

Dynamische Einwirkungen auf Stahlstrukturen – Simulation einer Anspannung auf eine mögliche U-Bootstruktur

Norbert Nawa, [Thomas Just](#)

Howaldtswerke – Deutsche Werft AG, Norbert.Nawa@hdw.de, Kiel, Deutschland
TNO Automotive GmbH, just@tno-automotive.de, Stuttgart, Deutschland

Abstract:

The underwater pressure field and initial shockwave from a TNT detonation was calculated using the explicit code of LS-DYNA. The effect of this initial shockwave was determined on cylindrical geometries representing a submarine. Models and material laws for water and subsequent loading were proven during these analyses. Care was taken to apply suitable loading with consideration of the model size and calculation time. Further considerations were made for the reaction of flooded sections. A provisional result came in form of the loading function *LOAD_SSA (sub-sea-analysis) for cylindrical geometries, and was proven to be useful. The *LOAD_SSA was then tested on an example geometry of an actual submarine. These results were compared with previous experience, showing that the loading and the response of a submerged submarine to shockwaves can be analyzed by LS-DYNA.

Keywords:

submarine, underwater explosion, shockwave, *LOAD_SSA

1 Einleitung

Die Entwicklung und der Bau von U-Booten hat in Deutschland eine Tradition von 150 Jahren. Einer der beiden deutschen Hersteller ist die HDW AG in Kiel. Als innovatives Unternehmen setzt HDW auf aktuelle und neueste Berechnungsmethoden, so entstand die Idee für diese Diplomarbeit, welche mit folgender Zielstellung bearbeitet wurde. Es sollte die Berechenbarkeit der Auswirkungen einer Unterwasserexplosion auf ein U-Boot mit dem expliziten FE-Programm LS-DYNA gezeigt werden. Wichtige Punkte waren dabei, das Finden einer geeigneten Belastung und die Darstellung der initialen Schockwelle am Querschnitt eines U-Bootes. Eine geeignete Belastung zu finden, heißt hier auf die Modellgröße und die Anzahl und Geometrie der verwendeten Elemente zu achten. Da die zu betrachtenden U-Boote von nicht geringer Größe sind (ca. 50 – 60 m Länge und 6-7 m Durchmesser), kann die Rechenzeit schnell sehr groß werden. Innerhalb der durchgeführten Berechnungen konnten zwei mögliche Verläufe der initialen Schockwelle am Schiffsquerschnitt ermittelt werden. Weiter wurden Analysen zu gefluteten Bereichen und dem ersten Blasenimpuls durchgeführt. Als abschließende Berechnung wurde eine Anspannung an eine Beispielgeometrie eines U-Bootes simuliert, wobei die Verbindungsstelle zwischen Vorschiff und Druckkörper näher betrachtet wurde.

2 Die Unterwasserexplosion und ihre Folgen

Eine Unterwasserexplosion ist ein sehr komplexer und energiereicher Vorgang, wobei der Verlauf einer Unterwasserexplosion von vielen verschiedenen Einflussfaktoren abhängig ist. Durch die hohe Abbrandgeschwindigkeit beim Verbrennen der Ladung wird die so genannte initiale Schockwelle ausgelöst, welche sich zuerst mit Überschall und später mit Schallgeschwindigkeit des Wassers sphärisch ausbreitet. Aus dem Verbrennungsprozess entsteht außerdem eine überhitzte und hoch komprimierte Gasblase. Diese dehnt sich infolge des Überdruckes aus und wird durch den hydrostatischen Druck des Wassers wieder auf ein Minimum des Volumens komprimiert. Beim Erreichen des minimalen Volumens wird eine zweite Druckwelle mit einem wesentlich geringeren Druck, aber mit einer höheren Intensität ausgelöst. Nach diesem Schema pulsiert die Gasblase mehrmals, wie in Abbildung 1 dargestellt. Während dieses Pulsierens wandert die Gasblase aufgrund ihrer geringeren Dichte gegenüber dem Wasser in Richtung der Wasseroberfläche. Zum Zeitpunkt der minimalen Volumina legt die Gasblase den größten Weg zurück. Erreicht die Gasblase die Wasseroberfläche, kann aufgrund der hohen Geschwindigkeit des Vorgangs Kavitation beobachtet werden. Folgende Faktoren oder Randbedingungen haben einen wesentlichen Einfluss auf den Verlauf der Explosion:

- Salzgehalt und Temperatur
- Explosionstiefe (Umgebungsdruck)
- Chemische Zusammensetzung der Ladung
- Größe und Gewicht der Ladung

