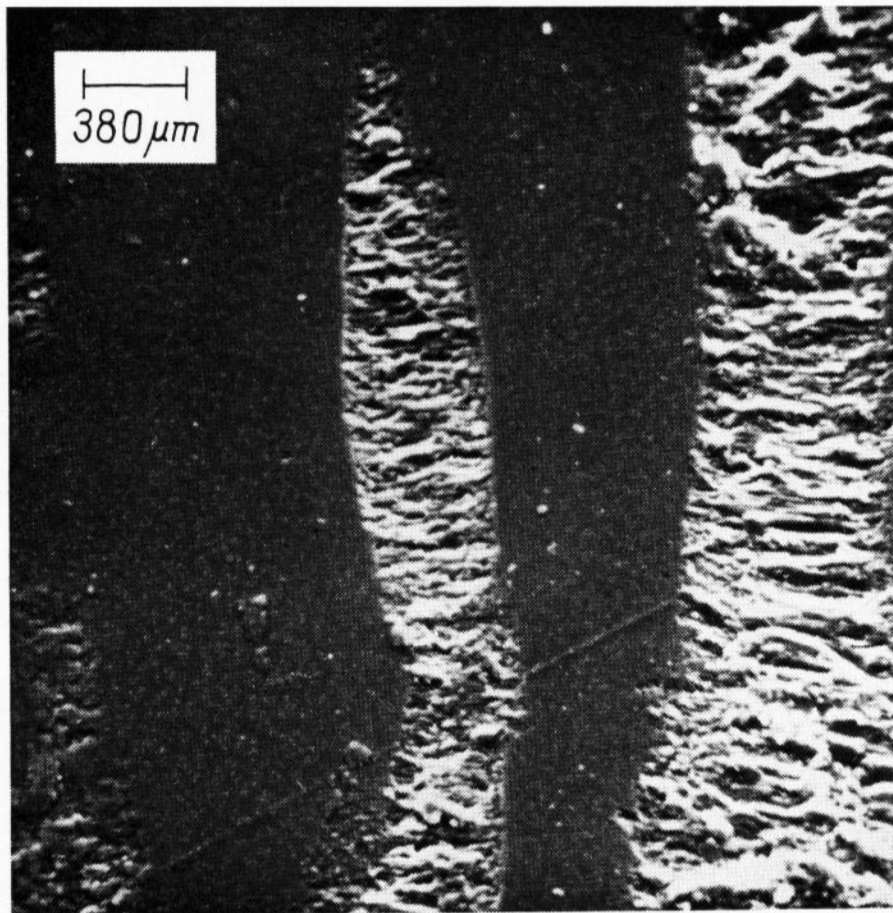


Bild 1. Oberflächenschäden an einer 0,5-l-Milchflasche nach einer Beanspruchung im Simulator von 5 min.

3. Innendruckfestigkeit (Berstdruckfestigkeit)

Die Innendruckfestigkeit wurde an 0,7-l-Limonadenflaschen und 0,5-l-Milchflaschen bestimmt, wobei die Hohlgläser im unbeschädigten Zustand und nach einer Simulatorbeanspruchung (naß und trocken) geprüft wurden. Die Druckanstiegsgeschwindigkeit betrug 4 ± 1 at/s. Da in Vorversuchen eine Abhängigkeit von der Formnummer der Gläser festzustellen war, wurde wie folgt verfahren:

a) Bei den leichtgewichtigen Milchflaschen (0,5 l) gelangte nur eine Formnummer zur Prüfung; 50 Proben je Kollektiv. Wie den Ergebnissen der Tabelle 2 entnommen werden kann, bewirkte die Beanspruchung im Simulator eine Reduzierung des Berstdruckes. In der Praxis werden die Hohlgläser auf der Abfülllinie in ähnlicher Form beansprucht wie im Simulator.

b) Bei den 0,7-l-Limonadenflaschen erfolgte die Prüfung an sechs Formnummern zu je 15 Stück. Eine größere Stückzahl war nicht gegeben. Tabelle 3 gibt die Untersuchungsergebnisse von Proben im Anlieferungszustand wieder. Diese Werte zeigen deutlich eine Formnummernabhängigkeit.

Auf Grund dieser Feststellungen darf bei der Beurteilung der Innendruckfestigkeit von Glashohlgefäßen der Einfluß der Formnummer nicht unberücksichtigt bleiben.

4. Oberflächenbeschädigung

Das Aneinanderreiben der Gläser im Simulator, analog zur Beanspruchung in der Abfülllinie, bewirkt eine

Verletzung der Oberfläche. Der Oberflächenzustand der Außenhaut nach einer Beanspruchung im Simulator wurde mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskopes bestimmt. Den Zerstörungsgrad zeigt Bild 1. Diese Kerben führen bei Einwirkung äußerer Lasten zu Spannungsspitzen und wirken somit vorzeitig bruchauslösend.

5. Dehnungsmessungen unter Axial- und Innendruck

Zur Bestimmung der Dehnungen an den Glashohlgefäßen wurde die Dehnungsmeßstreifen-(DMS)-Methode benutzt. Bezüglich der Angaben zu diesem Meßverfahren wird auf die entsprechende Literatur verwiesen [1 u. 2]. Bei den Versuchen wurden sowohl Einzel-DMS als auch DMS-Ketten verwendet. Die Schaltung erfolgte in allen Fällen als Halbbrückenschaltung. Als Klebstoff für die DMS mit Epoxidharz-Trägermaterial wurde Z 65 gewählt.

Mit Hilfe von DMS-Rosetten wurde die Frage geklärt, in welchem Winkel zur Symmetrieachse der Glashohlgefäße die Hauptspannungsrichtungen liegen. Sowohl für die 0,7-l-Limonadenflasche als auch für die 0,5-l-Milchflasche stimmten die berechneten Hauptspannungsrichtungen gut mit den Symmetrieachsen der Gefäße überein.

5.1. Dehnungsmessungen unter Innendruck

Der Dehnungsverlauf unter Innendruck wurde mit drei DMS-Ketten zu je zehn Meßpunkten bestimmt, wobei der Meßgitterabstand innerhalb einer Kette 4 mm betrug. Die Typenbezeichnung dieser DMS-Ketten lautet KE 13-4-120.

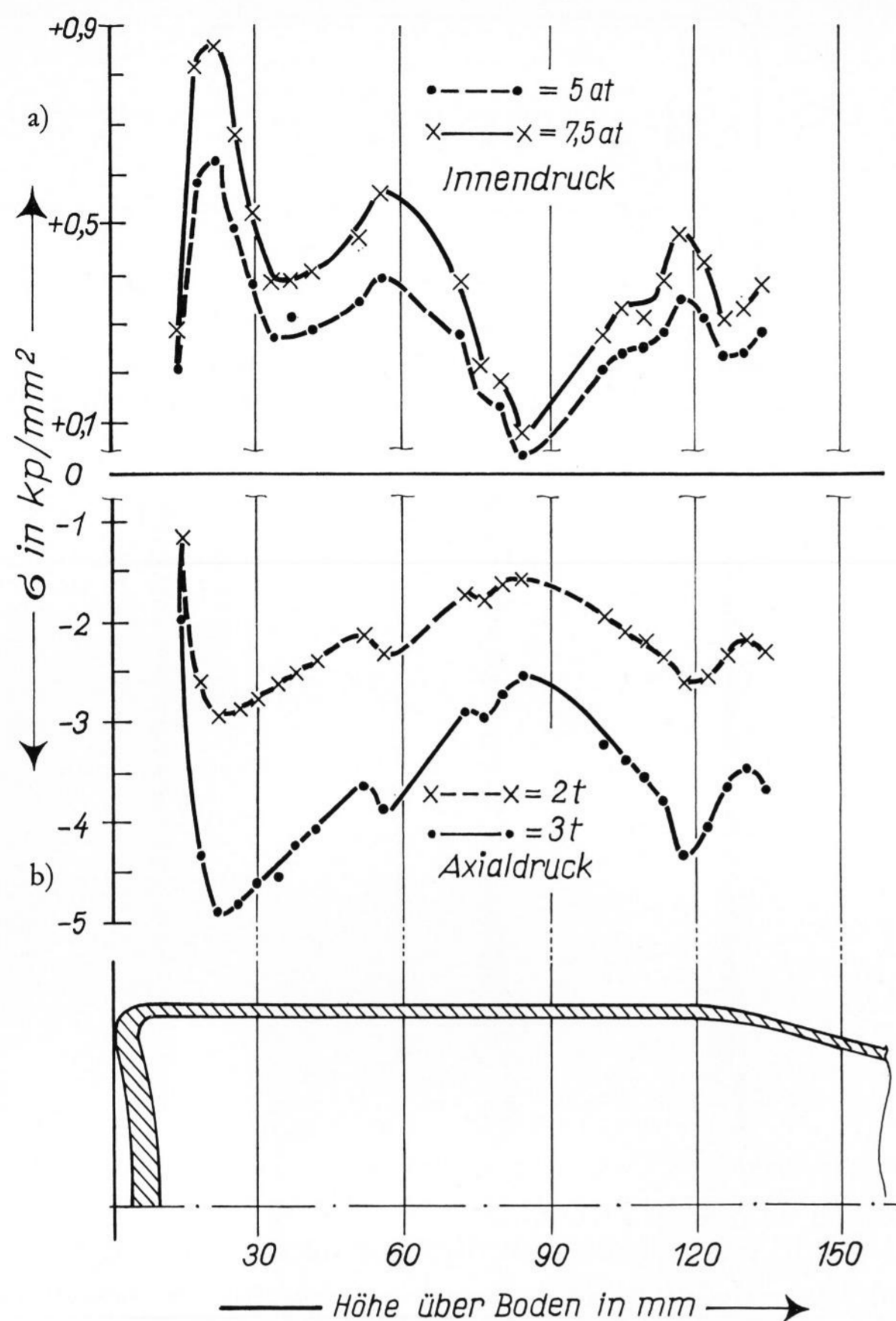
Die errechneten Spannungen sind für die einzelnen Meßpunkte als Kurven in den Bildern 2a und 3a wiedergegeben. Der Kurvenverlauf weist für beide Hohlgläser mehrere Maxima auf, wobei die größten Zugspannungswerte in der Übergangszone vom zylindrischen Teil zum Boden liegen.

Ein Vergleich mit den Spannungswerten, errechnet nach der Kesselformel [3], wobei für beide Flaschentypen die Bedingung

$$\frac{b_m}{d_m} < 0,1$$

eingehalten ist (b_m = mittlere Wanddicke, d_m = mittlerer Durchmesser), ergibt Werte, die in der Größenordnung liegen, jedoch die Spannungsspitzen nicht erfassen. Bei einer theoretischen Festigkeitsbetrachtung empfiehlt es sich, das Auftreten derartiger Spannungsspitzen zu berücksichtigen [4].

Der Dehnungsverlauf unter Innendruck wurde weiterhin am Übergang vom zylindrischen Teil zum Boden hin bestimmt. Bei den benutzten Meßketten



Bilder 2a und b. Zylinder-Projektion der Spannungen an einer 0,7-l-Limonadenflasche; a) Innendruck; b) Axialdruck.

handelte es sich um alternierende Meßketten mit der Lage 0 und 90°. Der Abstand der Meßgitter betrug ebenfalls 4 mm. Die Meßketten reichten 15 mm in die Bodenfläche hinein. Die Innendruckbelastung lag bei den 0,5-l-Milchflaschen bei 1, 2 und 3 at, bei den 0,7-l-Limonadenflaschen bei 2, 4, 6, 8 und 10 at.

