

Die physikalischen Grundlagen der Wirkung einer Detonation

Von Hubert Schardin

Auszug aus dem in der I. Wissenschaftssitzung der Ordentlichen Mitglieder am 1. März 1943 gehaltenen Vortrag

Die Wirkung der Detonation eines Sprengstoffes beruht auf der mit außerordentlicher Geschwindigkeit erfolgenden chemischen Umsetzung eines im allgemeinen festen, mitunter auch flüssigen oder gasförmigen Sprengstoffes in gasförmige Zeretzungsprodukte (Schwaden), die bei normalem Druck ein wesentlich höheres Volumen einnehmen als der ursprüngliche Sprengstoff.

Die Umsetzungsgeschwindigkeit innerhalb des Sprengstoffes bei einer Detonation wird als Detonationsgeschwindigkeit bezeichnet. Sie ist eine physikalische Konstante und liegt in der Größenordnung von mehreren 1000 m/sec., z. B. bei Trinitrotoluol 1000 m/sec. Die gasförmigen Zeretzungsprodukte nehmen bei der Detonation von 1 kg Trinitrotoluol einen Raum von 7800 Litern (das ist das 12500fache des festen Sprengstoffes) bei einer Temperatur von 2800° C bzw. von 735 Litern bei normaler Temperatur (das 1175fache des festen Sprengstoffes) ein.

Wenn man sich theoretisch überlegen will, welche Wirkung von einer Detonation auf die Umgebung ausgeübt wird, so kann man zunächst näherungsweise infolge der hohen Detonationsgeschwindigkeit annehmen, daß zur Zeit $t = 0$ der gesamte Sprengstoff momentan umgesetzt ist. Es handelt sich dann also um die Expansion eines Gasvolumens, das im Beispiel des Trinitrotoluol unter normalen äußeren Umständen ein Volumen von 7800 Litern einnimmt, das aber zur Zeit $t = 0$ auf ein Volumen von 0,625 Litern, nämlich das des festen Sprengstoffes komprimiert ist. Der bei diesem Zustand vorhandene Druck liegt in der Größenordnung von 100 000 atn.

Der Vorgang der Expansion eines komprimierten Gasvolumens läßt sich für den hieren Fall, d. h. für den Ausbreitungsvorgang in einem Rohr, noch verhältnismäßig einfach und mit einiger Genauigkeit berechnen. Es sei hierfür das Resultat kurz skizziert: Vom komprimierten Gas läßt sich eine Stoßwelle in die ruhende äußere Luft hinein (eine Stoß-

welle ist eine Welle mit unendlich steiler Front.) Die Geschwindigkeit der Stoßwelle hängt vom Druckverhältnis Außendruck : Anfangsdruck ab. Bei relativ geringen Außendrüeken kann sie mit Geschwindigkeiten bis zu 10 000 m/sec und darüber laufen. (Diese Geschwindigkeit hat jedoch mit der Detonationsgeschwindigkeit nichts zu tun, wie es mitunter angenommen wird.)

Die Höhe des Drucksprunges in der nach außen laufenden Stoßwelle ist nun nicht etwa gleich der Druckdifferenz des Anfangsdrucks gegen den Außendruck, sondern beträgt nur einen mehr oder weniger geringen Bruchteil hiervon. Der Grund liegt darin, daß bei Beginn des Ausbreitungsvorganges neben der nach außen laufenden Stoßwelle auch eine Verdünnungswelle in die Schwaden hineinlaufen muß. Diese Verdünnungswelle hat keine unetetige Front, die Zustandsänderung in ihr erfolgt im wesentlichen adiabatisch. Und zwar läuft von den beiden Enden der in ein Rohr eingeschlossenen gedachten Schwaden die gleiche Verdünnungswelle aus. Nun läuft z. B. die von der linken Begrenzung ausgehende Verdünnungswelle auch in den Bereich der nach rechts laufenden Druckstoßwelle hinein; denn die Front der Verdünnungswelle läuft mit der Schallgeschwindigkeit der Schwaden bzw. der hinter der Stoßwelle komprimierten Luft. Diese Geschwindigkeit ist infolge der hohen Temperatur größer als die Geschwindigkeit der Stoßwelle, obgleich letztere in bezug auf die Außenluft sich mit wesentlicher Überschallgeschwindigkeit bewegt.

Ein zahlenmäßiges Beispiel für diesen Vorgang gibt die Abbildung 1 wieder. Es sind als Abszisse der Ort und als Ordinate der Druck in

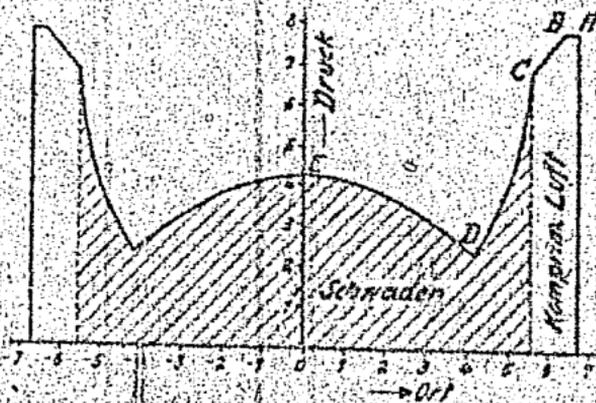


Abb. 1
Druckverteilung in der Umgebung eines detonierten Sprengstoffs bei linearem Ausbreitungsvorgang

einem dimensionslosen Maßstab aufgetragen. Bis zum Punkt 6,8 ist die nach rechts laufende Stoßwelle gekommen. Der Druckanstieg erfolgt gegenüber dem Außendruck unendlich steil. Vom Ort A bis zum Ort B der Stoßwelle herrscht zunächst ein Gleichdruckgebiet. Im Punkt B erfolgt ein Absinken des Drucks, da die von der linken Begrenzung her ausgehende Verdünnungswelle gerade bis hierher gelaufen ist. Am Ort C befindet sich die Grenze zwischen der durch die Stoßwelle komprimierten Luft und den nachströmenden Schwaden. Zwischen C und D erfolgt ein weiteres Absinken des Drucks (jetzt in den Schwaden) und anschließend wieder ein geringes Ansteigen des Drucks bis zur Mitte (E) des ursprünglichen Sprengstoffs. Genau der gleiche Druckzustand herrscht links von E.

