

Über die Vorgänge bei der Initiierung flüssiger Sprengstoffe

Von M. ZIPPERMAYR *

Ein schwerer Unglücksfall beim Hantieren mit einer Lösung von Dinitrobenzol in Salpetersäure (im folgenden mit Dnbz-S-Lösung bezeichnet) bot den Anlaß zu einer größeren Zahl von Versuchen, die bei der AG Dynamit Nobel, Werk St. Lambrecht (Steiermark), durchgeführt worden waren und über deren Ergebnis bereits früher berichtet wurde¹. Bei dieser Lösung handelt es sich um eines jener explosiblen Gemenge von Nitrokohlenwasserstoffen mit Salpetersäure, welche vor etwa achtzig Jahren SPRENGEL und HELLHOFF in Vorschlag gebracht hatten. Die hohe Detonationsenergie dieser Sprengflüssigkeiten, ihre leicht zu beschaffenden Bestandteile wie auch die einfache Herstellungsweise bieten immer wieder einen Anreiz, sie für industrielle bzw. militärische Verwendung brauchbar zu machen. Leider steht den günstigen fabrikatorischen Voraussetzungen und den guten sprengtechnischen Eigenschaften eine recht unangenehme Eigentümlichkeit gegenüber, wie sie fast allen flüssigen Sprengstoffen anhaftet. Sie können nämlich, trotzdem sie selbst rauhe Behandlung längere Zeit gelegentlich anstandslos vertragen haben, ganz unversehens eine unerklärlich hohe Stoßempfindlichkeit zeigen und dabei zur Ursache schwerer Unglücksfälle werden. Dieser Umstand war es auch, welcher den Sprengflüssigkeiten den Ruf einer gefährlichen Unzuverlässigkeit eintrug.

Es war Aufgabe der eingangs erwähnten Untersuchungen, die äußeren Bedingungen dieses merkwürdigen Verhaltens zu erforschen, um damit etwas über die Art jenes Vorganges zu erfahren, welcher bei der Initiierung eines flüssigen Sprengstoffes von dominierendem Einflusse ist. Sofern dies gelungen ist, so scheint es nicht ausgeschlossen, auch zu allgemeiner gültigen Schlußfolgerungen über die Natur des molekularen Geschehens bei der Einleitung solcher und ähnlicher Reaktionen gelangen zu können.

Der folgende Bericht gibt einen gedrängten, aber möglichst instruktiv gehaltenen Überblick über die wichtigsten Versuche und die zu ziehenden Folgerungen, doch gerade nur so weit, als dies zum Klarlegen der Zusammenhänge erforderlich ist.

I. Initiierung durch Gasbläschen

Wohl die umfassendsten Untersuchungen über das Verhalten von flüssigen Sprengstoffen gegenüber verschiedenartigen Beanspruchungen sind jene von F. P. BOWDEN und seinen Mitarbeitern^{2,3,4}.

Als bedeutendstes Ergebnis dieser Untersuchungen kann der Nachweis gelten, daß bei Anwesenheit kleiner Gasblasen die Stoßempfindlichkeit der flüssigen Sprengstoffe sich ganz außerordentlich erhöht. Zur Erklärung dieses Phänomens wird die Vermutung ausgesprochen, daß die durch den Stoß verursachte schlagartige Kompression dieser Bläschen angenähert adiabatisch vor sich geht und die damit verbundene Temperatursteigerung dann zur Initiierung führt.

Gegen die Annahme eines solchen thermischen Vorganges sprechen die relativ sehr geringe Wärmemenge, welche bei der Kompression einer kleinen Gasblase entsteht, der große Wärmeverlust, den kleine von Flüssigkeit umgebene Blasen aufweisen, und andererseits der relativ große Wärmearaufwand, welcher nötig ist, um die an das Gasbläschen angrenzende Sprengflüssigkeit auf Zündtemperatur zu erhitzen und den Zerfall einzuleiten. Die ersten Versuche beschäftigten sich daher mit der Frage, ob derangedeutete thermische Vorgang überhaupt imstande ist, die Detonation einer Sprengflüssigkeit herbeizuführen.

