

Experimentelle Arbeiten zum Problem der Detonation

Von Hubert Schardin

(Auszug)

Es gibt eine große Anzahl empirischer Faustformeln für die Abhängigkeit der Wirkung einer Explosion von den Ausgangsdaten (z. B. bei Bergwerkssprengstoffen, Minen usw.). Sie alle führen jedoch nicht zu einem physikalischen Verständnis der Vorgänge. Eine wirkliche physikalische Theorie wird immer auf den zeitlichen Ablauf der Vorgänge im Sprengstoff und in seiner Umgebung eingehen müssen. Ferner ist es unbedingt notwendig, quantitative Messungen über den Druckverlauf in der Umgebung des detonierenden Sprengstoffs durchzuführen. Man muß dann versuchen, die so erhaltenen Ergebnisse mit den empirisch gewonnenen Wirkungen einer Sprengung in Beziehung zu setzen.

Nun ist es leider so, daß die Untersuchung der Vorgänge bei der Detonation experimentell nicht sehr einfach durchzuführen ist, weil es sich hier um so extreme Dimensionen handelt, daß die in der Physik sonst üblichen Meßverfahren meist versagen.

Im folgenden soll nun über einige derartige zur Analyse des zeitlichen Ablaufs dienende, bereits angewendete oder dafür geeignete Versuchsanordnungen und über Ergebnisse, die damit erzielt worden sind, berichtet werden.

Über die Einleitung einer Detonation

Nicht bei jedem Sprengstoff läßt sich eine Detonation durch Temperaturerhöhung oder Schlag einleiten. Wenn ein Sprengstoff »angezündet« wird, so kann er sehr wohl ganz normal abbrennen, ohne daß die Verbrennung in Detonation umzuschlagen braucht. Umgekehrt sind des öfteren Unglücksfälle dadurch vorgekommen, daß ein Stoff, der bisher nicht als Sprengstoff bekannt war, unter besonderen Umständen doch detoniert. Am bekanntesten ist das Oppauer Unglück vom Jahre 1923.

Sprengstoffe, die infolge Temperaturerhöhung oder Schlag sicher detonieren, nennt man »Initialsprengstoffe«. Nicht immer aber ist die

beginnende Umsetzung sofort eine Detonation. Aufschluß hierüber gibt eine Registrierung der bei der Explosion auftretenden Lichterscheinung auf einem rotierenden Film. Eine derartige Aufnahme von der Entflammung einer Aufschüttung von Knallquecksilber durch eine Bickfordzündschnur zeigt Abbildung 1. Man erkennt, daß zunächst eine Verbrennung vorhanden ist, die im Punkte A in Detonation umschlägt. Die Verbrennung erfolgt langsam (im Mittel mit 16 m/sec) und nicht mit kon-

Abb. 1



Zeitweg-Aufnahme von der Entflammung einer Aufschüttung von Knallquecksilber (nach Patry)

stanter Geschwindigkeit, während die Detonationsgeschwindigkeit einen wohl definierten Wert ganz anderer Größenordnung besitzt (2800 m/sec). Eine Schlagzündung dagegen führt beim Knallquecksilber praktisch sofort zur Detonation. Bleiazid detoniert ohne vorhergehende Verbrennung sowohl bei Entflammung als auch bei Schlagzündung. Eine Verbrennung des Bleiazids läßt sich nur unter ganz besonderen Bedingungen erreichen. Durch Zeitwegaufnahmen auf rotierendem Film läßt sich nachweisen, daß die Detonation von einem Sprengkörper auf einen zweiten je nach den Verhältnissen übertragen werden kann

1. durch die bei der Detonation des ersten Sprengstoffes entstehende Luftstoßwelle,
2. durch das Auftreffen der Schwaden,
3. durch mit hoher Geschwindigkeit auftreffende feste Teilchen.

Über den Verlauf der Detonation

In explosiblen Gasgemischen haben bereits 1883 Mallard und Le Chatelier den zeitlichen Ablauf der Umsetzung durch Abbildung der auftretenden Leuchterscheinung auf rotierendem Film untersucht. Zahlreiche derartige Aufnahmen sind dann von Dixon ausgeführt worden. Eine davon, die in viele Veröffentlichungen und Lehrbücher übernommen ist, zeigt Abbildung 2. Sie stellt den Umschlag von Verbrennung in

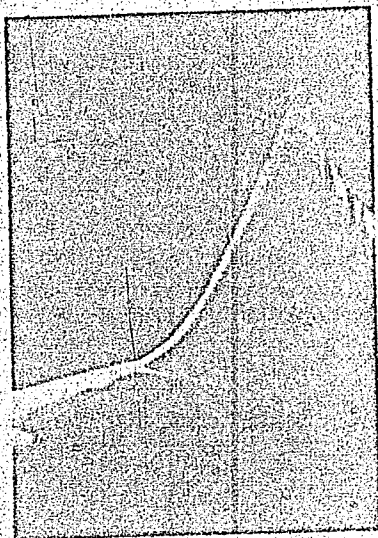


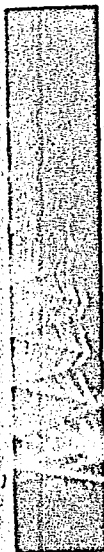
Abb. 2

Zeitweg-Aufnahme des Überganges von Verbrennung in Detonation bei einem explosiblen Gasgemisch (nach Dixon)

Detonation bei der Zündung eines explosiblen Gasgemisches durch einen elektrischen Funken dar. Auf anderen Aufnahmen fand er merkwürdige Schwingungen der Verbrennungsfrent (Abbildung 3); er erklärte ihr

Zustandekommen durch hin und her laufende Schallwellen. Daß diese Erklärung stimmt, ist durch Payman und seine Mitarbeiter sehr instruktiv durch gleichzeitige Abbildung der Schlieren nach der Toeplerschen Methode auf dem rotierenden Film nachgewiesen worden.