Alles bisher Gesagte galt für den linearen Fall, d. h. also z. B. für den Vorgang in einem Rohr mit unendlich starren Wänden oder aber für eine unendlich große Sprengstoffplatte. Bei räumlicher Ausbreitung einer detonierenden Sprengstoffkugel sind die Verhältnisse quantitativ viel schwieriger zu erfassen. Exakt lösbar ist die räumliche Expansion einer Gaskugel mit kleinem Überdruck. Die entsprechende Rechnung



Abb. 2

Druckverlauf in der Umgebung einer expandierenden Gaskugel bei geringem Überdruck und kegelförmiger Ausbreitung (sägezahnförmig)

ergibt als Resultat einen sägezahnförmigen Druckverlauf der sich ausbreitenden Störung. Zunächst erfolgt ein unsteiliger Anstieg, dann ein linearer Abfall und schließlich wieder ein unsteiliger Anstieg bis zum ursprünglichen Außendruck (vgl. Abbildung 2). Daß dieses Ergebnis nicht ganz abwegig auch für die Detonation geringer Sprengstoffmengen ist, beweist die experimentelle Aufnahme des Druckverlaufs in der Nähe einer detonierenden Sprengkugel (Abbildung 3).

Betrachten wir jetzt weitere experimentelle Ergebnisse.

In Abbildung 4 sehen wir einige aufeinanderfolgende Stadien der Detonation einer kleinen Bleisäurekugel. Auf dem ersten Bild ist die Detonation bereits erfolgt, sie wurde auf elektrischem Wege ausgelöst. Die

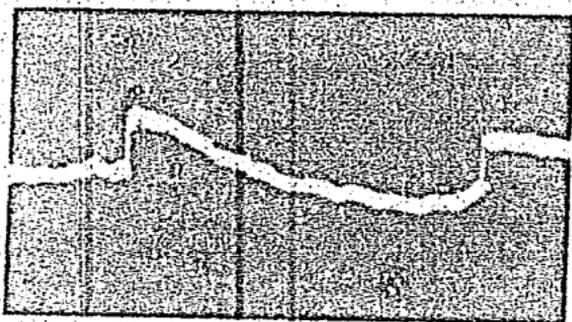


Abb. 3

Experimentell aufgenommener zeitlicher Druckverlauf in der Nähe einer detonierenden Sprengkapsel (vgl. Abb. 2)

Umsetzung erfolgte nicht vollständig, denn zahllose feste Teilchen haben die Wellenfront durchstoßen. Jedes zieht für sich eine Kopfswelle. Infolgedessen ist die äußere Begrenzung des ganzen Vorgangs unregelmäßig, die Luftstoßwelle hebt sich kaum von den Schwaden ab. Auf dem zweiten Teilbild dagegen sind die Schwaden bereits deutlich isoliert. Sie sind infolge der Lichtabsorption durch den Bläddampf vollkommen schwarz. Auf dem dritten Teilbild ist die Neubildung einer zweiten



Abb. 4

Vier zeitlich aufeinanderfolgende Schlierenaufnahmen von der Detonation einer Bleiszidpille

Knallwelle erkennbar. Auf dem letzten ist diese deutlich ausgeprägt. Es handelt sich also um einen Vorgang, der dem der Bildung eines Sägezahns entspricht. In der Front der ersten Knallwelle erfolgt ein un stetiger Druckanstieg, der langsam bis auf Unterdruck abnimmt. In der zweiten Knallwelle erfolgt dann der Ausgleich des Unterdrucks wieder in Form einer Stoßwelle. Nach der zweiten Stoßwelle ist im Wesent-

lichen der vorher herrschende Außendruck wieder vorhanden, so daß auch, nachdem die zweite Stoßwelle die Schwaden verlassen hat, diese keine wesentliche Bewegung mehr ausführen werden.

Wenn man einen physikalischen Vorgang nicht exakt beherrscht — wie im vorliegenden Falle den Ausgleichvorgang bei der Detonation einer Sprengstoffmenge —, ist man bemüht, ein Modellgesetz abzuleiten, das vor allen Dingen den großen Vorteil hat, die Zahl der zur Klärung des Vorganges durchzuführenden Versuche auf ein Minimum herabzusetzen. Es läßt sich nun auch für einen Sprengvorgang ein Modellgesetz ableiten, dem weitgehende Gültigkeit zukommt. Es lautet:

Bei zwei Sprengungen herrscht an den Punkten, die um das gleiche Vielfache des Sprengkörperdurchmessers vom Sprengzentrum entfernt sind, der gleiche absolute Druckverlauf, wobei der Zeitmaßstab sich proportional mit dem Längenmaßstab ändert.

Es ist also möglich, Druckmessungen, die bei der Sprengung einer bestimmten Sprengstoffmenge durchgeführt worden sind, mit Hilfe dieses Modellgesetzes auf eine andere Sprengstoffmenge umzurechnen. Ein Beispiel hierfür zeigt die Abbildung 5. In ihr ist eine Reihe von Ver-

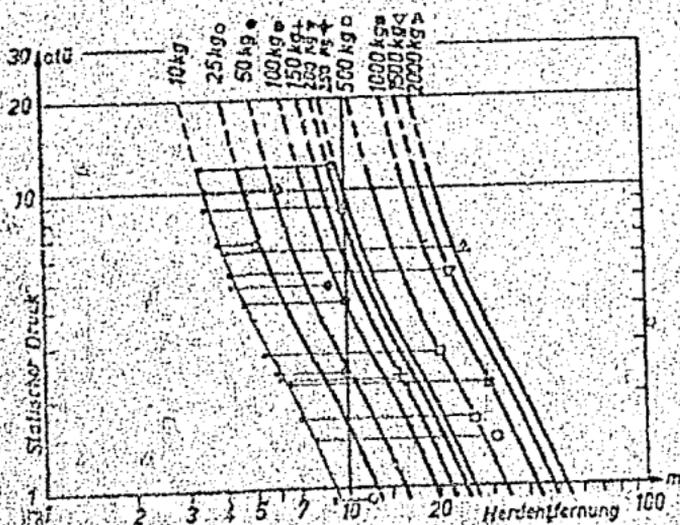


Abb. 5

Statischer Maximaldruck in Abhängigkeit von der Entfernung bei der Sprengung von Körpern von 10 kg bis 2000 kg. Die jeweiligen Meßpunkte sind nach dem Modellgesetz auf 10 kg umgerechnet und liegen hier gut auf einer Kurve. Diese kann dann wieder auf die Aufgesprengstoffmengen zurückgerechnet werden.