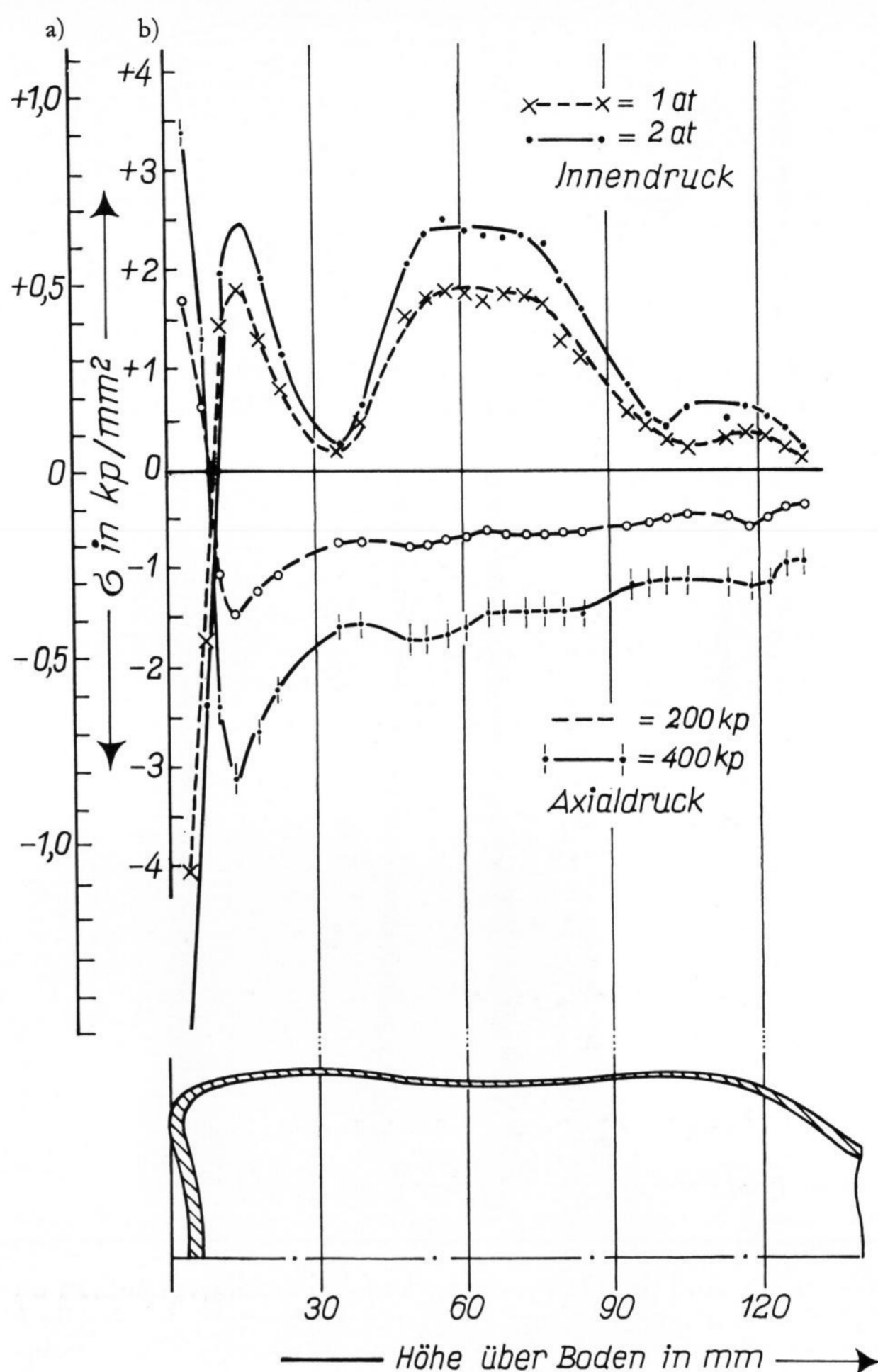
Die Ergebnisse zeigten eine sehr gute Übereinstimmung bezüglich der Lage der Nulldurchgänge mit den zuvor ermittelten Werten.

5.2. Dehnungsmessungen unter Axialdruck

Dieselben Glashohlgefäße wurden im Anschluß an die Innendruckprüfung auf Axialdruck belastet und die Dehnungen in Abhängigkeit vom Axialdruck bestimmt.

Auf Grund der zuvor bestimmten Stapeldruckkräfte wurden die Hohlgläser nur so hoch belastet, daß mit Sicherheit kein Bruch zu erwarten war. Die Bilder 2b und 3b zeigen den Spannungsverlauf über den Meßkettenbereich. Die Spannungsbestimmung erfolgte nach dem HOOKESchen Gesetz unter Zugrundelegung eines E-Moduls von 7000 kp/mm². Der höchste Spannungswert an den Flaschenoberflächen wurde bei der 0,7-l-Limonadenflasche 22 mm, bei der 0,5-l-Milchflasche 16 mm vom Boden entfernt bestimmt.

In beiden Fällen liegen die Maxima in der Übergangszone zum Flaschenboden, und wie aus Bild 3b zu entnehmen ist, erfolgt im Anschluß an das Maximum der Übergang in den Zugbereich.



Bilder 3a und b. Zylinder-Projektion der Spannungen an einer 0,5-l-Milchflasche; a) Innendruck; b) Axialdruck.

6. Schlaguntersuchungen und Bestimmung der dabei auftretenden Dehnungen

Schlaguntersuchungen wurden an 1/1-Sektflaschen, 0,7-l-Limonadenflaschen und dem leichtgewichtigen Einweg-Marmeladenglas (385 cm³) durchgeführt. Da Schlagversuche dynamische, schnell ablaufende Vorgänge darstellen, konnten diese Versuche nur mit Hilfe elektronischer Meßgeräte durchgeführt werden. Zur Bestimmung der Dehnungen an Glasoberflächen infolge Schlageinwirkung wurden Dehnungsmeßstreifen in Verbindung mit elektronischen Meßverstärkern und Lichtpunktlinienschreibern benutzt. Folgende Meßgeräte kamen zum Einsatz: Meßverstärker vom Typ KWS/II-50; Lichtpunktlinienschreiber vom Typ Visicorder 3508; Galvanometer vom Typ M 13000 mit einer Eigenfrequenz von 13000 Hz; tastlose induktive Wegaufnehmer; Pendelschlaggerät, Bauart AGR; Luftdruckpistole.

6.1. Untersuchungen an 1/1-Sektflaschen

Die Schlagversuche an den 1/1-Sektflaschen wurden in gefülltem Zustand der Flaschen, sowohl drucklos als auch unter 6 at Innendruck, durchgeführt. Die Meßstreifen waren in einem druck- und einem zugverspannten Teil der Probe (Eigenspannungen) aufgeklebt

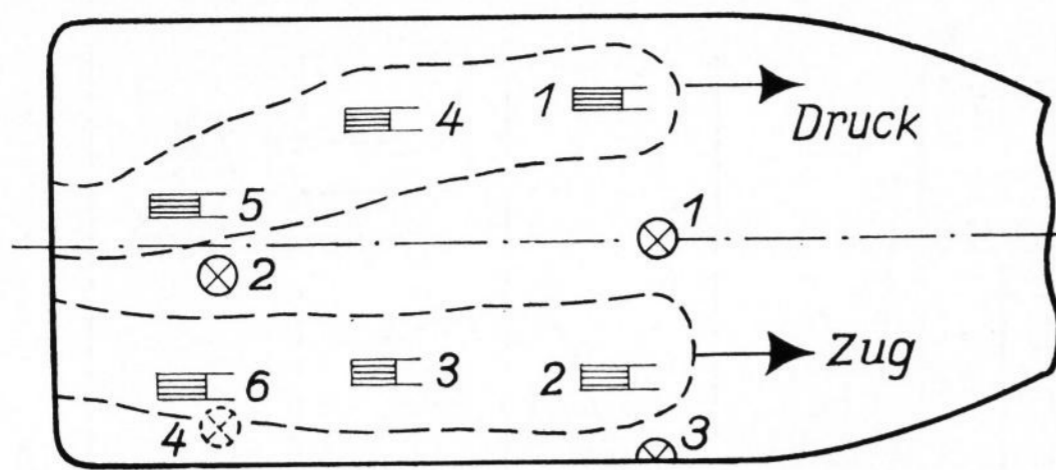


Bild 4. Lage der DMS und der Schlagpunkte bei den Schlaguntersuchungen an 1/1-Sektflaschen (Maßstab 1:3).

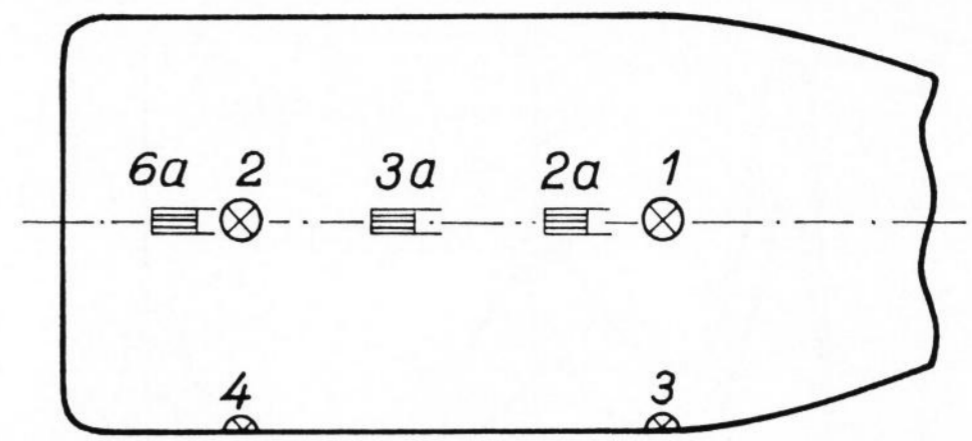
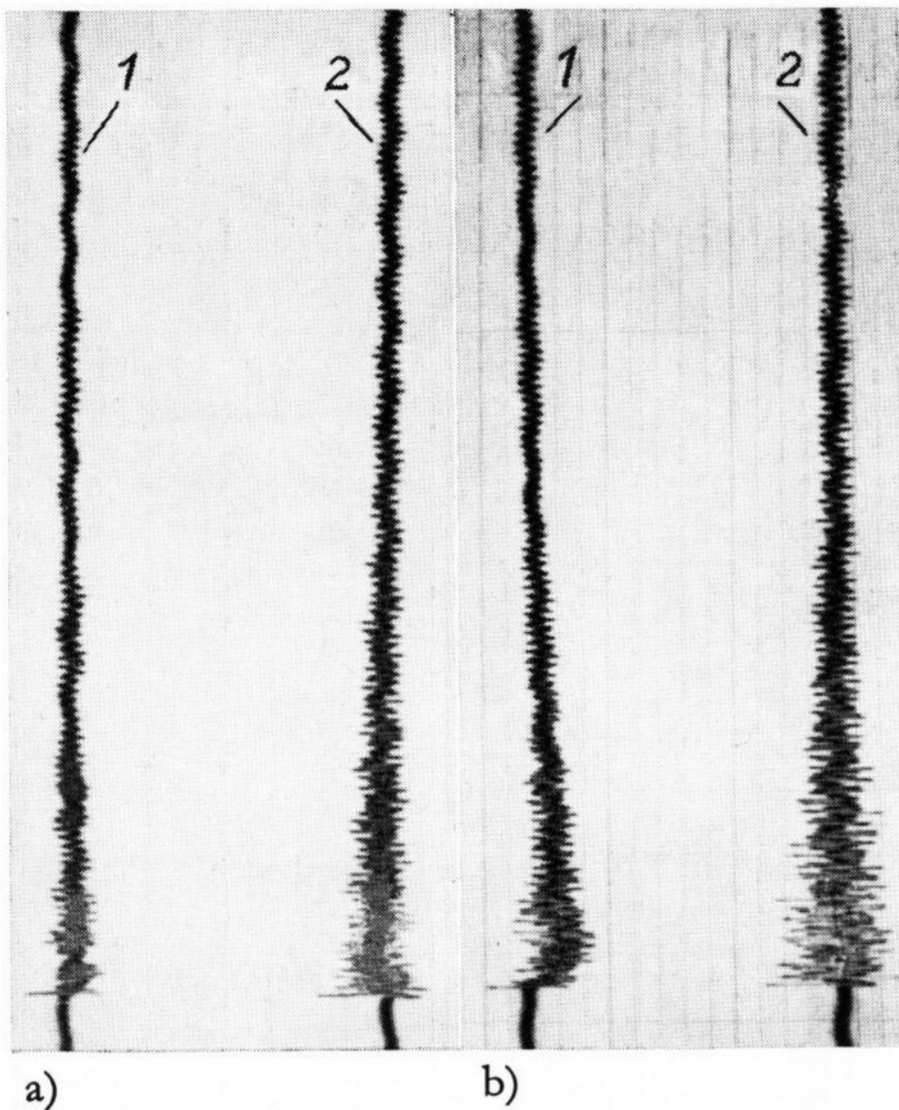