Abb. 3



Schwingungen der Verbrennungsfront bei der Explosion von Knallgas (nach Dixon)

Abbildung 4 gibt den Ablauf der Explosion eines Methan-Luft-Gemisches in einem 3,65 m langen Rohr wieder. Die Zündung erfolgt mit Hilfe eines kleineren mit Knallgas gefüllten Rohres, das in das rechte Ende des großen Rohres hineinragt. Zur Einleitung des Vorganges wird im Knallgas durch einen elektrischen Funken eine Detonation hervorgerufen. Sobald die Detonationswelle auf das Methan-Luft-Gemisch trifft, setzt in diesem eine Verbrennung ein, gleichzeitig beginnt eine Störungswelle in das noch unverbrannte Gemisch hinein zu laufen. Die Sichtbarmachung sowohl der Wellen als auch der Verbrennungsfront erfolgt mit Hilfe der Toeplerschen Schlierenmethode. Durch Abbildung auf einem rotierenden Film ergibt sich dann die Weg-Zeit-Kurve.

Da die Anwendung der Schlierenmethode einen Hohlspiegel oder ein Objektiv von einem Durchmesser mindestens gleich der Ausdehnung des Objektes voraussetzt, so folgt ohne weiteres, daß bei der Länge des Rohres von 3,65 m mit einem Versuch nur ein Teil des Gesamtvorganges erfaßt werden konnte. Daraus erklärt sich die Aufteilung des Rohres in 10 verschiedene Felder.



Abb. 1

Zeitweg-
Schlieren-
Aufnahme der
Explosion eines
Methan-Luft-
Gemisches (nach
Payman)

Die Abbildung 1 setzt sich also aus 10 verschiedenen Versuchen für den Ablauf der Vorgänge im Innern des Rohres und einem Versuch für den Außenraum am linken Ende des Rohres zusammen. Man sieht jedoch, daß die Aneinanderfügung recht gut paßt, die einzelnen Versuchsläufte also sehr gleichmäßig ab.

Die erste Stoßwelle läuft mit einer Geschwindigkeit von 360 m/sec durch das Rohr. Sie wird von den nachfolgenden schwächeren Wellen eingeholt, wie es ja auch von der Theorie verlangt wird; denn die einem Verdichtungsstoß nachlaufenden Wellen bewegen sich in einem Gas mit höherer Temperatur.

Die Verbrennungsfront im Methan-Luft-Gemisch hat infolge der intensiven Zündung durch das detonierende Knallgas zunächst eine höhere Geschwindigkeit, sie nimmt aber bald auf 120 m/sec ab und bleibt einige Zeit konstant. Gegen Ende des Rohres erscheint die Verbrennungsgeschwindigkeit wieder beschleunigt. Diese Beschleunigung beginnt in dem Augenblick, wo die vom offenen Ende ausgehende Verdünnungswelle auf die Verbrennungsfront auftrifft, sie ist also auf die Expansion des Rohrinhalts in die freie Atmosphäre zurückzuführen. Zu einer Detonation kommt es nicht.

Innerhalb von festen Sprengstoffen ist natürlich nur eine Registrierung der Leuchterscheinungen möglich.

Beachtung dürfte die Tatsache verdienen, daß mitunter eine Umsetzungsgeschwindigkeit auftritt, die weit über der Verbrennungsgeschwindigkeit liegt, jedoch nur einen Bruchteil der normalen Detonationsgeschwindigkeit beträgt. Als Beispiel sei ein Versuch von Patry in Abbildung 5 wiedergegeben. Es handelt sich um die Detonation von zwei Pikrinsäurestrecken, von denen die Rechte mit einer Sprengkapsel gezündet wird; die linke ist 0,7 bis 4 cm von dem Ende derselben entfernt.

Im Teilbild I (Zwischenraum 0,7 cm) ist fast unmittelbar nach Beginn der Umsetzung in der linken Sprengstoffstrecke die normale Detonationsgeschwindigkeit (3500 m/sec) vorhanden.

Im Teilbild II (Zwischenraum 2,3 cm) ist in der linken Säule zunächst eine Umsetzungsgeschwindigkeit von nur 1500 bis 2200 m/sec vorhanden. Erst dann setzt normale Detonation ein. Die Lichterscheinung im Anlaufgebiet ist wesentlich geringer als bei der normalen Detonation.

Im Teilbild III (Zwischenraum 2,5 cm) verläuft die Explosion der zweiten Säule nur mit der kleineren in sich konstanten Geschwindigkeit von 2200 m/sec.

Im Teilbild IV (Zwischenraum 4 cm) ist längs einer kurzen Strecke die Umsetzungsgeschwindigkeit von 2200 m/sec vorhanden. Danach bleibt die Detonation vollkommen stehen.

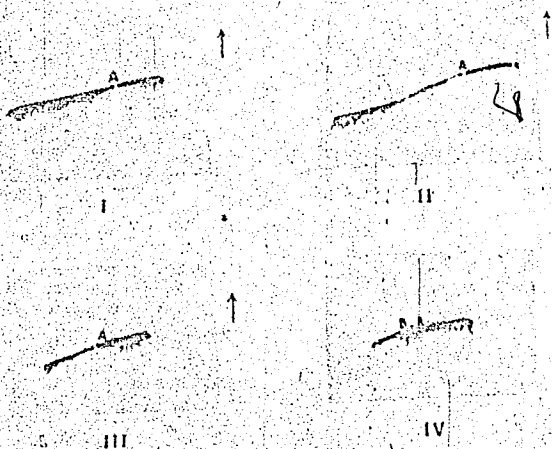


Abb. 5

Detonation zweier Pikrinsäurestrecken. Die rechts wird mit einer Sprengkapsel gezündet. Zwischen beiden befindet sich bei A ein Luftwischenraum.