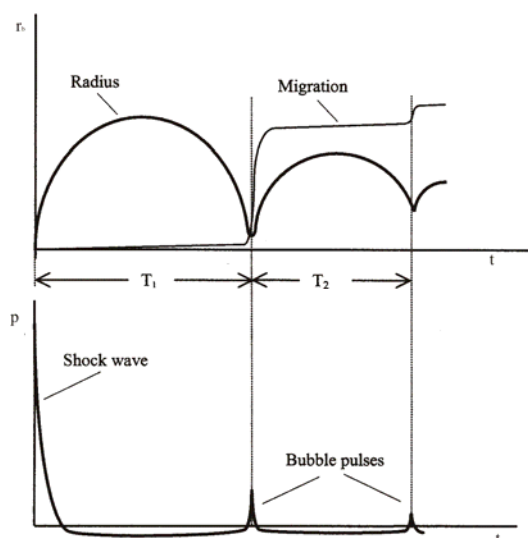


Abbildung 1 - Zeitverlauf von Radius und Druck der Gasblase

3 Berechnungsgrundlagen

Hauptziel der Betrachtungen ist es auf eine U-Bootstruktur mit einer Belastung gleich der initialen Schockwelle einzuwirken. Ein wichtiger Punkt dabei ist die Art der Einwirkung als Schockwelle, welche treten unter bestimmten Bedingungen spontan aus Druckwellen entstehen. Bei ansteigendem Druck (Druckwelle) in einer Flüssigkeit erhöht sich die Schallgeschwindigkeit entsprechend dem Druckanstieg (Abbildung 2). Ausgehend von dieser Bedingung breitet sich die Druckwelle im Bereich des Maximums schneller aus, wie am Fuße der Druckwelle. Es kommt zu einem „Aufsteilen“ der Druckwelle (Abbildung 3). Geschieht dieses bis zur Senkrechten, so wird von einer Schockwelle gesprochen. Allgemein können die Eigenschaften von Schockwellen in den folgenden Punkten kurz zusammengefasst werden:

- druckabhängig, die Ausbreitung erfolgt mit Überschall bis Schallgeschwindigkeit
- mit der Form der steilen Welle ändern sich spontan alle thermodynamischen Größen
- bei räumlichen Schockwellen fällt die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit der Entfernung zum Ursprung
- nichtlineare Superposition der Reaktionen (Reflektion und Interaktion)

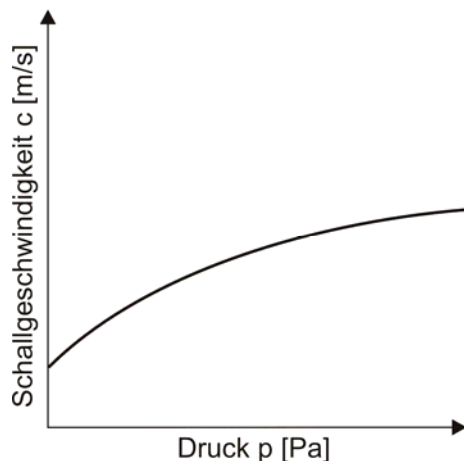


Abbildung 2 - Schallgeschwindigkeit über Druck

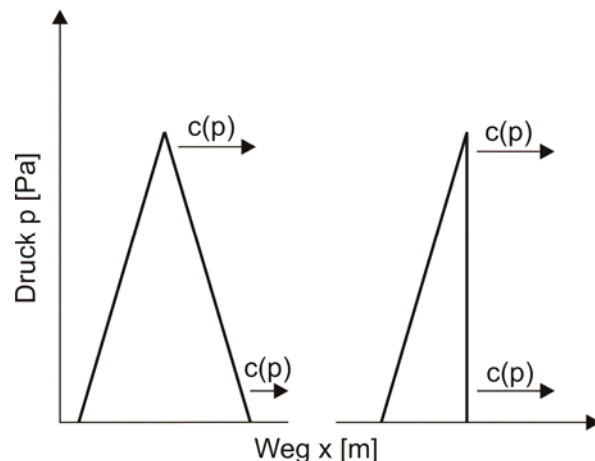


Abbildung 3 - aus Druckwelle wird Schockwelle

Nach [6] stellen Schockwellen ein so genanntes Anfangswertproblem dar, insbesondere für die Kontinuitätsbedingungen Masse, Impuls und Energie. So werden alle Werte der Kontinuitätsbedingungen bis zu einem relativen ersten Zeitpunkt, für den konkrete Werte vorhanden sind, als konstant angenommen. Der Druckverlauf am festen Ort für ebene Schockwellen kann nach [5] mit der folgenden e-Funktion bestimmt werden.

$$p(t) = p_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (1)$$

Mit den Gleichungen (2) und (3) werden der maximale Druck p_{\max} und der Abklingfaktor θ bestimmt.

$$p_{\max} = A \cdot \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{\alpha} \quad (2)$$

$$\theta = K_2 \cdot \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{\gamma} \quad (3)$$

Die Parameter A , α , K_2 und γ sind vom Sprengstoff abhängig und werden durch das BWB (Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung) in [1] vorgegeben. W ist die Ladungsmasse in Kilogramm und R ist der Abstand vom Detonationspunkt zum Betrachtungspunkt in Metern.

Vom BWB wird mit [1] die Grundlage geschaffen, ein Marineschiff zu konstruieren und für den Einsatz auszulegen. Mit experimentellen Nachweis und rechnerischen Nachweis werden zwei Möglichkeiten vorgegeben, die Tragstruktur eines U-Bootes zu bemessen. Für den rechnerischen Nachweis kann die Belastung der zu bemessenden Struktur durch vorgegebene Schockantwortspektren oder den Gleichungen (1) bis (3) aus [5] erfolgen.