Bild 6. Lage der DMS und der Schlagpunkte bei den Schlaguntersuchungen an 0,7-l-Limonadenflaschen (Maßstab 1:3).



Bilder 5a und b. Dehnungsverlauf bei Schlagversuchen an 1/1-Sektflaschen (Beschuß mit einer Bleikugel); Meßstelle 1 lag im Eigenspannungsdruckbereich, Meßstelle 2 im Eigenspannungszugbereich;

a) gefüllt, drucklos; Meßstelle 1 maximal 19,2/20,5 $\mu\text{m}/\text{m}$ (die Zahlen bedeuten — wie auch bei folgenden Bildern —: die erste die Dehnung, die zweite die Stauchung), Meßstelle 2 maximal 35,2/22,4 $\mu\text{m}/\text{m}$;

b) 6 at Innendruck; Meßstelle 1 maximal 23,1/20,5 $\mu\text{m}/\text{m}$, Meßstelle 2 maximal 41,0/40,3 $\mu\text{m}/\text{m}$.

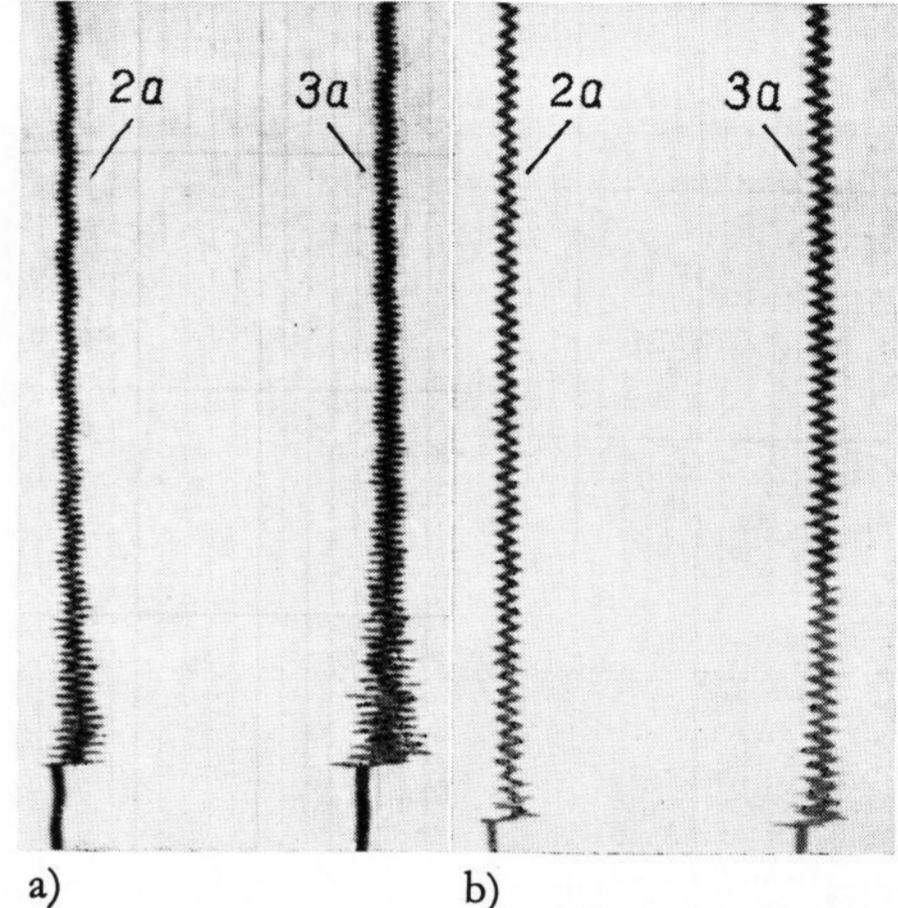
(Bild 4). Für die Schlagversuche waren zwei Meßstellen (1 und 2) angeschlossen. Der Schlag erfolgte durch Beschuß mit einer Bleikugel aus einer Luftdruckpistole; die Energie betrug 0,0838 kpm. Der Schlagpunkt lag 32 mm vom Boden entfernt im Punkt 4.

In den Bildern 5a und b sind die Schlagwellen für die Meßstellen 1 und 2 wiedergegeben. Auf Grund der Amplituden, in Verbindung mit der entsprechenden Geräteempfindlichkeit, wurden maximale Dehnungen und Stauchungen ermittelt, die in den Bildunterschriften vermerkt sind.

Der Amplitudenvergleich zwischen den Bildern 5a und b zeigt, daß eine unter Innendruck stehende Flasche bei Schlagbeanspruchung größere Dehnungen und Stauchungen erfährt als eine gefüllte, jedoch drucklose Flasche. Der Abklingvorgang der Schwingung weist im Vergleich kaum Unterschiede auf.

6.2. 0,7-l-Limonadenflaschen

An den 0,7-l-Limonadenflaschen wurde das Verhalten einer leeren gegenüber einer gefüllten Flasche bei Schlagbeanspruchung untersucht. Die Aufbringung des Schlags erfolgte durch Beschuß (Luftdruckpistole mit Bleikugel). Die aufgebrauchte Energie betrug in beiden Fällen



Bilder 7a und b. Dehnungsverlauf bei Schlagversuchen an 0,7-l-Limonadenflaschen (Beschuß mit einer Bleikugel);

a) leer; Meßstelle 2a maximal 67/83 $\mu\text{m}/\text{m}$, Meßstelle 3a maximal 115/112 $\mu\text{m}/\text{m}$;

b) mit Wasser gefüllt; Meßstelle 2a 32/35 $\mu\text{m}/\text{m}$, Meßstelle 3a maximal 35/38 $\mu\text{m}/\text{m}$.

0,0838 kpm. Aus Bild 6 ist die Lage der Dehnungsmeßstreifen und Schlagstellen ersichtlich. Für die in den Bildern 7a und b aufgezeichneten Kurven lag mit Punkt 3 der Schlagpunkt 12 cm vom Boden entfernt und 90° zu den Meßstreifen versetzt.

Das Verhalten der Proben war sehr unterschiedlich. Die wesentlich größeren Amplituden wurden an der leeren Flasche registriert. Den Bildern 7a und b sind sowohl die maximalen Dehnungen und Stauchungen zu entnehmen als auch die unterschiedlichen Schwingungsfrequenzen. Der Dehnbetrag für die leere Flasche liegt für Meßstelle 3a etwa dreimal so hoch wie für die gefüllte. Weiterhin kann diesen Schwingungsaufzeichnungen entnommen werden, daß die gefüllte Probe eine gleichmäßigere und geringere Spannung durch einen Schlag erfährt als eine leere. Der Vergleich der Dehnbeträge der Meßstellen 2a und 3a zeigt es deutlich.

6.3. 385-cm³-Marmeladenglas

Bei den Schlaguntersuchungen am 385-cm³-Marmeladenglas wurden außer den Longitudinalwellen auch die Transversalwelle gemessen, und zwar hinter dem Schlagpunkt im Glasinnern. Zur Aufnahme und Registrierung dieser Schwingungen diente ein tastloser induktiver Wegaufnehmer in Verbindung mit einem Meßverstärker und Lichtpunktlinienschreiber. Die Anordnung der Meßstreifen und die Lage des Schlagpunktes sind in Bild 8 aufgezeichnet.

Im ersten Vergleichsversuch erfolgte die Aufbringung des Schlags mit Hilfe eines Schlagpendels, an

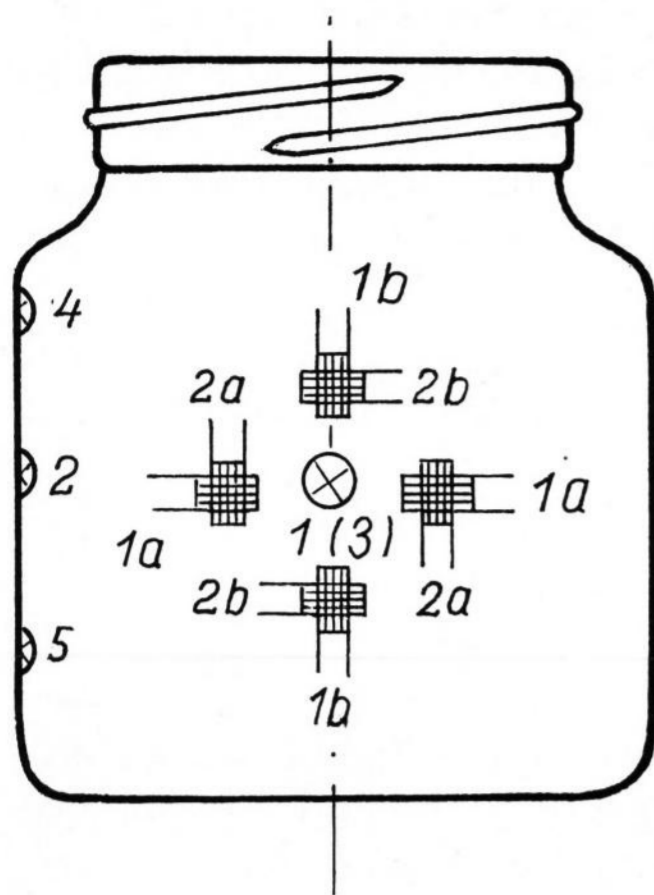


Bild 8. Lage der DMS und der Schlagpunkte bei den Schlaguntersuchungen an 385-cm³-Marmeladengläsern (Maßstab 1:2).