Es handelt sich also hier um einen Fall, wo außer der normalen Detonationsgeschwindigkeit von 3500 m/sec noch eine weitere von 2200 m/sec vorhanden ist. Es dürfte dieser eine chemische Teilreaktion entsprechen. Vielleicht läßt sich auf diese Weise ein Einblick in den Ablauf der chemischen Reaktionen bei der Detonation des betreffenden Sprengstoffes gewinnen.

Die Tatsache, daß die Leuchterscheinung im Anlaufgebiet geringer ist als an den Orten normaler Detonation, ermöglicht bei der Detonation von ebenen Sprengstoffplatten eine sehr einfache Ermittlung der Ausdehnung des Anlaufgebietes. Man braucht nur in einem verdunkelten Raum eine Standaufnahme der Leuchterscheinungen bei der Sprengung zu machen. Das Gebiet mit der geringeren Detonationsgeschwindigkeit hebt sich dann deutlich als dunkle Stelle ab. Zur Verhinderung einer Überstrahlung ist es zweckmäßig, die Sprengung in einer Küvette mit Wasser vorzunehmen.

Die zahlenmäßige Auswertung einer derartigen Aufnahme liefert für die Sprengung einer 8 mm starken Platte aus einer Mischung 1:1 von Trinitrotoluol und Hexogen bei einer Zündung mit einer Sprengkapsel Nr. 8 eine Umsetzungsgeschwindigkeit im Anlaufgebiet von 2500 m/sec bei 8000 m/sec normaler Detonationsgeschwindigkeit. Dieses Resultat wurde gewonnen aus einer funkenkinematografischen Aufnahme einer Sprengung unter Wasser. Aus der Stoßwelle, die sich in der Flüssigkeit ausbildet, ersieht man, bis zu welcher Stelle im Sprengstoff die Detonation vorgeschritten ist. Daraus läßt sich einmal die Detonationsgeschwindigkeit ermitteln, ferner lassen sich Schlüsse über die Form der Detonationswelle innerhalb des Sprengstoffes ziehen. Die Geschwindigkeit der Stoßwellen im Wasser liefert gleichzeitig eine Möglichkeit zur Angabe eines Mindestwertes für den Druck im Sprengstoff.

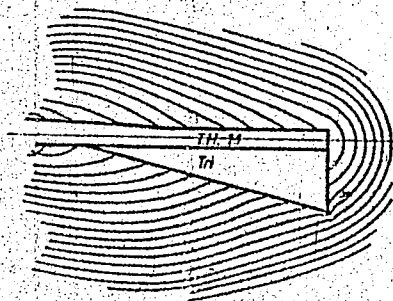
Auf Grund theoretischer Betrachtungen ist es möglich, aus der Geschwindigkeit der Stoßwelle in einer Flüssigkeit genau wie bei Gasen auf den Druck hinter der Stoßfront zu schließen. Der Detonationsdruck muß dann auf jeden Fall größer als dieser Wert sein. Bei Vorliegen weiterentwickelter theoretischer Unterlagen lassen sich u. U. auch genauere Angaben über den Druck im Sprengstoff selbst machen. Die funkenkinematografische Aufnahme einer Sprengung unter Wasser kann somit als neue Methode für sprengstoffphysikalische Untersuchungen angesehen werden.

Zwangswise kann in einem Sprengstoff auch eine erhöhte Detonationsgeschwindigkeit erzielt werden. Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 6. An der einen Seite einer Sprengstoffstrecke aus der Mischung

Abb. 6

Ergebnis einer funkenkinematografischen Aufnahme der Detonation zweier Sprengstoffe unter Wasser. Die eingezeichneten Kurven geben die Lage der Wasserstoßwelle für Zeitpunkte an, die um

$\frac{1}{400000}$ sec auseinanderliegen (Aufnahme I.K.A. [Thomanek])



Trinitrotoluol und Hexogen befindet sich ein Keil aus reinem Trinitrotoluol. Die Detonationsgeschwindigkeit in der Sprengstoffmischung beträgt 8000 m/sec gegenüber 6800 m/sec im Trinitrotoluol. Die Zündung im Trinitrotoluol erfolgt also mit „Überdetonationsgeschwindigkeit“. Es wird sich also im Trinitrotoluol eine Detonationswelle ausbilden, deren Form davon abhängt, wie die Detonationsgeschwindigkeit auf den normalen Wert absinkt. Infolge der Keilform des Trikkörpers schneidet mit zunehmender Ausbreitung immer jeweils ein anderer Punkt der Detonationswelle die Außenfläche des Sprengstoffkeiles. Dieser Punkt läßt sich nun durch die Ausbildung der Wasserstoßwellen bei einer Sprengung im Wasser mit Hilfe der Funkenkineinographie feststellen, so daß sich damit auch die zeitliche Abnahme der Detonationsgeschwindigkeit ergibt.