4 Umsetzung in LS-DYNA

Auf konventionelle Art kann ein Druck auf eine Schalenstruktur durch *LOAD_SHELL_SET mit einer entsprechenden Lastkurve aufgebracht werden. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, einen Druck auf eine sphärische Wassergeometrie aufzubringen und als Reaktion eine Druckwelle durch modelliertes Wasser auf eine U-Bootstruktur bewegen zu lassen. Bei sehr großen U-Bootgeometrien kann die Rechenzeit sehr schnell zu groß werden, da immer ein ausreichender Teil des Umgebungswassers mit zu berechnen ist. Diese Möglichkeit wurde für Vorbetrachtungen und als Vergleichsmöglichkeit für die nächste effizientere Variante genutzt.

Eine weitere effizientere Möglichkeit mit LS-DYNA eine Unterwasserexplosion zu simulieren, ist durch die Belastungsfunktion *LOAD_SSA gegeben. Dabei wird die Schockbelastung mit Gleichung (1) bis (3) berechnet und direkt auf die U-Bootstruktur aufgebracht, ohne das Wasser modelliert werden muss. Folgende Funktionen sollen mit *LOAD_SSA bereitstehen:

- Belastung von getauchten zylindrischen Strukturen mit der initialen Schockwelle
- weitere Belastung durch die nachfolgenden Blasenimpulse
- Berücksichtigung von Kavitation
- Simulation von gefluteten Bereichen
- Reflektion der Schockwelle von Gewässergrund und Oberfläche
- Mehrere Explosionen sind simulierbar
- für die jeweilige Ladung kann der Detonationszeitpunkt einzeln festgelegt werden

5 Vorbetrachtungen

Alle Berechnungen wurden mit den gleichen Randbedingungen durchgeführt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. So ist die Entfernung Explosionsort – Schiffsstruktur 10 m und die Ansprengung erfolgt mit einer Ladung von 100 kg TNT. Für die Vorbetrachtungen sind drei Modelle entstanden, aus denen zwei brauchbare Ergebnisse lieferten.

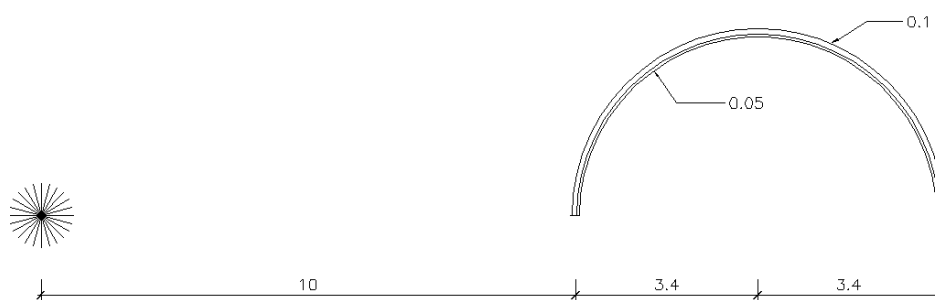


Abbildung 4 - Grundgeometrie

Aus diesen Bedingungen ergeben sich folgende zwei Kontrollwerte zur Auswertung. Erstens sollte der maximale Druck p_{\max} 2×220 bar betragen, da er vom Starrkörper vollständig reflektiert wird. Zweitens sollte die Schockwelle die Schiffsgeometrie nach etwa 6,7 ms erreichen, da sich die Schockwelle mit der Schallgeschwindigkeit des Wassers ausbreitet.

5.1 Dreidimensionales Modell

Bei diesem ersten Modell wird die Belastung nach der ersten Variante aufgebracht. Dazu wurde der Druckverlauf auf die Gasblase mit kugelförmigen Geometrierand bestimmt und per Lastkurve mit *LOAD_SHELL_SET aufgebracht. Das U-Boot wird durch einen 5 cm starken Hohlzylinder (Solid-Elemente) als Starrkörper mit den Materialdaten von Stahl unter Ausnutzung der Symmetrie abgebildet. Das Wasser um den Hohlzylinder modelliert, so dass die Schockwelle ausreichend abgebildet wird. Vernetzt wurde das Wasser mit 1-Punkt-intergrierten Tetraeder-Elementen, wobei als Material für das Wasser wird Null-Material mit Equation of State Grüneisen verwendet wurde. Als Randbedingungen kam entsprechend Symmetrie und an den freien Flächen non-reflecting boundaries (*BOUNDARY_NON_REFLECTING) zum Einsatz, um ungewollte Reflektionen durch dieses Feder-Dämpfer-System zu verhindern.