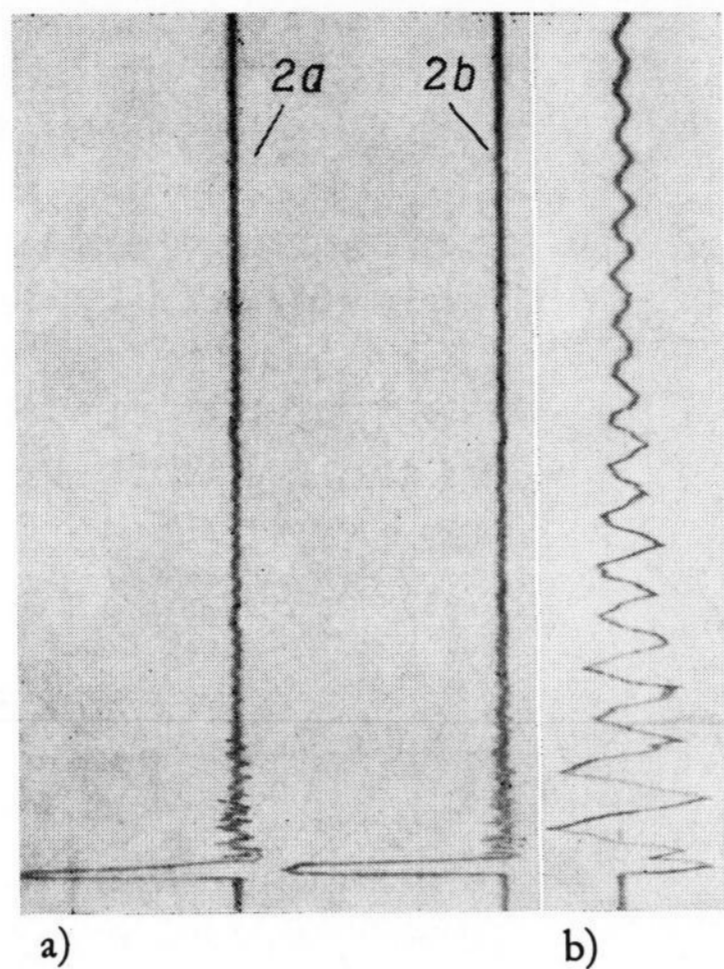


Bild 9. Dehnungsverlauf bei Schlagversuchen an 385-cm³-Marmeladengläsern (Schlagpendel);
 a) Longitudinalwellen, Meßstelle 2a maximal 81 µm/m (Dehnung), Meßstelle 2b maximal 81 µm/m (Dehnung);
 b) Transversalwelle: Spaltveränderung vorschwingend 62 µm, rückschwingend 51 µm.

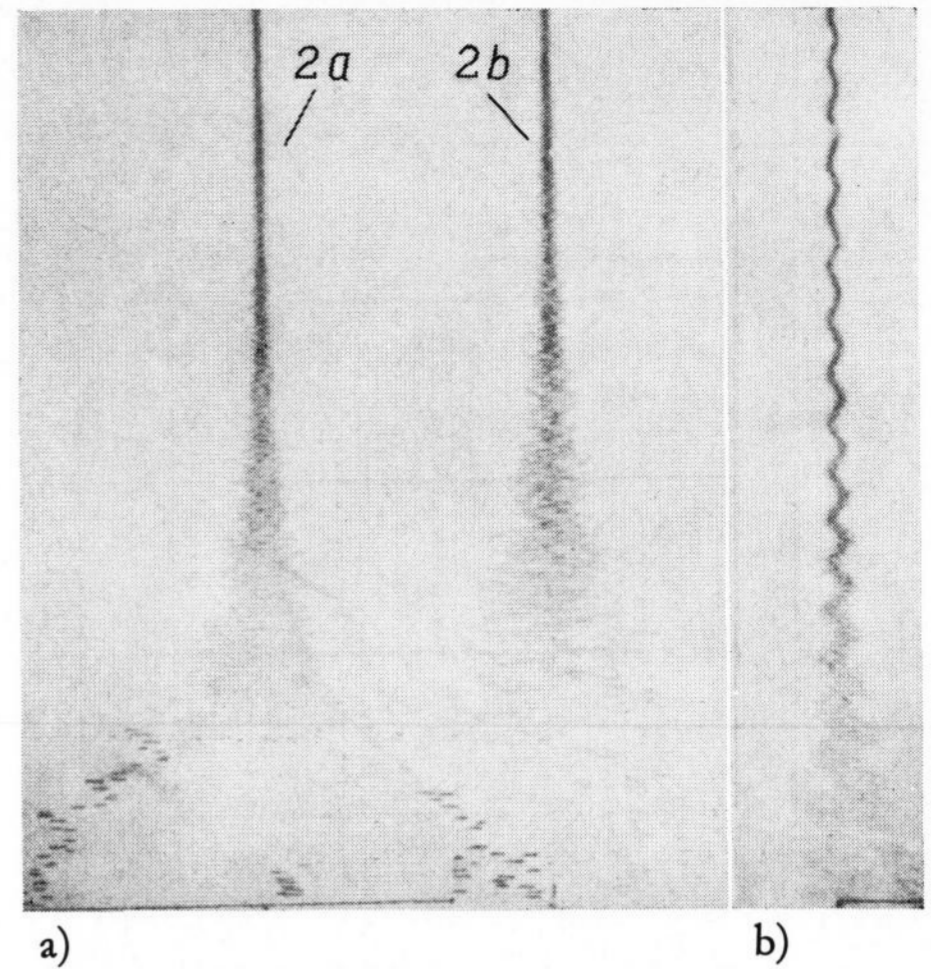


Bild 10. Dehnungsverlauf bei Schlagversuchen am 385-cm³-Marmeladenglas (Beschuß);
 a) Longitudinalwellen, Meßstelle 2a maximal 90 µm/m (Dehnung), Meßstelle 2b maximal 104 µm/m (Dehnung);
 b) Transversalwelle: Spaltveränderung vorschwingend 53 µm, rückschwingend 14 µm.

welchem nacheinander verschiedene Schlagkugeln angebracht wurden. Die Schwingungen wurden durch eine Stahlkugel von 10 mm Durchmesser, eine Glaskugel von 6 mm Durchmesser und eine Bleikugel von 4,4 mm Durchmesser hervorgerufen. In allen drei Fällen betrug die aufgebrachte Schlagenergie 0,00232 kpm. Bild 9 zeigt die registrierten Schwingungen, die durch die Stahlkugel von 10 mm Durchmesser erzeugt wurden. Die ersten beiden Schwingungsaufzeichnungen stellen die Longitudinalwellen der Meßstellen 2a und 2b dar, die dritte Schwingungsaufzeichnung gibt den Verlauf der Transversalwelle am Schlagpunkt 1 wieder.

Bei einem Vergleich der Longitudinalwellen der Meßstellen 2a und 2b von allen drei Versuchen an dem 385-cm³-Marmeladenglas (Tabelle 4) konnten nur geringe Unterschiede in den Amplituden festgestellt werden. Bei der Stahlkugel waren diese Werte gleich groß, bei der Glas- und Bleikugel zeigten jeweils die horizontal verlaufenden Meßstreifen höhere Dehnbeträge. Absolut gesehen erzeugte die Stahlkugel die größten Dehnungen, die Bleikugel die geringsten. Während bei dem Schlag durch die Stahlkugel noch ein Nachschwingen des Glases gut zu erkennen war, wurde dieses Nachschwingen beim Schlag durch die Bleikugel nach einer halben Wellenlänge fast vollständig gedämpft.

Auch der zeitliche Verlauf der ersten Halbwelle war stark unterschiedlich. Die Stahlkugel mit einem sehr hohen E-Modul bewirkte eine sehr hohe Dehnung in einer kurzen Zeit im Gegensatz zur Bleikugel, die während des Aufschlages plastisch verformt wird, wodurch ein Teil der Energie in plastische Formänderung umgesetzt wird.

Die Transversalwellen zeigten im Schwingungsverlauf untereinander ähnliche Tendenz. Die größten Verformungswege wurden durch den Schlag mit der Stahlkugel erzielt, die geringsten durch den mit der Bleikugel.

In allen Fällen besaß die rückschwingende Welle eine kleinere Amplitude als die in Schlagrichtung schwingende Welle. Es wurden folgende Verformungswerte gemessen:

- a) für die Stahlkugel von 10 mm Durchmesser: vorschwingend 62 µm, rückschwingend 51 µm;
- b) für die Glaskugel von 6 mm Durchmesser: vorschwingend 57 µm, rückschwingend 56 µm;
- c) für die Bleikugel von 4,4 mm Durchmesser: vorschwingend 25 µm, rückschwingend 21 µm.

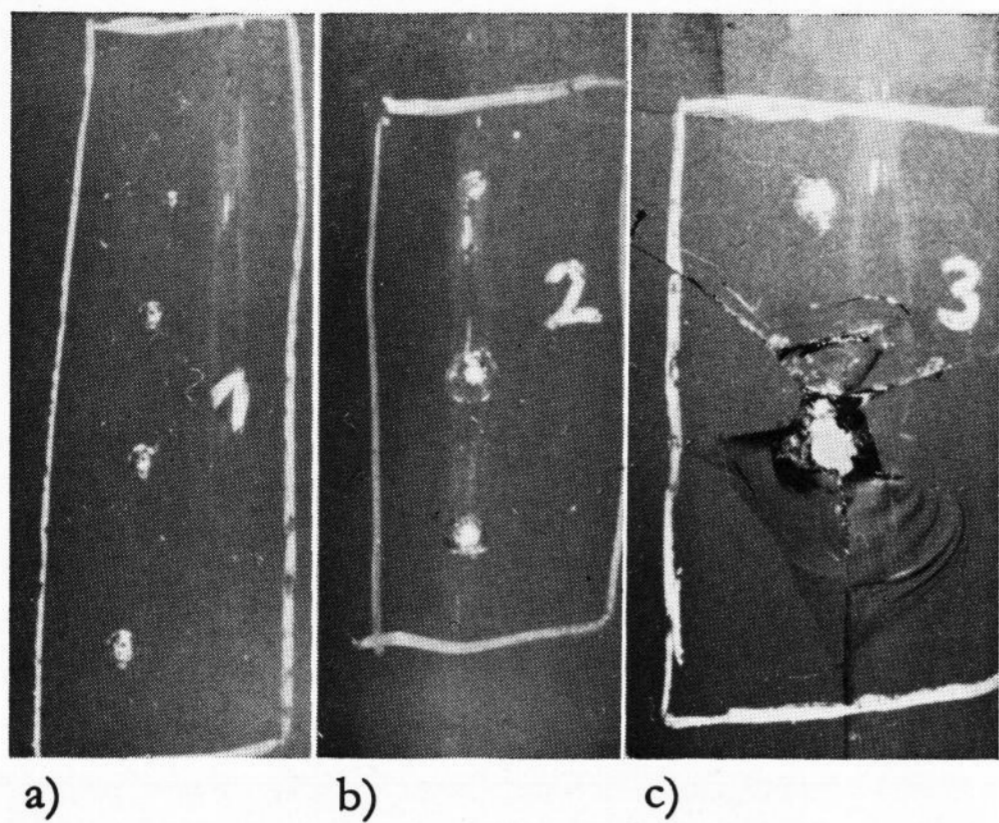
Wird die Schlagenergie nicht durch ein Schlagpendel, sondern durch Beschuß aufgebracht, d. h. durch geringe Masse und hohe Geschwindigkeit, so erhält man eine Schlagwelle von wesentlich höherer Frequenz (Bild 10). Die Amplitude der Longitudinalwellen ist aber mit den vorhergehenden Schlaguntersuchungen nicht direkt vergleichbar, da die aufgebrachte Energie um das 7,5fache größer ist. Die Transversalwelle kommt nicht so stark zur Wirkung, die Amplitude ist wesentlich geringer, die Frequenz jedoch höher.