Über die Untersuchung der Vorgänge in der Umgebung des Sprengstoffes

a) Der eindimensionale Vorgang

Da theoretisch bisher sowohl für die Detonation als auch für die Ausbreitung einer Knallwelle nur der lineare Vorgang mit einiger Sicherheit erfaßt werden kann, wird es also auch eine erste Aufgabe der experimentellen Sprengstoffphysik sein, den linearen Vorgang bei einer Detonation zu realisieren und zu untersuchen. Man tut dies im allgemeinen dadurch, daß man den Sprengstoff in einem Rohr zur Detonation bringt und die sich in einem Glasrohr ausbreitende Leuchterscheinung auf einem rotierenden Film aufnimmt. Es ist natürlich zu beachten, daß u. U. die Rohrwandung einen Einfluß auf den Ablauf des Vorganges ausüben kann. Ferner können Zeit-Weg-Aufnahmen auf rotierendem Film durch die Glasbruchvorgänge gestört werden. Zwar beträgt die normale Glasbruchausbreitungsgeschwindigkeit nur 1500 m/sec, sie ist also geringer als die Geschwindigkeit der Vorgänge, um die es sich hier im allgemeinen handelt. Bei der Zertrümmerung des Glasrohres durch eine Detonation werden allerdings durch die sich im Glas ausbreitende sehr intensive Longitudinalwelle laufend Sekundärbrüche hervorgerufen, so daß praktisch das Glasrohr unmittelbar hinter der Longitudinalwellenfront zu Bruch geht. Für durchfallendes Licht wird daher das Glas mit einer Geschwindigkeit von 5400 m/sec undurchsichtig. Wenn es sich jedoch nur um die Aufnahme der Ausbreitung der selbstleuchtenden Vorgänge handelt, so dringt das abzubildende Eigenlicht auch durch ein vollkommen zertrümmertes Glasrohr. Der Bruch des Glases macht sich dann also nicht störend bemerkbar.

Die Temperatur in der Knallwelle ist außerordentlich hoch, sie liegt im allgemeinen über der Temperatur der expandierenden Schwaden. Mit abnehmendem Druck im Außenraum nimmt die Temperatur noch erheblich zu, so daß gerade bei kleinen Außendrucken außerordentlich starke Leuchterscheinungen auftreten.

In der Nähe des Sprengstoffes ist der Abstand zwischen der Schwadengrenze und der Stoßwellenfront außerordentlich klein. Wenn man eine Zeit-Weg-Aufnahme auf rotierendem Film macht und die optische Auflösung — z. B. infolge eines zu breiten Spaltes — nicht fein genug ist, werden die Schwaden und die Stoßwelle gleichschnell zu laufen scheinen und sich erst von einer bestimmten Entfernung ab zu trennen beginnen:

Auf der Zeit-Weg-Aufnahme wird man als Bild der Knallwelle eine schmale, helle Linie erwarten müssen. Aus ihrer Neigung ergibt sich die Geschwindigkeit der Stoßwelle und daraus mit Hilfe der bekannten Beziehungen auch der Druck in der Stoßwelle. So findet z. B. Patry, daß bei fast allen Sprengstoffen — wenn nur die Ladedichte nicht zu extreme Werte annimmt — die Geschwindigkeit der Stoßwelle in Luft vom Atmosphärendruck in der Größenordnung von 6000 m/sec liegt. Daraus folgt ein Druck in der Stoßwelle von 410 at und eine Temperatur von 7500° C. Bei niedrigeren Außendrucken sind wesentlich höhere Geschwindigkeiten gemessen worden; z. B. von R. Becker eine Stoßwellengeschwindigkeit von 14000 m/sec. Ob es experimentell gelingt, eine so starke Evakuierung zu erreichen, daß eine Luftstoßwelle nicht mehr entsteht, und daß dann nur die Schwaden in das Rohr hineinströmen und die Leuchterscheinungen verursachen, sei dahingestellt.

b) Der räumliche Vorgang

Abbildung 7 gibt die Detonation einer 1 g schweren Kugel aus Bleiazid in 4 aufeinanderfolgenden Stadien wieder. Auf dem ersten Teilbild hebt sich die Knallwelle kaum von den Schwaden ab, aber zahllose feste Teilchen haben die Wellenfront durchstoßen. Jedes zieht für sich eine Kopfwelle. Infolgedessen ist die äußere Begrenzung des ganzen Vorganges sehr unregelmäßig. Auf dem zweiten Teilbild heben sich die Schwaden infolge ihres Bleigehaltes sehr deutlich innerhalb der Wellenkugel ab. Die Begrenzung der Schwaden ist sehr unregelmäßig. Dies scheint dadurch bedingt zu sein, daß einige der fortgeschleuderten festen Teilchen erst nachträglich verbrennen. Auf dem dritten Teilbild ist die

Neubildung einer zweiten Knallwelle erkennbar, auf dem letzten Teilbild ist diese deutlich ausgeprägt. Es dürfte sich hierbei, um die zweite Zacke des für die Expansion einer Gaskugel sich theoretisch (unter der Annahme kleiner Amplituden) ergebenden »Sägezahnes« handeln.

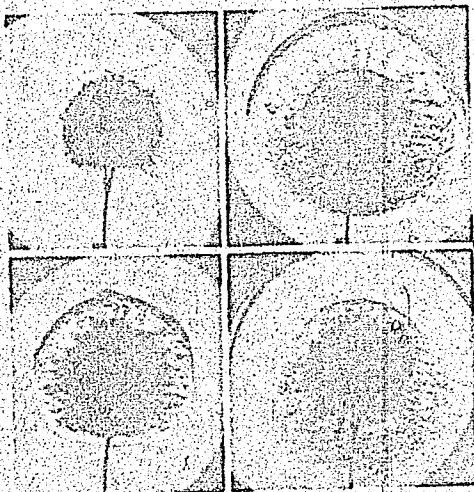


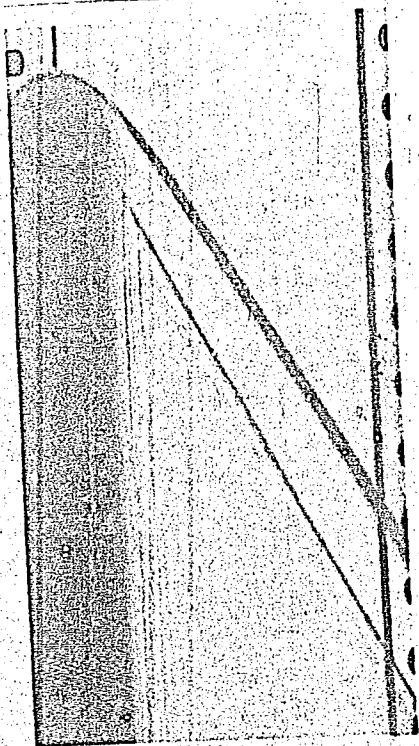
Abb. 7

Funkenkinematographische Bilderreihe der Detonation einer 1 g schweren Kugel aus Bleiazid (Aufnahme IKA [Strutli])