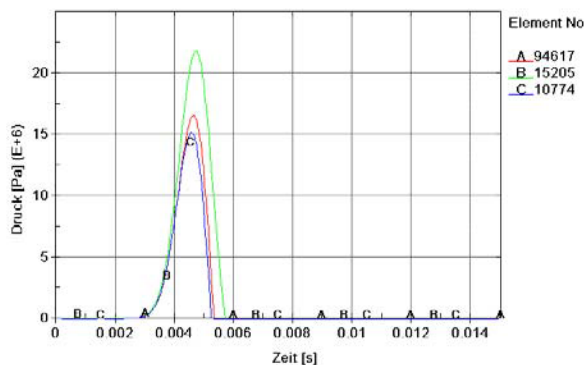


Abbildung 5 - Druckverlauf im Auftreffpunkt

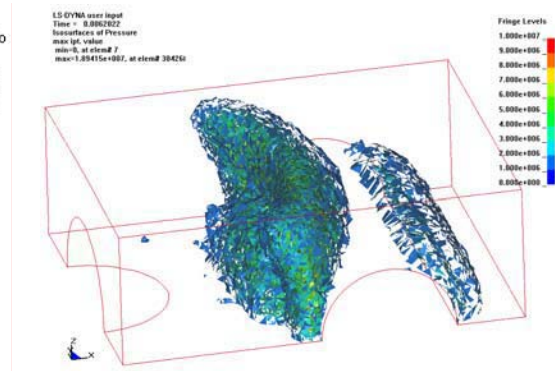
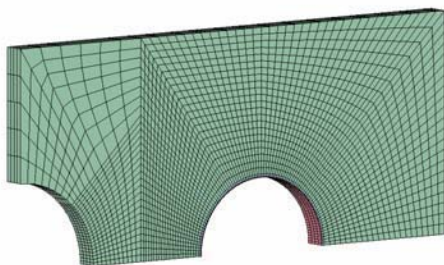


Abbildung 6 - Druckwelle und Stützdruck

Zur Auswertung werden hier drei nebeneinander liegende Wasserelemente herangezogen. Sie zeigen in Abbildung 5, dass die Ergebnisse der einzelnen Elemente sehr sprunghaft sind. Die Ursache hierfür liegt in der Netzstruktur und in der Elementgeometrie, die Tetraederelemente sind grundsätzlich zu steif und so lässt sich auch der zu geringe Druck erklären. Der Zeitpunkt des Auftreffens der Druckwelle entspricht nicht der Vorgabe, er ist trotz Abzug der Zeit für den benötigten Weg des maximalen Gasblasenradius etwa 0,8 ms zu spät. Rein qualitativ wurden trotzdem gute Ergebnisse erzielt, so ist in Abbildung 6 auch der Stützdruck auf der Rückseite und eine Reflektion der Schockwelle zu erkennen.

5.2 2d/3d-Modell



Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurde dieses Modell Abbildung 7 erstellt. Hierbei wurde die Geometrie so gewählt, dass Hexaderelemente verwendet werden. Die Randbedingungen und Material-kennwerte haben sich gegenüber dem ersten Modell nicht geändert.

Abbildung 7 - Netz 2d/3d-Modell

In Abbildung 8 ist der Druckverlauf von drei Elementen dargestellt, welche sich im Auftreffpunkt (Kurve A), im Zenit des halben Hohlzylinders (Kurve B) und auf Rückseite (Kurve C) befinden. Der maximale Druck und der Zeitpunkt des maximalen Druckes im Auftreffpunkt entsprechen diesmal den Vorgabewerten von 440 bar und 4 ms. Anhand der blauen Kurve in Abbildung 8 ist nach dem Auftreffen der Schockwelle der Stützdruck des Wassers erkennbar, wie er auch in Abbildung 9 auf der Rückseite zu sehen ist.

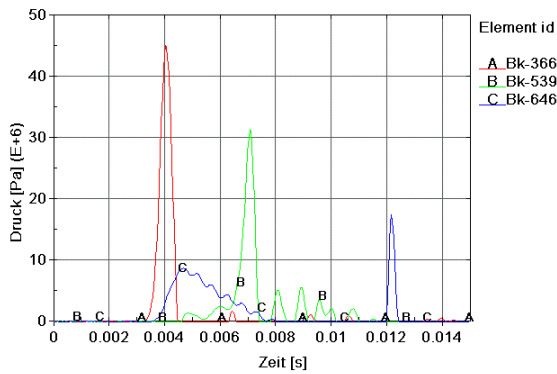


Abbildung 8 - Druckverlauf am Uboot

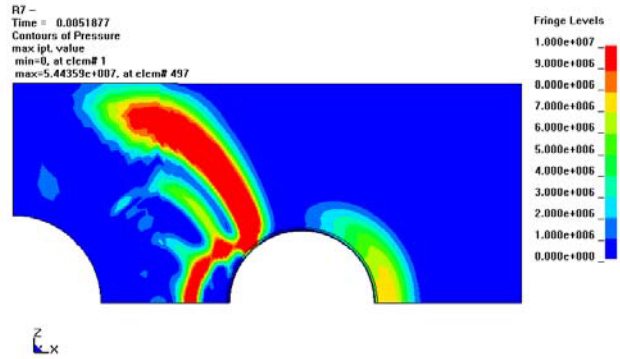
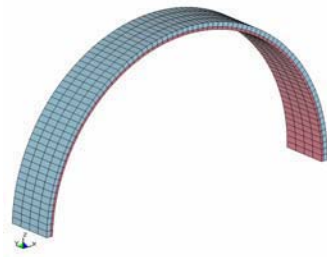


Abbildung 9 – Druckwelle, Reflektion und Stützdruck

5.3 SSA-Modell



Für das dritte Modell wurde wieder der gleiche Hohlzylinder verwendet. Um diesen Hohlzylinder eine Elementreihe Wasservolumenelemente modelliert und darauf Schalenelemente ohne Steifigkeit gelegt, welche für den Lasteintrag benötigt werden. Die Belastungskennwerte wurden direkt im Input-File festgelegt, wie in Abschnitt 4 beschrieben.

