

Beschuss von flüssigkeitsgefüllten Behältern

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTOR-INGENIEURS
von der Fakultät für
Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Thorsten Timm
aus der Freien und Hansestadt Hamburg

Tag der mündlichen Prüfung: 20.02.2002

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing.E.h. Dr.techn.h.c. J. Eibl
Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. habil. W. Wagner
Prof. Dr.-Ing. L. Stempniewski
Prof. Dr.-Ing. H. Saal

Karlsruhe 2003

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beinhaltet Experimente und theoretische Untersuchungen zur Erforschung des Tragverhaltens von flüssigkeitsgefüllten Behältern unter mittlerer Stoßgeschwindigkeit. Dünnwandige zylindrische Stahlbehälter mit unterschiedlicher Wandstärke wurden mit Projektilen beschossen. Um die unterschiedlichen Versagensmechanismen untersuchen zu können, wurden leere und mit Wasser gefüllte Behälter gewählt. Bei den mit Flüssigkeit gefüllten Behältern sind unterschiedliche Versagensmechanismen von einer einfachen Perforation der Behältervorder- und -rückseite bis hin zu einem katastrophalem Versagen der beschossenen Behälterseite mit Perforation der Behälterrückseite festzustellen. Die Entwicklung einer konzentrierten Druckwelle in der Flüssigkeit, ausgehend von dem Aufschlagpunkt des Projektils an dem Behälter, durch die Flüssigkeit hindurch zur gegenüberliegenden Behälterwand und von dort aus wieder zurück zum Aufschlagpunkt konnte ebenso wie eine überlagerte Druckentwicklung auf Grund der Verdrängung der Flüssigkeit durch das Projektil festgestellt werden. Spannungen und Dehnungen wurden in dem Behälter gemessen. Ebenfalls hat die Geschossgeschwindigkeit und die Geometrie des Containments großen Einfluss auf die Versagensart des Behälters. Die Primärdruckwelle und die reflektierten Druckwellen beeinflussen die Rissbildung in der Behälterwand. Theoretische Untersuchungen unter Zuhilfenahme der FE-Methode halfen die Experimentellen Untersuchungen zu verdeutlichen.

Abstract

The study summarizes experiments and theoretical investigations to explore the behavior of liquid filled containers under medium speed impact. Thin-walled cylindrical steel containers with different wall thickness were impacted by gun projectiles. To investigate the major difference of the container failure modes empty and water filled containers were used. In the case of the water filled containers the impact damages ranged from simple perforation of front and rear wall to a catastrophic front wall rupture which started at the rim of the impact hole and an additional perforation of the rear wall. The development of the pressure distribution in the water starting at the point of penetration was followed through the container to the opposite wall and back to the point of entry of the projectile. Stresses and strains in the containment were registered. Also the impact velocity and the geometry of the container cause different failure modes. The primary and the reflected pressure fields interact with the wall creating specific crack patterns. Theoretical investigations by means of the Finite Element Method helped to explain the experimental findings.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe (TH).

Mein besonderer Dank gilt meinem Lehrer, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr.techn. h.c. J. Eibl, für die Anregung zu dieser Arbeit, die kritischen Anmerkungen, sowie die wertvollen Diskussionen, die den Fortgang dieser Dissertation begleiteten. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. W. Wagner möchte ich besonders danken für die Übernahme des Korreferates und für die wertvollen Hinweise zur Vervollständigung dieser Arbeit. Ebenfalls möchte ich den Herren Prof. Dr.-Ing. L. Stempniewski sowie Prof. Dr.-Ing. H. Saal für die anregenden Diskussionen und die Übernahme der weiteren Korreferate danken.

Den Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie und dort insbesondere Herrn Gerlach und Frau Eggmann möchte ich für die ständige Hilfsbereitschaft und für das nette Arbeitsklima danken. Des weiteren möchte ich den Mitarbeitern der Meßtechnik und dort besonders Herrn Dr.-Ing. Hehn und Herrn Trump, sowie den Mitarbeitern der Werkstatt für die Hilfe bei der Durchführung der zahlreichen Versuche danken. Des weiteren möchte ich dem Ernst-Mach Institut in Freiburg für die Unterstützung und Möglichkeit zur Durchführung zweier Versuche danken.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie die mich bei dieser Arbeit unterstützte und sie ermöglichte.

Thorsten Timm

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung	1
2	Untersuchungen anderer Autoren	3
	2.1 Strukturen bei Impact-Beanspruchungen	5
	2.2 Empirisch-Analytische Ansätze	22
	2.3 Untersuchungen mit Hilfe der FEM	23
3	Prinzipielles Tragverhalten	31
4	Eigene experimentelle Voruntersuchungen	41
	4.1 Durchgeführte Vorversuche	42
	4.2 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	44
	4.3 Auswertung der Vorversuche	48
5	Eigene Hauptexperimente	59
	5.1 Durchgeführte Versuche	59
	5.2 Das Material der Behälter	64
	5.3 Geschwindigkeitsmessung	65
	5.4 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	67
	5.5 Druckmessungen in der Flüssigkeit	70
	5.6 Auswertung der Versuche	72
	5.6.1 Beschuss von leeren Behältern	72
	5.6.2 Beschuss von flüssigkeitsgefüllten Behältern	75
	5.6.3 Ergebnisse der Druckmessungen in der Flüssigkeit	86
	5.6.4 Vergleich von gefüllten und leeren Behältern	90
6	Rechnerische Simulation mit der FEM	95
	6.1 Diskretisierung	99
	6.1.1 Der Behälter	99
	6.1.2 Das Fluid im Behälter	101
	6.1.3 Das Geschoss	104

6.2	Kontakt zwischen den einzelnen Elementgruppen	105
6.3	Stoffgesetze für Behälter, Fluid und Projektil	108
7	Vergleich von Versuchsergebnissen und FEM	115
7.1	Vergleich des Beschusses von leeren Behältern und FEM	115
7.2	Vergleich des Beschusses von wassergefüllten Behältern und FEM ..	122
7.3	Weitere Berechnungen mit der FEM	133
8	Diskussion der Ergebnisse	143
9	Zusammenfassung	149
10	Literatur	151
	Anhang	165

1 Problemstellung

In der Gesellschaft entwickelte sich über die letzten Jahrzehnte hinweg ein immer stärkeres Sicherheitsbedürfnis. Daraus folgte eine vermehrte Untersuchung von möglichen Katastrophen-Lastfällen, wie sie auch bei relevanten Bauwerken auftreten können. Zu diesen Bauwerken zählen nicht nur Kraftwerke, und dort insbesondere Kernkraftwerke, sondern auch Gebäude der chemischen Industrie, Raffinerien, Behälter mit gefährlichem Inhalt und sensible öffentliche Gebäude. Der Bereich der Beanspruchung ist weit gefächert und reicht von Stoßbeanspruchungen durch LKW, Eisenbahn oder Flugzeug, Fallen und Fliegen von Bruchstücken bei Störfällen in Anlagen, wie zum Beispiel bei schnell drehenden Maschinenteilen, Explosion und Detonation in Gebäuden oder Sprengladungen bei terroristischen Anschlägen.

In der chemischen Industrie sind meist mehrere Behälter, die mit Flüssigkeit gefüllt sind und teilweise unter hohem Druck stehen, räumlich eng in einer Behältergruppe angeordnet. Kommt es zu einem Störfall, so dass einer der Behälter explodiert, so können umstehende Behälter von Bruchstücken, wie zum Beispiel Teilen der Behälterschale, Rohren oder Ventilen getroffen werden.

Diese Schäden müssen lokal begrenzt und Kettenreaktion von Explosionen durch ein katastrophales Versagen jeweils weiterer Behälter verhindert werden. Ein derart katastrophales Versagen ist im Allgemeinen so charakterisiert, dass die Behälterwand auf einem Großteil der Gesamtstruktur schlagartig aufreißt (siehe Abb. 3.5). Dieses schlagartige Aufreißen eines mit Flüssigkeit gefüllten Behälters ist hauptsächlich abhängig von der Behälterwanddicke, dem Material der Behälterwand und der Auftreffgeschwindigkeit und Masse des Bruchstückes. Das schlagartige Aufreißen bei meist flüssigkeitsgefüllten Behältern erfolgt durch zwei verschiedene physikalische Phänomene, die anschließend kurz beschrieben werden.

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, leere und mit Flüssigkeit gefüllte Stahlbehälter, die mit Projektilen beschossen wurden, zu untersuchen, um die Parameterkombination, die zu einem katastrophalen Versagen der Behälterwand führen kann, einzugrenzen. Anschließend wurden die Versuche mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode simuliert und der Einfluss von Behälterwanddicke und Material untersucht.

2 Untersuchungen anderer Autoren

Das Feld von Stoßbeanspruchungen umspannt einen extrem weiten Bereich von Situationen, welche für Ingenieure unterschiedlichster Fachrichtungen von hohem Interesse sind. Ebenso sind Militär- und Raumfahrtwissenschaftler bestrebt, die Widerstandsfähigkeit von Zielstrukturen zu verbessern, welche Impact-Belastungen, wie zum Beispiel durch Geschosse und Raketen oder einem Kometeneinschlag, ausgesetzt sind. Bauingenieure müssen abschätzen, von welchen Gebäuden, wie beispielsweise Kraftwerke oder Industrieanlagen, eine Gefährdung ausgeht, oder umgekehrt, welchen Schutz diese Anlagen gegen Einwirkungen von Außen benötigen, um die Gebäude so zu planen und zu konstruieren, dass mit einer ausreichend hohen Sicherheit eine gegenseitige Gefährdung möglichst auszuschließen ist. Überall wo Körper kollidieren oder die Gefahr einer Kollision besteht, müssen Ingenieure Stoßbeanspruchungen berücksichtigen.

Stoßgeschwindigkeit	Materialverhalten	Mögliche Belastung	Bereich
größer 12000 m/s	Explosionsstoß - die kollidierenden Körper verdampfen	----	ultra hoch
3000 - 12000 m/s	hydrodynamisches Verhalten; die Zusammendrückbarkeit des Materials ist nicht vernachlässigbar	Explosionsbelastungen	hoch
1000 - 3000 m/s	fluides Verhalten; lokale Drücke überschreiten Materialfestigkeit um eine Größenordnung; Dichte ist ein dominanter Parameter	Beschleunigungen mit Gas oder Pulverbetrieb	mittel
500 - 1000 m/s	viskos, jedoch Materialfestigkeit noch signifikant		
50 - 500 m/s	ausgeprägt plastisch	Fallanlagen, Servohydraulische Maschinen, Beschleunigungen mit Gas oder Druckluft	niedrig
0 - 50 m/s	primär elastisch; lokal plastisch		

Abb. 2.1 Einteilung stoßartiger Belastung nach Stoßgeschwindigkeit [82]

Dabei ist zu beachten, dass für unterschiedliche Stoßgeschwindigkeiten auch unterschiedliche Materialgesetze für die gestoßenen Körper gelten. Eine Unterteilung der Belastung nach Stoßgeschwindigkeiten mit den zu erwartenden Materialverhalten der gestoßenen Körper ist der Abbildung 2.1 zu entnehmen. Eine weitere generelle Einteilung von Stoßproblemen ist die Unterscheidung in einen harten oder weichen Stoß. Bei einem harten Stoß trifft ein nahezu undeformierbarer Körper auf eine Zielstruktur auf. Die kinetische Energie des aufprallenden Körpers muss so von dem Zielkörper über Formänderungsenergie aufgenommen werden. Dagegen ist bei einem weichen Stoß der anprallende Körper stark deformierbar und wandelt so im Gegensatz zu der Zielstruktur den Großteil der kinetischen Energie in Formänderungsarbeit um. Zur numerischen Lösung dieses Problems wird zunächst vereinfachend von Massenpunkten ausgegangen. In Abbildung 2.2a ist das mechanische Modell für das Stoßproblem beim Anprall einer Masse M_1 auf eine Zielstruktur M_2 (z.B. Stahlbetonkonstruktion) dargestellt. Dabei gelten bei Berührung die beiden Gleichgewichtsbedingungen

$$M_1 \ddot{u}_1 + R_1(u_1 - u_2) = 0 \quad (2.1)$$

$$M_2 \ddot{u}_2 + R_2(u_2) - R_1(u_1 - u_2) = 0 \quad (2.2)$$

mit den entsprechenden Anfangs- und Randbedingungen, die den Bewegungszustand des Systems und der ankommenden Masse beschreiben. Hierbei ist $R_1(u_1 - u_2)$ der nicht lineare Widerstand, der die Kontaktkraft zwischen den beiden Körpern repräsentiert und $R_2(u_2)$ der Widerstand der getroffenen Baustruktur als Folge der ihr aufgezwungenen Verformung. Nur in dem Sonderfall $u_1 \gg u_2$ können die beiden Gleichungen (2.1) und (2.2) näherungsweise entkoppelt werden. Bei Vernachlässigung von u_2 kann die Gleichung

$$M_1 \ddot{u}_1 + R_1 u_1 = 0 \quad (2.3)$$

gelöst werden. Ist die Lösung von

$$F_2(t) = R_2[u_1(t)] \quad (2.4)$$

bekannt, so läßt sich ebenfalls die Gleichung (2.5) lösen.

$$M_2 \ddot{u}_2 + R_2(u_2) = F_2(t) \quad (2.5)$$

Abbildung 2.2b zeigt für den Sonderfall eines weichen Stoßes, bei dem die oben angegebenen Gleichungen entkoppelt sind, eine ermittelte Belastungsfunktion $F(t)$ die auf die Struktur wirkt. Mit Hilfe von Versuchen kann für ein bestimmten Sachverhalt eine Belastungsfunktion ermittelt werden, mit der dann zum Beispiel in einer FE-Simulation eine Struktur belastet werden kann.

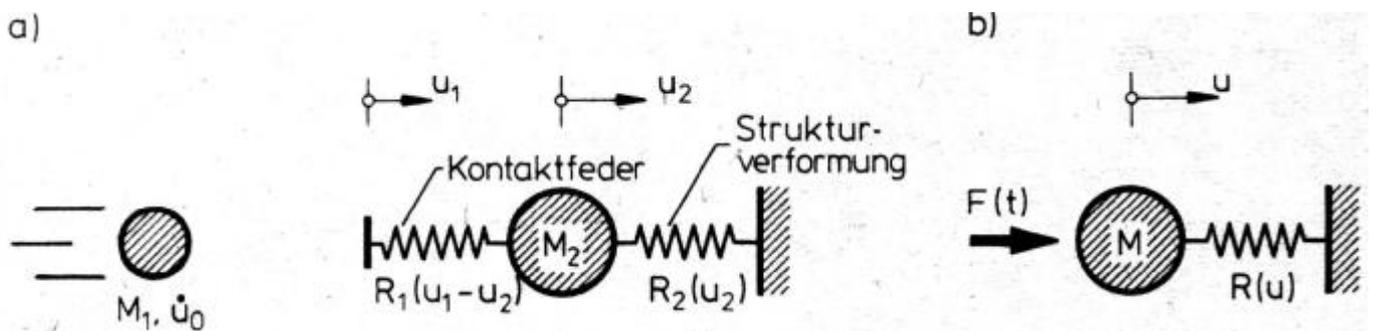


Abb. 2.2 Das Stoßproblem im mechanischen Modell [aus 31]

Da das Themengebiet sehr weit gefächert ist, und eine Vielzahl von Veröffentlichungen erschienen sind, soll im folgenden Kapitel nur auf die für diesen Sachverhalt wesentlichen Belastungsarten und Reaktion der Zielstrukturen eingegangen werden. Zunächst wird ein allgemeiner Überblick über Strukturen gegeben, die durch unterschiedliche Projektile beschossen wurden. Dabei werden unterschiedliche Versagensformen der Zielstrukturen vorgestellt.

2.1 Strukturen bei Impact-Beanspruchungen

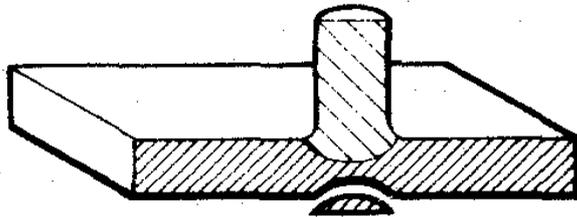
Ein gebräuchliches Maß von der Fähigkeit des Zieles, einem Projektil zu widerstehen, ist seine ballistische Grenze. Verschiedenste Untersuchungen wurden zur näheren Bestimmung dieser Grenze durchgeführt. Allgemein gilt, dass die größte zu erreichende Projektilgeschwindigkeit, bei der es gerade noch nicht zu einer Perforation der Struktur kommt, die ballistische Grenze dieser Struktur darstellt. Die Definition der ballistischen Grenze variiert abhängig von der Interpretation, was die Struktur "erfüllen" soll. So kommt es bei einer Panzerung darauf an, dass keine frei fliegenden Teile die Struktur durchdringen, oder durch den Beschuss sich Teile der Struktur auf der Rückseite ablösen und Schaden anrichten können. Jedoch bei einem Behälter, der zum Beispiel eine Flüssigkeit halten oder abhalten soll, ist die ballistische Grenze bereits erreicht, wenn die Struktur eine Schädigung hat, so dass

Flüssigkeit die Behälterwand durchdringen kann. Das muss nicht bedeuten, dass das Projektil die Behälterwand vollständig perforiert.

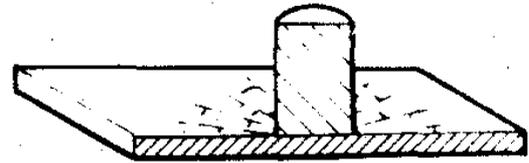
Es gibt verschiedene Mechanismen, die zu einer Schädigung der Zielstruktur führen. Dabei treten diese einzeln oder auch in Kombination auf. Die Unterteilung von Versuchsergebnissen in verschiedene Versagensmechanismen beruht im allgemeinen auf phänomenologischen Erkenntnissen. Daher sind die Versagensmechanismen im großen Maß von den jeweiligen Versuchsparametern abhängig und nicht generell auf andere Strukturen übertragbar.

Abbildung 2.3 zeigt die acht Versagensformen, die nach Backman und Goldsmith [8] für dünne und zwischenliegende Strukturen am häufigsten auftreten. Die Teilbilder in Abbildung 2.3 sind nach Geschwindigkeit und Größe des Impact-Körpers gestaffelt. Die Impact-Geschwindigkeit der oberen Teilbilder ist geringer als die der unteren, die Massen der Impact-Körper hingegen werden von oben nach unten geringer.

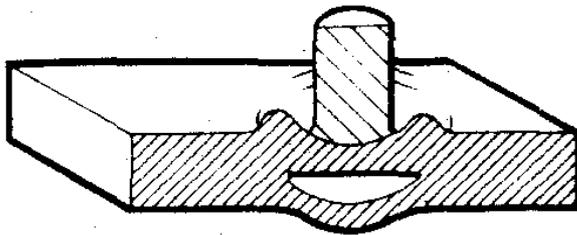
Der Versagensmodus in Teilbild a) ist typisch für eine spröde Zielstruktur mit geringer Zugfestigkeit wie zum Beispiel bei Beton. Teilbild b) ist eine charakteristische Versagensform, die bei Materialien wie Glas oder Keramiken auftritt. Die Versagensform in Teilbild c) ist bei duktileren Materialien mit geringer dynamischer Zugfestigkeit zu beobachten. Teilbild d) zeigt eine Versagensform, die bei massiven Stahlbeton- ebenso wie bei Metallbauteilen auftreten kann. Die Voraussetzung für "frontal Petaling" (siehe Teilbild e)) ist eine massive Zielstruktur und häufig duktiles Materialverhalten, bei dem Teile der Struktur durch den Aufschlagdruck und somit entstehenden Schmelze nach vorne ausgeblasen werden. Die Versagensform von Teilbild f) ist bei duktilem Materialverhalten der Zielstruktur und geringen Wandstärken zu beobachten. Teilbild g) zeigt eine Versagensform, die bei spröden Materialien oder bei sehr hohen Impact-Geschwindigkeiten auftritt. Die Versagensform Teilbild h) ist charakteristisch für hohe Impact-Geschwindigkeiten und duktile Strukturen.



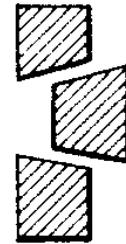
(a) Fracture due to initial stress wave



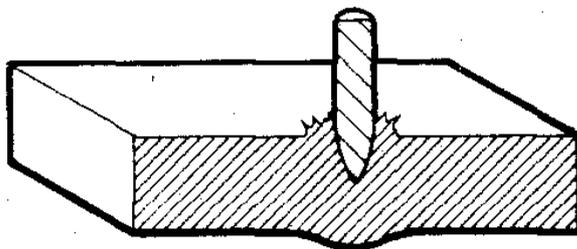
(b) Radial fracture behind initial wave in a brittle target



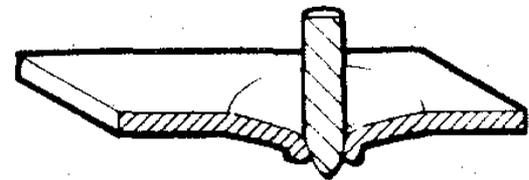
(c) Spall failure (scabbing)



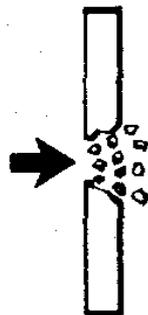
(d) Plugging



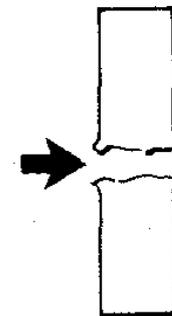
(e) Petaling (frontal)



(f) Petaling (rearwards)



(g) Fragmentation



(h) Ductile hole enlargement

Abb. 2.3 *Verschiedene Versagensmodi nach Backman und Goldsmith [8]*

Zunächst wird der Bereich von Impactgeschwindigkeiten bis 3000 m/s betrachtet.

Da nicht nur die lokale Struktur sondern auch die globalen Randbedingungen für das Versagen eine Rolle spielen und diese meist stark von einander abweichen, ist es schwierig, eine exakte Vorhersage zu treffen, welcher Versagensfall eintritt. Tendenziell gilt jedoch für fast alle harten Stöße, bei denen das Projektil nur eine geringe Deformation erfährt, die in Abbildung 2.4 angegebenen Ergebnisse der Untersuchungen von Leppin und Woodward [59], welche den Einfluss von Impact-Geschwindigkeit und Zielstrukturdicke auf die Versagensart zeigen. Bei den Zielstrukturen dieser Versuche handelte es sich um eine Titanlegierung. Die Projektile, die zu den in Abbildung 2.4 gezeigten Versagensarten führten, besaßen eine konische Auftrefffläche.

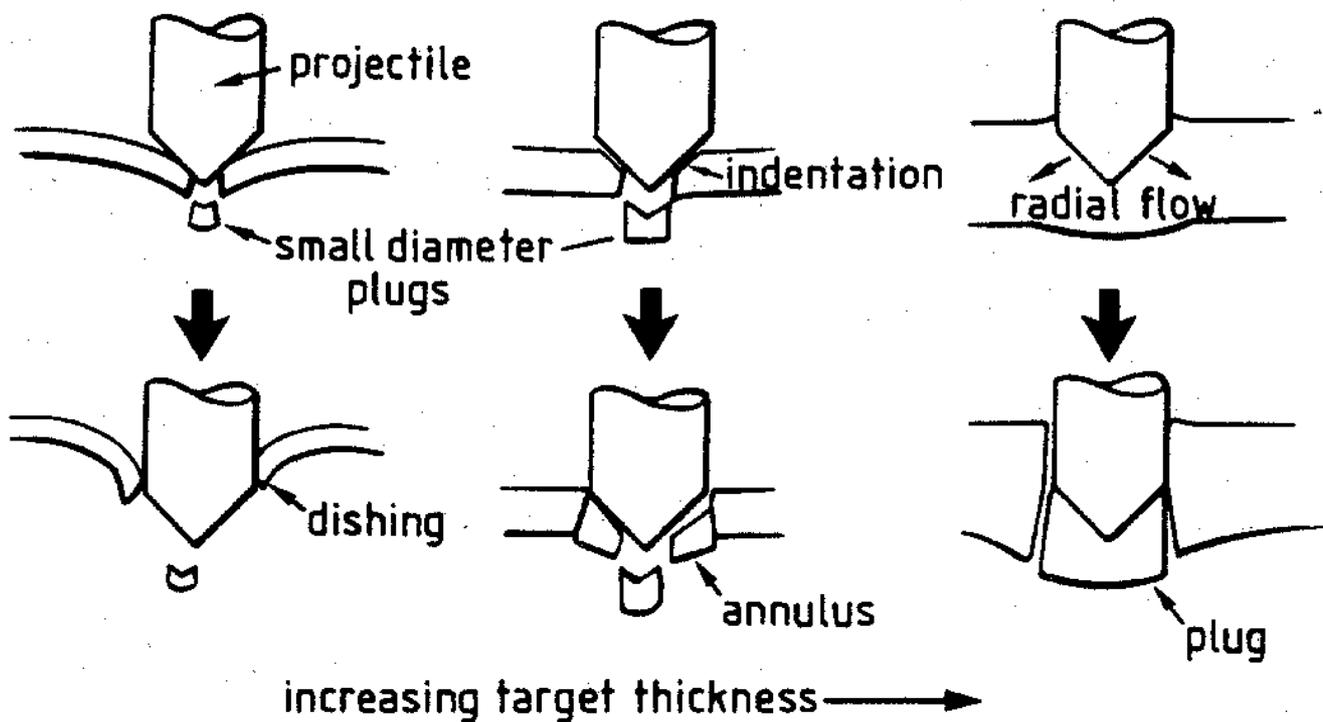


Abb. 2.4 Einfluss von dicker werdender Zielstruktur und Geschwindigkeit bei Titanlegierungen [59]

Abbildung 2.4 zeigt in der oberen Reihe die zu erwartenden Versagensarten bei geringeren Impact-Geschwindigkeiten mit nach rechts zunehmenden Zielstrukturdicken. In der unteren Reihe sind die zu erwartenden Versagensarten bei höheren Impact-Geschwindigkeiten abgebildet. Bei einer dünneren Zielstruktur wird diese vornehmlich auf Grund von größeren Verformungen auf Zug belastet, dagegen bei dickeren Strukturen auf Schub. Die dünneren Zielstrukturen werden ausgehend

von der Projektilspitze her aufgerissen. Dagegen ist bei dickeren Zielstrukturen ein Herausstanzen von einem Pfropfen, der auf der beschossenen Seite annähernd den Durchmesser des Projektils besitzt, zu beobachten.

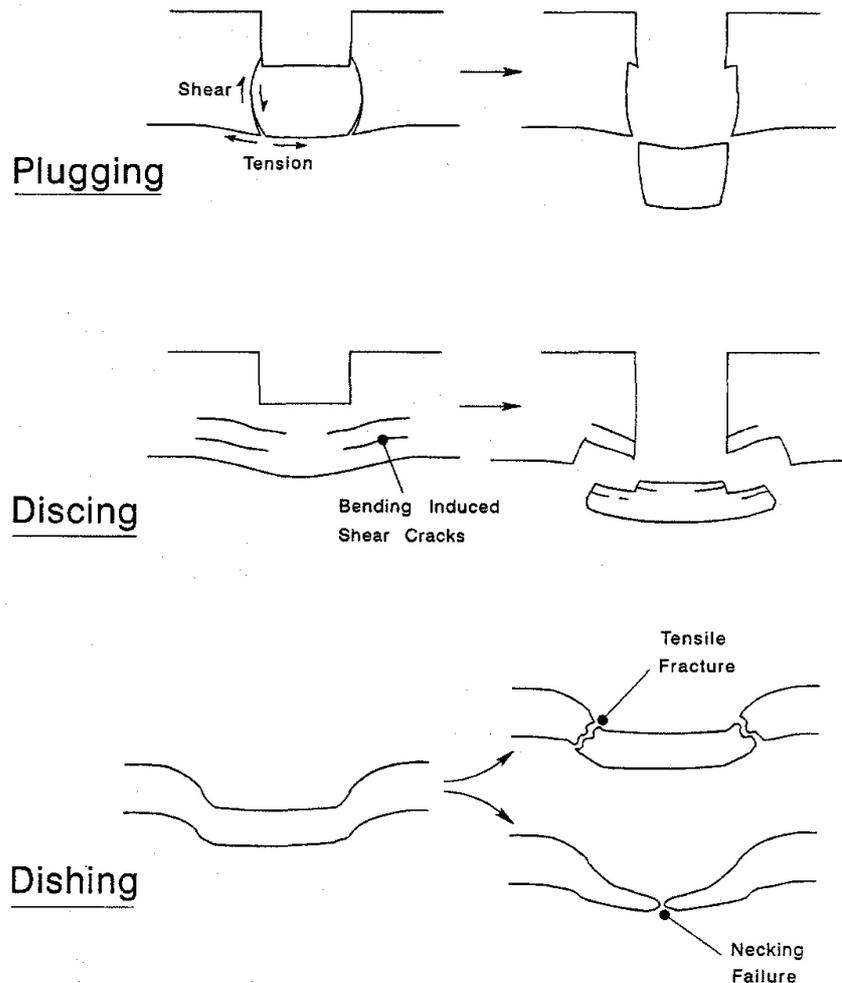


Abb. 2.5 Schematische Darstellung von typischen Versagensmechanismen in homogenen Platten in Abhängigkeit von der Zielstrukturdicke [95]

Abbildung 2.5 zeigt die schematische Darstellung von typischen Versagensmechanismen in Platten aus Aluminiumlegierung, die mit flachköpfigen Projektilen beschossen wurden, in Abhängigkeit von der Zielstrukturdicke [95].

In den Untersuchungen von Woodward und Cimpoeru [95] sind ähnliche wie zuvor beschriebene Versagensmechanismen an Platten aus Aluminiumlegierungen verschiedener Wanddicke, die hier mit flachköpfigen Projektilen beschossen wurden, festgestellt worden. Dabei konnten ebenfalls in Abhängigkeit von der

Wanddicke verschiedene Versagensmechanismen festgestellt werden. So war bei den dicken Platten stets ein Pfropfen aus der Zielstruktur, in der annähernden Dicke des Projektils, auf Grund von Scherversagen herausgestanzt worden. Dieses Scherversagen ist typisch für dicke, spröde und hochfeste Materialien, wie die bei Woodward und Cimpoeru [95] verwendeten Zielstrukturen aus Aluminiumlegierungen. Bei den weniger dicken Platten konnte ein Discing-Versagen der Zielstruktur beobachtet werden. Dieses Discing-Versagen ist dadurch charakterisiert, dass Scherrisse in der Plattenebene entstehen. Diese Scherrisse entstehen bei hochfesten Materialien geringer Scherfestigkeit durch Biegung der Zielstruktur. Ebenfalls spielen die thermischen Effekte durch die hohe Dehnrates eine Rolle. Bei den Platten geringer Wanddicke ist vornehmlich auf Grund der größeren Biegungen der Zielstruktur ein Versagen auf Zug in der Plattenebene, anstatt von Scherversagen, festzustellen. Ähnliche Ergebnisse wurden auch unter anderem in den Untersuchungen von [3,8,9, 30,32,47,62,81,98] gewonnen.

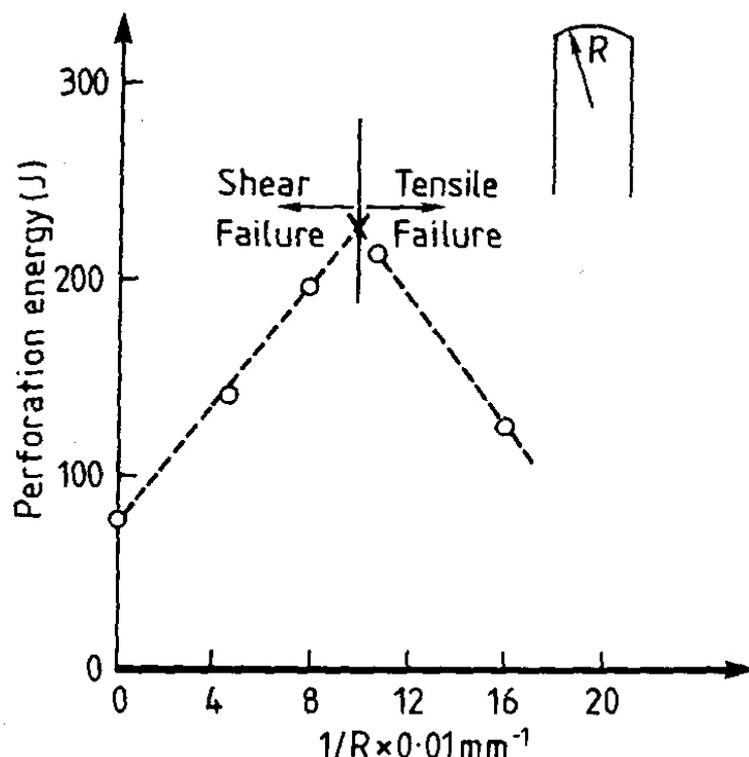


Abb. 2.6 Abhängigkeit der Perforationsenergie von dem Radius der Projektilspitze für 1,3 mm dicke Zielstrukturen [25]

Die vorgestellten Versagensarten ähneln sich unter Berücksichtigung der Abhängigkeit von der Zielstrukturdicke. So tritt Scherversagen bei eher dickeren Zielstrukturen und Zugversagen tendenziell bei dünneren Zielstrukturen auf. Allerdings ist ein Scher- oder Zugversagen der Zielstruktur auch im hohen Maß abhängig von dem beschossenen Material. Die Geschossform hat ebenfalls einen Einfluss auf das Tragverhalten und die

Versagensart der Zielstruktur. Abbildung 2.6 zeigt die aus den Experimenten von Corran, Shadbald und Ruiz [25] gewonnenen Abhängigkeiten des Radius der Projektilspitze auf die Perforationsenergie. So gibt es eine Form der Projektilspitze, bei der die Zielstruktur an der Auftreffstelle auf Zug und Schub belastet wird. Bei dieser Geschossform besitzt die Zielstruktur die größte Widerstandsfähigkeit dem Projektil gegenüber. Dieser Radius der Projektilspitze ist abhängig von dem Material des Projektils und ebenfalls abhängig von dem Material und der Wanddicke der Zielstruktur.

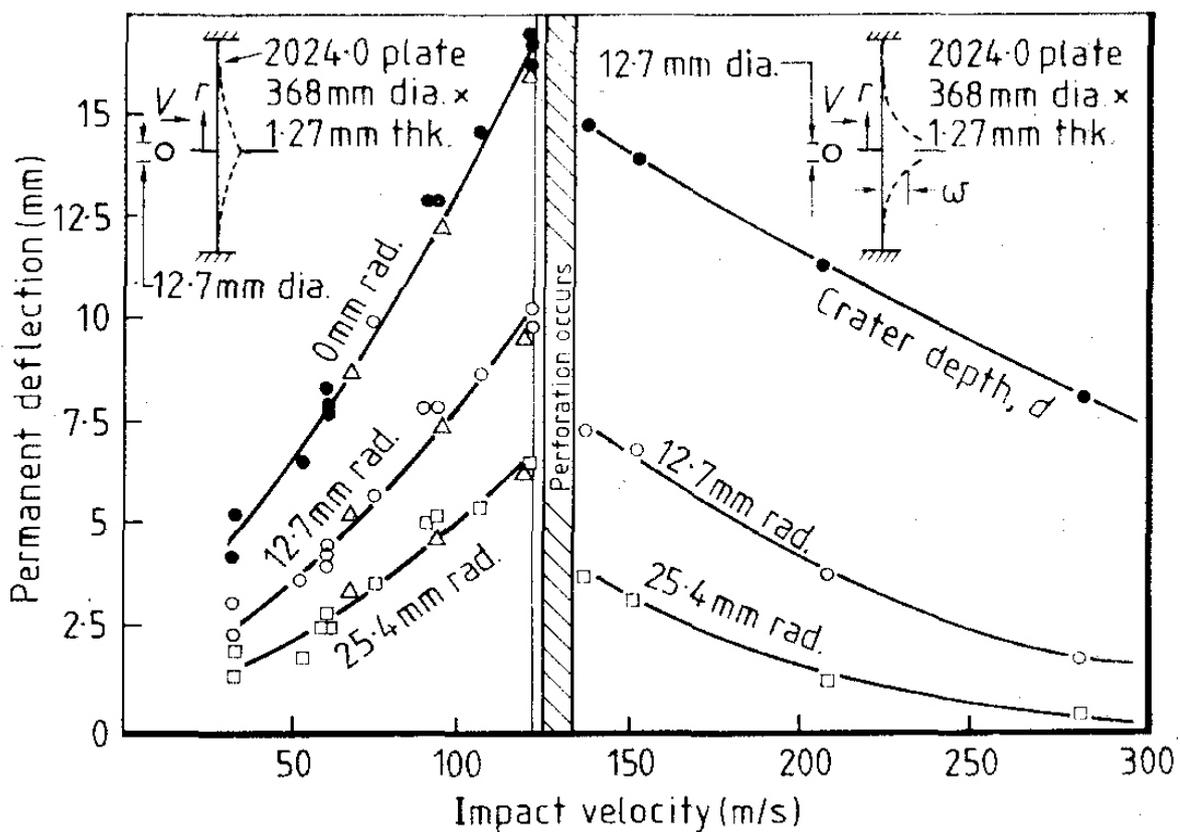


Abb. 2.7 Permanente Plattenverformung durch den Beschuss von Stahlprojektilen [16]

Abbildung 2.7 zeigt die permanenten Verformungen von 1,27 mm dicken Aluminiumplatten, die mit Stahlprojektilen von 12,7 mm Durchmesser beschossen wurden [16]. Es zeigt sich, dass die permanenten Verformungen bis zum Erreichen der ballistischen Grenze anwachsen. Ist die ballistische Grenze überschritten, so nehmen die Verformungen mit zunehmender Impact-Geschwindigkeit ab.

Xiaoqing und Stronge [98] untersuchten das Tragverhalten von Stahlrohren unter Beschuss von Projektilen, und verglichen die Ergebnisse mit dem Tragverhalten von ähnlich dicken Stahlplatten. Dabei stellte sich heraus, dass die Rohre steifer waren, als die Platten und ebenfalls eine höhere ballistische Grenze besaßen.

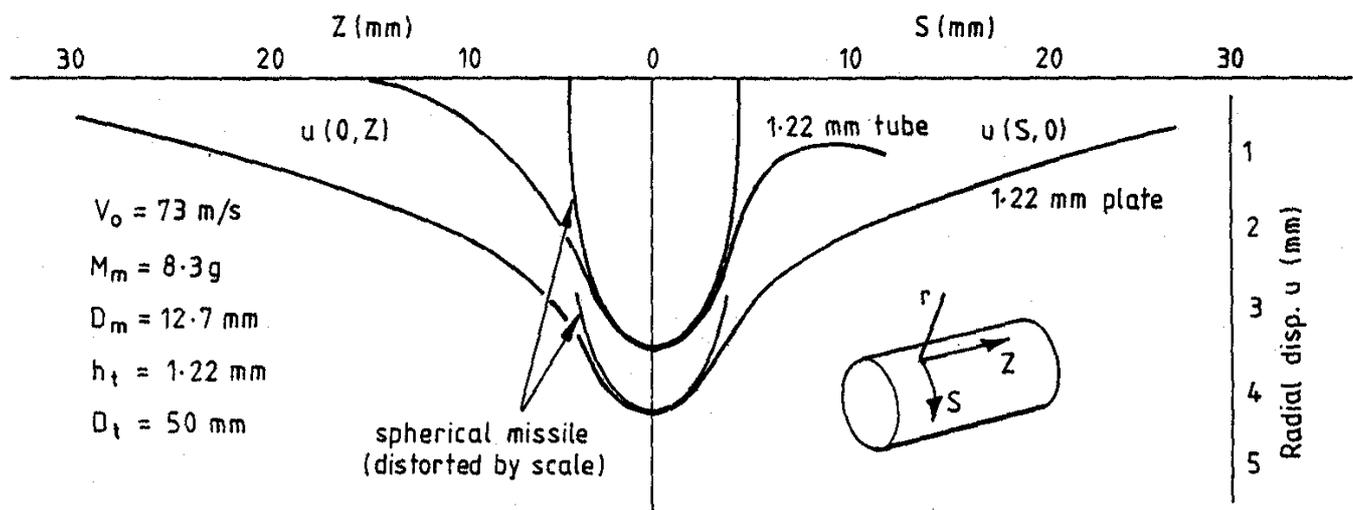


Abb. 2.8 Vergleich von Verformungen an Rohren und Platten für den Beschuss nahe der ballistischen Grenze (Wanddicke = 1,22 mm) [98]

In Abbildung 2.8 ist der Vergleich von Verformungen an Rohren und Platten für den Beschuss nahe der ballistischen Grenze dargestellt [98]. Die Rohre und die Platten besaßen die gleiche Wanddicke von 1,2 mm und bestanden beide aus Stahl identischer Güte. Der linke Teil der Abbildung 2.8 zeigt die Verformungen in longitudinaler, der rechte Teil die Verformungen in meridialer Richtung.

Xiaoqing und Stronge [98] beobachteten Unterschiede im Tragverhalten bei Versuchen an dünn- und dickwandigen Rohren. So führte es bei dünnwandigen Rohren und höheren Impact-Geschwindigkeiten zu einem Zuwachs von “dishing”, also eher einem Versagen auf Zug. Dagegen war bei Rohren dickerer Wandstärke ein Einstanzen auf der Beschussseite, bis sich ein Pfropfen ausbildete und der dann abgeschert wurde, festzustellen. Der Übergang von Zug- (>3) zu Scherversagen (<3) stellte sich bei einem Verhältnis der Projektildicke zu Wanddicke von 1:3 ein.

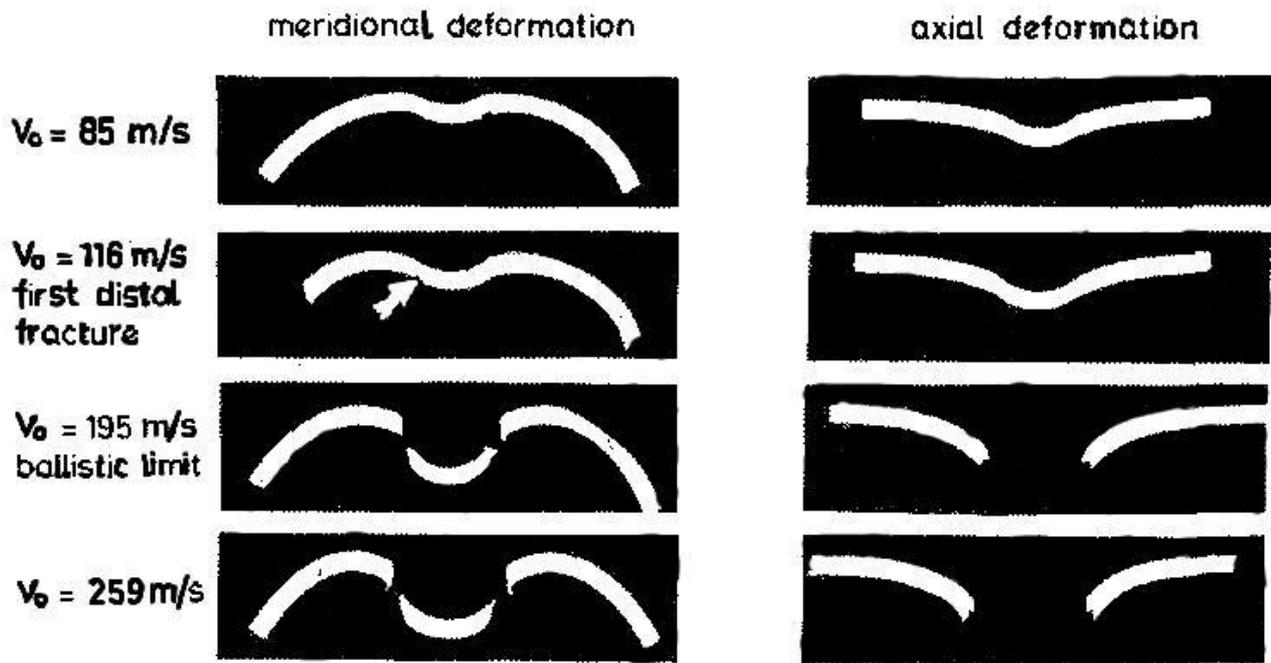


Abb. 2.9 Meridial- und Longitudinalschnitt durch dünne Stahlrohre (Durchmesser = 50 mm, Wanddicke = 2,1 mm), die mit einem Impact-Körper von 12,7 mm Durchmesser und einer Impact-Geschwindigkeit nahe der ballistischen Grenze beschossen wurden [98]

Abbildung 2.9 zeigt die Verformungen von Rohren, die mit unterschiedlichen Projektilgeschwindigkeiten nahe der ballistischen Grenze beschossen wurden [98]. Die Rohrwand hatte eine Dicke von 2,1 mm bei 50 mm Durchmesser. Beschossen wurden diese Rohre mit Projektilen von 12,7 mm Durchmesser. Die ballistische Grenze wurde bei einer Projektil-Geschwindigkeit von 195 m/s erreicht. Abgebildet sind jeweils ein Schnitt durch das Rohr in meridialer- und longitudinaler Richtung. Es sind jeweils immer größer werdende Verformungen, bis zum Erreichen der ballistischen Grenze festzustellen. Bei den hier vorgegebenen Parametern wird, nach dem Erreichen der ballistischen Grenze, aus den Versuchskörpern ein Rohrstück herausgeschossen. Es handelt sich hierbei um ein primär durch Schub dominiertes Versagen der Rohrwände.

Das Schubversagen von einer Zielstruktur kann nach Liss et al. [62] unter der Annahme eines harten Stoßes in fünf Bereiche unterteilt werden, die teilweise auch zeitabhängig sind (siehe Abbildung 2.10). Dabei charakterisiert der Teilbereich 1 den undeformierten Impact-Körper, der auf den Zielbereich auftrifft.

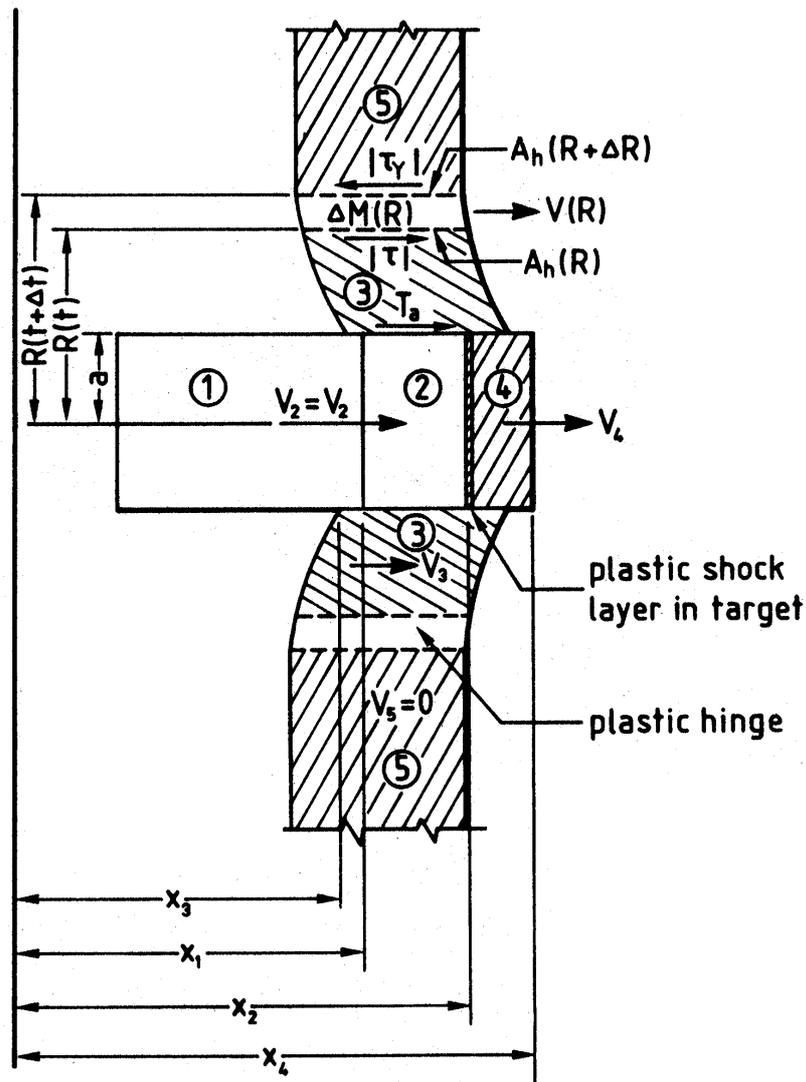


Abb. 2.10 Aufteilung des gestoßenen Bereichs in fünf verschiedene Zonen [62]

Teilbereich 2 (Abbildung 2.10) ist der Bereich des Projektils, der sich nach dem Auftreffen auf die Zielstruktur elastisch verformt. Zwischen Teilbereich 2 und Teilbereich 4 bildet sich auf Grund des Aufschlagdrucks eine plastisch verformte Zone der Zielstruktur aus. Teilbereich 3, dazu zählt am Anfang auch Teilbereich 4, wird durch die Aufschlagkraft auf Schub belastet. Da die Zielstruktur wegen ihrer Dicke nur geringe Biegeverformungen erfährt und die Schubspannungen an der Geschosskante immer größer werden, bildet sich ein Propfen (Plug) aus, der dann aus dem Gefüge der Zielstruktur herausgedrückt wird. Der Teilbereich 3 wird plastisch verformt und breitet sich über die Zeit in Richtung des Bereichs 5 aus. Der Teilbereich 5 erfährt nur elastische und somit keine irreversiblen Verformungen.

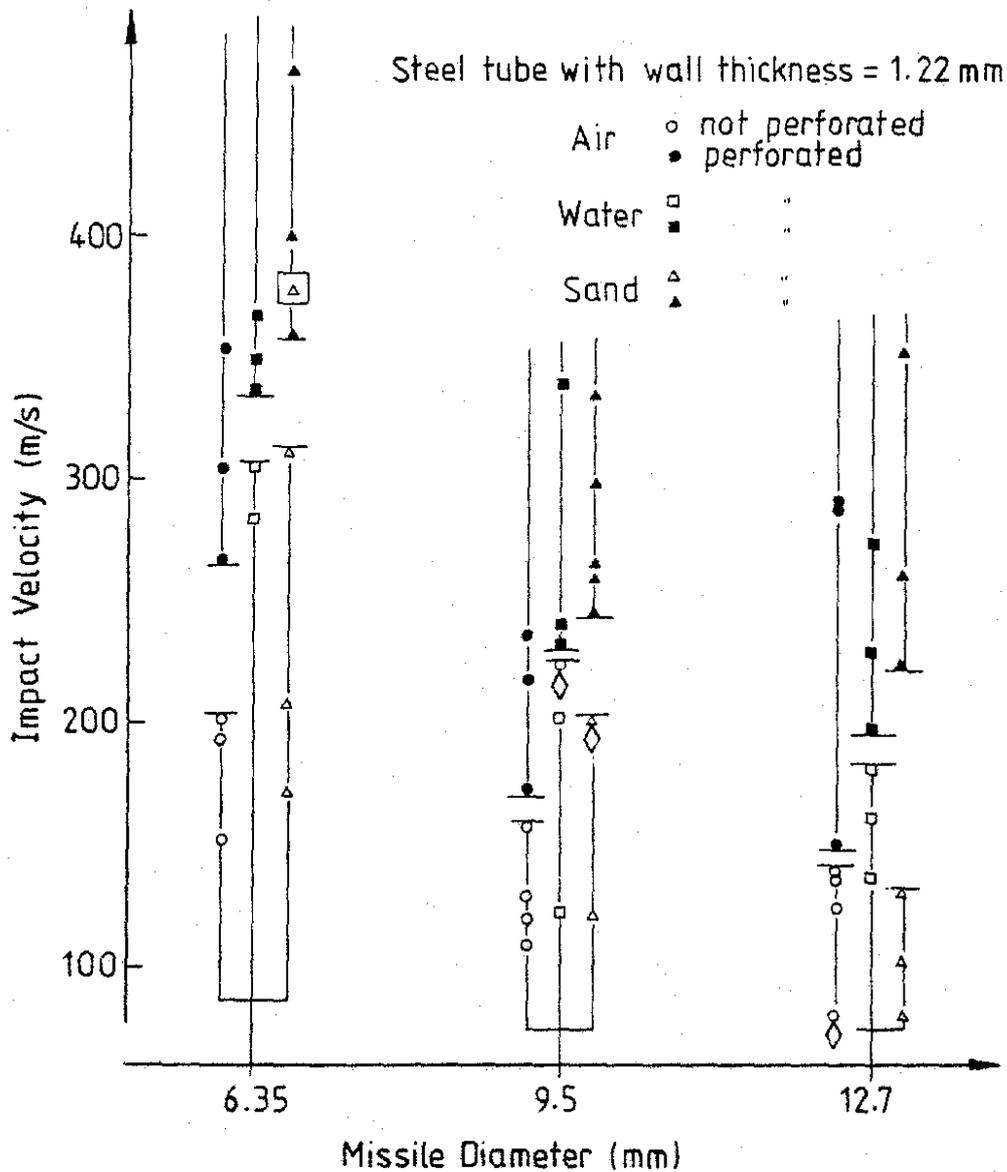


Abb. 2.11 Untersuchung der ballistischen Grenze in Abhängigkeit von Projektildurchmesser und Füllmedium des Rohres [98]

In Abbildung 2.11 ist der Vergleich von Projektildurchmesser und Füllmedium der Rohre zur Projektil-Geschwindigkeit dargestellt. Dabei ist festzustellen, dass die ballistische Grenze mit zunehmendem Projektil-Durchmesser abnimmt, was mit der Massenzunahme der größeren Durchmesser zusammenhängt. Dieses kommt einer Zunahme des Impact-Impulses gleich. Ebenfalls ist eine Zunahme der ballistischen Grenze für die jeweiligen Projektil-Durchmesser, bei einer Füllung der Rohre mit Wasser oder Sand festzustellen.

Beim Beschuss von Strukturen mit Geschossen, die eine Auftreffgeschwindigkeit über 3000 m/s besitzen, spricht man vom Hypervelocity Impact. Anwendung findet

dieses Spezialgebiet vornehmlich bei Konstruktionen die Meteoritenbeschuss ausgesetzt sind. Für die Raumfahrt ist dies ein wichtiger Anwendungsbereich, da überlebensnotwendige Hochdrucktanks, mit z.B. Sauerstoff oder Treibstoff gefüllt, bei Raumfahrten einem möglichen Meteoriteneinschlag ausgesetzt sind. Obwohl für diesen Hochgeschwindigkeitsbereich andere Materialgesetze gelten und es auch zu anderen Versagensarten kommen kann, existieren auch hier Gemeinsamkeiten.

Bei dem Hochgeschwindigkeitsbeschuss von leeren Behältern wird die Behältervorderseite perforiert. Auf Grund der hohen Impact-Geschwindigkeit und dem sich daraus ergebenden Aufschlagdruck, schmelzen die getroffenen Behälterteile und der Impact-Körper. Aus diesen Fragmenten bildet sich eine "Debris cloud" die sich immer noch mit einer sehr hohen Geschwindigkeit durch den Behälter hindurch bewegt [86]. Auf der Behälterrückseite beschädigen oder durchschlagen die Fragmente die Behälterwand auf einem gewissen Bereich [18]. Die Fragmente der "Debris cloud" breiten sich radial von dem Aufschlagpunkt aus. Daher nimmt der Bereich, auf dem die Rückwand durch Fragmente getroffen wird, mit größer werdender Entfernung zu. Die Untersuchungen von [18,56,86] zeigen, dass Behälter, die einem anfänglichen Innendruck ausgesetzt sind, auf zwei verschiedene Arten katastrophal versagen können. Einerseits kann die Behältervorderseite oder die Behälterrückseite versagen. Dieses ist abhängig von dem anfänglichen Innendruck in dem Behälter und von dem Durchmesser und der Geschwindigkeit des Geschosses [86].

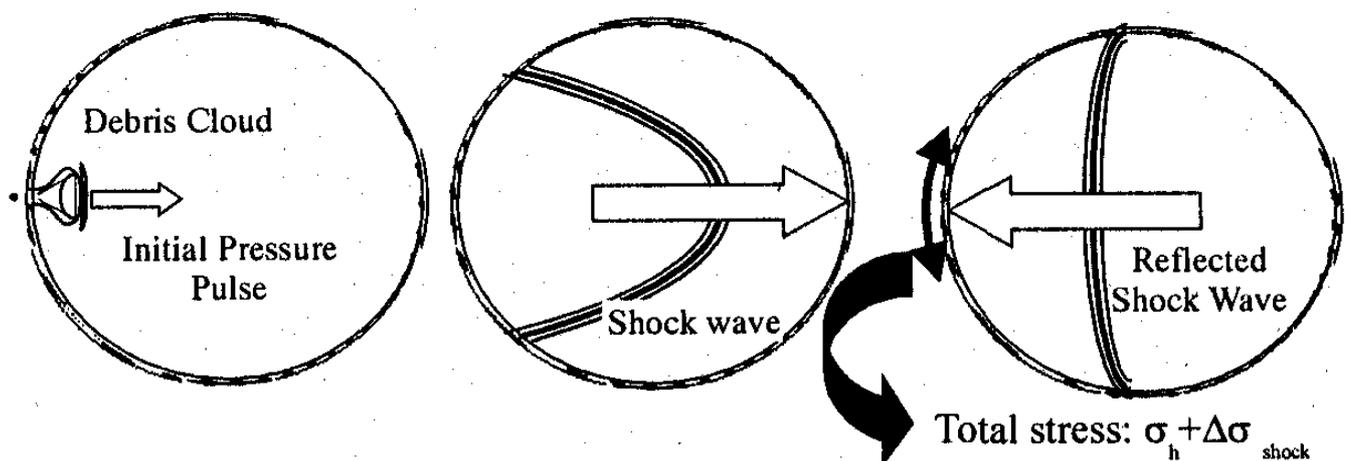


Abb. 2.12 Belastungsablauf von gasgefüllten Behältern unter Hochgeschwindigkeitsbeschuss [86]

Abbildung 2.12 zeigt den Belastungsablauf von gasgefüllten Behältern unter Hochgeschwindigkeitsbeschuss. Der, durch die Füllung des Behälters mit Gas, auf die Behälterwand wirkende statische Innendruck bewirkt in dieser eine vorbelastende Radialspannung σ_h .

Bei dem katastrophalen Aufreißen der Behältervorderseite übernimmt das in dem Behälter befindliche Gas eine relative Schutzfunktion für die Behälterrückseite. Die kleineren und weniger schnellen Impact-Körper werden durch den Aufschlag auf die Behälterwand feiner fragmentiert und diese Kleinfragmente können durch das in dem Behälter befindliche Gas abgebremst werden.

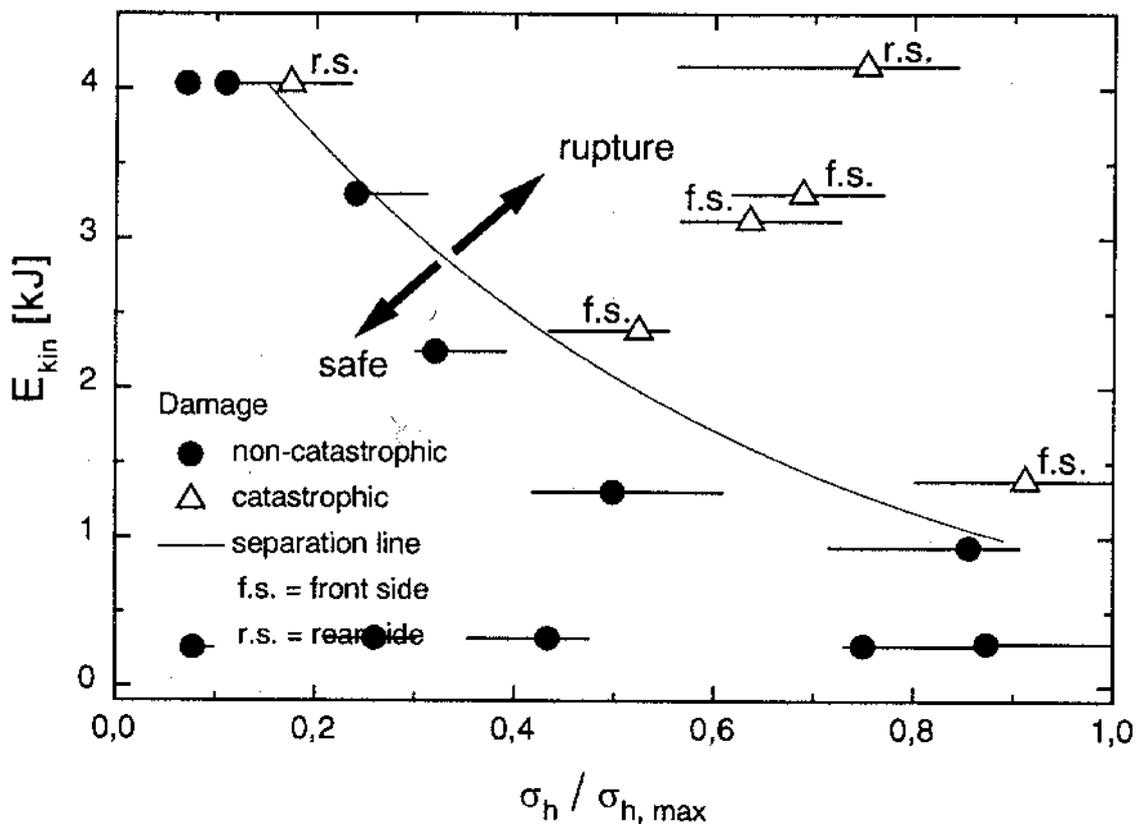


Abb. 2.13 Versuchsergebnisse von Hochgeschwindigkeitsbeschuss auf Druckbehälter [86]

Dadurch verbleibt als Belastung auf die Behälterwand, zusätzlich zu dem anfänglichen Innendruck, eine durch das Gas laufende Schockwelle, die an der Rückseite reflektiert wird und wieder zum Einschuss zurückläuft. Übersteigen die beiden Druckkomponenten die aufnehmbare Zugspannung in der Behälterwand, so reißt der Behälter auf Grund der Geometrie und Imperfektion durch den Einschuss auf der Behältervorderseite in longitudinaler Richtung auf. Bei größeren und schnelleren Impact-Körpern können die Fragmente, die durch den Aufschlag auf den

Behälter entstehen, nicht mehr durch das Gas genügend abgebremst werden und so kommt es zu einer Perforation der Behälterrückseite.

