

Simulation von flüssigkeitsgefüllten Behältern unter Beschuß

P. Starke*, G. Lemmen
EADS Militärflugzeuge GmbH
81663 München

Übersicht

Bei Hochgeschwindigkeitsaufschlag auf flüssigkeitsgefüllte Strukturen kann es neben der Schädigung am Aufschlagort selbst durch Ausbreitung von Druckwellen im Fluid auch an weiter entfernten Stellen zu Schäden kommen.

Stichworte: Fluid-Struktur-Kopplung

1 Phänomene beim Hydrodynamischen Druckstoß

Ein Geschöß, das mit hoher Geschwindigkeit in eine Flüssigkeit eindringt, erzeugt Druckwellen unterschiedlicher Stärke und Wirkdauer. Dieser Vorgang wird als Hydrodynamischer Druckstoß bezeichnet. Bild 1 zeigt einen typischen zeitlichen Verlauf. Nach einer äußerst kurzen, sehr starken Druckspitze folgt ein wesentlich längerer Abschnitt mit verhältnismäßig geringem Druck. Der Zeitraum, in dem die kurze Druckspitze wirkt, wird als Stoßwellenphase, der länger andauernde Abschnitt mit moderatem Druck als Verdrängungs- und Kavitationsphase bezeichnet.

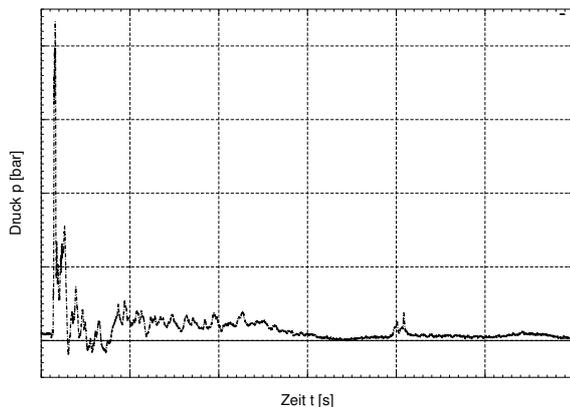


Bild 1: Typischer Druckverlauf beim Hydrodynamischen Druckstoß

Oberhalb einer kritischen Geschwindigkeit bildet

*peter.starke@eads.com

sich hinter dem eindringenden Projektil ein Hohlraum, die sogenannte Kavitationsblase. Bild 2 zeigt eine solche Blase hinter einem Splitter. In das Bild ist gestrichelt auch die Lage der Stoßwelle eingezeichnet.

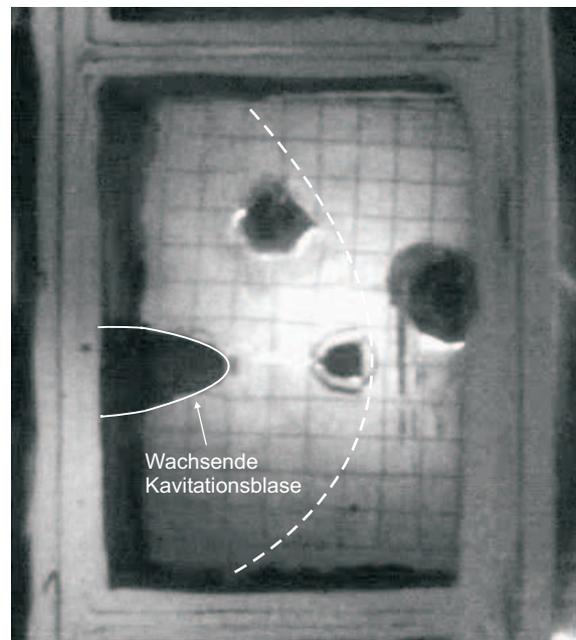


Bild 2: Stoßwelle und Kavitation beim Tankbeschuß

Eine ausführliche Beschreibung der Phänomene ist in [1] zu finden.

1.1 Stoßwellenphase

Der plötzliche Aufschlag und das Eindringen des Geschößes erzeugt in der Flüssigkeit um den Einschlagpunkt eine Stoßwellenfront. Diese breitet sich — vom Einschlagpunkt weg — etwa halbkugelförmig aus. Die Stärke des Druckstoßes nimmt mit seiner Ausbreitung schnell ab; Beobachtungen liefern Hinweise, daß die Abnahme quer zur Geschößbahn stärker ist als entlang der Bahn des Projektils.