Um einen Einblick in die Größe der Kompressionsarbeit zu erhalten, die nötig ist, um in verschiedenen großen Gasbläschen eine bestimmte Temperatur zu erzielen, wurden in Abänderung der BOWDENschen Versuchsbedingungen nicht inerte Gasbläschen in Sprengflüssigkeit, sondern Knallgasbläschen verschiedener Größe in Wasser Stoßkompressionen zunehmender Stärke unterworfen, bis Zündung eintrat. Wie erwartet, zeigte sich ein starkes Anwachsen der zur Zündung nötigen Kompressionsenergie mit abnehmendem Bläschenradius, wohl in erster Linie als Folge der damit stark zunehmenden Wärmeverluste. Sehr kleine Bläschen sind überhaupt nicht zur Entzündung zu bringen. Dies stellte schon E. BIESALSKY⁵ an knallgasgefüllten Schäumen fest, die sich nicht einmal mit dem Bunsenbrenner entflammen ließen.

Demgegenüber sind nach den Feststellungen von F. P. BOWDEN Bläschen bis herab zu 0,1 mm Durchmesser noch imstande, initiierend zu wirken, wobei die zur Initiierung nötigen Stoßenergien als ungewöhnlich gering gefunden wurden. Schon diese Umstände ließen die thermische Natur des Initiierungsvorganges als unwahrscheinlich erscheinen.

Diese Schlußfolgerung wurde durch weitere Versuche bestätigt, bei denen in Glasröhrchen eingeschmolzene handelsübliche Sprengflüssigkeiten erhitzt wurden und die deutlich

* Dr.-Ing. MARIO ZIPPERMAYR, Kremsmünster (Oberösterreich).

¹ M. ZIPPERMAYR, *Explosivstoffe* 3 (1955) Heft 3/4.

² F. P. BOWDEN, M. F. R. MULCAHY, R. G. VINES und A. D. YOFFE, The Detonation of Liquid Explosives by Gentle Impact. The Effect of Minute Gas Spaces, *Proc. Roy. Soc. A* 188 (1947) 291, 311.

³ F. P. BOWDEN, M. A. STONE und G. K. TUDOR, Hot Spots on Rubbing Surfaces and the Detonation of Explosives by Friction, *Proc. Roy. Soc. A* 188 (1947) 329.

⁴ Zusammenfassung: F. P. BOWDEN und A. D. YOFFE, *The Initiation and Growth of Explosions in Liquids and Solids*, Cambridge Monographs on Physics (1952).

⁵ *Z. angew. Chem.* 41 (1928) 853.

sichtbar erkennen ließen, daß die flüssigen Sprengstoffe mitunter recht erhebliche Veränderungen erleiden, bis der explosive Zerfall eintritt. Die dabei gefundenen Zündtemperaturen lagen zwischen 160 und 330°C; sie ließen sich durch Variation des über der Sprengflüssigkeit herrschenden Druckes in begrenztem Ausmaße verändern, und zwar hatte steigender Druck ein Absinken der Zündtemperatur zur Folge.

Den gewichtigsten Grund für die Ausschließung eines thermischen Vorganges als Ursache des BOWDENschen Gasbläscheneffektes lieferte aber der folgende Versuch, bei welchem nach dem Thermitverfahren hergestelltes flüssiges Eisen in ein mit Dnbz-S-Lösung gefülltes Gefäß tropfte. Trotz der unmittelbaren, lokal eng begrenzten Einwirkung eines weit über die Zündtemperatur erhitzten Wärmeträgers erfolgte keine Detonation.

Die Vorstellungen der kinetischen Molekulartheorie legen nun den Gedanken nahe, daß ein geeigneter mechanischer Vorgang sich u. U. als wirkungsvoller erweisen könnte, als dies rein thermische Vorgänge vermögen. Das bei den in Glasröhren eingeschlossenen Sprengflüssigkeiten festgestellte Sinken der Zündtemperatur mit steigendem Innendruck deutet gemäß diesen Vorstellungen auf den Einfluß sich häufender molekularer Stoßvorgänge hin, und zwar im Sinne eines die Initiierung begünstigenden Umstandes. Zur Einleitung der Reaktion kommt es jedoch nur dann, wenn eine hinreichende Zahl von Stößen mit einer durch die Natur der Reaktion bedingten, genügend hohen kinetischen Energie ausgeübt wird.

In diesem Zusammenhange den Temperaturbegriff einzuführen, ist genau genommen nicht möglich, weil mit Rücksicht auf das Fehlen eines Ausgleiches innerhalb der nach Größe und Art verschiedenen molekularen Energien die grundlegende Voraussetzung für eine definierte und experimentell erfaßbare Temperatur fehlt.