Bei einem schlagartigen Versagen der Behälterrückseite treffen die durch den Beschuss der Vorderseite entstandenen Fragmente annähernd gleichzeitig mit der durch den Aufschlag des Impacts auf den Behälter induzierten Schockwelle auf der Behälterrückseite auf. Dabei besitzen die Fragmente eine höhere Geschwindigkeit als die Laufgeschwindigkeit der Schockwelle. Dadurch, dass auf der Rückseite die Behälterwand durch die Fragmente perforiert ist, und somit Fehlstellen in der Schale vorhanden sind, bewirkt das Eintreffen der Schockwelle ein schlagartiges Aufreißen der Behälterrückwand.

In Abbildung 2.13 sind die Versuchsergebnisse von Telitchev, Schäfer, Schneider und Lambert [86] abgebildet. Sie zeigt die Abhängigkeit der kinetischen Energie zu dem Verhältnis von statischen Radialspannungen des Versuchs zur maximal aufnehmbaren Zugspannung der Behälterwand. Es ist zwischen den Versuchswerten eine Trennlinie approximiert worden, welche die Versuche, bei denen ein katastrophales Versagen der Behälter eintrat, von denen ohne katastrophales Versagen trennt.

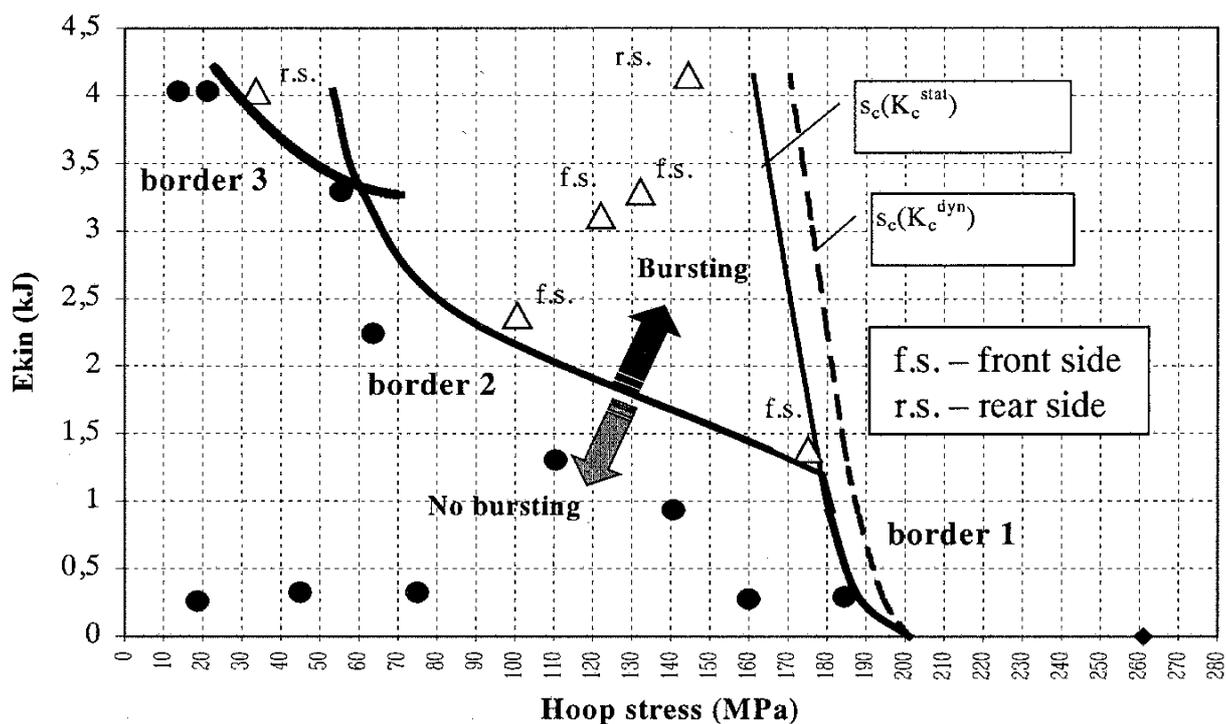


Abb. 2.14 Belastungsgrenzen zwischen einfacher Perforation und katastrophalem Versagen von, durch Beschuss vorgeschädigten Druckbehältern [86]

Abbildung 2.14 zeigt die Unterteilung der Trennlinie zum katastrophalen Versagen in drei Bereiche. Die Trennlinie 1 gilt für Geschosse, die einen geringeren Durchmesser als 3,45 mm besitzen. Trennlinie 2 wurde für Geschosse mit einem Durchmesser größer 3,45 mm angesetzt.

Bei den Untersuchungen von Whitney [92] sind unter anderem wassergefüllte Cola-Dosen mit $6,88 \text{ km/s}$ schnellen Projektilen beschossen worden. Zusätzlich zu der Flüssigkeit wurden die Dosen mit einem statischen Innendruck von 30 psi vorbelastet. Die Versuchskörper versagten an der Behältervorderseite. Das Versagensbild 2.15 ist nahezu identisch mit den selber durchgeführten Untersuchungen (Kapitel 3). Allerdings kann bei den Versuchen von Whitney nicht die reflektierte Druckwelle zu einem Versagen der Behältervorderseite geführt haben, da das Projektil schneller als die Wellengeschwindigkeit von Wasser war und somit nur ein Versagen der Dosenrückseite in Frage gekommen wäre. Daher muss die Vorderseite durch den Verdrängungsdruck des sich durch die Flüssigkeit bewegenden Projektils zusätzlich zu dem statischen Innendruck und der damit verbundenen Zugspannungen der Behälterwand versagt haben.

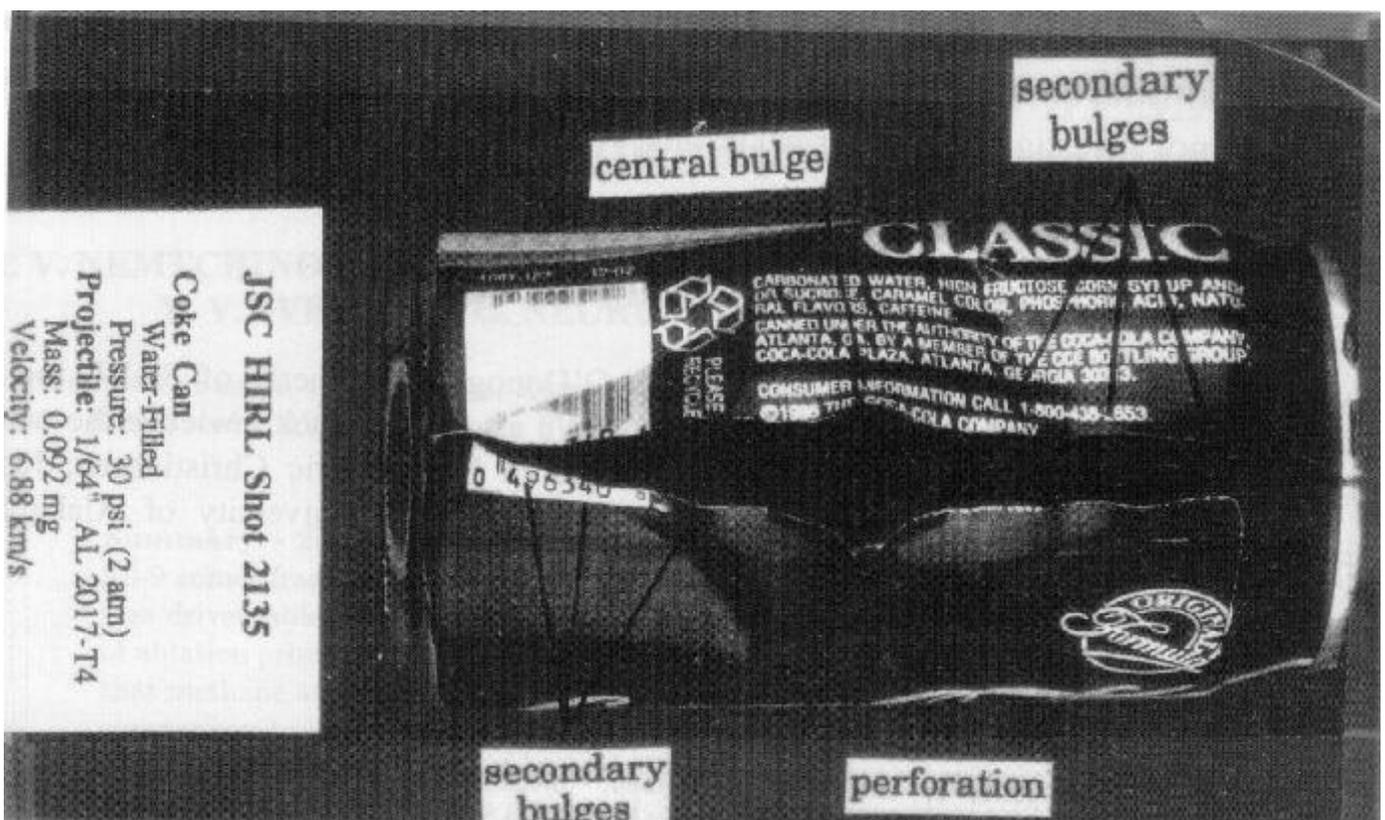


Abb. 2.15 Versagensbild des zerstörten Versuchskörpers von Whitney [92]

Bei Betrachtung der Untersuchungen an flüssigkeitsgefüllten Behältern und Rohren bei Stoßbeanspruchungen ist festzustellen, dass bisher noch nicht viele Versuche unternommen worden sind dieses Phänomen der Interaktion von Flüssigkeit und Behälter zu untersuchen. Es gibt einige Untersuchungen die sich im Rahmen der Reaktorsicherheit oder der Offshore Öl- und Gas-Industrie mit Rohren beschäftigten, welche flüssigkeitsgefüllt mit Impact-Körpern beschossen wurden [68,98].

Bei der Reaktorsicherheit kommt es durch Ablösen von Turbinenteilen oder durch Explosion von Containments und Rohren zu eher kleineren Projektilen mit geringer Masse und hohen Geschwindigkeiten. Dagegen handelt es sich bei Schiffskollisionen mit Offshore Pipelines vornehmlich um einen Stoß der eine hohe Masse und eine geringe Geschwindigkeit besitzt. Bei dem mittleren Impact-Geschwindigkeitsbereich in Kombination mit flüssigkeitsgefüllten Behältern stehen in der Literatur keine Vergleichsversuche zu den selber durchgeführten Versuchen zur Verfügung.

Xiaoqing und Stronge [98] beschäftigten sich als eine der ersten mit dem Einfluss den Wasser oder Sand auf das Tragverhalten von Rohren unter Stossbelastungen hat. Sie beobachteten einen Zuwachs der Steifigkeit des Rohres und eine Erhöhung der ballistischen Grenze im gefüllten Zustand. So kamen sie unter anderem zu dem Resultat, das die ballistische Grenze eines gegebenen Rohres mit zunehmender Wanddicke und größerer Dichte des Füllmediums zunimmt, jedoch mit größer werdendem Projektildurchmesser abnimmt.

Neilson et al. [68] verglichen leere Rohre mit durch Innendruck und Wasser vorbelasteten Rohren, welche einen Außendurchmesser von 150 mm und einer Wandstärke von 7,6 mm besaßen. Diese Versuchskörper sind mit flachköpfigen Projektilen von 25 mm und 60 mm Durchmesser beschossen worden. Die mit Wasser gefüllten Rohre sind mit einem Anfangsdruck vorbelastet, der umgerechnet in Radialspannungen 25 % der Streckgrenze ausmachte.

Bei den Untersuchungen von Neilson wurde an den zwei verschiedenen Rohrdurchmessern ein deutlicher Unterschied in den gemessenen Dehnungen, besonders in radialer Richtung und Null Grad zur Beschussachse, festgestellt. So waren bei den leeren Rohren in radialer Richtung in der Rohrwand ausschließlich negative Dehnungen (Druck), im Gegensatz zu den positiven Dehnungen (Zug) bei

den mit Wasser gefüllten Rohren zu beobachten. Dieser Umstand ist damit begründet worden, dass das Wasser den Impuls durch den Beschuss weiter verteilt und somit sich ein Radialdruck anders als bei den leeren Rohren aufbauen kann. Neilson et al. [68] kamen ebenso zu dem Schluss, dass die benötigte Perforationsenergie abnimmt, wenn das Rohr mit Flüssigkeit gefüllt ist. Diese Meinung ist gegensätzlich zu der von Xiaoqing und Stronge [98]. Die Unterschiede bei den Versuchen der beiden Wissenschaftlergruppen lagen einmal bei der Geschossgeometrie und dem Geschossgewicht, welche bei Neilson vier Kilogramm schwer und eine flachköpfige Form hatten, und bei Xiaoqing und Stronge weniger als zehn Gramm wogen und eine abgerundete Geschosspitze besaßen. Des weiteren kommt hinzu, dass die Test-Dimensionen bei Neilson ungefähr drei bis vier mal so groß waren, wie die von Xiaoqing und Stronge. Jedoch ist zu beachten, dass die Verhältnisse von Geschossdurchmesser zu Rohrwanddicke und Geschoss- zu Rohrdurchmesser in den durchgeführten Versuchen durchaus im selben Rahmen waren. Beide sind sich darin einig, dass die Anwesenheit von Wasser einen weitaus größeren Einfluss auf die kritische Perforationsenergie besitzt, als der des anfänglich aufbrachten Wasserdrucks. Auch sind sich beide darin einig, dass ein geänderter Anfangswasserdruck wahrscheinlich eine unterschiedliche Versagensform durch das Projektil an dem Rohr verursacht.

Versuchsparameter	Neilson et al. [68]	Xiaoqing / Stronge [98]
Geschossgeschw. v_0	46 - 325 m/s	74 - 427 m/s
Geschossform	flach	abgerundet
Geschossdurchmesser d_p	-	6,35 / 9,53 / 12,7 mm
Geschossmasse	1700 - 5420 g	1,03 / 3,53 / 8,35 g
Rohrdurchmesser D	152 mm	51 mm
Rohrwanddicke h_0	7,2 / 11,0 / 18,2 mm	1,2 / 2,1 / 3,3 mm

Tab. 2.1 Parameter von Versuchen an Wassergefüllten Rohren [68,98]

Im Vergleich zu den selber durchgeführten Versuchen mit dünnen Behälterwänden im Verhältnis zu dem Behälterdurchmesser handelt es sich hier bei Neilson und Xiaoqing/Stronge um Rohre, die eine dicke Behälterwand im Verhältnis zu dem Durchmesser aufweisen.

2.2 Empirisch-Analytische Ansätze

Ein Großteil der analytischen Ansätze basiert auf Grundlage von durchgeführten Versuchen. Die Parameter sind hierbei meist mit Vorfaktoren auf die einzelnen Versuche abgestimmt. Daher ist der Geltungsbereich der analytischen Ansätze nur eingeschränkt zu verwenden.

Erste Untersuchungen von Robins [80] stellten in Experimenten einen Zusammenhang der Projektilgeschwindigkeit (v_0) gleich schwerer Geschosse (m_p) und der Eindringtiefe (x) in eine bestimmte Zielstruktur her. Dieser Zusammenhang führte zur auch heute noch ansatzweise verwendeten Gleichung von Robins-Euler

$$x = \frac{m_p V_0^2}{2a} \quad (2.6)$$

in der a das Maß der Widerstandsfähigkeit von der Zielstruktur gegenüber dem Projektil darstellt. Dabei ist a eine Konstante, welche in Experimenten ermittelt werden muss.

Bei Untersuchungen zur Bestimmung der kritischen Geschossenergie für Stahlplatten entwickelte De Marre bereits 1886 eine immer wieder für verschiedene Versuchsparameter angepasste empirische Formel,

$$E_c = a \cdot d_p^{1.5} h_0^{1.4} \quad (2.7)$$

welche auch zu Näherungsformeln zur Bestimmung der kritischen Geschoss-Perforationsenergie E_c für Rohre führte. Hier ist d_p der Projektildurchmesser und h_0 die anfängliche Dicke der Zielstruktur.

In den Untersuchungen von Stronge [85] wurden die Konstanten und Potenzen für die eigenen Versuche angeglichen. Daraus ergeben sich dann die folgenden Formeln zur Bestimmung der Perforationsenergie (E_c in Joule) und der Energie (E_f) bei der die ersten Risse in der Rohrwandung auftreten.

$$E_f = 1.7 \cdot h_0^{2.0} d_p^{0.8} \quad (2.8)$$

$$E_c = 1.1 \cdot h_0^{1.63} d_p^{1.48} \quad (2.9)$$

Neilson [66] änderte die Formel 2.9 leicht ab und kalibrierte sie an seinen eigenen Versuchsergebnissen und erhielt so

$$E_c = C \cdot h_0^{1.7} d_p^{1.8} . \quad (2.10)$$

Hierbei ist C eine Konstante die sich aus den Versuchswerten ergibt. Neilson entwickelte ebenso mit Hilfe der Dimensionsanalyse die folgende Formel zur Bestimmung der kritischen Perforationsenergie, bei der A eine Konstante ist die zwischen 1,0 und 1,4 liegt, σ_u ist die aufnehmbare Zugspannung und D der Rohrdurchmesser der Zielstruktur.

$$E_c = A \cdot \sigma_u \cdot d_p^3 \left(\frac{h_0}{d_p}\right)^{1.7} \left(\frac{d_p}{D}\right)^{0.5} \quad (2.11)$$

Die Gültigkeit der oben aufgeführten Formeln ist auf einen engen, den durchgeführten Versuchen angepassten Parameterbereich beschränkt. Die Formeln besitzen keine Allgemeingültigkeit.

2.3 Untersuchungen mit Hilfe der FEM

In der Literatur sind verschiedenste Untersuchungen mit der FEM zu finden, die sich mit fluid-structure-interaction beschäftigen. Die Schnittmenge zu den eigenen Untersuchungen ist allerdings gering. Folgend soll auf einige Untersuchungen eingegangen werden, welche einen ähnlichen Themenbereich behandeln.

Cichocki [19] untersuchte die Schutzmöglichkeit von Containment-Strukturen die durch Impuls-Lasten belastet wurden. In diesem Fall wurde die Impuls-Last durch eine Unterwasserexplosion auf die Stahlschale aufgebracht, welche die darunterliegende Stahlbeton und Stahl Sandwich-Schale schützen sollte. Zur Umsetzung der Problemstellung wurde das Finite-Elemente Programm ABAQUS/Explicit verwendet.

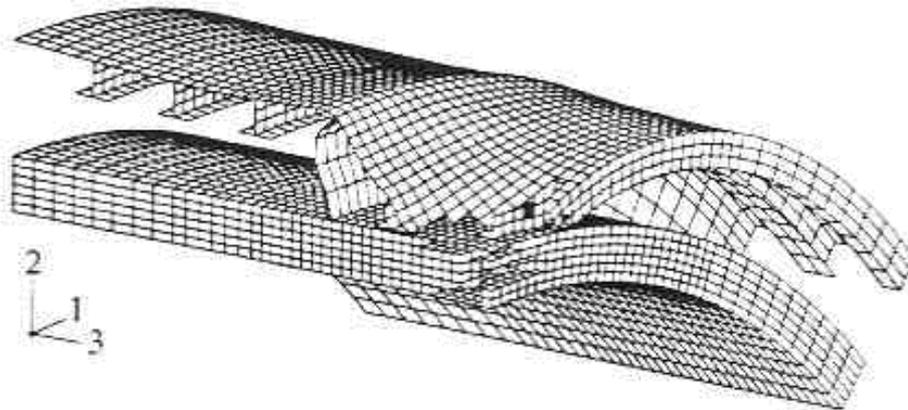


Abb. 2.16 *Deformierte außenliegende Schutzschale mit Unterkonstruktion nach einer Unterwasserexplosion [19].*

Ziel der Untersuchungen war es, durch eine außen liegende Schalenkonstruktion so viel Energie zu dissipieren, dass das Haupttragwerk, in diesem Fall eine Tunnelröhre, nicht so stark geschädigt wird, das gegebenenfalls Wasser eindringen kann.

Abbildung 2.16 zeigt die deformierte außenliegende Schutzschale der Tunnelkonstruktion nach einer Unterwasserexplosion. Nicht dargestellt sind hier die Flüssigkeitselemente und die Sprengladung. Bei dieser Betrachtung wurde von einem Tunnelradius von 7,5 m ausgegangen. Die Schutzschale hatte ein Radius von 8,5 m und eine Wandstärke von 35 mm. Die Tunnelschale wurde in der Grundkonstellation mit einer 25 mm Stahl, 45 mm Beton und wieder 25 mm Stahl-Sandwichkonstruktion generiert. In einer Parameterstudie untersuchte Cichocki die Auswirkung von verschiedenen zusätzlichen Layern aus Beton, die er Wahlweise auf die außenliegende Schutzschale aus Stahl, oder die Sandwich-Tunnelröhre aufbrachte. Beide Varianten verhinderten nicht einen Aufschlag mit bis zu 900 m/s der äußeren Schutzschale auf die Unterkonstruktion.

Zur Abbildung des Fluids wurden Kontinuumelemente mit dem Stoffgesetzen von Mie-Grüneisen verwendet [44]. Für den Sprengstoff fanden die Jones-Wilkens-Lee Stoffgesetze, welche in [44] beschrieben sind, Anwendung. Für den Stahl wurden Schalenelemente verwendet, welche auf Basis der Mises Stoffgesetze mit isotroper

Verfestigung und Fließbedingung, verbunden mit dem Stoffgesetz von Hook mit linear isotroper Elastizität beruhten (siehe [44]). Für den Beton wurde ein elasto-plastisches Schädigungsmodell verwendet, welches über eine Subroutine in den ABAQUS/Explicit Code eingegeben wurde. Versuche, mit denen die FE-Untersuchungen verglichen werden konnten, existieren nicht.

Holmes und Kirkpatrick erforschten in einer Reihe von Untersuchungen das Tragverhalten von dünnen Aluminiumschalen [45,52]. In den Untersuchungen [45] wurden kreiszylindrische Aluminiumbehälter mit einer Höhe und einem Durchmesser von 30,48 cm mit einer Sprengladung versehen und belastet. Die Behälter hatten eine Wanddicke von 0,635 mm und wurden an den Enden mit Aussteifungsringen verstärkt, um die Schalen einspannen zu können. Als Ladung wurde ein langsam abbrennender Sprengstoff verwendet. Die Sprengladung hatte einen Durchmesser von 7,62 cm. Untersucht wurden Behälter ohne Innendruck und mit einem Innendruck von 0.76 MPa.

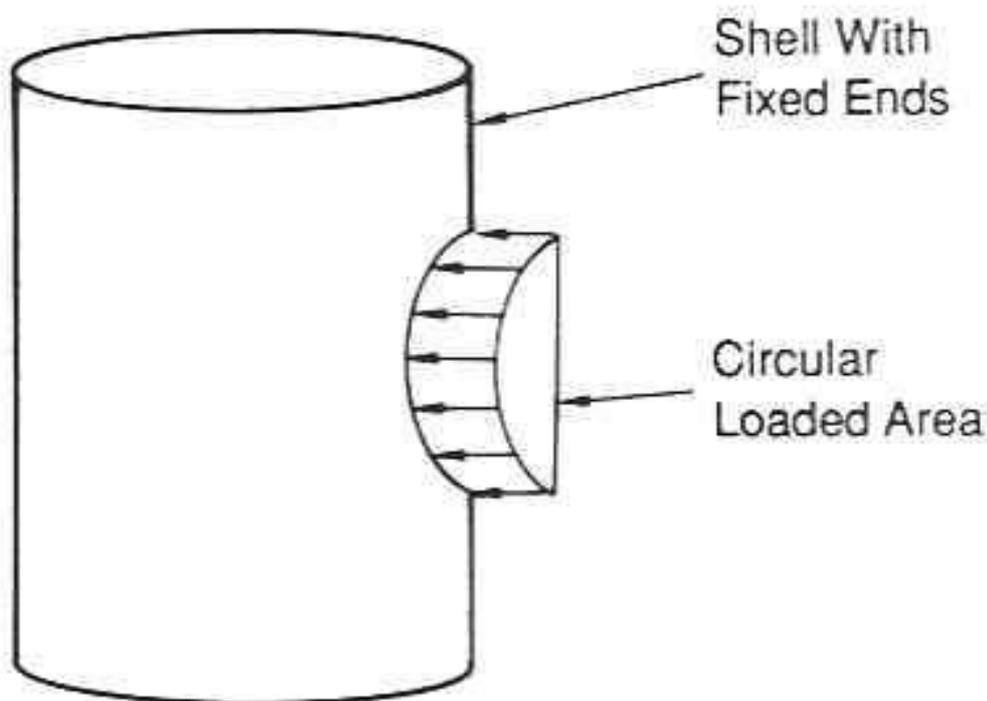


Abb. 2.17 *Schema des Versuchsaufbaus von Holmes und Kirkpatrick [45]*

Abbildung 2.17 zeigt den schematischen Versuchsaufbau von den Behälterschalen und den Bereich in dem die Sprengladung angebracht wurden.

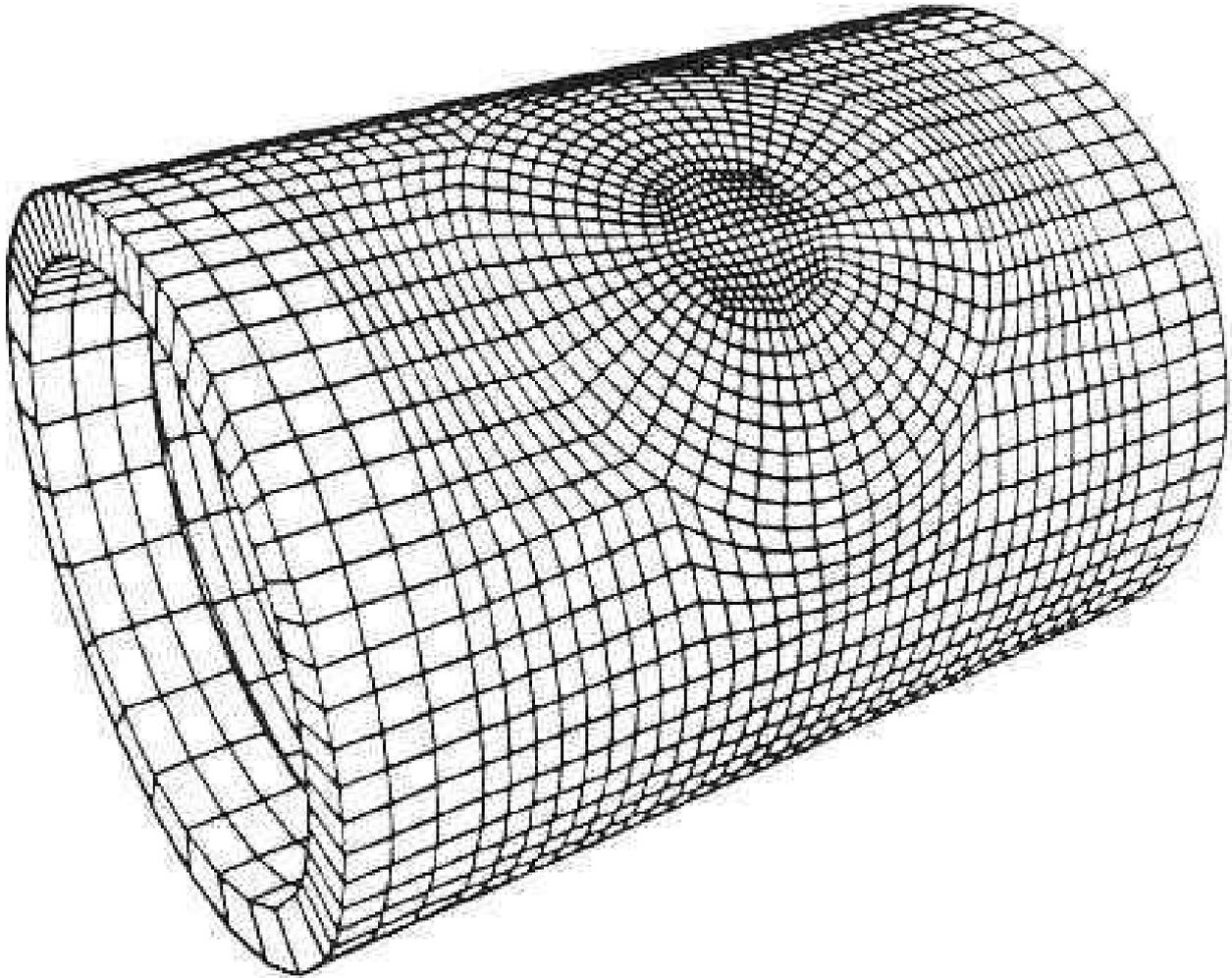


Abb. 2.18 *Elementnetz des abgebildeten Versuchskörpers [45]*

Die Versuchsreihe zeigte, dass sich zwei unterschiedliche Versagensmodi einstellen, je nach dem, ob in den Behältern Innendruck war oder nicht. Bei den Behältern ohne Innendruck wurde die Behälterwand zum Zentrum hin eingedrückt. Bei den Behältern mit Innendruck hingegen wurde festgestellt, dass die Behälterwand in dem Bereich der Sprengladung nach außen gedehnt wurde. Dehnmessungen zeigten, dass die Behälterwand zunächst auf Grund der Sprengladung, analog zu den Behältern ohne Innendruck, nach innen eingedrückt wurde und anschließend durch den vorhandenen Innendruck über die Ursprungslage hinaus nach Außen gedehnt wurden. Die Nachrechnung der Versuche erfolgte mit Hilfe des FEM-Programms DYNA3D. Die Behälterwand wurde mit Schalenelementen nach dem Ansatz von Beliytschko-Lin-Tsay abgebildet. Es wurde ein Lagrange'sches Elementnetz mit expliziter Zeitintegration verwendet.

In Voruntersuchungen wurden die Schalenelemente von Huges-Liu, welche auf degenerierten Brig-Elementen beruhten und somit auch finite Scheer-Anteile berücksichtigten, mit denen von Belytschko-Lin-Tsay, welche auf der Mindlin Plattentheorie beruhen und nur infinitesimale Scheer-Anteile berücksichtigen, verglichen.

Die Autoren kamen zu dem Schluß, dass der Einfluß der unterschiedlichen Ansätze auf das hier abzubildende Tragverhalten nur sehr gering ist und verwendeten daher die Elemente mit dem Ansatz von Belytschko-Lin-Tsay, was den Vorteil einer kürzeren Rechenzeit hatte. Den Schalenelementen wurde ein Versagenskriterium zugewiesen, welches von biaxialen statischen Zugversuchen des Aluminiums (6061-T6) abgeleitet wurden. Die Spannungs-Dehnungs Kurve aus den Zugversuchen wurde in DYNA3D mit einem bilinearen Spannungs-Dehnungs Verlauf angenähert.

Abbildung 2.18 zeigt den vollständig abgebildeten Versuchskörper. In den Berechnungen wurde unter Berücksichtigung der Symmetriebedingungen nur ein viertel des Netzes verwendet.

Die Explosion des Sprengstoffes wurde mit Hilfe einer Belastung-Zeit Funktion und einer Anfangsgeschwindigkeit der Schalenelemente unter dem Sprengstoff angenommen. Der Innendruck wurde mit einer konstant nach außen wirkenden Kraft entsprechend dem angenommenen Innendruck abgebildet.

Neilson [67] verglich in seinen Untersuchungen die beiden dreidimensionalen FE-Programme EURODYN-03 mit DYNA-3D. Abgebildet wurden Versuche, bei denen ein dickwandiges Rohr mit einem 100 m/s schnellen Impact beschossen wurde. In den Untersuchungen zeigte sich, dass DYNA-3D die endgültigen Verformungen genauer abbilden konnte.

Abbildung 2.19 zeigt die Verformungen von einem dickwandigem Rohr nach dem Beschuss mit einem 100 m/s schnellem Geschoss, welches die Rohrwandung nicht perforierte.

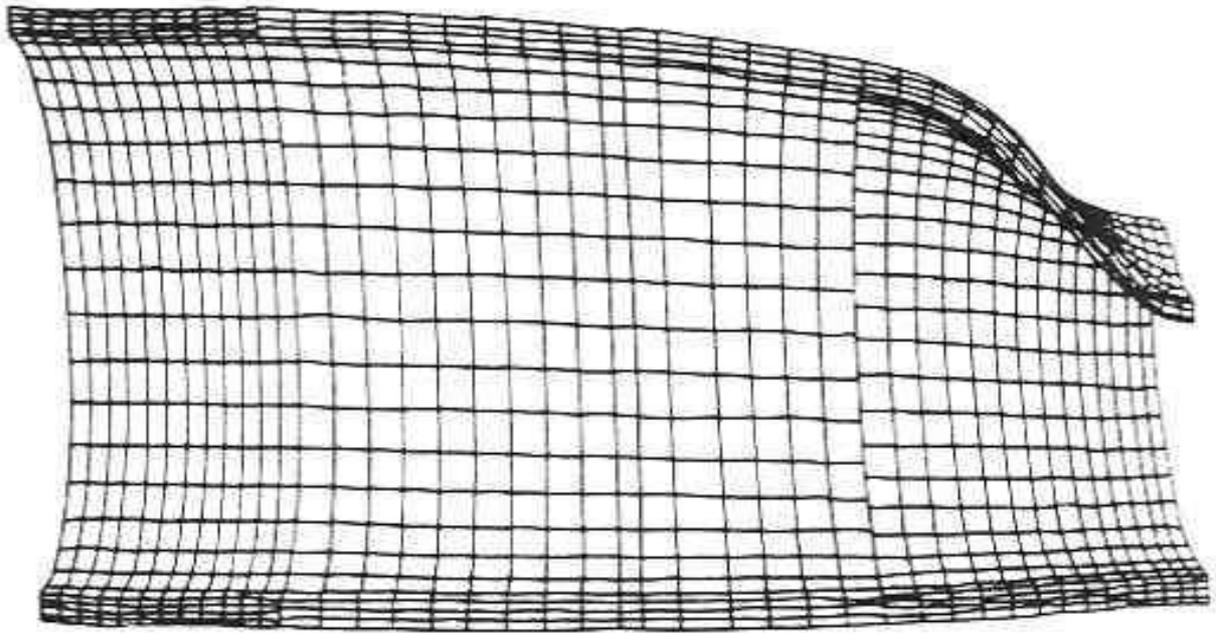


Abb. 2.19 *Verformungen eines Rohrstückes nach dem Beschuss [67]*

Nicholas, Kimsey [101] versuchten in ihren FE-Untersuchungen den Beschuss von Benzin gefüllten Flugzeugtragflächen zu simulieren. Hierfür verwendeten sie den FE-Code EPIC-2. Generiert wurde ein kreiszylindrischer Bereich des Tanks mit einem Radius von 50,8 cm und einer Tiefe von 15,2 cm. Die Behälterwände wurden aus 1,8 mm dickem Aluminium (2024-T3) angenommen. Beschossen wurde mit einem 50 g schwerem Geschoss, das eine Aufschlaggeschwindigkeit von 909 m/s hatte. Die Flüssigkeit wurde als Wasser angenommen. Ein Entlanggleiten des Projektils an der Flüssigkeit wurde zugelassen. Die Flüssigkeit wurde mit Dreieckelementen abgebildet.

Abbildung 2.20 zeigt die Druckentwicklung und den Deformationsgrad der Elemente nach 40 und 180 μ s. Die Primärdruckwelle erreicht Werte von etwa 280 MPa, welche schnell wieder auf etwa 15 MPa abfielen.

Die Werte wurden nicht an Versuchen kalibriert, da Vergleichsversuche für diesen Sachverhalt fehlten. Zudem ist ein Großteil der Untersuchungen nicht öffentlich verfügbar.

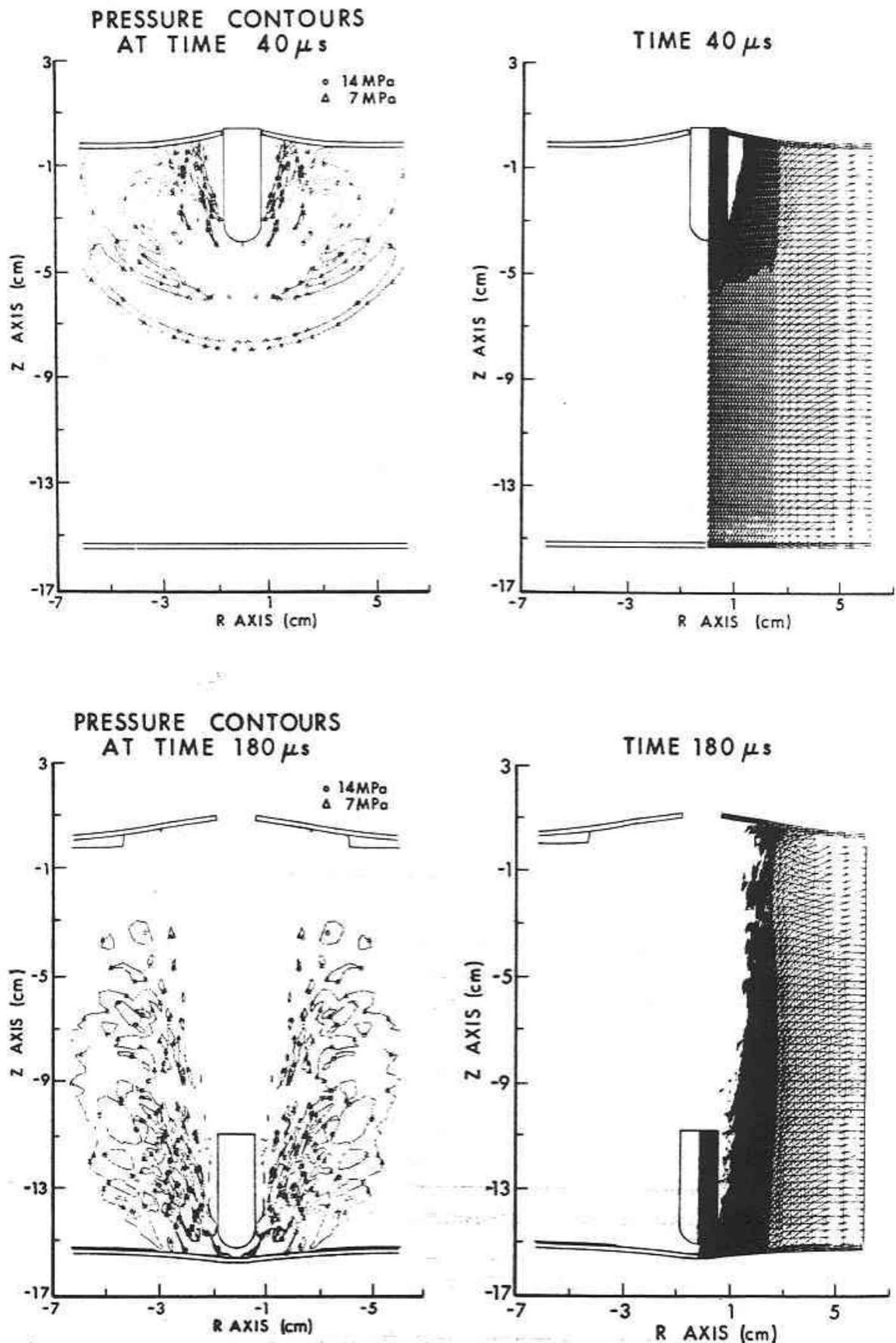


Abb. 2.20 Druck- und Deformationsprofil nach 40 und $180 \mu\text{s}$ [101]

3 Prinzipielles Tragverhalten

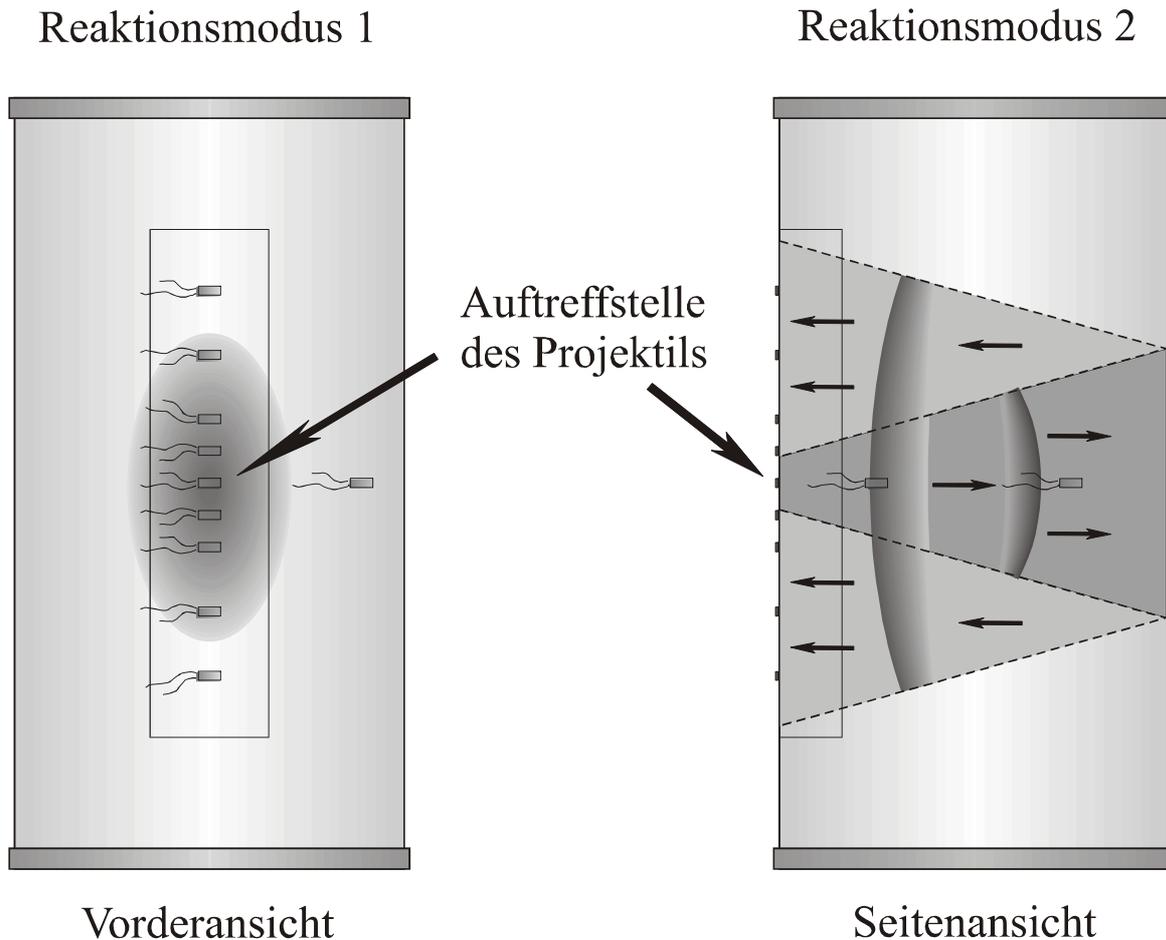
Bei dem Beschuss von flüssigkeitsgefüllten Behältern, welche eine geringe Behälterwanddicke im Gegensatz zu dem Behälterdurchmesser aufweisen, lassen sich zwei unterschiedliche Reaktionsmodi für die Belastung der Behälterwand feststellen, die zu einem schlagartigen Aufreißen der Behältervorderseite führen können.

Mit der Behältervorderseite ist in diesem Fall die Seite gemeint, an der das Projektil auf den Behälter auftrifft. Analog dazu ist die Behälterrückseite diejenige Seite, an der das Projektil aus dem Behälter wieder austritt. Zusätzlich sollen hier noch die Behälteraußenseite als diejenige Wandseite die außerhalb des Behälters liegt und die Behälterinnenseite als diejenige die innerhalb des Behälters liegt definiert werden.

Das Auftreffen des Projektils auf die Behältervorder- und Außenseite bewirkt einerseits ein Verdrängen des an der Behälterinnenseite befindlichen Fluids, das sich auf Grund der hohen Massenträgheit bei dynamischen Beanspruchungen zu diesem Zeitpunkt nur in geringem Maß in Richtung des Behältermittelpunktes verdrängen läßt. Zum Anderen ist die Flüssigkeit annähernd inkompressibel, was eine Verringerung des Volumens beschränkt. Die Flüssigkeit bewegt sich daher in diesem Fall in Richtung der Innenseite der Behältervorderseite, also bei einer radialen Betrachtungsweise des Einschussbereichs entgegen der Flugrichtung des Projektils. Dadurch wird die Behältervorderwand am Einschussbereich nach außen verdrängt. Der Bereich, in dem diese Verformungen auftreten, ist in der Abbildung 3.1 bei dem Reaktionsmodus 1 dunkel dargestellt. Auf Grund der Krümmung der kreiszylindrischen Behälterwand und der damit verbundenen größeren Kräfteaufnahme in meridialer- als in longitudinaler Richtung entsteht ein ovaler Bereich bei dem ein Verdrängen der Behältervorderseite nach außen zu beobachten ist. Ist die Auftreffgeschwindigkeit des Projektils ausreichend hoch und die Behälterwanddicke ausreichend gering, so kann dieses bereits zu diesem Zeitpunkt zu einem Aufreißen der Behältervorderseite in longitudinaler Richtung führen. Außerdem wird die Behälterwand an der Behältervorderseite durch die sich von der Beschussstelle radial ausbreitenden Druckwelle, welche durch die Flüssigkeit zur Innenseite der Behälterrückseite läuft und dort wiederum zur Vorderseite reflektiert wird, belastet. Dieser Reaktionsmodus ist in Abbildung 3.1 Reaktionsmodus 2 dargestellt. Der Bereich, in dem die Vorderseite der Behälterwand besonders stark

belastet wird ist auch hier dunkel dargestellt worden.

Auf Grund der Ergebnisse aus den durchgeführten Versuchen läßt sich der Belastungs- und Reaktionsablauf für einen Behälterbeschuss in einzelne Phasen unterteilen, die im Folgenden für flüssigkeitsgefüllte Behälter dem Prinzip nach beschrieben werden.



Vorderansicht
Abb. 3.1 Unterteilung des Beanspruchungsablaufs auf die Behälterwand für den Beschuss von flüssigkeitsgefüllten Behältern in zwei verschiedene Reaktionsmodi, die zu einem schlagartigen Aufreißen der Behälterwand führen können
 Seitenansicht

Als erstes ist die Auftreffphase des Geschosses auf den Behälter zu beobachten. Die Auftreffphase ist dadurch gekennzeichnet, dass sich eine lokale Verformung der Auftrefffläche einstellt. Dabei bildet sich im Fluid eine konzentrierte Stoßwelle aus, die sich radial mit der Wellengeschwindigkeit der Flüssigkeit ausbreitet. Anschließend wird die Behälterwand durch das Projektil perforiert und das hinter der Auftrefffläche liegende Fluid verdrängt.

Dabei kann es bei Einhaltung bestimmter geometrischer Verhältnisse wie den Parametern Behälterradius, Wandstärke, Impactgeschwindigkeit und Masse des Projektils zu einem teilweisen Aufreißen der Behältervorderseite kommen. Diese Schädigung der Behältervorderseite ist in Abbildung 3.1 als Reaktionsmodus 1 beschrieben worden. Die nächste Phase ist die Schockphase, in der die Information des Stoßes durch das Fluid weitergegeben wird. An dem Materialübergang vom Fluid zur Behälterrückseite kann die Druckwelle nicht weitergegeben werden und es kommt zur Reflexion der primären Druckwelle. Diese reflektierte Druckwelle läuft zurück zur Behältervorderseite, wo die bereits durch den Reaktionsmodus 1 vorgeschädigte Behälterwand weiter nach außen gedehnt wird und gegebenenfalls auf ganzer Höhe ausgehend von dem Rand des Einschussloches aufreißt (Abb. 3.1 Reaktionsmodus 2). Die nächste parallel ablaufende Phase ist die Durchdringungs- und Verdrängungsphase. Hier werden die Flüssigkeitspartikel durch das Geschoss aus der Geschossflugbahn verdrängt und es kommt zu einer Verschiebung der Partikel an einen anderen geometrischen Ort. Durch die Partikelgeschwindigkeit der durch das Projektil verdrängten Flüssigkeit bildet sich ein konzentrierter Druckbereich vor und um das Geschoss herum aus. Während der Durchdringung des Projektils durch die Flüssigkeit wird ein großer Teil der kinetischen Energie des Geschosses durch Reibung dissipiert und in Druck und Wärme umgewandelt. Fängt das Geschoss an zu kippen, also ein Verlassen der stabilen Flugbahn durch Rotation um die Flugachse, wird überproportional kinetische Energie, durch die größere Verdrängungsfläche und damit auch größere Kavitation, dissipiert. Die letzte Phase ist die Austrittsphase des Geschosses aus dem Behälter. Bei einer genügend großen kinetischen Restenergie wird die Behälterrückwand perforiert und das Geschoss tritt aus. Zu diesem Zeitpunkt ist das mögliche Aufreißen der Behältervorderseite für die in den Versuchen verwendeten Impactgeschwindigkeiten bereits abgeschlossen.

Auf Basis dieser Betrachtungsweise und der Kesselformel für dünnwandige Behälter setzt sich die aufnehmbare Zugspannung der Behälterwand in meridialer Richtung σ_φ wie folgt zusammen:

$$\sigma_\varphi = p_{ges} \frac{r}{t} \quad (3.1)$$

Wobei p_{ges} der Innendruck in dem Behälter ist, r den Radius des Behälters und t die Behälterwanddicke bezeichnet. Der Innendruck im Behälter setzt sich aus drei Anteilen zusammen.

$$p_{ges} = p_I + p_D + p_V \quad (3.2)$$

Hierbei ist p_I der statische Innendruck, mit dem der Behälter gegebenenfalls vorbelastet ist, und p_D der Druck, welcher durch den Aufschlag des Projektils auf die Behälterwand eine konzentrierte Druckwelle in die Flüssigkeit einleitet. Der Druck p_V entsteht in Folge der Verdrängung der Flüssigkeit durch das Projektil. Setzt man Formel (3.1) in (3.2) ein, so erhält man

$$\sigma_\varphi = (p_I + p_D + p_V) \frac{r}{t} \quad (3.3)$$

Der Druck p_V ist hierbei eine Funktion, welche von der Form und der Anfangsgeschwindigkeit des Projektils und der Zähigkeit der Flüssigkeit abhängig ist. Der Druck p_D wird beschrieben durch eine Funktion in Abhängigkeit von der Behälterwanddicke, der Masse und der Anfangsgeschwindigkeit des Projektils.

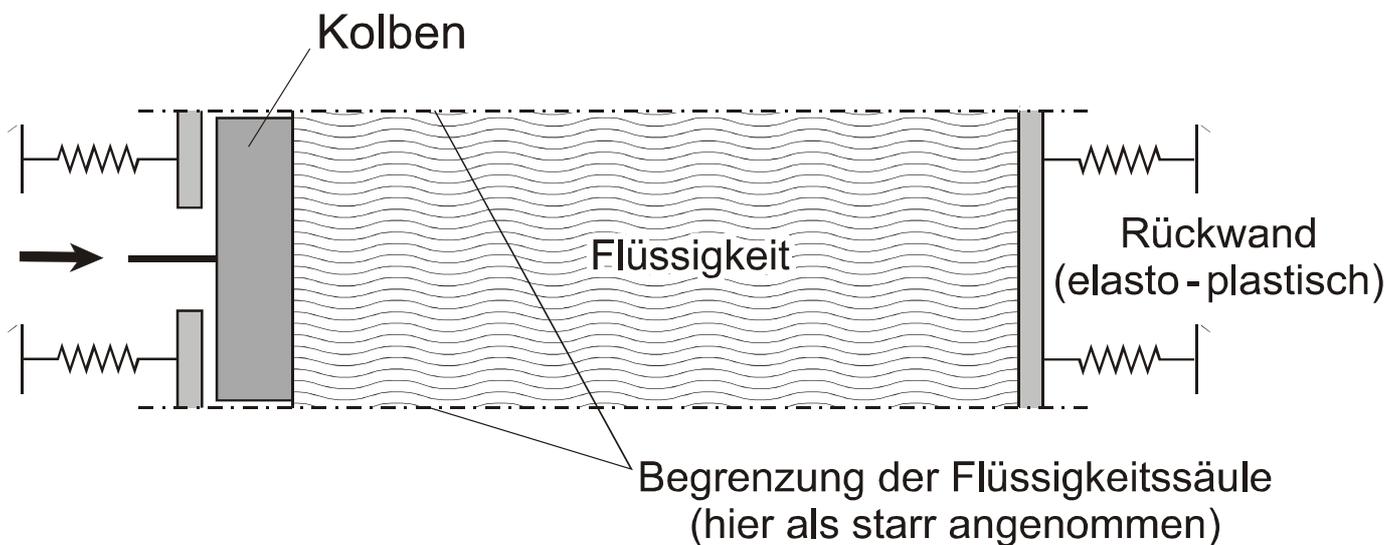


Abb. 3.2 Reduzierung des Behälter-Stoß-Phänomens auf eine Flüssigkeitssäule (Gestößener mittlerer Bereich des Behälters)

Abbildung 3.2 zeigt vereinfacht das in den eigenen Versuchen auftretende Stoßphänomen. Hierbei wird für das Modell zunächst eine gedachte horizontale Scheibe aus dem Behälter herausgeschnitten. Die getroffene Behälterwand weist hierbei ein Loch (auf Grund der Perforation des Projektils) auf. Die Behältervorder- und Rückseite werden als elastisch gelagert angenommen, dabei besitzt die Rückwand ein elasto-plastisches Materialverhalten. Der Stoß wird hier vereinfacht durch einen Kolben der sich in Richtung der Flüssigkeit bewegt aufgebracht.

Die Umsetzung dieses vereinfachten Stoßphänomens erfolgte mit Hilfe des Finite-Elemente-Programms ABAQUS/Explicit [44]. Dieser Modellansatz (Abb. 3.2) wurde zur Erklärung der physikalischen Grundlagen der Schock- und Verdrängungsphase gerechnet:

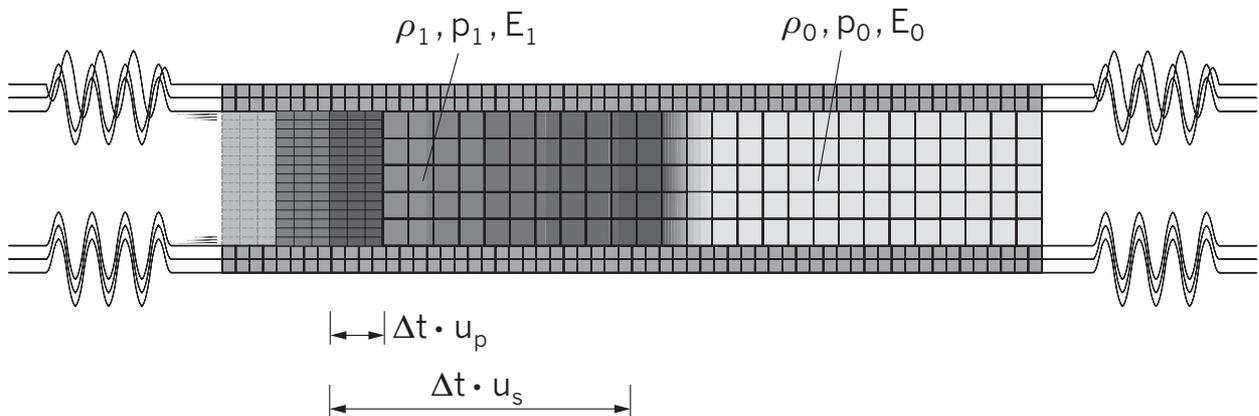


Abb. 3.3 Durch zwei Elementreihen oben und unten gehaltene Flüssigkeitssäule bei der über einen Kolben, mit vorgegebener Anfangsgeschwindigkeit, eine Druckwelle erzeugt wird

In Abbildung 3.3 ist die Umsetzung des Behälter-Stoß-Phänomens durch ABAQUS/Explicit dargestellt. Die verwendeten Elemente sind dreidimensional, allerdings durch diese Seitenansicht nur zweidimensional abgebildet. Die Flüssigkeitssäule wird oben und unten durch zwei Elementreihen in vertikaler Richtung gehalten. Diese Elementreihen besitzen eine Masse, um die Kopplung der betrachteten Säule zur übrigen Behältermasse zu simulieren und sind hier als unverformbar angenommen worden. Der Stoß wird, durch einen Kolben der eine vorgegebene Anfangsgeschwindigkeit u_0 besitzt, von links auf die Flüssigkeit aufgebracht. Dieser Kolben schließt die Flüssigkeitssäule auf der linken Seite ab. Am rechten Ende wird die Flüssigkeitssäule durch Schalenelemente verschlossen, die ein elasto-plastisches Materialverhalten wie die Behälterrückseite aufweisen. Die Schalenelemente sind in dieser Ansicht nicht zu erkennen, da es sich um Vier-Knotenelemente handelt, die senkrecht zur Bildebene liegen. Die Federn, welche die Flüssigkeitssäule rechts und links halten, sollen die Nachgiebigkeit der Gesamtstruktur des Behälters mit der Halterung abbilden.

Abbildung 3.3 zeigt den quantitativen Druckzustand in der Flüssigkeit zum Zeitpunkt Δt nach dem Auftreffen des Kolbens auf die Flüssigkeit. Der Kolben hat einen Teil des Fluides verdrängt. Da keine Flüssigkeit entweichen kann, ist die

Partikelgeschwindigkeit vor dem Kolben gleich der Kolbengeschwindigkeit u_p . Die Wellengeschwindigkeit u_s , mit der die Druckinformation in dem Fluid weitergegeben wird, ist höher als die Partikelgeschwindigkeit, mit der sich das Fluid vor dem Kolben her bewegt. Die Flüssigkeit hat sich bis zu diesem Zeitpunkt um die Strecke $\Delta t u_p$ bewegt. Im Gegensatz dazu hat sich die Druckwelle zu diesem Zeitpunkt schon um $\Delta t u_s$ fortbewegt. Aus der Erkenntnis, dass das ungestörte Fluid die Dichte ρ_0 und das durch die Druckwelle komprimierte Fluid die Dichte ρ_1 besitzt läßt sich der Massenerhaltungssatz ableiten.

$$\rho_0 u_s = \rho_1 (u_s - u_p) \quad (3.4)$$

Die Partikelgeschwindigkeit u_p ist grundlegend unterschiedlich von der Wellengeschwindigkeit u_s . Bei der Partikelgeschwindigkeit handelt es sich um einen reellen Partikelfluss, dagegen bei der Wellengeschwindigkeit um die Weitergabe einer Belastungsinformation, die dann zu einer Partikelgeschwindigkeit führen kann. Bei den hier untersuchten Belastungsgeschwindigkeiten ist die Wellengeschwindigkeit immer größer als die Partikelgeschwindigkeit. Wasser hat bei 20° Celsius eine Wellengeschwindigkeit von 1485 m/s [29].

Möchte man den Impulserhaltungssatz anhand dieses Beispiels herleiten, so kann man folgende Betrachtung anstellen. Die Kraft, die von der linken Seite durch den Kolben auf die Flüssigkeitssäule pro Flächeneinheit wirkt, ist gleich dem Druck p_1 , wogegen der Druck rechts von der Störung gleich dem ursprünglichen Druck p_0 vor der Belastung entspricht. Die Kraft pro Flächeneinheit, die durch den Kolben auf das System wirkt, ist $p_1 - p_0$. Die Druckwelle des Stoßes beschleunigt eine Masse von $\rho_0 \cdot u_s$ pro Zeiteinheit auf die Geschwindigkeit u_p , was ein Impuls-Transfer von $\rho_0 \cdot u_s \cdot u_p$ bewirkt. Aus diesen Betrachtungen ergibt sich folgende Formel, für den Impulserhaltungssatz:

$$p_1 - p_0 = \rho_0 \cdot u_s \cdot u_p \quad (3.5)$$

Auch der Energieerhaltungssatz läßt sich anhand des Beispiels darstellen. Der Kolben bewegt sich in einem Zeitintervall um die Strecke $\Delta t \cdot u_p$, damit ist die Arbeit, die der Kolben in dem Intervall Δt verrichtet $p_1 u_p \cdot \Delta t$. Die Masse des Materials, welches durch die Druckwelle auf die Geschwindigkeit u_s beschleunigt wurde, ist $\rho_0 \cdot u_s \cdot \Delta t$. Die kinetische Energie der beschleunigten Masse ist dabei

$\Delta t \cdot 0,5 \cdot (\rho_0 \cdot u_s \cdot u_p^2)$. Wählt man die innere Energie vom ungestörten Bereich als E_0 und vom gestoßenen Bereich als E_1 , so ist der Zuwachs der inneren Energie ($E_1 - E_0$) gleich $\rho_0 \cdot u_s \cdot \Delta t$ pro Masseneinheit. Die Arbeit, welche in dem System verrichtet wird, ist gleich der Summe der kinetischen und der inneren Energie. Damit erhält man den Energieerhaltungssatz:

$$p_1 u_p = (\rho_0 u_s u_p^2) + \rho_0 u_s (E_1 - E_0) \quad (3.6)$$

Auf Abbildung 3.4 sind fünf signifikante Zeitschritte t_1 bis t_5 dargestellt. Auf der rechten Seite ist das FEM-Netz und die Druckverteilung in dem Fluid abgebildet. Ebenso ist dort die Bewegungsrichtung für die einzelnen Komponenten (Kolben, Fluid und Rohr) durch Pfeile angegeben.