1.2 Verdrängungs- und Kavitationsphase

Während des Eindringens in die Flüssigkeit erzeugt das Fragment entlang seiner Bahn zunächst einen zylindrischen Hohlraum, wobei die an die Kavität angrenzende Flüssigkeitsmenge radial beschleunigt wird. Dies bewirkt eine Vergrößerung des Einschubkanals in radialer Richtung.

Durch das Einschubloch strömt Luft in den Hohlraum nach und vermischt sich mit der in die Kavitation hinein verdunstenden Flüssigkeit. Darüber hinaus erzeugen heiße und möglicherweise taumelnde Fragmente zusätzlich einen Flüssigkeitsnebel.

Im Bereich der größten Radialbeschleunigung — etwa bei halber Eindringtiefe — beginnt sich im einfachsten Fall eine, meist aber mehrere kugelförmige Blasen auszubilden. Wegen der Dynamik des Vorganges und der Gegenwirkung der umgebenden Flüssigkeit entsteht eine oder mehrere pulsierende Gasblasen, die zu den Zeitpunkten ihrer Volumenminima zusätzliche Druckstöße erzeugen. Die Zeitdauer von der Entstehung der Blasen bis zu ihrer Auflösung wird als Kavitationsphase bezeichnet.

1.3 Schädigung durch den Hydrodynamischen Druckstoß

Die einzelnen zeitlichen Abschnitte des Hydrodynamischen Druckstoßes und die Phänomene, die durch die Wechselwirkung mit der Behälterstruktur entstehen, sind in Bild 3 zu sehen.

Die Stoßwelle wirkt zu kurz, um nennenswerte Verformungen der Struktur — und damit eine Schädigung — zu verursachen. Lediglich eine Verstärkung der Schäden in der unmittelbaren Umgebung des Einschubloches ist denkbar.

Die während der Verdrängungs- und Kavitationsphase auftretenden Drücke sind im Vergleich zur Stoßphase deutlich kleiner, wirken aber länger und belasten großflächig das Bauteil. Damit ist dieser Abschnitt für den größten Teil der Schädigung verantwortlich.

Das Projektil trifft an der Austrittsseite auf eine durch die Druckwelle bereits belastete und verformte Wand. Durch das Zusammenwirken der Druck- und Schlagbelastung nimmt das Ausmaß der Schäden weiter zu.

2 Simulation

Als Referenzstruktur für die Simulation wurde ein in drei Kammern unterteilter Kasten ausgewählt. Alle drei Kammern sind vollständig mit Wasser gefüllt. Die obere und untere Wand besteht aus Kohlefaserverbund (CFK). Die inneren Verbindungsstege be-