7. Oberflächenverletzungen und Bruch durch Schlägeinwirkungen in Abhängigkeit von der Größe des Schlagkopfes, der Auftreffgeschwindigkeit und der Schlagarbeit

Das Verhalten von Gläsern unter Schlägeinwirkung ist im voraus nur schwer zu bestimmen, da sehr viele

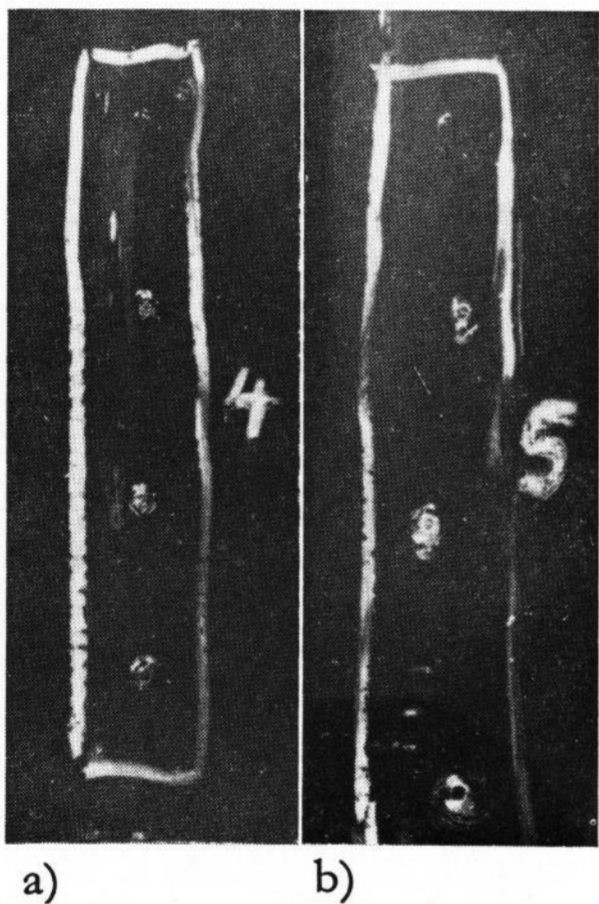
Tabelle 4. Maximale Amplituden der Longitudinalwellen bei den Schlaguntersuchungen am 385-cm³-Marmeladenglas

	maximale Dehnung in µm/m		
	Stahlkugel (10 mm Durchmesser)	Glaskugel (6 mm Durchmesser)	Bleikugel (4,4 mm Durchmesser)
Meßstelle 2a	81	65	32
Meßstelle 2b	81	70	40



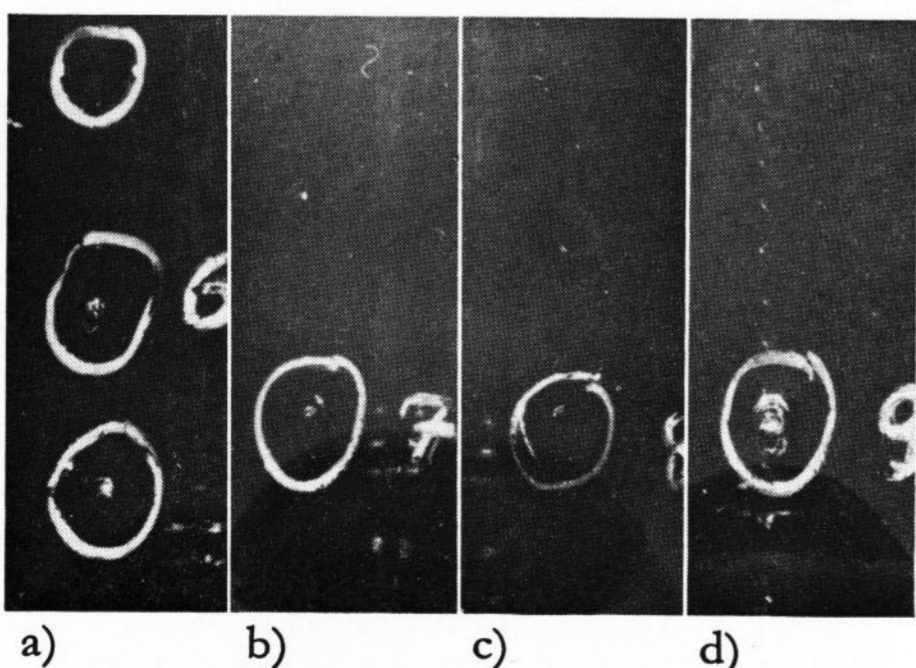
Bilder 11 a bis c. Oberflächenverletzungen an 1/1-Sektflaschen durch Schlagbeanspruchung (Schlagkopf 1: Pendelgewicht 0,344 kg; Stahlkugeldurchmesser 3 mm).

Bild:	11a	11a	11a	11a	11a
δ in Grad:	10	15	20	25	30
v_1 in m/s:	0,522	0,782	1,041	1,297	1,552
SA_1 in pm:	5	11	19	30	42
Bild:	11b	11b	11b	11c	11c
δ in Grad:	35	40	45	45	50
v_1 in m/s:	1,803	2,050	2,294	2,294	2,533
SA_1 in pm:	57	74	92	92	113



Bilder 12a und b. Oberflächenverletzungen an 1/1-Sektflaschen durch Schlagbeanspruchungen (Schlagkopf 2: Pendelgewicht 0,344 kg; Stahlkugeldurchmesser 10 mm).

Bild:	12a	12a	12a	12a	12b	12b	12b	12b
δ in Grad:	20	30	40	45	50	55	60	65
v_1 in m/s:	1,041	1,552	2,050	2,294	2,533	2,768	2,997	3,221
SA_1 in pm:	19	42	74	92	113	134	158	182



Bilder 13a bis d. Oberflächenverletzungen an 1/1-Sektflaschen durch Schlagbeanspruchungen (Schlagkopf 3: Pendelgewicht 0,344 kg; Stahlkugeldurchmesser 30 mm).

Bild:	13a	13a	13a	13b	13c	13d
δ in Grad:	60	70	80	90	100	105
v_1 in m/s:	2,997	3,438	3,853	4,239	4,592	4,756
SA_1 in pm:	158	207	260	316	370	397

Faktoren das Bruchverhalten beeinflussen [5]. Die Untersuchungen erstreckten sich auf Versuche an 1/1-Sektflaschen und 385-cm³-Marmeladengläser, wobei Oberflächenverletzungen in Art, Form und Größe sowie der Bruch dieser Hohlgläser in Abhängigkeit vom Kugeldurchmesser des Schlagkopfes, der Auftreffgeschwindigkeit (v) und der Schlagarbeit (SA) ermittelt wurden. Da die herkömmlichen Schlaggeräte nicht die Möglichkeit boten, mit sehr unterschiedlichen Massen zu arbeiten, wurde für diese Versuche ein Schlaggerät gebaut, das es erlaubte, mit zwei sehr unterschiedlichen Massen von 0,344 kg (Pendellänge 916 mm) und 2,822 kg (Pendellänge 922 mm) zu arbeiten, wobei für jedes dieser Pendelgewichte drei verschieden große Schlagkörper benutzt wurden. Diese bestanden aus gehärteten Stahlkugeln mit den Durchmessern 3, 10 und 30 mm. Das Gegenlager für die Hohlgläser war variabel:

a) starr, d. h. ein Zurückrollen des Wagens war nicht möglich;

b) elastisches Zurückrollen des Wagens einschließlich der Probe, wobei die Elastizität durch verschieden starke Federn regelbar war.

Die Anlagenform konnte gerade ($\rightarrow \square$) oder winklig ($\rightarrow \square$) sein. Außerdem war der Ort des Schlages in der Höhe verstellbar.

Vor Beginn der Untersuchungen wurde das Gerät auf seine Reibungsverluste hin untersucht und dabei festgestellt, daß die Verlustarbeit im Arbeitsbereich unter 2% lag.

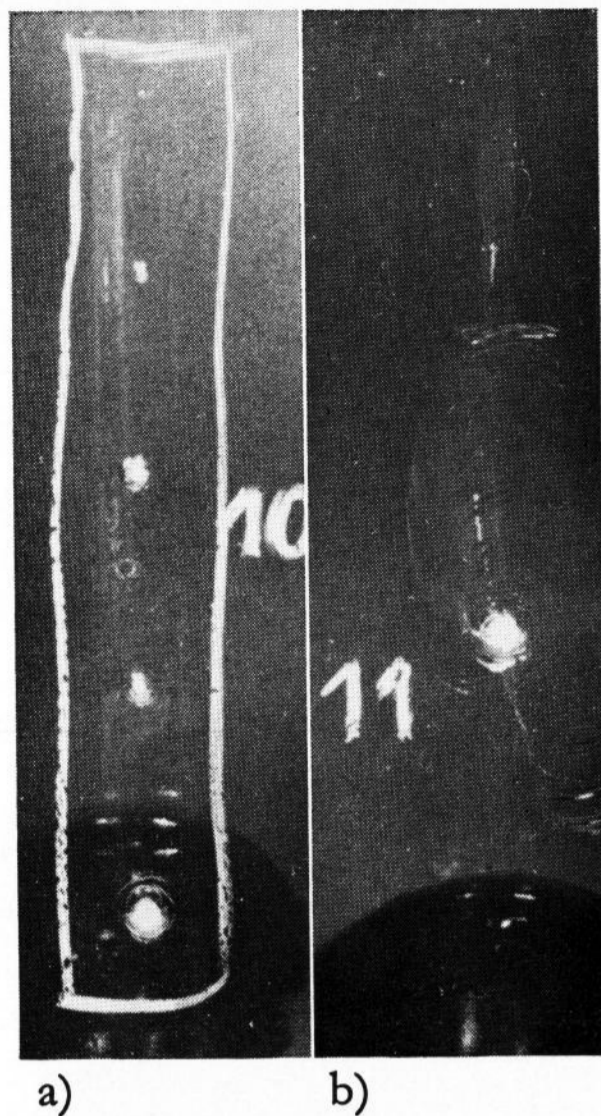
7.1. Schlaguntersuchungen an 1/1-Sektflaschen