Auf der linken Seite sind untereinander die Verschiebung der Gesamtstruktur zur Ausgangslage, der Druck in der Flüssigkeit anhand von Element 1 und 2, welche sich links und rechts in der Mitte der Flüssigkeitssäule befinden (siehe Abbildung 3.4 für Zeitschritt t_1) und als vorgegebene Randbedingung die Geschwindigkeit des Kolbens der den Anfangsimpuls auf das Fluid überträgt, dargestellt. Die Simulation wurde mit Hilfe des Finite-Elemente Programs ABAQUS/Explicit durchgeführt.

Nachdem der Kolben mit der vorgegebenen Geschwindigkeit von 400 m/s auf die Flüssigkeitssäule aufgetroffen ist (Zeitschritt t_1) und die Stoßwelle durch das Fluid hindurch gelaufen ist, wird diese an der Rückseite durch die Behälterrückwand in diesem Fall durch die Schalenelemente reflektiert (Zeitschritt t_2). Erst durch diesen Impuls auf die Behälterrückseite bewegen sich die Begrenzungselemente ober- und unterhalb der Flüssigkeit. Die rücklaufende Druckwelle überträgt auf den Kolben wiederum einen so großen Impuls, dass dieser die Bewegungsrichtung ändert und sich von der Flüssigkeit entfernt (Zeitschritt t_3). Die Schalenelemente an der rechten Rohrseite werden durch die neuerlich reflektierte Druckwelle und durch die gegenläufige Bewegungsrichtung von Fluid und Begrenzungselementen immer stärker gedehnt (Zeitschritt t_4). Danach löst sich die Flüssigkeit von der Schale ab (Zeitschritt t_5), dieser Umstand kann, wie die durchgeführten Versuche zeigen, zum Einbeulen der Behälterrückwand führen (siehe auch Kapitel 4). Nach dem Zeitpunkt t_5 ist der für den Behälterbeschuss relevante Zeitbereich vorbei, das Ausschwingen des Rohres ist für diese Untersuchung nicht von Interesse.

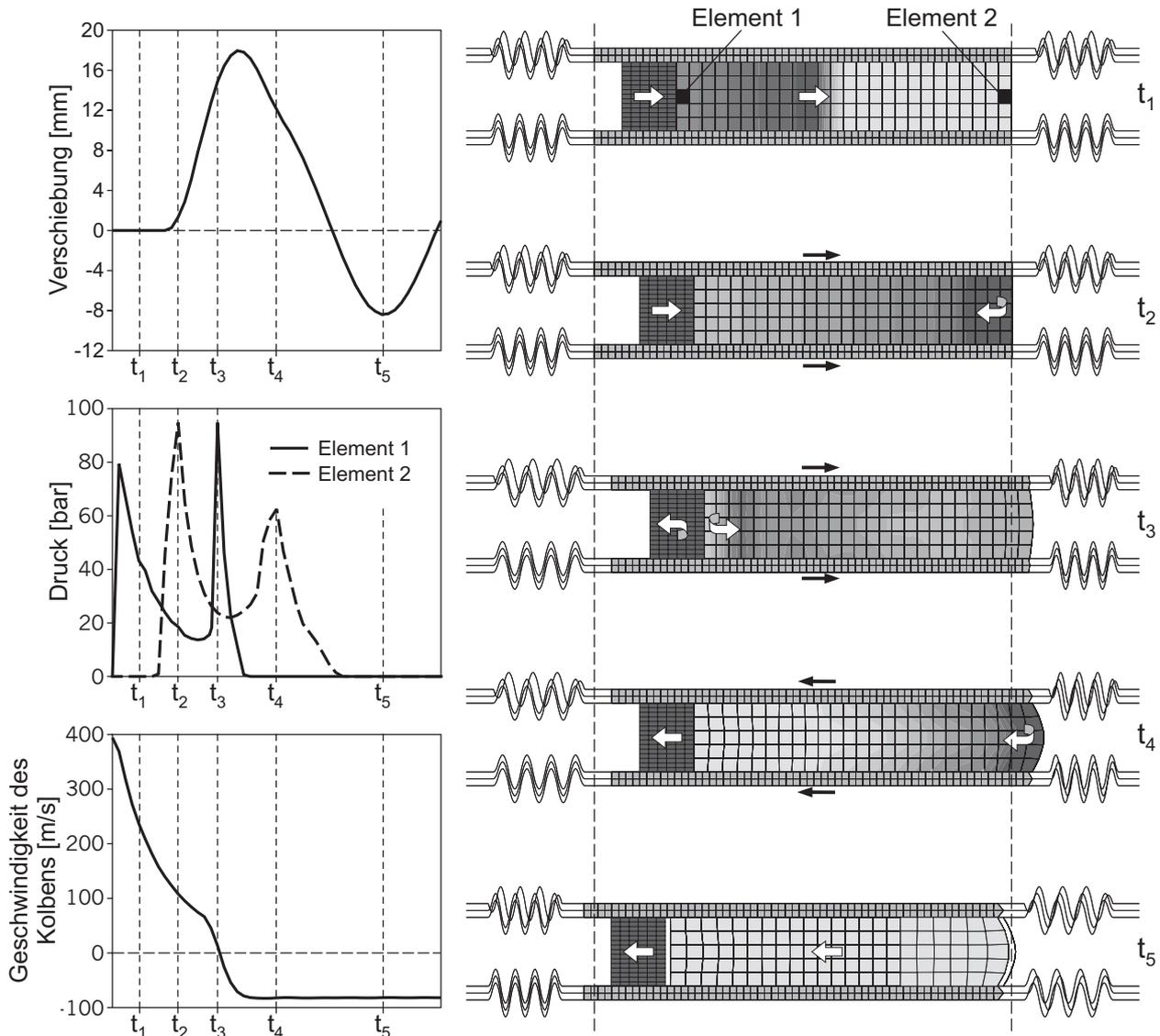


Abb. 3.4 Finite-Elemente Auswertung (ABAQUS/Explicit) für die Reduzierung des Behälter-Stoß-Phänomens auf eine Flüssigkeitssäule mit der Anfangsbedingung einer vorgegebenen Kolbengeschwindigkeit von $v_0 = 400 \text{ m/s}$

Abbildung 3.5 zeigt den Behälter Beh.5, der in der eigenen Versuchsreihe mit einem 733 m/s schnellen Projektil beschossen wurde (vgl. Kapitel 4). Der Behälter war zu dem Beschusszeitpunkt vollständig mit Wasser gefüllt. Auf Grund des oben angegebenen Belastungsablaufs ist die Behältervorderseite, auf die das Projektil geschossen wurde, über den Großteil der Behälterhöhe aufgerissen. Dabei haben Versuchsergebnisse gezeigt das der Behälter verglichen mit den vorherigen FE-Rechnungen zu dem Zeitpunkt t_3 etwa zu $\frac{2}{3}$ der Risslänge aufgerissen war. Zu dem Zeitpunkt t_4 ist der Behälter auf fast der vollständigen Risslänge aufgerissen gewesen.



Abb. 3.5 Vorderansicht des mit Wasser gefüllten Behälters nach dem Beschuss mit einem Projektil (Versuch Beh.5)

4 Eigene experimentelle Voruntersuchungen

Im Rahmen eigener Untersuchungen wurden bei Vorversuchen zunächst Metall-Getränkedosen und nachfolgend kreiszylindrische Stahlbehälter rechtwinklig zur Behälterachse beschossen. Einige der Dosen und Stahlbehälter wurden mit Dehnmessstreifen versehen und mit verschiedenen Hochgeschwindigkeitskameras gefilmt. Bei den Stahlbehältern wurde zusätzlich ein Druckaufnehmer im Behälterinneren angebracht, um den Druck im Wasser während des Belastungsablaufs ermitteln zu können.

Die meisten Versuche wurden in der Versuchshalle des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe (TH) und einige der Vorversuche im Forschungszentrum Karlsruhe durchgeführt. Die Versuche an zwei Stahlbehältern (Beh.5 und Beh.6), welche während des Versuchs mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt wurden, sind am Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik (Ernst-Mach-Institut in Evringen-Kirchen bei Freiburg) durchgeführt worden.

In den Voruntersuchungen konnten gezielt Parameter für die nachfolgenden größeren Versuche festgelegt und Fehldimensionierung vermieden werden. Außerdem stellten sich bei den Getränkedosen dieselben Versagensmechanismen ein, die später auch bei den Behältern festgestellt wurden.

Bei dem Beschuss der Metall-Getränkedosen ging es einerseits darum, kostengünstig den Beschuss eines Behälters zu simulieren, um die Dimensionierung für nachfolgende größere Behälter richtig zu wählen, und andererseits Erkenntnisse dafür zu bekommen, an welchen Stellen des Behälters mit besonderen Verformungen oder besonderem Versagen zu rechnen ist, um die Dehnmessstreifen und später den Druckaufnehmer an den Stellen anzubringen, an denen relevante Größen gemessen werden konnten.

4.1 Durchgeführte Vorversuche

Es wurden 34 Metall-Getränkedosen aus Weißblech mit Hilfe eines Hochleistungsluftgewehrs beschossen. Dabei handelte es sich bei 30 der Dosen um gleiche 330 ml Getränkedosen, außerdem wurden zwei 500 ml und zwei 200 ml Dosen beschossen.

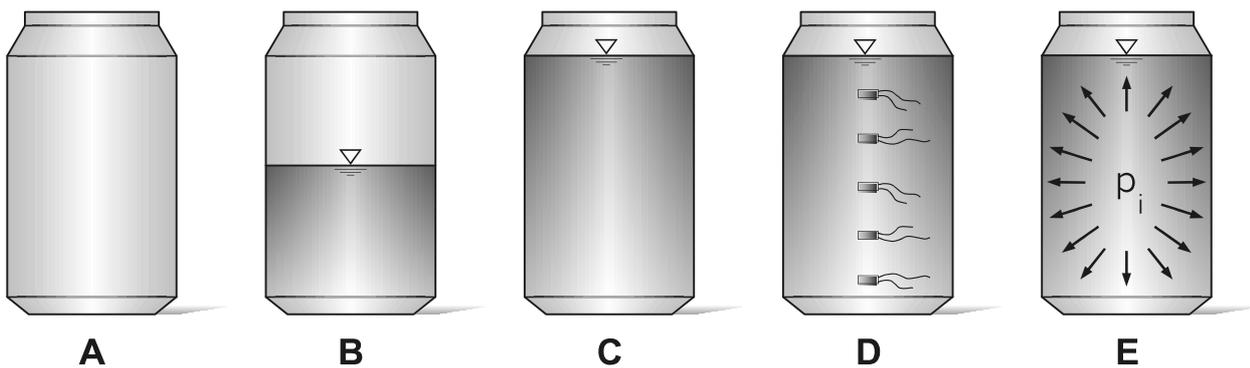


Abb. 4.1 *Verschiedene Parameter der durchgeführten Vorversuche*

Abbildung 4.1 zeigt die verschiedenen untersuchten Parameter, die auch in Tabelle Tab. 4.1 aufgeführt sind. Die Darstellung der Parameter, der Dosenkennungen und der zugehörigen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen können der Tabelle A1 im Anhang entnommen werden. Zwei der 330 ml-Dosen wurden mit je sechs Dehnmessstreifen beklebt.

Versuch	Füllstand d. Flüssigkeit	Besonderheiten	Anz. d. Versuche	Anz. d. zugehörigen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen
A	leer	-	3	-
B	halb voll	-	7	2
C	voll	-	17	7
D	voll	Dehnmessstreifen	2	-
E	voll	Innendruck	6	1

Tab. 4.1 *Parameter der durchgeführten Tastversuche*

Es ist nicht nur der Einfluss des Füllstandes auf das Tragverhalten, sondern auch der Einfluss von Innendruck untersucht worden. Abbildung 4.2 zeigt den Versuchsaufbau für den Beschuss der Getränkedosen. Der Versuchskörper wird zwischen zwei Stahlplatten in Richtung der Behälterachse unverschieblich gehalten. Die Stahlplatten sind jeweils mit einer Nut, entsprechend der Abmessungen des Dosenbodens und Deckels, versehen worden. Es wurde über die Gewindestangen keine Normalkraft auf die Behälterschale aufgebracht.

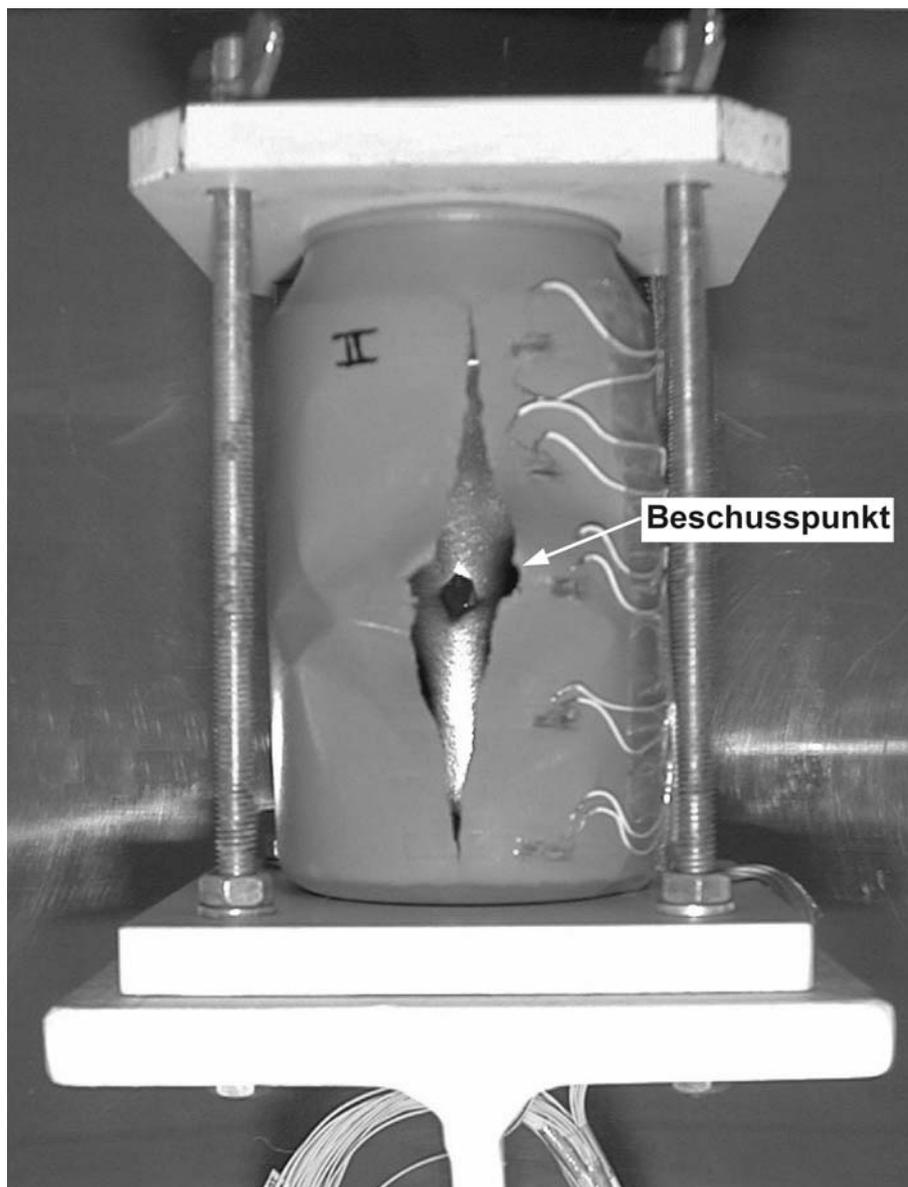


Abb. 4.2 Versuchsanordnung für dem Beschuss der Metall-Getränkedosen

Die beschossenen Dosen bestehen aus gezogenem Weißblech mit einer geringen

Duktilität. Auf Grund der geringen Blechdicke der Behälterwand von 0,1 mm und dem Fehlen geeigneter Vergleichsproben konnten mit den am Institut für Massivbau vorhandenen Prüfmaschinen keine Zugversuche zur Bestimmung der Materialkennwerte durchgeführt werden.

Bei den Versuchen an den Metall-Getränkedosen, die mit Dehnmessstreifen beklebt wurden, konnte ein Versagen der DMS bei einer Dehnung von 0,8 % festgestellt werden. Dieser Wert liegt innerhalb des Messbereichs von $\pm 2,0$ % der Dehnmessstreifen und des Transienten-Rekorders. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass die Grenzdehnung der Dosenwand auch in etwa bei 0,8 % Dehnung liegt. Andere Materialkennwerte wie E-Modul und Streckgrenze konnten aus Materialtabellen für Weißblech [55] entnommen werden.

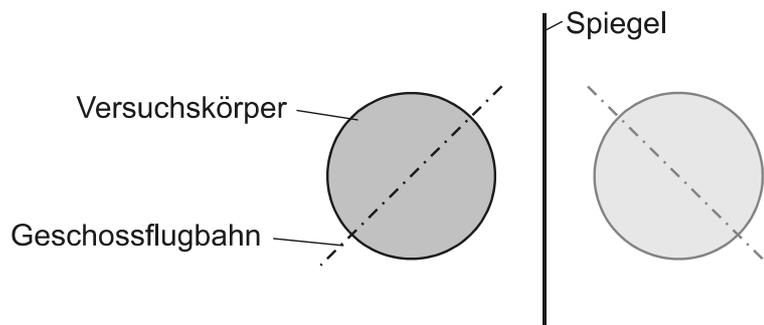
Die Geschwindigkeit der verwendeten Geschosse, in diesem Fall Blei-Diabolos, wurde mit Hilfe einer Siemens LGK-7672 Helium-Neon Laserschranke ermittelt. Die Beschussgeschwindigkeit des Diabolos wurde 10 cm entfernt vom der Mündung des Gewehrlauf nach mehreren Durchläufen mit 190 m/s bestimmt, dabei wurde eine Abweichung von $\pm 2 \text{ m/s}$ festgestellt. Auf Grund der geringen Abweichung von ca. 1% konnte bei der gesamten Versuchsreihe von einer konstanten anfänglichen Impact-Geschwindigkeit vor dem Auftreffen des Projektils auf die Dose ausgegangen werden.

4.2 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Vom Institut für Technische Physik am Forschungszentrum Karlsruhe wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera zur Verfügung gestellt, die bis zu 12000 Bilder pro Sekunde aufnehmen kann. Es handelt sich um eine digitale Aufnahmetechnik, bei der die Bilder in einem Rechner zwischengespeichert und später auf ein VHS-Videoband überspielt werden.

Bei einer Dauer des gesamten Versuchsablaufes von 0,52 ms (vergleiche Abb. 4.17) konnte bei einer Aufnahmegeschwindigkeit von 1000 Bildern pro Sekunde ein Vollbild während des gesamten Versuchereignisses aufgenommen werden. Um den Versuchsablauf besser dokumentieren zu können, entschied man sich für Teilbilder, die jedoch mit einer höheren Aufnahmegeschwindigkeit aufgenommen werden konnten. Somit wurden bei einer Aufnahmegeschwindigkeit von 12000 Bildern pro Sekunde sieben Teilbilder während der interessanten Versuchsphase aufgenommen.

Die Abbildungen 4.4 und 4.5 zeigen zwei Bilder. Das eine Bild ist zu dem Zeitpunkt $t_0 = 0,0$, bei dem das Geschoss auf die Behälterwand aufschlug (Abb. 4.4), und das andere Bild ist bei $t_1 = 0,3$ ms (Abb. 4.5) nach dem Beschuss aufgenommen worden. In den Abbildungen ist jeweils links die Getränkedose von vorn, also entlang der Beschussachse, und rechts daneben die Seitenansicht der selben Getränkedose zum gleichen Zeitpunkt zu sehen. Dieses wurde mittels eines schräg gestellten Spiegels realisiert (siehe Abb. 4.3). Abbildung 4.4 zeigt die unverformte vollständig mit Wasser gefüllte (geschlossen) Dose (B) unmittelbar vor dem Auftreffen des Projektils.



Ansicht
Abb. 3.4 und 3.5

Abb. 4.3 Draufsicht auf den Versuchsaufbau
Abb.4.4+4.5

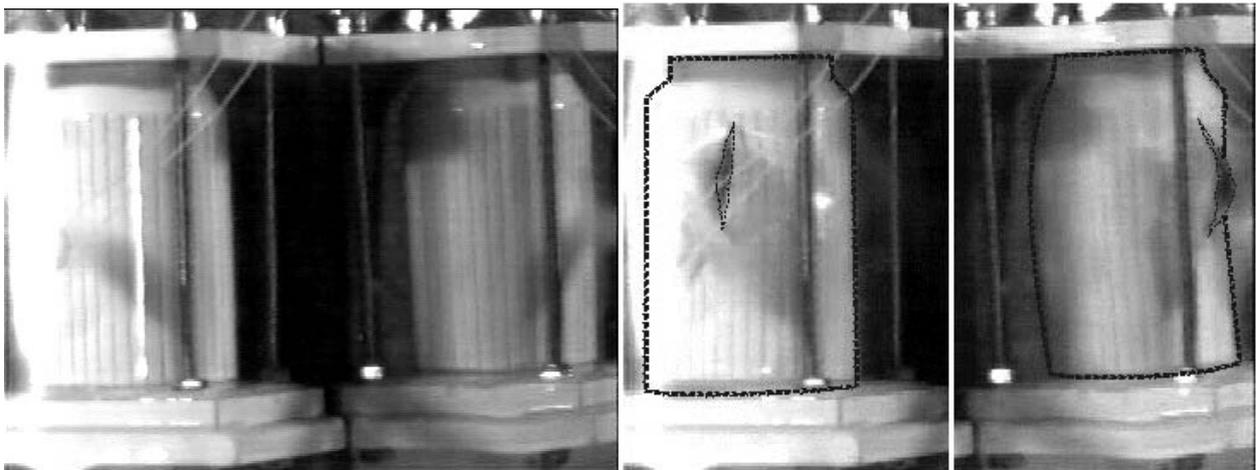


Abb. 4.5 Hochgeschwindigkeitsaufnahme Versuch Dose (B); $t_0 = 0,0$
Abb. 4.4 Hochgeschwindigkeitsaufnahme Versuch Dose (B); $t_1 = 0,3$ ms nach dem Beschuss

Abbildung 4.5 zeigt, wie das Wasser aus der oberhalb des Einschusses aufgerissenen Dose heraus spritzt. Die Vorderseite der Dose ist zu diesem Zeitpunkt nach hinten eingebault, der geborstene Teil jedoch nach vorne hin aufgerissen. Zur Verdeutlichung dieses Phänomens wird im Einzelnen später im Kapitel darauf eingegangen. Zur besseren Darstellung sind in Abbildung 4.5 die Umriss- und der Riss, der sich oberhalb des Einschusses eingestellt hat, umrandet worden.

Der Versuchskörper (Dose (B)) ist im Gegensatz zu den anderen vollständig mit Wasser gefüllten Dosen nur oberhalb der Auftreffstelle aufgerissen. Bei den anderen gefüllten Versuchskörpern war jeweils ein annähernd symmetrisches Versagensbild ober- und unterhalb der Auftreffstelle des Projektils zu beobachten.

Die großen Verformungen, die eine Dose während der Belastung erfährt, sind auch auf Abbildung 4.6 a) dargestellt. Beide Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (Abb. 4.6) sind mit einer Aufnahmegeschwindigkeit von 12000 Bildern pro Sekunde aufgenommen worden. Abbildung 4.6 a) zeigt den Versuchskörper Dose (E) einmal vor dem Einschlag des Geschosses und daneben jeweils $\Delta t = 0,083$ ms später.

Auf der Abbildung 4.6 b) ist oben die noch unzerstörte Dose zu erkennen, darunter sind im gleichen zeitlichen Intervall Δt die folgenden Teilbilder aufgetragen. Dose (E) war genau wie Dose (A) vollständig mit Wasser gefüllt. Dose (E) war verschlossen und mit Mineralwasser gefüllt. Durch die darin enthaltene Kohlensäure bestand gegenüber dem Umgebungsdruck ein erhöhter Innendruck in der Getränkedose, was zu einem schnelleren und weiteren Aufreißen der Behältervorderseite nach bereits 0,083 ms führte. Die Teilbilder Abb. 4.6 a) t_2 - t_4 zeigen die Umsetzung von kinetischer und potenzieller Energie durch die Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses und den Innendruck in der Flüssigkeit, in Verformungsarbeit der Behälterschale und aus der Getränkedose herausspritzendem Wasser. Der dunkle Bereich in der Bildmitte der Teilbilder t_2 - t_4 ist gleichbedeutend mit den Risskanten der beiden Behälterseiten.

Teilbild Abb. 4.6 a) t_4 zeigt, dass sich Boden und Deckel der Getränkedose infolge des weit auseinandergerissenen Zylindermantels von den Wiederlagern abhebt. Auf der Abbildung 4.12 ist links die verformte Dose (E) abgebildet.

Beim Versuchskörper Dose (A) zeigt das Teilbild Abb. 4.6 b) t_2 ein lokales Einbeulen im Bereich der Auftreffstelle. Bei diesem Versuch bildet sich nach $\Delta t =$

0,166 ms (Abb. 4.6 b) t_3) ein Riss in longitudinaler Richtung entlang der Dosenvorderseite aus.

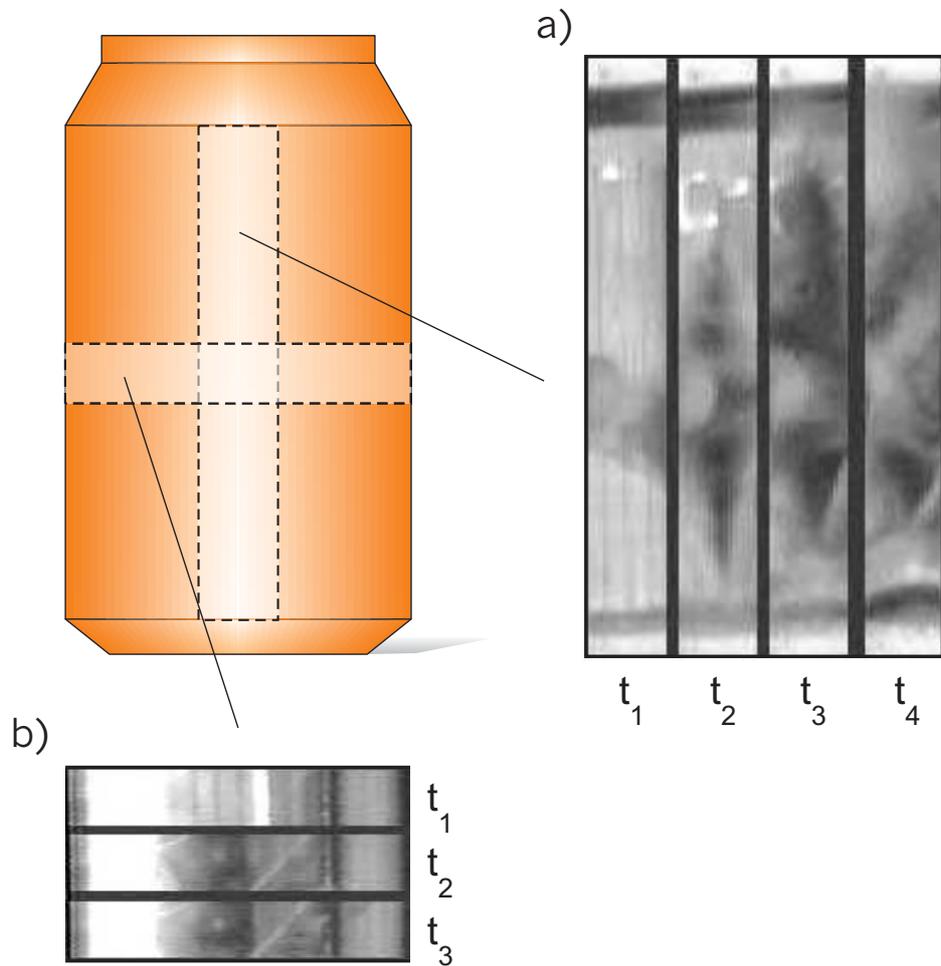


Abb. 4.6 Mit einer Aufnahmegeschwindigkeit von 12000 Bildern pro Sekunde aufgenommene Teilbilder a) Dose (E), b) Dose (A)

4.3 Auswertung der Vorversuche

Die durchgeführte Versuchsserie umfasste die Variation der Parameter Flüssigkeitsfüllstand, Innendruck und Dosengeometrie. Die Dosen zeigten je nach Parameterkombination ein stark unterschiedliches Verhalten im Versuch.

Vergleicht man leere mit flüssigkeitsgefüllten Dosen nach dem Beschuss, so sind diverse Unterschiede zu beobachten.

Bei der Betrachtung der leeren Getränkedosen ist festzustellen, dass die Verformungen durch den Beschuss lediglich unmittelbar an der Einschuss- (Abb. 4.7) und an der Ausschussstelle zu beobachten sind.



Abb. 4.7 Einschussstelle der leeren Dose (12)

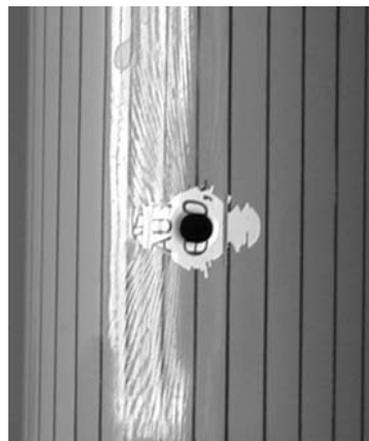


Abb. 4.8 Einschussstelle der vollen Dose (D)

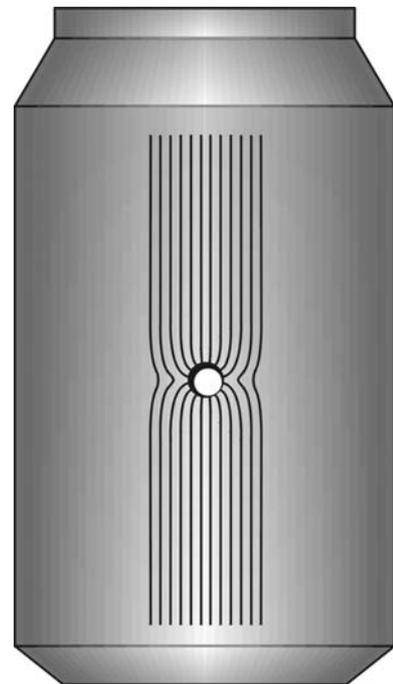


Abb. 4.9 Rissbild im Lack der vollen Dose (D)

Die übrige Behälterschale bleibt wegen der geringen Wandstärke und somit geringen Energieübertragung von dem Geschoss auf die Wandung annähernd unverformt. Die Einschusslöcher bei den leeren Getränkedosen sind rund mit drei oder vier von dem Auftreffpunkt des Projektils ausgehenden Rissen ausgebildet. Dagegen wirken die leicht ovalen Einschusslöcher der jeweiligen Dosen, welche mit Flüssigkeit gefüllt waren, wie ausgestanzt. Wird eine leere Getränkedose mit einem Diabolo

beschossen, so prägt das Geschoss die Wand in Form der Geschosstirnfläche ein (Abb. 4.10 a). Danach wird das die Auftrefffläche umgebende Blech mit dem Geschoss mitgezogen, bis die Zugspannungen an der Diabolospitze so groß werden, dass die Zugfestigkeit des Weißblechs überschritten wird (Abb. 4.10 b). Nachfolgend ist ein Aufreißen der Dosenwandung von der Spitze des Projektils aus die Folge (siehe Abb. 4.10 c).

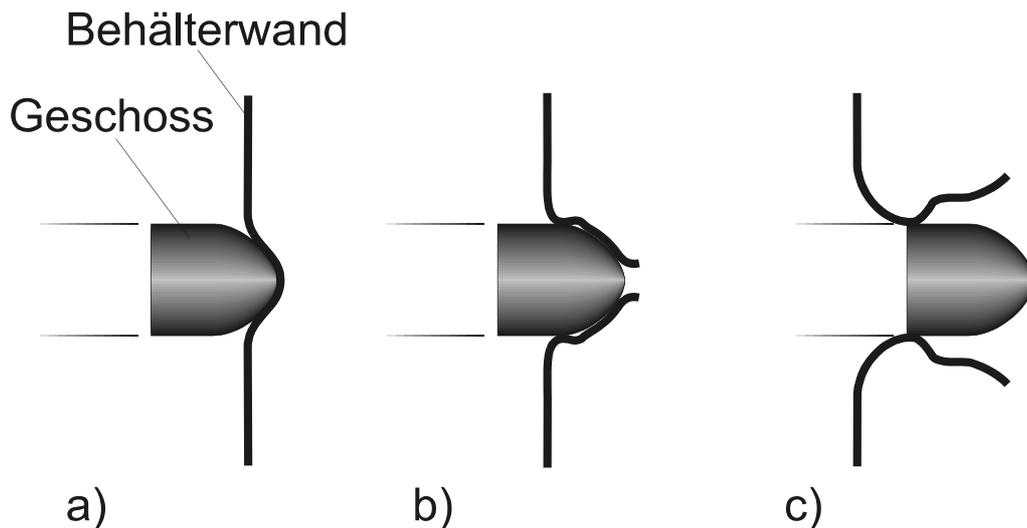


Abb. 4.10 *Ablauf der Eindringphase eines Geschosses in einen leeren Behälter*

Bei den mit Flüssigkeit gefüllten und nach dem Beschuss nicht aufgerissenen Getränkedosen ist ein sehr gleichmäßiges ovales, ausgestanztes Loch an der Auftreffstelle entstanden (Abb. 4.8). Die Verformungen um die Einschussstelle herum sind geringer als bei den leeren Getränkedosen. In dem Farblack, mit dem die Getränkedosen vor dem Versuch eingesprüht wurden, zeigt sich ein deutliches Rissbild. Ausgehend vom Einschuss ist der Lack im unmittelbaren Bereich der Einschussstelle vollständig abgeplatzt, was sich auf die verhältnismäßig großen Dehnungen und Beschleunigungen während der Belastung zurück führen lässt. Die Risse verlaufen ausgehend von dem Einschussloch strahlenförmig nach außen. In einem Abstand von circa einem Zentimeter vom Einschussloch zeigt sich eine Ausrichtung der Risse in Richtung der Behälterachse (siehe auch Abb. 4.9). Bei der Betrachtung des Belastungsablaufes soll der Einfluss der vorlaufenden Stoßwelle, die sich bei den vorgegebenen Parametern sehr viel schneller als das Geschoss bewegt, vorerst vernachlässigt werden. Der Diabolo trifft auf und prägt, wie bei den leeren Getränkedosen, die Stirnfläche des Geschosses in die Dosenwandung ein (Abb. 4.11

b). Erst nach einer gewissen Eindringtiefe des Projektils kommt der Einfluss des Wassers vollständig zum Tragen. Die Membran ist gänzlich durch das Fluid gebettet und muss hinter der Auftreffstelle des Geschosses erst verdrängt werden. Dabei wird, unter Betrachtung der Geschossflugbahn, das Wasser nach hinten, zur Seite und von innen im Bereich des Einschusses gegen die Behälterschale verdrängt (Abb. 3.11 c). Der Membranbereich hinter der Stirnfläche des Geschosses ist, wegen der Massenträgheit des Fluids, sehr viel widerstandsfähiger gebettet, als das bei den leeren Dosen der Fall ist.

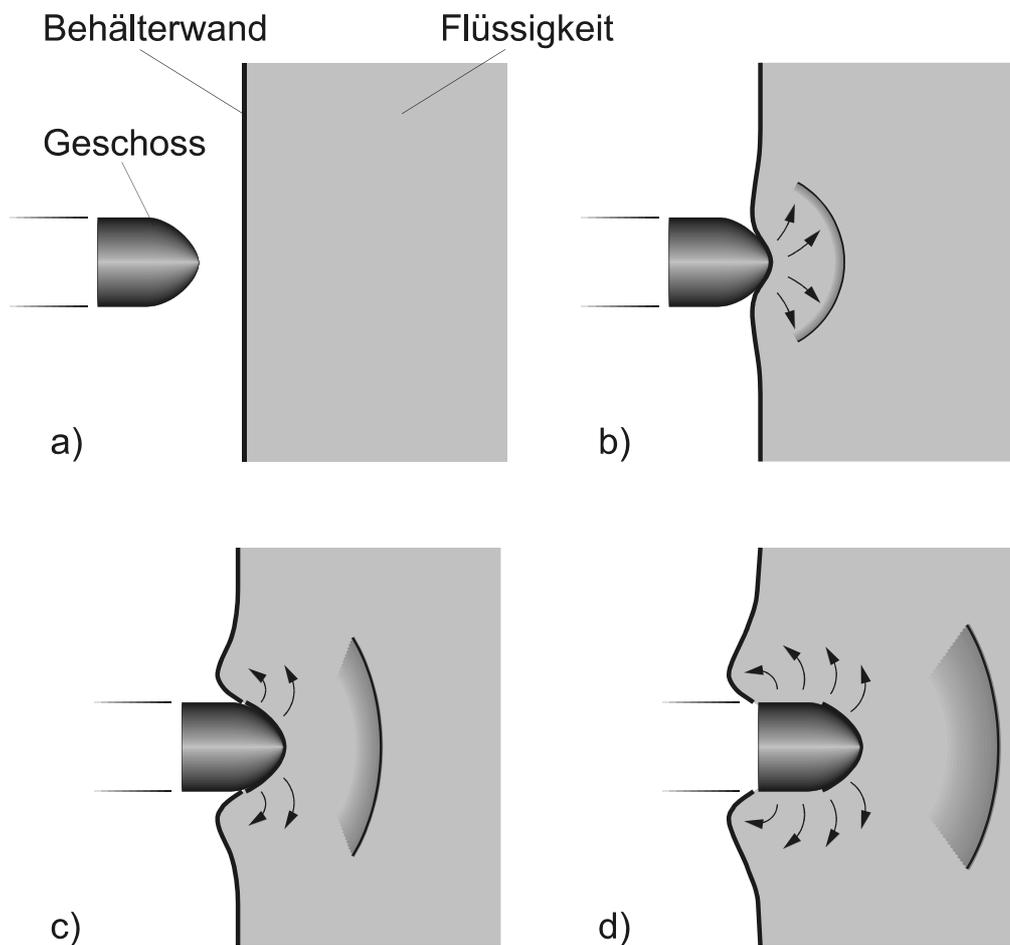


Abb. 4.11 *Ablauf der Eindringphase eines Geschosses in einen mit Flüssigkeit gefüllten Behälter*

Auf Grund der gleichmäßigen Bettung des Projektils tritt ein Überschreiten der Zugfestigkeit an der Kante der Stirnfläche des Geschosses ein. Wegen der Rundung der Dosenwand besitzt die Schnittfläche der Dosenwand, welche durch das Projektil heraus gestanzt wurde, eine ovale Form.

Als nächstes soll der Einfluss von Innendruck auf das Tragverhalten flüssigkeitsgefüllter Getränkedosen untersucht werden.

In Abbildung 4.12 sind drei Getränkedosen zu sehen, die alle vollständig mit Wasser gefüllt waren. Die linke stark deformierte Getränkedose war zum Zeitpunkt des Beschusses ungeöffnet und wurde zusätzlich wegen der im Mineralwasser befindlichen Kohlensäure durch einen statischen Innendruck belastet. Die anderen beiden Dosen waren oben am Verschluss geöffnet und der Originalinhalt durch Leitungswasser ersetzt worden. Alle Getränkedosen wurden mit der gleichen anfänglichen Projektil-Geschwindigkeit beschossen. Die in der Mitte abgebildete Getränkedose ist auf ganzer Höhe des zylindrischen Bereichs aufgerissen. Auf der nicht katastrophal versagten rechten Getränkedose sind in dem Lack feine Risse zu sehen, welche durch die Dehnungen in der Behälterwand zu Stande gekommen sind.



Abb. 4.12 *Vollständig mit Flüssigkeit gefüllte Dosen. Links mit anfänglichen statischen Innendruck (Dose E), in der Mitte (Dose F) und rechts (Dose C) ohne Innendruck*

Man kann so die Hauptspannungsrichtungen, die während der Belastung auf der Vorderseite der Wandung herrschten, im Lack erkennen (siehe auch Abb. 4.9). Auch an der mittleren Getränkedose ist der Lack unmittelbar um die Auftreffstelle des Projektils rund abgeplatzt. Nachdem das geschehen war, ist im Gegensatz zur Getränkedose (C) unmittelbar danach der Versuchskörper (F) aufgerissen.

Der Grund für das unterschiedliche Versagen der Getränkedosen (C) und (F) kann nur in einem geringen Belastungsunterschied oder Imperfektion liegen. Bei den ungleich größeren Verformungen der Getränkedose (E) ist in entscheidendem Maß der anfängliche statische Innendruck mitverantwortlich. Alle (original) verschlossenen Getränkedosen mit einem Innendruck haben ähnlich katastrophal versagt wie Dose (E). Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (Abb. 4.6) zeigen den Unterschied sehr deutlich. Ein Teil der aufnehmbaren Behälterringszugspannungen sind durch den Innendruck bereits ausgelastet und daher kann nur noch eine geringere Spannungsdifferenz bis zum Versagen der Behälterschale ausgenutzt werden. Die eingetragene kinetische Energie reichte bei den Versuchskörpern ohne Innendruck bei sieben von 20 Getränkedosen aus, um die Schale aufzureißen. Bei den Getränkedosen mit Innendruck ist dagegen ein vollständiges Aufreißen der Dosenvorderseite bei allen Dosen erfolgt. Bei den wassergefüllten Getränkedosen war offensichtlich eine Art Verzweigung des Versagens zu erkennen. Es erfolgte entweder ein vollständiges Aufreißen der Behältervorderseite oder eine bis auf die Einschussstelle ungeschädigte Behälterwand als Versagensbild.

Des weiteren soll der Einfluss des Füllstandes auf das Tragverhalten untersucht werden.

Abbildung 4.13 zeigt zwei Getränkedosen, die jeweils zur Hälfte (bis zur Füllstandsmarke) mit Wasser gefüllt wurden. Die Getränkedose (9) links auf dem Bild wurde im Bereich der Flüssigkeit beschossen. Dagegen ist die Dose (8) rechts direkt unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche beschossen worden. Es zeigen sich ähnliche Versagensmuster. Diese wurden offensichtlich durch die in der Getränkedose befindliche Flüssigkeit stark beeinflusst. Steht im Bereich der Aufschlagstelle Flüssigkeit im Behälter an, so führt die Kraftübertragung durch die Flüssigkeit auf die Behälterwand zum Aufreißen derselben. Steht keine Flüssigkeit im Bereich der Aufschlagstelle an, so tritt außer dem scharf begrenzten Ein- und Ausschussloch keine weitere Verformung der Behältervorderseite auf. Die Flüssigkeit hat eine so große Massenträgheit, dass die Überdeckung der Aufschlagstelle des Projektils mit Flüssigkeit für die Druckentwicklung in dem Wasser ab einer bestimmten Überdeckung nicht mehr von Bedeutung ist.



Abb. 4.13 *Zur Hälfte mit Flüssigkeit gefüllte Dosen. Links erfolgte der Beschuss unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche (Getränkedose (9)) und rechts auf der Höhe der Flüssigkeitsoberfläche (Getränkedose (8))*

Der Energieübertrag von dem Geschoss auf das Wasser erfolgt offensichtlich so schnell, dass die Belastungsinformation noch nicht an die “Randbedingungen” der Flüssigkeit (Füllhöhe) weitergegeben werden konnte, und somit für die mit Wasser gefüllten Bereiche der teilweise gefüllten Dosen zumindest ähnliche Belastungs- und Reaktionsabläufe, wie für die vollständig mit Flüssigkeit gefüllten gelten.

Abbildung 4.14 zeigt zwei verschiedene Füllstände in zwei Behältern zu zwei verschiedenen Zeitpunkten nach der Belastung durch das Projektil. Zum Zeitpunkt a (1a und 2a) ist die Stoßwelle, die sich mit der Wellengeschwindigkeit im Wasser ausbreitet, bis an die Flüssigkeitsoberfläche des Wassers bei dem Teilbild 4.14 1a) gelangt. Im Fall 2a) findet die Ausbreitung der Stoßwelle in gleicher Weise statt. Bis zu diesem Zeitpunkt ist somit die Reaktion auf die Stoßwelle identisch. Erst ab Zeitpunkt b (1b und 2b) mit dem Erreichen der Stoßwelle an der Flüssigkeitsoberfläche im Fall 1b) verändern sich die Belastungsabläufe der Fälle 1 und 2. Bis dahin ist allerdings schon ein Großteil der Energie von dem Projektil auf das Fluid übertragen worden und so reißt die untere Hälfte der Dosenwand ähnlich wie bei einer vollständig gefüllten Getränkedose auf.

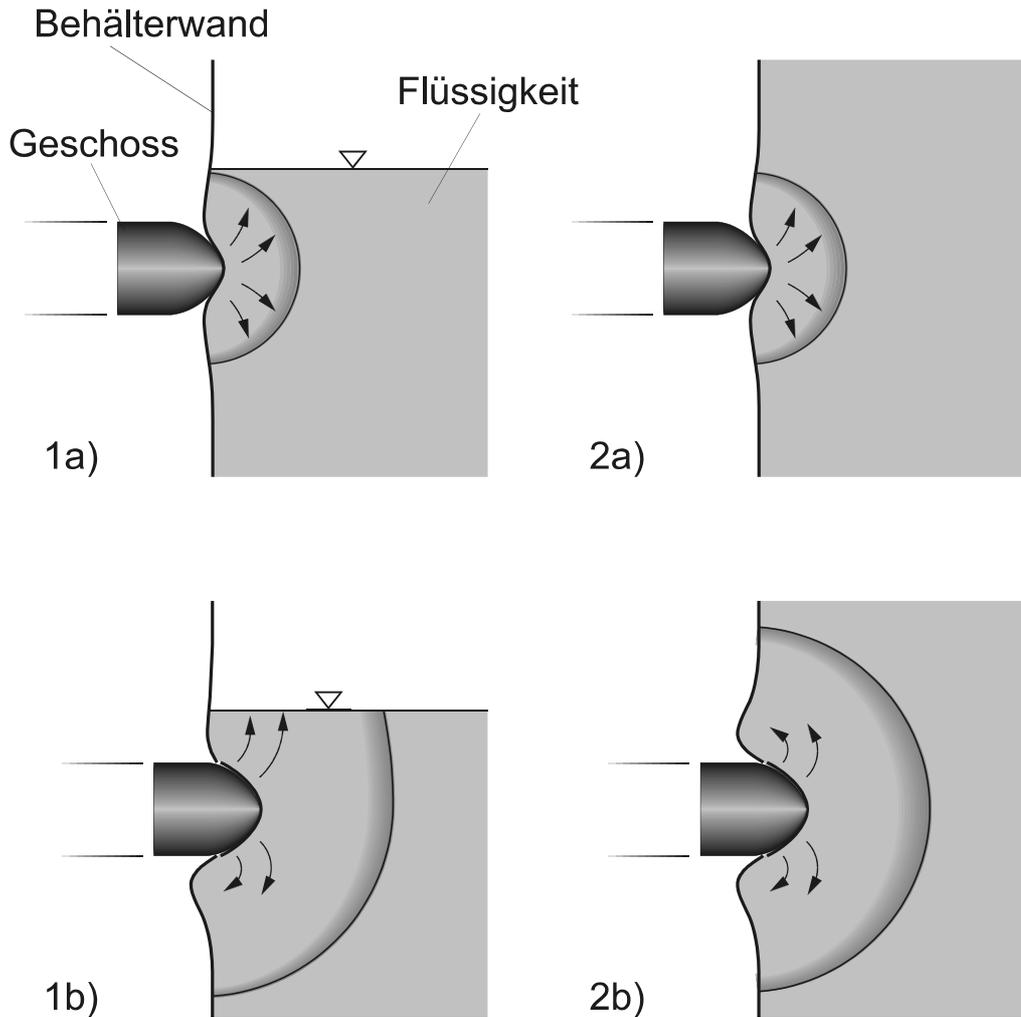


Abb. 4.14 *Reaktionsabläufe in Abhängigkeit von der Füllhöhe der Flüssigkeit*

Es wurde auch eine halbgefüllte Getränkedose oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche beschossen. Das Versagensbild dieser Getränkedose (10) ist im Grunde identisch mit einer gänzlich leeren Getränkedose (vergleiche Abb. 4.7). Die Flüssigkeit in der Dose spielte bei der Versagensart keine Rolle.

Der Einfluss der Behältergeometrie auf das Tragverhalten wurde durch Variation des Verhältnisses von Behälterhöhe zu Durchmesser (h/d) untersucht. Das h/d -Verhältnis der 330 ml Getränkedosen beträgt $h/d = 1,81$. Für die 500 ml Getränkedosen beträgt das Verhältnis $h/d = 2,65$.



Abb. 4.15 *Vollständig mit Wasser gefüllte und offene 0,5 Liter Geträndedose (M)*

Die 500 ml Geträndedosen haben auf die gleiche Art versagt wie die 330 ml Geträndedosen (siehe Abb. 4.15). So sind die 500 ml Geträndedosen auf einer ähnlich langen Risslänge aufgerissen wie die kleineren 330 ml Geträndedosen. Allerdings war der Riss bei den kleineren Geträndedosen durch den Deckel und Boden begrenzt worden. Bei den höheren 500 ml Geträndedosen endete der Riss vor dem Erreichen von Boden oder Deckel. Der Druck, der durch das eindringende Projektil in der Flüssigkeit aufgebaut wird, ist nicht ausreichend hoch, um den Versuchskörper auf einer größeren Länge aufzureißen und zu verformen.

Als letztes wurden noch zwei Geträndedosen mit Dehnmessstreifen beklebt. Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen werden folgend vorgestellt.

Abbildung 4.16 zeigt die Vorder- und Rückansicht der vor dem Beschuss mit Wasser gefüllten Versuchskörper (II). Der Versuchskörper wurde mit fünf auf der

Vorderseite über die Höhe der Getränkedose äquidistant verteilten Dehnmessstreifen (DMS) versehen. Die Rückseite wurde mit einem Dehnmessstreifen auf der halben Höhe der Getränkedose versehen. Die DMS sind so angeordnet, dass ausschließlich die Ringdehnungen in der Behälterwand gemessen wurden. Abbildung 4.17 zeigt die gemessenen Ringdehnungen über die Versuchsdauer.



Abb. 4.16 *Vorder- und Rückansicht der Dose II nach dem Beschuss*

Die Daten wurden durch einen Transienten-Rekorder (TRA-800; W+W Elektronik) mit einer Aufnahmefrequenz von 40 ns aufgenommen.

Auf der Vorderseite erfolgte die Numerierung der Dehnmessstreifen von oben nach unten DMS-1 bis DMS-5 und auf der Rückseite, an der Ausschussstelle des Diabolo, ist der Dehnmessstreifen DMS-6 angebracht worden. Der Einschuss erfolgte leicht oberhalb des Dehnmessstreifens DMS-3. Aus diesem Grund verlaufen die Dehnungskurven der Dehnmessstreifen DMS-2 und -4 geringfügig phasenverschoben.

Betrachtet man die Dehnungsmessungen in Abbildung 4.17, so ist zu sehen, dass der Dehnmessstreifen DMS-3 als erster der Dehnmessstreifen, direkt nachdem er von dem Geschoss getroffen wurde, zerreißt. Nachfolgend tritt eine kurze

elektromagnetische Störung auf. Diese Störung betrifft alle DMS, auch den DMS-6, der auf der Versuchskörperrückseite liegt. Der anschließende Druck (negative Werte) in der Behälterschale bei den DMS-2 und -4 ist auf das lokale Einbeulen der Behälterwand um den Einschussbereich herum zu erklären (vergleiche auch Abb. 4.6 b t₂). Die Dosenvorderseite wird nun kontinuierlich nach hinten eingebault. Bei den DMS-2 und DMS-4 kommt es um den Zeitbereich 0,08-0,1 ms zu schnellen Zugdehnungszuwächsen, welche auf die sich an der Dosenrückseite reflektierten Stoßwelle im Wassers zurückführen lassen. Die Stoßwelle im Wasser benötigt in dem Behälter, um sich mit Schallgeschwindigkeit von der Vorder- zur Rückseite und wieder zurück zu bewegen, rechnerisch 0,085 Millisekunden, was gut mit den Messungen übereinstimmt. Zum Zeitpunkt 0,13 ms respektive 0,16 ms fallen die Dehnmessstreifen DMS-2 respektive DMS-4 infolge des Durchlaufs des Risses aus (siehe Abb. 4.17 Bereich δT_1). Auf der Dosenrückseite (DMS-6) bauen sich kontinuierlich immer größere Zugspannungen in der Behälterwand auf, was sich mit den Behälterverformungen begründen lässt. Der Riss, der sich auf der Vorderseite kontinuierlich, jetzt allerdings mit einer erheblich geringeren Rissgeschwindigkeit, weiter nach oben und unten ausbreitet, läuft auf den DMS-1 und DMS-5 zu. In dem Zeitbereich von 0,18 ms bis 0,20 ms ist bei den DMS-1 und DMS-5 ein Maximum zu sehen. Auch hierbei handelt es sich um die nun zum zweiten Mal reflektierte Stoßwelle in der Flüssigkeit. Beachtet man, dass die Strecke, welche die Stoßwelle zurücklegen muss, auf Grund der geometrischen Anordnung der Dehnmessstreifen sich ein wenig verlängert, ist es auch nicht verwunderlich, dass die Peaks sich erst bei ungefähr 0,19 ms anstatt bei 0,17 ms ausbilden. Ein drittes Mal ist die reflektierte Welle an der Dosenvorderseite, jedoch deutlich abgeschwächt, bei dem Zeitbereich 0,26 ms bis 0,27 ms zu erkennen. Der Druck des Wassers auf die Behälterrückwand (Zugspannungen in der Schale) nimmt nun kontinuierlich ab (DMS-6), da sich die Gesamtbewegungen und Verformungen nun umgekehrt haben. Die Dosenvorder- und Rückseite bewegen sich nach vorn. Die Behältervorderseite schlägt durch und daher wechseln auch die DMS-1 und DMS-5 die Vorzeichen. Dieser Zeitbereich ist auf der Hochgeschwindigkeitsaufnahme Abbildung 4.5 zu sehen. Dort ist die Getränkedose leicht nach hinten “durchgebogen” und an der Vorderseite annähernd bis zu der Stelle, an welcher der Dehnmessstreifen DMS-1 befestigt worden ist, aufgerissen.

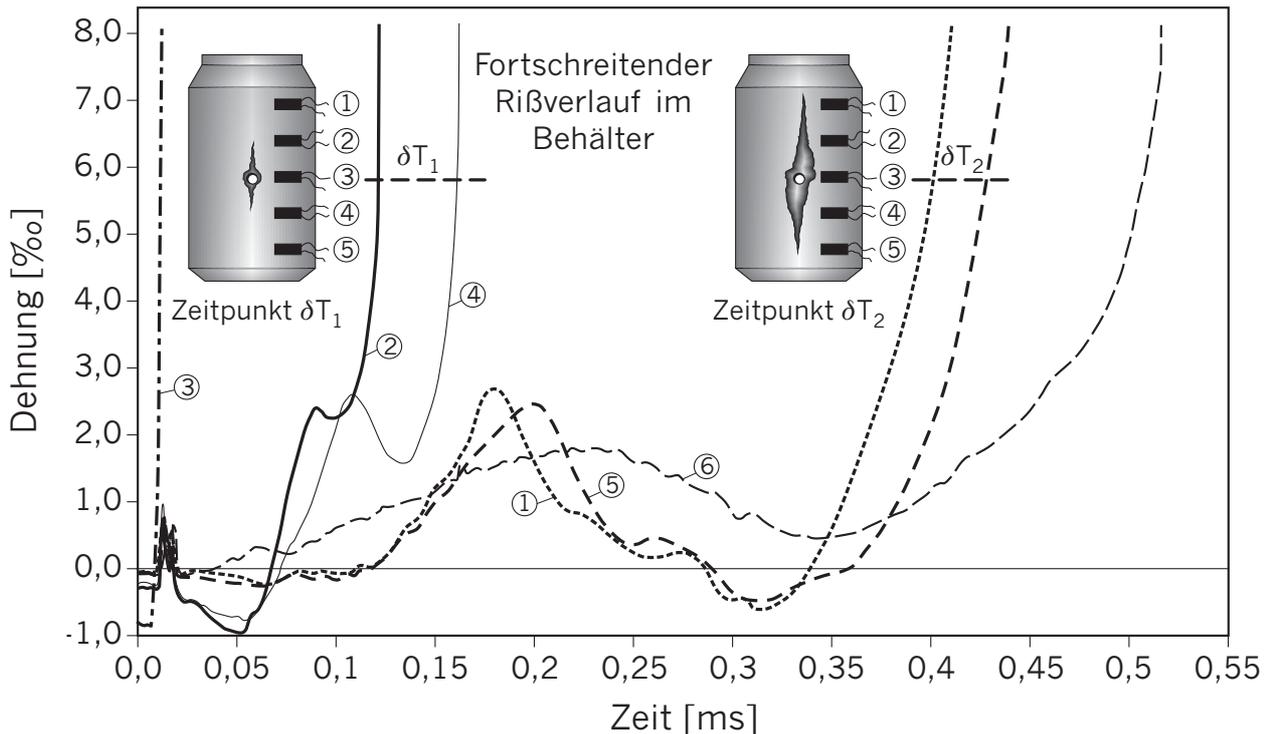


Abb. 4.17 DMS-Messungen bei dem Versuch Getränkedose (II)

Die Beschleunigung der Flüssigkeit nach vorne reicht zu diesem Zeitpunkt aus, um den Riss weiter anwachsen zu lassen und die Dehnmessstreifen DMS-1 und DMS-5 zu durchtrennen (siehe Abb. 4.17 Bereich δT_2). Als Letztes steigt die Dehnung in dem DMS-6 stetig an. Um das Geschoss bildet sich, während der gesamten Durchdringung des Fluids, ein Druckkegel in dem Wasser aus, der von 0,4 ms an auf Grund der Annäherung des Projektils an die Behälterrückwand an der Ausbreitung behindert wird und somit zu einem Spannungsanstieg in der Behälterrückwand führt. Schließlich wird die Rückwand durch den Diabolo perforiert. Der ganze Versuchsablauf hatte eine Dauer von 0,52 ms. Zur Verdeutlichung der Abläufe, die zu dem Versagen des Versuchskörpers führen, sei auf das beschriebene Behälterstoß-Phänomen im Kapitel 3 Abbildung 3.1 verwiesen.

Die Wellengeschwindigkeit in der Flüssigkeit ist mit 1485 m/s ungefähr acht mal so groß wie die anfängliche Projektilgeschwindigkeit. Daher kann die Druckwelle in der Flüssigkeit vier mal von der Vorder- zur Rückseite des Behälters reflektiert werden, bevor das Projektil die Behälterrückseite perforiert.

5 Eigene Hauptexperimente

Die in den Voruntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse wurden bei der Wahl der Behältergeometrie auf die Impact-Geschwindigkeit der Hauptexperimente abgestimmt.

5.1 Durchgeführte Versuche

Es wurden sieben, abgesehen von der Wanddicke, geometrisch gleiche kreiszylindrische Behälter beschossen. Die Wanddicke wurde bei den Behältern zwischen 0,6 mm, 0,8 mm und 1,0 mm variiert (siehe Tabelle 5.1). Der Zylinder hatte eine Höhe von 600 mm und einen Durchmesser von 300 mm. Die Zylinderschale wurde aus einem Flachblech gerollt und verschweißt. Auch Boden und Deckel wurden mit der Zylinderschale verschweißt.