Bei der Suche nach einem passenden und gut reproduzierbaren Verfahren zur Ausübung abstimmbarer mechanischer Impulse erwies sich der von W. BAUER⁶ (Das Widerstandsgesetz schnell bewegter Kugeln in Wasser) und C. RAMSAUER⁷ (Die Bewegungserscheinungen des Wassers beim Durchgang schnell bewegter Kugeln) sehr eingehend untersuchte Schuß von Stahlkugeln durch Wasser den gestellten Anforderungen als durchaus entsprechend.

Wie Abb. 1 zeigt, entsteht beim Eindringen einer rasch bewegten Stahlkugel in eine Flüssigkeit hinter der Kugel ein konischer Hohlraum. Infolge der Massenträgheit bleibt um Kugel und Hohlraum herum der Zusammenhang der Flüssigkeit fürs erste gewahrt. Erst in der weiteren Folge bewirken die der Flüssigkeit erteilten Beschleunigungen ein Zerreißen und Zersprühen der ausgehöhlten Flüssigkeitsmasse. Vor der Kugel, in ihrem Staubebereich, baut sich ein Kraftfeld mit definierter Druckverteilung auf, welches die Kugel mit Eigenge-

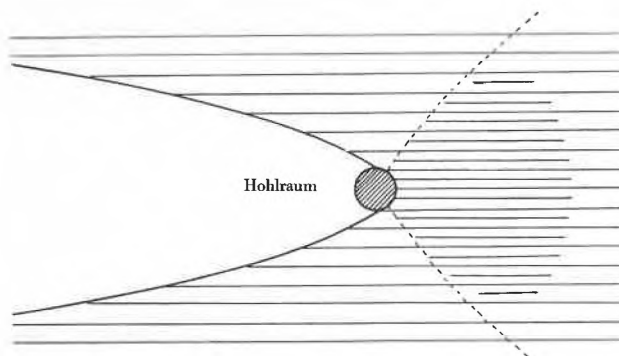


Abb. 1

schwindigkeit vor sich herschiebt. In Abb. 1 ist dieses Feld durch eine punktierte Linie und dichtere Schraffur angedeutet. Der höchste Druck herrscht knapp vor der Kugel in ihrem Staupunkte; von da sinkt in Schußrichtung der Druck mit zunehmendem Abstände von der Kugel.

Die bei den Versuchen angewendeten Kugelgeschwindigkeiten lagen zwischen 300 und 1100 m/s, was maximale Staudrucke zwischen 650 und 10 000 kg/cm² ergibt. Da der Kugelaufschlag auf eine Flüssigkeit – abgesehen von Sonderfällen – ein im allgemeinen stark gedämpfter Vorgang ist, so stellen sich die Drucke im Staubebereich ohne Druckschwankungen auf den Endwert ein. Der Druckanstieg beim Aufschlag der Kugel erfolgt also aperiodisch gedämpft. Auf ihrem Wege durch die Flüssigkeit strahlt die Kugel ununterbrochen energiereiche Schallwellen in die Flüssigkeit ab, welche wegen des hohen Schallgeschwindigkeitswertes in Flüssigkeiten (zwischen 1000 und 2000 m/s) im allgemeinen der Kugel vorausseilen. Der Geschwindigkeitsverlauf der Kugel beim Durchdringen einer Flüssigkeit läßt sich mittels der von W. BAUER⁸ aufgestellten Gesetzmäßigkeiten auch unter etwas abweichenden Bedingungen rechnerisch recht gut wiedergeben.

Zur Aufhellung des durch Gasbläschen ausgelösten Initiierungsmechanismus wurde der geschilderte ballistische Vorgang in folgender Weise angewandt.

Etwa $\frac{1}{2}$ bis $\frac{3}{4}$ l Dnbz-S-Lösung wie auch Nitroglycerin wurden in Säcke aus dünner Mipolamfolie gefüllt, 1 bis 2 cm hoch mit Paraffinöl überschichtet und mit Stahlkugeln von 4,4 mm Durchmesser beschossen, in deren Oberfläche gleichmäßig verteilt viele Vertiefungen eingearbeitet waren (siehe Abb. 2).