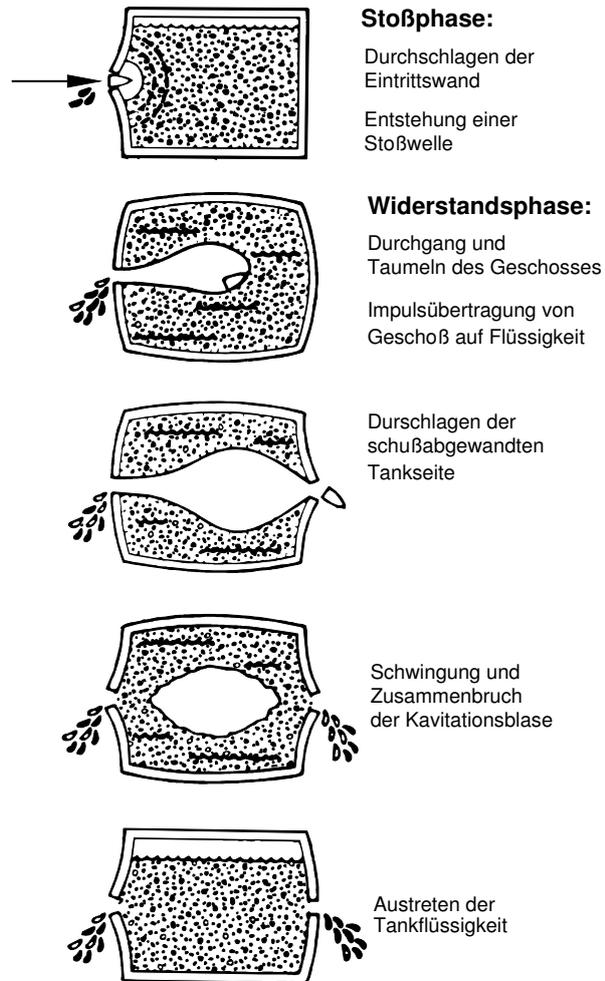


Bild 3: Zeitliche Abschnitte des Hydrodynamischen Druckstoßes, nach [1]

stehen ebenfalls aus CFK. Die äußeren Stege bestehen aus einer Aluminiumlegierung. Bild 4 zeigt eine Schrägansicht des Versuchsbauteils.

Mehrere Simulationen wurden mit unterschiedlich feiner Vernetzung im Bereich des Fluids durchgeführt. Zur Validierung dieser Berechnungen wurden am Ernst-Mach-Institut für Kurzzeitphysik Beschußversuche durchgeführt.

Aus Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, die dabei gemacht wurden, sind Wegpunkte des Geschosses ausgemessen worden. Bild 5 zeigt einen Vergleich der Geschossvorschubung in Abhängigkeit der Zeit aus Versuch und Simulationen mit unterschiedlich feinen Netzen.

Die aus den Meßpunkten abgeleitete Kurve hat keinen stetigen Verlauf, sondern besteht aus zwei Abschnitten mit stark unterschiedlicher Steigung. Der Übergang zwischen den beiden Kurvenabschnitten erfolgt schlagartig. Der Grund für diese Änderung ist die einsetzende Taumelbewegung des Projektils und der damit verbundene Anstieg des Widerstands des Geschosses.

Die aus den Simulationen abgeleiteten Weg-Zeit-

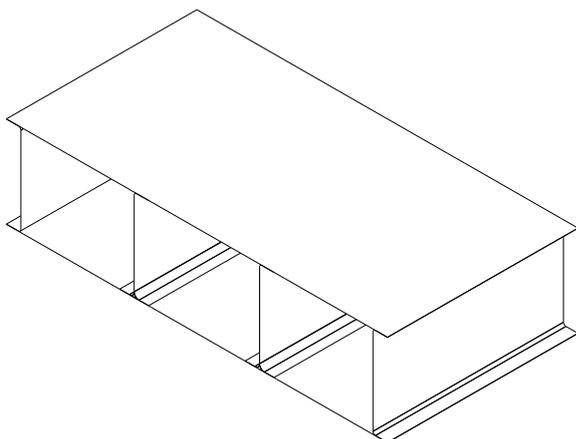


Bild 4: Referenzbauteil für Beschußversuche

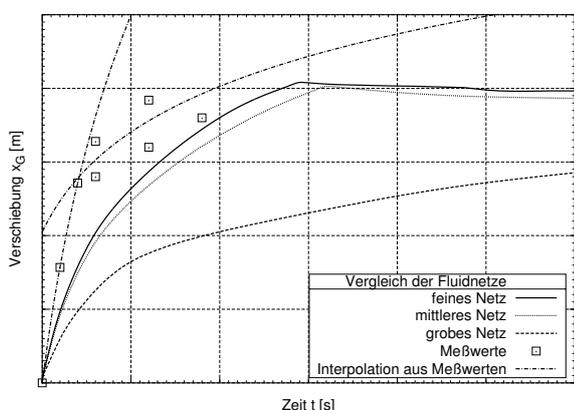


Bild 5: Vergleich der Geschoßverschiebung in Abhängigkeit der Zeit

Kurven nähern sich dem Verlauf aus dem Experiment umso mehr an, je feiner der Bereich des Fluids vernetzt wurde.

Wachstum und Zusammenbruch der Kavitationsblase in der Simulation ist in Bild 6 zu sehen. Wie auch im Versuch beobachtet, beginnt das Geschoß bei seiner Bewegung in der Flüssigkeit nach einer kurzen stabilen Phase zu taumeln. Die Taumelbewegung ist auch für die unregelmäßige Form der Kavitationsblase verantwortlich.