Der Grad der Schlagverletzungen bei den 1/1-Sektflaschen ist in den Bildern 11 bis 16 wiedergegeben. Die verwendeten Symbole bedeuten: δ = Auslenkwinkel in Grad; v_1 = Auftreffgeschwindigkeit des leichten Pendels in m/s; v_s = Auftreffgeschwindigkeit des schweren Pendels in m/s; SA_1 = Schlagarbeit des leichten Pendels in pm; SA_s = Schlagarbeit des schweren Pendels in pm.

a) Schlagkopf 1 (Pendelgewicht 0,344 kg; Stahlkugeldurchmesser 3 mm): Wie Bild 11a zeigt, werden schon bei kleinen Auslenkungen (ab 10°) sichtbare Oberflächenverletzungen bedingt durch den spitzen Schlagkopf hervorgerufen. Bis 35° entstehen rund um den Schlagpunkt kleine Risse und darüber hinaus weiße Stellen aus Glasmehl (Bild 11b). Bild 11c zeigt, daß die Auswirkung des Schlages in die Tiefe geht. In allen Fällen entstand die Verletzung durch Überschreiten der zulässigen Flächenpressung.

b) Schlagkopf 2 (Pendelgewicht 0,344 kg; Stahlkugeldurchmesser 10 mm): Die Verletzungen (Bilder 12a und b) werden im Gegensatz zum Versuch mit der Stahlkugel von 3 mm Durchmesser erst bei größeren Auslenkungen hervorgerufen, da ein großer Teil der Schlagenergie auf die ganze Flasche übergeht. Erst eine Auslenkung von 60° zeigt Spuren von Glasmehl. Das Loch, das in Bild 12b unten wiedergegeben ist, geht nicht durch die Flaschenwand.

c) Schlagkopf 3 (Pendelgewicht 0,344 kg; Stahlkugeldurchmesser 30 mm): Der große Kugeldurchmesser ruft nur geringe Oberflächenverletzungen (Bilder 13a bis d) hervor. Erst eine Auslenkung von 105° (kurz vor dem Bruch der Flasche) läßt eine merkliche Oberflächen-



Bilder 14a und b. Oberflächenverletzungen an 1/1-Sektflaschen durch Schlagbeanspruchungen (Schlagkopf 4: Pendelgewicht 2,822 kg; Stahlkugeldurchmesser 3 mm).

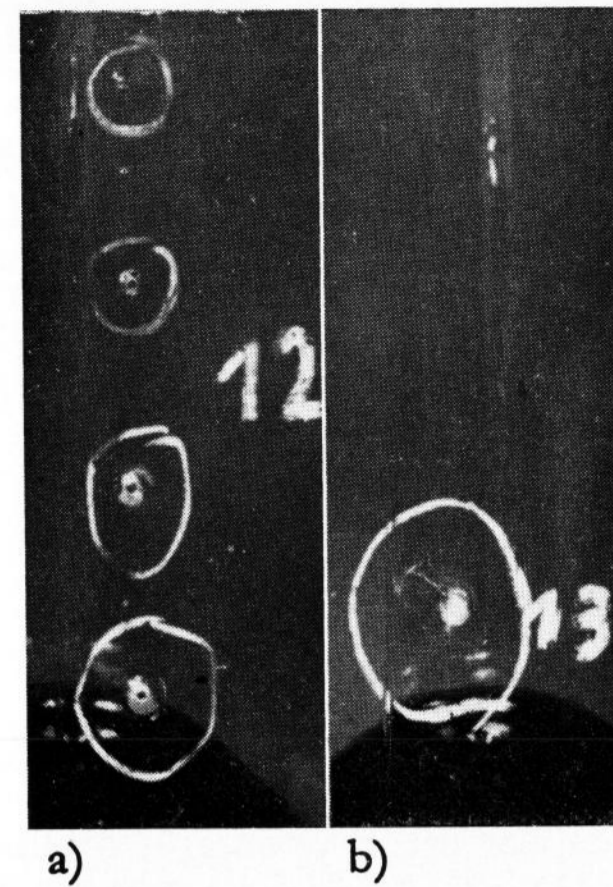
Bild:	14a	14a	14a	14a	14a	14b
δ in Grad:	5	10	15	20	25	30
v_s in m/s:	0,262	0,524	0,785	1,044	1,302	1,557
SA_s in pm:	10	40	89	157	244	349

verletzung entstehen. Eine gleich starke Schädigung wird mit der Stahlkugel von 3 mm Durchmesser schon bei 30° erreicht. Ein Vergleich der entsprechenden Einflußgrößen ergibt ein Geschwindigkeitsverhältnis von 3:1 und ein Verhältnis der Schlagarbeiten von 9,5:1. Das Hohlglas nimmt fast die gesamte Schlagenergie auf, bevor es zu Bruch geht, wobei die Oberfläche nur wenig verletzt wird.

d) Schlagkopf 4 (Pendelgewicht 2,822 kg; Stahlkugeldurchmesser 3 mm): Die Oberflächenverletzungen (Bilder 14a und b) sind ähnlich denen der Bilder 11a bis c, jedoch sind die Schlagstellen durch vermehrte Glasmehlbildung kontrastreicher. Dies ist auf die höhere Schlagenergie zurückzuführen. Die große Masse kann nicht so leicht zurückfedern, wodurch sich der Schlag nachhaltiger auswirkt. In Bild 14b ist eine muschelartige Abplatzung deutlich sichtbar. Diese wird durch den hohen spezifischen Flächendruck unter der Glasoberfläche im Innern ausgelöst.

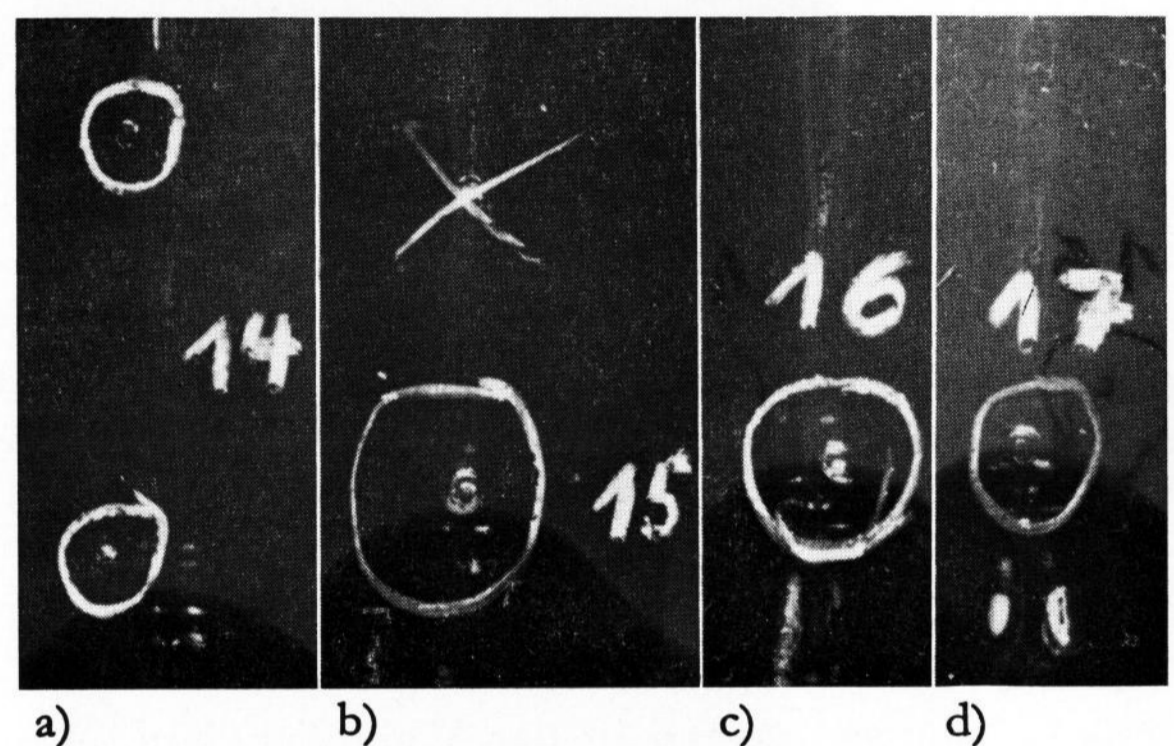
e) Schlagkopf 5 (Pendelgewicht 2,822 kg; Stahlkugeldurchmesser 10 mm): Die Verletzungen (Bilder 15a und b) sind ähnlich denen, die mit gleichem Kugeldurchmesser und dem Pendelgewicht von 0,344 kg erhalten wurden (Bilder 12a und b), jedoch wird ungefähr die zwei- bis dreifache Schlagarbeit bei halb so großer Auftreffgeschwindigkeit benötigt, um gleiche Verletzungen hervorzurufen.

f) Schlagkopf 6 (Pendelgewicht 2,822 kg; Stahlkugeldurchmesser 30 mm): Die Zerstörungen der Oberfläche (Bilder 16a bis d) werden erst durch hohe Schlägeinwirkungen hervorgerufen. Das Zerstörungsbild zeigt sich jeweils in wenigen Rissen um den Schlagpunkt herum und ist dem der Bilder 13a bis d ähnlich. Ein Vergleich der Versuchswerte zu den Bildern 13d und 16d ergibt, daß die Schlagarbeit des schweren Pendels dreimal so groß ist wie die des leichten, während die Auftreffgeschwindigkeit des leichten Pendels eineinhalbmal so groß wie die des schweren ist.



Bilder 15a und b. Oberflächenverletzungen an 1/1-Sektflaschen durch Schlagbeanspruchungen (Schlagkopf 5: Pendelgewicht 2,822 kg; Stahlkugeldurchmesser 10 mm).

Bild:	15a	15a	15a	15a	15b
δ in Grad:	15	20	25	30	35
v_s in m/s:	0,785	1,044	1,302	1,557	1,808
SA_s in pm:	89	157	244	349	471



Bilder 16a bis d. Oberflächenverletzungen an 1/1-Sektflaschen durch Schlagbeanspruchungen (Schlagkopf 6: Pendelgewicht 2,822 kg; Stahlkugeldurchmesser 30 mm).

Bild:	16a	16a	16b	16c	16d
δ in Grad:	25	35	45	50	60
v_s in m/s:	1,302	1,808	2,302	2,542	3,007
SA_s in pm:	244	471	762	929	1301

Die unter den Abschnitten a) bis f) durchgeführten Untersuchungen lassen an Hand der Ergebnisse folgende Schlußfolgerungen zu: Spitze Schlagköpfe rufen große, in die Tiefe gehende Oberflächenverletzungen am Schlagpunkt hervor. Bei stumpfen Schlagköpfen sind die Verletzungen geringer, jedoch großflächiger; die Schlagenergie wird in erster Linie vom gesamten Hohlglas aufgenommen. Bei gleichem Oberflächenverletzungsgrad benötigt ein Pendel mit großer Masse mehr Schlagenergie als ein Pendel mit kleiner Masse. Die Bruchursachen sind bei einem spitzen Schlagkopf auf Überschreitung der zulässigen Flächenpressung am Schlagpunkt zurückzuführen, der stumpfe Schlagkopf hingegen löst den Bruch an der schwächsten Stelle des Hohlglases aus.