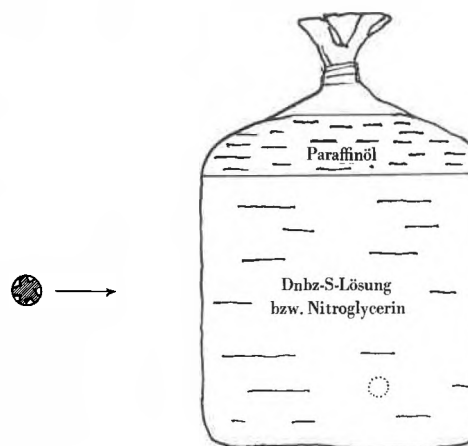


Abb. 2

⁶ Ann. Physik 80 (1926) 232.

⁷ Ann. Physik 84 (1927) 697.

⁸ Ann. Physik 80 (1926) 232.

Beim Aufschlag auf die Flüssigkeit wird die Luft in den von Flüssigkeit bedeckten Vertiefungen der Stahlkugel innerhalb von 1 bis 10 μ sec auf sehr hohe Drucke verdichtet. Trotzdem ergaben weder die gekörnten noch glatte Kugeln eine Initiierung.

Daraus muß gefolgert werden, daß unter den gegebenen Verhältnissen weder die entstehende Reibungswärme, noch die von der Kugel abgestrahlten energiereichen Schallwellen, noch etwaige sonstige Begleiterscheinungen eine Detonation auszulösen vermögen. Aber auch der im Staupunkt der Kugel zweifellos enorme und schlagartig einsetzende Druckanstieg, welchem Sprengflüssigkeit und Gasbläschen ausgesetzt sind, ist dazu nicht imstande. Eine im Zusammenhang mit einem anschließenden Drucksturz eventuell sich einstellende Wirkung kann sich nicht geltend machen, weil der flüssigkeitsbedingt hohe Staudruck erst beim Austritt der Kugel aus der Sprengflüssigkeit ziemlich rasch auf den viel niedrigeren Staudruck in Luft fällt. Außerhalb der Sprengflüssigkeit besteht jedoch keine Möglichkeit mehr, irgendwelche Impulse von der Kugel auf die Sprengflüssigkeit zu übertragen. Fixiert man aber seitlich der vorgesehenen Schußrichtung, etwa an der durch den punktierten Kreis in Abb. 2 angedeuteten Stelle, eine Gasblase innerhalb der Sprengflüssigkeit, so erfolgt in den meisten Fällen Initiierung, sicherlich deswegen, weil die in den Staubereich der Kugel gelangende und dabei komprimierte Luftblase nach dem Passieren der Kugel innerhalb des noch kompakten Teiles der Sprengflüssigkeitsmasse expandieren kann. Die gefundenen Ergebnisse führen zum zwingenden Schlusse, daß der Initiierungsvorgang sich nicht im Verlaufe der Kompressionsphase abspielt, sondern frühestens zu Beginn der Expansionsphase einsetzen kann, wahrscheinlich in dem Moment, in welchem geeignete Bedingungen für die Anregung einer die Reaktion auslösenden Schwingung oder Erschütterung herrschen.

Dies fügt sich auch folgerichtig der Tatsache ein, daß nur bei Vorliegen eines stark bzw. aperiodisch gedämpften Druckanstieges die Initiierung ausbleibt, weil im Falle eines ungedämpften oder nur schwach gedämpften Druckverlaufes sich am Ende Druckschwankungen einstellen, welche, nach dem Bisherigen zu schließen, bei hinlänglicher Stärke Initiierung zur Folge haben müssen.



Abb. 3

Weitere Klärung über die Natur des Gasbläschenmechanismus brachte eine Reihe von Versuchen, bei welchen, wie dies Abb. 3 zeigt, mit Dnbz-S-Lösung gefüllte Eisenrohre (die beiden Rohröffnungen waren durch aufgeklebte Mipolamfolien verschlossen) mit Stahlkugeln längs durchschossen wurden.

Die Einführung eines Eisenrohres als starre seitliche Begrenzung der Sprengflüssigkeit ermöglicht ein einfaches Fixieren der Gasblase, außerdem erhält man mit einer verhältnismäßig kleinen Menge Sprengflüssigkeit angenähert die Verhältnisse einer in seitlicher Richtung unendlich ausgedehnten Flüssigkeitsschicht. Eventuell störende Reflexionseffekte an der Rohrwand lassen sich durch Überziehen der Rohrwand mit dämpfendem Material weitgehend eliminieren.