Abbildung 10 - Netz SSA-Modell

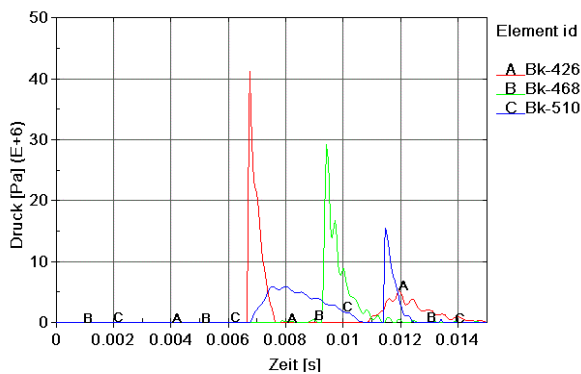


Abbildung 11 - Druckverlauf mit SSA

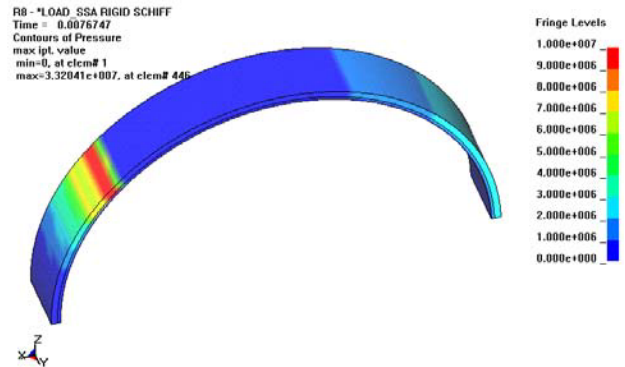


Abbildung 12 - SSA-Druck am Uboot

Der sprunghafte Anstieg des Druckverlaufes der drei über den Umfang verteilten Wasserelemente gibt die Schockwelle als steile Druckwelle gut wieder, da sich mit der Schockwelle alle thermodynamischen Größen z. B. der Druck spontan ändern. Beim Vergleich der Druck-Zeit-Verläufe von 2d/3d-Modell und SSA-Modell zeigt sich ein zeitlicher Unterschied beim Erreichen Druckmaxima auf der Rückseite des Hohlzylinders. Werden die Abstände über die Ausbreitungsgeschwindigkeit, also die Schallgeschwindigkeit des Wassers in Entfernungen umgerechnet, ergeben sich die in Abbildung 13 dargestellten Wege der Schockwelle am U-Boot und es sind Rückschlüsse zur Ursache der Zeitdifferenz möglich. Abbildung 13 zeigt, dass die Schockwelle im 2d/3d-Modell über den Umfang des U-Bootquerschnittes wandert und sich auf der Rückseite teilweise ablöst und nach einer Zeit von ca. 12 ms (18,74m) die Rückseite erreicht. Im Gegensatz dazu erreicht die Schockwelle des SSA-Modells, die Rückseite schon nach etwa 11,2 ms, das entspricht einem Weg von 16,8 m bei einer Schallgeschwindigkeit von 1500 m/s. Durch die Zeitdifferenz von 0,8 ms wird die Art des Lasteintrages durch *LOAD_SSA deutlich. Über die Entfernung der Elemente zum Detonationsort und die Schallgeschwindigkeit des Ausbreitungsmediums ermittelt LS-DYNA den Zeitpunkt des Lasteintrages und den maximalen Druck. Dabei wird die direkte Entfernung zwischen Detonationsort und dem jeweiligen Element unabhängig von Hindernissen geprüft.

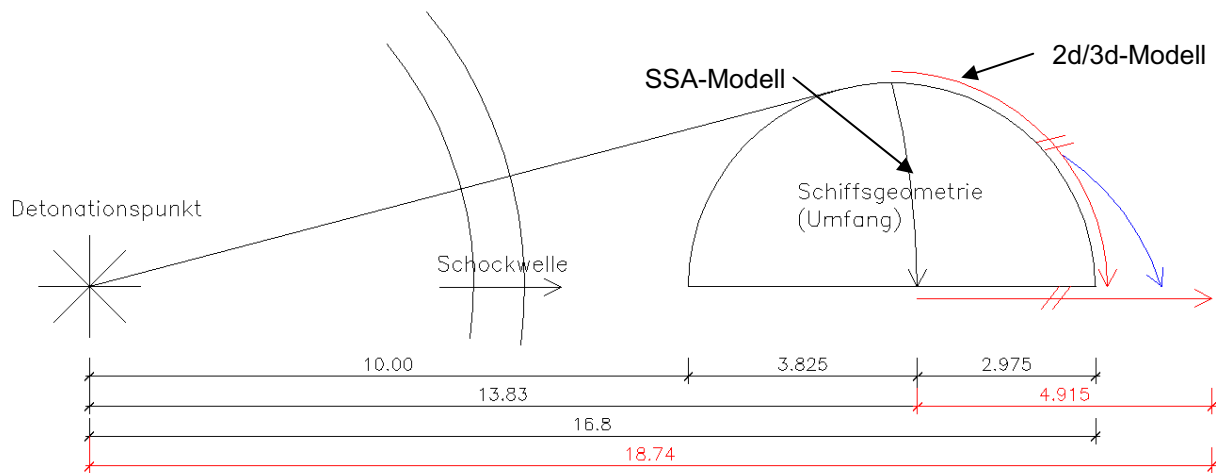


Abbildung 13 - Mögliche Wege der Schockwelle am U-Bootquerschnitt

5.4 Fazit der Vorbetrachtungen

Neben den bereits kurz dargestellten Berechnungen, wurden weitere Betrachtungen zu folgenden Punkten durchgeführt:

- Einfluss von elastischem Material
- Ausbreitung
- Einfluss des Tiefendruckes
- Berücksichtigung des ersten Gasblasenimpulses
- Simulation von gefluteten Bereichen

Die erste Möglichkeit einen Druckverlauf in das Wasser einzutragen, kann für zweidimensionale Betrachtungen genutzt werden. Für dreidimensionale Betrachtungen ist diese Variante nicht geeignet.