suchsergebnissen für den Maximaldruck bei der Sprengung von Körpern aus Füllpulver 60/40 eingetragen. Die jeweiligen Meßpunkte sind nach dem Modellgesetz auf 10 kg umgerechnet. Sie liegen hier gut auf einer Kurve. Die Gültigkeit des Modellgesetzes ist somit durch unmittelbare Messungen nachgewiesen. Rechnet man die interpolierte 10-kg-Druckkurve auf diejenigen Sprengstoffmengen um, für die die Originalmessungen erfolgt sind, so ergeben sich die eingetragenen stark ausgezogenen Kurven. Die Meßpunkte liegen nun naturgemäß nicht mehr genau auf diesen Kurven, sondern weisen eine geringe Streuung auf. Um die Verhältnisse bei einem bestimmten Sprengstoff zu erfassen, wäre es somit nur notwendig, die Druckkurve für eine einzige Sprengstoffmenge zu kennen.

Wir wollen uns jetzt überlegen, wie nun eine Detonation auf einen Gegenstand wirkt. Betrachten wir zunächst eine frei in der Luft detonierende Sprengkugel in ihrer Wirkung auf eine ebene, unendlich groß gedachte Wand, wie sie z. B. durch den Erdboden dargestellt wird, wenn die Sprengung in einem Abstand über dem Erdboden erfolgt. Das Druckdiagramm (Abbildung 5) liefert den statischen Druck hinter der Stoßwellenfront an dem Ort, wo die Druckwelle die Ebene berührt. Nun findet an der Wand jedoch Reflexion statt und infolge der Reflexion eine wesentliche Druckerhöhung. Diese Druckerhöhung kann bei intensiven Stoßwellen bis zum 8fachen betragen. Sie ist nicht identisch mit dem aus der Hydrodynamik bekannten Staudruck.

Wir betrachten nun die Wirkung einer Detonation auf ein schwingungsfähiges Gebilde mit einer bestimmten Eigenfrequenz, das sich in der Wand befindet (vgl. Abbildung 6).

Wir nehmen an, der wahre Druckverlauf (ein Beispiel hierfür zeigt die Abbildung 7) sei zu ersetzen durch einen dreieckförmigen Verlauf. Wir vernachlässigen also den Unterdruckanteil der Welle.

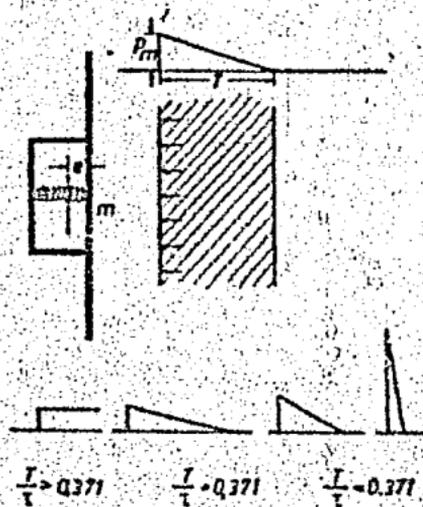


Abb. 6

Schema für ein in eine Wand eingebauter schwingungsfähiges Gebilde, gegen das eine Luftstoßwelle läuft

Wohl kann der Sog das äußere Bild einer Zerstörung beeinflussen, denn er folgt zeitlich dem Überdruck; die Hauptzerstörung wird jedoch fast ausschließlich durch den Überdruck und nicht durch den Sog hervorgerufen.

Wenn nun die angenommene dreieckförmige Druckwelle auf die Wand auftrifft, wird an dieser der Druck erhöht. Der reflektierte Druck oder auch Stoßdruck wirkt gleichzeitig auf das in die Wand eingebaute System. Die Masse m , desselben fängt an sich zu bewegen.

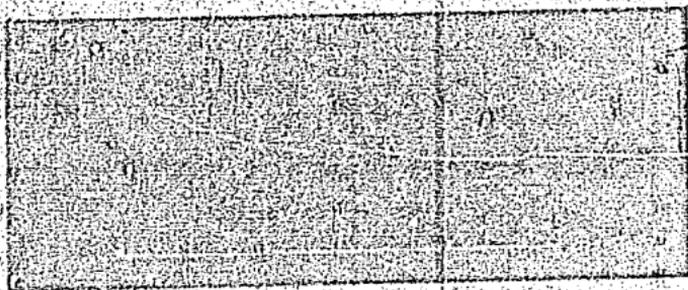


Abb. 7

Experimentell aufgenommenener Druckverlauf am Boden bei einer Sprengung von 500 g Sprengstoff bei 3 m Abstand über dem Boden

Es ist nun sehr wesentlich, ob die Zeit T des Druckstoßes klein oder groß gegen die Eigenschwingzeit τ des Systems ist. Ist T klein gegen τ , so handelt es sich um einen ballistischen Vorgang. Nach Ablauf des Druckstoßes hat die Masse m des Systems nur einen kleinen Weg zurückgelegt und fängt an, eine Schwingung auszuführen in ähnlicher Weise, wie es bei der Schwingepule des ballistischen Galvanometers der Fall ist. Die Geschwindigkeit v_0 , mit der die Masse ihre Bewegung beginnt, ergibt sich leicht mit Hilfe des Impulssatzes. Es muß nämlich $\int p \cdot dt = m v_0$ sein (p = reflektierter Druck an der Wand). Die Bewegung des Systems ist ein einfacher sinusförmiger Schwingungsvorgang. Nehmen wir an, daß das System beim Überschreiten einer maximalen Amplitude e zu Bruch geht, so erkennen wir, daß es für den Fall $T < \tau$ nur auf den Impuls der Stoßwelle ankommen kann. Denn die Anfangsgeschwindigkeit des Systems ist nur hierdurch bedingt, und der Weiterablauf der Bewegung des Systems ist unabhängig davon, wie groß der Maximaldruck im einzelnen gewesen ist. Ganz anders liegen die Verhältnisse, wenn $T > \tau$ ist. In diesem Falle wird sich der maximale Ausschlag des Systems bereits einstellen, während der Druck der Stoßwelle noch wirkt. Der Vorgang ist also ein mehr oder weniger statischer, d. h. die maximale Amplitude ist nur durch den Druck gegeben. Da jedoch die Stoß-