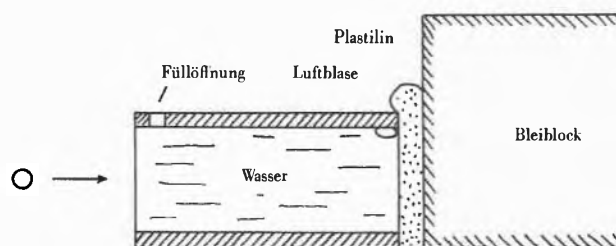


Abb. 4

Gasblasen im Innern oder im Bereiche des Ausschusses des Rohres führen regelmäßig Detonation herbei; nicht aber eine am Einschusse fixierte Blase, denn diese wird weggeschleudert, bevor sie in den komprimierenden Staubereich der ins Rohr eindringenden Kugel gelangt. Um bleibende Spuren des in der Nähe der Gasblase sich abspielenden Initiierungsvorganges zu erhalten, wurde in die diesmal mit Wasser beschickte Versuchsanordnung neben die Gasblase eine Plastilinscheibe eingesetzt (siehe Abb. 4). Der in Abb. 5 abgebildete Schnitt durch die Plastilinscheibe nach ihrem Beschuß zeigt in der Mitte den Schußkanal als Folge des Kugelschlages und oben, genau an der Stelle, wo sich die Gasblase befand, einen etwa halbkugelförmigen Krater. Dieser verdankt seine Entstehung folgendem Geschehen.

Der durch das Eindringen der Stahlkugel in das wassergefüllte Rohr erzeugte sehr hohe Staudruck komprimiert die Gasblase und beschleunigt dabei die Flüssigkeitsmasse, welche die



Abb. 5

Gasblase umgibt, so stark, daß es auf Grund eines Vorganges – ähnlich jenem beim hydraulischen Widder – zu zweifellos ungewöhnlich hohen Drucksteigerungen innerhalb der zusammengepreßten Gasblase kommt. Nach den Erfahrungen von F. P. BOWDEN findet dabei kein restloses Zusammenfallen der Blase statt, sondern es bleibt stets ein kleiner Hohlraum noch erhalten. Der im Verlauf der nun folgenden Expansion gebildete Krater im Plastilin beweist, daß von einem zentralen Punkte aus, der etwa am Ort des Mittelpunktes der Gasblase anzunehmen ist, radial nach allen Richtungen gerichtete, relativ große Kräfte wirksam waren, in ihrem Effekte analog dem einer explodierenden hochverdichteten Blase. Die Größe des gebildeten Kraterhohlraumes ist, verglichen mit den Dimensionen des Schußkanales, sehr bedeutend, ein deutliches Zeichen für die Größe der wirksam gewesen Energie.

Aus diesem Ergebnis resultiert, daß der durch Gasbläschen bedingte Initiierungseffekt mit dem Auftreten einer hohen lokalen Druckspitze und anschließendem steilem Druckfall verknüpft ist; eindeutige Vorbedingungen für die Anregung eines Schwingungs- oder Erschütterungsvorganges mit reaktionsauslösender Wirkung. Ob diese Wirkung sich nur auf die allernächste Umgebung beschränkt oder in größerer Entfernung noch

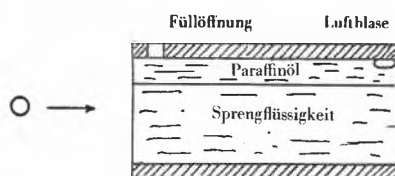


Abb. 6

auftritt, wurde auf einfache Weise durch Überschichten der Sprengflüssigkeit mit Paraffinöl eruiert (Abb. 6). Dabei zeigte sich, daß unter den gegebenen Bedingungen erst ein Paraffinölschichtenraum von rund 1 cm Dicke zwischen Blase und Oberfläche der Sprengflüssigkeit eine Detonation mit Sicherheit verhindert. Dies kann als weiterer Beweis für die rein mechanische Natur des Initiierungsvorganges gewertet werden, denn um die Sprengflüssigkeit vor der Einwirkung einer gefährlichen lokalen Temperaturerhöhung zu schützen, dazu würde eine wesentlich dünnere Schicht genügt haben.