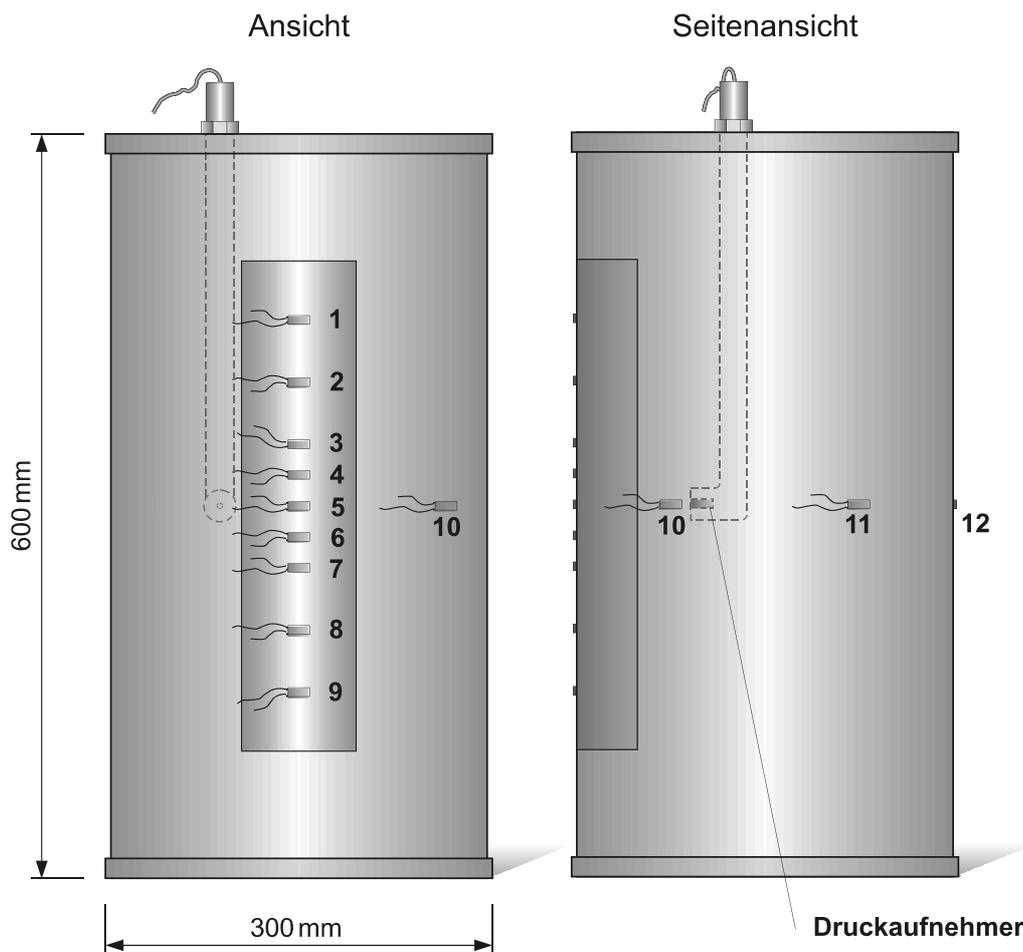


Abb. 5.1 Anordnung der Dehnmessstreifen und des Druckaufnehmers bei den mit Wasser gefüllten Behältern

Eine zentrische Öffnung im Deckel von 100 mm Durchmesser ermöglichte die Montage eines Druckaufnehmers und das Befüllen des Behälters mit Wasser. Der Behälter wurde auf einen Sandsack gestellt und zusätzlich oben und unten mit Hilfe von je einem Drahtseil an dem oberen und unteren Widerlager fixiert (Abb. 5.2).

Auf sechs der sieben Behälter sind Dehnmessstreifen aufgeklebt worden. Die Anordnung der Dehnmessstreifen kann der Abbildung 5.1 entnommen werden. Der Beschuss erfolgte auf den Dehnmessstreifen 5 (siehe Abb. 5.1). Bei den Bereichen, an denen große Dehnungen erwartet wurden, wie beispielsweise unmittelbar ober und unterhalb des Einschusses (DMS 3/4/6/7) und auf der Behälterrückseite an der Ausschussstelle (DMS-12), wurden Hoch-Dehnmessstreifen angebracht. Diese Hoch-Dehnmessstreifen konnten 20% Dehnung bis zum Versagen aufnehmen. Der Messbereich wurde am Transienten-Recorder von -5% bis +15% Dehnung eingestellt. Die übrigen DMS sind normale Dehnmessstreifen, die einen Messbereich zwischen $\pm 4\%$ Dehnung hatten.

Ver- suchskörp- er	Behälterwa- nddicke [mm]	Füllstand mit Wasser	v_0 in [m/s]	Geschoss	Druckaufneh- mer im Wasser
Beh.0	1,0	voll / leer	384 / 380	K.O.	-
Beh.1	1,0	voll	394	Brenneke	vorhanden
Beh.2	1,0	voll	396	Brenneke	vorhanden
Beh.3	0,8	voll	421	Brenneke	vorhanden
Beh.4	0,6	voll	420	Brenneke	vorhanden
Beh.5	1,0	voll	721	Brenneke	-
Beh.6	1,0	leer	733	Brenneke	-

Tab. 5.1 Durchgeführte Versuche an Stahlbehältern mit einer Höhe von 600 mm und einem Durchmesser von 300 mm

Mit den für die Behälter verwendeten Stählen wurden zu jeder Wandstärke Zugversuche durchgeführt, um Materialkennwerte zu bestimmen. Um den Druck in dem Wasser während der Belastung ermitteln zu können, ist bei vier von den sieben

Behältern auf Höhe der Schussachse ein Quarzkristall Druckaufnehmer eingebaut worden.

Beschossen wurden die Behälter mit zweierlei Flintenlaufgeschossen. Der Behälter Beh.0 wurde mit einem 28 g schweren KO-Flintenlaufgeschoss (Abb. 5.3) beschossen. Die Behälter Beh.1 bis Beh.4 wurden mit einem 31 g schweren Brenneke-Flintenlaufgeschoss (Abb. 5.4) und Behälter Beh.5 und Beh.6, die am Ernst-Mach-Institut (EMI) beaufschlagt wurden, mit einem leicht modifizierten Brenneke-Flintenlaufgeschoss beschossen (Abb. 5.5).

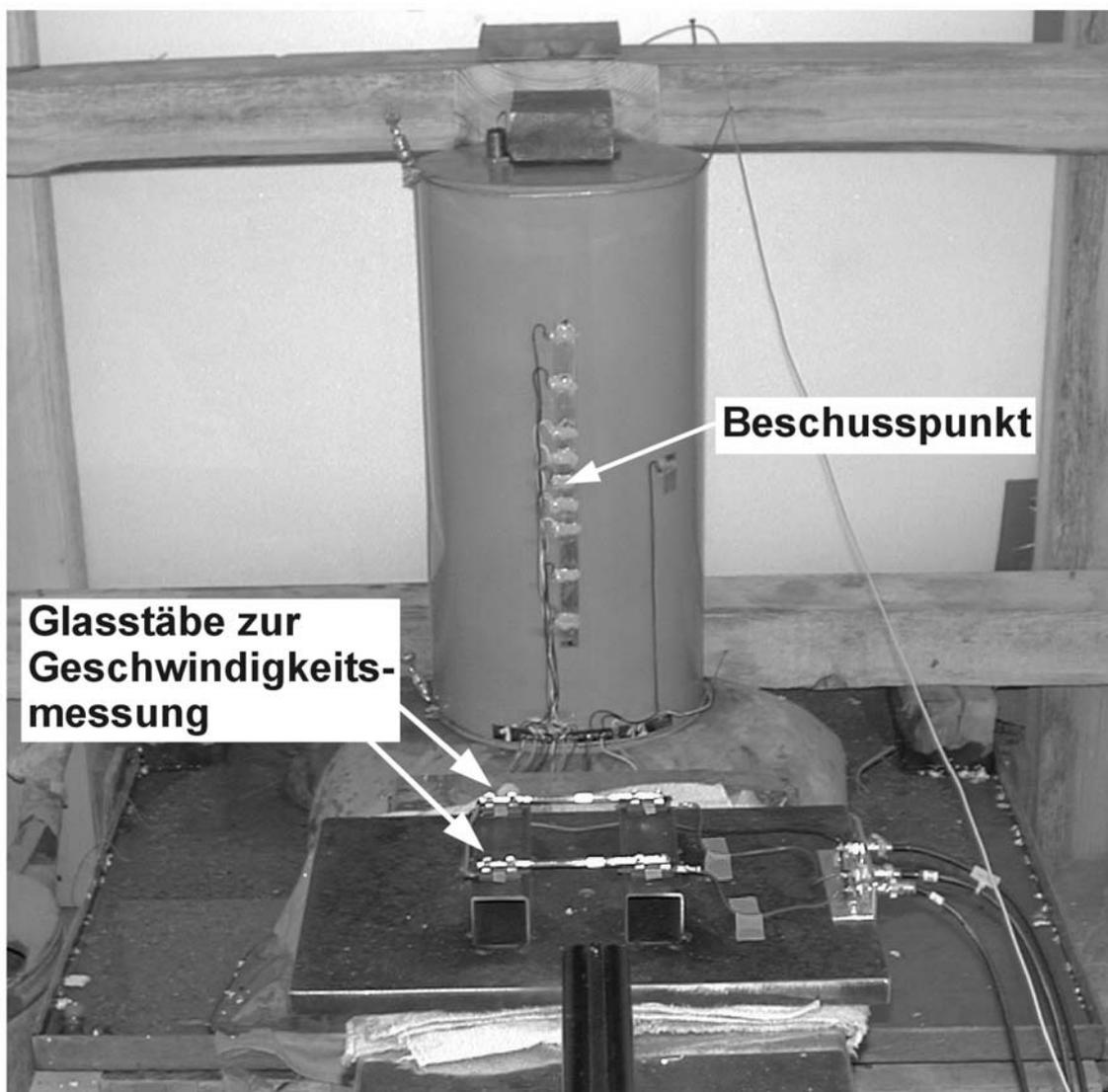


Abb. 5.2 Versuchsaufbau am Inst. f. Massivbau. Hier Behälter Beh.3 vor dem Beschuss

Die Flintenlaufgeschosse sind im Aufbau zweigeteilt, sie bestehen aus einem vorderem Teil aus Blei und einem hinteren Teil aus Kunststoff oder Filz. Der hintere Teil dichtet das Geschoss gegen den Lauf ab, um ein Entweichen der Verbrennungsgase zu verhindern. Am EMI sind von den Behältern zusätzlich zu den Dehnungsmessungen auch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen während des Beschlusses aufgenommen worden.

Die Behälter wurden, um einen besseren Kontrast zum Hintergrund zu bilden, mit orangefarbenen Lack besprüht.

Abbildung 5.2 zeigt den Versuchsstand für den Behälterbeschuss. Im Vordergrund sieht man den Lauf der Flinte, dahinter die Glasstäbe zur Ermittlung der Geschossgeschwindigkeit und im Hintergrund den mit Dehnmessstreifen beklebten Behälter (Beh.3) vor dem Beschuss.



Abb. 5.3 *KO-Flintenlaufgeschoss nach dem Beschuss eines leeren Behälters, eines vollen Behälters und undeformiert*

Abbildung 5.3 zeigt das KO-Flintenlaufgeschoss mit dem der Behälter Beh.0 beschossen wurde. Rechts ist das Projektil vor dem Beschuss abgebildet. In der Mitte sieht man das Geschoss nach dem Beschuss des mit Wasser gefüllten Behälters und links daneben nach dem Beschuss des leeren Behälters. Die hochgradige Deformation des linken Geschosses liegt nicht an dem Widerstand der

Behälterstruktur, sondern an dem dahinter liegenden Kugelfang der aus mehreren Sandsäcken bestand. Aus diesem Grund kann keine genaue Aussage getroffen werden, wie das Geschoss nach dem Beschuss aussah. Der Deformationsgrad läßt aber darauf schließen, dass die Restgeschwindigkeit nach der Perforation der Behälterrückseite noch erheblich war.



Abb. 5.4 Brenneke-Flintenlaufgeschoss nach Beschuss eines leeren Behälters, eines vollen Behälters und undeformiert

Abbildung 5.4 zeigt rechts das Brenneke-Flintenlaufgeschoss mit dem die Behälter Beh.1 bis Beh.4 beaufschlagt wurden. In der Mitte des Bildes ist das deformierte Projektil nach dem Beschuss von Beh.2 zu sehen und links daneben wiederum das vollständig deformierte Geschoss nach dem Beschuss des leeren Behälters. In Abbildung 5.5 sieht man rechts das Brenneke-Flintenlaufgeschoss, das nicht mehr einen Filz- sondern einen Plastikteil zum Abdichten des Laufes besitzt. Dieser wurde erforderlich, da zum Beschuss des Behälters Beh.5 und Beh.6 am EMI eine 20 mm Lafette zur Verfügung stand, die Projektile jedoch für einen 18 mm Innendurchmesser Lauf ausgelegt waren. Daher hat der Plastikteil auch einen um 2 mm größeren Durchmesser als das Geschoss. Links neben dem Geschoss ist ein deformiertes Behälterplättchen zu sehen, das bei dem leeren Versuchskörper Beh.6 durch das Projektil ausgestanzt wurde.



Abb. 5.5 Beim EMI verwendetes Geschoss (Fragmente und undeformiert)

Links daneben ist der Rest des Projektils zu sehen, welches auf den mit Wasser gefüllten Versuchskörper Beh.5 geschossen wurde, und ganz links auf dem Bild sind die auf Grund des hohen Aufschlagdrucks geschmolzenen übrigen Teile des Projektils zu sehen, die nach dem Versuch im Behälterinneren gefunden wurden.

5.2 Das Material der Behälter

Die Zylinderschale bestand aus Stahl unterschiedlicher Wandstärke. Zu jeder Wandstärke (0,6/ 0,8/ 1,0 mm) wurden an Hand von Proben mehrere Zugversuche

Behälterwandstärke	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A_{gt} [%]	A [%]	E-Modul [N/mm ²]
1,0 mm	150	321	24	31	199330
0,8 mm	160	303	24	36	213330
0,6 mm	265	341	23	31	203840

Tab. 5.2 Materialkennwerte der verschiedenen Behälterstähle

durchgeführt. In Abbildung 5.6 sind die Auswertungen der Zugversuche von jeweils einer Behälterwandstärke abgebildet. Außer bei dem Material der 0,6 mm starken Behälterwand ist bei den anderen Behälterstählen (0,8mm/ 1,0mm) kein ausgebildeter Fließbereich vorhanden.

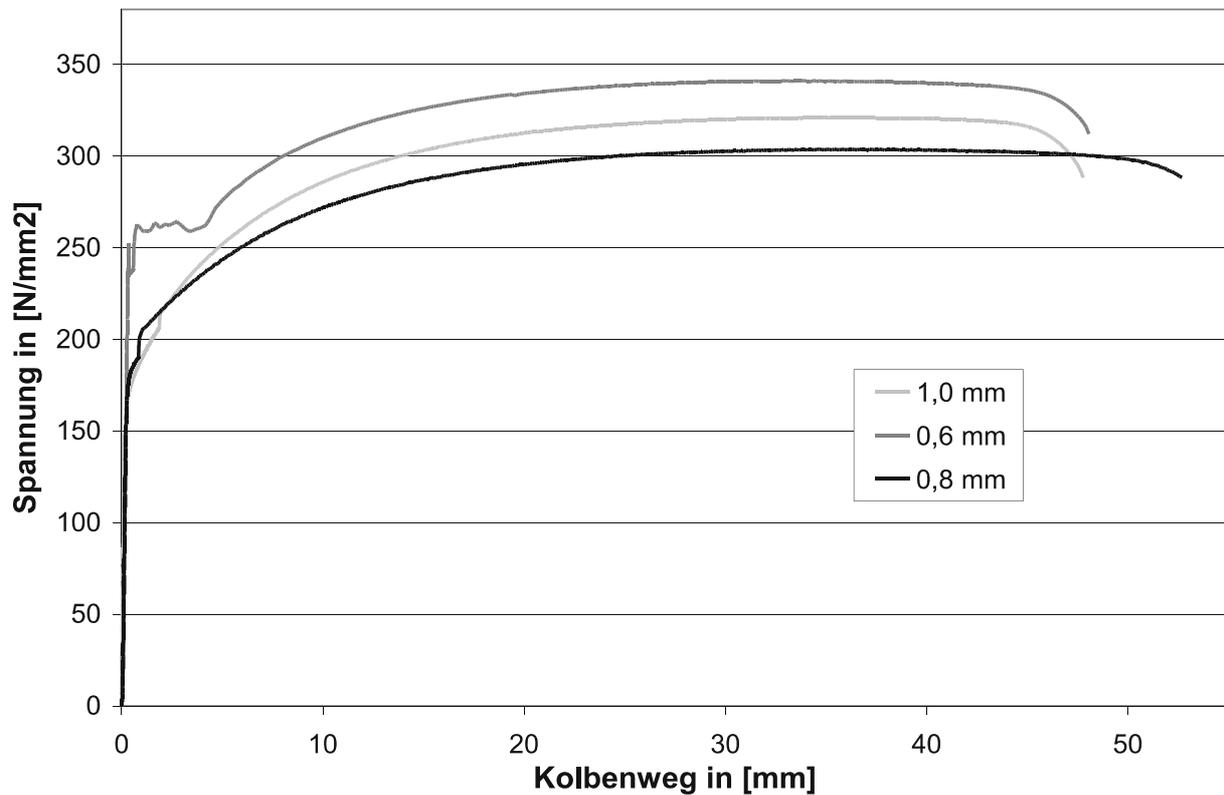


Abb. 5.6 Auswertung der Zugversuche für die verschiedenen Behälterwandstärken

Die Berechnungen nach DIN 50125 und EN 10002 ergaben die in Tabelle 5.2 angegebenen Materialkennwerte für die drei verschiedenen Behälterwandstärken. Die Zugfestigkeit aller Stähle lag zwischen 300 und 350 N/mm². Das Material verhielt sich äußerst duktil.

5.3 Geschwindigkeitsmessung

Die Auftreffgeschwindigkeit des Projektils konnte bei den Behälterversuchen nicht mit Hilfe einer Laser-Lichtschranke ermittelt werden, weil die Erschütterungen durch den Schuss und die austretenden Verbrennungsgase keine genaue Messung zuließen. Die Schwierigkeit bestand darin, dass die Laser-Lichtschranke vom Durchmesser her einen sehr kleinen Lichtstrahl aussendet, der mittels Spiegel exakt reflektiert werden

muss, um eine aussagekräftige Messung zu gewährleisten. Je weiter man nun Laser und Spiegel von einander entfernt, um den Einfluss der Druckwelle gering zu halten, umso störanfälliger wird die Konstruktion und umso schwieriger wird es zudem, den Lichtstrahl mit dem Projektil zu treffen. Daher kamen zwei dünne Glasstäbe, die auf der Geschossflugbahn liegend von dem Projektil zerstört wurden, zum Einsatz. Auf der von der Flugbahn des Projektils abgewendeten Seite sind die Glasstäbe mit Silberleitlack bestrichen worden. Wird der Glasstab zerbrochen, unterbricht das den anliegenden Stromkreis und gibt so das Signal für die Geschwindigkeitsmessung an den Transienten-Recorder weiter.

Die Glasstäbe waren so spröde, dass eine Beeinflussung der Geschossflugbahn ausgeschlossen werden konnte. Dieses Prinzip ermöglichte eine sehr zuverlässige Geschwindigkeitsmessung.

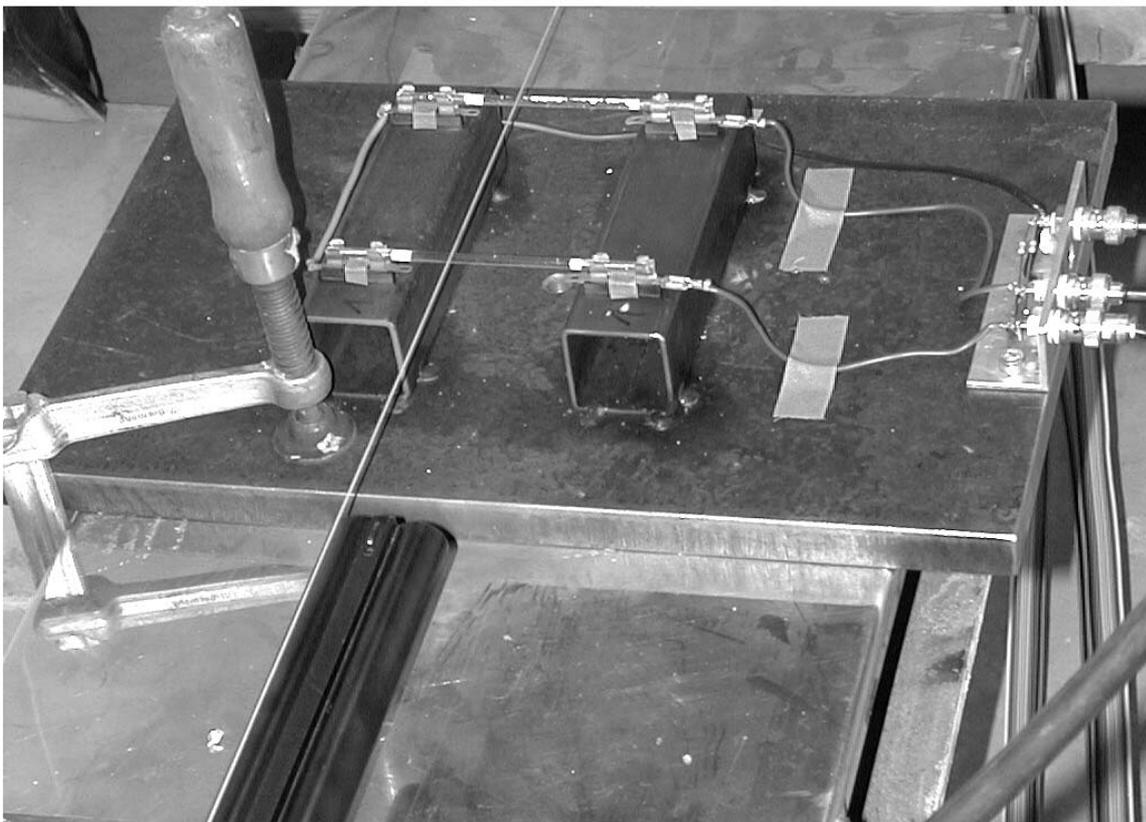


Abb. 5.7 Versuchsaufbau zur Bestimmung der Geschossgeschwindigkeit

Abbildung 5.7 zeigt den Versuchsaufbau mit den zwei Glasstäben zur Bestimmung der Geschossgeschwindigkeit. Im Vordergrund ist die Mündung des Gewehrlaufes und darüber eine zur Visierung dienende Schnur zu sehen.

5.4 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Es wurden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen während des Beschusses der Behälter Beh.5 und Beh.6 am EMI mit Hilfe einer CCD-IMACON Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Aufgrund der Konstruktion der Kamera sind acht Einzelbilder mit verschiedenen Belichtungszeiten möglich. Die Triggerung der Kamera erfolgte mit zwei Aluminiumfolien und einem dazwischen liegenden Zellophanpapier (siehe Abbildung 5.8). Die beiden Aluminiumfolien sind an eine Stromquelle angeschlossen worden, was bei einer Durchdringung durch das Projektil zu einem Trigger-Impuls für die Kamera führte.

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sind, wenn man Abbildung 5.9 betrachtet, von links aufgenommen worden, wo die CCD-IMACON durch eine Glasscheibe geschützt stand.

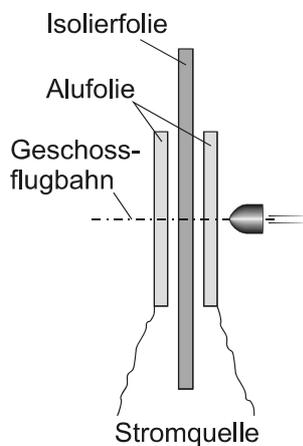


Abb. 5.8 *Trigger-Mechanismus*

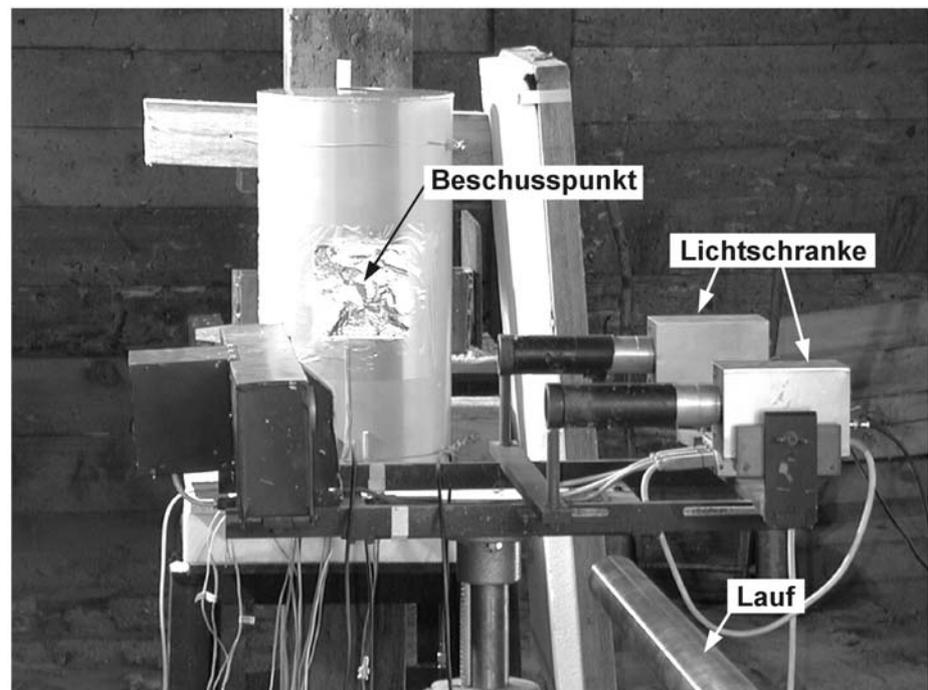


Abb. 5.9 *Versuchsaufbau für den Behälterbeschuss am Ernst-Mach-Institut Efringen-Kirchen*

Da der Versuchsstand, um kürzere Belichtungszeiten für die Kamera zu erhalten, mit drei Halogenscheinwerfern ausgeleuchtet wurde, bewirkte das eine unbeabsichtigte Reflexion durch die Aluminiumfolie (siehe Abbildung 5.10). Ebenso konnte der unter den Folien liegende Auftreffpunkt der Geschosse während der Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskamera nicht eingesehen werden. Der genaue Perforationszeitpunkt der Rückwand wurde an Hand der Dehnmessstreifen mit 0,44 ms nach dem Auftreffen des Projektils auf den Behälter bestimmt (Abb. 5.16). Für den zweiten der beiden Versuche wurde daher die Größe der Aluminiumfolien erheblich verringert, was eine bessere Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen durch die geringere Reflexion und die bessere Einsicht auf die Behältervorderseite ermöglichte.

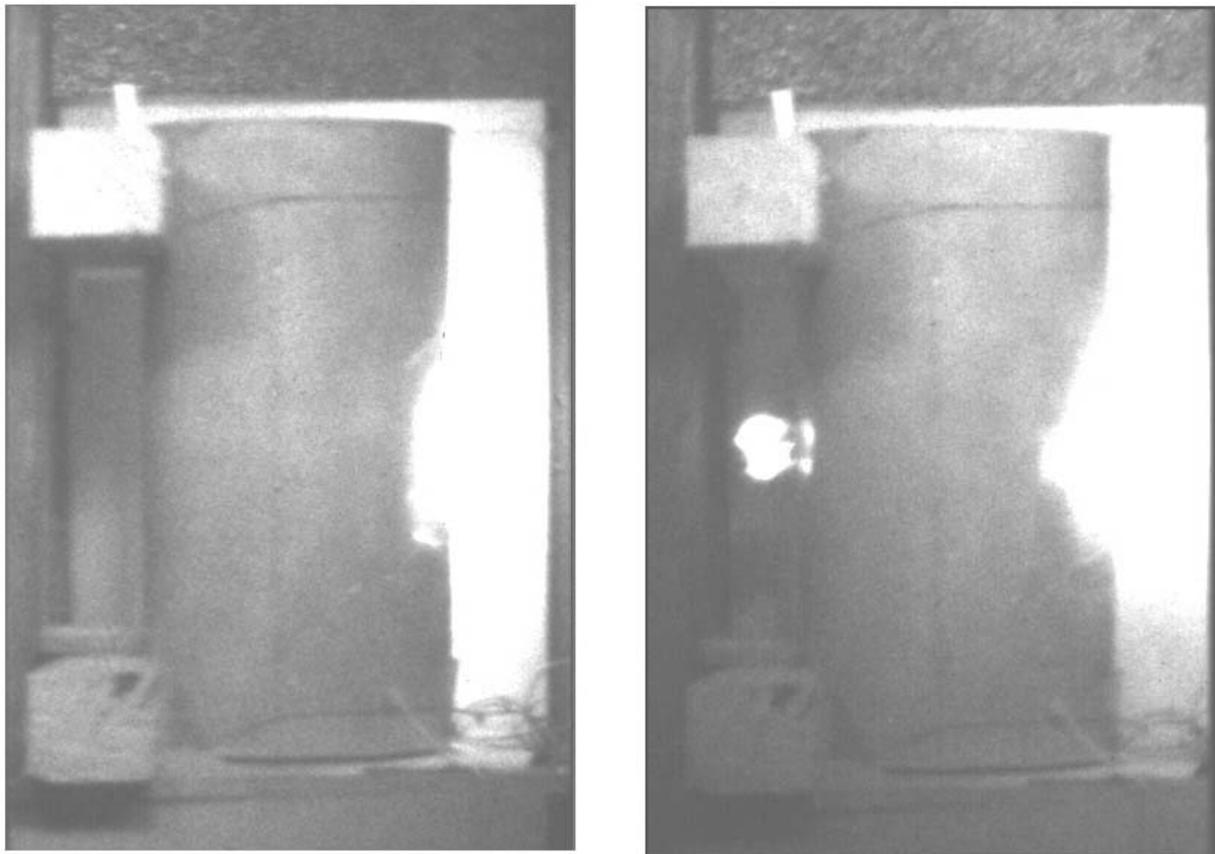


Abb. 5.10 *Hochgeschwindigkeitsbilder des leeren Versuchskörpers Beh.6; links $t_1=0,05$ ms und rechts $t_2=0,5$ ms nach dem Auftreffen des Projektils auf die Behälterwand*

Abbildung 5.9 zeigt den Aufbau der Versuche für die Behälter Beh.5 und Beh.6 beim EMI in Efringen-Kirchen. Im Vordergrund sieht man das Rohr der 20 mm Lafette,

dahinter die Lichtschranke zur Bestimmung der Geschossesgeschwindigkeit und im Hintergrund den Behälter Beh.6 mit den Aluminiumfolien zur Triggerung der Hochgeschwindigkeitskamera. Nicht zu sehen sind die hinter der Aluminiumfolie auf den Behälter geklebten fünf Dehnmessstreifen.

Abbildung 5.10 zeigt zwei Hochgeschwindigkeitsbilder des leeren Versuchskörpers Beh.6, links 0,050 ms und rechts daneben 0,500 ms nach dem Auftreffen des Projektils auf die Behältervorderseite. Die Schussachse verläuft im rechten Winkel zur Bildebene. Der Beschuss erfolgte von der rechten Seite. Bei dem rechten Bild (nach 0,500 ms aufgenommen) ist zu sehen, wie ein Stück der Behälterrückseite durch das Projektil herausgeschossen wird und auf Grund der Halogenstrahler stark reflektiert.

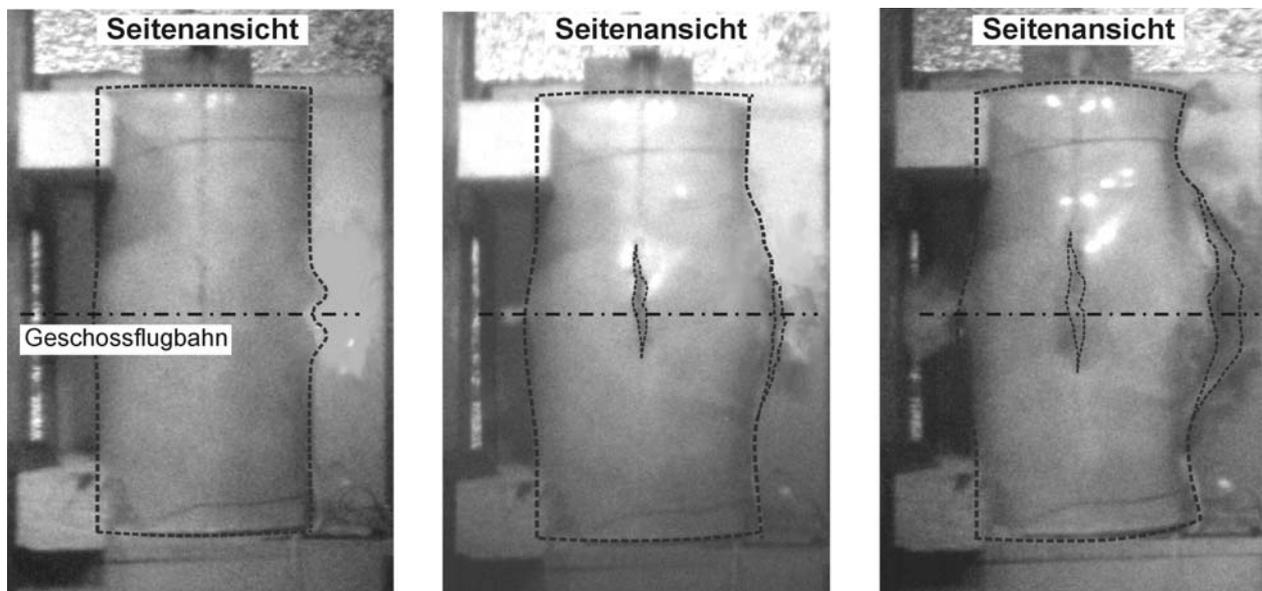


Abb. 5.11 Hochgeschwindigkeitsbilder von dem Versuchskörper Beh.5. Links $t_1 = 0,5$ ms, in der Mitte $t_2 = 1,0$ ms und rechts $t_3 = 2,0$ ms nach dem Beschuss. Die Behälterumrisse sind zum besseren Erkennen gestrichelt nachgezogen worden

Das erste Bild in Abbildung 5.11 zeigt den Behälter Beh.5 0,5 ms nach dem Aufschlagen des Geschosses. Die Behältervorderseite um den Einschussbereich ist zu diesem Zeitpunkt aufgerissen und die Behälterrückseite ist auf halber Höhe leicht nach außen gedehnt. Nach einer Millisekunde (mittleres Bild, Abb. 5.11) ist der Behälter in dem Bereich der Ausbeulung auf der Vorderseite aufgerissen und das Wasser spritzt aus dem Behälter heraus. Die Schweißnaht der Behälterschale, mittig auf dem Bild zu sehen, ist ebenfalls auf einer Länge von annähernd 10 cm aufgerissen und die Behälterrückwand dehnt sich immer stärker nach außen. Auf dem

rechten Bild (Abb. 5.11), zwei Millisekunden nach dem Beschuss, hat der Behälter seine endgültige Verformung angenommen.

Die Vorderseite ist auf einer Höhe von 44 cm aufgerissen und stark nach außen ausgebeult (siehe auch Abb. 5.37). Die Risslänge in der Schweißnaht ist auf eine Länge von 21 cm angewachsen und auf der Rückseite des Behälters ist das aus dem Ausschuss austretende Wasser zu sehen. Die Dehnungsmessungen ergaben einen Austrittszeitpunkt nach dem Auftreffen des Geschosses auf die Behältervorderseite nach $\Delta t = 1,48$ ms. Bei den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sind die Konturen des mit Wasser gefüllten Behälters Beh.5 zum besseren Erkennen nachträglich mit einer gestrichelten Linie nachgezogen worden.

5.5 Druckmessungen in der Flüssigkeit

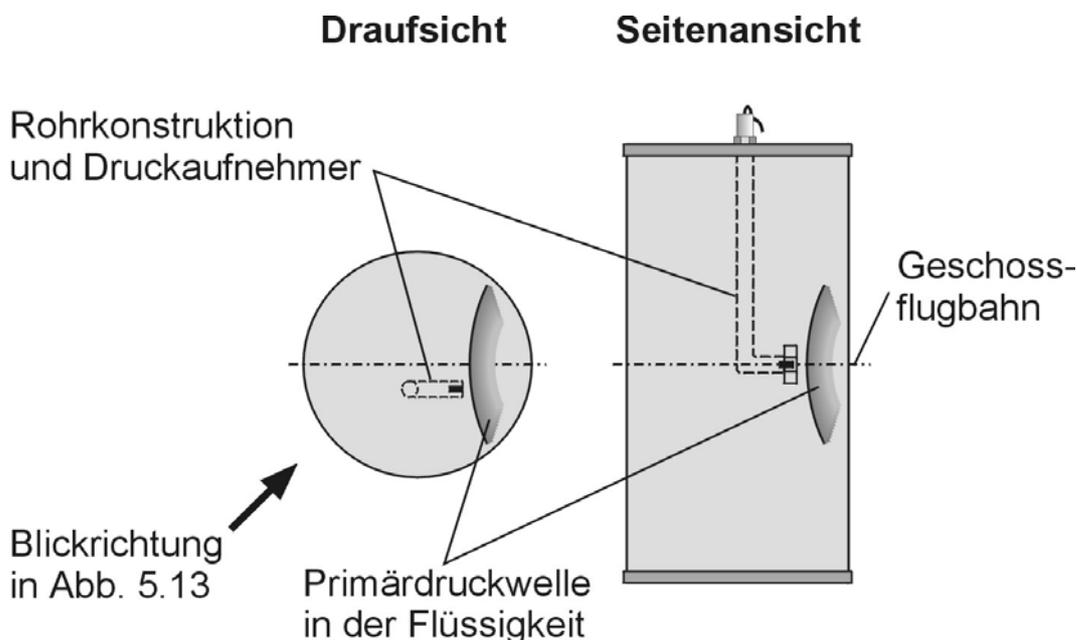


Abb. 5.12 Anordnung des Druckaufnehmers

Mit einem Quarzkristall-Druckaufnehmer der Marke Kistler Typ 603B wurden bei den Versuchen Beh.1 - 4 die Drücke in dem Wasser gemessen (siehe Tab. 5.1). Um zu vermeiden, dass der Aufnehmer durch das Geschoss getroffen wird, ist die Lage des Aufnehmers 5 cm nach innen in den Behälter und um 5 cm seitlich von der Geschossflugbahnachse versetzt worden (siehe auch Abb. 5.12). Der Vorteil dieses Druckaufnehmers ist, dass er für Druckschwankungen hoher Frequenz bzw. kurzer Anstiegszeit ausgelegt ist. Es steht ein Messbereich von Vakuum bis 200 bar zur Verfügung. Der zu messende Druck wirkt über eine Membrane auf das Quarzkristall-

Messelement, das den Druck in ein elektrisches Signal umwandelt. Dieses hat allerdings den Nachteil, dass der Druckaufnehmer nicht auf hydrostatische Drücke ausgelegt ist. Bei dem Versuch Beh.5 musste auf den Druckaufnehmer verzichtet werden, da Drücke oberhalb des Messbereichs zu erwarten waren, die den Aufnehmer wahrscheinlich zerstört hätten.



Abb. 5.13 *Druckaufnehmer und Einschuss des Behälters nach dem Versuch Beh.4 durch die aufgerissene Schweißnaht aufgenommen*

Abbildung 5.12 zeigt die Anordnung des Druckaufnehmers in dem Behälterinneren, der einen Abstand von 7,0 cm von der Auftreffstelle des Projektils auf die Behältervorderseite hatte. Abbildung 5.13 zeigt die Lage des Druckaufnehmers, aufgenommen durch den Riss von der Schweißnaht in der Behälterwand, nach dem Beschuss des Behälters Beh.4. Ebenfalls zeigt die Abbildung 5.13 die Rückseite des Einschusslochs an der Behältervorderseite und die Rohrkonstruktion, in welcher der Druckaufnehmer eingebaut wurde.

5.6 Auswertung der Versuche

Vier unterschiedliche Parameterstudien wurden durchgeführt. Zunächst wurde das Tragverhalten eines leeren Behälters unter Beschuss mit zwei unterschiedlichen Geschossgeschwindigkeiten und gleicher Behälterwanddicke untersucht. Weiter wurde bei den mit Wasser gefüllten Behältern der Einfluss der Behälterwanddicke und als nächstes der Einfluss der Impact-Geschwindigkeit untersucht. In allen Fällen wurden die unterschiedlichen Reaktionsverhalten von gefüllten und leeren Behältern, welche die gleiche Behälterwandstärke und Impact-Geschwindigkeit aufwiesen, verglichen.

5.6.1 Beschuss von leeren Behältern

Die Abbildung 5.14 zeigt den Bereich der Einschussstelle des leeren Behälters Beh.6. Die fünf auf der Vorderseite angebrachten DMS sind ebenso wie die Pulverreste des Treibsatzes, die sich in den Lack eingebrannt haben, deutlich zu erkennen. Bei den Auswertungen der Messergebnisse sind die Störungen der hinter dem Geschoss auftreffenden Pulverwolke in Abbildung 5.16 zu sehen. Der Behälter Beh.6 ist mit einer Impact-Geschwindigkeit von 733 m/s beschossen worden. Die Verformungen an der Einschussstelle des Projektils sind, wegen der weit oberhalb der ballistischen Grenze liegenden Geschwindigkeit, nur sehr gering. Dieser Sachverhalt wird durch die Untersuchungen von anderen Autoren [9,16,21,43] bestätigt.

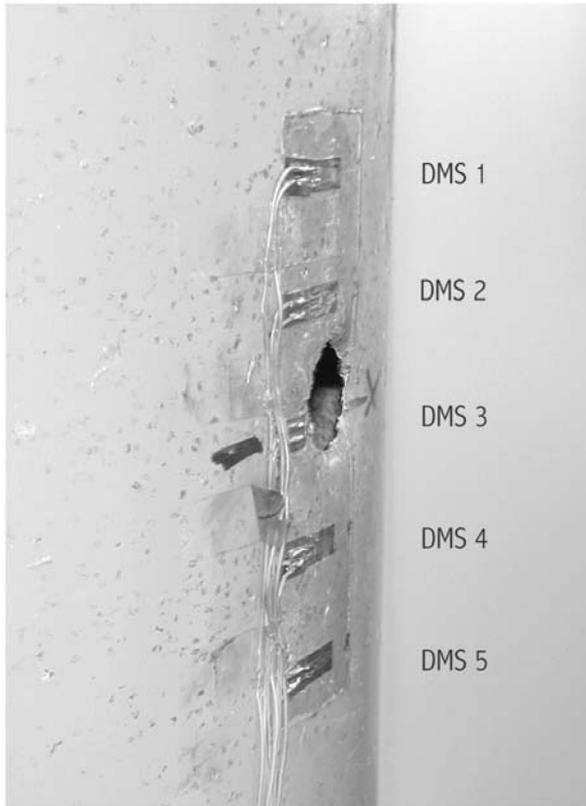


Abb. 5.14 *Einschuss an der Behältervorderseite und Dehn-messstreifen 1-5 des leeren Behälters Beh.6*

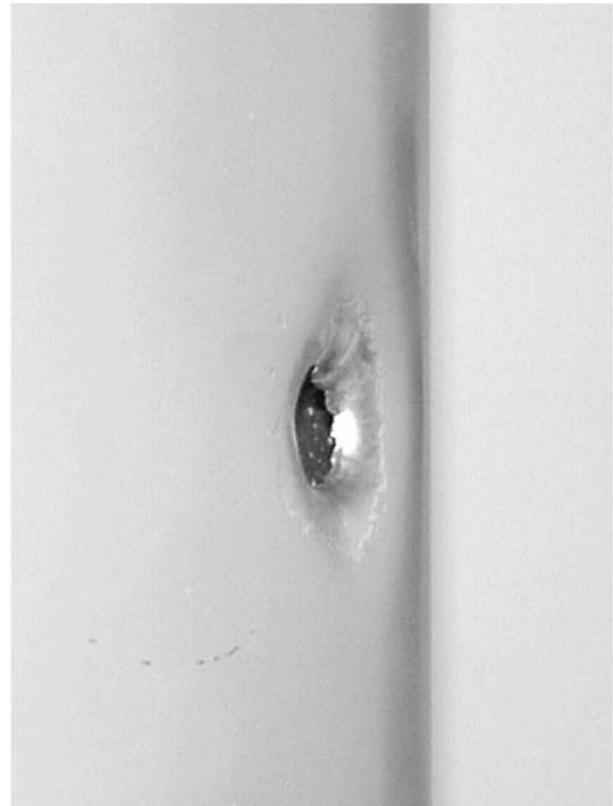


Abb. 5.15 *Einschuss an der Behältervorderseite des leeren Behälters Beh.0*

Die Behältervorderseite ist um den Einschuss herum um 3 mm nach innen eingebault. An der Einschusskante sind auf Grund der hohen Geschwindigkeit Bleireste zu erkennen, die mit der Behälterwand verschmolzen sind.

Abbildung 5.15 zeigt den Einschussbereich des Behälters Beh.0. Hier ist die Vorderseite um 14 mm bei dem Auftreffpunkt eingebault worden. Das ist mit der geringeren Impact-Geschwindigkeit von 380 m/s , die näher an der ballistischen Grenze liegt, zu begründen. Die Einschussradien der beiden Behälter sind mit 21 mm identisch. Es hat sich in beiden Fällen ein kreisförmiges Einschussloch ausgebildet.

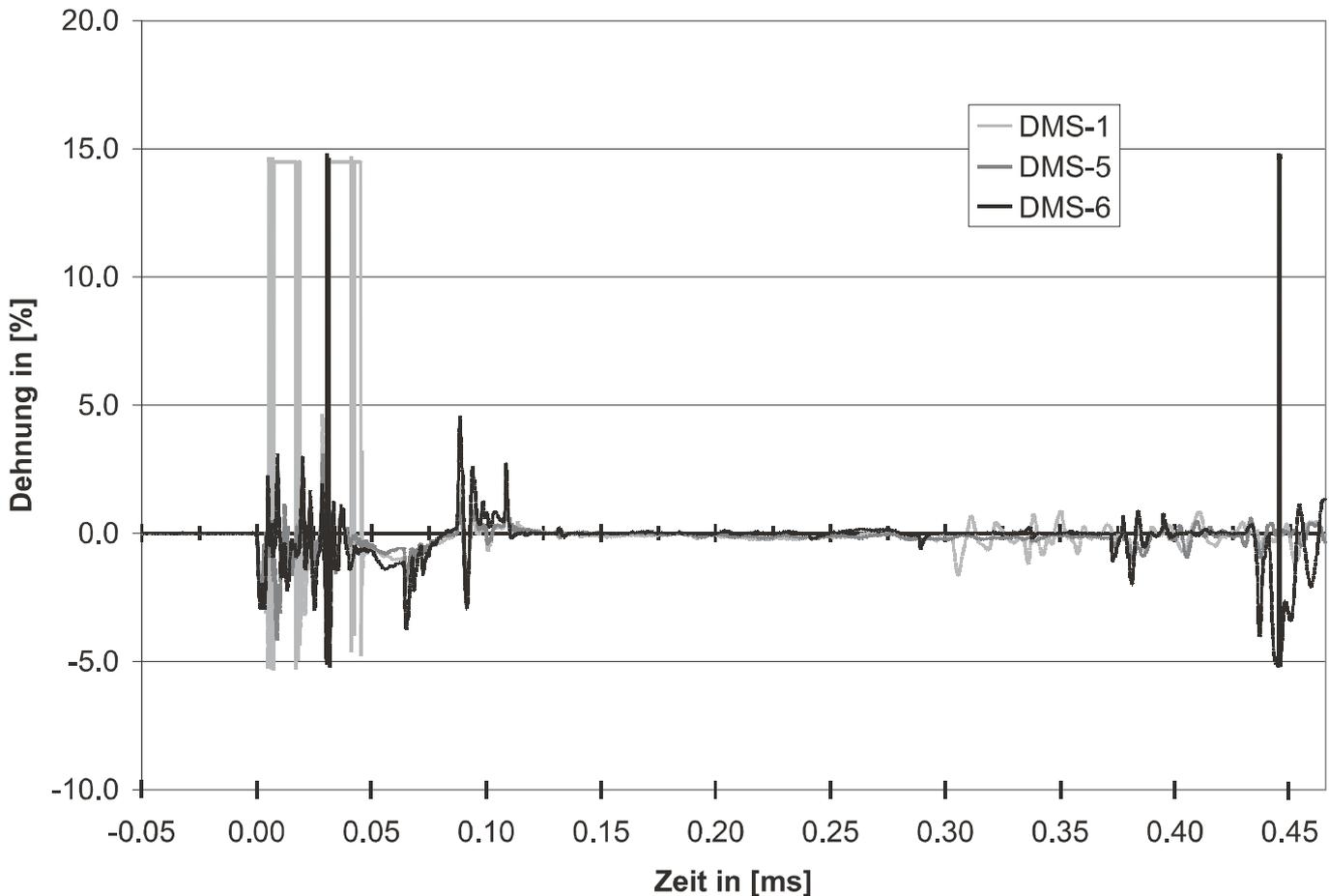


Abb. 5.16 DMS-Messungen (DMS 1/5/6) am leeren Behälter Beh.6

Die Dehnungen die in Abbildung 5.16 über die Zeit abgetragen sind, stammen von dem Versuch Beh.6, bei dem ein leerer Behälter mit 1,0 mm Wandstärke und einer Impact-Geschwindigkeit von $v_0 = 733 \text{ m/s}$ beschossen wurde. Die anfänglich sehr starken Ausschläge bei den Messungen des DMS-1 (hellgrau) sind auf die Pullvergaswolke und Verbrennungsrückstände des Treibsatzes zurückzuführen (siehe auch Abb. 5.14). Die Dehnmessstreifen DMS-2 und -4 sind durch Pulverrückstände so stark beschädigt worden, dass sie nicht in die Grafik (Abb. 5.16) aufgenommen wurden. Der DMS-5 (dunkelgrau) ist unbeschädigt und hat während der ersten 0,05 ms nach dem Beschuss sehr viel geringere Ausschläge der Messwerte als DMS-1 (hellgrau). Dehnmessstreifen DMS-6 (schwarz) ist auf der Behälterrückseite, auf Höhe des Ausschusses, aufgeklebt worden. Nach 0,436 ms gibt es einen starken Ausschlag der Messwerte, der zum Versagen des Dehnmessstreifen führt. Das ist der Zeitpunkt, zu dem der Behälter auf der Rückseite anfängt zu perforieren, was auch die Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bestätigen (Abb. 5.10).

Aus der Impact-Geschwindigkeit (v_0) des Projektils und der Zeitspanne Δt vom Einschuss bis zum Ausschuss, lässt sich die an der Eintrittsstelle dissipierte Energie

wie folgt bestimmen:

$$E_0 = \frac{1}{2} m v_0^2 \quad (5.1)$$

E_0 = Anfangsenergie des Geschosses (Kinetische Energie) vor dem Aufschlag

m = Masse des Projektils

v_0 = Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses vor dem Aufschlag

Da das Projektil während des Fluges durch den Behälter ($s = 30$ cm) außer dem Luftwiderstand keinen weiteren Einflüssen unterworfen ist und die Abnahme der Geschwindigkeit auf Grund des Luftwiderstandes auf 30 cm zu vernachlässigen ist, errechnet sich die Geschwindigkeit des Geschosses innerhalb des Behälters zu:

$$v_1 = \frac{s}{\Delta t} = \frac{0,3m}{0,000436 s} = 688 \frac{m}{s} \quad (5.2)$$

Somit ergibt sich die Energiedifferenz (ΔE) von der Anfangsenergie (E_0) zur Energie während des Fluges im Behälterinneren (E_1) zu:

$$\Delta E = E_0 - E_1 = \frac{m}{2} (v_0^2 - v_1^2) = \frac{0,031}{2} (733^2 - 688^2) = 991,0 J \quad (5.3)$$

Es werden also 991,0 J der kinetischen Energie bei der Durchdringung der vorderen Behälterwand in Form von Verformungen und Wärme dissipiert. Die Energie ΔE ist jedoch keine feste Größe, sondern von verschiedenen Faktoren wie z.B. Strain-Rate Effekt und Reaktion der gesamten Konstruktion abhängig. Allerdings unterscheiden sich Anfangsgeschwindigkeit und die Geschwindigkeit während des Fluges in dem Behälterinneren nur geringfügig, so dass eine ähnliche Energiedissipation bei der Perforation der Behälterrückseite erwartet werden kann. Es wird daher erwartet, dass die Austrittsgeschwindigkeit des Geschosses aus dem Behälter ungefähr 640 m/s beträgt (vgl. auch Tabelle 7.2).

5.6.2 Beschuss von flüssigkeitsgefüllten Behältern

Die Versuche mit den wassergefüllten Behältern wurden in zwei Untersuchungsreihen durchgeführt. In der einen Untersuchungsreihe wurde die Behälterwanddicke verändert und die übrigen Parameter konstant gehalten und in der

anderen Untersuchungsreihe wurden die Impact-Geschwindigkeiten verändert.

Zunächst werden die Ergebnisse dargestellt, die sich aus der Variation der Behälterwanddicke ergaben.

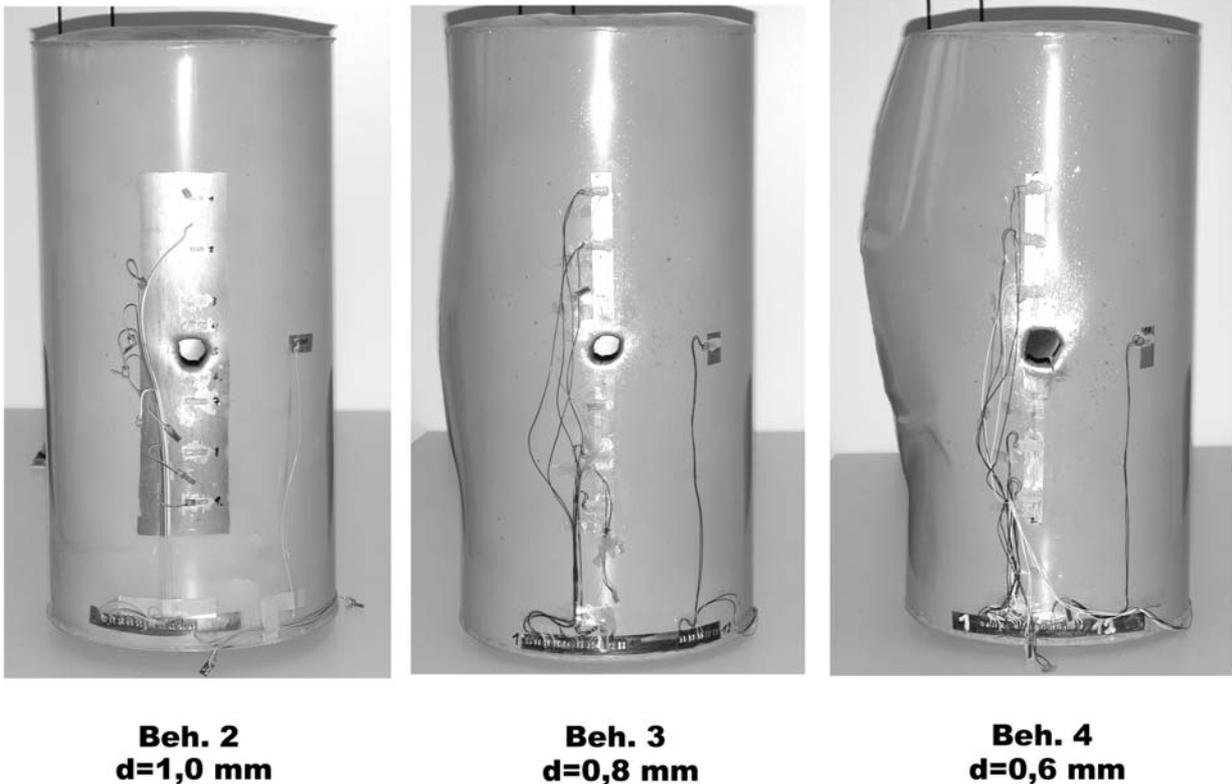


Abb. 5.17 Vorderansicht der Behälter Beh.2, 3, und 4 nach dem Beschuss mit einer durchschnittlichen Impact-Geschwindigkeit von 408 m/s

Abbildung 5.17 zeigt Behälter Beh.2 (1,0 mm Wandstärke), Beh.3 (0,8 mm Wandstärke) und Beh.4 (0,6 mm Wandstärke) nach dem Beschuss. Die Behälter wurden mit einer durchschnittlichen Impact-Geschwindigkeit von 408 m/s beschossen (siehe auch Tab. 5.1). Auf der Abbildung ist die Vorderansicht der beschossenen Behälterwand dargestellt.

Der Behälter Beh.2 (1,0 mm Wandstärke) ist bis auf den Ein- und Ausschussbereich nahezu unverformt. Der Umstand, dass auf der Vorderseite fast alle Dehnmessstreifen abgerissen sind, zeigt, dass sich die Behältervorderseite um den Einschussbereich erheblich gedehnt haben muss. Das bestätigen auch die Messergebnisse. Die Dehnmessstreifen, die dem Einschuss am nächsten waren (DMS 3 bis 7), sind bereits unmittelbar nach dem Beschuss auf Grund von Zugdehnungen

über 15% teils zerstört worden und teils lösten sie sich von der Behälterwandung, weil der auf diese DMS abgestimmte Kleber, mit dem die DMS befestigt waren, bei so hohen Dehnungen nicht mehr haftete.



Abb. 5.18 *Behälterrückseite von Beh.4 mit dem Ausschuss des Projektils und der rechts und links nach innen eingedrückten Behälterwand*

Beim Behälter Beh.3 (0,8 mm Wandstärke) sind stärkere Verformungen zu beobachten. Die an der linken Seite liegende Schweißnaht der Behälterwand ist auf einer Länge von 28 cm aufgerissen. Die Schweißnaht ist bei der Versuchsdurchführung rechtwinklig zur Schussachse angeordnet worden, da dort ausgehend von den Vorversuchen mit den geringsten Belastungen und Verformungen gerechnet werden konnte. Für die Dehnmessstreifen wurde ein dehnfähigerer Kleber als zuvor verwendet, doch auch hier haben sich die DMS ober- und unterhalb des Einschusses auf Grund der sehr großen Dehnungen abgelöst.

Der Behälter Beh.4 (0,6 mm Wandstärke) hat in dieser Versuchsreihe die größten Dehnungen erfahren. Die Schweißnaht Der Behälterwand ist auf 46 cm der Behälterhöhe aufgerissen. Der Bereich um den Einschuss hat sich großflächig nach außen gedehnt (gegen die Beschussrichtung) und es haben sich die ersten Risse vom Einschussloch ausgehend gebildet. Auf der Rückseite ist die Behälterwand um den Ausschuss nach innen eingedrückt (siehe Abb. 5.18). Dieses Phänomen ist auch bei einigen der aufgerissenen Getränkedosen aus den Tastversuchen beobachtet worden. Wenn die Getränkedosen auf der Vorderseite aufrissen, verlor die Konstruktion ein Teil ihrer Formstabilität und dadurch wurde ein Einbeulen der Dosenrückseite hin zum Dosenmittelpunkt durch das sich der Flugbahn des Projektils entgegen bewegende Wasser, das einen Unterdruck an der Behälterrückwand bewirkte, begünstigt (vgl. Kapitel 3 Behälter-Stoß-Phänomen).

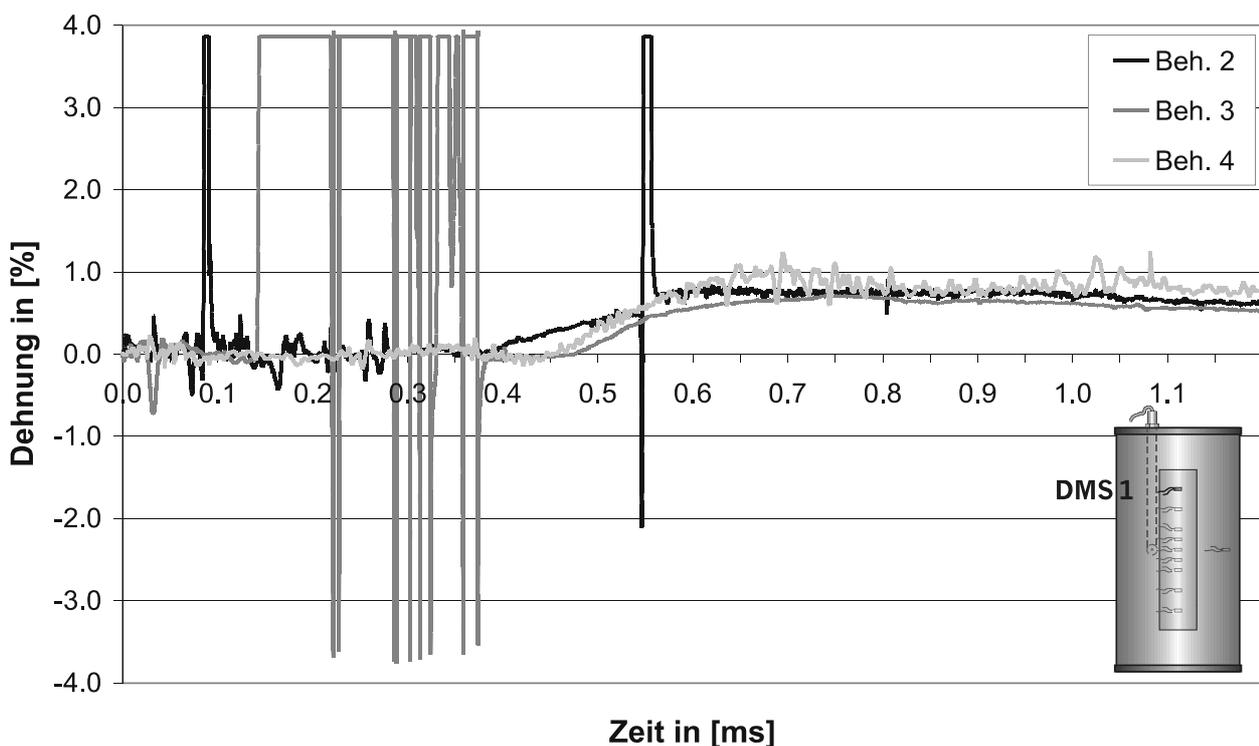


Abb. 5.19 Messergebnisse des Dehnmessstreifen 1 der Behälter Beh.2-4

Nachfolgend sind einige der gemessenen Dehnungen von verschiedenen Messstellen abgetragen worden, die von den drei Versuchen Beh.2, 3, und 4 stammen und die gleiche geometrische Lage besitzen.