7.2. Schlaguntersuchungen an 385-cm³-Marmeladengläsern

Bei der Durchführung dieser Versuche trat das Problem der Definition der zu Bruch führenden Schlagarbeit auf. Folgende Gesichtspunkte waren zu berücksichtigen: a) Geht eine Probe beim ersten Schlag zu Bruch, so kann die Schlagarbeit zu hoch gewählt worden sein.

b) Erfolgt kein Bruch beim ersten Schlag, so hat die Probe bereits eine Verletzung erfahren. Die Voraussetzungen für weitere Schläge sind andere als für den ersten Schlag.

c) Werden $n-1$ Schläge gleicher Auslenkung auf eine Probe ausgeführt, so kann die gleiche Auslenkung beim n -ten und zum Bruch führenden Schlag viel zu hoch sein (Verletzungen durch $n-1$ Schläge).

d) Bei dieser Versuchsart kann die Schlagzahl n bis zum Bruch sehr groß werden.

Für die Untersuchungen wurde daher folgendes Verfahren angewandt: Zunächst wurde eine Anfangsauslenkung δ_0 ermittelt, die für jeden Schlagkopf verschieden war und bei der die Proben mit Sicherheit nicht zu Bruch gingen. Um die Zahl n der Pendelschläge klein zu halten, wurde die Pendelauslenkung δ mit jedem Schlag konstant um $\Delta\delta$ erhöht. Die Größe von $\Delta\delta$ wurde für jeden Schlagkörper so gewählt, daß ungefähr vier Schläge bis zum Bruch erforderlich waren. Der Auslenkungswinkel des zum Bruch führenden Schlags ist δ_{Bruch} . Der erste Schlag erfolgte jeweils auf die gleiche Umfangsstelle (Hüttenzeichen). Nach jedem Schlag wurde die Probe um 45° gedreht.

Für die Versuche wurden 54 Gläser herangezogen, die neun verschiedene Formnummern aufwiesen. Als Probengegenlager wurde das Winkelprisma benutzt. Der Schlagpunkt lag in der Probenmitte. Tabelle 5 gibt für die einzelnen Schlagköpfe die Ausgangswinkellagen δ_0 und den konstanten Winkelzuwachs $\Delta\delta$ wieder. Diese Werte wurden in einem umfangreichen Vorversuch ermittelt.

7.2.1. Einfluß der Wanddicke

Durch die Herstellung bedingt, treten bei jedem Hohlglas Schwankungen in der Wanddicke auf. Wird ein Glas durch einen Schlag beansprucht, so hängt sein

Tabelle 5. Anfangsauslenkung δ_0 und Winkelzuwachs $\Delta\delta$ für die Schlagköpfe 1 bis 6

Schlagkopf	δ_0 in Grad	$\Delta\delta$ in Grad
1	40	3
2	45	3
3	47	3
4	14	1
5	15	1
6	16	1

Bruchverhalten u. a. auch von der Wanddicke an der Schlagstelle ab.

Zur Bestimmung dieser Einflußgröße wurde die maximale und minimale Wanddicke an 72 Gläsern mit einem optischen Wanddickenmesser bestimmt. Die Werte schwankten zwischen 1,52 und 3,57 mm. Als Schlagköpfe dienten die Stahlkugeln mit dem Durchmesser 3 bzw. 30 mm und dem leichten bzw. schweren Pendelgewicht (Schlagköpfe 1, 3, 4 und 6). Je 24 Gläser wiesen die gleiche Formnummer auf. Bei jeweils 36 Gläsern wurde der Schlag auf die größte bzw. kleinste Wanddicke ausgeübt. Die in Tabelle 5 ermittelten Schlagbedingungen wurden diesen Versuchen zugrunde gelegt.

Wie das Ergebnis (Tabelle 6) zeigt, haben Wanddickendifferenzen einen starken Einfluß auf die Schlagfestigkeit. Im Falle des 385-cm³-Glases beträgt die Schlagarbeit — auf die Wanddicke W_{max} bezogen — für die Wanddicke W_{min} nur 75%. Dieser Wert gilt als Mittel für alle Schlagköpfe mit leichtem und schwerem Pendelgewicht.

7.2.2. Einfluß von Eigenspannungen

Die Bestimmung von Eigenspannungen an Hohlgläsern kann mit polarisiertem Licht im Hell-Dunkelfeld und mit Rot I. Ordnung (Farbumschlag) oder mit Hilfe einer Kontrollisokline erfolgen. Bei der Betrachtung im Hell-Dunkelfeld können nur Eigenspannungsdifferenzen registriert werden. Eine genaue Aussage über den Verspannungszustand an der Außenseite der Gläser ist danach nicht möglich. Trotz dieser einschränkenden Aussagekraft wurden 120 Marmeladengläser zwölf verschiedener Formnummern (je Formnummer zehn Stück) nach diesen Verfahren untersucht und die Aufhellungen je nach Grad in vier von sechs möglichen Stufen eingeteilt. Diese Vorspannungen zeigten sich in der Regel als drei helle Stellen, getrennt durch zwei dunkle Linien. Der Aufhellungsgrad lag zwischen den Stufen 0 bis 3.

Die Schläge wurden mit dem leichten und schweren Pendel ausgeführt, wobei als Schlagkörper die Kugeln mit den Durchmessern 3 und 30 mm dienten (Schlagköpfe 1, 3, 4 und 6). Geschlagen wurde abwechselnd auf eine der verspannten Stellen in der Reihenfolge: mittlere, linke, rechte Aufhellung; die Schlaghöhe lag bei $h_{1/2}$. Die ermittelten Wanddicken an den Schlagstellen lagen zu 67% im Bereich von 2,32 bis 2,68 mm.

Tabelle 6. Einfluß der Wanddickendifferenzen auf die Schlagfestigkeit bei Marmeladengläsern

Schlagpunkt:	W_{max}				W_{min}			
	1	3	4	6	1	3	4	6
Schlagkopf:	1	3	4	6	1	3	4	6
δ_0 in Grad:	40	47	14	16	40	47	14	16
$\Delta\delta$ in Grad:	3	3	1	1	3	3	1	1
Form-Nr. 3: δ_{Bruch} in Grad; n-Schläge:	51; 5	65; 7	18; 5	21; 6	44; 2	47; 1	15; 2	16; 1
Form-Nr. 5: δ_{Bruch} in Grad; n-Schläge:	59; 7	61; 6	18; 5	21; 6	46; 3	48; 1	15; 2	16; 1
Form-Nr. 11: δ_{Bruch} in Grad; n-Schläge:	53; 5	65; 7	17; 4	26; 11	46; 3	72; 9	18; 5	26; 11
$\bar{\delta}_{\text{Bruch}}$ in Grad; \bar{n} -Schläge:	54; 6	64; 7	18; 5	23; 8	45; 3	56; 4	16; 3	19; 4
v in m/s:	2,72	3,18	0,94	1,20	2,29	2,81	0,84	0,99
SA in pm:	130	177	127	207	92	139	101	142
SA in % ¹⁾ :	100	100	100	100	71	79	80	69
\bar{SA} in % ¹⁾ :	100				75			

¹⁾ Werte für SA (W_{min}) und \bar{SA} (W_{min}) jeweils bezogen auf SA (W_{max}) bzw. auf \bar{SA} (W_{max}).

Tabelle 7. Zum Bruch führende Pendelauslenkung bzw. Schlagarbeit in Abhängigkeit von Eigenspannungen und Schlagkopf

Spannungsklasse:	0		1		2		3		—	
	δ_{Bruch} in Grad	\bar{n} -Schläge	δ_{Bruch} in Grad	\bar{n} -Schläge	δ_{Bruch} in Grad	\bar{n} -Schläge	δ_{Bruch} in Grad	\bar{n} -Schläge	δ_{Bruch} in Grad	\bar{n} -Schläge
Schlagkopf 1:	45,5	9	48,5	14	52	6	46	1		
Schlagkopf 3:	58	9	57,5	14	60	5	69,5	2		
Schlagkopf 4:	17	11	16,5	12	16,5	6	16	1		
Schlagkopf 6:	18,5	16	20,5	10	26	4	—	—		
	\overline{SA} in pm		\overline{SA} in pm		\overline{SA} in pm		\overline{SA} in pm		\overline{SA} in pm	
Schlagkopf 1:	94		106		121		96			
Schlagkopf 3:	148		146		158		205			
Schlagkopf 4:	114		107		107		101			
Schlagkopf 6:	142		170		263		—			

Da in vielen Fällen dieses Versuches sowohl bei kleiner Wanddicke eine hohe Schlagenergie verbraucht wurde als auch bei großer Wanddicke eine niedrige Schlagenergie, andererseits verschieden hohe Schlagenergien bei gleicher Wanddicke benötigt wurden, muß angenommen werden, daß die Eigenspannungen sich entsprechend ausgewirkt haben. Läßt man die Formnummer als Parameter unberücksichtigt, so erhält man die in Tabelle 7 aufgeführten Ergebnisse. Aus dem Kurvenverlauf in Bild 17, in dem diese Ergebnisse dargestellt sind, ist zu entnehmen, daß sich spitze Schlagkörper unabhängig vom Aufhellungsgrad am Schlagpunkt ungünstiger auswirken als stumpfe Schlagkörper. Eine einwandfreie Zuordnung der Schlagarbeit zum Aufhellungsgrad ist aber nicht gegeben, da ähnliche Ergebnisse auch ohne Berücksichtigung der Eigenspannungen erhalten wurden.

7.2.3. Einfluß der Formnummer

Der Einfluß der Formnummer auf die Schlagfestigkeit von Marmeladengläsern wurde aus den Versuchen des Abschnitts 7.2.2. hergeleitet. Um eine Rangordnung ermitteln zu können, wurden die Schlagarbeiten für die einzelnen Schlagköpfe in Prozenten errechnet, wobei die größte Schlagarbeit 100% entspricht. Wenn man für die einzelnen Formnummern die prozentualen Schlagarbeiten addiert, den größten Anteil gleich 100% setzt und die anderen Schlagarbeiten auf diesen Wert bezieht, so erhält man eine Reihenfolge für die Schlagfestigkeiten der einzelnen Formnummern (Tabelle 8). In Tabelle 8 weist die Formnummer 11 den höchsten Wert auf, Formnummer 6 dagegen den niedrigsten. Alle anderen Werte bewegen sich zwischen 100 und 60%.

Die Gründe für diese Schwankungen können Wanddickendifferenzen, Eigenspannungen, stärkere Abweichungen von der Rundheit sein.