welle ansetzt, setzt ein Einschwingvorgang im System ein. Die maximale Amplitude des Systems hängt davon ab, wie groß dessen Dämpfung ist. Bei Dämpfungsfreiheit würde das System auf den doppelten Ausschlag ausschlagen, als dem Gleichgewicht entsprechen würde. Bei einem ungedämpften System hoher Eigenfrequenz ist es also möglich, daß bei einer Belastung durch eine Stoßwelle das System eher zu Bruch geht als bei einer langsam aufgebracht, aber dauernd wirkenden Druckkraft von der Höhe des Maximaldruckes der Stoßwelle.

Wir haben somit die beiden Extremfälle der Wirkung einer Stoßwelle auf ein schwingungsfähiges Gebilde kennengelernt:

Bei großer Eigenschwingzeit des Systems bzw. bei der Beanspruchung durch eine Stoßwelle, die von kleinen Sprengstoffmengen in entsprechend geringen Abständen herrührt ($T < \tau$), hängt die Zerstörung vom Impuls der Stoßwelle ab.

Bei kleiner Eigenschwingzeit des Systems bzw. bei der Beanspruchung durch eine Stoßwelle, die von großen Sprengstoffmengen in entsprechend großen Abständen herrührt ($T > \tau$), hängt die Zerstörung vom Maximaldruck der Stoßwelle ab.

Dazwischen gibt es einen Übergang.

Um die Zerstörung eines Gebildes in übersichtlicher Weise darstellen zu können, verwenden wir nun das Druckentfernungdiagramm mit der Sprengstoffmenge als Parameter (vgl. Abbildung 5). Wir wollen in diesem Diagramm diejenigen Punkte eintragen, die ein bestimmtes System gerade zerstören.

Zunächst sei als Beispiel der Bruch einer Fensterscheibe herangezogen. Für die Durchführung der Versuche dienten 48×38 cm große Glasscheiben von 2,1 mm Dicke. Sie waren in einen Rahmen eingespannt und zur Vermeidung von Randspannungen zwischen Gummi gelagert. Der Rahmen mit der Glasscheibe wurde jeweils entweder in eine große Holzwand oder in den Erdboden eingebaut. Im ersten Falle traf die Stoßwelle senkrecht auf, im zweiten Falle lief die Stoßwelle an der Glasscheibe entlang. Selbstverständlich weisen die einzelnen Versuchsergebnisse auf. Man muß daher für eine bestimmte Sprengstoffmenge die zugehörige Entfernung als 50%ige Bruchgrenze bestimmen.

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind in Abbildung 6 wiedergegeben. Diese experimentell aufgenommenen Zerstörungskennlinien für Fensterscheiben zeigen nun in ihrem Verlauf die gleiche Tendenz wie sie für den einfachen Schwinger angegeben wurde: Für große Sprengstoffmengen ist eine horizontale Asymptote vorhanden. Je kleiner die Sprengstoffmenge ist, um so höher liegt der zugehörige Druck.

In einem Impulsentfernungdiagramm wäre der Verlauf umgekehrt.

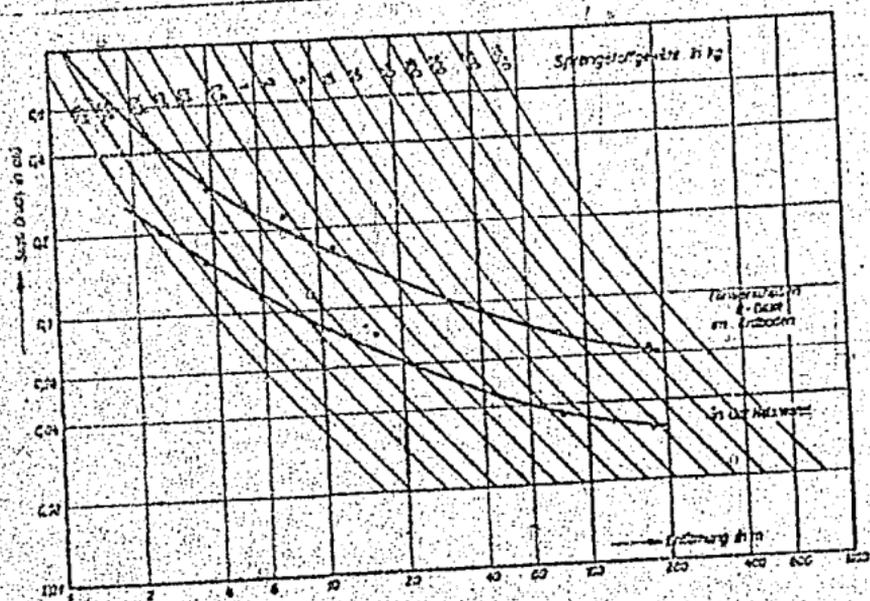


Abb. 8

Kennlinien für die experimentell aufgenommene 50% Bruchgrenze von Fensterscheiben (2,1 mm stark, 38 x 48 cm). Die obere Kurve gilt für den Fall, in dem die Druckwelle zu der Scheibe entlangläuft; die untere für senkrecht aufstossende Welle.

Wenden wir uns jetzt einer anderen Zerstörungskennlinie zu: der Tödtlichkeitsgrenze von Tieren. Diese ist in den Debaer Versuchsreihen für Hunde und Meerschweinchen festgelegt worden. In Abbildung 9 sind die zur Tötung von Hunden oder Meerschweinchen erforderlichen Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Entfernung vom Sprengherd aufgetragen. Man sieht auch in diesem Falle, daß die gleiche Tendenz im Verlauf der Kurven vorhanden ist.