Abbildung 8 zeigt nun den gleichen Vorgang als Zeit-Weg-Kurve. Da die einzelnen Phasen bereits besprochen wurden, ist sofort klar, worum es sich handelt. Die primäre Knallwelle ist gut ausgeprägt und scharf begrenzt. Man kann aus ihrem Verlauf die Geschwindigkeit durch einmaliges Differenzieren ermitteln. Die Geschwindigkeit der sekundären Knallwelle ist von Anfang an fast gleich der normalen Schallgeschwindigkeit in ruhender Luft. Wie zu erwarten, ist die Zeit-Weg-Kurve für die Begrenzung der Schwaden nicht scharf. Die vielen kleinen Teilchen mit ihren Kopfwellen rufen eine Anzahl von Linien hervor, die im einzelnen zu identifizieren unmöglich ist.

Die Auswertung derartiger Aufnahmen liefert eine experimentelle Unterlage für das Problem der räumlichen Ausbreitung einer Knallwelle. Da theoretische Unterlagen hierfür noch nicht vorhanden sind, ist es in

Abb. 8



Zeitweg-Schlieren-Aufnahme der Detonation einer 1 g schweren Kugel aus Bleisäure (Aufnahme LKA [Struth])

Verbindung mit Druckregistrierungen auf diese Weise möglich, die Vorgänge so weit zu klären, daß die für die Praxis wichtigen Fragen beantwortet werden können.

Die Ermittlung des physikalischen Zustandes in der durch eine Detonation erzeugten Knallwelle

Die Zeit-Weg-Aufnahmen liefern als quantitatives Ergebnis die Detonationsgeschwindigkeit, die Geschwindigkeit der Knallwelle und größenordnungsmäßig auch die Geschwindigkeit der Schwaden.

Aus der Geschwindigkeit w der Knallwelle lassen sich mit Hilfe der bekannten Beziehungen Druck, Temperatur und Dichte für einen Ort unmittelbar hinter der Wellenfront berechnen. Diese Gleichungen setzen u. a. das Verhältnis der spezifischen Wärmen für den betreffenden Zustand als bekannt voraus. Die neueren durch G. Burkhardt durchgeführten Berechnungen liefern hierfür genaue Unterlagen.

Unmittelbar lassen sich experimentell der Druck und der Dichteverlauf ermitteln. Eine Messung der Temperatur mit Hilfe von Thermoelementen o. dgl. dürfte wohl ausgeschlossen sein; in Frage kommt höchstens eine Ermittlung der Temperatur über die spektrale Verteilung der Lichtemission.

a) Über die Messung des Druckverlaufs in Luftstoßwellen

Die Anforderungen, die an Geräte zum Messen der Luftstoßwellen gestellt werden, sind viel höher als die der gewöhnlichen Akustik; denn erstens handelt es sich um sehr viel höhere Drücke und zweitens erfolgt der Druckanstieg derart schnell, daß die Eigenfrequenz der normalen Meßgeräte nicht ausreicht, um den ersten Druckanstieg einwandfrei aufzeichnen zu können. Es war daher die Entwicklung besonderer Geräte notwendig.

Eine derartige Entwicklung ist durch Wilhelm Schneider in der Chemisch-Technischen Reichsanstalt durchgeführt worden. Schneider verwendet ein Kondensator-Mikrophon mit festem Dielektrikum (Abbildung 9). In einem Stahlring sitzt ein Hartgummiring und in diesem

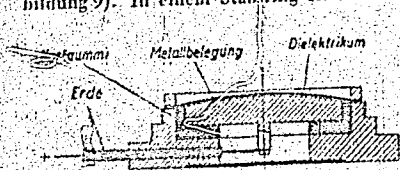


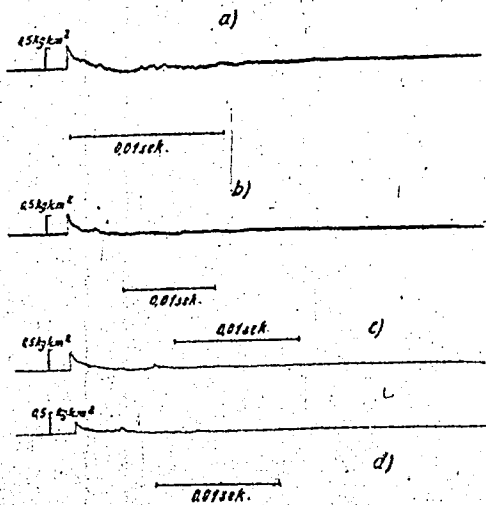
Abb. 9

Schematische Darstellung des Schneiderschen Kondensator-Mikrophons mit festem Dielektrikum

isoliert von dem äußeren Stahlring eine Stahlscheibe. Über sie wird eine einseitig metallisierte Folie gespannt, die durch einen weiteren Stahlring gehalten wird. Die Metallfolie steht mit dem Gehäuse in leitender Verbindung und ist wie dieses geerdet. Beim Auftreffen einer Stoßwelle auf das Mikrophon wird die isolierende Folie komprimiert und dadurch wird eine Änderung der Kapazität hervorgerufen. Über einen