Die Dehnmessstreifen sind der Numerierung nach abgebildet und der Nullpunkt ist gleichbedeutend mit dem Beschusszeitpunkt an dem das Projektil auf die

Behältervorderseite aufschlägt. Die Dehnmessstreifen waren so angeordnet, dass diese nur Ringdehnungen aufnehmen konnten. Auf die Abbildung der unmittelbar ober- und unterhalb des Beschusspunktes liegenden Dehnmessstreifen wurde verzichtet, da diese einerseits fast gleichzeitig mit dem Beschuss schlagartig versagten.

Die einzelnen großen Störungen (Peaks) bei 0,1 ms und 0,55 ms des Behälters Beh.2 (DMS-1, Abb. 5.17) und bei allen hier aufgezeigten Messkurven des Behälters Beh.3 (bei 0,22 / 0,28 / 0,32 / 0,36 ms) sind physikalisch nicht zu erklären, sondern müssen auf Grund der Phasengleichheit an unterschiedlichen Stellen durch eine elektromagnetische Störung anderer Stromkabel induziert worden sein.

Betrachtet man zunächst die Dehnmessungen von den DMS-1 und 9 (Abb. 5.19 und 5.22), welche die gleiche Entfernung zu dem Beschusspunkt aufweisen, so erkennt man nicht nur zwischen den unterschiedlichen Behältern, sondern auch zwischen den beiden Messstellen eine große Ähnlichkeit im Verlauf der Messungen.

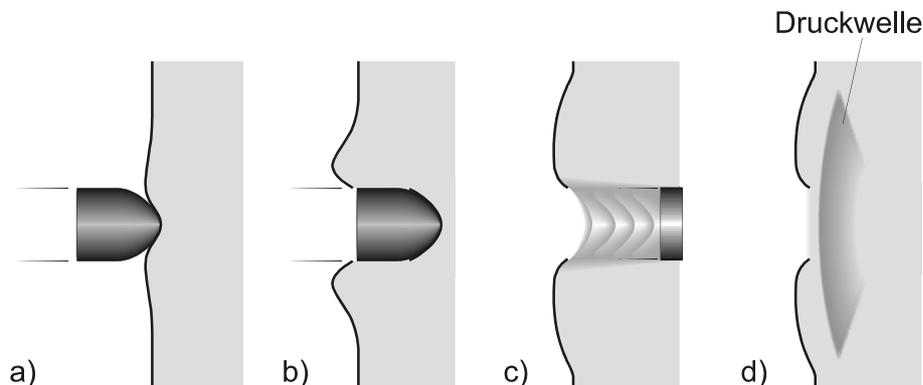


Abb. 5.20 *Ablaufschema bei dem Beschuss von wassergefüllten Behältern*

Bis zum Zeitbereich von $\sim 0,4$ ms - 0,45 ms sind nur geringfügige Dehnungen gemessen worden, erst wenn die Druckwelle sich von dem Aufschlagpunkt mit Schallgeschwindigkeit im Wasser einmal von der Vorderseite des Behälters zur Rückseite und wieder nach vorne fortgepflanzt hat, kommt es zu Dehnungen, die im Bereich von 0,5 - 1,0 % Dehnung liegen. Nachdem die Dehnungen zwischen 0,6 ms und 0,8 ms ihr Maximum erreichen, ist anschließend ein leichter Rückgang der Werte festzustellen.

In Abbildung 5.20 ist das charakteristische Ablaufschema im Bereich der Behältervorderseite dargestellt. Teilbild a zeigt das Aufschlagen des Projektils auf die Behälterwand. Die konzentrierte Druckwelle bildet sich ausgehend von dem Aufschlagpunkt aus und pflanzt sich mit der Wellengeschwindigkeit in der Flüssigkeit fort. Bei dem Teilbild b ist die Perforation der Behälterwand durch das Projektil abgeschlossen, und der Aufschlagbereich um den Einschuss herum erfährt auf Grund der Wasserpartikelverdrängung die ersten größeren Dehnungen. Die Dehnungen in Folge der Partikelverdrängung sind bei dem Teilbild c abgeschlossen. Dieser Zeitbereich, der zwischen den Teilbildern b und c liegt, ist bei den hier durchgeführten Versuchen zwischen 0,0 ms und ungefähr 0,3 ms. Das Teilbild d ist stellvertretend für den Zeitbereich von 0,4 ms bis ungefähr 0,5 ms, zu dem die an der Behälterrückseite reflektierte Druckwelle wieder an der Behältervorderseite eintrifft.

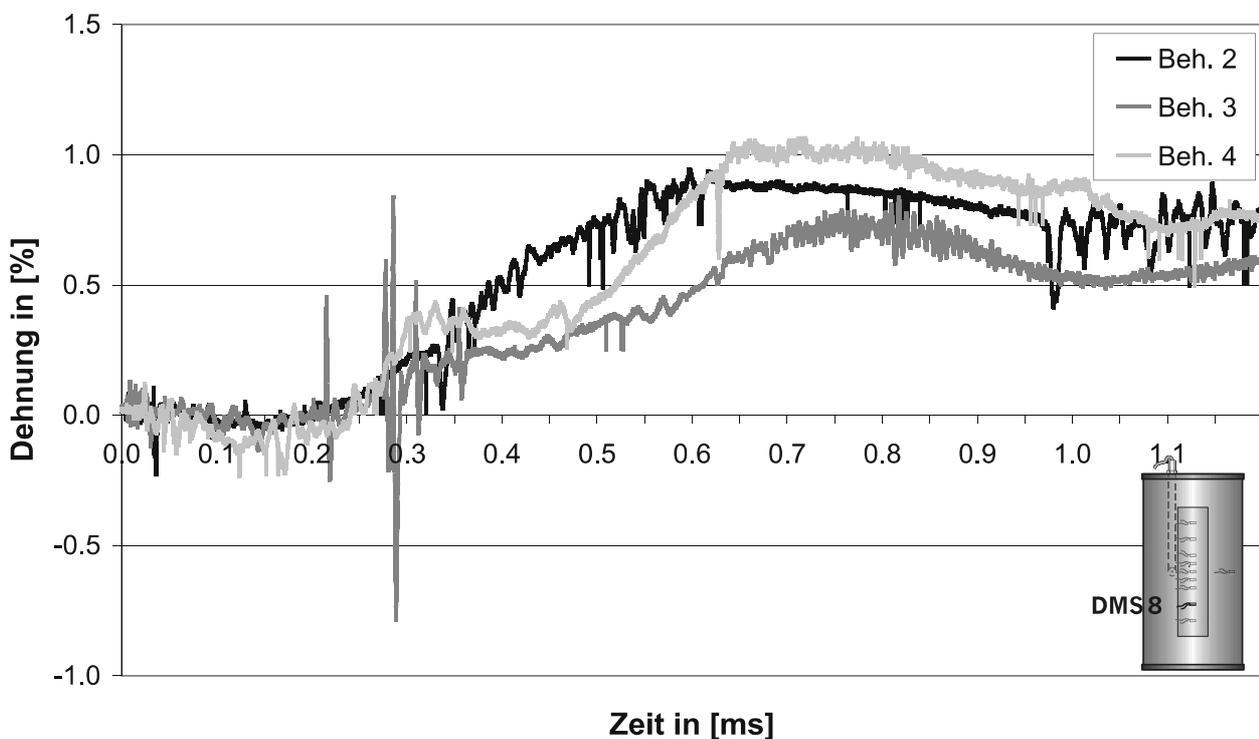


Abb. 5.21 Messergebnisse des Dehnmessstreifen 8 der Behälter Beh.2-4

Bei dem Dehnmessstreifen DMS-8 (Abb. 5.21), der 5,0 cm näher an dem Aufschlagpunkt des Geschosses liegt, sieht man, dass die Messungen der Dehnungen zunächst negativ sind (Druck) und dann das Vorzeichen wechseln, um kontinuierlich immer größere Werte (Zugdehnungen) anzunehmen. An der Dehnmesskurve DMS-8 Beh.4, der mit 0,6 mm die geringste Behälterwandstärke aufweist, sieht man am deutlichsten, dass sich nach 0,3 ms eine Art Plateau ausbildet, bis die Messungen am Dehnmessstreifen nach 0,43 ms wieder weitere Zuwächse bei den Zugdehnungen

verzeichnen. Dieser Ablauf ist damit zu erklären, dass sich zunächst die Behältervorderseite auf Grund des Einschlags des Projektils und der damit verbundenen Wasserpartikelverdrängung verformt, bis nach 0,4 ms die reflektierte Stosswelle an dieser Messstelle eintrifft und so eine weitere Dehnung bewirkt.

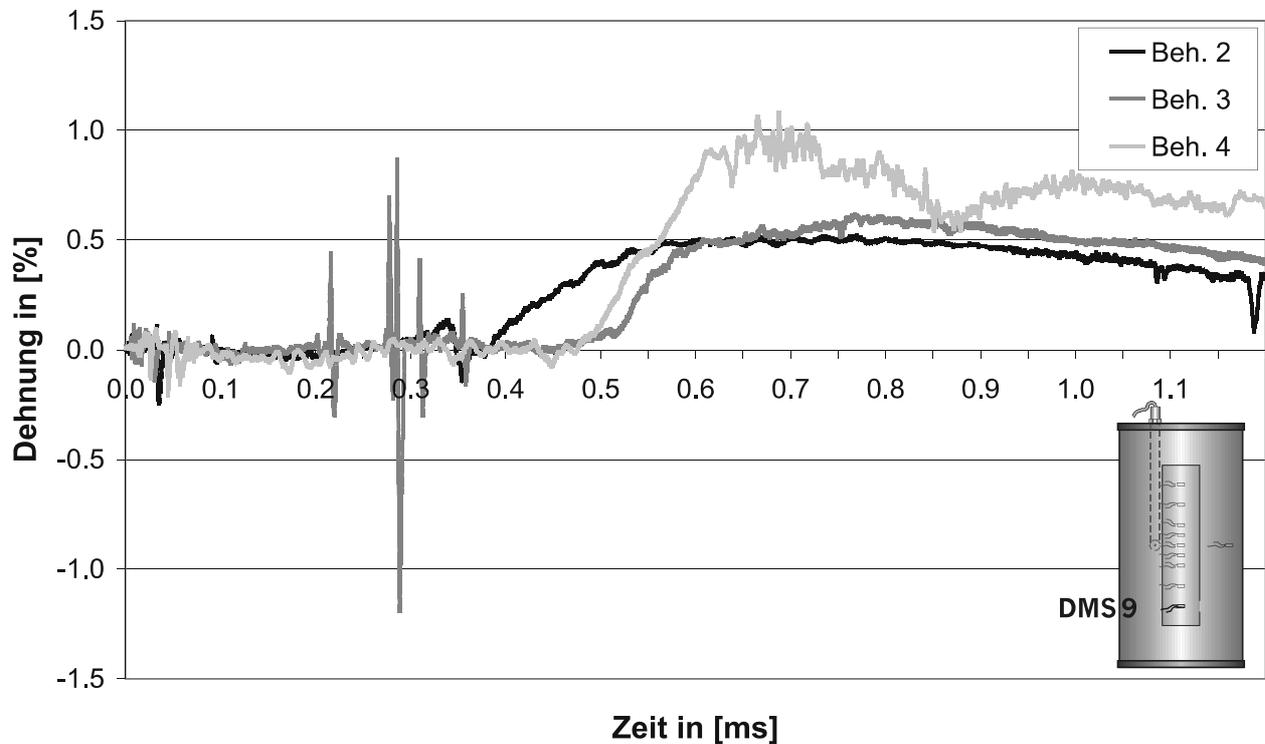


Abb. 5.22 Messergebnisse des Dehnmessstreifen 9 der Behälter Beh.2-4

Betrachtet man die gemessenen Dehnungen des DMS-10 (Abb. 5.23), so erkennt man, dass es fast unmittelbar nach dem Beschuss zu einem Anstieg der Zugdehnungen bis zu dem Zeitpunkt 0,25 ms kommt. Auch hier bildet sich ähnlich, wie bei dem DMS-8 ein Plateau aus, das bis 0,3 ms nach dem Beschuss anhält, um dann nachfolgend bis in den Zeitbereich zwischen 0,35 ms bis 0,4 ms weiter anzusteigen.

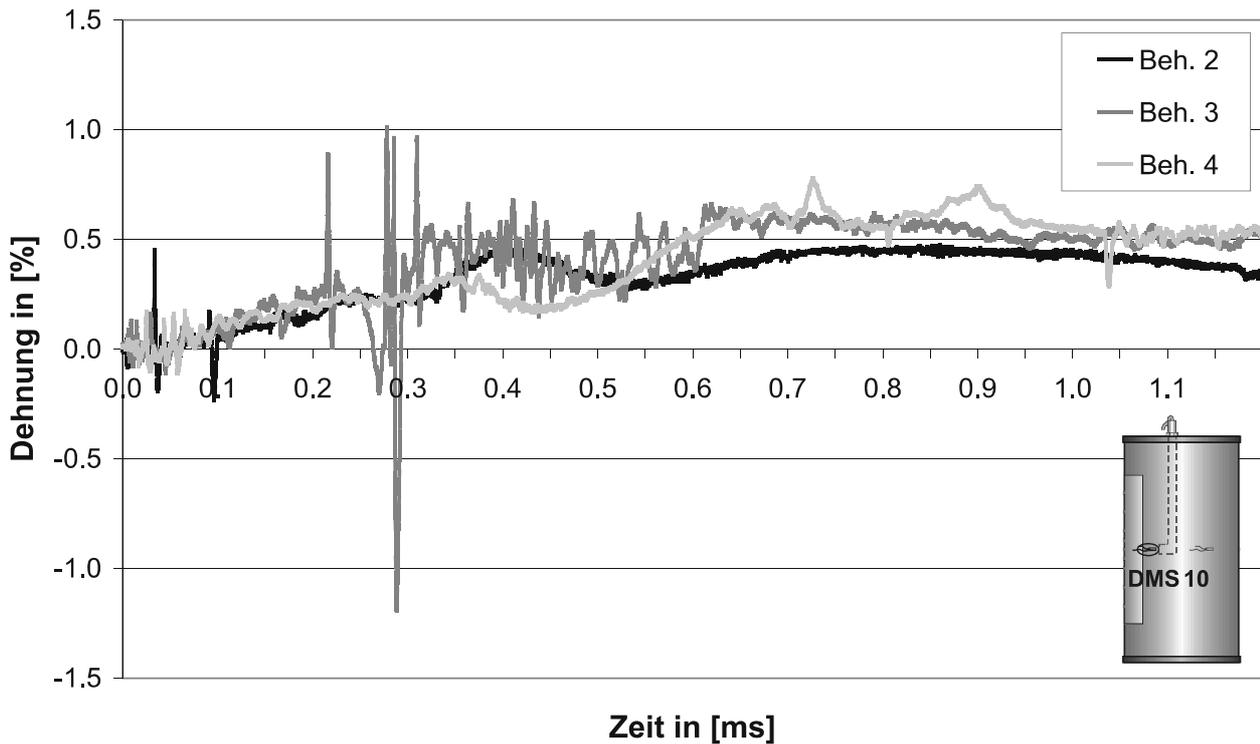


Abb. 5.23 Messergebnisse des Dehnmessstreifen 10 der Behälter Beh.2-4. Der Dehnmessstreifen 10 liegt auf Höhe des Einschusses seitlich verschoben

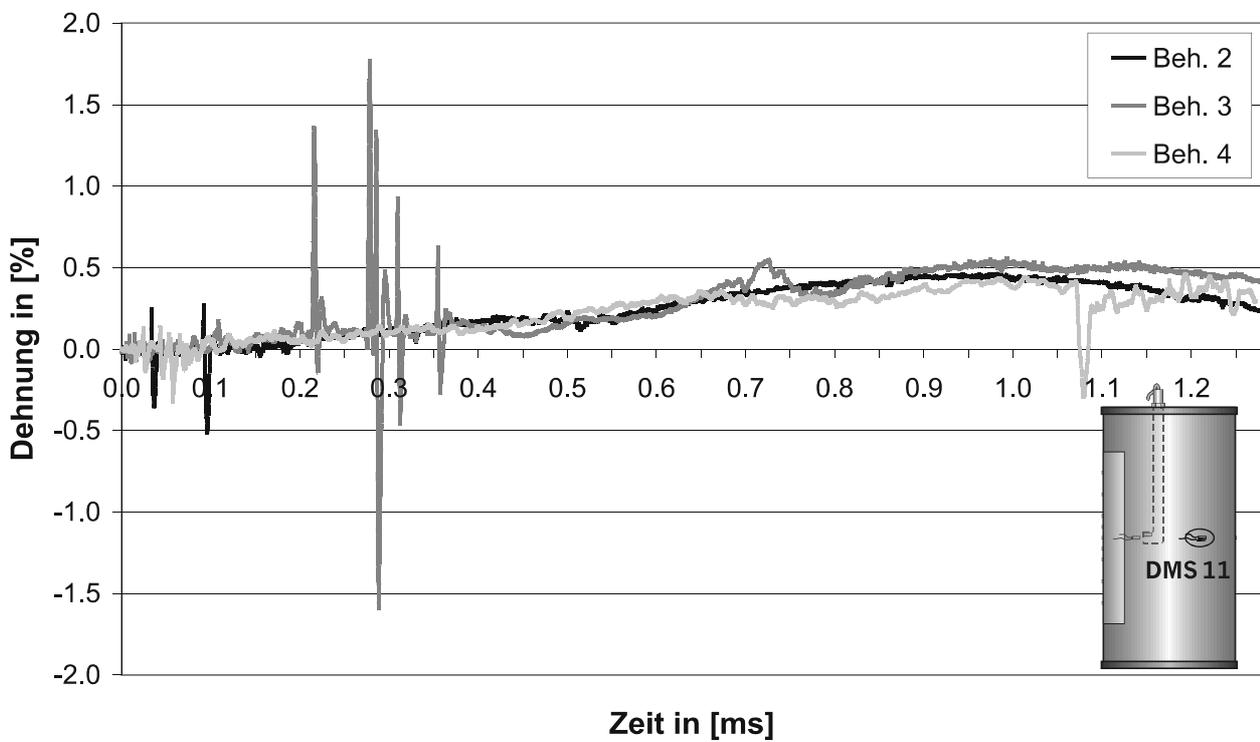


Abb. 5.24 Messergebnisse des Dehnmessstreifen 11 der Behälter Beh.2-4. Der Dehnmessstreifen 11 liegt auf der Höhe des Einschusses seitlich verschoben

Beim DMS-11 (Abb. 5.24) wird die Behälterwand verglichen mit DMS-10 erst zu einem sehr viel späteren Zeitpunkt nennenswert gedehnt. Hier erreichen die Dehnungen bei ca. 1,0 ms ihren Höhepunkt, was an dem sich durch das Fluid bewegendem Geschoss und der damit verbundenen Druckerhöhung des umgebenden Wassers liegt. Der Dehnmessstreifen DMS-11 des Behälters Beh.4 verzeichnet bei 1,08 ms einen Peak, der bis in den Druckbereich hineinreicht. Dieses ist der Zeitpunkt, zu dem sich die Behälterrückwand einbeult (siehe auch Abb. 5.18).

Der Dehnmessstreifen DMS-12 markiert die Austrittsstelle des Projektils aus dem Behälter. Wie aus Abbildung 5.25 abzulesen ist, perforieren die Projektil nach 1,2 ms bei den Behältern Beh.2 und Beh.4 und nach 1,35 ms bei dem Behälter Beh.3 die Rückseite des Behälters. Die kontinuierlich langsam anwachsenden Dehnungen vor der Perforation der Behälterrückseite sind auf die das Geschoss umgebenden Druckkegel in der Flüssigkeit zurück zu führen, deren Einfluss auf die Behälterrückwand mit der weiteren Annäherung zunimmt und dadurch zunehmende Zugdehnungen in der Behälterwand verursacht.

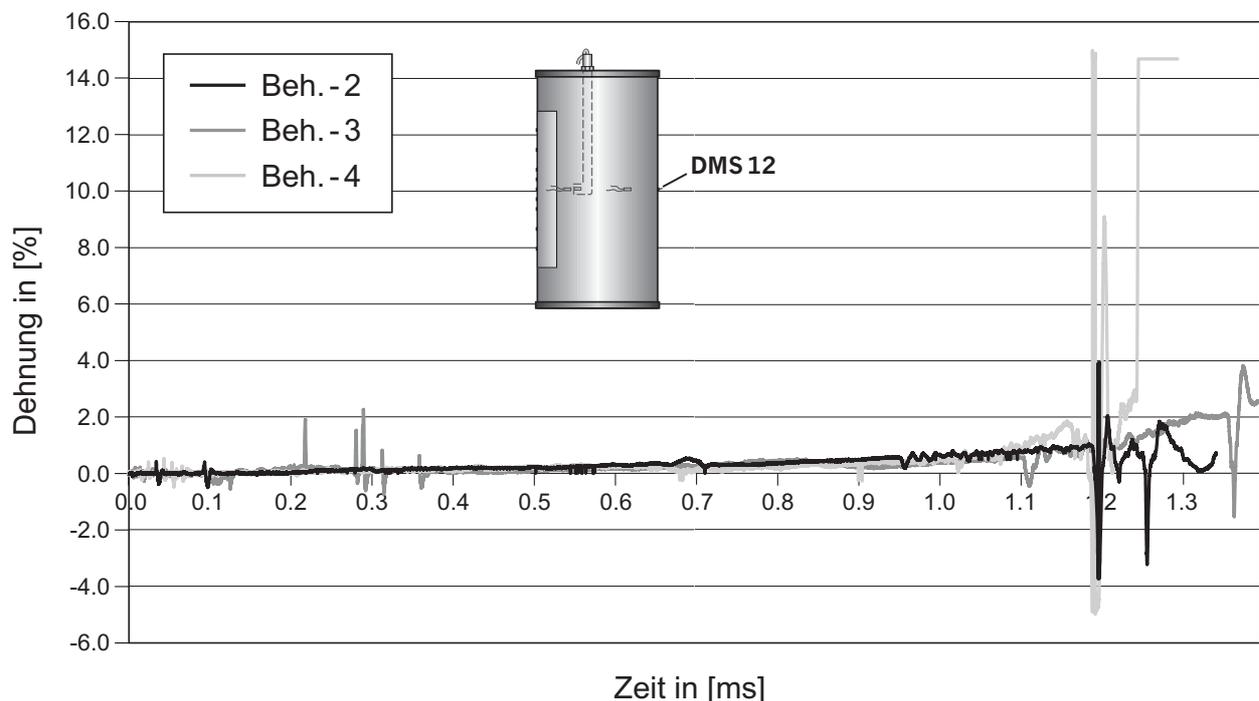


Abb. 5.25 Messergebnisse des Dehnmessstreifen 12 der Behälter Beh.2-4. Der Dehnmessstreifen 12 liegt an der Ausschussstelle des Projektils

In Folge unterschiedlicher Wandstärken der Behälter Beh.2 bis Beh.4 ist auch eine unterschiedliche Energiedissipation bei dem Projektil zu erwarten. Dieser Einfluss läßt sich jedoch an Hand der gemessenen Durchdringungszeiten der Projektils nicht

belegen.

Als nächstes sollen hier die Unterschiede die sich durch die Variation der Geschwindigkeit ergeben dargestellt werden.



Beh.2 $v_0 = 396 \text{ m/s}$

Beh.5 $v_0 = 721 \text{ m/s}$

Abb. 5.26 Vorderansicht auf die Behälter Beh.2 und Beh.5 mit je 1,0 mm Wandstärke nach dem Beschuss

Verglichen werden hier die Behälter Beh.2 ($v_0 = 396 \text{ m/s}$) und Beh.5 ($v_0 = 721 \text{ m/s}$), die beide mit Wasser gefüllt waren. In Abbildung 5.26 sieht man links den bereits beschriebenen Versuchskörper Beh.2 und rechts daneben den Behälter Beh.5. Der Versuchskörper Beh.5 ist am Ernst-Mach-Institut (EMI) in Evingen-Kirchen beschossen worden. Am EMI wurden die Pulverladungen so dimensioniert hergestellt, dass die Projektile auf eine Impact-Geschwindigkeit von etwa 700 m/s beschleunigt wurden. Die Geschwindigkeitsmessungen zeigten, dass das Geschoss auf eine Geschwindigkeit von 721 m/s beschleunigt wurde und somit eine kinetische Energie von 8058 J besaß. Das entsprach der 3,3-fachen kinetischen Energie von dem Projektil, das auf den Behälter Beh.2 (2431 J) geschossen wurde. Der Behälter Beh.5 ist auf einer Länge von 44 cm an der Behältervorderseite aufgerissen. Der Deckel ist

stark nach oben gewölbt und an einigen Stellen ist die Schweißnaht aufgeissen. Auch die an der Seite liegende Schweißnaht der Behälterwand ist auf einer Länge von 21 cm aufgeissen.

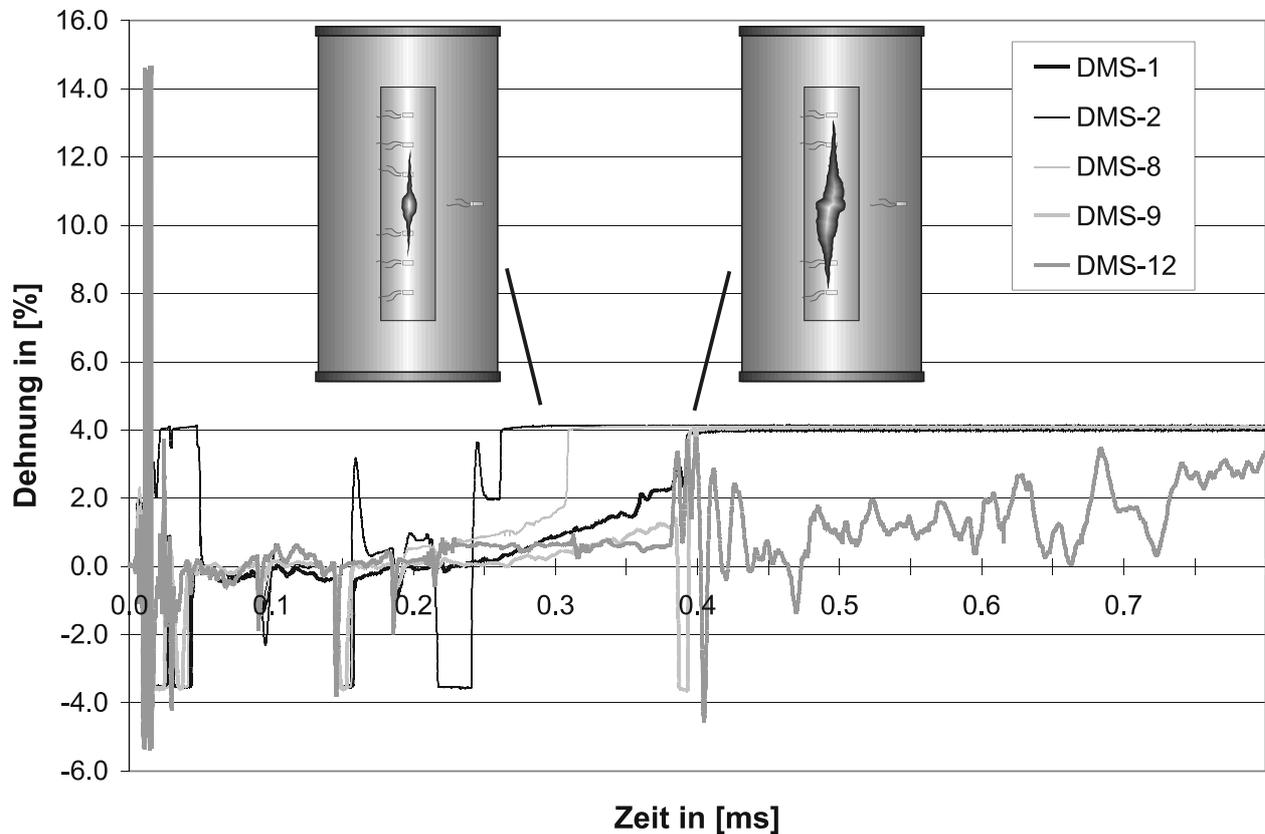


Abb. 5.27 Messergebnisse der Dehnmessstreifen 1,2,8,9,12 von dem Behälter Beh.5 mit der schematischen Darstellung des Rissfortschrittes in der Behältervorderseite

Betrachtet man die abgebildeten Ergebnisse der Dehnmessungen auf Abbildung 5.27 und 5.28 so erkennt man, dass es auch bei dem Versuch Beh.5 zu elektromagnetischen Störungen kam. Die Peaks zu den Zeitpunkten 0,0 - 0,05 / 0,1 / 0,15 / 0,19 sind auf solche Störungen, hervorgerufen durch die starken Halogenscheinwerfer die zum Ausleuchten der Versuchseinrichtung dienten, zurückzuführen.

Die Druckentwicklung in Folge der Partikelverdrängung ist bei der hohen Impact-Geschwindigkeit von 721 m/s so groß, dass der Behälter nach 0,26 ms und 0,31 ms bis zu den Dehnmessstreifen DMS-2 und DMS-8 aufreißt (siehe Abb. 5.27). Nach 0,4 ms werden auch die DMS-1 und DMS-9 gleichzeitig durch die von der

Behälterrückseite reflektierte Stoßwelle zerstört. Die Druckentlastung bewirkt unmittelbar danach auch beim DMS-12 ein kurzzeitiges Abfallen der Dehnungen auf -4 %. Die Behälterrückseite wird erst nach 1,48 ms durch das stark deformierte Projektil perforiert (vgl. Abb. 5.5). Dieses ist auf die durch den Aufschlag auf die Behältervorderseite bedingte starke Reduktion der Geschossmasse und damit deutlich geringeren kinetischen Energie des Projektils zurückzuführen.

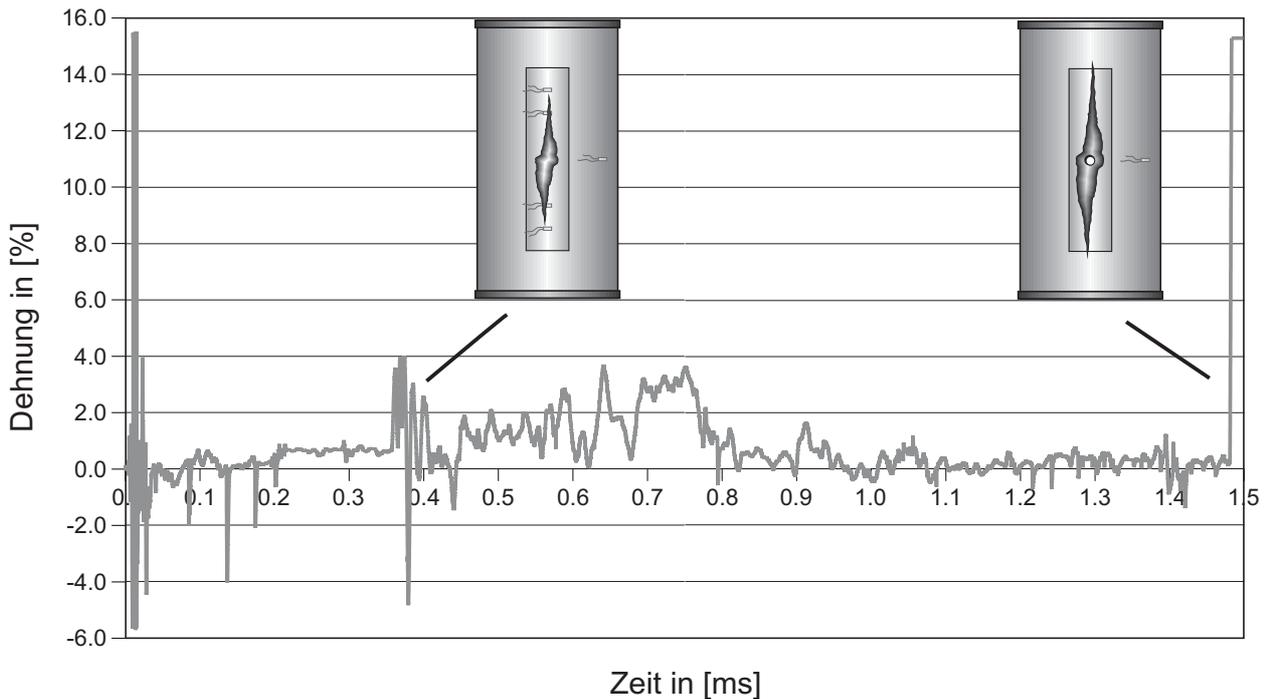


Abb. 5.28 Messergebnisse des Dehnmessstreifen 12 von dem Behälter Beh.5 mit der schematischen Darstellung des Rissfortschrittes der Behältervorderseite

5.6.3 Ergebnisse der Druckmessungen in der Flüssigkeit

Druckverläufe in einer Flüssigkeit sind bei Behälterbeschuss bisher so noch nicht gemessen worden, daher liefern diese Versuche die Möglichkeit, die gewonnenen Ergebnisse mit FEM-Rechnungen zu vergleichen. Die nachfolgend diskutierten Maximaldrücke von bis zu 200 bar durch Beschuss mit einer Geschwindigkeit von ca. 400 m/s wurden so nicht erwartet.

Die Messergebnisse der Druckverläufe für die Behälter Beh.2, 3, und 4 weisen eine große Ähnlichkeit auf (siehe Abb. 5.29). Vom Beschusszeitpunkt $t = 0$ bis zum Eintreffen der konzentrierten Druckwelle bei dem von dem Auftreffpunkt des

Projektils 7 cm entfernten Druckaufnehmer vergehen 0,047 ms. Auf der Abbildung 5.29 ist die Zeitachse bei 0,85 ms gekappt worden, da die Messwerte der Drücke nur noch Minimalwerte nahe dem Nullpunkt aufweisen. Bei allen Verläufen ist ein ausgeprägter Anfangsdruck zu erkennen der auf Null abfällt, um nachfolgend nochmals auf Werte um 50 bar anzusteigen, bis er sich dann kontinuierlich dem Nullwert annähert.

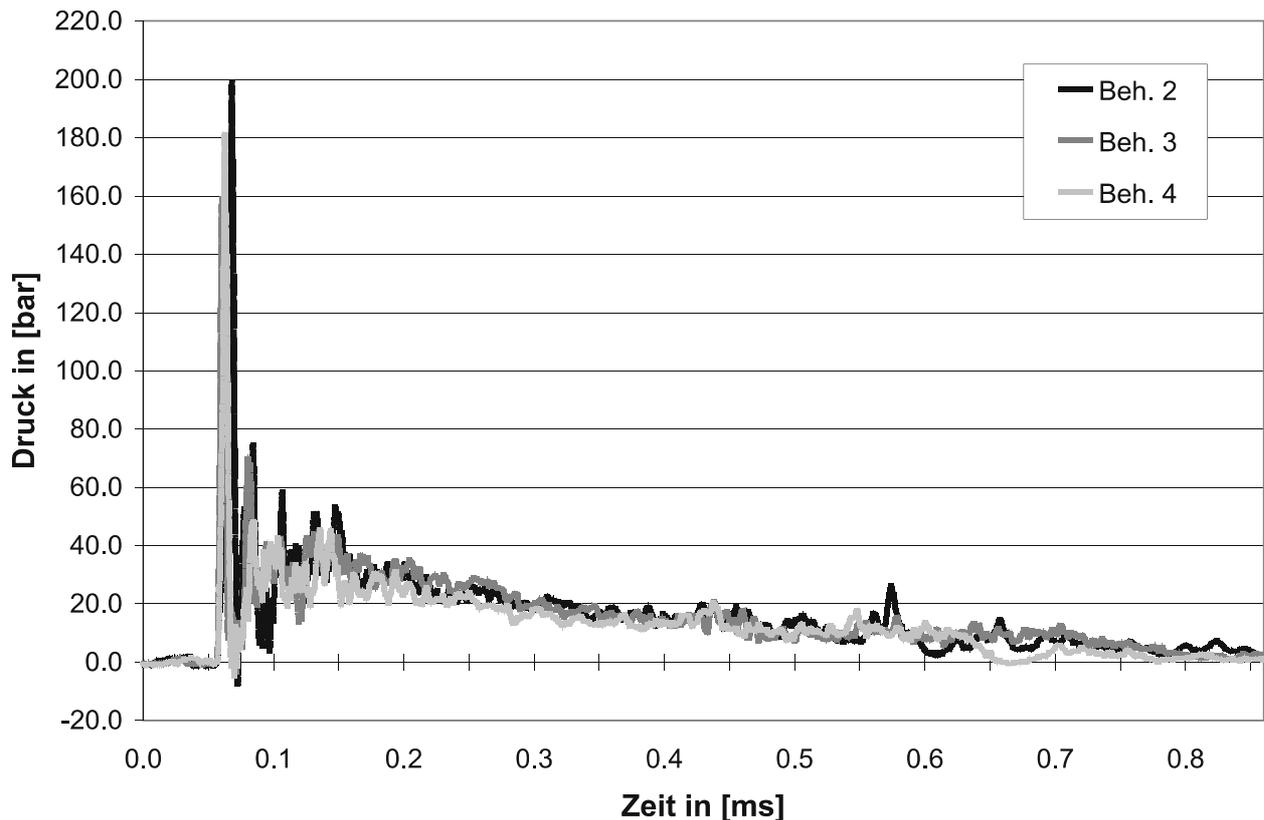


Abb. 5.29 *In einer Entfernung von 7 cm vom Auftreffpunkt des Projektils gemessene Drücke in der Flüssigkeit von Behälter Beh.2-4*

Der verwendete Druckaufnehmer ist speziell für Druckschwankungen hoher Frequenz beziehungsweise kurzer Anstiegszeit ausgelegt. Zur besseren Betrachtung des anfänglichen Druckverlaufes sind in Abbildung 4.30 die ersten 0,11 ms der Belastung aufgetragen. Der Nullpunkt ist der Zeitpunkt, an dem das Projektil auf den Behälter auftrifft. Die Zeitspanne von Null bis 0,047 ms entspricht der Zeit, die benötigt wird, damit die konzentrierte Druckwelle mit Wellengeschwindigkeit die Strecke vom Aufschlagpunkt des Geschosses bis zu dem Druckaufnehmer zurücklegen kann (7 cm). Der Druckaufnehmer ist auf der Höhe des Auftreffpunktes von dem Projektil 5 cm seitlich zur Geschossflugbahn und 5 cm in den Behälter hinein angeordnet worden. Alle vier Behälter (Beh.1 bis Beh.4), in denen der

Druckaufnehmer eingebaut wurde, zeigten eine schlagartige Druckänderung, nachdem die Druckwelle den Aufnehmer erreicht hat, an. Die errechnete Wellengeschwindigkeit bei den Versuchen lag mit 1489 m/s nur geringfügig über dem Wert von 1485 m/s der in der Literatur [29] für die Wellengeschwindigkeit in Wasser bei 20° C angegeben wird.

Bei dem Behälter Beh.1 ist die Druckkurve bei 160 bar abgeschnitten (siehe Abb. 5.30). Das liegt daran, dass vor dem Versuch nicht mit so hohen Drücken gerechnet wurde und aus diesem Grund der Messbereich auf 160 bar maximal beschränkt war. Bei den drei anderen Versuchen ist daher der maximale Messbereich des Druckaufnehmers von 200 bar ausgeschöpft worden. Es ist anzunehmen, dass die Maximaldrücke für den Versuchskörper Beh.1, wenn keine Beschränkung vorgenommen worden wäre, noch über denen von Beh.2 gelegen hätten.

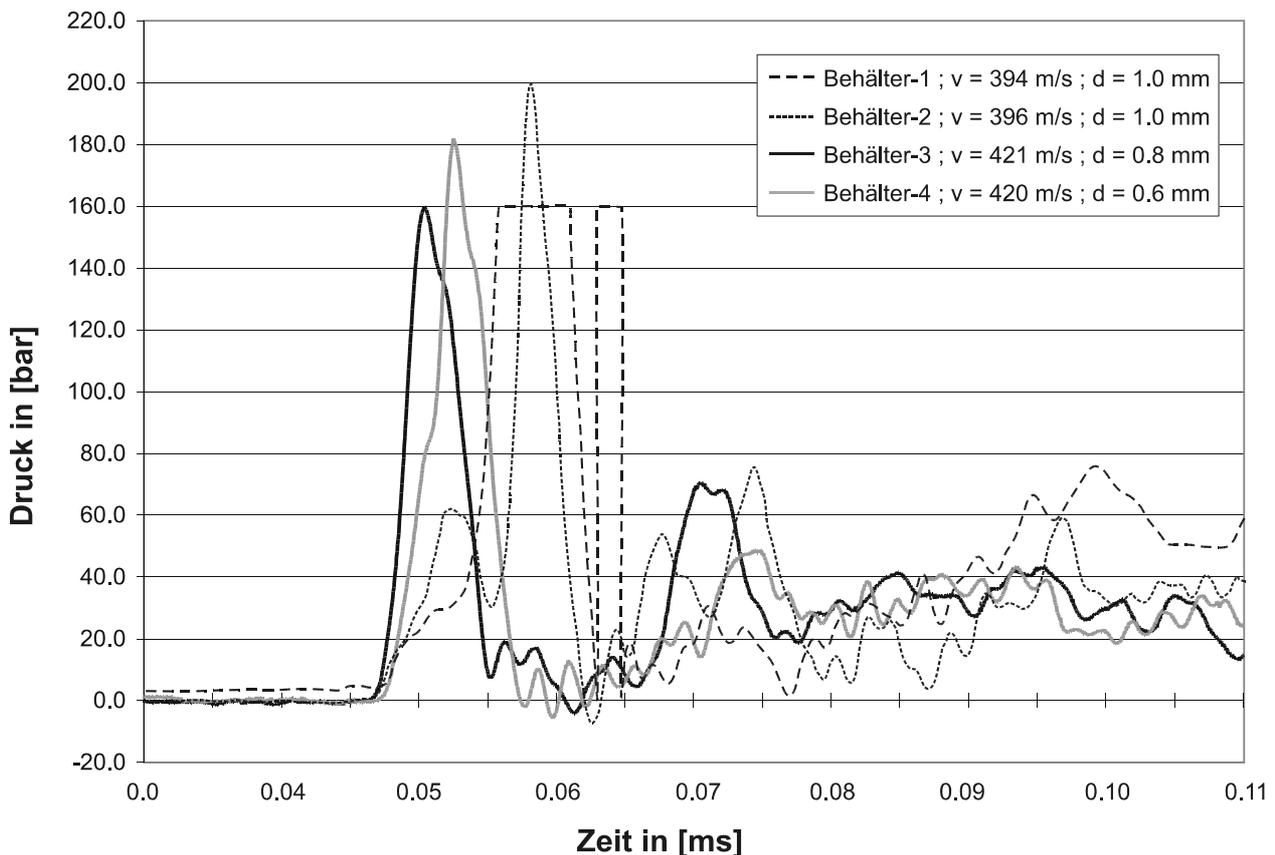


Abb. 5.30 In einer Entfernung von 7 cm vom Auftreffpunkt des Projektils gemessene Drücke in der Flüssigkeit von Behälter Beh.2-4

Betrachtet man zunächst die beiden Messkurven des Drucks in der Flüssigkeit von Versuch Beh.1 und Beh.2 (Abb. 5.30), beide jeweils mit einer Wandstärke von 1,0mm, so erkennt man nach dem Eintreffen der Druckwelle an dem

Druckaufnehmer bei 0,047 ms einen kontinuierlichen Anstieg. Bei 0,0525 ms ist kurzzeitig kein weiterer Druckanstieg festzustellen und bei der Messkurve Beh.2 fällt der Druck sogar um annähernd 30 bar ab. Anschließend steigen die beiden Druckverläufe binnen 0,003 ms rasant auf den Maximaldruck an. Danach fallen die Messwerte für den Druck der Behälter Beh.1 und Beh.2 annähernd genauso schnell, bis in den negativen Bereich (Unterdruck), ab. Der Unterdruck reicht fast bis an ein Vakuum heran. Die folgenden Druckanstiege von $t = 0,065$ ms an sind auf nachlaufende Druckwellen durch den Beschuss und später bei etwa 0,95 ms durch das sich an dem Druckaufnehmer vorbei bewegende Projektil zu erklären.

Bei den Messwerten des Drucks für die Versuche Beh.3 und Beh.4, die eine geringere Behälterwandstärke aufweisen, ist ein deutlich steilerer und kürzerer Druckanstieg festzustellen. Die Maximaldrücke liegen unter denen von Beh.1 und Beh.2.

Dieses Phänomen ist damit zu erklären, dass der Energieeintrag in das Wasser abhängig von der Behälterwanddicke ist. Bei einer sehr dünnen Behälterwand ist der Energieeintrag nahezu identisch mit einem Beschuss auf eine freie Wasseroberfläche. Besitzt die Behälterwand eine Dicke, bei der zwar eine Perforation stattfindet, aber ein erheblicher Teil der kinetischen Energie des Projektils vernichtet wird, so ist ein Druckanstieg der Primärdruckwelle in der Flüssigkeit zu erwarten. Bei einer Behälterwand die weit oberhalb der ballistischen Grenze liegt wird die kinetische Energie zu einem größeren Teil durch die Behälterwand dissipiert und ein geringerer Teil an die Flüssigkeit übertragen (siehe auch Abb. 5.31).

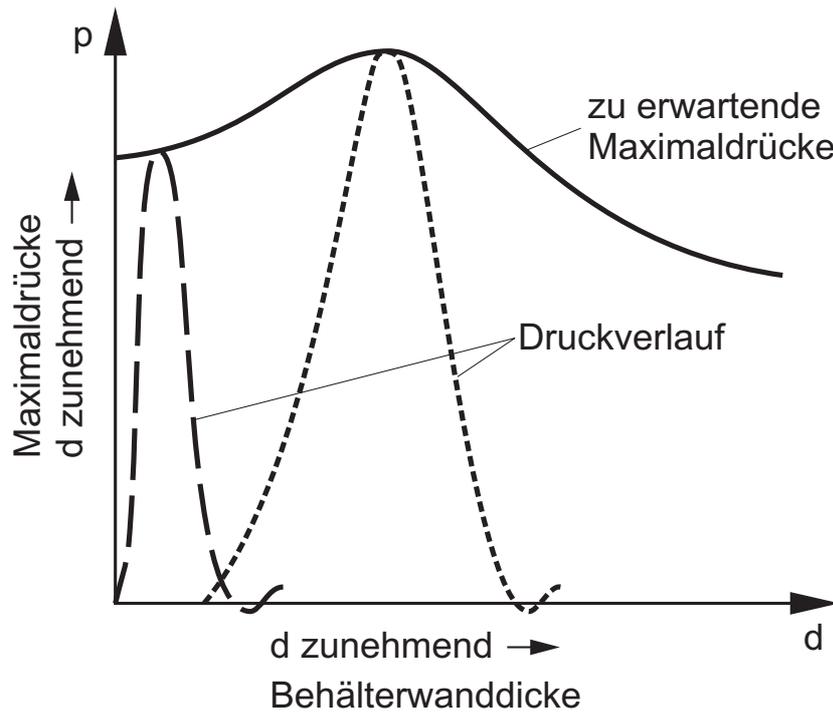


Abb. 5.31 *Qualitativer Verlauf des Maximaldrucks in Abhängigkeit von der Behälterwanddicke und zu erwartender Druckverlauf über die Zeit*

5.6.4 Vergleich von gefüllten und leeren Behältern

Ein direkter Vergleich der ballistischen Grenze für den gefüllten und den leeren Behälter konnte auf Grund der vorgegebenen kinetischen Energie der Geschosse nicht erstellt werden.

Beschossen wurde der volle wie leere Behälter Beh.0 mit einem KO-Flintenlaufgeschoss, welches eine kinetische Energie von 2022 J hatte. Die Geschossgeschwindigkeit lag dabei, das ergaben spätere FE-Rechnungen, mit 380 m/s ungefähr um 250 m/s über der ballistischen Grenze für diesen Behälter mit einer Wandstärke 1,0 mm. Auch wenn das Tragverhalten an der ballistischen Grenze nicht untersucht werden konnte, so waren dennoch wesentliche Unterschiede im Tragverhalten beobachtet worden.

Die Abbildungen 5.32 und 5.34 zeigen die Auftreff- und Austrittsstelle des Projektils von dem mit Flüssigkeit gefüllten Behälter Beh.0. Die Verformungen an der Auftrefffläche des Impacts sind relativ gering, was auf die "Bettung" durch das Fluid zurück zu führen ist. Durch die Massenträgheit der Flüssigkeit konnte sich die Zylinderwand nicht großflächig einbeulen, sondern wurde im Gegenteil ober- und unterhalb der Auftrefffläche des Geschosses auf Grund der Verdrängung des Fluids durch den Impact und die rücklaufende Druckwelle nach außen gebeult. Der Einschuss ist nicht kreisrund sondern leicht oval mit 23 mm Breite auf 19 mm Höhe. Somit bildete sich ein vergleichbarer Einschuss wie bei den mit Wasser gefüllten und nicht aufgerissenen Dosen aus. Es ist sowohl beim Ein- wie beim Ausschuss der vertikal gerissene Lack zu erkennen, welcher auf die hin- und rückläufige Druckwelle im Fluid zurück zu führen ist. Die Wellengeschwindigkeit in Wasser beträgt bei Raumtemperatur 1485 m/s und ist somit ungefähr vier mal höher wie die anfängliche Geschossgeschwindigkeit (384 m/s). Daher ist der Lack auf der Behälterrückseite lange vor dem Zeitpunkt gerissen, an dem die Behälterwand durch den Impact perforiert wird. Das KO-Flintenlaufgeschoss mit einer kinetischen Energie von 2020J war nicht in der Lage, die Behälterrückwand vollständig zu durchschlagen und wurde nach dem Beschuss in dem Behälter gefunden.

Das Tragverhalten des leeren Behälters (Beh.0) unterscheidet sich gravierend von dem Tragverhalten des gefüllten Behälters. Zum Vergleich betrachte man hier die Abbildungen 5.33 und 5.35, welche die Auftreff- und Austrittsstelle des Projektils auf den Behälter Beh.0 zeigen. Man erkennt bei dem Behälter die sehr viel größeren Verformungen, welche die Beschussseite um die Auftrefffläche herum erfahren hat. Der Einschuss ist in diesem Fall mit 21 mm Durchmesser kreisrund und die vordere Behälterwand nach innen eingebeult. Auch bei der Behälterrückseite ist ein deutlich abgegrenzter runder Ausschuss zu beobachten. Hier laufen die Risse in dem Lack radial auf den Ausschuss zu, was wiederum einen Gegensatz zu dem mit Wasser gefüllten Behälter darstellt und verdeutlicht, welchen Einfluss das Fluid auf das Tragverhalten des vollen Behälters hat.

Betrachtet man die Projektile, welche auf den Behälter geschossen wurden, so ist auch hier ein Unterschied festzustellen. Bei den mit Wasser gefüllten Behältern Beh.0 bis 4 hat sich jeweils das durch das Projektil an der Vorderseite herausgeschossene Behälterstück der Auftrefffläche über die Stirnseite des Geschosses gezogen (siehe auch Abb. 5.3 und 5.4 jeweils in der Mitte des Bildes). Diese Plättchen sind mit dem Geschoss fest verbunden gewesen. Unterhalb der

Plättchen sind die Geschosspitzen auf Grund des hohen Aufschlagdruckes geschmolzen.

Bei dem Vergleich der Behälter Beh.5 und Beh.6 ist der Unterschied im Tragverhalten signifikant. Der vollständig mit Wasser gefüllte Behälter Beh.5 ist, wie man in Abbildung 5.36 sehen kann, nach dem Beschuss mit einem über 720 m/s schnellen Geschoss im Gegensatz zu dem leeren Behälter (Abbildung 5.37) auf fast der gesamten Behälterhöhe aufgerissen und großflächig deformiert. Die Seiten entlang der Risskante sind durch das Wasser auseinander und nach außen gedrückt worden. Entlang der beiden Behälterseiten verlaufen parallel Risse in dem Lack, die sich zum Einschuss hin radial ausrichten. Die Vorderseite des leeren Behälters ist hingegen bis auf das Einschussloch unverformt. Bei beiden Versuchskörpern hat sich ein klar abgegrenzter runder Einschuss ausgebildet, an dessen Kanten geschmolzene Blei- und Stahlreste zu erkennen sind.

Bei dem Ausschuss des vollen Behälters Beh.5 sind auch hier die vertikalen Risse in dem Lack zu sehen. Die Maßstäbe sind bei den Bildern Abb. 5.38 und 5.39 korrekt im Verhältnis zu einander abgebildet. So ist der Ausschuss bei dem Versuchskörper Beh.5 17 mm im Durchmesser im Gegensatz zu dem Beh.6, bei dem der Ausschuss einen Durchmesser von 27 mm besitzt. Dieses ist allerdings beim Beh.5 auf die starke Reduktion der Geschossgröße durch den Aufschlag auf den Behälter und das damit verbundene Schmelzen des Projektils zurückzuführen.

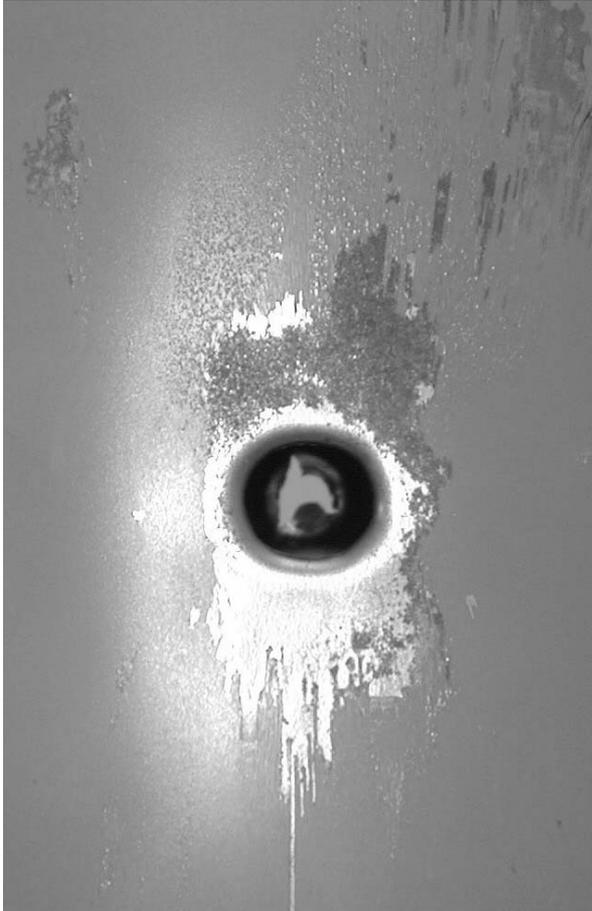


Abb. 5.32 Einschussstelle des gefüllten Behälters Beh.0 ($v_0 = 384 \text{ m/s}$)

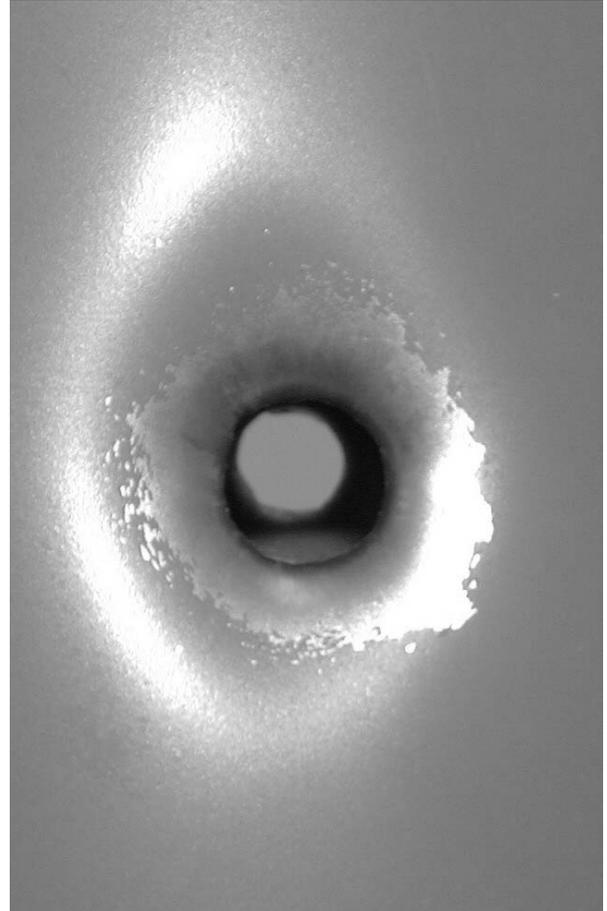


Abb. 5.33 Einschussstelle des leeren Behälters Beh.0 ($v_0 = 380 \text{ m/s}$)

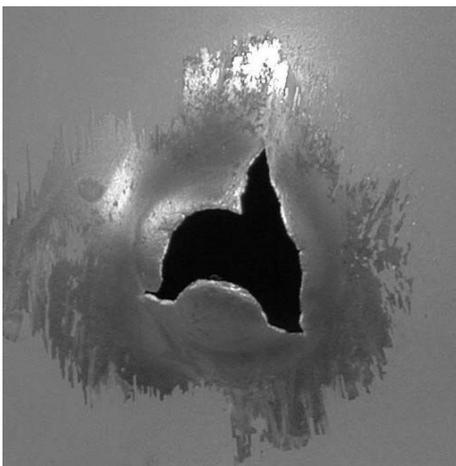


Abb. 5.34 Ausschussstelle des gefüllten Behälters Beh.0

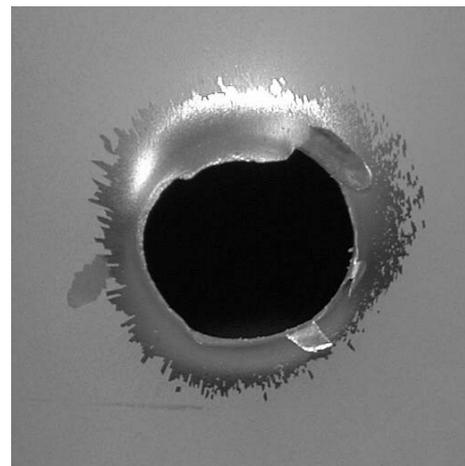


Abb. 5.35 Ausschussstelle des leeren Behälters Beh.0



Abb. 5.37 *Einschussseite des gefüllten Behälters Beh.5*
($v_0 = 733 \text{ m/s}$)



Abb. 5.36 *Einschussseite des leeren Behälters Beh.6*
($v_0 = 721 \text{ m/s}$)



Abb. 5.39 *Ausschussstelle des gefüllten Behälters Beh.5*



Abb. 5.38 *Ausschussstelle des leeren Behälters Beh.6*

6 Rechnerische Simulation mit der FEM

Der hier vorliegende Sachverhalt des Behälter-Stoß-Phänomens zeichnet sich dadurch aus, dass eine Belastungsinformation durch ein weitgehend ungestörtes Medium weitergeleitet wird. Die Störungen des Mediums, in diesem Fall Wasser, beschränken sich auf einen sehr kleinen Bereich. Aus diesem Grund war es nicht notwendig, das Wasser durch ein Euler-Netz abzubilden. Ein Massenstrom oder Durchfluss findet in dem untersuchten Zeitbereich, der für das Tragverhalten von Behältern entscheidend ist, nur im sehr geringen Umfang statt. Die Wellengeschwindigkeit in der Flüssigkeit ist ungefähr 3,5 mal so schnell, wie die Auftreffgeschwindigkeit des Projektils auf die Behälterwand.

Mit Hilfe des Finite-Elemente-Programms ABAQUS/Explicit [44] wurden die aus den Behälterversuchen gewonnenen Ergebnisse simuliert. ABAQUS/Explicit bot sich zur Simulation für diesen Sachverhalt an, da in der Version 5.8 für das Fluid die Verwendung eines “Adaptive Remeshing” zur Verfügung stand. Das “Adaptive Remeshing” ermöglicht stark deformierte Elementnetze zu glätten und somit die Ergebnisse der Berechnung zu verbessern. Ebenso ist eine dreidimensionale Abbildung der Versuchskörper möglich. Eine Überlegung hätte sein können, jeweils aus dem Behälter eine horizontale und eine vertikale Scheibe abzubilden und diese zur Nachrechnung mit einem FE-Programm, das nur zweidimensionale Sachverhalte abbilden kann, zu verwenden. Jedoch ist es bei diesen Teilbereichen nicht möglich, die dreidimensionale Komplexität des Wechselspiels zwischen dem Behälter und der Flüssigkeit bei der Ausbildung der Stoßwelle in der Flüssigkeit und dem Aufreißen der Behältervorderseite ausreichend abzubilden. Eine Reduktion des Sachverhaltes auf ein zweidimensionales System schien daher nicht akzeptabel.

Das verwendete Programm ABAQUS/Explicit ist für kurzzeitige dynamische Vorgänge ausgelegt und verwendet ein explizites Zeitintegrationsverfahren. Nichtlineare Stoffgesetze können für die verwendeten Elemente angesetzt werden, und ebenso können mittels speziell definierter Flächen Kontakteigenschaften bei der Wechselwirkung zwischen dem Behälter und der Flüssigkeit abgebildet werden. So ist es zum Beispiel möglich, entlang der Behälterwand die Flüssigkeit reibungsfrei zu verschieben, das Durchdringen der Behälterwand durch den Impactkörper realitätsnah darzustellen und ein anschließendes Verdrängen des Fluids durch den Impact abzubilden.

Die verwendeten Elemente wurden in Lagrangescher Betrachtungsweise abgebildet.

Einflüsse, wie statischer Innendruck in dem Behälter und Temperaturentwicklung in Folge der hohen Drücke bei dem Aufschlag des Projektils, wurden für die Flüssigkeit in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Die Voraussetzungen für die Berechnung eines Behälterbeschusses mit Hilfe von ABAQUS/Explicit sollen im Folgenden kurz beschrieben werden. Für Einblicke in die Programmierung des verwendeten Programms wird auf [44] und die einschlägige FE-Literatur [12,17,81,99] verwiesen.