II. Aufschlag-Initiierung

Die Bedeutung der Druckschwankung für das Einsetzen des Initiierungsmechanismus zeigt folgender Versuch:

Schießt man längs eines mit gasblasenfreiem Nitroglycerin gefüllten Eisenrohres hindurch (Abb. 7a), so er-

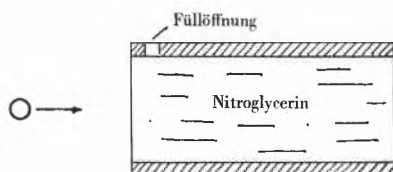


Abb. 7a

folgt in jedem Falle Initiierung. Sie bleibt aber aus, wenn man ein mit stark dämpfendem Material (teigiger, w-möglich mit Hohlräumen durchsetzter Belag) ausgeklei-

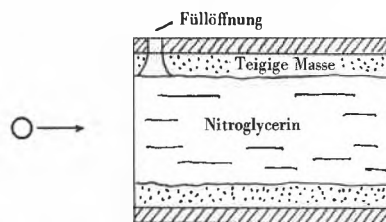


Abb. 7b

detes Rohr verwendet (Abb. 7b). Die von der Stahlkugel ausgehenden Schallwellenzüge werden im ersten Falle von den eisernen Rohrwandungen reflektiert und erzeugen vor der Kugel ein Feld mit örtlich verschieden hohen Verdichtungen, welche ein Schwanken der im Staubereich herrschenden Drucke bewirken. Bei dem empfindlichen Nitroglycerin genügen diese Druckschwankungen, um die Detonation herbeizuführen. Bei der weniger empfindlichen Dnbz-S-Lösung ist dies nicht der Fall, wohl aber kommt es dazu, wenn die Kugel innerhalb der von

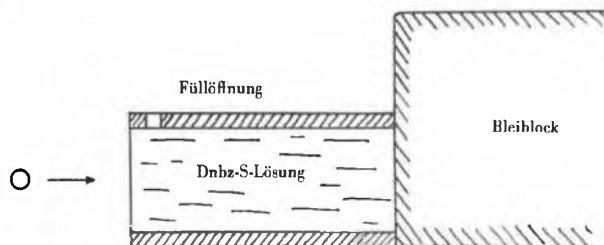


Abb. 8

einem Eisenrohr umschlossenen Dnbz-S-Lösung mit einer Geschwindigkeit von mindestens 250 bis 300 m/s innerhalb eines ausreichend langen Rohres auf eine feste Wand aufschlägt (Abb. 8).

Bei zu kurzen Rohren kann durch Verengen der Einschußöffnung (z. B. mittels eines aufgeschweißten Eisenringes), die Initiierungsfähigkeit der Anordnung wiederhergestellt werden. Da diese Maßnahme das Entstehen eines höheren Staudruckes beim Eindringen der Kugel in das Rohr bewirkt, so ist zu folgern, daß der mit dem Kugelaufschlag verknüpfte Initiierungsvorgang nur dann bis zum explosiven Zerfall führt, wenn im Moment des Aufschlages in der Umgebung der Aufschlagstelle ein hinreichend hoher Druck herrscht, denn erst die Erfüllung dieser Druckbedingung gewährleistet das Wirksamwerden eines zur Initiierung an sich befähigten Impulses.

Natürlich können auch durch Erhöhen der Kugelgeschwindigkeit die erforderlichen Druckverhältnisse am Ort des Aufschlages geschaffen werden, so daß sich also hier der Einfluß des Druckes in analoger Weise manifestiert, wie es bei der Zündung durch Erhitzen von in Glaskapillaren eingeschmolzenen Sprengflüssigkeiten der Fall war, wo steigender Druck ein Absinken der Zündtemperatur bewirkte. In beiden Fällen sind dem Aus-