Verstärker erfolgt dann in genügender Entfernung vom Sprengherd eine Aufzeichnung der Kapazitätsänderung mit Hilfe eines Oszillographen. Abbildung 10 zeigt Aufnahmen der Luftstoßwelle, die beim Sprengen von $\frac{1}{2}$ kg Trinitrotoluol in 5, 6, 7,5 und 10 m Abstand vom Sprengherd gewonnen wurden. Der Druck steigt im ersten Druckstoß sehr schnell auf seinen Höchstwert an, dann folgt ein geringer Unterdruck. Den Auf-

Abb. 10



Druckverlauf beim Sprengen von $\frac{1}{2}$ kg Trinitrotoluol in
 a) 5 m, b) 6 m,
 c) 7,5 m und
 d) 10 m Abstand vom Sprengherd

zeichnungen sind noch kleine Schwingungen überlagert. Diese werden durch die Zuleitungen zum Kondensator-Mikrophon verursacht. Die Unterdrücke werden mit anderer Empfindlichkeit aufgezeichnet als die Überdrücke. Der Meßbereich ist bei etwa einer Atmosphäre Überdruck begrenzt.

Die Eichung des Kondensator-Mikrophons wird statisch vorgenommen. Eine unmittelbare dynamische Eichung ist nicht möglich. Daher ist es wünschenswert, noch weitere Meßgeräte zu besitzen, die nach anderen Prinzipien arbeiten, um so eine Vergleichsmöglichkeit zu haben.

Ganz allgemein ist bei derartigen Druckmessungen auf folgendes hinzuweisen: Man mißt nicht den Druck in der freilaufenden Stoßwelle,

sondern den Druck, der bei der Reflexion dieser Stoßwelle am Mikrophon entsteht. Daraus läßt sich jedoch der primäre Druck rechnerisch ermitteln. Allerdings muß man dafür sorgen, daß von den Rändern des Mikrophons keine Störungen ausgehen. Es ist also notwendig, das Mikrophon in eine genügend große ebene Reflexionswand einzubauen. In all denjenigen Fällen, in denen dies nicht erfolgt ist, ist der Druckverlauf von den geometrischen Anordnungen des Aufbaues abhängig.

Die Entwicklung einer anderen Druckmeßapparatur ist durch G. Turetschek im Ballistischen Institut der Luftkriegsakademie erfolgt; er verwendet den Piezoeffekt. Die Aufgabe war insbesondere dafür zu sorgen, daß die Eigenfrequenz des Meßsystems das Resultat nicht störend beeinflußt. Dies ist auf folgende Weise geschehen: Die zu registrierende Stoßwelle trifft zunächst auf die Stirnkante einer Aluminiumstange, die sich in einem Ausschnitt einer größeren Stahlplatte befindet (Abbildung 11). Die Stoßwelle läuft in der Aluminiumstange

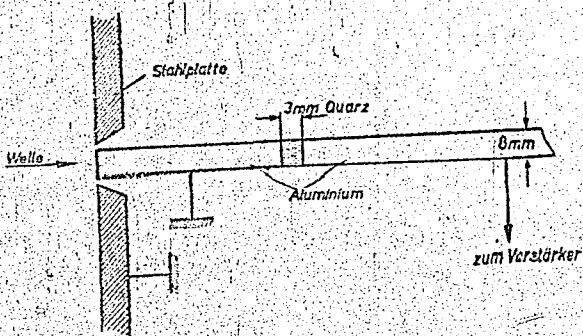


Abb. 11

Schematische Darstellung der Druckmeßapparatur nach G. Turetschek

praktisch ungedämpft weiter. In die Aluminiumstange ist nun eine Quarzscheibe eingekittet. An der Übergangsstelle Aluminium-Quarz darf keine Reflexion stattfinden.

Die Bedingung für reflexionsfreien Übergang an der Stoßwelle lautet

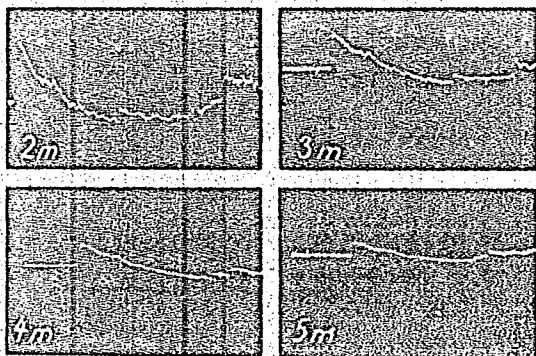
$$\left(\frac{E \cdot q}{c}\right)_{\text{Quarz}} = \left(\frac{E \cdot q}{c}\right)_{\text{Metall}} \quad \text{wobei } E \text{ Elastizitätsmodul} \\ q \text{ Querschnitt} \\ c \text{ Schallgeschwindigkeit}$$

Sie ist genügend genau für Quarz und Aluminium erfüllt.

Die Stoßwelle durchläuft also die Quarzplatte, ohne sie zu Eigenschwingungen anzuregen. Macht man jetzt die gesamte Aluminiumstange genügend lang, so erhält man ein einwandfreies Oszillogramm des Druckverlaufs in der Stoßwelle. Die Reflexion am anderen Ende der Aluminiumstange darf erst so spät zurückkommen, daß der eigentliche Vorgang bereits registriert ist.

Die Grenzfrequenz des verwandten Verstärkers betrug 10^5 Hz, der Verstärkungsfaktor 10000. In Abbildung 12 sind 4 Aufnahmen mit dieser Apparatur wiedergegeben, die den Druckverlauf bei einer Sprengung von 250 g einer Mischung 1:1 von Trinitrotolpol und Hexogen in 2, 3, 4 und 5 m wiedergeben.

Abb. 12



Druckverlauf
bei einer
Sprengung von
250 g Spreng-
stoff in 2, 3, 4
und 5 m Ab-
stand vom
Sprengherd

b) Über die Messung des Dichteverlaufs

Mit Hilfe des allgemeinen Zusammenhanges der optischen Brechzahl n mit der Dichte ρ nach L. Lorentz und H. A. Lorentz

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{1}{\rho} = \text{konst.},$$

die sich für Vorgänge in Gasen vereinfachen läßt zu $\frac{n-1}{\rho} = \text{konst.}$ (Biot und Arago 1806) ist es möglich, aus einer rein optisch durchzuführenden Bestimmung der Brechzahl die Dichte zu berechnen.