Handelte es sich bei der Fensterscheibe um einen verhältnismäßig einfachen Vorgang, der fast dem idealen Fall des linearen Schwingers entspricht, so dürften die Vorgänge, die zur Tötung eines Tieres führen, außerordentlich kompliziert sein, und trotzdem ergibt sich erstaunlicherweise sowohl eine sehr definierte Todessgrenze als auch die gleiche Tendenz des Verlaufs der Todessgrenze in der Abhängigkeit von der Sprengstoffmenge und der Entfernung wie bei einfachen mechanischen Gebilden. Auf jeden Fall läßt diese Tatsache vermuten, daß es sich bei der Tötung eines Tieres durch eine Stoßwelle um ganz bestimmte Vorgänge im einzelnen handeln muß.

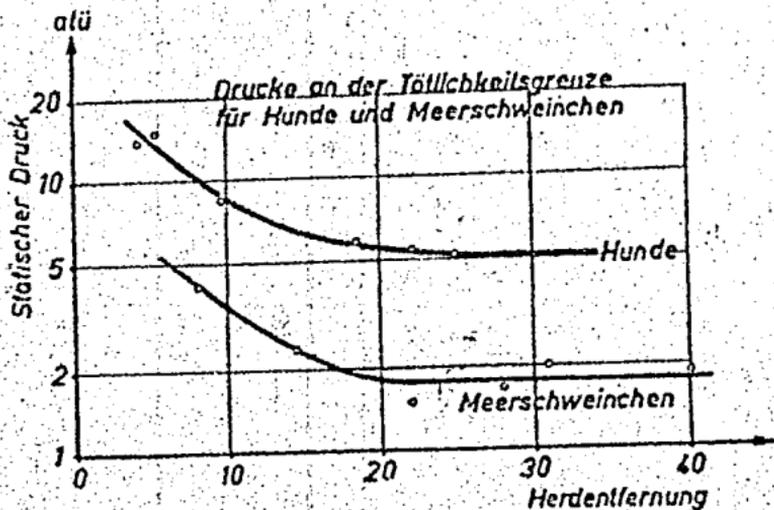


Abb. 9

Todeskurven für Hunde und Meerschweinchen

Eines haben die Tierversuche mit den Fensterscheibenversuchen gemeinsam: Der Effekt der Zerstörung, d. h. also in einem Falle die Tötung, im anderen Falle der Bruch, läßt sich mit nahezu 100%iger Genauigkeit nach dem Versuch angeben. Darüber hinaus ist in ähnlicher Weise wie bei einer Fensterscheibe ein Tier, das einer Detonation außerhalb der Todesgrenze ausgesetzt war, verhältnismäßig wenig beschädigt: Entweder führt die Minenwirkung einer Bombe durch Gasschlag zum sofortigen Tode oder aber das Tier trägt nur kleinere, heilbare Schäden davon. (Abgesehen selbstverständlich von den sekundären Verletzungen, die u. U. durch das Fortschleudern o. dgl. hervorgerufen werden.)

Um die Minenwirkung von Geschossen oder Bomben auf andere Gebilde, z. B. Flugzeuge oder Gebäude, beurteilen zu können, wäre es notwendig, auch hierfür zunächst die Zerstörungskennlinien zu kennen. In diesem Falle ist die Definition der Zerstörung aber nicht mehr so einfach. Es gibt oft einen verhältnismäßig langsamen Übergang zwischen dem Fall, wo die Stoßwelle keinen wesentlichen Schaden hervorruft, und dem Fall, der zur Unbrauchbarkeit des Objektes führt.

Wir haben bisher nur von dem Druck gesprochen, der beim Auftreffen der von einer Sprengung herrührenden Stoßwelle auf eine verhältnismäßig große Wand entsteht. Handelt es sich um ein endlich ausgedehntes Objekt, so wird folgendes eintreten: An denjenigen Oberflächenpunk-

ten des beaufschlagten Körpers, an denen die Stoßwelle auftrifft, entsteht zunächst der gleiche Druck, wie er auch bei unendlich großer Wand vorhanden wäre. An den Seiten des Körpers jedoch läuft die Stoßwelle ungehindert vorbei. Es wird daher von den seitlichen Begrenzungen des Körpers her eine Entlastungswelle an der Vorderseite vorbeilaufen und den Überdruck, der durch die Reflexion entstanden ist, herabsetzen. Umgekehrt wird an der Rückseite des Körpers von den Seiten her eine Druckwelle entlanglaufen, die hier eine allmähliche Drucksteigerung zur Folge hat. Auf diese Weise entstehen an der Oberfläche des Körpers beim Darüberlaufen einer Stoßwelle erhebliche Druckdifferenzen, die starke Kräfte auf den Körper übertragen können. So ist — wenn z. B. ein Tier einer Druckstoßwelle ausgesetzt ist — das Fortschleudern zu

erklären sowie u. U. Schäden, die unmittelbar unter der Oberfläche liegen, wie z. B. Rippenbrüche oder das Zerreißen von Muskeln längs der Rippen.

Die Schlierenaufnahme (Abbildung 10) gibt ein anschauliches Bild des Druckausgleichsvorganges beim Darüberlaufen einer Stoßwelle über eine begrenzte Wand. Man erkennt sowohl die von den Rändern ausgehenden Wellen, die auf der Rückseite den Druck erhöhen, als auch diejenigen, die auf der Vorderseite den Druck herabsetzen.

Beim Darüberlaufen einer Stoßwelle über ein Objekt wird dieses also für kurze Zeit zunächst in ein Überdruck- sodann in ein Unterdrückniveau getaucht. Man könnte annehmen, daß diese Druckänderung als solche die Ursache für eine zerstörende Wirkung sein könnte. Bei lebenden Wesen ist dies jedoch sicher nicht der Fall. Es ist genügend bekannt,