7.2.4. Einfluß des Schlagortes

Zur Bestimmung des Einflusses des Schlagortes auf die Festigkeit wurde die leichtgewichtige Milchflasche untersucht. In Bild 18 sind die drei Schlagorte vermaßt angegeben. Da es sich bei diesen Gläsern um dünnwandige Gefäße ($\bar{W} = 1,5 \text{ mm}$) handelte, wurde das leichte Pendelgewicht mit der Schlagkugel von 10 mm Durchmesser (Schlagkopf 2) gewählt. δ_0 war 60° und wurde mit jedem Schlag um $\Delta\delta = 5^\circ$ erhöht. Als Gegenlager diente das Stahl-Winkelprisma; die Berührungspunkte Glas-Stahl waren x_u und x_o . Der Formnummerneinfluß wurde nicht erfaßt, da nur Gläser der Form-

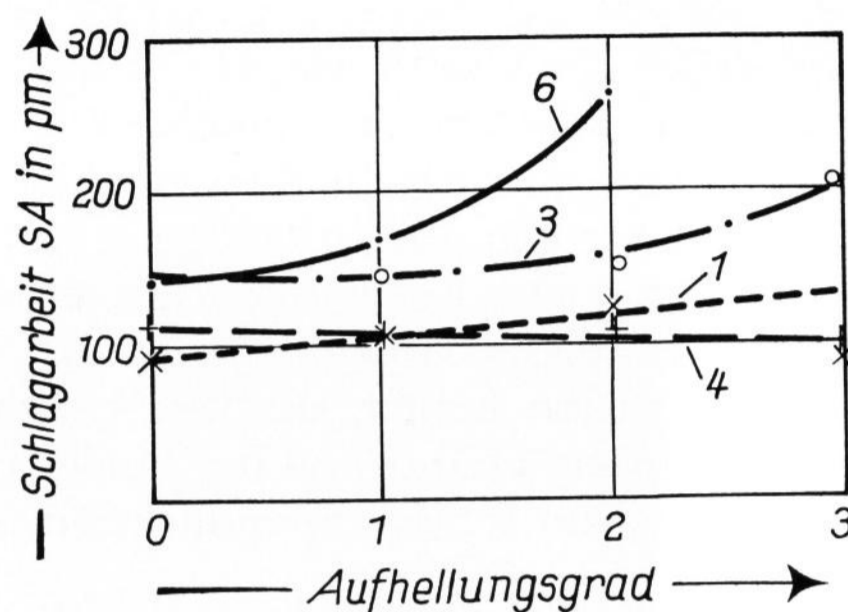


Bild 17. Zum Bruch führende Schlagenergie in Abhängigkeit von Eigenspannungen bei Marmeladengläsern (Pendelgewicht und Form des Schlagkopfes als Parameter).

- 1 = Schlagkopf 1, 3 = Schlagkopf 3,
- 4 = Schlagkopf 4, 6 = Schlagkopf 6.

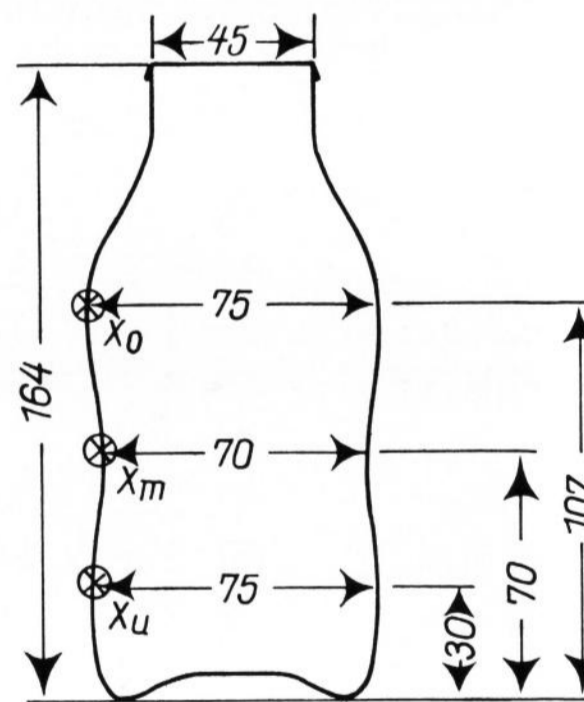


Bild 18. Abmessungen (Angaben in mm) einer 0,5-l-Milchflasche mit Kennzeichnung der drei Schlagorte x_o , x_m und x_u .

Tabelle 8. Schlagarbeit in Prozenten für die einzelnen Formnummern

Schlagkopf:	1	3	4	6	$\Sigma \overline{SA}$ in %	\overline{SA} in % bezogen auf Form-Nr. 11
	\overline{SA} in %					
Form-0:	94	82	—	—	176	89
Nr. 3:	80	70	—	—	150	76
4:	83	—	82	—	165	83
5:	100	—	78	—	178	90
6:	71	—	—	47	118	60
7:	78	—	—	43	121	61
8:	—	100	78	—	178	90
11:	—	98	100	—	198	100
12:	—	93	—	100	193	97
14:	—	59	—	71	130	66
16:	—	—	96	71	167	84
18:	—	—	88	51	139	70

Tabelle 9. Einfluß des Schlagortes auf die zum Bruch führende Schlagenergie bei leichtgewichtigen Milchflaschen

Schlagort:	x_u	x_m	x_o
$\bar{\delta}_{Bruch}$ in Grad; \bar{n} -Schläge:	67,8; 2÷3	65,3; 2	72,5; 3÷4
$\bar{S}\bar{A}$ in pm:	196	183	220
$\bar{S}\bar{A}$ in % ²⁾ :	89	83	100
\bar{v} in m/s:	3,34	3,23	3,54
\bar{v} in % ²⁾ :	94	91	100

²⁾ Werte bezogen auf den Schlagort x_o .

nummer 18 für diese Versuche vorlagen. Tabelle 9 gibt das Ergebnis als Mittelwert aus jeweils 20 Versuchen wieder.

Als Versuchsergebnis kann festgestellt werden, daß für die 0,5-l-Milchflasche eine Abhängigkeit der Schlagfestigkeit vom Schlagort besteht. Der höchste Schlagarbeitswert wurde für den oberen Schlagort x_o erreicht, es folgten x_u und x_m . Die Reihenfolge könnte dadurch erklärt werden, daß dieser Hohlglastyp an der Stelle x_o seine höchste Elastizität besitzt, der Ort x_u durch den Boden eine Versteifung erfährt und der Punkt x_m durch seine Einschnürung am schlagempfindlichsten ist.

7.2.5. Einfluß des Gegenlagers

Da neben den bereits untersuchten Einflußfaktoren auch das Gegenlager — starres bzw. federndes Widerlager — von Einfluß auf die Schlagfestigkeit ist, wurden

in dieser Richtung Untersuchungen an 64 0,5-l-Milchflaschen mit dem leichten und schweren Pendelgewicht jeweils in Verbindung mit den Kugeldurchmessern 3 und 30 mm durchgeführt. Der Schlag erfolgte für alle vier Variationen auf die Stelle x_u (Bild 18).

In Tabelle 10 sind die Mittelwerte der Schlagarbeit und die Auftreffgeschwindigkeit aufgeführt. Wie das Ergebnis zeigt, wirkt sich ein festes Widerlager ungünstiger aus, da die Schlagenergie voll vom Körper aufgenommen werden muß.

Im Rahmen dieser Schlagfestigkeitsversuche erfolgte noch eine Reihe weiterer Untersuchungen, bei denen das Widerlager mit verschiedenen Materialien unterschiedlicher Elastizität belegt war. Ein weiches Schaumstoff-Gegenlager erhöht die Schlagfestigkeit gegenüber einem mit PMMA belegten Gegenlager. Wird ein zweites Hohlglas zwischengeschaltet, d. h. werden zwei Hohlgläser hintereinander angeordnet, so ist nur eine geringe Steigerung der Schlagfestigkeit festzustellen. Ein starres Stahl-Widerlager zeigt eine höhere Schlagempfindlichkeit als ein solches, dessen Oberfläche mit PMMA belegt ist. Auf ausführliche Aufzeichnungen sei an dieser Stelle jedoch verzichtet.

Der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG), Frankfurt (Main), und der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), Köln, wird für die freundliche Unterstützung der Forschungsarbeit gedankt.

Tabelle 10. Einfluß eines federnden und eines festen Gegenlagers auf die Schlagfestigkeit von leichtgewichtigen Milchflaschen (Schlagkopf als Parameter)

Gegenlager:	federnd				fest			
	1	3	4	6	1	3	4	6
Schlagkopf:	1	3	4	6	1	3	4	6
δ_0 in Grad:	55	65	17	17	50	50	15	15
$\Delta\delta$ in Grad:	5	5	1	1	5	5	1	1
δ_{Bruch} in Grad; n-Schläge:	70; 4	75; 3	19; 3	18; 2	65; 4	55; 2	19; 5	16; 2
δ_{Bruch} in Grad; n-Schläge:	65; 3	70; 2	20; 4	22; 6	70; 5	65; 4	17; 3	16; 2
δ_{Bruch} in Grad; n-Schläge:	70; 4	75; 3	18; 2	18; 2	60; 3	65; 4	20; 6	16; 2
δ_{Bruch} in Grad; n-Schläge:	60; 2	75; 3	18; 2	20; 4	65; 4	55; 2	16; 2	17; 3
δ_{Bruch} in Grad; n-Schläge:	60; 2	80; 4	18; 2	19; 3	65; 4	55; 2	15; 1	19; 5
δ_{Bruch} in Grad; n-Schläge:	60; 2	70; 2	19; 3	18; 2	55; 2	65; 4	16; 2	19; 5
δ_{Bruch} in Grad; n-Schläge:	65; 3	75; 3	17; 1	19; 3	60; 3	75; 6	17; 3	19; 5
δ_{Bruch} in Grad; n-Schläge:	60; 2	70; 2	19; 3	20; 4	55; 2	70; 5	18; 4	17; 3
$\bar{\delta}_{Bruch}$ in Grad:	63,8	73,8	18,5	19,3	61,9	63,1	17,3	17,4
\bar{n} -Schläge:	3	3	2÷3	3	3÷4	3÷4	3	3÷4
$\bar{S}\bar{A}$ in pm:	176	227	135	146	167	173	118	119
$\bar{S}\bar{A}$ in % ³⁾ :	100	100	100	100	95	76	87	81
\bar{v} in m/s:	3,17	3,60	0,97	1,01	3,08	3,14	0,90	0,91
\bar{v} in % ³⁾ :	100	100	100	100	97	87	93	90

³⁾ Werte für jeden Schlagkopf jeweils auf $\bar{S}\bar{A}$ (federnd) in % bezogen bzw. auf \bar{v} (federnd) in %.

8. Literatur

[1] FINK, K. und ROHRBACH, C. (Hrsg.): Handbuch der Spannungs- und Dehnungsmessung. Düsseldorf: VDI-Verl. 1958.

[2] O. Verf.: Arbeitsanleitungen zu den Meßgeräten der Hottinger-Baldwin Meßtechnik GmbH.

[3] KANTOROWITSCH, S. B.: Die Festigkeit der Apparate und Maschinen für die chemische Industrie. Berlin: VEB Verl. Technik 1955.

[4] TEAGUE, J. M., jr. und BLAU, H. H.: Investigations of stresses in glass under internal hydrostatic pressure. I: Photoelastic studies of fosterite models. II: Breakage studies of glass bottles under internal hydrostatic pressure. III: Electric strain gauge and brittle coating studies. J. Amer. ceram. Soc. **39** (1956) S. 229 – 252. [Ref. Glastechn. Ber. **31** (1958) S. 249.]

[5] MOULD, R. E.: The behaviour of glass bottles under impact. J. Amer. ceram. Soc. **35** (1952) S. 230 – 235. [Ref. Glastechn. Ber. **26** (1953) S. 249.]