Weiter kann als Ergebnis der Vorbetrachtungen festgehalten werden, dass *LOAD_SSA die Belastung einer U-Bootstruktur durch eine Unterwasserexplosion hinreichend genau wiedergibt und es für die Berechnung getauchter Strukturen geeignet ist.

6 Simulation am U-Boot

Nach den Vorbetrachtungen war es Ziel eine Anspannung an einer Beispielgeometrie zu simulieren. Gleichzeitig sollen Festigkeitsbetrachtungen an der Verbindungsstelle zwischen Druckkörper, als wichtigstes Tragglied und Überlebensraum und dem Vorschiff durchgeführt werden. Innerhalb des gefluteten Vorschiffes befinden sich die Torpedorohre, das Notaufauchsystem und die Tauchzellen. Die Schwierigkeit an diesen Festigkeitsbetrachtungen liegt in der Erfassung des Verhaltens der gefluteten Bereiche nach der Schockbelastung.

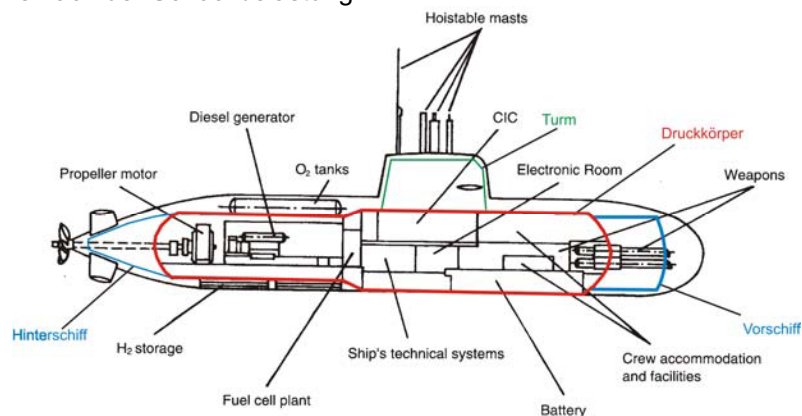


Abbildung 14 -Aufbau eines U-Bootes (Klasse 212)

6.1 Berechnungsmodell

Die Geometrie wurde von HDW bereitgestellt und unter Nutzung von Symmetrie wurde die in Abbildung 15 Abbildung 16 dargestellte Struktur in der Berechnung verwendet. Diskretisiert wird die Geometrie durch vollintegrierte Schalenelemente mit fünf Integrationspunkten über die Schalendicke, so dass mit einem plastischen Materialgesetz gearbeitet werden kann.

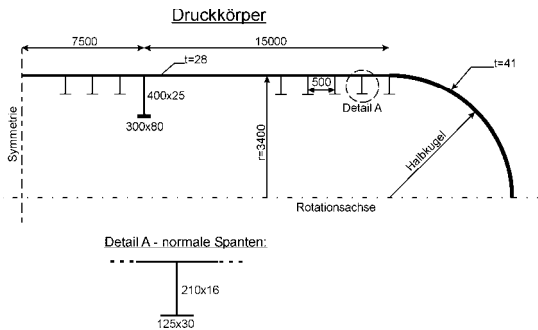


Abbildung 15 - Geometrie Druckkörper

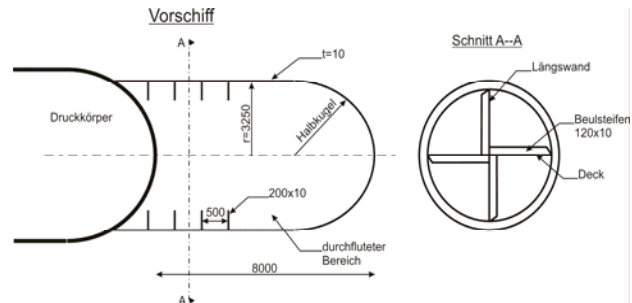
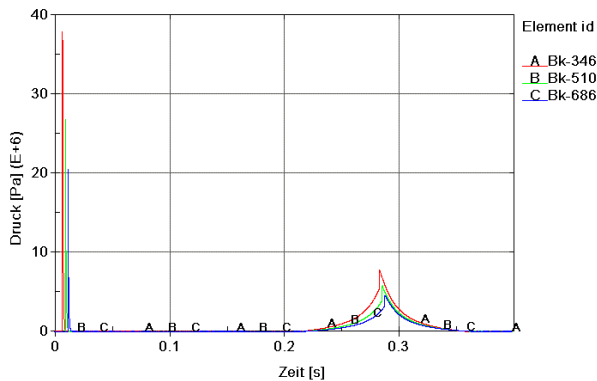