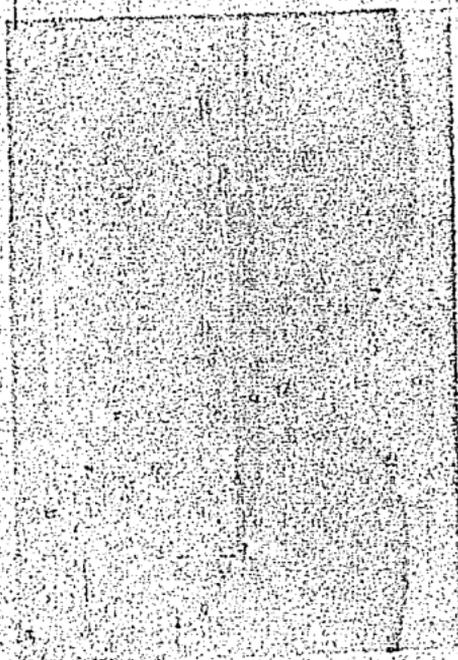


Abb. 10

Schlierenaufnahme der Front einer Stoßwelle, die gegen eine aufgespannte Blechplatte läuft. Die Stoßwelle ist über die Platte hinweggelaufen. Sie wird an der Vorderseite der Platte reflektiert und läuft um die obere und untere Peripherie herum.

daß die Unterdrücke, die bei der Sprengung auftreten, von Menschen ohne Schwierigkeiten ertragen werden. Dergleichen halten Menschen und Tiere statisch einen weit höheren Überdruck aus als dem Maximaldruck bei Sprengungen entspricht, bei dem bereits eine tödliche Wirkung auftritt.

Wir haben bisher nur davon gesprochen, daß an der Oberfläche des Objektes eine bestimmte Druckänderung vor sich geht. Aber auch im Innern des Körpers erfolgt ein Druckausgleich. Insbesondere läuft die auftretende Stoßwelle mit der Schallgeschwindigkeit des Körpers nach innen hinein. Der Maximaldruck dieser Stoßwelle ist gleich dem Maximaldruck an der Vorderfläche des Körpers bei der Reflexion der Luftstoßwelle. Da nun, wie soeben betont, die statische Druckerhöhung nicht die Ursache für die auftretenden Wirkungen sein kann, muß man auch die Front der in den Körper hineinlaufenden Stoßwelle für die Wirkung verantwortlich machen. Wir hätten ja schon bei dem einfachen Schwinger festgestellt, daß infolge der Steilheit der Front die Amplitude des Systems den doppelten Wert erreichen kann als bei gleichwertiger statischer Belastung, so daß alleine infolge der steilen Front das System zu Bruch gehen kann. Wir wollen jetzt untersuchen, welche primären Wirkungen beim Hineinlaufen der Druckwelle mit steiler Front in den heaufschlagten Körper hervorgerufen werden können.

Als erstes definieren wir einen »Trägheitseffekt«. Betrachten wir zwei nebeneinanderliegende gleichgroße Volumen, angefüllt mit Massen verschiedener Dichte, durch die die Stoßwelle hindurchläuft (vgl. m_1 und m_2 in Abbildung 11). Befindet sich links von diesen beiden Massen ein Medium mit wesentlich geringerer Dichte, so wird an der Vorder-

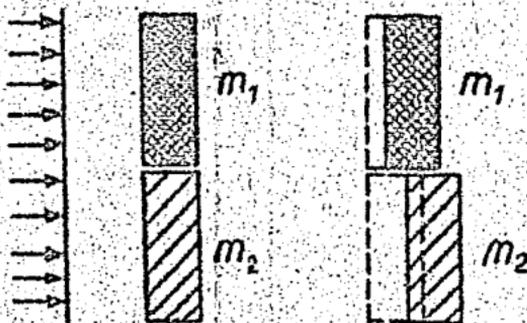


Abb. 11.

Schema für den »Trägheitseffekt«

seite von m_1 und m_2 die Stoßwelle zum Teil reflektiert. Dadurch wird auf beide Massen ein näherungsweise gleich großer Impuls übertragen. Infolgedessen nehmen m_1 und m_2 wegen ihrer verschiedenen Masse auch verschiedene Geschwindigkeiten an. Das kann zu einem Zerreißen im Übergangsbereich der beiden Massen führen. Hinzu kommt noch, daß auch beim Durchlaufen der Stoßwelle die Massen m_1 und m_2 Geschwindigkeiten bekommen, die im gleichen Sinne voneinander verschieden sind.

Ein sehr instruktives Beispiel für diesen Effekt bietet die Detonation einer Bombe inmitten von Laubbäumen. Man kann nämlich feststellen, daß bis zu einer bestimmten Entfernung vom Sprengzentrum alle Blätter vollkommen von den Zweigen abgerissen werden. Von einer gewissen größeren Entfernung ab zeigt sich keine Wirkung mehr. Dazwischen aber liegt ein Bereich, in dem von den Blättern nur das Fleisch weggerissen wird, während die Rippen an den Stielen und Ästen verbleiben. Das Fleisch des Blattes bekommt infolge seiner im Vergleich zu den Rippen und bezogen auf die Flächeneinheit kleineren Masse eine größere Beschleunigung als die Blattrippen und Zweige. Dadurch treten Kräfte zwischen dem Blattfleisch und den Rippen auf, die zu einem Herausstanzen des Blattfleisches führen können.

Ein anderer Effekt, der mit der un stetigen Front der Stoßwelle zusammenhängt, kommt zustande, wenn zwei Körper verschiedener Masse hintereinander liegen. Wir betrachten jetzt die an der Grenzfläche reflek-

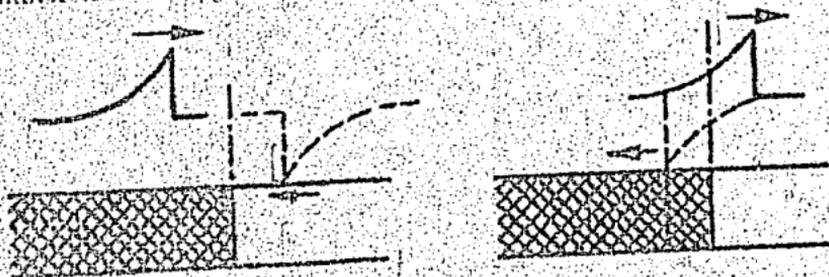


Abb. 12
Schemata für den »Abplatzeffekt«

tierte Stoßwelle für den Fall, daß das rechte Medium eine geringere Dichte haben soll (vgl. Abbildung 12). Im Extremfalle befindet sich links ein fester Körper oder eine Flüssigkeit, rechts dagegen ein Gas. Läßt man jetzt von links her die Druckwelle in den Körper hinein, so kann man sich deren Reflexion am rechten Ende so vorstellen, als ob von rechts her eine entsprechende Zugwelle entgegenliefe. Die Überlagerung von Druck-

und Zugwelle muß dann die jeweils herrschende Druckspannung ergeben. Beide löschen sich genau am Ende — wie es sein muß — aus; aber weiter im Innern entstehen Zugspannungen, die hier zu einem Zerreißen des Materials führen können.