Für die explizite dynamische Berechnung des Sachverhaltes verwendet das Programm Zeitschritte, in denen das Gesamt ereignis abgearbeitet wird. Hierbei wird die zentrale Differenzenmethode genutzt, ausgehend von folgenden Ansätzen:

$$\dot{u}_{(i+\frac{1}{2})} = \dot{u}_{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{u}_{(i)} \quad (6.1)$$

$$u_{(i+1)} = u_{(i)} + \Delta t_{(i+1)} \dot{u}_{(i+\frac{1}{2})} \quad (6.2)$$

Hierbei ist u^N ein Freiheitsgrad der entweder eine Verschiebung oder eine Rotation darstellt. Der Index i stellt das aktuelle Inkrement während der Berechnung dar. Die Beschleunigungen zum Zeitpunkt i werden zur Vorausbestimmung der Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt $i+\Delta i/2$ verwendet, mit denen dann die Verformungen zum Zeitpunkt $t+\Delta t$ errechnet werden. Die Effektivität der zentralen Differenzenmethode liegt darin, dass eine diagonale Lumped-Massenmatrix verwendet wird, mit der die Beschleunigungen am Ende jedes Inkrements wie folgt errechnet werden können

$$\ddot{u}_{(i)} = (M^J)^{-1} (P_{(i)}^J - I_{(i)}^J). \quad (6.3)$$

M^J ist die Massenmatrix, P^J der Belastungsvektor, und I^J der Vektor der inneren

Kräfte. Es wird die inverse Massenmatrix verwendet, so dass bei der Multiplikation mit dem Vektor der inneren Kräfte nur n Operationen durchgeführt werden müssen, wobei n die Anzahl der Freiheitsgrade ist.

Die Integration der Zeitschritte mit der zentralen Differenzenmethode ist unter der Vorgabe von kleinen Zeitschritten bedingt stabil. Zwei Vorgaben müssen eingehalten werden, damit bei der Berechnung keine Divergenz der Lösung eintritt.

Einerseits muss der Zeitschritt Δt , der integriert werden soll so abgestimmt werden, dass

$$\Delta t \leq \frac{L_{\min}}{c_s} \quad (6.4)$$

erfüllt wird. Hier ist L_{\min} die kleinste Elementlänge aus dem System, ρ die Dichte und c_s die Wellengeschwindigkeit, mit der die Informationen von einem Element zum anderen übertragen werden können. Für die Wellengeschwindigkeit gilt:

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6.5)$$

Notwendig ist eine Dämpfung hochfrequenter Oberschwingungen ω_{\max} . Weshalb die Zeitschrittweite wie folgt

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} \quad (6.6)$$

beschränkt wird. Mit der Dämpfung ξ_{\max} der höchsten Frequenzen gilt für das stabile Zeitinkrement

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} (\sqrt{1 + \xi_{\max}^2} - \xi_{\max}). \quad (6.7)$$

Ein Teil der hochfrequenten Oszillationen wird durch eine "Bulk Viscosity"

kontrolliert, die eine lineare volumetrischen Dehnrate $\dot{\epsilon}_{vol}$ erzeugt, wobei b_1 der Dämpfungskoeffizient ist, ρ die Dichte des zugehörigen Materials, c_d die Wellengeschwindigkeit, und L_e die charakteristische Elementlänge.

$$p_{bv1} = b_1 \rho c_d L_e \dot{\epsilon}_{vol} \quad (6.8)$$

Zusätzlich wird für Kontinuum-Elemente eine “Bulk Viscosity” erzeugt, die mit der quadratischen Form der volumetrischen Dehnrate errechnet wird. Hier ist b_2 der Dämpfungskoeffizient.

$$p_{bv2} = \rho (b_2 L_e \dot{\epsilon}_{vol})^2 \quad (6.9)$$

Die quadratische “Bulk Viscosity” soll ein Kollabieren von Elementen, die sich mit hohem Geschwindigkeitsgradienten bewegen, verhindern. Dafür wird die Schockfront, die durch die Elemente läuft, über mehrere Elemente verschmiert.

Die beiden Dämpfungskoeffizienten b_1 und b_2 wurden auf die empfohlenen Werte von 0,06 und 1,2 gesetzt.

Da die hier verwendeten Elementtypen alle reduziert integriert waren, wurde zur Vermeidung von Nullenergie-Eigenformen die “Hourglass”-Kontrolle (hier Integral viscoelastic approach) die wie folgt definiert ist

$$Q = \int_0^t s K(t-t) \frac{d}{dt} dt \quad (6.10)$$

verwendet. Hierbei ist eine Nullenergie-Eigenform und Q die Kraft oder das Moment welches sich auf bezieht. K ist die Hourglass-Steifigkeit welche von dem Programm ausgewählt wird und s sind die Skalierungsfaktoren die sich auf die Verschiebungen oder Verdrehungen der zugehörigen Eigenformen beziehen. Diese Skalierungsfaktoren wurden auf die von ABAQUS/Explicit [44] vorgegebenen Werte gesetzt.

6.1 Diskretisierung

Bei der Diskretisierung des Systems wurde um die Rechenzeit zu verkürzen nur eine Symmetriehälfte generiert.

Die Elemente wurden in drei Elementgruppen zur Abbildung des Behälters, des Fluids und des Projektils unterteilt.

Elementtypen und Diskretisierungsfeinheit wurden im Rahmen von Voruntersuchungen so gewählt, dass ausreichend genaue Ergebnisse erzielt werden konnten.

6.1.1 Der Behälter

Für die Abbildung des Behälters wurden Schalenelemente nach der Kirchhoff-Schalentheorie mit vier Knoten, einem linearen Verschiebungsansatz und einem Integrationspunkt gewählt. Die Elemente sind für die Berechnung von finiten Membran-Dehnungen und großen Rotationen ausgelegt [siehe 44]. Dieser von den vier Knoten aufgespannten Fläche wurde eine für den ganzen Behälter konstante Wandstärke von 0,6mm, 0,8mm und 1,0mm entsprechend der jeweiligen abzubildenden Versuche zugewiesen.

Die geometrische Beschreibung zu einer gegebenen Phase während der Deformationsgeschichte zu einem Materialpunkt der Schale ist wie folgt definiert:

$$\mathbf{x}(S_i) = \bar{\mathbf{x}}(S_\alpha) + \bar{f}_{33}(S_\alpha) \mathbf{t}_3(S_\alpha) S_3 \quad i = 1, 2, 3 \quad (6.11)$$

Wobei α die Referenzoberflächen der Schale sind welche von 1 bis 2 reichen. In dieser Gleichung ist \mathbf{t}_3 die Normale zur Referenzoberfläche der Schale. Der Gradient der Position ist

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial S_\beta} = \frac{\partial \bar{\mathbf{x}}}{\partial S_\beta} + \bar{f}_{33} \frac{\partial \mathbf{t}_3}{\partial S_\beta} S_3, \quad \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial S_3} = \bar{f}_{33} \mathbf{t}_3, \quad (6.12)$$

mit vernachlässigbaren Werten von \bar{f}_{33} in Bezug auf S_β . S_α sind die lokalen Oberflächenkoordinaten welche als orthogonal und distanzmessend zu dem Referenzsystem angenommen werden. S_3 ist die Koordinate in Dickenrichtung, distanzmessend und orthogonal zu S_α in dem Referenzsystem. Der dicken Zunahmefaktor \bar{f}_{33} wird als unabhängig von S_3 angenommen.

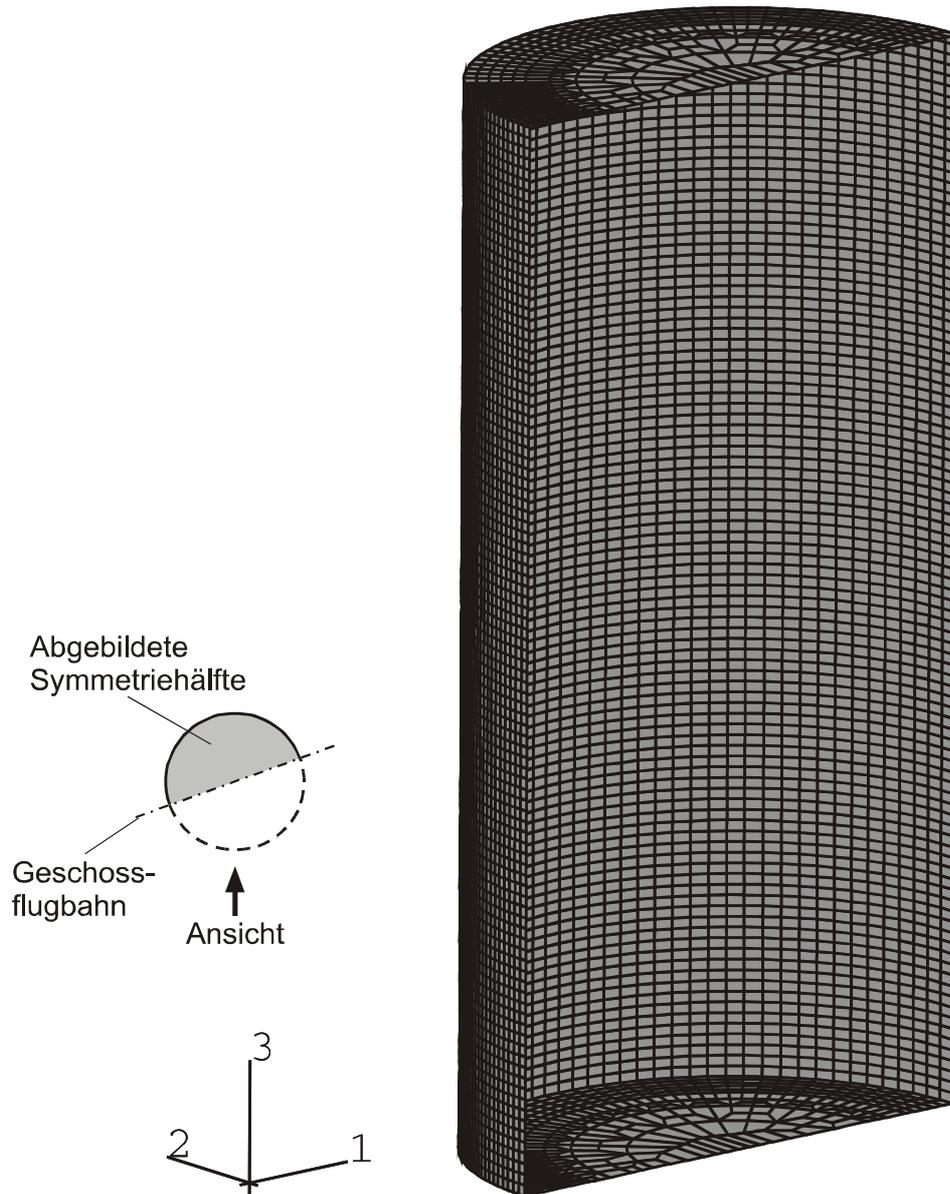


Abb. 6.1 Diskretisierter Behälter aus vierknotigen reduziert integrierten Schalenelementen

Abbildung 6.1 zeigt die so generierte Abbildung des Behälters, bei dem die Grundfläche an jedem Knoten in alle drei Verschiebungsrichtungen festgehalten ist. Oben an dem Behälterdeckel sind diejenigen Knoten in Richtung 1 und 2 (x und y) gehalten, die umlaufend den Übergang von Wand zu Deckel darstellen. Diese Wahl

der Randbedingungen konnte am ehesten die in den Versuchen verwendeten Halterungen wiedergeben. Zusätzlich wurden noch die Symmetrie-Randbedingungen berücksichtigt. So wurden alle Knoten auf der Symmetrieachse in Richtung 2 (y-Richtung) und ebenso die Rotation in Richtung 3 (z-Achse) entlang der Behälterachse, sowie die Rotation um Achse 1 (x-Achse) für den Behälterdeckel und Boden gehalten.

Da der Behälter durch das Projektil perforiert werden sollte und an dieser Stelle lokal mit großen Verformungen gerechnet werden musste, wird ein entsprechend feines Elementnetz an der Beschusseite des Behälters gewählt. Weil von den Versuchen her bekannt war, dass der Behälter an der Beschusseite die größten Verformungen auf Grund der Fluidinteraktion erfährt, wurde in diesem Bereich ein feineres Elementnetz als auf der Behälterrückseite gewählt. In Abbildung 6.1 ist auf Grund der gewählten Perspektive diese Netzverfeinerung schwer zu erkennen, jedoch zeigt Abbildung 7.12a eine Ansicht in der diese Verfeinerung besser dargestellt ist.

6.1.2 Das Fluid im Behälter

Die Flüssigkeit wurde mit dreidimensionalen Kontinuumelementen nach Kirchhoff abgebildet. Die Elemente besitzen acht Knoten mit linearem Verschiebungsansatz und reduzierter Integration. Außerdem wurde für die Elemente ein "adaptives remeshing" verwendet auf das noch folgend eingegangen wird. Die Elemente erlauben finite Dehnungen und Rotationen zur Berechnung von großen Verformungen.

Das Ziel bei der Generierung der Elemente war eine feine Elementvernetzung an dem Übergang von der "Flüssigkeit" zu der Behälterschale, um den Kontakt zwischen den beiden Flächen möglichst gut abbilden zu können. Fast zwangsläufig ist eine feine Elementnetzgenerierung an der Außenfläche mit einer noch feineren Vernetzung zum Kreismittelpunkt hin verbunden, was eine sehr große Elementanzahl erfordert, und die Rechenzeit für einen Beschuss stark verlängert. Daher musste ausgehend von dem Kreismittelpunkt eine Verfeinerung nach außen stattfinden. So ergab sich für die Flüssigkeit folgende Anordnung der Fluidelemente in einer Ebene (siehe Abb. 6.2), die dann mehrfach übereinander kopiert wurde. Die außenliegenden Fluidelemente sind bis auf die Symmetriebedingungen vollständig über Kontaktflächen durch den Behälter gehalten.

Abbildung 6.2 zeigt die Fluidelemente, die sich in dem Behälter befinden.

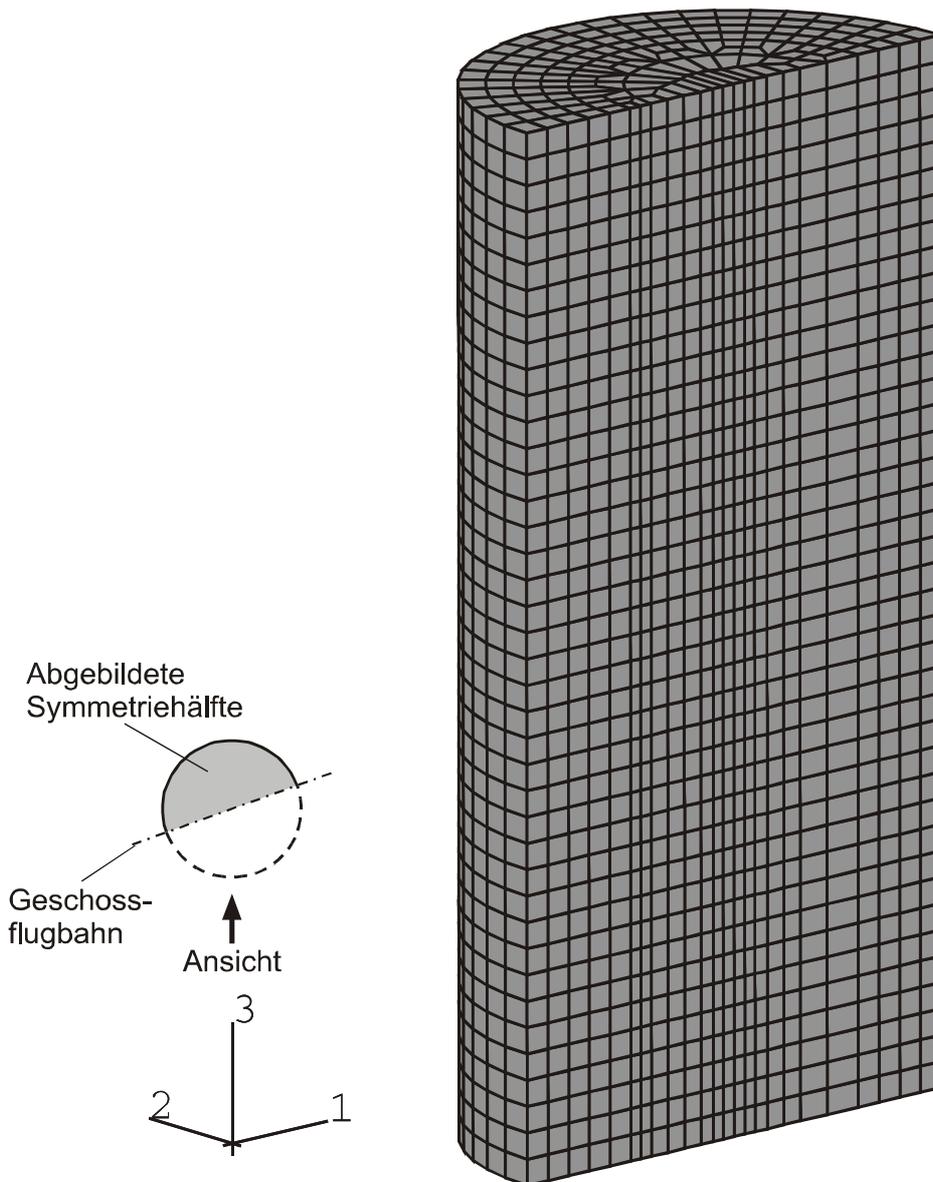


Abb. 6.2 Diskretisiertes Wasser mit acht-knotigen reduziert integrierten Kontinuumelementen

Dieses Elementnetz wurde während der Berechnung durch ein “Adaptive-Remeshing” automatisch nach jedem Zeitschritt neu vernetzt.

Das Programm misst die Abstände der benachbarten Knoten oder die Abstände von einem Knoten zu den benachbarten Massenmittelpunkten der Elemente und verschiebt die Knoten so, dass das Netz harmonisiert wird, um eine große Deformation der Elemente und somit einen Rechenabbruch zu vermeiden. Dabei können drei verschiedene Verschiebungsansätze verwendet werden.

Dieses Elementnetz wurde während der Berechnung durch ein “Adaptive-Remeshing” automatisch nach jedem Zeitschritt neu vernetzt (siehe nächste Seite).

Das Programm misst die Abstände der benachbarten Knoten oder die Abstände von einem Knoten zu den benachbarten Massenmittelpunkten der Elemente und verschiebt die Knoten so, dass das Netz harmonisiert wird, um eine große Deformation der Elemente und somit einen Rechenabbruch zu vermeiden. Dabei können drei verschiedene Verschiebungsansätze verwendet werden.

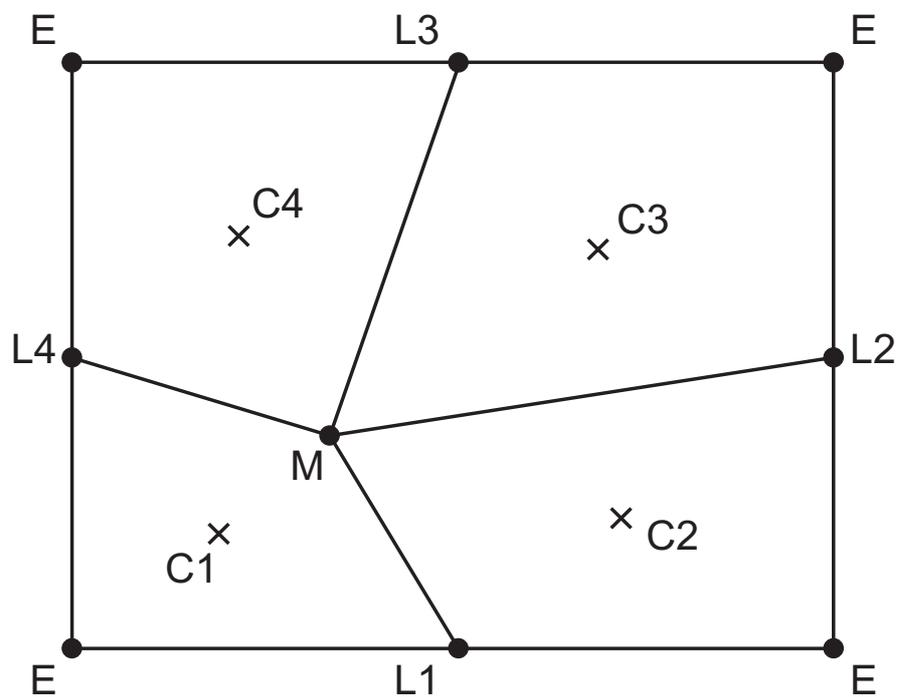


Abb. 6.3 Bewegung eines Knotens während einer Netz-Harmonisierung

Bei der Volumenharmonisierung werden die Abstände vom Knoten M (siehe Abb. 6.3) zu den Volumenmittelpunkten der Elemente C1 bis C4 berechnet und anschließend wird M so verschoben, dass die Mittelpunkte den gleichen Abstand zu M besitzen. In diesem Fall wird der Knoten M nach oben rechts verschoben.

Die Knoten mit dem Buchstaben E sind raumfest, L1 bis L4 hingegen lassen sich auf der Achse zwischen den beiden Eckpunkten verschieben.

Bei der Laplace-Harmonisierung (siehe [44]) werden die Abstände von M zu den Knoten L1 bis L4 gemessen und danach wird M so verschoben, dass die Abstände

annähernd gleich sind. Für die Laplace-Harmonisierung benötigt das Programm die geringste zusätzliche Rechenzeit.

Bei der equipotenzialen Harmonisierung werden nicht nur die Knoten L, sondern auch die Knoten E berücksichtigt, ansonsten funktioniert sie ähnlich wie die Laplace-Harmonisierung. Die equipotenziale Methode ist am rechenaufwendigsten und verlangsamt so die Gesamtrechnung am deutlichsten.

Alle Methoden berücksichtigen die Dreidimensionalität des Systems und ebenso ist bei allen Methoden die Verschiebung der Knoten von einem "Remeshing" zum nächsten auf maximal die Hälfte der Länge zwischen zwei benachbarten Knoten begrenzt. Es ist möglich, die verschiedenen Methoden miteinander zu kombinieren.

Schließlich wurde die Laplace-Harmonisierung gewählt, da bei der Verwendung der anderen beiden Methoden in Vergleichsrechnungen keine besseren Ergebnisse erzielt wurden und die Laplace-Harmonisierung den geringsten Einfluss auf die Rechenzeit hatte.

6.1.3 Das Geschoss

Das Geschoss wurde ebenfalls mit Hilfe der gleichen dreidimensionalen Elemente analog zu den Flüssigkeitselementen generiert. Da die realen Geschosse meist eine Form besitzen, die wenig Stabilität während des Fluges gewährleistet, drehen fast alle konventionellen Projektile um ihre eigene Achse, um an Flugstabilität zu gewinnen. Auf Grund der Symmetriebedingungen war, bei der Nutzung des halben Systems, rechnerisch eine Rotation um die eigene Achse aber ausgeschlossen. Daher musste bei der Abbildung des Geschosses durch die Finite-Elemente-Methode zusätzlich zu den Symmetriebedingungen das Projektil entlang seiner anfänglichen Flugachse (1-Achse) gehalten werden, um ein Kippen des Geschosses während der Durchdringung des Fluids zu verhindern. Abbildung 6.4 zeigt die Kontinuumelemente, die das Projektil abbilden.

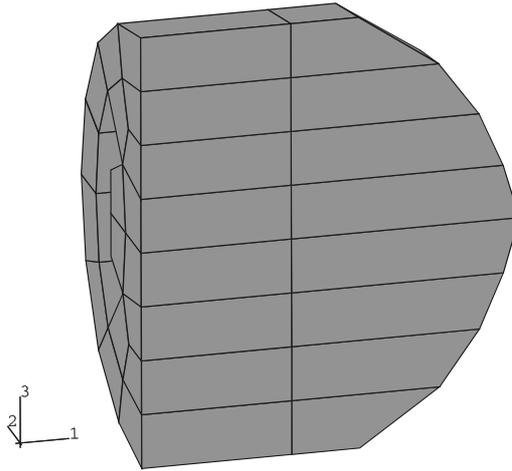


Abb. 6.4 *Generiertes Projektil
mit acht-knotigen
Kontinuumelementen*

6.2 Kontakt zwischen den einzelnen Elementgruppen

Die Kontakte zwischen den einzelnen Elementgruppen wurden entweder durch zwei gegeneinander gerichtete Kontaktoberflächen oder durch eine Kontaktfläche, die einem Kontakt-Node-Set gegenübersteht, abgebildet.

Drei Kontaktsets wurden gebildet.

- Der Kontakt zwischen Behälter und Flüssigkeit, welcher reibungsfrei ist.
- Der Kontakt zwischen Geschoss und Behälter, der ein Durchdringen des Behälters nach dem Materialversagen ermöglicht und bis zur Perforation Reibung zwischen den beiden Oberflächen berücksichtigt.
- Der Kontakt zwischen Geschoss und Flüssigkeit, der als reibungsfrei angenommen wurde und das Verdrängen des Fluids durch das Geschoss abbilden soll.

Um einen Kontakt zwischen Behälter und Flüssigkeit zu simulieren, müssen zwei Oberflächen definiert werden. Diese Oberflächen können entweder durch Einzelelemente oder durch eine Elementengruppe definiert werden. Verwendet man

bei Kontinuumelementen eine Elementgruppe, so erkennt das Programm diejenigen Teilflächen der einzelnen Elemente, die nach außen gerichtet sind, als Oberfläche der gesamten Gruppe. Auf jede an der Oberfläche befindliche Teilfläche der einzelnen Elemente wird eine nach außen gerichtete Normale definiert, die durch die zu der Ebene gehörigen Knoten begrenzt ist (siehe Abb. 6.5).

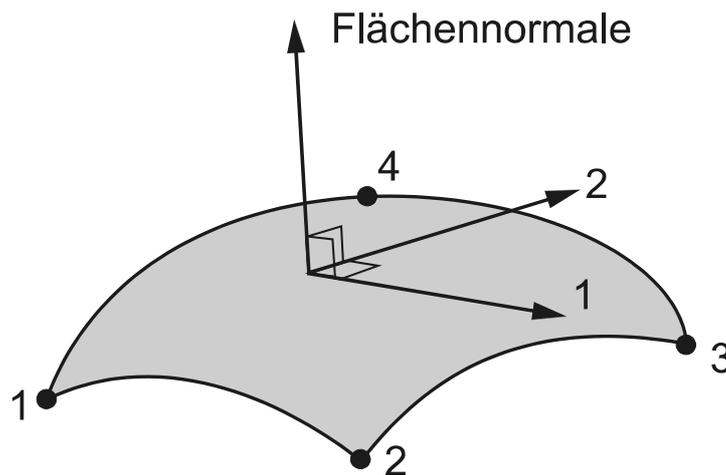


Abb. 6.5 Definition der Flächennormalen bei ABAQUS/Explicit

Bei den für den Behälter verwendeten Schalenelementen musste, da diese schon eine Fläche darstellten, nur noch definiert werden, in welche Richtung die Kontaktnormale gerichtet sein soll.

Bei der Verwendung eines Master-Slave-Kontakts (siehe Abb. 6.6) ist es notwendig, zu definieren, welche Kontaktoberfläche von der anderen bereichsweise durchdrungen werden darf. Dabei wird diejenige Oberfläche, welche die höhere Strukturfestigkeit besitzt, als Master-Oberfläche gewählt. Etwas anders liegen die Verhalten bei der vorliegenden Fluid-Struktur Interaktion. Da einerseits an der Behältervorderseite (Auftreffstelle des Geschosses) das Wasser von dem Behälter verdrängt wird und andererseits auf der Behälterrückseite das Wasser den Behälter verdrängt, ist es notwendig, entweder einen gleichwertigen Master-Slave-Algorithmus anzusetzen oder die Master- und Slave-Zuweisungen der Oberflächen für die Vorder- und Rückseite des Behälters zu tauschen. Ein gleichwertiger Master-Slave-Algorithmus bedeutet, dass die Knoten von der Master-Oberfläche genauso weit in die Slave-Oberfläche eindringen können wie umgekehrt. Da sich hier während des Belastungsvorganges die Verdrängungsrichtungen der Oberflächen

ändern, werden gleichwertige Master- und Slave-Oberflächen ohne Reibung verwendet.

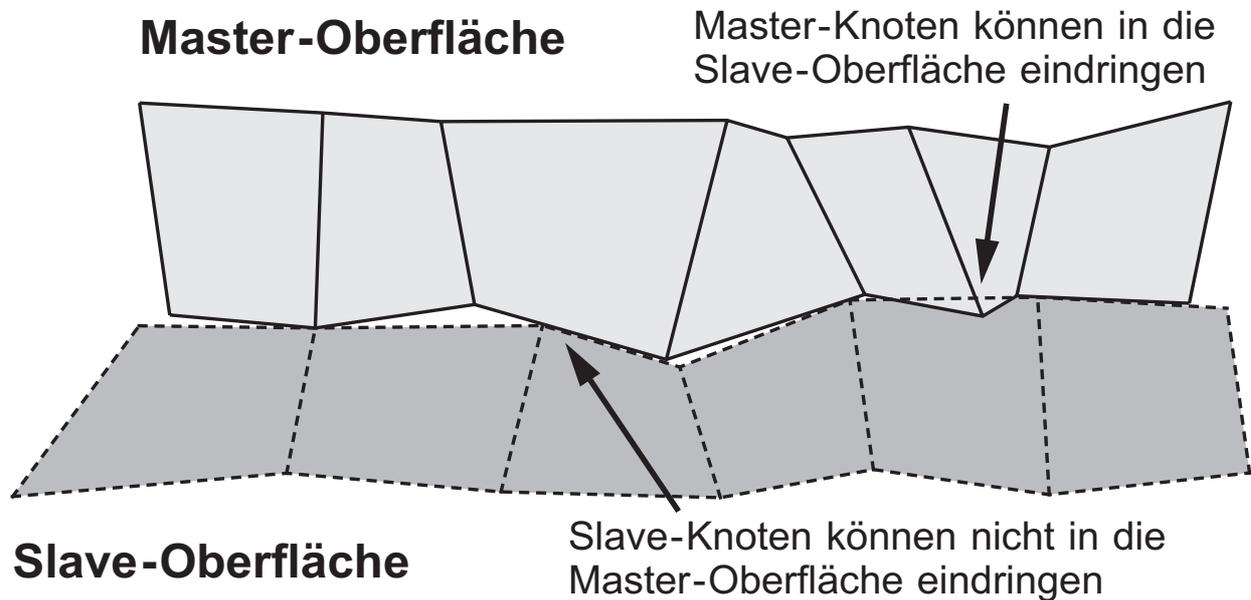


Abb. 6.6 *Verwendeter Master-Slave Kontakt zur Abbildung des Kontakts zwischen Behälter und Flüssigkeit*

Bei den Rechenläufen stellte sich heraus, dass der Master-Slave-Algorithmus die vorgegebenen Ziele gut abbilden konnte. Auch die feinere Vernetzung des Behälters im Gegensatz zu den Fluidelementen (2,5 zu 1) führte zu keinen Problemen.

Der Kontakt zwischen dem Geschoss und dem Behälter wurde ebenfalls durch ein Master-Slave-Kontaktpaar abgebildet. Hier wurde allerdings eindeutig die Geschossoberfläche als Master- und die Behälteroberfläche als Slave-Oberfläche definiert. Um die Rechenzeit nicht unnötig zu verlängern, wurde nur der Bereich um das Ein- und Ausschussloch bei dem Behälter als Slave-Oberfläche gewählt. Zwischen dem Projektil und dem Behälter wurde ein Reibbeiwert von $\mu = 0.15$ [55] angesetzt.

Der Kontakt zwischen dem Geschoss und der Flüssigkeit wurde durch eine Kontaktfläche und einem Contact-Node-Set simuliert. Auch hier stellt das Projektil die Master-Oberfläche dar. Die Flüssigkeit ist "Slave contact boundary". Anders als bei den zuvor beschriebenen Kontakt-Oberflächen ermittelt hier das Programm, ob die ausgewählten Knoten in die Master-Oberfläche eindringen.

6.3 Stoffgesetze für Behälter Fluid und Pro ektil

Es werden folgende Eigenschaften der Elemente gefordert:

- Das Tragverhalten einer Behälterschale unter Berücksichtigung der Schalentheorie soll realitätsnah abgebildet werden.
- Das elasto-plastische Materialverhalten des Stahls soll unter Berücksichtigung der dynamischen Einflüsse abgebildet werden.

Die Plastizitätsmodelle bei ABAQUS/Explicit liegen in inkrementeller Form vor, wobei die Dehnungen in einen elastischen und einen plastischen Anteil aufgeteilt werden.

Zur Abbildung des Stahlbehälters wurde ein elasto-plastisches Stoffgesetz unter Berücksichtigung der Dehnratenabhängigkeit auf der Grundlage der Misesschen Fließbedingung mit isotroper Verfestigung mit dem Modell der “Johnson-Cook Plasticity” verwendet.

Wie Abbildung 6.7 zeigt, ist die von Misessche Fließfläche im Hauptspannungsraum ein Zylinder, der durch

$${}^tF = \frac{1}{2} {}^tS_{ij} {}^tS_{ij} - {}^t\kappa \quad i, j = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (6.13)$$

mit

$${}^t\kappa = \frac{1}{3} {}^t\sigma_y^2 \quad (6.14)$$

gegeben ist [12]. Dabei gilt für den Spannungsdeviator

$${}^tS_{ij} = {}^t\sigma_{ij} - \frac{{}^t\sigma_{mm}}{3} \delta_{ij} \quad ; \quad {}^t\sigma_{mm} = \sum_m {}^t\sigma_{mm} \quad (6.15)$$

wobei ${}^t\sigma_y$ die Fließspannung zur Zeit t ist. Diese Fließspannung ist eine Funktion der plastischen Arbeit pro Volumeneinheit wobei $\bar{\epsilon}^{pl}$ die plastischen Dehnungen sind.

$${}^t W_P = \int_0^{{}^t \bar{e}_{ij}^{pl}} \sigma_{ij} d\bar{e}_{ij}^{pl} \quad (6.16)$$

Die Berechnung von ${}^t s_{ij}$ und ${}^t p_{ij}$ liefert

$${}^t s_{ij} = {}^t s_{ij} = \frac{\partial {}^t F}{\partial {}^t \sigma_{ij}} \quad ; \quad {}^t p_{ij} = {}^t H {}^t \sigma_{ij} = \frac{\partial {}^t F}{\partial {}^t \bar{e}_{ij}^{pl}} \quad (6.17)$$

wobei

$${}^t H = \frac{2}{3} {}^t \sigma_y \frac{d\sigma_y}{dW_P} \quad (6.18)$$

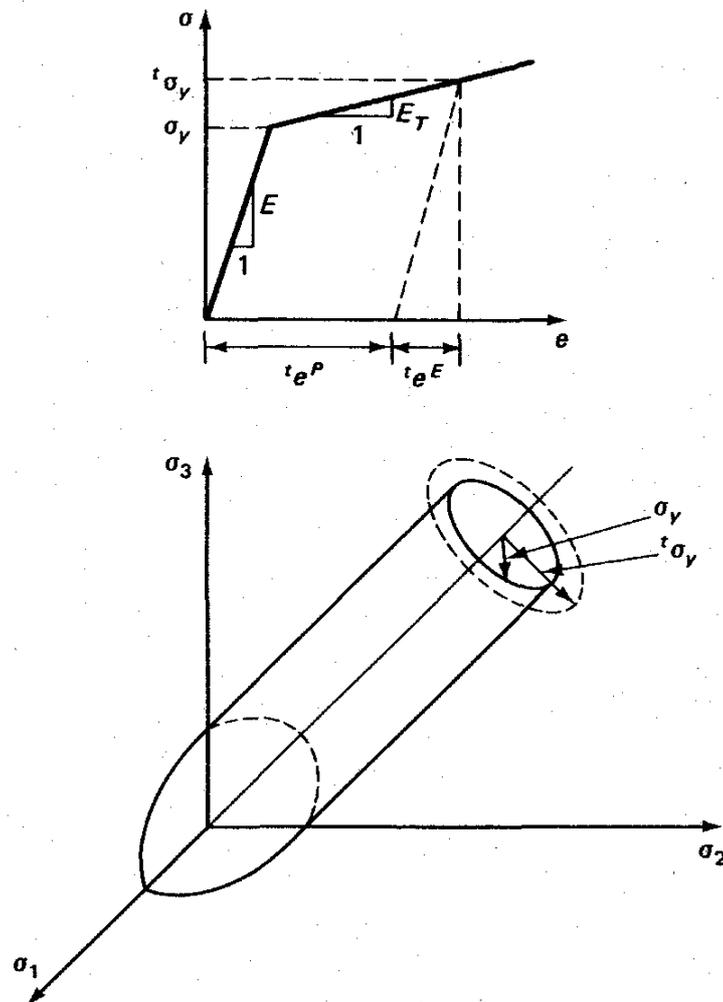


Abb. 6.7 Von Misessche Fließbedingung bei isotroper Verfestigung [aus 12]

Für idealplastische Materialien ist die Variable tH Null. Für Materialien, die sich durch Arbeit verfestigen, kennt man gewöhnlich den in einem Zugversuch gemessenen Verzerrungs-Verfestigungsmodul E_T (siehe Abb. 6.7); dann gilt.

$${}^tH = \frac{2}{3} \frac{E E_T}{E - E_T} \quad (6.19)$$

Bei den Johnson-Cook Stoffgesetzen wird die statische Streckgrenze σ^0 der isotropen Verfestigung nach [44] wie folgt angenommen:

$$\sigma^0 = [A + B (\bar{\varepsilon}^{pl})^n] (1 - \theta^m) \quad (6.20)$$

Dabei ist ε^{pl} die äquivalente plastische Dehnung. A , B , n und m sind Materialparameter, die bei oder unter der Übergangstemperatur $\theta_{transition}$ gemessen wurden. θ ist eine dimensionslose Temperatur, die wie folgt definiert ist

$$\theta \equiv \begin{cases} 0 & \text{für } \theta < \theta_{transition} \\ \frac{(\theta - \theta_{transition})}{(\theta_{melt} - \theta_{transition})} & \text{für } \theta_{transition} \leq \theta \leq \theta_{melt} \\ 1 & \text{für } \theta > \theta_{melt} \end{cases} \quad (6.21)$$

wo θ die momentane Temperatur ist, θ_{melt} die Schmelztemperatur ist und $\theta_{transition}$ die Temperatur ist bei der noch kein Temperatureinfluss für die Streckgrenze des Materials gegeben ist. Das Johnson-Cook Modell ist für Temperaturen bis zum Schmelzpunkt gültig. Ist die Schmelzgrenze erreicht, so schmilzt das Material und verhält sich wie eine Flüssigkeit. In diesem Fall versagt dieser Materialpunkt und die Spannungen in diesem Punkt werden auf Null gesetzt. Die Materialparameter werden nach [44] mit $A=175\text{kN/cm}^2$, $B=380\text{kN/cm}^2$, $n=0,32$, $m=0,55$, $\theta_{melt}=1538\text{ C}$ und $\theta_{transition}=25\text{ C}$ angenommen.

Das Johnson-Cook Stoffgesetz gibt die Möglichkeit, eine Dehnratenabhängigkeit abzubilden [44]. Dabei wird diese wie folgt angenommen

$$\bar{\sigma} = \sigma^0(\bar{\epsilon}^{pl}, \theta) R(\dot{\epsilon}^{pl}) \quad (6.22)$$

mit

$$\dot{\epsilon}^{pl} = \dot{\epsilon}_0 \exp\left[\frac{1}{C}(R-1)\right] \quad \text{für } \bar{\sigma} \geq \sigma^0. \quad (6.23)$$

Dabei ist σ die Streckgrenze bei einer Dehnrage ungleich Null, $\dot{\epsilon}^{pl}$ ist die äquivalente plastische Dehnrage, $\dot{\epsilon}_0$ und C sind Materialparameter, die bei der Übergangstemperatur gemessen werden müssen, $\sigma^0(\bar{\epsilon}^{pl}, \theta)$ ist die statische Streckgrenze wobei für $\bar{\epsilon}^{pl}$ ein Wert von 10% angenommen wurde und $R(\dot{\epsilon}^{pl})$ die Rate von der Streckgrenze bei einer Dehnrage ungleich Null zu der statischen Streckgrenze.

Für die Dehnrageabhängigkeit ergibt sich dann die Streckgrenze zu

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n] \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right] (1 - \theta^m). \quad (6.24)$$

Ebenso läßt sich für das Johnson-Cook Plastizitätsmodell ein Versagenskriterium angeben. Bei dem Versagenskriterium wird eine Spannungsgrenze bestimmt, die mit Hilfe des Hydrostatischen Drucks ermittelt wird. Wird diese Grenze erreicht, so versagt dieser Materialpunkt und die Spannungen werden an diesem Punkt zu Null gesetzt.

An die Elemente zur Abbildung der Flüssigkeit werden folgende Anforderungen gestellt:

- Nahezu Inkompressibel
- Keine Drücke unterhalb von -1,0 bar zulässig, da bei niedrigeren Drücken Wasserdampfbildung einsetzt

Die Mie-Gruneisen-Zustandsgleichung hat einen linearen Energieansatz und wird normalerweise in der Form

$$p - p_H = \Gamma \rho (E_m - E_H) \quad (6.25)$$

abgebildet. Dabei sind p_H und E_H Hugoniot-Druck und -Energie. Beides sind Funktionen, die ausschließlich von der Dichte abhängig sind. E_m ist die innere Energie pro Masseneinheit, ρ ist die Dichte des Materials, und Γ die Grüneisen-Rate, die wie folgt definiert ist

$$\Gamma = \Gamma_0 \frac{\rho_0}{\rho}, \quad (6.26)$$

wobei Γ_0 eine Materialkonstante und ρ_0 die Anfangsdichte darstellt.

Die Hugoniot-Energie E_H hängt mit dem Hugoniot-Druck folgendermaßen zusammen:

$$E_H = \frac{p_H \eta}{2 \rho_0}, \quad (6.27)$$

wobei η die nominale volumetrische Druckdehnung ausdrückt.

$$\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \quad (6.28)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen 6.23 und 6.24 erhält man

$$p = p_H \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m. \quad (6.29)$$

Die Zustandsgleichung und die Energie-Funktion stellen eine kombinierte Gleichung für Druck und Innere Energie dar. ABAQUS/Explicit löst diese Gleichungen zur gleichen Zeit für jeden einzelnen Materialpunkt. Die lineare Form dieser Zustandsgleichung wird in der folgenden Form beschrieben

$$p = f + g E_m. \quad (6.30)$$

Hierbei stellen $f(\rho)$ und $g(\rho)$ Funktionen dar, die nur von der Dichte ρ abhängig sind (siehe [44]).

Zur Abbildung eines Fluids wird die lineare $U_s - U_p$ Variante der Hugoniot-Kurve,

welche wie folgt definiert ist verwendet:

$$p_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \quad (6.31)$$

Dabei definieren c_0 und s den linearen Ansatz zwischen der Schockgeschwindigkeit U_s und der Partikelgeschwindigkeit U_p folgendermaßen:

$$U_s = c_0 + s U_p \quad (6.32)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 6.28 erlangt man die lineare Hugoniotform

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m. \quad (6.33)$$

$\rho_0 c_0^2$ ist gleich der elastischen Bulk Viscosity bei kleinen Dehnungen. Die Anfangs-Energie pro Masseneinheit E_{m0} wird bei der linearen $U_s - U_p$ Form der Hugoniot-Kurve zu Null gesetzt.

Der Grenzdruck wird bei dieser “equation of state” durch eine der folgenden Gleichungen

$$\eta_{\text{lim}} = \frac{1}{s} \quad (6.34)$$

oder

$$\rho_{\text{lim}} = \frac{s \rho_0}{s - 1} \quad (6.35)$$

bestimmt. Diese Grenzen stellen die Unterdruckgrenze dar. Unterhalb dieser Grenze werden negative Schallgeschwindigkeiten für das Material errechnet.

So kann bei der Zustandsgleichung eine lineare Druck/Volumenänderung abgebildet werden. Es werden nur Druckspannungen errechnet und Schubeinflüsse vernachlässigt.

Für die Abbildung des Behälterbeschusses mit seinen unterschiedlichen Versagensmodi des Behälters war es nebensächlich, das Geschoss mit einem

aufwendigeren Materialgesetz abzubilden. Daher wurde der Einfluss eines möglichen Schmelzens und einer Fragmentierung des Geschosses vernachlässigt. Bei der Abbildung des Projektils wurde ein elasto-plastisches Materialgesetz, das analog zu dem verwendeten Stoffgesetz für den Behälter auf der Grundlage der Misesschen Fließbedingungen beruht, verwendet.

7 Vergleich von Versuchsergebnissen und FEM

In diesem Kapitel werden Ergebnisse aus der Versuchsauswertung (Kapitel 5.6) mit den aus den Finite-Elemente-Berechnungen gewonnenen Werten verglichen. Die Berechnungen erfolgten auf der Grundlage der in Kapitel 6 ausgeführten Materialgesetze und Geometrien.

Dynamische Versuche beinhalten die Schwierigkeit, dass es leicht zu Streuungen der Messergebnisse von 20 % kommen kann. Daher kann eine Nachrechnung eines Versuchs mit Hilfe der FEM nur eine Grundtendenz darüber vermitteln, wie das Tragverhalten eines Versuches aussehen kann.

7.1 Vergleich des Beschusses von leeren Behältern und FEM

Einige gewonnene Ergebnisse aus den FEM-Rechnungen sind folgend den Versuchsauswertungen für den Beschuss der leeren Behälter Beh.0 und Beh.6 gegenübergestellt worden.

Zunächst sollen die Verformungen am Einschussbereich der Behälter Beh.0 und Beh.6 verglichen werden. Dabei sei anzumerken, dass eine Beobachtung der Verformungen über die Zeit in den Versuchen nicht durchgeführt wurde, allerdings lassen sich die endgültigen Verformungen an der Behälterwand mit denen aus der Berechnung vergleichen.

Abbildung 7.1 zeigt die errechneten Verformungen des Einschussbereichs der Behältervorderseite für den leeren Behälter Beh.0. Die anfängliche Projektilgeschwindigkeit betrug 380 m/s und die Behälterwanddicke $1,0 \text{ mm}$. Zur besseren Darstellung der Verformungen ist von dem $0,6 \text{ m}$ hohen Behälter nur der mittlere Bereich von $0,2 \text{ m}$ - $0,4 \text{ m}$ Höhe abgebildet worden. Die Verformungen der Behälterwand sind in Millimetern angegeben, was einer tausendfachen Vergrößerung der Bezugsgrößen gleich kommt. Der Schusskanal des Projektils ist grau dargestellt. In der Abbildung 7.1 sind die Verformungen zu drei verschiedenen Zeitpunkten angegeben. $0,66 \text{ ms}$ nachdem das Projektil auf die Behälterwand auftrifft, stellen sich die endgültigen Verformungen an der Vorderseite ein. Danach ist lediglich ein Ausschwingen der Behältervorderseite festzustellen.

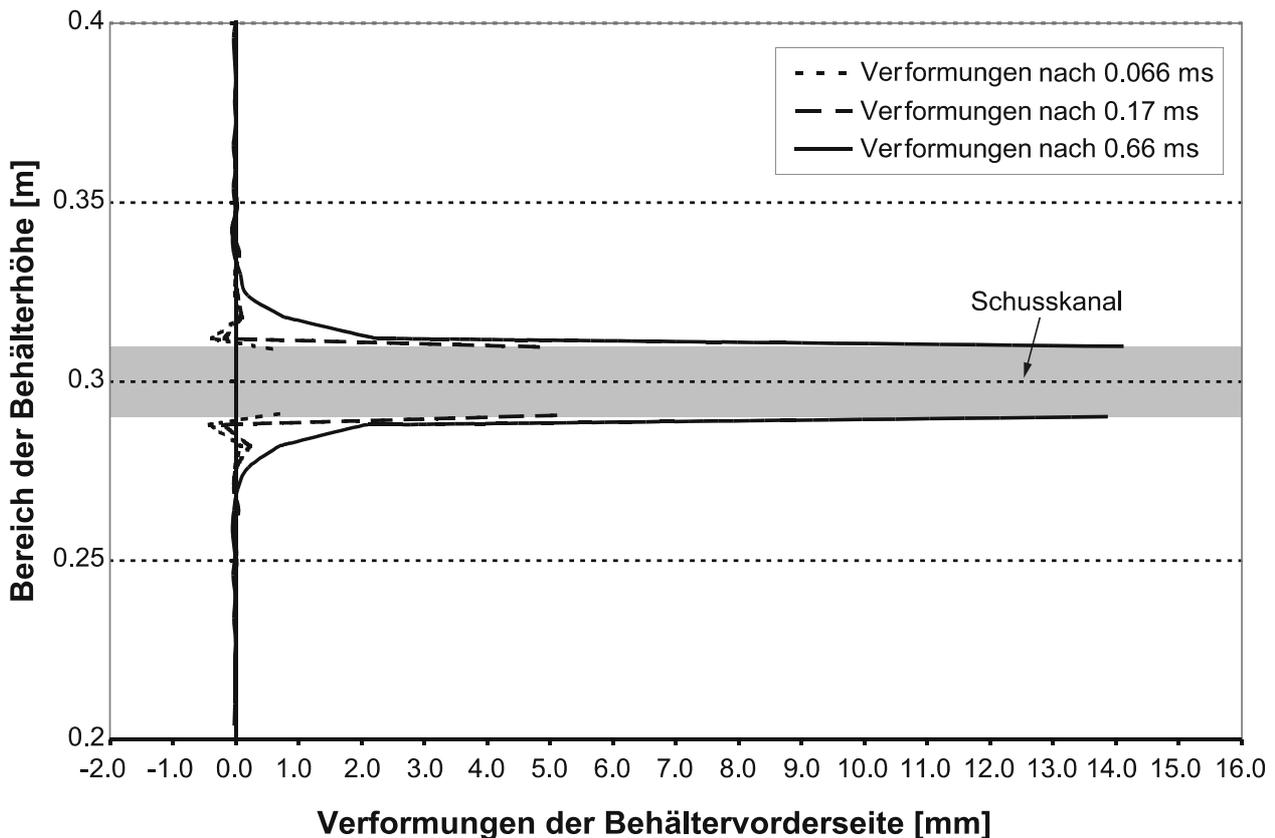


Abb. 7.1 Berechnung der Verformungen der Behältervorderseite zu verschiedenen Zeitpunkten, für einen leeren Behälter (Wanddicke = 1,0 mm), der mit einer Projektilgeschwindigkeit von 380 m/s beschossen wurde (vgl. Beh.0)

Die in dem Schusskanal liegenden Elemente, die unmittelbar nach dem Auftreffen des Projektils auf die Behälterwand auf Grund der vorgegebenen Materialeigenschaften versagen, sind nicht dargestellt worden. Vergleicht man die Verformungen zu den ersten beiden Zeitpunkten (0,066 ms und 0,17 ms) mit den endgültigen Verformungen zum Zeitpunkt 0,66 ms, so ist festzustellen, dass sich der Behälter zunächst ober- und unterhalb der Auftreffstelle des Projektils nach außen, wie bei einem ideal-elastischen Balken (vgl. Schlüter [82]), verformt. Das Schwingverhalten läßt sich in drei Phasen unterteilen (siehe Abbildung 7.2). In der ersten Phase (t_1) bleibt die Beanspruchung auf den direkten Stoßbereich beschränkt. Es treten örtliche Verformungen auf. In der zweiten Phase (t_2) breitet sich die Beanspruchung mit endlicher Geschwindigkeit im Balken aus, bis sie die Auflager erreicht. In der dritten Phase (t_3) schwingt der Balken aus.

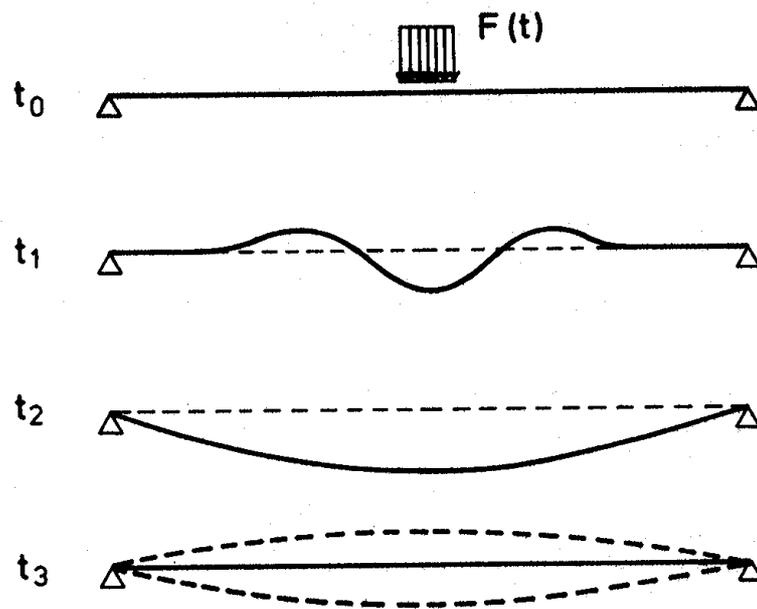


Abb. 7.2 Schwingphasen bei einem Balken [80]

Bei einer stoßartigen Belastung auf einen Körper, der eine sehr viel größere Bauteillänge als Bauteildicke aufweist, tritt die maximale Querkraft im Lasteinleitungsbereich der Stoßkraft auf. Massenkräfte im unmittelbaren Stoßbereich vermindern die effektiven Querkräfte. Die Maximalwerte der Biegemomente sind dagegen abhängig von der Lagerungsart und der Spannweite. In der Regel treten sie zeitverschoben nach der maximalen Stoßkraft auf [4,13,14,47,78,82]. Aus diesem Grund wird in der frühen Phase des Beschusses ein lokales Scherversagen und zu einem späteren Zeitpunkt ein Schalen-Zugversagen begünstigt.

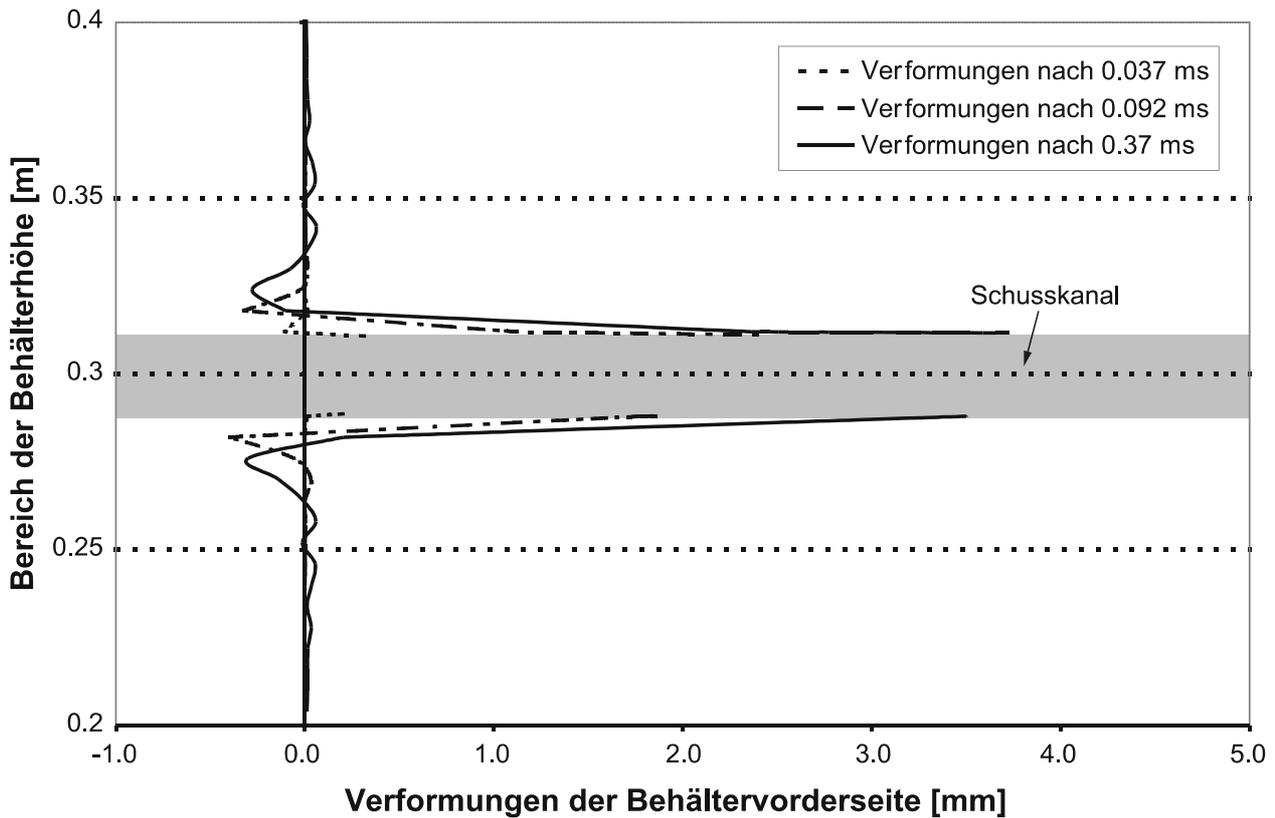


Abb. 7.3 Berechnung der Verformungen der Behältervorderseite zu verschiedenen Zeitpunkten, für einen leeren Behälter (Wanddicke = 1,0 mm), der mit einer Projektilgeschwindigkeit von 730 m/s beschossen wurde (vgl. Beh.6)

Abbildung 7.3 zeigt die berechneten Verformungen der Behältervorderseite für einen Behälter, der mit einer anfänglichen Projektilgeschwindigkeit von 730 m/s beschossen wird und eine Behälterwanddicke von 1,0 mm besitzt (vgl. Beh.6). Auch hier ist zur besseren Darstellung nur der mittlere Bereich der Behältervorderseite dargestellt worden. Der Penetrationsvorgang ist zu drei verschiedenen Zeitpunkten abgebildet, wobei die Verschiebungen nach 0,37 ms den endgültigen Verformungen gleichkommen. Auf Grund der größeren Projektilgeschwindigkeit stellen sich die endgültigen Verformungen zu einem früheren Zeitpunkt als bei dem Beschuss von Beh.0 ein.

Die elastischen und plastischen Verformungen während der Perforation der Behälterwand hängen von verschiedenen Faktoren ab. Nimmt man nur die Impact-Geschwindigkeit als variable Größe, wie hier zuvor dargestellt, an, so sind die Verformungen von dem Energieeintrag in die Zielstruktur und von der Eigenfrequenz der Zielstruktur abhängig. An der ballistischen Grenze des Behälters ist der Energieeintrag am größten und somit treten dort auch die größten Verformungen auf.

Da bei 380 m/s die ballistische Grenze bereits überschritten ist nehmen die Verformungen bei größer werdenden Impact-Geschwindigkeiten weiter ab.

Die nach dem Beschuss in den Versuchen gemessenen endgültigen Verformungen am Einschussloch der Behälternvorderseite der Behälter Beh.0 und Beh.6 zeigen eine gute Übereinstimmung mit den FEM-Rechnungen.

Vergleich der Verformungen am Einschussloch	Behälter Beh.0 Projektilgeschwindigkeit $t v_0 = 380 \text{ m/s}$	Behälter Beh.6 Projektilgeschwindigkeit $v_0 = 733 \text{ m/s}$
Versuch	14 mm	3 mm
Rechnung	13 mm	4 mm

Tab. 7.1 Vergleich der Verformungen am Einschussloch

Tabelle 7.1 zeigt die ermittelten bleibenden Verformungen von Versuch und FEM-Rechnung an dem Einschussloch der Behälternvorderseite für die Behälter Beh.0 und Beh.6.

Abbildung 7.4 zeigt vier Teilbilder, welche eine Teilvergrößerung des vollständig generierten FEM-Netzes darstellen. Links neben dem Teilbild a) ist der heraus vergrößerte Bereich aus dem vollständigen FEM-Netz und darunter die Draufsicht auf die nebenstehenden Teilbilder abgebildet. Die Teilbilder zeigen die effektiven Dehnungen in der Behälterwand. Die Symmetrieachse des FEM-Netzes ist leicht gedreht, damit nicht nur die Dehnungen der Behälternvorderseite, sondern auch die der Behälterrückseite zu sehen sind. Der ungedehnte Bereich des Behälters ist ebenso wie das Projektil schwarz abgebildet. Die Teilbilder a) und b) zeigen den Perforationsvorgang der Behälternvorderseite und die Teilbilder c) und d) den Perforationsvorgang der Behälterrückseite. In den Teilbildern c) und d) sind jeweils acht Elemente der Behälternvorderseite herausgelöscht worden, da in diesen Elementen die vorgegebene Materialfestigkeit überschritten wurde. Dieser Berechnung liegt ebenfalls die Belastung und die Geometrie des Versuchs Beh.6 zu Grunde.