Für die Ermittlung der Brechzahl in einem schnell verlaufenden Vorgang stehen der Mach-Zehundersche Interferenzrefraktor sowie das Toeplersche Schlierenverfahren zur Verfügung.

Die Überlagerung von Detonationsknallwellen

Für Stoßwellen gilt nicht das lineare Superpositionsgesetz. Der einfachste Fall der Überlagerung ist der der Reflexion einer ebenen Stoßwelle an einer festen Wand. Hierfür lassen sich in einfacher Weise die exakten Gleichungen hinschreiben. Als Resultat ergibt sich der in Abbildung 13 dargestellte Zusammenhang, der von W. Döring berechnet worden ist.

Man sieht also, daß durch die Reflexion der Druck um ein Mehrfaches erhöht wird. Der einfachste räumliche Fall ist der der Überlagerung zweier Kugelwellen. Bereits E. Mach hat zur Klärung der hierbei auftretenden auf den ersten Blick z. T. recht merkwürdigen Erscheinungen zahlreiche Versuche angestellt. Er ließ geringe Mengen Knallquecksilber an der Oberfläche von herußten Glasplatten detonieren. Die Einleitung der Zündung erfolgte durch hintereinander geschaltete elektrische Funken, die zwischen Stanniolstreifen übersprangen. Das Stanniolpapier war auf die Glasplatten geklebt. Durch die sich ausbreitenden Knallwellen wurde nun der Ruß je nach der Intensität derselben mehr oder weniger stark weggeblasen. Man erzielt auf diese Weise ein Bild des räumlichen Verlaufs der Intensität der Knallwellen. Eine derartige Aufnahme zeigt Abbildung 14. Man erkennt daraus die 2 Explosionszentren *A* und *B*. In der unmittelbaren Umgebung dieser beiden Stellen ist der Ruß stark weggeblasen. Mit zunehmender Entfernung bleibt er wieder liegen. Jedoch ist er ausgehend von der Mitte zwischen *A* und *B* nach oben und unten längs des sogenannten »Machschen V_2 « wieder stark weggenommen. Infolge der Überlagerung zweier Knallwellen müssen also an gewissen Stellen im Raum wesentlich erhöhte Wirkungen vorhanden sein. Diese Tatsache ist die Grundlage der Hohlraumwirkung bei Sprengungen (Mantoe-Effekt). Der von Mach bereits durchdachte und durch Versuche

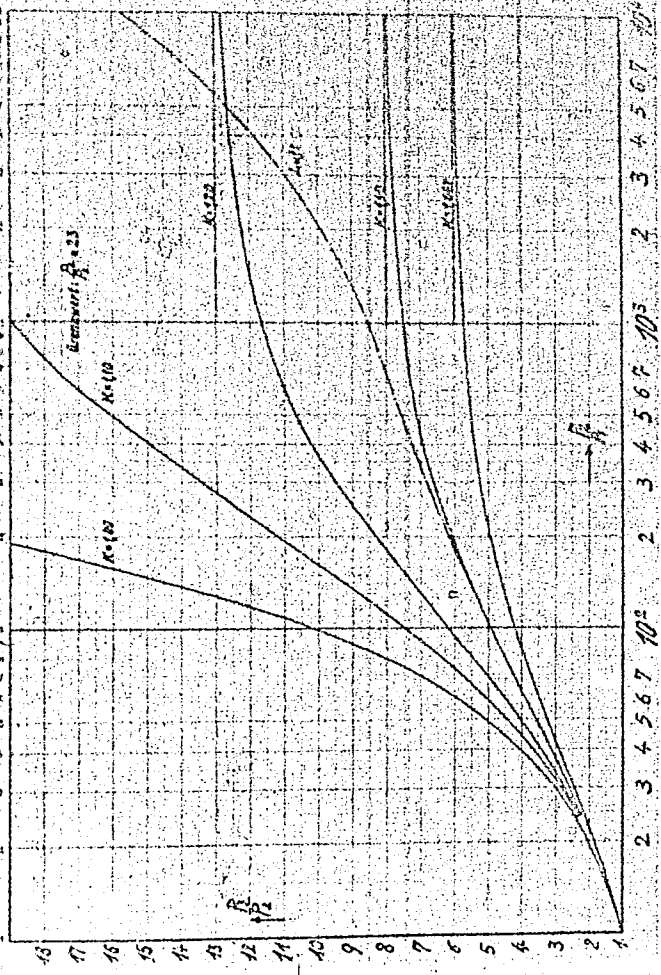


Abb. 13

Druckerhöhung beim senkrechten Auftreffen einer ebenen Stoßwelle auf eine ebene Wand für verschiedene Werte von $\frac{p_2}{p_1}$; $\frac{v}{v_1}$ Druckverhältnis der auftreffenden, $\frac{p_2}{p_1}$ der reflektierten Welle.

belegte Fall der Überlagerung zweier Knallwellen, die von zwei punktförmigen Detonationszentren ausgehen, läßt sich qualitativ voll verstehen und auch noch z. T. quantitativ erfassen.