Als Beispiel hierfür diene folgender Versuch. Eine runde Glasscheibe enthalte in der Mitte eine Bohrung. In diese wird eine Sprengkapsel eingeführt und gesprengt. Es läuft dann von der Mitte eine Stoßwelle in die Glasscheibe hinein. Sie ist in Abbildung 13a mit Hilfe der Funkenkinematographie auf spannungsoptischem Wege sichtbar gemacht. Man erkennt die Front dieser Stoßwelle sowie die mit kleinerer Geschwindigkeit erfolgende Ausbreitung des Bruchvorganges. Abbildung 13b stellt

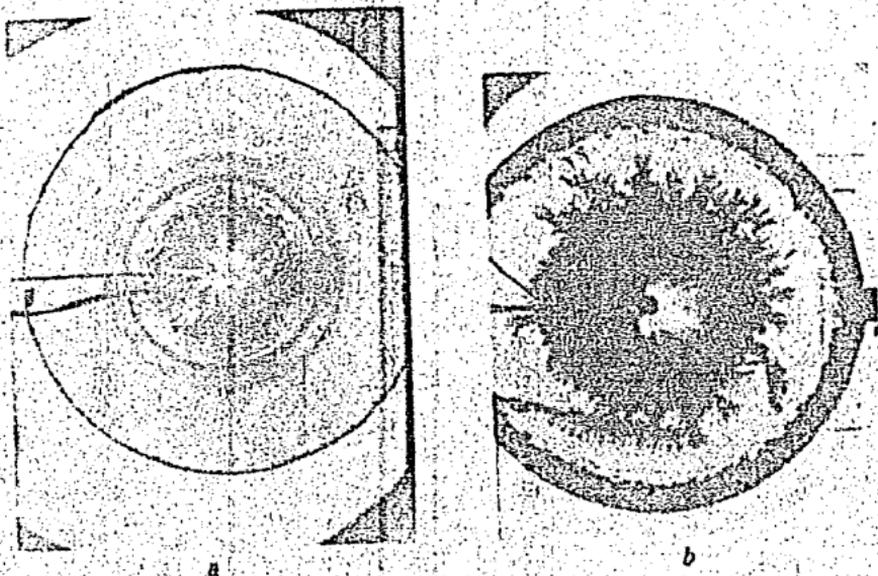


Abb. 13

Zwei zeitlich aufeinanderfolgende Funkenaufnahmen der Zertrümmerung einer Glasscheibe durch eine Sprengkapsel.

nun den Zustand der Glasplatte dar, der unmittelbar nach erfolgter Reflexion der Stoßwelle am Rande der Glasplatte vorhanden ist. Die primäre Bruchausbreitung hat den Rand noch nicht erreicht, trotzdem ist aber der gesamte Rand zerstört. Es handelt sich hier also um einen Bruch, der unmittelbar durch die Reflexion der Stoßwelle am Rande eingeleitet worden ist. Wir wollen diesen Vorgang als »Abplatzeffekt« bezeichnen.

Vielleicht muß in einigen Fällen noch ein anderer Vorgang herangezogen werden, der auftritt, wenn in einer Flüssigkeit Gasblasen eingeschlossen sind. Läßt durch eine solche Flüssigkeit eine Stoßwelle hindurch, so erfolgt ein Implosion der Gasblase (Implosionseffekt). Flüssigkeiten sind nur wenig kompressibel. Daher ist die Größe der stofflichen Verschiebung beim Durchlaufen der Stoßwelle durch die Flüssigkeit nur gering. Sie reicht bei weitem nicht aus, um auch den eingeschlossenen Gasblasen die gleiche Druckerhöhung mitzuteilen. Daher wird die die Blasen begrenzende Flüssigkeit beschleunigt werden und die Blase weiter komprimieren. Die Druckenergie setzt sich also am Rande einer Blase in kinetische Energie der Flüssigkeit um. Auf Grund der Massenträgheit geht nun die Kompression der Blase weit über den Zustand hinaus, der dem Druck der Umgebung entsprechen würde; es entstehen in der stark komprimierten Blase dabei Drücke in der Größenordnung von 100 000 atm. Experimentell läßt sich nachweisen, daß von der implodierten Gasblase wieder intensive Druckwellen ausgehen. Das beweist die Abbildung 14, in der der Vorgang der Ausbreitung einer Stoßwelle in Wasser sichtbar gemacht ist. Die Stoßwelle wurde erzeugt durch Detonation einer Bleiazidpille. Im Wasser befindet sich nun eine Reihe von kleinen Luftbläschen, die durch Ausströmen von Luft aus einer feinen Düse erzeugt wurden. Beim Drüberlaufen der Stoßwelle über diese Bläschen erkennt man, daß jedes Bläschen zum Zentrum einer neuen Knallwelle wird. U. U. spielen sich ähnliche Vorgänge in der Lunge ab, wenn ein Tier von einem Luftstoß getroffen wird. Es ist verständlich, daß etwa am Ort einer solchen Blase vorhandenes Gewebe zerstört wird. Die auftretenden Kräfte können zu einer Versetzung des Gasinhaltes der Blase führen, und es wäre möglich, daß in ähnlicher Weise Luft in die Blutbahn hineingedrückt und dadurch eine Embolie herbeigeführt wird. Daß der Implosionseffekt in der Lage ist, eine erhebliche mechanische Zerstörung hervorzurufen, beweist die Korrosion bei der Kavitation, wie sie z. B. an zu schnell laufenden Schiffsschrauben auftritt. Bei der Kavitation handelt es sich um gashaltige Wasserdampfblasen, die durch eine geringe Druckerhöhung zur Implosion gebracht werden. Befindet sich eine solche Blase an der Oberfläche eines Körpers, so wird der Gasinhalt der Blase mit Drücken in der Größenordnung bis zu 100 000 atm in die Poren des Materials hineingedrückt und übt hier eine sprengende Wirkung aus. Schiffsschrauben aus Bronze, die normalerweise jahrelang im Seewasser halten, können bei auftretender Kavitation innerhalb von Stunden zerstört werden.