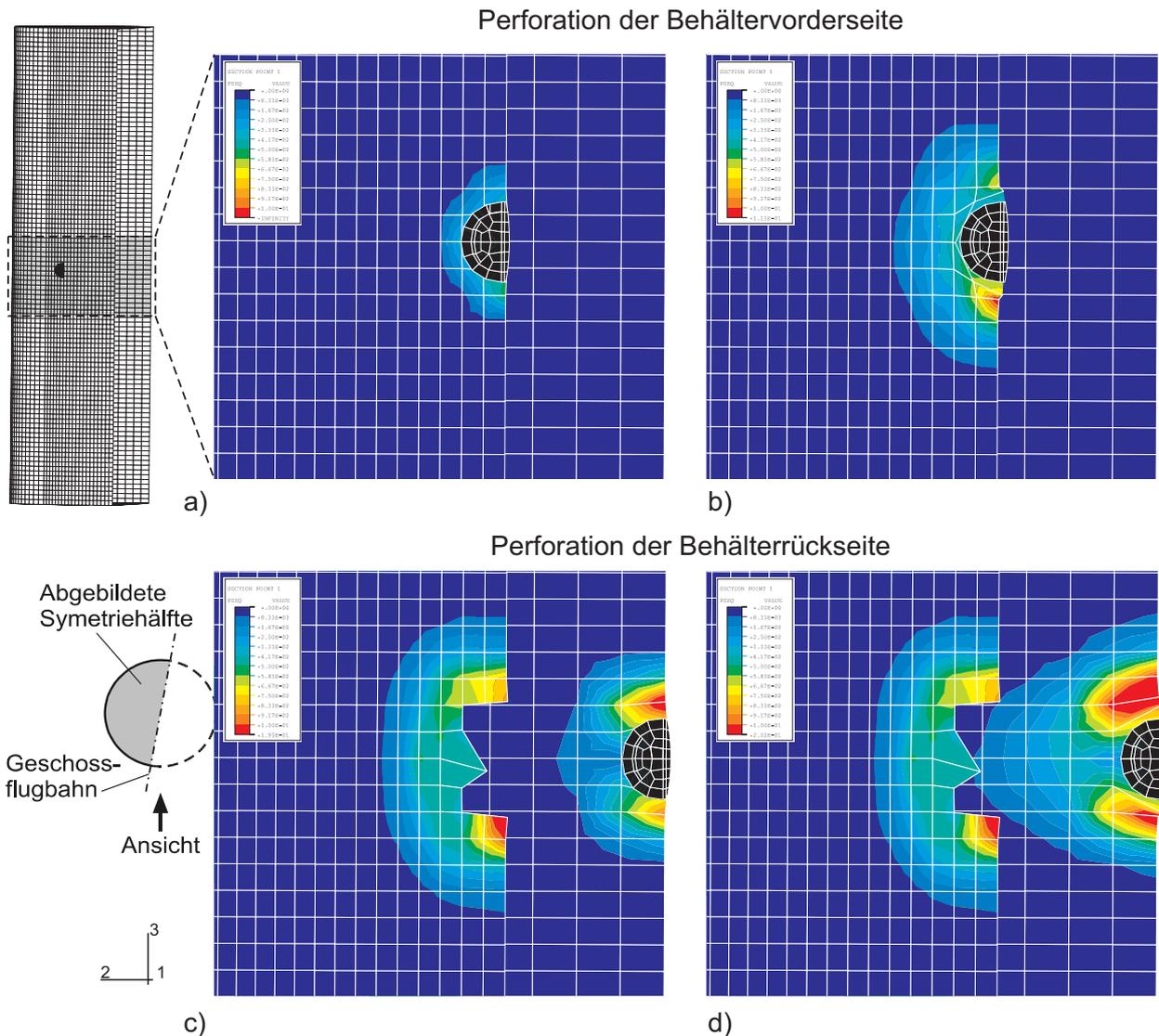


Abb. 7.4 Berechnung der effektiven Dehnungen in der Behältervorder- und Rückseite für den Beschuss von einem leeren Behälter (vgl. Beh.6)

Die Verformungen der Behältervorder- wie Rückseite gleichen den tatsächlich im Versuch (Beh.6) festgestellten Werten auch bei einem Vergleich mit den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen überaus gut (vgl. Tab. 7.1).

Als nächstes soll die Projektil-Geschwindigkeit für den Behälter Beh.6 mit der FE-Rechnung verglichen werden.

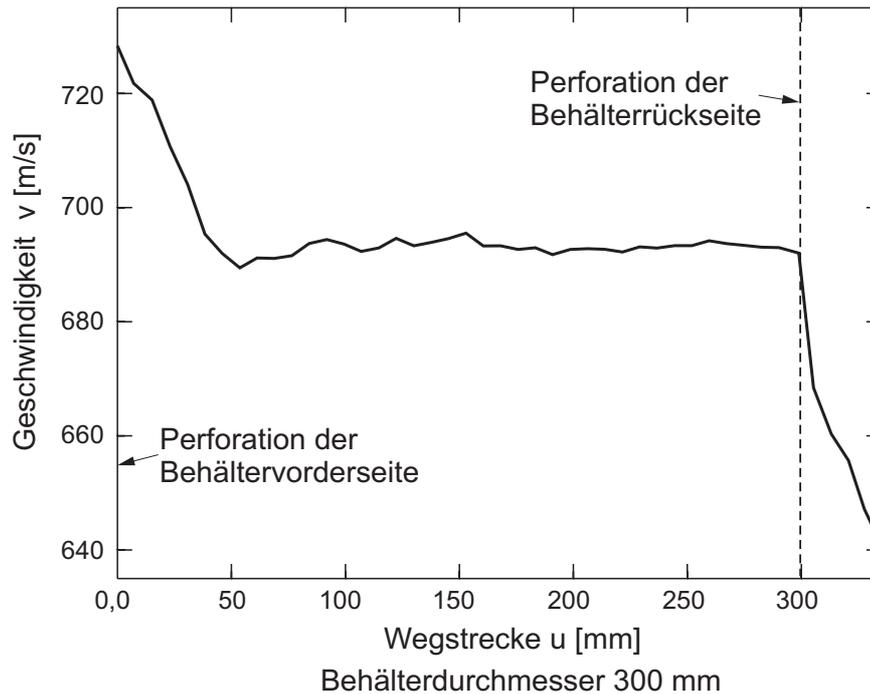


Abb. 7.5 Berechnung der Projektil-Geschwindigkeit für den Beschuss eines leeren Behälters mit 1,0 mm Wanddicke (vgl. Versuch Beh.6)

Abbildung 7.5 zeigt die Berechnungen der Projektil-Geschwindigkeit für den Beschuss eines leeren Behälters. Belastung und Geometrie sind für die Berechnung aus dem Versuch Beh.6 übernommen worden. Die anfängliche Projektilgeschwindigkeit vor dem Auftreffen auf den Behälter betrug 730 m/s und die Behälterwand-dicke 1,0 mm.

Vergleich der Projektil-Geschwindigkeit von Versuch Beh.6 und Rechnung ($v_0 = 733 \text{ m/s}$)	Projektil-Geschwindigkeit nach der Perforation der Behältervorderseite	Projektil-Geschwindigkeit nach der Perforation der Behälterrückseite
Versuch Beh.6	688 m/s	640 m/s
Rechnung	693 m/s	642 m/s

Tab. 7.2 Vergleich der Projektil-Geschwindigkeit nach der Perforation der Behältervorder- und Rückseite von Versuch Beh.6 und Rechnung

Die in Abbildung 7.5 benannte Wegstrecke (X-Achse) ist gleichbedeutend mit der von dem Projektil zurückgelegten Strecke während des Beschusses. Bei dem Wert

0.0 m trifft das Projektil auf die Behältervorderseite und bei dem Wert 0,3 m auf die Behälterrückseite auf. Mit Abschluss der Perforation der Behältervorderseite hat das Projektil eine Geschwindigkeit von ca. 693 m/s . Nach der Perforation der Behälterrückseite beträgt die Projektilgeschwindigkeit 642 m/s .

Tabelle 7.2 zeigt einen Vergleich der Projektil-Geschwindigkeiten nach der Perforation der Behältervorder- und Rückseite von Versuch Beh.6 und FEM-Rechnung. Dabei weisen die errechneten Werte nur eine sehr geringe Abweichung im Vergleich zu dem Versuch auf. Eine so genaue Übereinstimmung der Ergebnisse ist für die Berechnung von dynamischen Versuchen ungewöhnlich.

7.2 Vergleich des Beschusses von wassergefüllten Behältern und FEM

Einige Ergebnisse aus den durchgeführten Versuchen, bei denen wassergefüllte Behälter beschossen wurden, sind folgend FE-Rechnungen gegenüber gestellt worden.

Zunächst wurden einige Dehnmessungen aus Versuch Beh.5 mit den Berechnungen verglichen.

Abbildung 7.6 zeigt die in dem Versuch Beh.5 gewonnenen Messwerte des DMS-8 und den Vergleich zur FEM-Rechnung (vgl. Kapitel 5.6.2). Bei dem Versuch Beh.5 handelte es sich um einen mit Wasser gefüllten Behälter mit einer Wanddicke von 1,0 mm, der mit einem 721 m/s schnellen Projektil beschossen wurde. In dem Versuch wird bei dem Wert von 4 % Dehnung der DMS-8 an der Behältervorderseite zerstört und die Behälterwand reißt bis zu dieser Stelle auf. Die Werte aus der Rechnung erreichen annähernd gleichzeitig (nach 0,31 ms) mit dem im Versuch eine Dehnung von 4 % für diese Behälterstelle. Für den Versuch wie auch in der Rechnung wurden hier die effektiven Umfangsdehnungen des mittleren Integrationspunktes der Schalenelemente verglichen, da hier der Einfluss der Biegeanteile bei den kleinen Behälterwanddicken als gering erachtet werden kann.

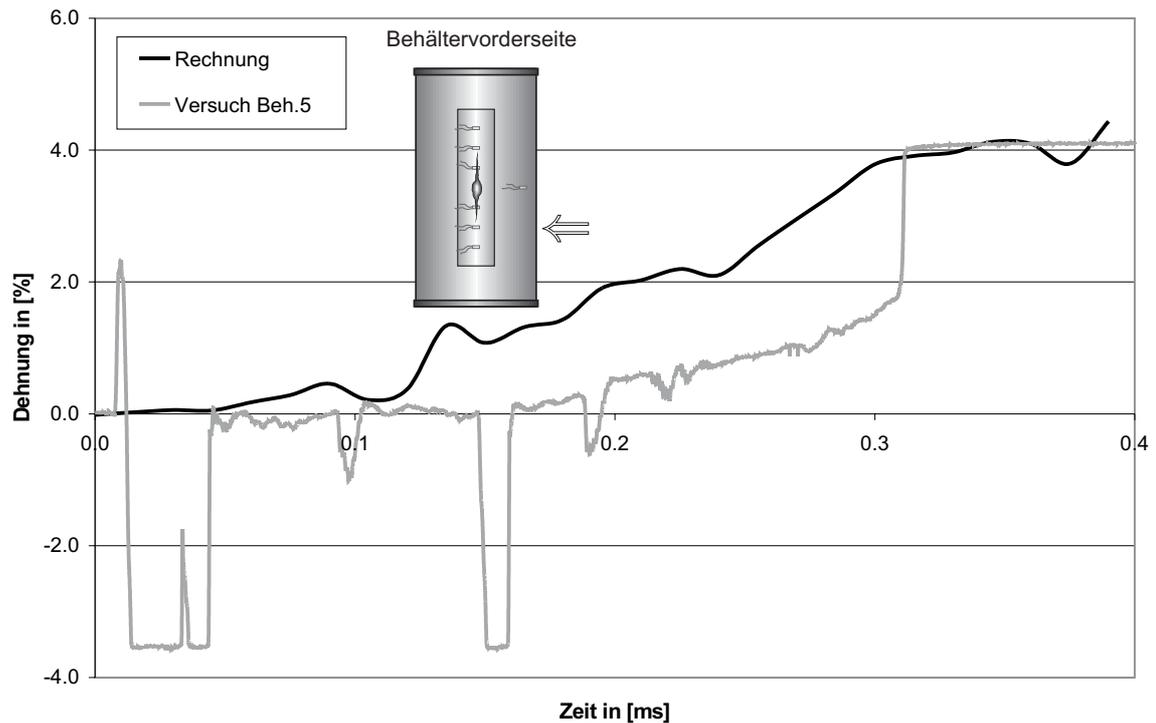


Abb. 7.6 Vergleich der beim Versuch Beh.5 aufgezeichneten effektiven Dehnungen von DMS-8 an der Behältervorderseite und der Rechnung

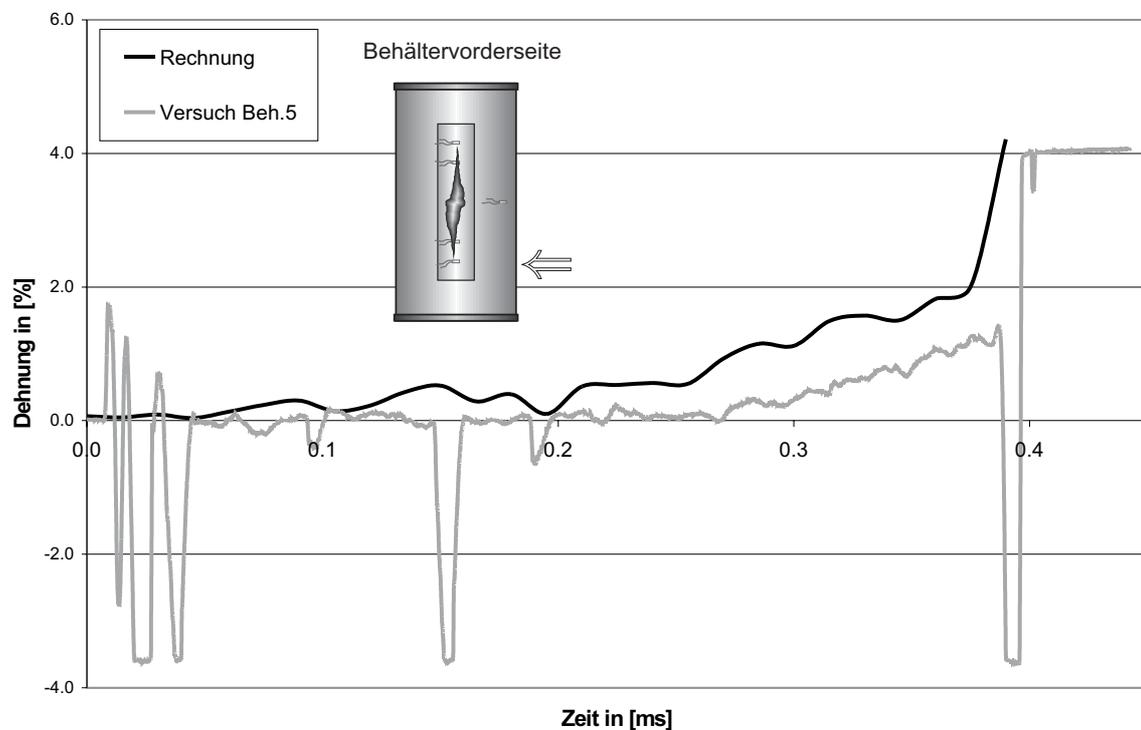


Abb. 7.7 Vergleich der beim Versuch Beh.5 aufgezeichneten effektiven Dehnungen von DMS-9 an der Behältervorderseite und der Rechnung

Abbildung 7.7 zeigt den Vergleich der Messergebnisse von dem DMS-9 im Versuch Beh.5 und der FEM-Rechnung. Auch dieser Dehnmessstreifen wurde bei einem Messwert von 4 % Dehnung zerstört und die Behältervorderseite bis zu dieser Stelle aufgerissen. Annähernd zum selben Zeitpunkt (0,39 ms) erreichen beide Kurven den Wert von 4% Dehnung. Bei den Messwerten handelt es sich um die effektiven Dehnungen in umfangs Richtung.

Folgend sollen die Druckmessungen in der Flüssigkeit aus Versuch und Rechnung verglichen werden.

Ein Vergleich der in den Versuchen Beh.1 bis 4 durchgeführten Druckmessungen in der Flüssigkeit mit den jeweilig zugehörigen FEM-Rechnungen zeigte, dass die Maximaldrücke aus den Versuchen nicht in den FEM-Rechnungen simuliert werden konnten. Hierfür wurde in der FE-Rechnung dasjenige Element, welches an dem gleichen geometrischen Ort, wie in dem Versuch der Druckaufnehmer war ausgewählt.

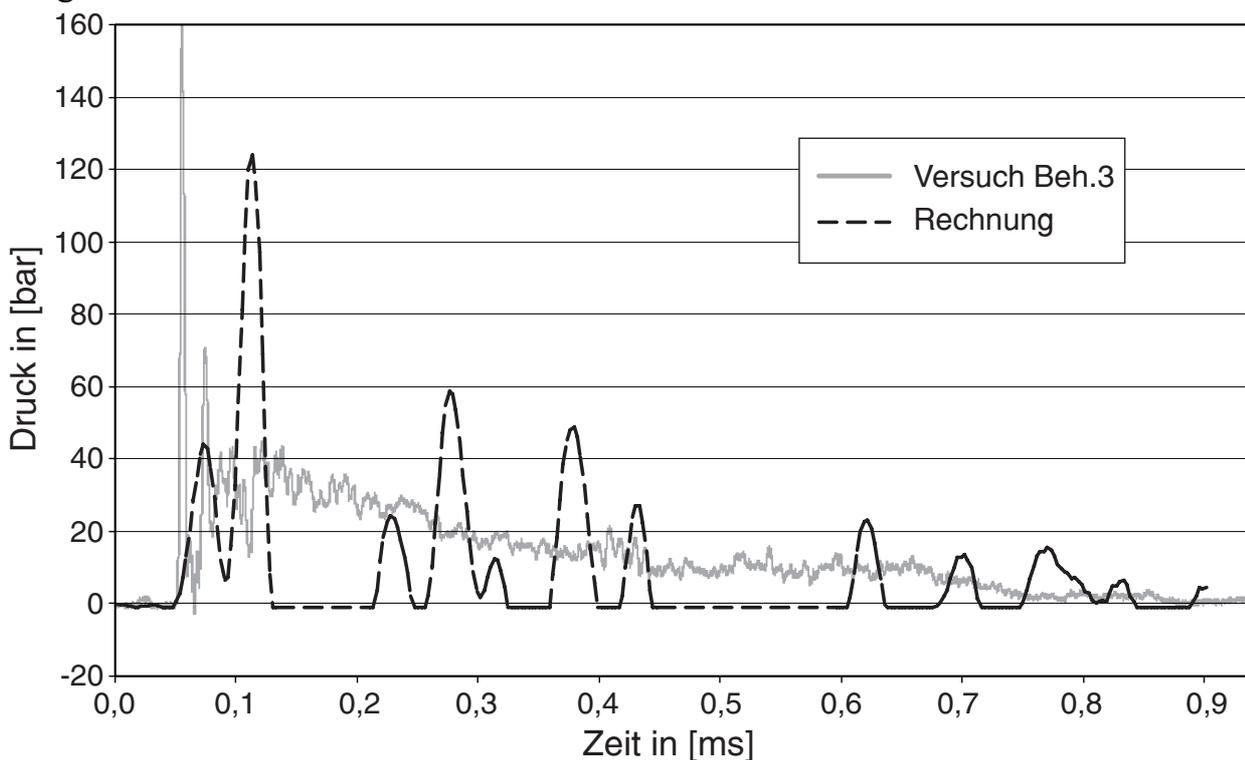


Abb. 7.8 Gegenüberstellung von den im Versuch Beh.3 ermittelten Drücken in der Flüssigkeit mit der FEM-Rechnung

Abbildung 7.8 zeigt exemplarisch den Vergleich von Versuch Beh.3 und Rechnung. Zum Zeitpunkt 0,0 trifft das Projektil auf die Behältervorderseite auf. Da sich anders

als bei dem Versuch vor dem Druckaufnehmer nicht ein stehender Druck aufbauen kann fallen die Werte in den FE-Rechnungen schnell wieder auf null ab um jeweils wieder oszillierend anzusteigen. Nimmt man eine gemittelte Einhüllende für diese Oszillationen an, so erhält man annähernd den Druckverlauf der Messungen. Die primäre Druckwelle allerdings kann hier nicht so wie in den Versuchen auftretend in der FE-Rechnung dargestellt werden.

Nach 0,05 ms erreicht die konzentrierte Druckwelle den 7 cm entfernten Druckaufnehmer, beziehungsweise das äquivalente Element (geometrisch gleicher Ort) in der Rechnung. Danach steigen die Werte in dem Versuch auf die gemessenen Maximalwerte an. In der Rechnung sind nicht so schnelle Anstiegszeiten zu verzeichnen und auch der Maximalwert liegt annähernd 25% unterhalb des Versuchswertes. Dieses kann unter anderem an der Größe der Fluidelemente liegen. Jedoch hatte eine Verkleinerung der Fluidelemente nicht zu einer Verbesserung der Ergebnisse geführt.

Als nächstes sollen die Verformungen an der Behältervorderseite von Versuch und Rechnung verglichen werden.

Abbildung 7.9 zeigt die errechneten bleibenden Verformungen der Behältervorderseite für den Beschuss von wassergefüllten Behältern. Die negativen Werte auf der X-Achse bedeuten, dass sich diese Punkte der Behältervorderseite nach außen verschoben.

Die anfängliche Projektilgeschwindigkeit des Geschosses betrug 420 m/s und die Behälterwanddicke wurde zwischen 0,6 mm bis 1,0 mm variiert. Zur besseren Darstellung wurde nur der mittlere Teil des Behälters von 0,2 m bis 0,4 m abgebildet. Die in den Versuchen und Rechnungen ermittelten maximalen Verformungen an der Behältervorderseite sind der Tabelle 7.3 zu entnehmen.

Die Behälter Beh.3 und Beh.4 sind, wie im Kapitel 5.6 beschrieben, an der seitlich liegenden Schweißnaht der Behälterwand aufgerissen. Dieses führte zu einem Druckabfall in der Flüssigkeit und somit zu geringeren Verformungen an der Behältervorderseite. Trotzdem ist die gleiche Tendenz, in Form von größeren Verformungen mit abnehmender Wanddicke, wie in der Rechnung festzustellen.

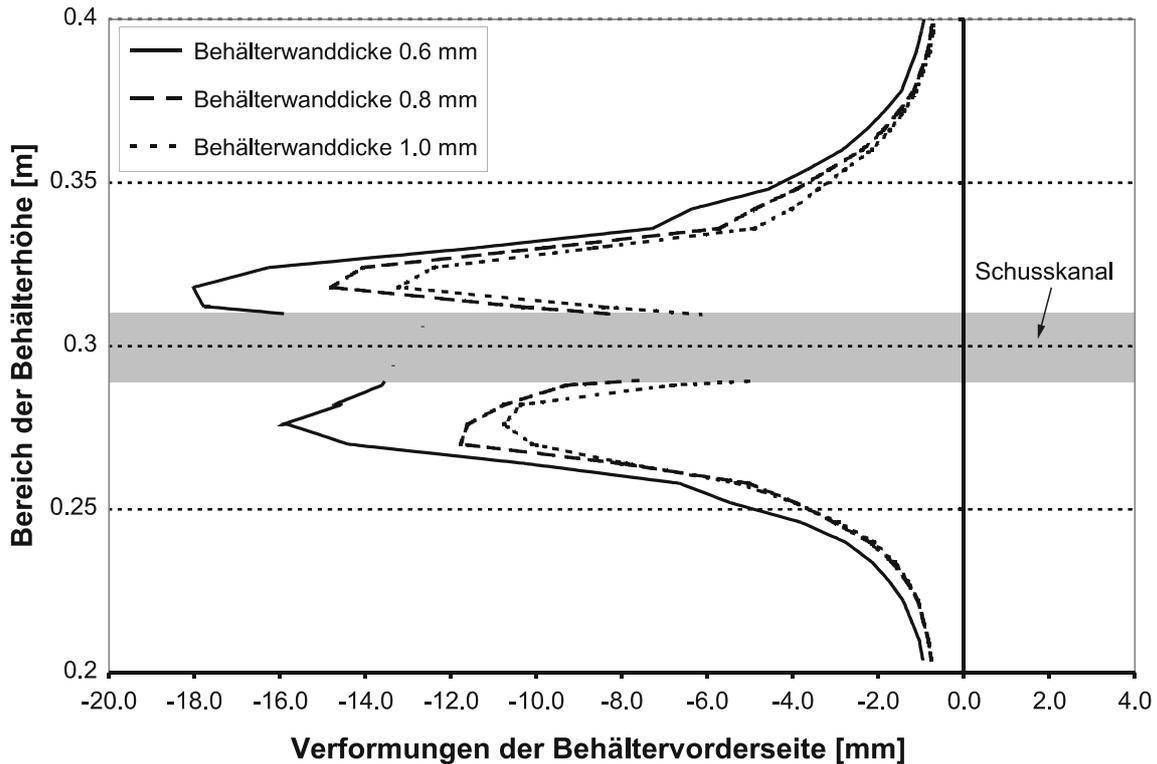


Abb. 7.9 Berechnung der bleibenden Verformungen der Behältervorderseite von Behältern unterschiedlicher Wanddicke, die mit einer Projektilgeschwindigkeit von 420 m/s beschossen wurden (vgl. Behälter Beh.2, 3 und 4)

Behälter	Verformungen der Behältervorderseite Versuch [mm]	Verformungen der Behältervorderseite Rechnung [mm]
Beh.4 (0,6 mm Wanddicke)	11	18
Beh.3 (0,8 mm Wanddicke)	6	15
Beh.2 (1,0 mm Wanddicke)	4	13

Tab 7.3 Vergleich der maximalen Verformungen an der Behältervorderseite

Folgend soll die Entwicklung der Druckwellen in der Flüssigkeit betrachtet werden.

Abbildung 7.10 zeigt die zeitliche Entwicklung der Druckwellen in einem

wassergefüllten Behälter, der mit einem 420 m/s schnellen Projektil beschossen wurde. Der Behälter hatte eine Wanddicke von $1,0 \text{ mm}$. Die in der Legende dargestellten Werte sind in N/mm^2 angegeben. Multipliziert man diese Werte mit 10, so erhält man Drücke in bar. Das Projektil ist nicht in den Teilbildern abgebildet, es befindet sich allerdings zu den jeweiligen Zeitschritten an der Spitze der verformten Fluidelemente. Teilbild a) zeigt die Druckverteilung in der Flüssigkeit unmittelbar nach dem Auftreffen des Projektils auf den Behälter. Um das Projektil herum ist eine Druckkonzentration auf Grund der Fluidverdrängung festzustellen. Die durch den Stoß eingeleitete konzentrierte Druckwelle, die sich mit der Wellengeschwindigkeit des Wassers fortbewegt, ist sichelförmig ausgebildet und breitet sich annähernd 3,5 mal so schnell wie das Projektil aus. Teilbild b) zeigt die Druckverteilung nach $0,15 \text{ ms}$. Die Druckentwicklung durch die Verdrängung der Flüssigkeit ist immer noch auf einem hohen Niveau existent. Aus der unmittelbar dem Projektil umgebenden Druckglocke bilden sich kontinuierlich neue Druckwellen aus, die sich ebenfalls mit der Wellengeschwindigkeit in der Flüssigkeit fortbewegen. Die primäre Druckwelle, die als erstes durch die Flüssigkeit läuft, nimmt an Wert auf Grund der dreidimensionalen Ausbreitung ab. Die Druckverteilung kurz bevor die Primärwelle die Behälterrückseite erreicht ist dem Teilbild c) zu entnehmen. Zur deutlicheren Darstellung ist eine gestrichelte Linie in diese hineingelegt worden. Beim Auftreffen auf die Behälterrückwand besitzt die Primärwelle noch Druckwerte von 15 bar , was in etwa $2/3$ der durch die Behälterwand aufnehmbaren statischen Zugspannungen entspricht. Danach wird die Druckwelle an der Behälterrückseite reflektiert und bewegt sich wieder in Richtung der Behälervorderseite. Das Teilbild d) zeigt den Zeitpunkt, an dem die Primärwelle auf der Behälervorderseite auftrifft. Auch in diesem Fall ist die Druckwelle zur besseren Darstellung durch eine gestrichelte Linie hervorgehoben worden. Nach $0,4 \text{ ms}$ ist das Projektil annähernd bis zur Hälfte durch den Behälter durchgedrungen. Die Drücke nehmen auf Grund der näher kommenden Behälterrückseite wieder um das Projektil herum zu. Da sich immer mehr Druckwellen überlagern und sich dadurch eine diffuse Druckverteilung in der Flüssigkeit einstellt, sind die folgenden Zeitschritte nicht mehr dargestellt worden. Für höhere anfängliche Projektilgeschwindigkeiten, wie im Versuch Beh.5 gezeigt, reißt, nach dem Auftreffen der reflektierten Primärwelle an der Behälervorderseite (nach $0,4 \text{ ms}$), die Behälterwand über einen Großteil der Höhe auf.

Zu der FE-Berechnung Abb. 7.10, welche eine Nachrechnung des Versuchs Beh.2 darstellt, wurden die Parameter für Impact-Geschwindigkeit und Behälterwanddicke

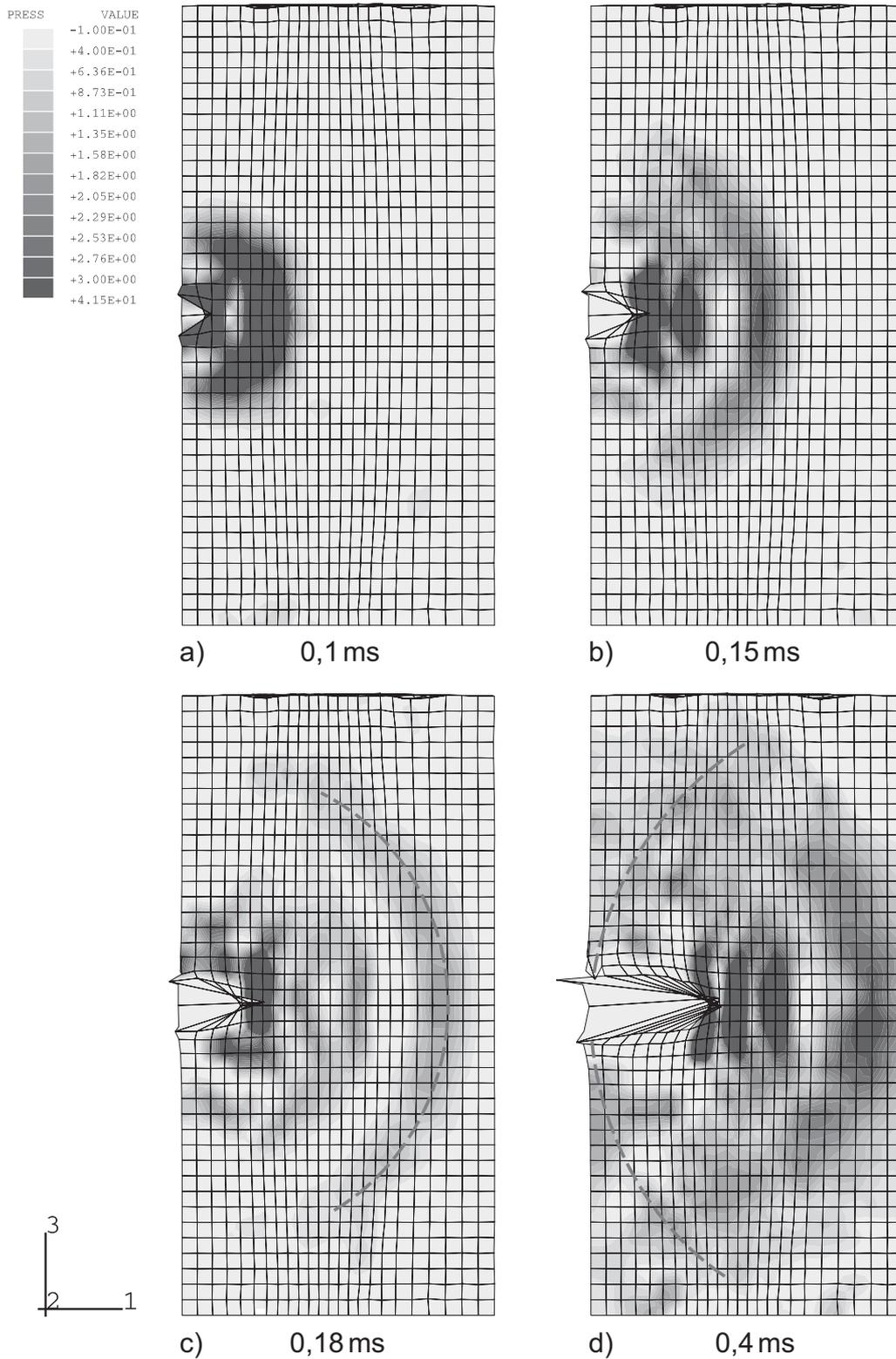


Abb. 7.10 *Entwicklung der Druckwellen in einem mit Flüssigkeit gefüllten Behälter durch den Beschuss von einem 420 m/s schnellen Projektil*

so variiert, dass auch ein Vergleich mit den anderen durchgeführten Versuchen möglich war. Dabei wurde untersucht, welchen Einfluss die Impact-Geschwindigkeit und die Behälterwanddicke auf die Primärdruckwelle in der Flüssigkeit hat. Es wurde festgestellt, dass die Behälterwanddicke keinen signifikanten Einfluss auf die Primärwelle hat. Dieses ist nachvollziehbar, da sich an der Geometrie des Versuchsaufbaus nur wenig ändert und die Primärdruckwelle sich dadurch auszeichnet, eine Belastungsinformation weiterzugeben, wobei hier der gleiche Belastungsimpuls vorliegt. Bei der Variation der Impact-Geschwindigkeit ist allerdings ein deutlicher Druckanstieg in der Primärwelle festzustellen. Dieses steht auch im Einklang zu den Versagensformen von Versuch Beh.2 und Beh.5. Betrachtet man einen Behälter (Tab. 7.4) mit 1,0 mm Wanddicke, einem Radius von 150 mm und einer Zugfestigkeit des Stahls von $321 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ (ermittelter Wert siehe Kapitel 5.2), so liegt der statisch aufnehmbare Innendruck bei 21 bar. Der Behälter aus Versuch Beh.2 (15bar) ist nach dem Beschuss nicht an der Behältern Vorderseite aufgerissen (siehe Kapitel 5.6.2 Abb. 5.26) im Gegensatz zu dem Versuch Beh.5 (27 bar). Auch bei den Versuchen Beh.3 und Beh.4 lässt sich ein Zusammenhang von Primärdruckwelle und aufnehmbarem Innendruck in dem Behälter finden. Aus den Materialkennwerten des Behälters Beh.3 konnte ermittelt werden, dass der Behälter theoretisch einem statischen Innendruck von 16 bar stand hält. Die Primärdruckwelle in der Flüssigkeit hatte an der Behältern Rückseite einen Wert von 13 bar und lag somit geringfügig unterhalb des statisch aufnehmbaren Drucks von 16 bar. Bei dem Behälter Beh.4 hingegen hatte die Primärdruckwelle an der Behältern Rückseite einen Wert von 16 bar und lag somit oberhalb von dem statisch aufnehmbaren Druck von 14 bar. Betrachtet man die Versagensbilder der beiden Versuche (siehe Kapitel 5.6.2 Abb. 5.17), so ist festzustellen, dass der Behälter Beh.3 an der Schweißnaht der Behälterwand aufgerissen ist, aber ansonsten keine weitere nennenswerte Behälterdeformation aufgetreten ist. Der Behälter Beh.4 ist hingegen nicht nur an der Schweißnaht aufgerissen, sondern auch auf der Behältern Vorder- und Rückseite stark deformiert. Aus dieser Beobachtung lässt sich schließen, dass bei einer Überschreitung des statisch aufnehmbaren Drucks, durch die an der Rückseite der Behälterwand eintreffende Primärdruckwelle, mit einem katastrophalem Versagen der Behälterwand gerechnet werden muss.

Tabelle 7.4 zeigt die Ergebnisse für die Primärdruckwelle an der Behältern Rückseite auf der Höhe des Einschusses aus der FE-Berechnung. Dem gegenübergestellt wurden die aufnehmbaren statischen Innendrucke für die in den Versuchen verwendeten Behälter.

Parametervergleich zu Versuch	Behälterwanddicke [mm]	Anfängliche Impact-Geschwindigkeit [m/s]	Druck der Primärwelle an der Behälterrückseite [bar]	Statisch aufnehmbare Druck des Behälters [bar]
Beh.2	1,0	420	15	21
Beh.3	0,8	420	13	16
Beh.4	0,6	420	16	14
Beh.5	1,0	720	27	21

Tab. 7.4 Parameterkombinationen bei denen der Druck der Primärwelle an der Behälterrückseite berechnet und mit dem statisch aufnehmbaren Innendruck des Behälters verglichen wurde

In den durchgeführten Versuchen wurden leider keine Druckmessungen an der Behälterrückseite in der Flüssigkeit vorgenommen, daher ist an dieser Stelle kein unmittelbarer Vergleich der Primärdruckwerte möglich.

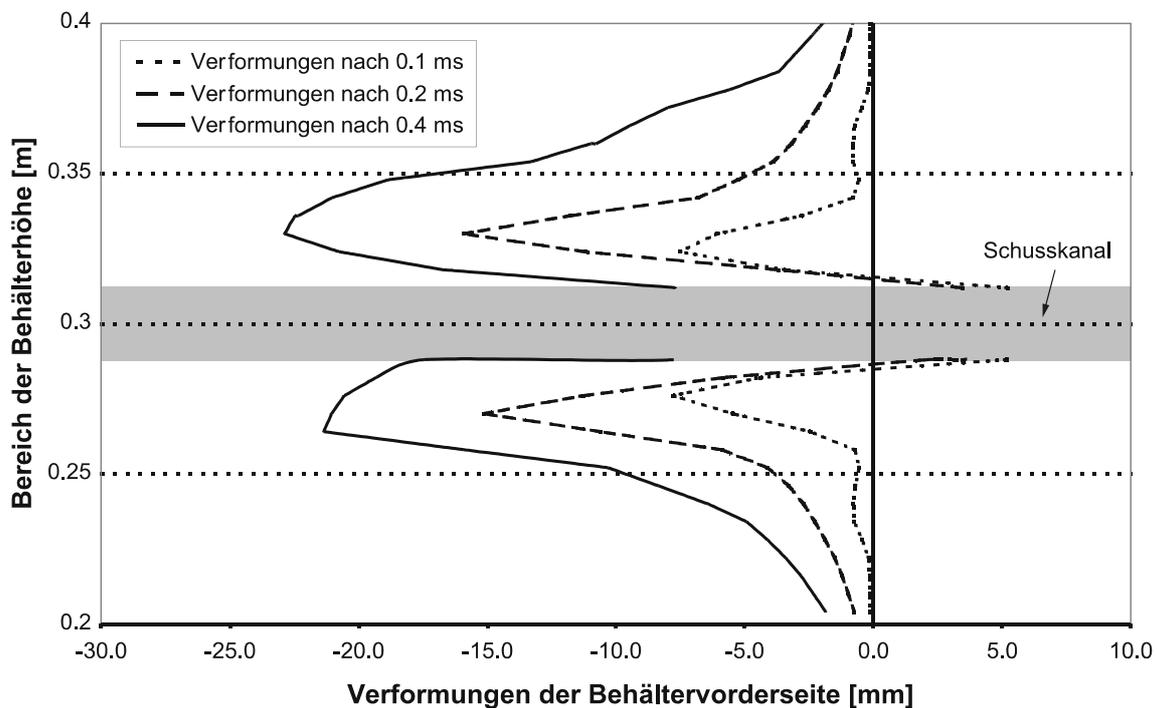


Abb. 7.11 Berechnung der Verformungen an der Behältervorderseite zu verschiedenen Zeitpunkten für einen mit Flüssigkeit gefüllten Behälter (Wanddicke = 1,0 mm), der mit einer Projektilgeschwindigkeit von 730 m/s beschossen wurde (vgl. Versuch Beh.5)

Abbildung 7.11 zeigt die errechneten Verformungen der Behältervorderseite des Versuchs Beh.5 zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Auch hier ist in der Abbildung nur der mittlere Teil dargestellt. Die negativen Werte auf der X-Achse sind auch hier äquivalent mit einem nach außen verschieben der Behälterwand. Bereits kurz nach dem Auftreffen des Projektils auf den Versuchskörper (0,1 ms) wird die Behälterwand, durch die von dem Projektil verdrängte Flüssigkeit, nach außen verschoben. Mit fortschreitender Zeit nehmen auch die Verformungen an der Behältervorderseite zu. Nach 0,4 ms trifft die reflektierte Druckwelle an der Vorderseite auf und kurz darauf reißt in diesem Versuch die Behälterwand über den Großteil auf (vgl. Kapitel 5.6). Die Verformungen nach 0,4 ms entsprechen nicht den endgültigen an der Behälterwand eintretenden Verformungen. Dadurch, dass in der FE-Rechnung nach diesem Zeitpunkt (0,4 ms) viele Behälterelemente auf Grund der vorgegebenen Materialkennwerte sehr stark deformiert werden und versagen, führt dieses zum Abbruch der Rechnung.

Abbildung 7.12 zeigt die effektiven Dehnungen in der Behältervorderseite für den Beschuss eines mit Wasser gefüllten Behälters. Die anfängliche Projektilgeschwindigkeit beträgt 730 m/s und die Behälterwanddicke 1,0 mm. Im Teilbild a) ist das vollständige FE-Netz der generierten Symmetriehälfte des Systems abgebildet. Der dunkel abgehobene Bereich des FE-Netzes ist in den Teilbildern b), c) und d) vergrößert dargestellt. Im Teilbild b) sind die effektiven Dehnungen der Behälterwand 0,05 ms nach dem Auftreffen des Projektils auf die Behältervorderseite abgebildet. Diejenigen Schalenelemente, die auf Grund der Beanspruchung die Materialfestigkeit überstiegen, sind aus dem Elementnetz herausgelöscht worden. Derjenige Bereich, der über 10 % gedehnt wurde, ist schwarz dargestellt. Teilbild c) zeigt die effektiven Dehnungen nach 0,2 ms. Zu diesem Zeitpunkt ist der Einfluss, der auf Grund der Verdrängung des Fluids durch das Projektil entstandenen Druckentwicklung, auf der Behältervorderseite abgeschlossen. Zwischen Projektil und der Behälterwand ist ein weißer Zwischenraum zu erkennen, der dadurch zustande kommt, weil zerstörte Elemente gelöscht wurden. Die den Dehnungsbereich umgebenden Spitzen sind auf die FE-Generierung zurückzuführen. Die Fluidelemente besitzen in horizontaler Richtung die vierfache Länge der Schalenelemente. Somit liegt nur jedes vierte Schalenelement an die Fluidelemente an, was zu diesem gezackten Dehnungsbereich führt. In der Realität würde sich ein gerundeter Dehnungsverlauf ausbilden. Von einer Netzverfeinerung der Fluidelemente musste allerdings Abstand genommen werden, da schon bei einer Halbierung der Fluidelementlänge die Rechenzeit überproportional anstieg. Im

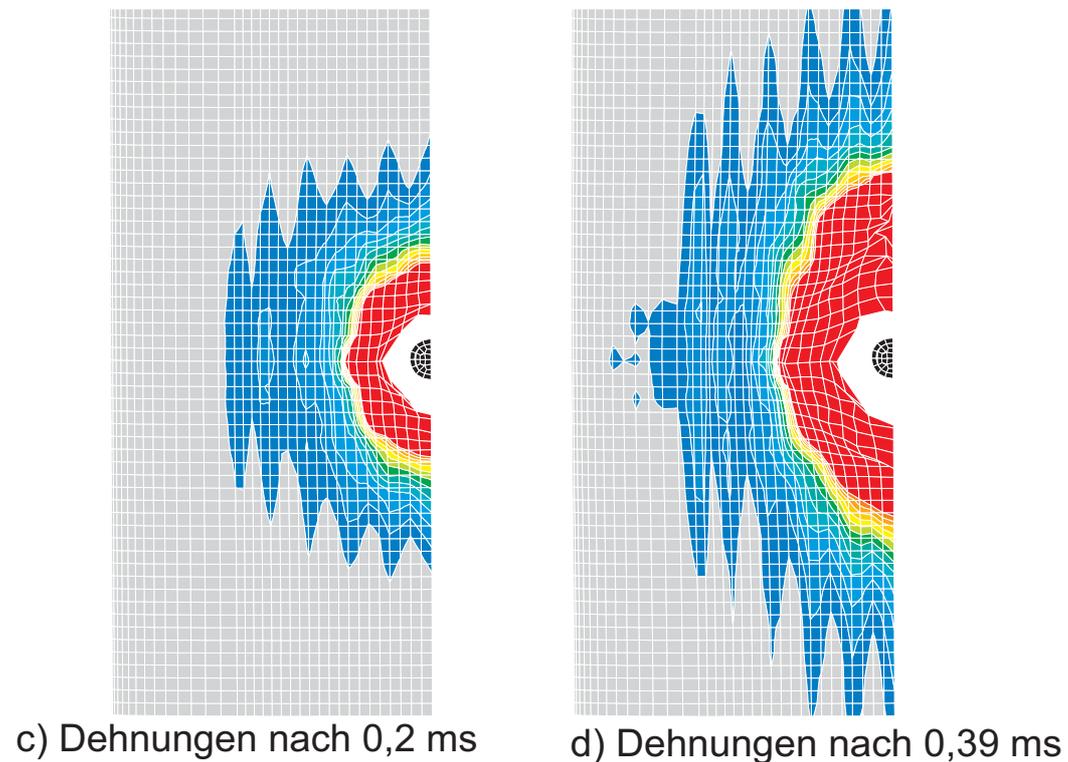
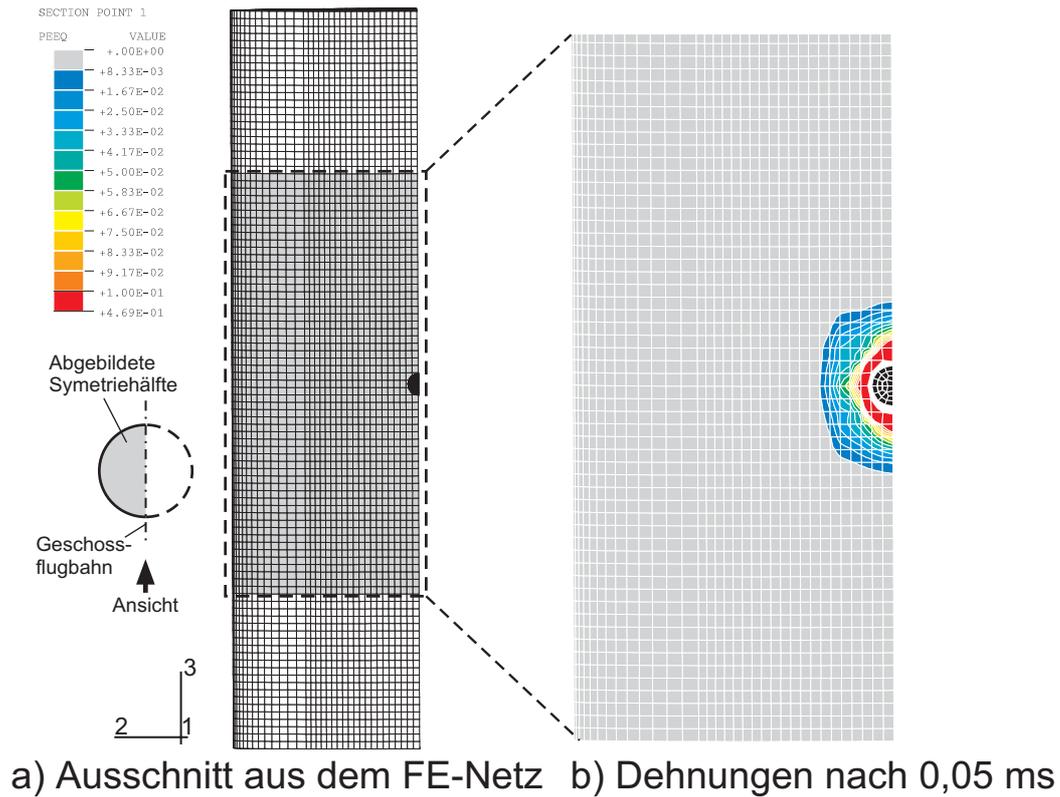


Abb. 7.12 Berechnung der Dehnungen in der Behältervorderseite für den Beschuss von einem mit Wasser gefüllten Behälter (vgl. Versuch Beh.5)

dreidimensionalen Raum entspricht das der achtfachen Menge an Freiheitsgraden. Teilbild d) zeigt die Dehnungen der Behälterwand nach 0,4 ms. Dieses ist der Zeitpunkt, zu dem sich die Druckwelle, welche ausgehend von dem Aufschlagpunkt des Projektils auf der Behälervorderseite, einmal durch die in dem Behälter befindliche Flüssigkeit hindurch bewegte und wieder an der Behälervorderseite auftrifft. Die Dehnungen erstrecken sich nun entlang des größten Teils der Höhe der Behälervorderseite.

7.3 Weitere Berechnungen mit der FEM

Zunächst soll die ballistische Grenze für leere und mit Flüssigkeit gefüllte Behälter bestimmt werden.

Bei der Bestimmung der ballistischen Grenze für die Behälter wurden zwei verschiedene Parameter variiert. Einerseits wurde die Projektil-Geschwindigkeit für einen Behälter mit 1,0 mm Wanddicke so weit abgemindert, bis das Projektil die Behälterwand nicht mehr perforiert. Andererseits wurde für eine Projektil-Geschwindigkeit von 730 m/s die Wanddicke so weit erhöht, das auch in diesem Fall das Projektil nicht mehr die Behälterwand perforieren konnte. Darauf hin konnte die ballistische Grenze von leeren und mit Flüssigkeit gefüllten Behältern verglichen werden.

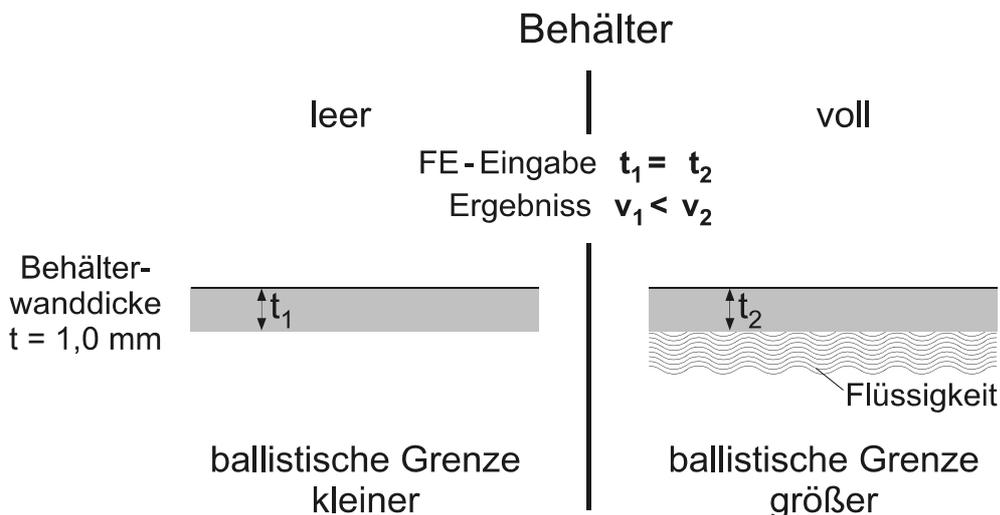


Abb. 7.13 Berechnung der ballistischen Grenze für eine Behälterwanddicke von $t=1,0 \text{ mm}$

Für den in den Untersuchungen verwendeten leeren Behälter mit einer Wanddicke von 1,0 mm wurde in der FE-Rechnung die ballistische Grenze für eine Projektil-

Geschwindigkeit von $v_1 = 110 \text{ m/s}$ berechnet. Dieser Wert steht ebenfalls im Einklang mit den vergleichbaren Untersuchungen von [16,95].

Für den mit Flüssigkeit gefüllten Behälter mit einer Wanddicke von 1,0 mm wurde die ballistische Grenze für eine Projektil-Geschwindigkeit von $v_2 = 125 \text{ m/s}$ ermittelt. Der mit Flüssigkeit gefüllte Behälter besitzt, bei einer Wanddicke von 1,0 mm, eine geringfügig höhere ballistische Grenze als der leere Behälter (siehe Abb. 7.13).

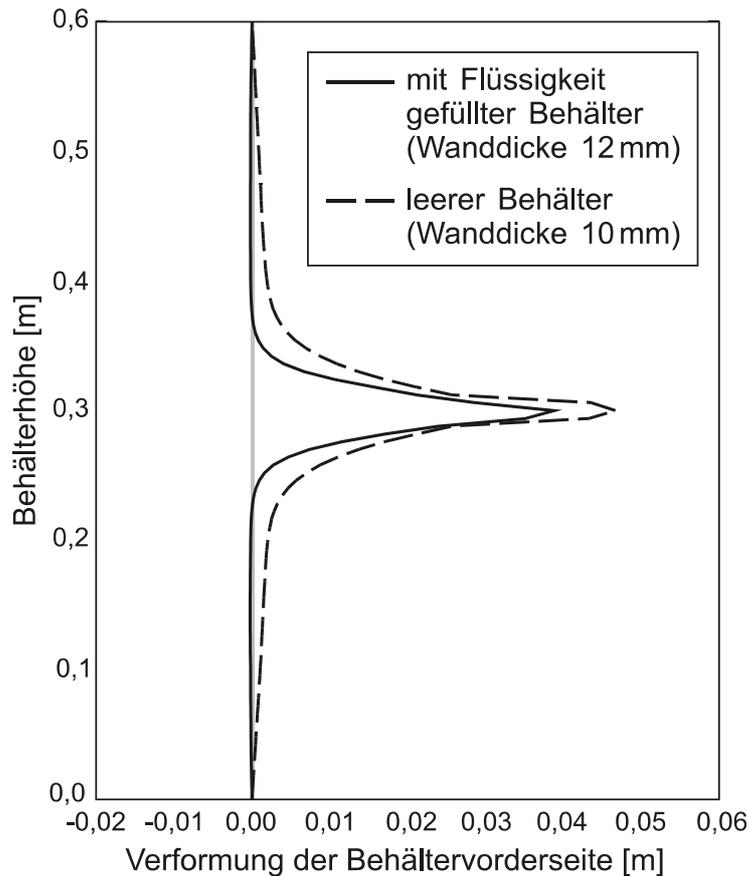


Abb. 7.14 Endgültige Verformungen der Behältervorderseite für einen leeren und einen mit Flüssigkeit gefüllten Behälter an der ballistischen Grenze ($v_0 = 730 \text{ m/s}$)

Betrachtet man den leeren und den mit Flüssigkeit gefüllten Behälter, die mit einer Projektil-Geschwindigkeit von 730 m/s beschossen wurden, so betrug die Wanddicke, bei der die ballistische Grenze erreicht wurde, für den leeren Behälter 10,0 mm und für den flüssigkeitsgefüllten Behälter 12,0 mm (siehe Abb. 6.14).

Abbildung 7.14 zeigt die Verformungen der Behältervorderseite nach dem Beschuss eines 730 m/s schnellen Projektils für einen flüssigkeitsgefüllten Behälter mit einer Wanddicke von 12,0 mm und einen leeren Behälter mit einer Wanddicke von 10,0 mm. In beiden Fällen ist die ballistische Grenze erreicht. In grau ist die unverformte Behälterwand dargestellt. Der leere Behälter erfährt an der Vorderseite über die gesamte Höhe Verformungen. Dagegen werden die Verschiebungen der Behältervorderseite bei Füllung durch das Fluid behindert und so treten die Verformungen stärker örtlich begrenzt auf.

Abbildung 7.13 und 7.15 zeigen jeweils die gleichen Eingangswerte für einen leeren und einen mit Flüssigkeit gefüllten Behälter, die bei der jeweiligen FE-Rechnung eingegeben wurden. Unter den Eingabewerten stehen die aus den Rechenläufen gewonnenen Ergebnisse. Ebenso ist jeweils gekennzeichnet worden, bei welchem Behälter, leer oder gefüllt, die im Vergleich höhere oder niedrigere ballistische Grenze eintrat.

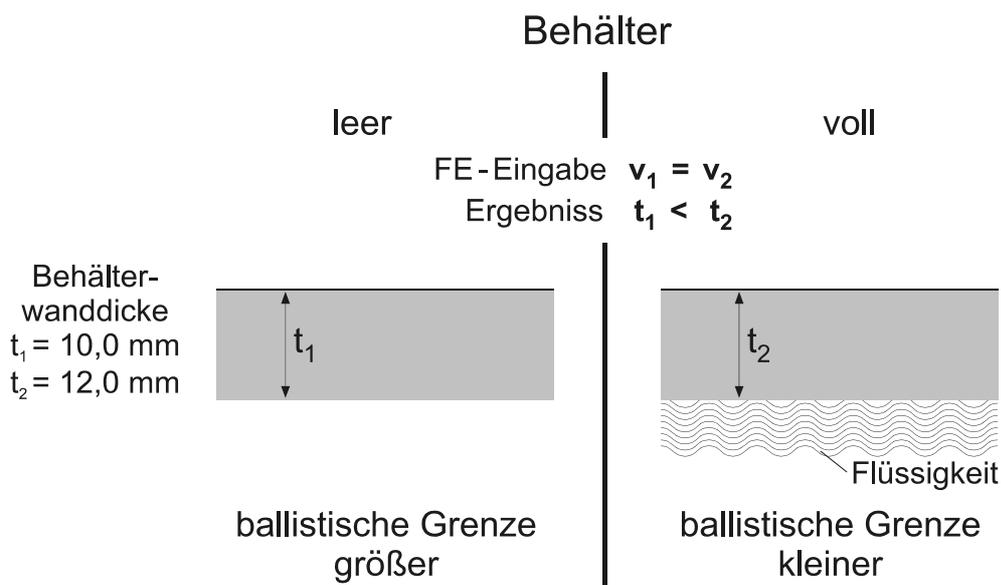


Abb. 7.15 Berechnung der ballistischen Grenze für eine Impact-Geschwindigkeit von 730 m/s

Setzt man nun aus diesen beiden Untersuchungen vom Vergleich der ballistischen Grenze von leeren und vollen Behältern einen Parameter fest, so kann unter der Annahme einer jeweils gleichen Impact-Geschwindigkeit (v_0) eine direkte Abhängigkeit von der Behälterwanddicke (t_i) abgelesen werden.

Aus dieser Untersuchung heraus lässt sich jetzt Folgendes feststellen. Bei Behältern geringer Wanddicke (ca. 1,0 mm) liegt demnach die ballistische Grenze für leere Behälter unter der von flüssigkeitsgefüllten Behältern. Dagegen liegt bei Behältern mit einer größeren Wanddicke (10 mm - 12 mm) die ballistische Grenze für leere Behälter über der von flüssigkeitsgefüllten Behältern (siehe Abb. 7.16).

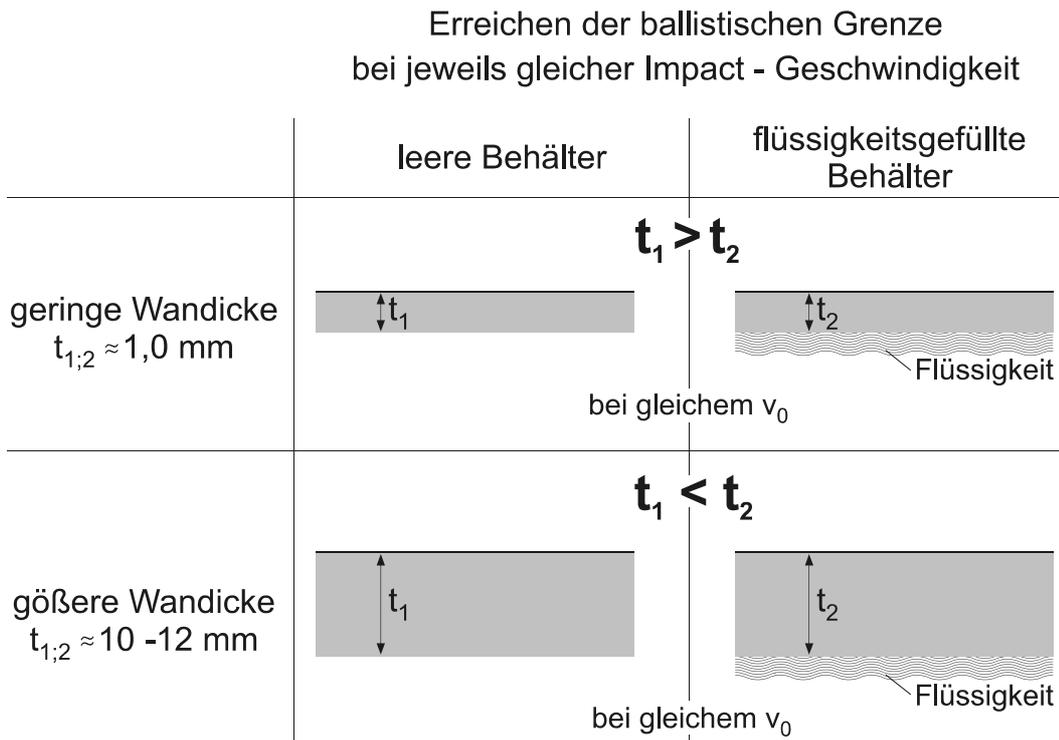


Abb. 7.16 *Abhängigkeit der ballistischen Grenze von Behälterfüllstand und Wanddicke t bei gleicher anfänglicher Impact-Geschwindigkeit*

Abbildung 7.16 zeigt ausgehend von der gleichen Sicherheit, also Widerstandsfähigkeit der Zielstruktur einem definiertem Impact zu widerstehen, welche Behälterwand dicker sein muss. Die Bereiche, in denen dieses gilt, sind in der linken Spalte angegeben.