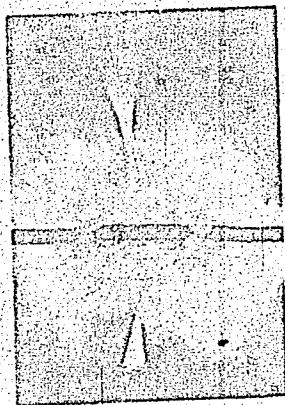


Abb. 11

Machzahl-Ma-Ausbreitung, sichtbar gemacht durch die Detonation zweier Knallsilberhäufchen auf einer herabgelassenen Glasplatte

Über die Sprengwirkung in festen Körpern

Bisher handelte es sich nur um die Erfassung der Vorgänge im Sprengstoff und in seiner unmittelbaren Umgebung (im allgemeinen Luft). Was jedoch innerhalb des festen Körpers vor sich geht, ist bisher nicht berührt worden. Der Sinn einer jeden Sprengung ist nun aber in fast allen Fällen — nicht nur bei den militärischen, sondern auch bei der rein zivilen Anwendung, z. B. im Bergbau — die Zerstörung von festen Körpern.

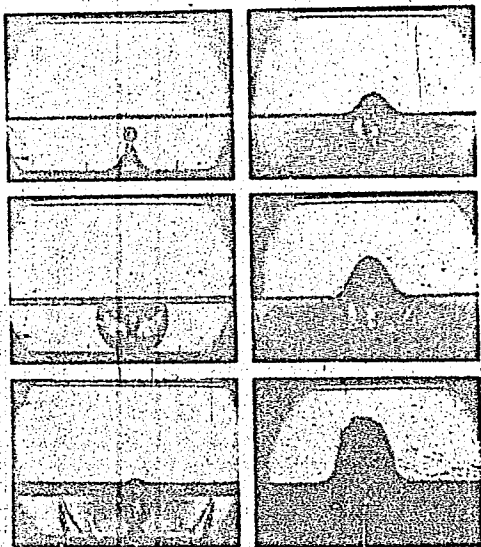
Will man also einen Überblick darüber gewinnen, welche Bedingungen zur möglichst vollkommenen Erreichung dieses Zieles notwendig sind, so ist es unerlässlich, sich auch mit den Vorgängen im festen Körper bei einer Sprengung zu befassen. Man tritt damit in ein Gebiet ein, das schon bei erheblich niedrigeren Belastungen und Belastungsgeschwindigkeiten ungeheure Schwierigkeiten macht. Zur Klärung der Zusammenhänge sind folgende Wege möglich:

1. Eine möglichst umfassende systematische Zusammenstellung aller technologischen Daten, die bei Sprengvorgängen eine Rolle spielen, mit der Tendenz, daraus auf irgendwelche allgemeineren Zusammenhänge zu

schließen. Hierbei sind sowohl die Daten des Sprengstoffes und dessen geometrische Anordnung als auch die Daten, die Anordnung und das metallographische Gefüge des zu sprengenden Körpers vor und nach der Sprengung von Bedeutung.

2. Die zeitliche Analyse der Sprengvorgänge mit Hilfe der Funkenkinematographie, wobei insbesondere die Durchführung von Modellversuchen von Sprengungen auf Körpern aus durchsichtigem Material (Flüssigkeiten, Glas, Kunstharze) sehr wertvoll ist (Abbildung 15). Man

Abb. 15



Modellversuch für die Wirkung einer Mine. Die drei ersten Bilder der funkenkinematographischen Bildfolge zeigen die Ausbreitung der Wasserstoffwelle, die drei letzten die Ausbildung der Wasserfontäne (Aufnahme LKA [Struth])

hat hierbei den Vorteil, den Ablauf des Vorganges im Innern zeitlich verfolgen zu können und ist zudem in der Lage, mit Hilfe des spannungsoptischen Effektes gewisse quantitative Aussagen über die Höhe der auftretenden Spannungen machen zu können. Ferner können die beim Beschuß von Panzerplatten gesammelten Erfahrungen mit herangezogen werden.

Welche Überraschung man bei der Wirkung einer Sprengung erleben kann, dafür folgendes Beispiel:

Um eine dünne Platte gegen Druckbelastungen widerstandsfähiger zu machen, versieht man sie im allgemeinen mit Rippen. Dieses Mittel hilft ausnahmslos in allen statischen Fällen und auch bei dynamischer Beanspruchung, solange nicht ausgesprochene Resonanzerscheinungen auftreten. Es wäre nun anzunehmen gewesen, daß mit Rippen versehene Fensterscheiben gegen die Zerstörung durch Bombenexplosionen besser gesichert seien als unverstärkte Glasplatten. Um das zu prüfen, wurden in verschiedenster Art mit Verstärkungsrippen versehene Glasscheiben neben freien Platten der Wirkung einer Detonationsknallwelle ausgesetzt, und da ergab sich, daß — bei einem bestimmten Abstand vom Sprengherd — sämtliche verstärkten Platten zertrümmert wurden, während beim gleichen Abstand alle unverstärkten Platten heil blieben (Abbildung 16). Das ist ein drastisches Beispiel dafür, daß Ergebnisse, die unter normalen technischen Bedingungen gewonnen worden sind, nur mit größter Vorsicht auf die Verhältnisse beim Sprengen übertragen werden dürfen.

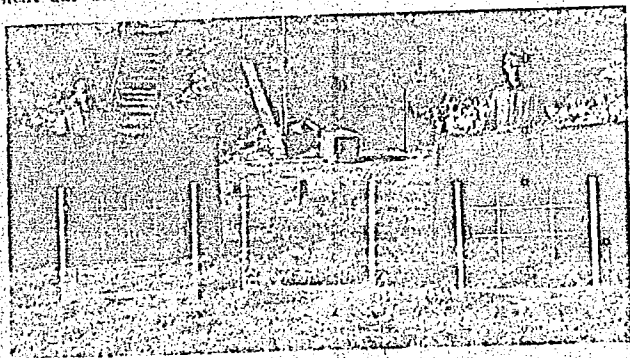


Abb. 16

Unverstärkte Glasplatten sind bei der Beanspruchung durch eine Explosion widerstandsfähiger als mit Rippen versehene