Abbildung 16 - Geometrie Vorschiff

Für den Tragfähigkeitsnachweis gibt [1] vor, dass nach einer Schockbelastung für Druckkörper und Vorschiff geringe plastische Verformungen zulässig sind, allerdings darf die Funktionsfähigkeit/Tragfähigkeit nicht beeinträchtigt werden. Allgemein dürfen die vorh. Spannungen die statische Streckgrenze des jeweiligen Materials nicht überschreiten, dabei wird als Nachweiskriterium die Vergleichsspannung (von-Mises) vorgeben. So wurde das Material Nr. 24 (*MAT_PIECE_WISE_PLASTICITY) für die höherfesten Stähle von Vorschiff und Druckkörper verwendet. Anhand von eventuell auftretenden plastischen Dehnungen kann im Ergebnis eine Überschreitung der zul. Spannungen nachgewiesen werden. Weiter ist so der Zeitpunkt einer eventuellen Überbeanspruchung durch den Verlauf der plastischen Dehnungen leicht zu erkennen.

6.2 Randbedingungen

Als Bemessungslast wird eine Ladung von 100 kg TNT in 10 m Entfernung bei einer Wassertiefe von 50 m angesetzt. Die Ladung wird senkrecht 13,25 m von der Hälfte der Längsachse des Vorschiffes platziert. Durch *LOAD_SSA wird die Belastung aus Schockwelle und 1. Blasenimpuls aufgebracht. Die Simulationszeit wurde so festgelegt, dass die Auswirkungen des 1. Blasenimpulses berücksichtigt werden, da anhand der Vorbetrachtungen ihm eine sehr große Wirkung (Flächeninhalt unter der Druck-Zeit-Kurve Abbildung 17) gegenüber der initialen Schockwelle ausgeht. Der Druckkörper wird durch Symmetrie festgehalten.



Die Simulationen berücksichtigen die Auswirkungen des 1. Blasenimpulses, da anhand der Vorbetrachtungen ihm eine sehr große Wirkung (Flächeninhalt unter der Druck-Zeit-Kurve Abbildung 17) gegenüber der initialen Schockwelle ausgeht. Der Druckkörper wird durch Symmetrie festgehalten.

Abbildung 17 - Druckverlauf am SSA-Modell mit 1. Blasenimpuls

6.3 Ergebnisse

Abbildung 18 zeigt die Reaktionen des U-Bootstruktur 2,5 ms nach dem Eintreffen der Schockwelle. An den Vergleichsspannungen lässt sich die sphärische Form der Schockwelle gut erkennen. Anhand an der weißen Ausgangsgeometrie und 20facher Skalierung der Verformungen können die Bewegungen und die Position der Schockwelle abgebildet werden. Bei 270 ms ist in Abbildung 19 deutlich die Wirkung des ersten Blasenimpulses zu sehen. Im Gegensatz zur initialen Schockwelle wirkt der Blasenimpuls aufgrund des deutlich größeren Radius und der langsameren Druckanstieges über den Umfang des Querschnittes und die initiale Schockwelle eher örtlich und sehr kurz.

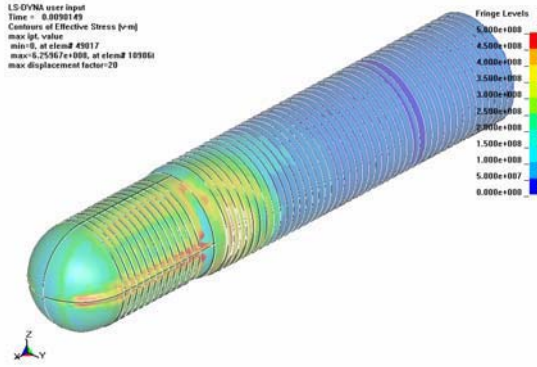


Abbildung 18 - Vergleichsspannungen durch initiale Schockwelle

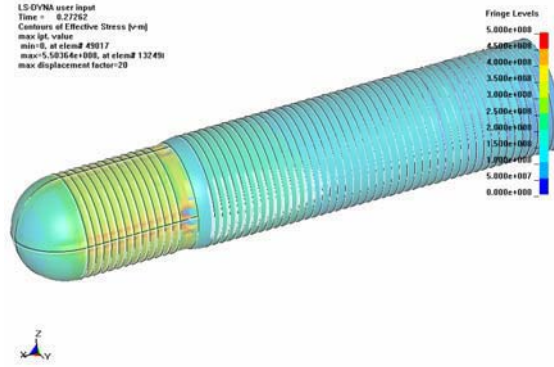


Abbildung 19 - Vergleichsspannungen bei 1. Blasenimpuls

Für die Festigkeitsbetrachtung zwischen Druckkörper und Vorschiff werden das Deck und die Längswand stellvertretend näher betrachtet. Die Kalotte des Druckkörpers ist durch ihre Geometrie, Dicke und den festeren Stahl gegenüber dem Vorschiff nicht maßgebend. So ist in Abbildung 20 zu sehen, dass der Bereich der mit dem Zenit der Druckkörperkalotte verbunden ist, plastische Dehnungen aufweist. Wird der Verlauf der plastischen Dehnungen in Abbildung 21 betrachtet, so ist zu erkennen, dass die plastischen Dehnungen durch die initiale Schockwelle hervorgerufen werden.