Dieses Phänomen ist damit zu erklären, dass ein leerer Behälter mit einer geringen Behälterwanddicke tendenziell an der Auftreffstelle auf Biegung versagt. Hat dieser Behälter eine größere Behälterwanddicke so versagt dieser eher auf "Plugging", also einem Scherversagen (siehe auch Abbildung 2.5). Betrachtet man nun die mit Wasser gefüllten Behälter, so erkennt man, dass diese spezifischen Trag- und Versagensverhalten durch die Bettung der Behälterwand durch die Flüssigkeit

begünstigt werden. Bei der geringen Behälterwanddicke begünstigt die Flüssigkeit das Tragverhalten auf Biegung und ermöglicht eine gleichmäßigere Belastungsverteilung. Dagegen wird bei der größeren Wanddicke das Scherversagen durch die Bettung der Behälterwand mit der Flüssigkeit begünstigt.

Dieser Umstand mag erklären, wieso Neilson et al. [67] in seinen Untersuchungen zu dem Schluss kommt, dass die mit Wasser gefüllten Rohre eine geringere ballistische Grenze besitzen, als die leeren Rohre. Xiaoqing und Stronge [95] jedoch ermittelten genau das Gegenteil in ihren Versuchen. Xiaoqing und Stronge verwendeten Rohre mit geringerer Wanddicke (1,2-3,3 mm) als Neilson(7,2-18,2 mm vgl. Kapitel 2).

Abbildung 7.17 zeigt die Abnahme der Projektil-Geschwindigkeit mit zunehmender Verschiebung der Behältervorderseite für einen leeren Behälter mit 10,0 mm Wanddicke und einen flüssigkeitsgefüllten Behälter mit einer Wanddicke von 12,0 mm. Direkt nach dem Auftreffen des Projektils auf den mit Flüssigkeit gefüllten Behälter

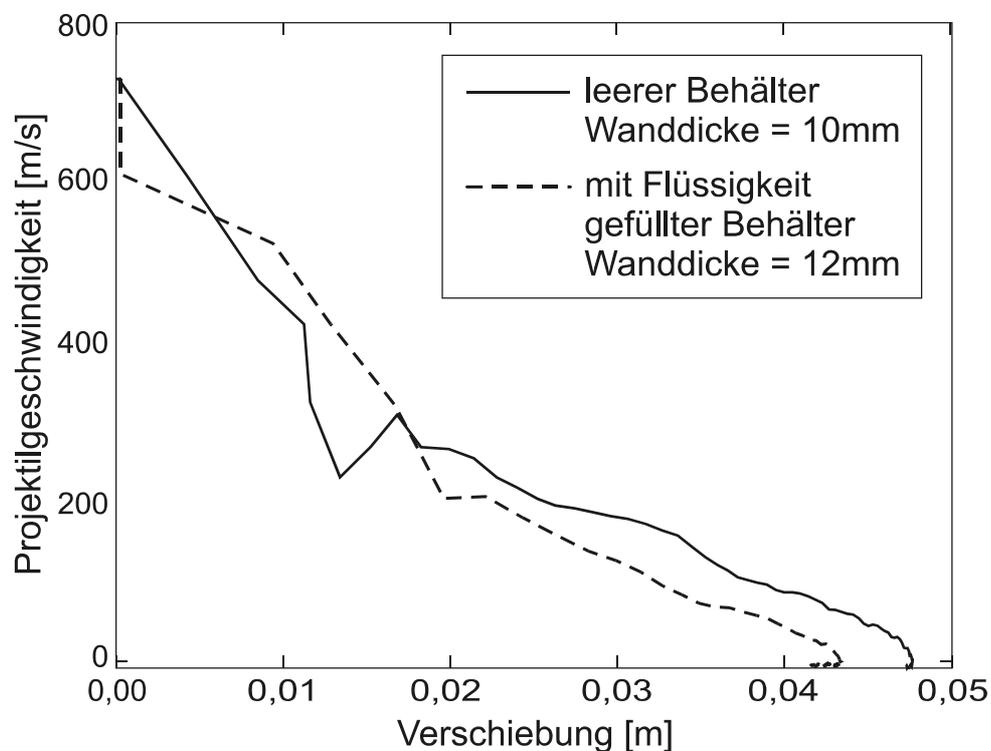


Abb. 7.17 *Projektilgeschwindigkeit für den Beschuss von einem leeren und einem mit Flüssigkeit gefüllten Behälter, zur Ermittlung der ballistischen Grenze*

nimmt die Geschwindigkeit schlagartig ab, da anders als bei dem leeren Behälter es eine gewisse Zeit dauert, um die Flüssigkeit hinter der Behälterwand zu beschleunigen und zu verdrängen (siehe Abb. 7.18). Die Abbildung 7.17 zeigt, dass die Projektil-Geschwindigkeiten auf einen Wert von Null abfallen. Danach bewegen sich die Projektile geringfügig entgegen der anfänglichen Bewegungsrichtung, somit wird die Behälterwand nicht vollständig perforiert.

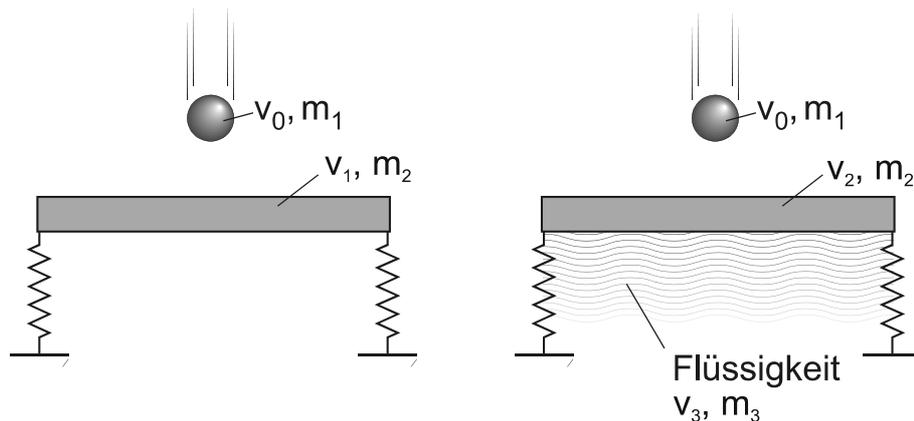


Abb. 7.18 Massen und Geschwindigkeiten der gestoßenen Körper mit und ohne Flüssigkeit

Abbildung 7.18 zeigt eine schematische Zeichnung der für einen leeren und mit Flüssigkeit gefüllten Behälter unter Berücksichtigung der Geschwindigkeiten und Massen der gestoßenen Körper. Dadurch wird deutlich, dass das Projektil, welches auf einen mit Flüssigkeit gefüllten Behälter geschossen wird, schneller abgebremst wird, als das bei dem leeren Behälter der Fall ist.

Als nächstes soll der Einfluss der Behälterwanddicke auf das Tragverhalten dargestellt werden.

Abbildung 6.19 zeigt die Verformungen der Behältervorderseite in Abhängigkeit von der Wanddicke. Die anfängliche Projektil-Geschwindigkeit betrug 730 m/s . Die hier abgebildeten Verformungen sind $0,4 \text{ ms}$ nach dem Beschuss aufgetreten.

Da die ballistische Grenze für diesen Behälter (Abbildung 7.19 bis 8 mm) weit übertroffen ist, perforiert die Vorderseite an der Auftreffstelle des Projektils und wird nicht weiter zum Behälterinneren eingebault. Die durch das Projektil eingeleitete Druckentwicklung an der Behältervorderseite, auf Grund der Verdrängung der

Flüssigkeit und der durch das Fluid laufenden Druckwelle, vermag die Wand nicht zu widerstehen. Bei einer geringen Wanddicke, in diesem Beispiel 2,0 mm, wird diese auf Grund des Innendrucks an der Behältervorderseite nach der Perforation nach außen verdrängt.

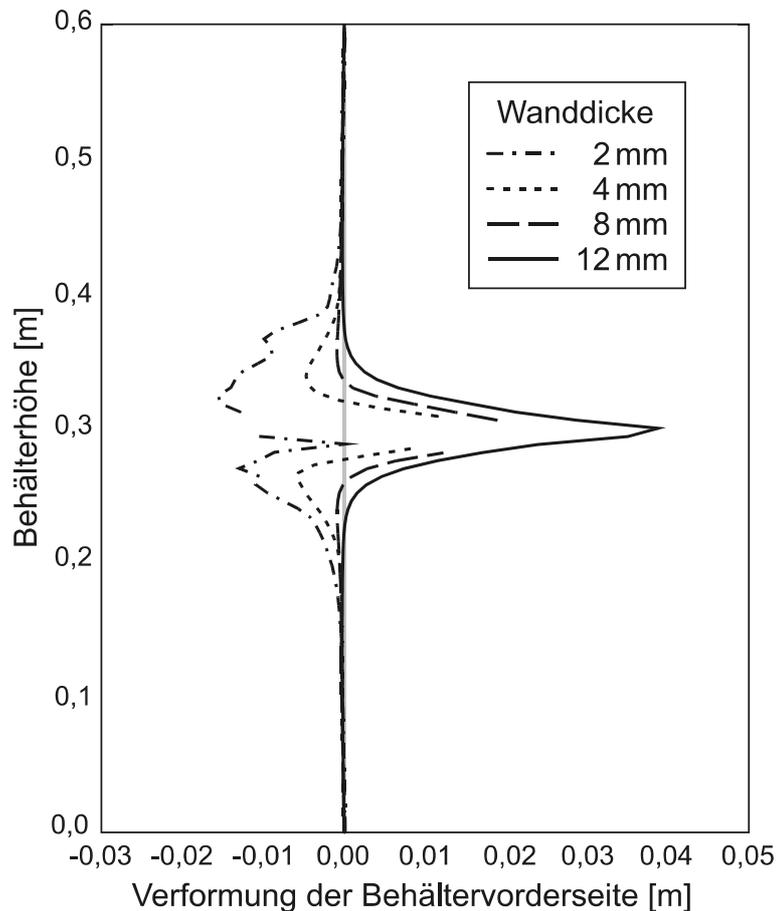
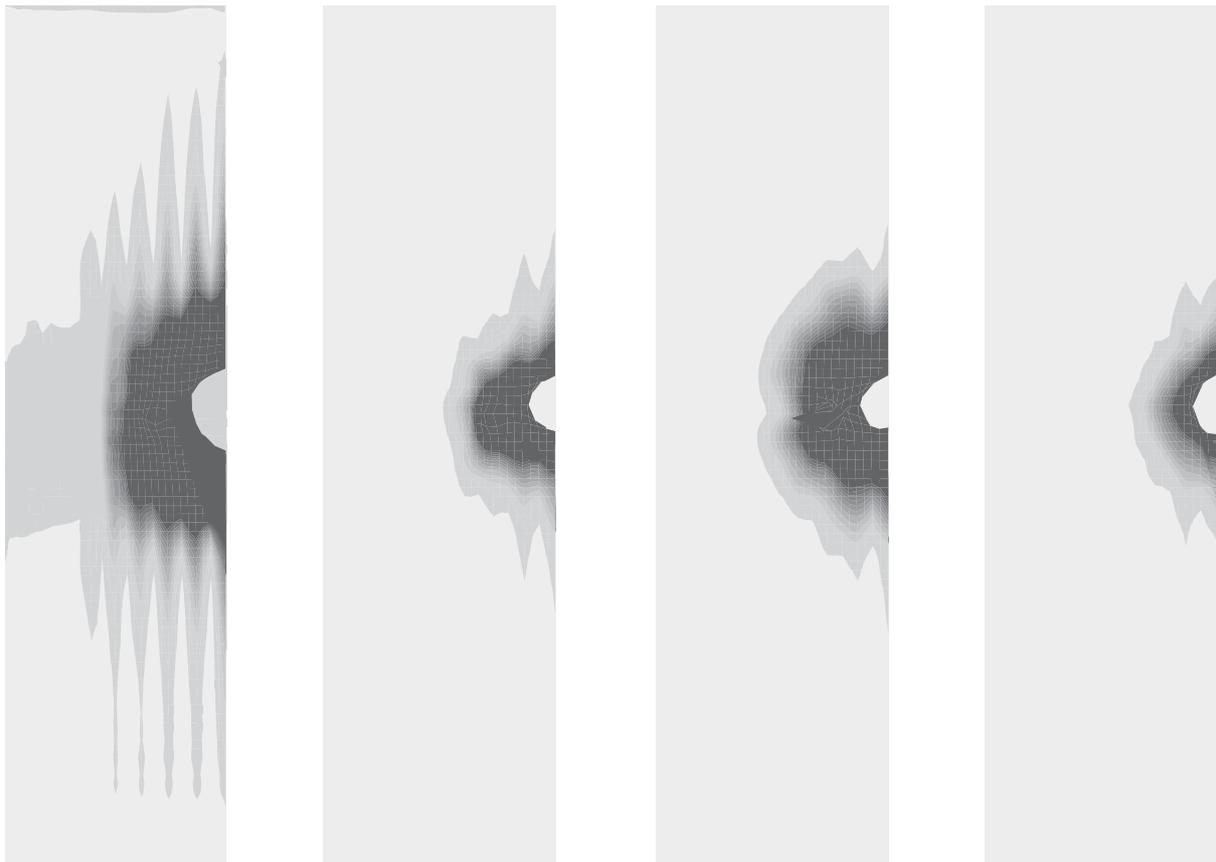


Abb. 7.19 *Verformungen der Behältervorderseite von einem mit Flüssigkeit gefüllten Behälter in Abhängigkeit von der Wanddicke (Projektilgeschwindigkeit = 730 m/s)*

Mit zunehmender Wanddicke nehmen auch diejenigen Verformungen, die ober- und unterhalb des Einschussloches auf Grund der Verdrängung des Fluids auftreten, ab. Vermag die Behälterwand dem Projektil zu widerstehen mit dem Erreichen der ballistischen Grenze, so reicht auch die durch das Projektil verursachte Druckerhöhung in der Flüssigkeit auf der Innenseite der Behälterwand nicht aus, um die Wand nach außen zu verdrängen.

Auch bei dieser Betrachtung ist deutlich der Übergang von einem Biegeversagen bei einer geringen Behälterwanddicke zum Schubversagen bei größer werdenden Wanddicken zu beobachten.

Als nächstes soll an Hand einer Parameterstudie der Einfluss des Behältermaterials auf das Tragverhalten gezeigt werden.



a) Al Mg3

b) St 52

c) St 44

d) St 37

Abb. 7.20 Einfluss des Behältermaterials auf das Tragverhalten

Abbildung 7.20 zeigt den Einfluss des Behältermaterials auf das Tragverhalten. Die Behälter besitzen eine Wanddicke von 4,0 mm und wurden jeweils mit einem 730 m/s schnellen Projektil beschossen. In der Abbildung 7.20 sind die effektiven Dehnungen zu dem Zeitpunkt 0,4 ms nach dem Beschuss dargestellt, also dem Zeitpunkt, bei dem die reflektierte Druckwelle wieder an der Behältervorderseite eintrifft. Der Bereich, der nach der DIN unmittelbar an der zu erfüllenden Bruchdehnung des jeweiligen Materials liegt, ist schwarz dargestellt. Bei den Materialien handelt es sich um geläufige Behälterstähle (DIN 1628 und DIN 1629) und eine Aluminiumlegierung

(DIN EN 1706), die ebenfalls im Behälterbau verwendet wird. Die Materialkennwerte können der Tabelle 7.5 entnommen werden.

Material	Streckgrenze R_e	Zugfestigkeit R_m	Bruchdehnung [%]
Al Mg3	70	140	5
St 52	355	500	21
St 44	275	420	21
St 37	235	350	25

Tab. 7.5 Materialkennwerte für Behältermetalle

Geht man davon aus, dass bei einer Bemessung einer Behälterwand die Zugfestigkeit des Materials den wichtigsten Parameter darstellt und der Ingenieur ausgehend von einer bestimmten Sicherheitsvorgabe die Behälterwanddicke wählt, so ist festzustellen, dass die Materialwahl der Behälter einen entscheidenden Einfluss auf das Tragverhalten hat. Eine geringe Bruchdehnung wirkt sich somit stärker als eine geringe Zugfestigkeit auf das Tragverhalten aus. Bei einer größeren Dehnfähigkeit des Materials bestehen auch größere Traglastreserven. Dies hängt mit der annähernden Inkompressibilität von Flüssigkeiten zusammen. Die in der Flüssigkeit in Form von dynamischen Druckzuständen vorhandene Energie kann durch die Wahl eines dehnfähigen Behältermaterials verringert werden.

8 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel sollen die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse aus den Untersuchungen zusammengestellt werden. Folgende Teilbereiche sollen hierfür nochmals kurz betrachtet werden:

- Betrachtung des hier vorliegenden Stoßphänomens für den Beschuss von flüssigkeitsgefüllten Behältern
- Versagensmechanismen
- Vergleich der ballistischen Grenze von leeren und mit Flüssigkeit gefüllten Behältern
- Einfluss des Behältermaterials auf das Tragverhalten
- Bemessungsvorschläge

Für eine ausführlichere Diskussion der einzelnen Unterpunkte wird auf die vorstehenden Kapitel verwiesen.

Die durchgeführten Untersuchungen konnten im hohen Maß Aufschluss über die Auswirkungen des Stoßphänomens von flüssigkeitsgefüllten Behältern geben. Der Beschuss von Behältern mit Projektilen, die eine Impact-Geschwindigkeit unterhalb der Wellengeschwindigkeit der Flüssigkeit haben, kann zu einem besonderem Versagensmechanismus des Behälters führen. Das Versagensbild des Behälters bei diesen Stoßbelastungen kann ein vollständiges Aufreißen der beschossenen Behältervorderseite sein. Die besondere Charakteristik besteht darin, dass der Impact-Körper an der Auftrefffläche eine konzentrierte Druckwelle in die Flüssigkeit induziert. Diese läuft so schnell durch den Behälter, dass die Primärdruckwelle vor dem Austreten des Projektils auf der Rückseite wieder zur Behältervorderseite reflektiert ist. So entstehen am Einschussloch auf Grund des in der Flüssigkeit befindlichen Drucks Zugspannungsspitzen, welche die vordere Behälterwand aufreißen können (siehe Kapitel 2.2 und eigene experimentelle Untersuchungen). Die anfängliche Projektilgeschwindigkeit in den durchgeführten Versuchen war maximal halb so groß wie die Wellengeschwindigkeit in der Flüssigkeit.

Bei den von mir durchgeführten Untersuchungen konnten verschiedene Versagensmechanismen beobachtet werden. Dabei spielt die Flüssigkeit in den Behältern eine entscheidende Rolle. Zunächst soll auf die Versagensmechanismen

für den Beschuss von leeren Behältern eingegangen werden.

Bei dem Beschuss von leeren Behältern wurde in Bezug auf das Tragverhalten der Gesamtstruktur nur die lokal begrenzte Perforation der Behälternvorder- und Rückseite beobachtet. Hierbei kam es bei jedem der untersuchten Versuche zu einer vollständigen Perforation der Vorder- und Rückseite mit einem Ein- und Ausschussloch, das jeweils in etwa dem Durchmesser des Projektils entsprach. Es handelt sich hier um einen harten Stoß, bei dem das Projektil im Verhältnis zur getroffenen Zielstruktur nur geringe Verformungen erfährt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Verformungen der Behälterwand nur lokal auftreten. Der Versagensmechanismus der getroffenen Behälterwand ist durch eine vornehmlich auf lokale Biegung zurückzuführende Zugbeanspruchung der Zielstruktur charakterisiert. Für hohe Impact-Geschwindigkeiten (siehe Versuch Beh.6 Kapitel 4.6.1) ist ein Übergang zu einem Schubversagen mit, auf Grund des hohen Aufschlagdrucks, teilweise Schmelzen der gestoßenen Körper festzustellen.

Bei dem Beschuss von flüssigkeitsgefüllten Behältern wurde in Bezug auf das Tragverhalten der Gesamtstruktur festgestellt, dass es zu einem vollständigen Aufreißen der Behälternvorderseite kommen kann. Auch hier kommt es, wie bei dem Beschuss des leeren Behälters, zunächst zu der Perforation der Behälternvorderseite. Die lokalen Versagensmechanismen sind ähnlich wie die des leeren Behälters, also durch lokale Biegung verursachte Zugbeanspruchung der Zielstruktur und bei höheren Impact-Geschwindigkeiten der Übergang zu einem Schubversagen mit teilweise Schmelzen der gestoßenen Körper. Allerdings kann es nach der lokalen Perforation bei einer ausreichend hohen Impact-Geschwindigkeit oder ausreichend geringen Behälterwanddicke zu einem teilweisen bis hin zum vollständigen Aufreißen der beschossenen Behälterseite kommen. Dieses ist auf Zugspannungsspitzen an dem Einschussloch zurückzuführen, und führt zu einem von dem Einschussloch ausgehendem Aufreißen der Behälterwand.

Der Beschuss von teilweise mit Flüssigkeit gefüllten Behältern weist ähnliche Versagensmechanismen auf, wie sie auch bei den vollständig gefüllten Behältern festzustellen sind. Es kann ebenso ein katastrophales Versagen der Behälterwand eintreten, allerdings reißt die Behälterwand vornehmlich bis zur Füllgrenze der Flüssigkeit auf.

Bei den Untersuchungen eines unmittelbaren Vergleichs der ballistischen Grenze leerer und mit Flüssigkeit gefüllter Behältern konnte festgestellt werden, dass eine Abhängigkeit von der Wanddicke des Behälters besteht. Bisher war die Wanddicke als Einflussgröße bei diesem Vergleich in der Literatur außer Acht gelassen worden. Und so ging man ([23]) davon aus, dass in den Untersuchungen von Neilson et. al. [67] und Xiaoqing et. al. [95] widersprüchliche Ergebnisse herausgefunden wurden. Ein Vergleich der ballistischen Grenze für den Beschuss von leeren und gefüllten Behältern stellte allerdings heraus, dass die Untersuchungen von [67] und [95] sich nicht widersprechen.

Zunächst wurde für einen Behälter mit einer Wanddicke von 1,0 mm die ballistische Grenze mit und ohne Flüssigkeitsfüllung ermittelt. Dabei zeigte sich, dass der mit Flüssigkeit gefüllte Behälter eine höhere ballistische Grenze als der leere Behälter aufwies. Grund dafür ist, dass bei einem Behälter mit einer geringen Wanddicke die Behälterwand lokal auf Zug (dishing) versagt. Befindet sich hinter dem Auftreffpunkt des Projektils Flüssigkeit, so führt das lokal zu einer "homogeneren Bettung" und die Zugspannungen in der Behälterwand verteilen sich auf einen größeren Bereich (siehe auch Kapitel 2 und Kapitel 6).

Bei einem weiteren Vergleich der ballistischen Grenze von leeren und gefüllten Behältern wurden die jeweiligen Behälter mit einem Projektil gleicher Impact-Geschwindigkeit beschossen. Dabei zeigte sich, dass der leere Behälter (10 mm Wanddicke) eine höhere ballistische Grenze als der mit Flüssigkeit gefüllte (12 mm Wanddicke) aufwies. Bei einem Behälter mit einer größeren Wanddicke versagt die Behälterwand lokal auf Schub (plugging). Hier wirkt sich die Bettung der Behälterwand durch die Flüssigkeit negativ aus und begünstigt ein Schubversagen (siehe auch Kapitel 2 und Kapitel 6).

Vergleicht man diese Ergebnisse wiederum mit denen von Neilson et. al. [67] und Xiaoqing et. al. [95], so ist der Versuchsaufbau von Neilson mit den ersten oberhalb erwähnten Untersuchungen und der Versuchsaufbau von Xiaoqing mit dem zweiten Untersuchungen der ballistischen Grenze vergleichbar.

Der Einfluss des Behältermaterials auf das Tragverhalten wurde an Hand von gebräuchlichen Behälterstählen und einer Aluminiumlegierung untersucht. Die Behälterstähle und die Aluminiumlegierung besaßen unterschiedliche Streckgrenzen,

Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen (siehe Kapitel 6). In diesen Untersuchungen zeigte sich, dass eine hohe Duktilität des Behältermaterials ein katastrophales Versagen des Behälters vermindert. Es zeigte sich, dass einerseits die Drücke der durch die Flüssigkeit laufenden Primärwelle auf Grund der dreidimensionalen Ausbreitung in der Flüssigkeit abnehmen und ein Teil der in der Druckwelle befindlichen kinetischen Energie durch die Behälterwand in Formänderungsarbeit übergeht. Da bei den hier untersuchten Behältern die Geometrie und Impact-Geschwindigkeit des Projektils gleich waren, konnte unmittelbar ein Rückschluss auf die Formänderungsarbeit des jeweiligen Materials gezogen werden. Auf Grund der annähernden Inkompressibilität von Wasser hat die mögliche Formänderungsarbeit einer Behälterwand einen großen Einfluss auf die Reflexion der Primärdruckwelle in der Flüssigkeit. Geht man davon aus, dass bei der Dimensionierung eines Behälters für die angenommenen Belastungen als Gegengröße die Zugfestigkeit dient und so die Wanddicke bestimmt wird, so kann die Dehnfähigkeit als stille Lastreserve angesehen werden. Daher hat die Bruchdehnung des Behältermaterials einen größeren Einfluss auf die Versagensart als die Zugfestigkeit.

Für die Bemessung von flüssigkeitsgefüllten Behältern sollte folgendes berücksichtigt werden:

Zunächst muss abgeschätzt werden, ob ein mögliches Gefährdungspotential für die Umgebung auf Grund der in dem Behälter gelagerten Flüssigkeit besteht. Davon ist abhängig, ob man einen möglichen Impact und den damit verbundenen Versagensmechanismus des Behälters in Betracht ziehen sollte.

Wie zuvor bereits erwähnt, hat die Dehnfähigkeit des Behältermaterials einen großen Einfluss auf das Tragverhalten bei dem Beschuss von flüssigkeitsgefüllten Behältern. Wenn es die Lagerung der Flüssigkeit und die statische Belastung zulässt, sollte ein Behältermaterial verwendet werden, das möglichst große Dehnungen aufnehmen kann.

Auf der Basis der hier gewonnenen Erkenntnisse (siehe Kapitel 6.2) stellte sich heraus, dass die Behälter katastrophal versagten, wenn die Primärdruckwelle an der Behälterrückseite einen Druckwert in Höhe der statisch aufnehmbaren Meridianzugspannung in der Behälterwand erreichte. Um die Wahrscheinlichkeit

eines katastrophalen Versagens der Behälterwand zu minimieren muss zusätzlich bei einer Dimensionierung beachtet werden, dass ein eventueller statischer Innendruck, sowie der hydrostatische Innendruck von den zulässigen Zugspannungen der Behälterwand abgezogen werden müssen. In der Formel

$$p_D < \frac{\sigma_\varphi \cdot t}{r} - p_I \quad (8.1)$$

bedeuten p_D den Druck in der Primärwelle an der Behälterrückseite, σ_φ die zulässigen Meridianzugspannungen der Behälterwand, t die Behälterwanddicke, r den Radius des Behälters und p_I die Summe aus statischen und hydrostatischen Innendruck. p_D muss mit Hilfe eines FE-Programms ermittelt werden und läßt sich nicht pauschal bestimmen, da Geometrie, anfängliche Impact-Geschwindigkeit und Masse des Impact-Körpers einen entscheidenden Einfluss haben.

Besteht die Chance, einen möglichen Impact durch eine Schutzmaßnahme zu verhindern oder zumindest stark abzubremsen, so ist dieses die sicherste Alternative, um ein mögliches katastrophales Versagen eines Behälters zu vermeiden.

9 Zusammenfassung

Die am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie durchgeführten Versuche zeigen, dass flüssigkeitsgefüllte Behälter unter dynamischer Belastung speziell dimensioniert werden müssen, damit zum Beispiel toxische Flüssigkeiten nicht die Umwelt gefährden. Das Gefährdungspotential zu quantifizieren und Einflussgrößen, die zu einem katastrophalen Versagen der Behälterwand führen, abschätzen zu können, ist Teil dieser Untersuchungen gewesen. Beim Beschuss von Behältern sind Projektil-Geschwindigkeit und Behälterwanddicke die maßgebenden Parameter welche das Versagensbild bestimmen. Es konnte festgestellt werden, dass leere und flüssigkeitsgefüllte Behälter beim Beschuss ein unterschiedliches Tragverhalten aufweisen. Im Gegensatz zu dem Beschuss von leeren Behältern besteht bei flüssigkeitsgefüllten Behältern die Gefahr des Versagens der gesamten Behälterstruktur. Dieses Gefährdungspotential ist auf die bei dieser Beanspruchung mittragende Wirkung der Flüssigkeit zurückzuführen. Besteht in einem angenommenen Fall ein besonderes Gefährdungspotential durch eine gelagerte Flüssigkeit, so muss abgeschätzt werden ob der Behälter auch für diese außergewöhnlichen Belastungen dimensioniert werden soll.

Die Erkenntnisse aus den durchgeführten Versuchen und numerischen Simulationen bilden die Grundlage zum Verständniss des Versagens von wassergefüllten Behältern unter Beschuss. Ausgehend von diesen Untersuchungen besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich des Einflusses anderer Geometrien und anderer Materialien auf das Tragverhalten dynamisch belasteter Behälter.

10 Literatur

- [1] ALTENBACH, J., ALTENBACH, H.:
Einführung in die Kontinuumsmechanik. B.G. Teubner Stuttgart
1994
- [2] ACHENBACH, J.D.:
Wave Propagation in elastic Solids. Amsterdam, North-Holland
Publishing Company, 1973
- [3] AMMANN, W., et al.:
Impact: Effects of Fast Transient Loadings. ISBN 9061918626
Balkema, Rotterdam 1988
- [4] AMMANN, W.:
Stahlbeton- und Spannbetontragwerke unter stoßartiger Belastung;
Bericht Nr. 142 des Instituts für Baustatik und Konstruktion ETH-
Zürich, Basel; Birkhäuser, 1981
- [5] AWERBUCH, J., BODNER, S.R.:
An investigation of oblique perforation of metallic plates by
projectiles. Exp. Mech. Vol. 17, pp. 147-153, 1977
- [6] ASAY, J.R., KERLEY, G.I.:
The response of materials to dynamic loading. Int. J. Eng., Vol.5,
pp. 69-99, 1987
- [7] ASAY, J.R., SHAHINPOOR, M.:
High-Pressure Shock compression of Solids, Springer Verlag 1994
- [8] BACKMAN, M.E., GOLDSMITH, W.:
The mechanics of penetration of projectiles into targets. Int. J.
Engang Sci. Vol.16, pp.1-99, 1978

- [9] BAI, Y.L., JOHNSON, W.:
Plugging: physical understanding and energy absorption. *Metals Tech.* Vol. 9, pp. 182-190, 1982
- [10] BARNES, D., BARR, P., et al:
Experimental Simulation of a light Aircraft Crash on to a Nuclear Power Plant Auxiliary Building Roof. UKAEA AEE Winfrith, Dorset 1984
- [11] BARR, P., CARTER, P.G., HOWE, W.D., NEILSON, A.J., RICHARDS, A.E.:
Experimental Studies of the Impact Resistance of Steel-Faced Concrete Composites. UKAEA AEE Winfrith, Dorset 1983
- [12] BATHE, K.-J.:
Finite-Elemente-Methoden. 2.Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2002
- [13] BIGGS, J.M:
Introduction to Structural Dynamics; New York ; Mc-Graw-Hill Book Company, 1964
- [14] BLOCK, K.:
Der harte Querstoß - Impact - auf Balken aus Stahl. Holz und Stahlbeton, Dissertation Universität Dortmund 1983
- [15] BOMHARD, H.:
Concrete Pressure Vessels - The Preventive Answer to the Mexico City LPG Disaster. GASTECH Proceedings, pp. 415- 424, 1986
- [16] CALDER, C.A., GOLDSMITH, W.:
Plastic deformation and perforation of thin plates resulting from projectile impact. *Int. J. Solids Struct.* Vol. 7, pp. 863-881, 1971
- [17] CHEN, W.-F.:
Constitutive Equations for Engineering Materials. Vol. 1+2, Elsevier Amsterdam-London-New York-Tokyo 1994

- [18] CHRISTIANSEN, E.L., KERR, J.H., WHITNEY, J.P.:
Debris cloud ablation in gas-filled Pressur vessels. *Int. J. Impact Engng.* Vol.20, pp. 173-184, 1997
- [19] Cichocki, K.:
Effects of underwater blast loading on structures with protective elements. *Int. J. Impact Engng.* Vol. 22, pp. 609-617, 1999
- [20] CLOUGH, R.W., PENZIEN, J.:
Dynamics of Structures, 2nd edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 1993
- [21] CORBETT, G.G., REID, S.R.:
Failure of composite pipes under local loading with a hemispherically-tipped intender. *Int. J. Impact Engng.* Vol. 15, No. 4, pp. 465-490, 1994
- [22] CORBETT, G.G., REID, S.R., AL-HASSANI, S.T.S.:
Static and dynamic penetration of steel tubes by hemispherically nosed punches. *Int. J. Impact Engng.* Vol. 9, No. 2, pp. 165-190, 1990
- [23] CORBETT, G.G., REID, S.R., AL-HASSANI, S.T.S.:
Resistance of Steel-Concrete Sandwich Tubes to penetration. *Int. J. Impact Engng.* Vol. 9, No. 2, pp. 191-203 , 1990
- [24] CORBETT, G.G., REID, S.R., JOHNSON, W.:
Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: a review. *Int. J. Impact Engng.* Vol. 18, pp.141-230, 1996
- [25] CORRAN, R.S.J, SHADBOLD, P.J., RUIZ, C.:
Impact loading Plates- an experimental investigation. *Int. J. Impact Engng.* Vol. 1, pp. 3-22, 1983

- [26] CROUCH, I.G., BAXTER, B.J., WOODWARD, R.L.:
Empirical test of a model for thin plate perforation. *Int. J. Impact Engng.* Vol. 9, pp. 19-33, 1990
- [27] DEGEN, P.P.:
Perforation of Reinforced Concrete Slabs by Rigid Missiles. *ASCE Journal of the Structural Division*, Vol. 106, No. ST7, pp. 1623-1642, 1984
- [28] GUPTA, N.K., MADHU, V.:
Normal and oblique impact of a kinetic energy projectile on mild steel plates. *Int. J. Impact Engng.* Vol. 12, pp. 333-344, 1992
- [29] EBERT, H.:
Pysikalisches Taschenbuch. Friedrich Vieweg Sohn
Braunschweig, 1986
- [30] EIBL, J.:
Verhalten von Betonkonstruktionen unter außergewöhnlichen Einwirkungen. Generalbericht zum Verhalten von Stahlbeton unter Stoßbelastung. *Vorträge Deutscher Betontag 1979*, Deutscher Betonverein E.V., Wiesbaden Eigenverlag, pp. 1-16, 1979
- [31] EIBL, J.:
Baudynamik. *Betonkalender 1997*, Teil 2, Seiten 775-861, Ernst Sohn Verlag, Berlin 1997
- [32] EIBL, J., (Herausgeber):
Berichte zum Forschungskolloquium "Stoßartige Belastung von Stahlbetonbauteilen". Abteilung Bauwesen, Konstruktiver Ingenieurbau, Universität Dortmund 1980

- [33] EIBL, J., EBNER, M.:
Untersuchungen zum Verhalten von Betonstrukturen beim Auftreffen von Bruchstücken. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben BMBF 1500930, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe, 1995
- [34] EIBL, J., HENSELEIT, O., SCHLÜTER, F.-H.:
Baudynamik. Betonkalender 1988, Teil 2, Seiten 665-774, Ernst Sohn Verlag, Berlin 1988
- [35] EIBL, J., KLEIN, E., KOBLER, G.:
Verhalten von Betonstrukturen bei harten Stößen- Teil 1: Betonverhalten bei hoher hydromechanischer Beanspruchung. Forschungsbericht zum DFG-Vorhaben EI-114/13, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe, 1994
- [36] EIBL, J., LEUKEL, W.:
Experimentelle Studien an einer Versuchs-Siloanlage zur Druckentlastung von Staubexplosionen. SFB 219, Arbeits- und Ergebnisbericht 1987- 1989, Eigenverlag SFB 219, pp. 243-264, 1990
- [37] FEYERABEND, M.:
Der harte Querstoß auf Stützen aus Stahl und Stahlbeton. Dissertation und Heft 7, Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe (TH), 1988
- [38] GEFKEN, P.R., KIRKPATRICK, S.W., HOLMES, B.S.:
Response of impulsively loaded cylindrical shells. Int. J. Impact Engng Vol. 7, No. 2, pp. 213-227, 1988
- [39] GHOSH, S.K., JOHNSON, W., REID, S.R., YU, T.X.:
On thin rings and tubes subjected to centrally opposed concentrated loads. Int. J. Mech. Sci. Vol. 23, pp. 183-194, 1981

- [40] GOLDSMITH, W., SACKMAN, J.L.:
An experimental study of absorption in impact on sandwich plates. Int. J. Impact Engng. Vol. 12, pp. 241-262, 1992
- [41] VAN DER GRINTEN, J.G.M.:
An Experimental Study of Shock-Induced Wave Propagation in Dry, Water-Saturated, and Partially Saturated porous Media. CIP-Gegevens Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, 1987
- [42] HAMPE, E.:
Bemerkungen zum Tragverhalten von Behälterbauwerken unter außergewöhnlichen dynamischen Einwirkungen. Beton- und Stahlbetonbau, S. 123-128, 155-160, 194-198, 1985
- [43] HETHERINGTON, J.G., RAJAGOPALAN, B.P.:
An investigation into the energy absorbed during ballistic perforation of composite armours. Int. J. Impact Engng. Vol. 11, pp. 33-40, 1991
- [44] HIBBIT, KARLSON, SORENSEN, INC: ABAQUS-Explicit Manuals Vol. I + II, Theory Manual, Example Problems Manual Version 5.8.
- [45] HOLMES, B.S., KIRKPATRICK, S.W., SCHWER, L.E.:
Response of metal tanks to impulsive spot loading: Experiments and calculation. ISBN 9061918626 Balkema, Rotterdam 1988
- [46] JOHN, R., SHAH, S.P.:
Constitutive modeling of concrete under impact loading. Amman et al. (Eds). Impact: Effect of fast transient loadings, Balkema, Rotterdam, pp. 37-65, 1988

- [47] JOHNSON, W.:
Impact strength of materials. Edward Arnold, London, Crane,
Russat, New York, 1972
- [48] JOHNSON, W., REID, S.R., GHOSH, S.K.:
Piercing of cylindrical tubes. Century 2 Pressure Vessel Piping
Conf. ASME., San Fransisco, CA, USA. August 12- 15 1980
- [49] JOHNSON, W., GHOSH, S.K., MAMALIS, A.G., REDDY, T.Y.,
REID, S.R.:
The quasi-static piercing of cylindrical tubes and shells. Int. J.
Mech. Sci. Vol. 22, pp. 9-20, 1980
- [50] JONAS, G.H., ZUKAS, J.A.:
Mechanics of penetration: analysis and experiment. Int. J. Engng
Sci. Vol. 16, pp. 879-904, 1978
- [51] JONES, N., SHEN, W.Q.:
A theoretical study of the lateral impact of fully clamped pipelines.
Proc. Inst. Mech. Engrs. Vol. 206(E), pp. 129-146, 1992
- [52] KIRKPATRICK, S.W., HOLMES, B.S.:
Struktural Response of Thin Cylindrical Shells Subjektet to
Impulsive External Loads. AIAA Journal, pp. 317-331 Vol. 26,
No. 1, 1988
- [53] KOLSKY, H.:
Stress Waves in Solids. New York, Dover Publication, Inc., 1963
- [54] KRAFT, J.M.:
Surface friction in ballistic penetration. J. Appl. Phys. Vol. 26(10),
pp. 1248-1253, 1955

- [55] KUCHLING, H.:
Taschenbuch der Physik. Frankfurt a. Main, Verlag Harri Deutsch, 1989
- [56] LAMBERT, M., SCHNEIDER, E.:
Hypervelocity impacts on gas filled pressur vessels. Int. J. Impact Engng. Vol. 20, pp. 491-498, 1997
- [57] LANGSETH, M., LARSEN, P.K.:
Dropped objekts plugging capacity of steel plates: an experimental investigation. Int. J. Impact Engng. Vol. 9, pp.289-316, 1990
- [58] LAZZERI, L., OLIVERI, M., TRAVI, S.:
On the Analysis of the Consequences of Aircraft Impact for the Design of Struktures and Components. Transactions of the 6th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Paris 1981, Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 1981
- [59] LEPPIN, S., WOODWARD, R.L.:
Perforation mechanisms in thin titanium alloy targets. Int. J. Impact Engng. Vol. 4, pp. 107-115, 1986
- [60] LEVY, N., GOLDSMITH, W.:
Normal impact and perforation of thin plates by hemispherically tipped projectiles. Int. J. Impact Engng. Vol. 2, pp. 299-324, 1984
- [61] LINDNER, H.:
Physik für Ingenieure. 13. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig - Köln 1992

- [62] LISS, J., GOLDSMITH, W.:
Plate perforation phenomena due to normal impact of blunt cylinders. *Int. J. Impact Engng.* Vol. 2, pp. 37-64, 1984
- [63] LORTZ, D.:
Hydromechanik. B.I.-Hochschultaschenbuch Band 696,
Wissenschaftsverlag Mannheim Leipzig Wien Zürich 1993
- [64] MEYERS, M.A.:
Dynamic Behavior of Materials. John Willy Sons, Inc. New York, 1994
- [65] MULLIN, S.A., COUQUE, H., COUR-PALIS, B.G., GROSCH, D.J., WALKER, J.D.:
Bursting of shielded pressure vessels subject to hypervelocity impact. *Int. J. Impact Engng.* Vol. 20, pp. 579-590, 1997
- [66] NEILSON, A.J.:
Missile impact on metal structures. *Nuclear Energy*, Vol. 19(3), pp. 191-198, 1980
- [67] NEILSON, A.J.:
Hard Missile impact on plates and tubes. Seminar on The State-of-the-Art in the Simulation of Impulsive and Impact Loadings, St Peter s College, Oxford, July, 1983
- [68] NEILSON, A.J., HOWE, W.D., GARTON, G.P.:
Impact resistance of mild steel pipes: An experimental study. Winfrith UKAEA Report AEEW-R 2125, 1987

- [69] VON NEUMANN, J., RICHTMYER, R.D.:
A Method for the Numerical Calculation of Hydrodynamic Shocks.
J. of Applied Physics, Vol. 21, No. 3, pp. 232-237, 1950
- [70] NICHOLAS, T., RAJENDRAN, A.M.:
In High Velocity Impact Dynamics, pp. 127-296 J.A. ZUKAS(ed).
John Wiley, 1990
- [71] NOWACKI, W.H.:
Stress Waves in Non-Elastic Solids. Oxford, Pergamon Press, 1978
- [72] OCKERT, J.:
Ein Stoffgesetz für die Schockwellenausbreitung in Beton.
Dissertation, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie,
Universität Karlsruhe, 1997
- [73] OHTE, S., YOSHIZAWA, H., CHIBA, N., SHIDA, S.:
Impact strength of steel plates struck by projectiles. Bull, JSME,
Vol. 25.206, pp. 1226-1231, 1982
- [74] ONAT, E.T., HAYTHORNTHWAITE, R.M.:
The load carrying capacity of circular plates at large deflections. J.
App. Mech. Vol. 23, pp. 49-55, 1956
- [75] PALOMBY, C., STRONGE, W.J.:
Blunt missile perforation of plates and shells by discing. Int. J.
Engng Vol. 7, No. 1, pp. 85- 100, 1988
- [76] RECHT, R.F., IPSON, T.W.:
Ballistic perforation dynamics. J. Appl. Mech. Vol. 30, pp. 385-39,
1963

- [77] REED, P.E., BREEDVELD, G., LIM, B.C.:
Simulation of the drop impact test for moulded thermoplastic containers. *Int. J. Impact Engng.* Vol. 24, pp. 133-153, 2000
- [78] REED, P.E.:
Influence of geometrical parameters on the mode of collapse of a “pinched” rigid-plastic cylindrical shell. *Int. J. Solids Struct.* Vol. 14, pp. 1027-1043, 1978
- [79] RIERA, J.D.:
On the Stress analysis of Structures Subjected to Aircraft Impact Forces. *Nuclear Engineering and Design* Vol.8, pp.415-426, 1968
- [80] ROBINS, B.:
New Principles of Gunnery, London, 1742
- [81] SCHEVER, L.E., SALAMON, N.J., LIU, W.K.:
Computational Techniques for Contact, Impact, Penetration and Perforation of Solids. ASME, 1988
- [82] SCHLÜTER, F.H.:
Dicke Stahlbetonplatten unter stoßartiger Belastung - Flugzeugabsturz -. Dissertation und Heft 2, Schriftenreihe des IfMB, Universität Karlsruhe (TH), 1987
- [83] STEVENS, D., HOGG, D., TARBELL, M., MODARES, D.:
Mechanical response and liquid release characteristics of fragment-impacted storage tanks. Proceedings of the 8-th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, 21-25 April 1997, McLean, Virginia

- [84] STEMPNIEWSKI, L.:
Flüssigkeitsgefüllte Stahlbetonbehälter unter Erdbebeneinwirkung.
Dissertation und Heft 31, Schriftenreihe des IfMB, Universität
Karlsruhe (TH), 1990
- [85] STRONGE, W.J.:
Metal Forming and Impact Mechanics, pp.389-402 (S. Reid ed.),
Pergamon Press, 1985
- [86] TELITCHEV, I.Y., SCHÄFER, F.K., SCHNEIDEER, E.E.,
LAMBERT, M.:
Analysis of the fracture of gas-filled pressure vessels under
hypervelocity impact. Int. J. Impact Engng. Vol.23, pp.905-919,
1999
- [87] THOMAS, S.G., REID, S.R., JOHNSON, W.:
Large deformations of thin-walled circular tubes under transverse
loading. Part I. Int. J. Mech. Sci. Vol. 18, pp. 325-333, 1976
- [88] THOMAS, S.G., REID, S.R., JOHNSON, W.:
Large deformations of thin-walled circular tubes under transverse
loading. Part II. Int. J. Mech. Sci. Vol. 18, pp. 325-333, 1976
- [89] TIMM, T.:
Beschuss von wassergefüllten Stahlbehältern. Beton und
Stahlbetonbau 96, Seite 335, Heft 4, Ernst und Sohn, Berlin, 2001
- [90] TIMM, T., EIBL, J., STEMPNIEWSKI, L.:
Impact on fluidfilled containers. Fluid Structure Interaction, pp. 87-
96. WIT-Press, Ashurst Lodge, Ashurst, Southampton SO40 7AA,
UK, 2001 ISBN 11-85312-881-3

- [91] VOGEL, H.:
Gerthsen Physik. Springer Berlin, 19. Auflage
- [92] WHITNEY, J.P.:
Hypervelocity Impact Tests of Shielded and Unshielded Pressure Vessels, JSC-32294, March 1993
- [93] WIERZBICKI, T., SUH, M.S.:
Indentation of tubes under combined loading. Int. J. Mech. Sci. Vol 30, pp. 229-248, 1988
- [94] WIERZBICKI, T., HOO FATT, M.S.:
Damage assessment of cylinders due to impact and explosive loading. Int. J. Impact Engng. Vol. 13, pp. 215-242, 1993
- [95] WOODWARD, R.L., CIMPOERU, S.J.:
A study of the perforation of aluminium laminate targets. Int. J. Impact Engng. Vol. 21, pp. 117-131, 1998
- [96] WOODWARD, R.L., DE MORTON, M.E.:
Penetration of targets by flat-ended projectiles. Int. J. Mech.Sci. Vol. 18, pp. 119-127, 1976
- [97] WOODWARD, R.L., TRACEY, S.R., CROUCH, I.G.:
The response of homogeneous and laminated metallic sheet material to ballistic impact. J. de Physique VI Colloque C3, C3 277- C3 282, 1991
- [98] XIAOQING, M., STRONGE, W.J.:
Spherical missile impact and perforation of filled steel tubes. Int. J. Impact Engng. Vol. 3, pp. 1-16, 1985

- [99] ZIENKIEWICZ, O.C., TAYLOR, R.L.:
The Finite Element Method, Vol. 1: the Basis, Vol. 2 Soild
Mechanics, Vol. 3 Fluid Dynamics, ISBN 07506 5049 4
Butterworth, Heinemann, Oxford, 2000
- [100] ZIMMERMANN, T., REBORA, B., RODRIGUEZ, M.:
Airplane Impacts on Reinforced Concrete Shells, Symposium on
concrete Strukturen under Impact and Impulsive Loading, Berlin
Bundesanstalt für Materialprüfung, 1982
- [101] ZUKAS, J.A., NICHOLAS, T., SWIFT, H.F., GRESZCZUK, L.B.,
CURRAN, D.R.:
Impact Dynamics. John Wiley Sons, New York Chichester
Brisbane Toronto Singapore, 1982
- [102] ZUKAS, J.A.:
In High Velocity Impact Dynamics. pp. 593-714, J.A Zukas (ed.).
John Wiley Sons 1990

Anhang A

Versuch	Innendruck	Füllstand	Versagen	Anmerk.	Versuch	Innendruck	Füllstand	Versagen	Anmerk.
1	o	1	B		F	x	1	A	HK (ID07)
2	o	1	A		G	x	1		HK (ID08)
3	o	1	A		H	x		A/C	HK (ID09)
4	o	1	A		I	x	1		HK (ID10)
5	x	1	A		J	x	1		
6	x	1	A		K	x		A	HK (ID12)
7	x		A		L	x	1	A	0,5 Liter
8	x		A		M	x	1	A	0,5 Liter
9	x		A		N	x	1		
10	x		C		I	x	1	A	DMS
11	x	0	C		II	x	1	A	DMS
12	x	0	C		III	x	1	A	
A	x	1	A	HK (ID02)	IV	x	1	A	
B	x	1	A	HK (ID03)	V	x		A	
C	x	1		HK (ID04)	VI	x	0	C	
D	x	1		HK (ID05)	VII	o	1	A	
E	o	1	A	HK (ID06)	VIII	x	1	A	

o : Geschlossene Dose mit Kohlendruck

x : Offene Dose

A : Dose vorne an der Auftreffstelle aufgerissen

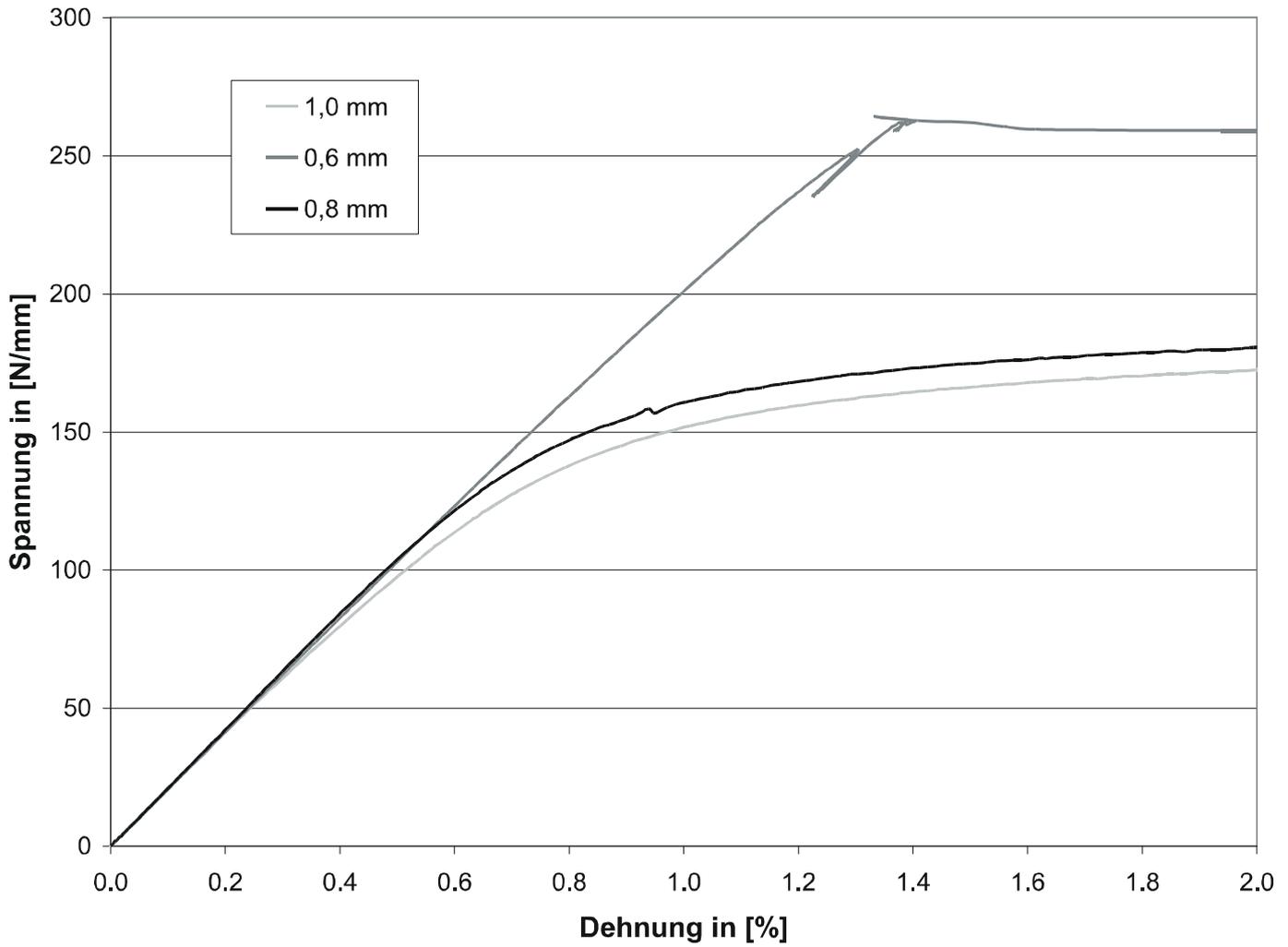
B : Dosenrückseite aufgerissen

C : anderes Versagen

HK : Aufgenommen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera

DMS : Mit Dehnmessstreifen beklebte Dose

A.1 Parameter der Versuche an Getränkedosen



A.2 Spannungs-Dehnungs-Kurven der verwendeten Behälterstähle.

**Schriftenreihe des
Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie**

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller und Prof. Dr.-Ing. Lothar Stempniewski

ISSN 0933-0461

- Heft 1** Manfred Curbach: *Festigkeitssteigerung von Beton bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten*. 1987
- Heft 2** Franz-Hermann Schlüter: *Dicke Stahlbetonplatten unter stoßartiger Belastung - Flugzeugabsturz*. 1987
- Heft 3** Marlies Schieferstein: *Der Zugflansch von Stahlbetonplattenbalken unter Längsschub und Querbiegung bei kritischer Druckbeanspruchung von Beton*. 1988
- Heft 4** Thomas Bier: *Karbonatisierung und Realkalisierung von Zementstein und Beton*. 1988
- Heft 5** Wolfgang Brameshuber: *Bruchmechanische Eigenschaften von jungem Beton*. 1988
- Heft 6** Bericht DFG-Forschungsschwerpunkt: *Durability of Non-Metallic Inanorganic Building Materials*. 1988
- Heft 7** Manfred Feyerabend: *Der harte Querstoß auf Stützen aus Stahl und Stahlbeton*. 1988
- Heft 8** Klaus F. Schönlin: *Permeabilität als Kennwert der Dauerhaftigkeit von Beton*. 1989
- Heft 9** Lothar Stempniewski: *Flüssigkeitsgefüllte Stahlbetonbehälter unter Erdbebeneinwirkung*. 1990
- Heft 10** Jörg Weidner: *Vergleich von Stoffgesetzen granularer Schüttgüter zur Silodruckermittlung*. 1990
- Heft 11** Pingli Yi: *Explosionseinwirkungen auf Stahlbetonplatten*. 1991
- Heft 12** Rainer Kunterding: *Beanspruchung der Oberfläche von Stahlbetonsilos durch Schüttgüter*. 1991

- Heft 13** Peter Haardt: *Zementgebundene und kunststoffvergütete Beschichtungen auf Beton*. 1991
- Heft 14** Günter Rombach: *Schüttguteinwirkungen auf Silozellen - Exzentrische Entleerung*. 1991
- Heft 15** Harald Garrecht: *Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk*. 1992
- Heft 16** Violandi Vratsanou: *Das nichtlineare Verhalten unbewehrter Mauerwerksscheiben unter Erdbebenbeanspruchung - Hilfsmittel zur Bestimmung der q-Faktoren*. 1992
- Heft 17** Carlos Rebelo: *Stochastische Modellierung menschengenerierter Schwingungen*. 1992
- Heft 18** Seminar 29./30. März 1993: *Erdbebenauslegung von Massivbauten unter Berücksichtigung des Eurocode 8*. 1993
- Heft 19** Hubert Bachmann: *Die Massenträgheit in einem Pseudo-Stoffgesetz für Beton bei schneller Zugbeanspruchung*. 1993
- Heft 20** DBV/AiF-Forschungsbericht: H. Emrich: *Zum Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen unter Querkraft- und Längszugbeanspruchung*. 1993
- Heft 21** Robert Stolze: *Zum Tragverhalten von Stahlbetonplatten mit von den Bruchlinien abweichender Bewehrungsrichtung - Bruchlinien-Rotationskapazität*. 1993
- Heft 22** Jie Huang: *Extern vorgespannte Segmentbrücken unter kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion*. 1994
- Heft 23** Rolf Wörner: *Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit Spritzbeton*. 1994
- Heft 24** Ioannis Retzepis: *Schiefe Betonplatten im gerissenen Zustand*. 1995
- Heft 25** Frank Dahlhaus: *Stochastische Untersuchungen von Silobeanspruchungen*. 1995

- Heft 26** Cornelius Ruckenbrod: *Statische und dynamische Phänomene bei der Entleerung von Silozellen.* 1995
- Heft 27** Shishan Zheng: *Beton bei variierender Dehngeschwindigkeit, untersucht mit einer neuen modifizierten Split-Hopkinson-Bar-Technik.* 1996
- Heft 28** Yong-zhi Lin: *Tragverhalten von Stahlfaserbeton.* 1996
- Heft 29** DFG: *Korrosion nichtmetallischer anorganischer Werkstoffe im Bauwesen.* 1996
- Heft 30** Jürgen Ockert: *Ein Stoffgesetz für die Schockwellenausbreitung in Beton.* 1997
- Heft 31** Andreas Braun: *Schüttgutbeanspruchungen von Silozellen unter Erdbebeneinwirkung.* 1997
- Heft 32** Martin Günter: *Beanspruchung und Beanspruchbarkeit des Verbundes zwischen Polymerbeschichtungen und Beton.* 1997
- Heft 33** Gerhard Lohrmann: *Faserbeton unter hoher Dehngeschwindigkeit.* 1998
- Heft 34** Klaus Idda: *Verbundverhalten von Betonrippenstäben bei Querkzug.* 1999
- Heft 35** Stephan Kranz: *Lokale Schwind- und Temperaturgradienten in bewehrten, oberflächennahen Zonen von Betonstrukturen.* 1999
- Heft 36** Gunther Herold: *Korrosion zementgebundener Werkstoffe in mineral-sauren Wässern.* 1999
- Heft 37** Mostafa Mehrafza: *Entleerungsdrücke in Massefluss-Silos - Einflüsse der Geometrie und Randbedingungen.* 2000
- Heft 38** Tarek Nasr: *Druckentlastung bei Staubexplosionen in Siloanlagen.* 2000
- Heft 39** Jan Akkermann: *Rotationsverhalten von Stahlbeton-Rahmen-ecken.* 2000
- Heft 40** Viktor Mechtcherine: *Bruchmechanische und fraktologische Untersuchungen zur Rißausbreitung in Beton.* 2001

- Heft 41** Ulrich Häußler-Combe: *Elementfreie Galerkin-Verfahren – Grundlagen und Einsatzmöglichkeiten zur Berechnung von Stahlbetontragwerken.* 2001
- Heft 42** Björn Schmidt-Hurtienne: *Ein dreiaxiales Schädigungsmodell für Beton unter Einschluß des Dehnrateneffekts bei Hochgeschwindigkeitsbelastung.* 2001
- Heft 43** Nazir Abdou: *Ein stochastisches nichtlineares Berechnungsverfahren für Stahlbeton mit finiten Elementen.* 2002
- Heft 44** Andreas Plotzitz: *Ein Verfahren zur numerischen Simulation von Betonstrukturen beim Abbruch durch Sprengen.* 2002
- Heft 45** Timon Rabczuk: *Numerische Untersuchungen zum Fragmentierungsverhalten von Beton mit Hilfe der SPH-Methode.* 2002
- Heft 46** Norbert J. Krutzik: *Zu Anwendungsgrenzen von FE-Modellen bei der Simulation von Erschütterungen in Kernkraftbauwerken bei Stoßbelastungen.* 2002
- Heft 47** Thorsten Timm: *Beschuß von flüssigkeitsgefüllten Behältern.* 2002
- Heft 48** Slobodan Kasic: *Tragverhalten von Segmentbauteilen mit interner und externer Vorspannung ohne Verbund.* 2002
- Heft 49** Christoph Kessler-Kramer: *Zugtragverhalten von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung.* 2002

Frühere Berichte des
Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie

Ulrich Häußler: *Geschwindigkeits- und Spannungsfelder beim Entleeren von Silozellen.* 1984

Wilfried Gladen: *Numerische Untersuchungen der Lasten in Silozellen beim exzentrischen Entleeren.* 1985

Bezug der Hefte: Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Universität Karlsruhe
Postfach 6980, **D - 76128 Karlsruhe**
Tel. 0721/608-2263; Fax 0721/608-2265

Druckkostenzuschuss incl. Porto: je Heft 18 Euro

Außerdem noch erhältlich:

Festschrift
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr.techn. h.c. Josef Eibl

Aus dem Massivbau und seinem Umfeld

788 Seiten, Preis incl. Versand: 25 Euro