In den unteren Teilabbildungen ist zu sehen, daß sich die untere Bepunktung von den Stegen löst. Auch dieses Verhalten stimmt mit dem Versuch gut überein.

Ein weiteres Kriterium zur Beurteilung der Güte der Berechnung ist die Druckbelastung der Tankstruktur durch die Flüssigkeit. In Bild 7 sind für den Verlauf des Druckes in der Flüssigkeit an einer ausgewählten Stelle in Abhängigkeit der Zeit die Rohdaten aus der Simulation und die daraus mit Hilfe eines SAE 10-kHz-Filters abgeleiteten Werte zu sehen. Bei der gefilterten Kurve fällt auf, daß sie nach der scharfen Druckspitze aus der Stoßpha-

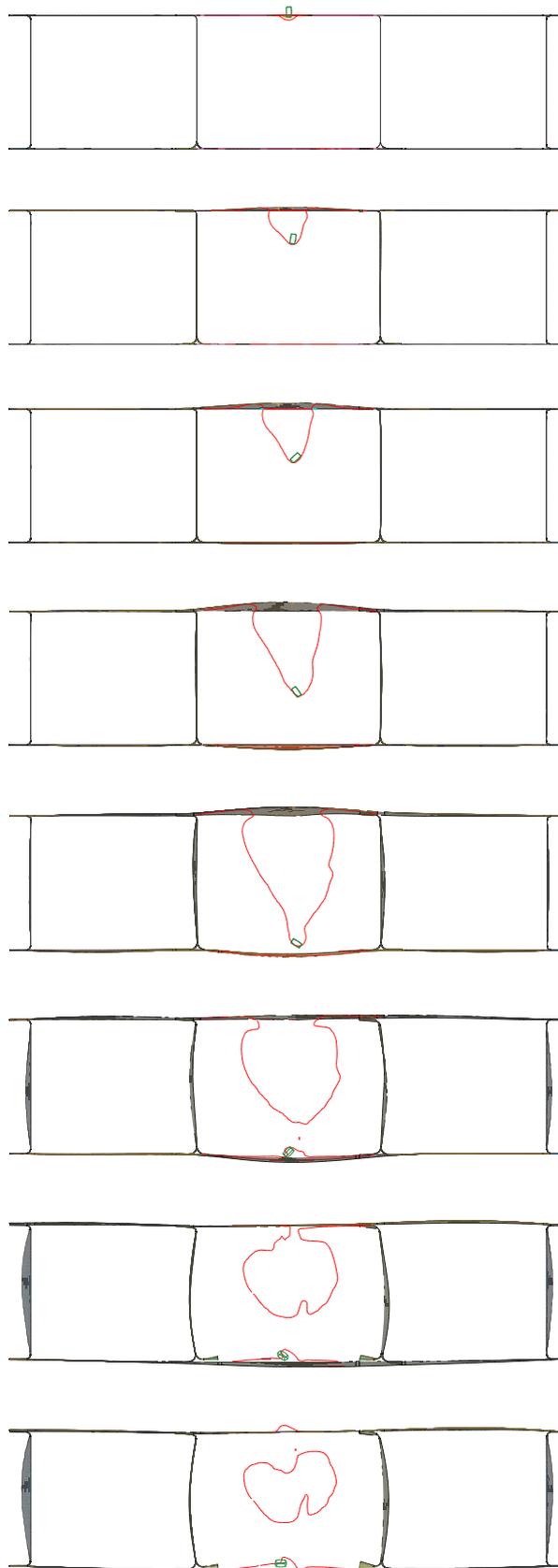


Bild 6: Wachstum und Zusammenbruch der Kavitationsblase bei der Simulation

se kurz im negativen Bereich verläuft. Dieses Überschwingen wird durch Anwendung des SAE-Filters verursacht.