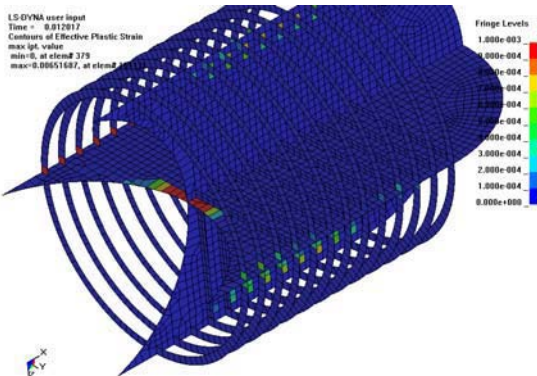


Abbildung 20 - plast. Dehnungen im Vorschiff

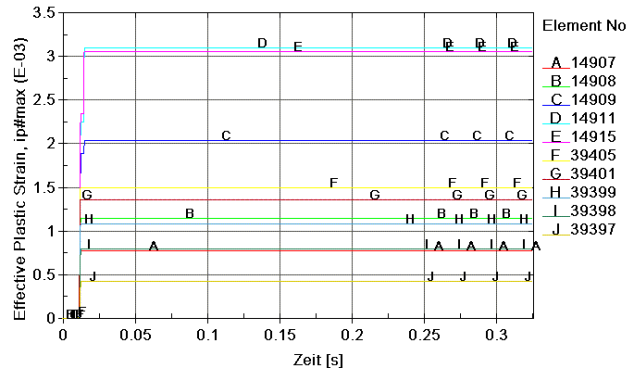


Abbildung 21 - Verlauf der plast. Dehnungen

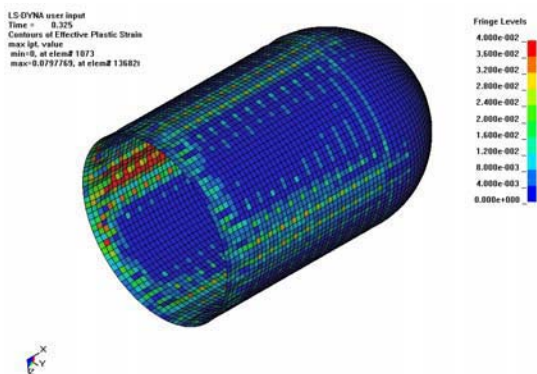


Abbildung 22 - plast. Dehnungen der Vorschiffhülle

Aus Abbildung 22 geht hervor, dass die Hülle des Vorschiffes erhebliche plastische Dehnungen aufweist, damit ist noch kein Versagen der Konstruktion vorhanden, da die festgelegte Bruchdehnung nicht erreicht wurde. Die Berechnung erfolgte nur mit der Tragkonstruktion, d.h. die Masse die aus Decks, Schotts, Geräten, Treibstoff usw. fehlt. Da in der Dynamik die Masse eine sehr große Rolle spielt, kann das Ergebnis bei genauerer Diskretisierung (Einbezug aller Massen, exakte Geometrie) positiver ausfallen. Weiter ist zu bemerken, dass die plastischen Dehnungen der Vorschiffhülle sich auf der Detonation abgewandten Seite befinden.

7 Zusammenfassung

Innerhalb der durchgeführten Analysen konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, eine Anspannung an ein U-Boot hinreichend genau zu simulieren. Dabei wurden mögliche Verläufe der initialen Schockwelle am U-Bootquerschnitt aufgezeigt. Mit *LOAD_SSA wurde eine effektive Belastung entsprechend den vorhandenen Vorschriften [1] und [4] gefunden. Die Festigkeitsbetrachtung am Vorschiff zeigt mögliche kritische Stellen, welche durch das plastische Materialgesetz örtlich und zeitlich erkennbar sind. Genauere Aussagen zur Tragfähigkeit sind jedoch erst nach weiteren Simulationen möglich.

Weitere mögliche Schritte sind:

- Simulation mit der gesamten U-Bootstruktur unter Berücksichtigung der genauen Geometrie und aller Massen
- Vergleich von Versuch und Simulation mit kleineren Strukturen
- Berücksichtigung von Reflektionen der initialen Schockwelle von Gewässeroberfläche und Gewässergrund

Der Autor bedankt sich bei allen, die ihn bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt haben, besonders bei den Mitarbeitern der HDW AG für die gute Zusammenarbeit, ihre Hinweise und Informationen.

8 Literatur

- [1] Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung: Bauvorschrift für Schiffe der Bundeswehr 0430 — Experimenteller und rechnerischer Nachweis für Überwasserschiffe und Uboote, Koblenz, Januar 1989
- [2] Mäkinen, Kjell: Underwater Shock Loaded Sandwich Structures, Doctoral Thesis Report 99-01, Department of Aeronautics, Stockholm, Schweden
- [3] HDW AG: Course No. 19 — Anti-Schock-Design, Kiel, 2001
- [4] HDW/THYSSEN-TSNW: U212 Standart K44 Schocksicherheit, Dez. 1998
- [5] Cole, Robert H.: Underwater Explosions, Princeton University Press, Princeton New Jersey USA, 1948
- [6] Ben-Dor, Gabi: Handbook of Shockwaves, Academic Press San Diego USA,
- [7] CAD-FEM Users Meeting 2003: ISBN 3-937523-00-6