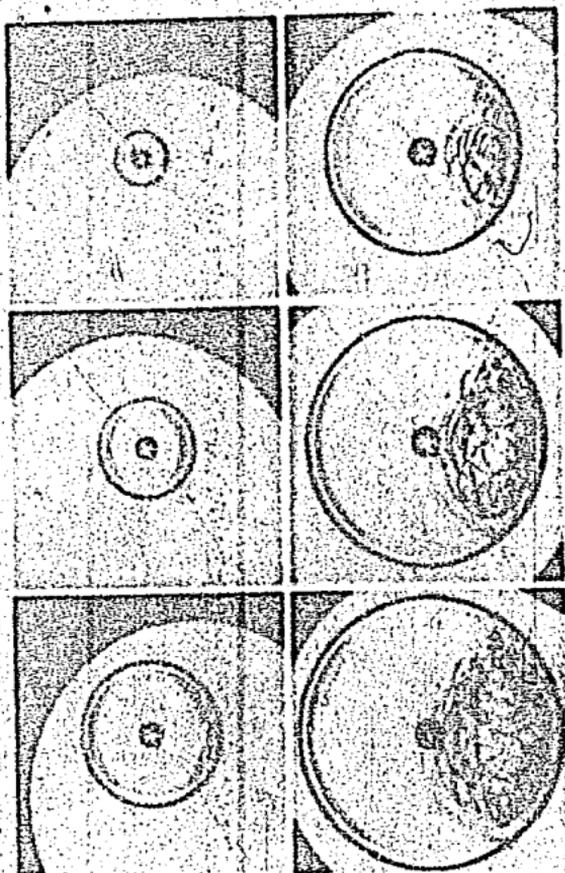


Abb. 14

Sechs zeitlich aufeinanderfolgende Funkenaufnahmen einer Unterwasserknallwelle, die über eingeschlossene Luftblasen hinwegläuft. »Implosion« der Luftblasen

Gerade als Ursache für die tödliche Wirkung eines Druckstoßes auf Menschen und Tiere wird man die primären Wirkungen der Stoßwellenfront heranziehen müssen. Als solche haben wir den Trägheits-, den Abplatz- und den Implosionseffekt kennengelernt. Es ist Aufgabe der experimentellen Untersuchungen, festzustellen, in welchem Maße diese drei Effekte die auftretenden Lungenschäden erklären, und ob man gegebenenfalls noch nach anderweitigen Erklärungen suchen muß.

Bei der tödlichen Wirkung von Luftstoßwellen auf lebende Wesen kann es sich jedoch auch noch um sekundäre Erscheinungen handeln. Auf eine solche wurde bereits mehrfach hingewiesen: Es ist die Impulsübertragung und damit das Fortschleudern des Tieres, das beim Aufprall tödliche Verletzungen davontragen kann.

Eine andere sekundäre Wirkung einer Detonation ist die Erzeugung von Gesteinstaub, die insbesondere in einem geschlossenen Raum zu einem Erstickungstode führen kann. Als Ursache für die Entstehung des Gesteinstaubes ist wieder der Abplatzeffekt heranzuziehen. Die Oberflächenteilchen der von einer Druckwelle getroffenen Wand lösen sich ab und fliegen mit der ihnen mitgeteilten Geschwindigkeit in den Raum hinein. Ein Beispiel für diesen Vorgang gibt die Abbildung 15 wieder. In einer Stahlplatte wird eine Druckwelle durch



Abb. 15

Funkenaufnahmen vom Beschuss einer Panzerplatte. Von der Rückseite der Platte löst sich eine Staubschicht. Das Geschöß ist durch seitliche Blechstreifen verdeckt

ein auf der linken Seite auftreffendes Geschöß erzeugt. Man erkennt, wie auf der Rückseite der Platte die Oberflächenschicht sich ablöst und zunächst mit geschlossener Front und mit der maximalen Geschwindigkeit, mit der sich die Platte bewegte, nach rechts fliegt. Erst etwas später löst sich die geschlossene Front auf und die feinen Staubeilchen bilden einen Nebel.

Ein weiterer zu beachtender Umstand ist durch die bei einer Detonation entstehenden Sprenggase gegeben. Sie enthalten giftige Gase, wie z. B. Kohlenoxyd. Dringen diese Sprenggase durch eine Öffnung in einen Bunker, so können die in dem Bunker vorhandenen Menschen an Kohlenoxydvergiftung sterben.

Befindet sich ein Objekt in unmittelbarer Nähe einer Sprengung, so wird es bei der Ausbreitung der Schwaden vollständig in diese eingetaucht werden. Außer der chemischen Einwirkung tritt in diesem Falle noch eine physikalische hinzu: Die hohe Temperatur der Schwaden wirkt genügend lange Zeit, um u. U. Verbrennungserscheinungen an der Oberfläche hervorzurufen.

Auch bedeutet das Auftreffen der Schwaden auf den Körper eine weitere Drucksteigerung. Wir hatten bisher damit gerechnet, daß die Druckwelle nur in der Luft läuft. Bei der frei sich ausbreitenden Detonationswelle ist nun zwar kein Drucksprung an der Grenze Schwaden-Luft vorhanden, wohl aber tritt ein solcher Drucksprung auf, wenn die Stoßwelle an einer festen Wand reflektiert wird. Infolge der größeren Dichte der Schwaden komprimieren diese die zwischen den Schwaden und der festen Wand vorhandene Luft. Es handelt sich hierbei um einen Vorgang ähnlich dem der Kompression eines in ein Rohr eingeschlossenen Gasvolumens durch einen in das Rohr hineingeschossenen Kolben. Hierbei entstehen außerordentlich hohe Drücke. In unmittelbarer Nähe des Sprengstoffs wäre dieser Effekt mitzuherücksichtigen. Er spielt also z. B. eine Rolle bei der Minenwirkung bei Geschossen, die in der Tragfläche eines Flugzeugs detonieren. Die Ausdehnung der Schwaden ist aber begrenzt, so daß bei größerer Entfernung des Objekts vom Sprengzentrum eine zusätzliche Drucksteigerung durch die auftreffenden Schwaden nicht mehr in Betracht kommen kann.