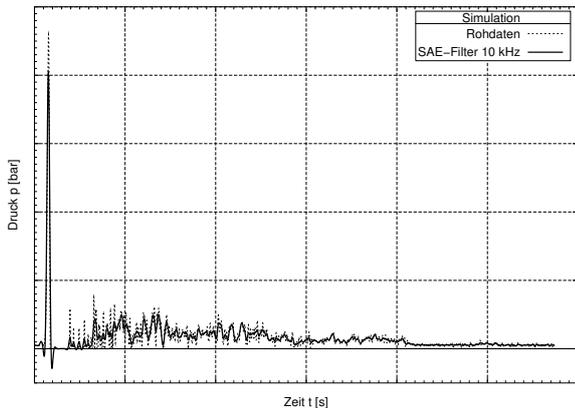


Bild 7: Auswirkung des SAE 10-kHz-Filters auf den Druckverlauf in der Simulation

Bild 8 zeigt einen Vergleich des Druckes in der Flüssigkeit an einer ausgewählten Stelle in Abhängigkeit der Zeit aus Versuch und Simulationen. Sowohl der zeitliche Verlauf als auch die Höhe des Druckes bei der Simulation stimmt mit dem Versuch sehr gut überein. Das Überschwingen der Versuchsdaten am Ende der Stoßphase führen die Verfasser auf Einflüsse der Meßtechnik zurück. Da die Meßwerte mit einem starken Rauschen behaftet waren, wurden sie mit Hilfe eines „gleitenden Mittelwertes“ geglättet.

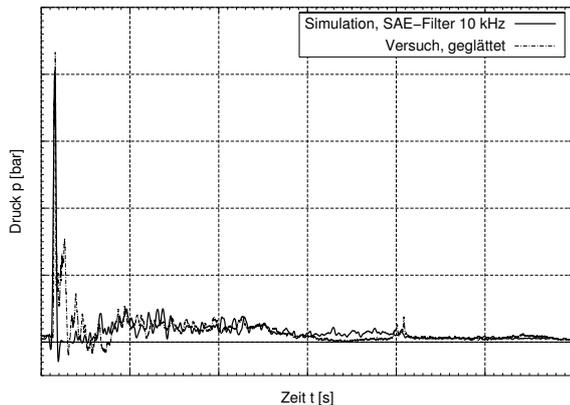


Bild 8: Vergleich des Druckes in Abhängigkeit der Zeit bei Simulation und Versuch

3 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe von LS-DYNA3D ist es grundsätzlich möglich, den Beschuß von mit Flüssigkeiten gefüllten Behältern zu simulieren. Die bei Versuchen

beobachteten Phänomene wie Stoßwellenausbreitung, Kavitationsbildung, Taumeln des Geschosses und Impulsübertragung von der Flüssigkeit auf die Tankstruktur traten auch in der Simulation auf. Die Berechnung verhält sich numerisch stabil.

Die Verzögerung des Geschosses ist von der Feinheit des Fluidnetzes abhängig. Bei den während der Widerstandsphase auftretenden Drücken wurde trotz eines verhältnismäßig groben Fluidnetzes eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Simulation erreicht. Da die Widerstandsphase für den größten Teil der Schädigung verantwortlich ist, können in Zukunft mit Hilfe von numerischen Simulationen Vorhersagen über das Ausmaß der Schäden nach Beschuß von Tankstrukturen gemacht werden.

Nach Meinung der Verfasser könnten die Simulationsergebnisse weiter verbessert werden, wenn bei zukünftigen Versionen von LS-DYNA3D für das Fluid unterschiedlich fein vernetzte Bereiche gekoppelt werden könnten. Bei „klassischen“ Paketen zur Strömungsberechnung wird diese Möglichkeit als Mehrgitter-Verfahren bezeichnet.

Für die Simulation des gegenüber dem Aufschlagvorgang verhältnismäßig langen Zeitraums des Nachschwingens der Kavitationsblase wäre eine Implementierung der Fluid-Struktur-Kopplung beim Impliziten Löser günstig.

Eine weitere Verbesserung der Simulationsergebnisse könnte dadurch erreicht werden, daß die Parameter der thermodynamischen Zustandsgleichung für das Fluid mit Hilfe von LS-OPT an die Versuchsergebnisse angepaßt werden.

Literatur

[1] **J. G. Avery**
 AGARDograph No. 238
 Design Manual for Impact Damage Tolerant Aircraft Structure
 AGARD, 7 rue Ancelle, 92200 Neuilly-sur-Seine
 ISBN 92-835-1403-3
 1981