maß des Druckeinflusses Grenzen gesetzt, denn es gibt eine untere Temperaturgrenze bzw. eine minimale Aufschlaggeschwindigkeit, unterhalb welcher auch durch eine sehr starke Erhöhung des Druckes eine Initiierung nicht mehr zu erzielen ist. Daß der mit dem Aufschlag verbundene Vorgang als ausschlaggebend für das Zustandekommen der Initiierung, der im Augenblick der Initiierung herrschende Druck aber lediglich als begünstigender Umstand zu werten ist, folgt aus der Tatsache, daß die Initiierung nicht eintritt, wenn zwischen Rohr und Rückwand ein Drahtnetz oder eine Plastilinscheibe eingeklemmt wird. Das Drahtnetz beeinträchtigt natürlich die Ausbildung des initiierenden Impulses, während im zweiten Falle der initiierende Vorgang in das nicht-explosible Plastilin verlegt wird, wobei die im Plastilin hinterlassenen Spuren recht deutlich Zeugnis über die Art des auslösenden Vorganges geben. Abb. 9 wie auch Abb. 5 zeigen einen Schnitt durch eine solche Plastilinscheibe, in deren Mitte der infolge abnehmender Kugelgeschwindigkeit sich verengende Schußkanal zu sehen ist. Er endet in einer auffällig erweiterten Ringnut, welche nichts anderes ist als der radial auseinandergeschleuderte Abdruck der Kugel kurz vor ihrem Aufschlage. Aus Gründen, die an anderer Stelle⁹ dargelegt sind, ist mit Sicherheit anzunehmen, daß die Expansion des Plastilins zur Ringnut noch vor dem Eindringen der Kugel in die Rückwand abgeschlossen ist, also mit großer Vehemenz erfolgt. Das ist aber nur möglich, wenn sich kurz vor dem Aufschlag eine sehr hohe lokale Druckspitze bildet, denn nur eine solche kann den Anstoß zu so rasanter Expansion geben.

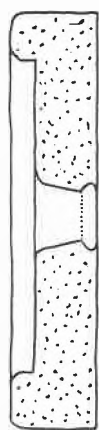


Abb. 9

⁹ M. ZIPPERMAYR, *Explosivstoffe* 3 (1955) 32–3.

III. Splitter-Initiierung

Eine nach den äußeren Umständen andersartige Initiierungsart ist beim Auftreffen von Splintern (z. B. von Sprengkapseln) auf die Oberfläche von Sprengflüssigkeiten zu beobachten. So lösen Sprengkapseln Nr. 8, etwa ½ m oberhalb eines mit Dnbz-S-Lösung gefüllten Schälchens gezündet, regelmäßige Detonation aus.

Es beruht dies nur auf der Wirkung der Splitter, denn der reine Detonationsstoß eines nur 10 cm entfernten Initialsprengstoffes bewirkte lediglich ein Wegschleudern der Sprengflüssigkeit und ein Plattdrücken des Schälchens, welches auf einer massiven Eisenunterlage stand. Der hart aufprallende Verdichtungsstoß bleibt deswegen ohne Wirkung, weil die Sprengflüssigkeit die Möglichkeit hat, auszuweichen, und zwar unter Vorgängen, die mit hoher Dämpfung behaftet sind.

Anders als bei der Bläschen- und Aufschlag-Initiierung spielt sich im Falle der Splitter-Initiierung der auslösende Vorgang nicht im Inneren der Sprengflüssigkeit ab, sondern an ihrer Oberfläche. Es genügt nämlich schon eine dünne Übersichtung mit Paraffinöl, um das Eintreten einer Detonation zu verhindern.

Die Beschränkung des Initiierungsablaufes auf den Oberflächenbereich kennzeichnet diese Initiierungsart als einen Sonderfall, denn schon die ersten Beschußversuche auf die in Mipolamsäcke gefüllten Sprengflüssigkeiten hatten ja ergeben, daß größere Geschosse selbst bei sehr hohen Aufschlaggeschwindigkeiten weder Dnbz-S-Lösung noch Nitroglycerin zur Detonation bringen können, sofern diese Sprengflüssigkeiten frei von Gasblasen waren. Um die Bedingungen zu erforschen, unter denen Kleingeschosse initiierungsfähig sind, wurden u. a. Stahl- und Aluminiumkugeln von 1 mm Durchmesser mit Hilfe einer einfachen Vorrichtung und unter Verwendung von Initialsprengstoffen¹⁰ auf die freie Oberfläche einer Dnbz-S-Lösung geschossen. Diese relativ wenig empfindliche Sprengflüssigkeit eignet sich besser als eine sehr empfindliche, um die hohe spezifische Wirksamkeit eines Impulses als Folge optimaler Versuchsbedingungen anzuzeigen. Während nun die Stahlkugeln sich bei allen angewandten Geschwindigkeiten als wirkungslos erwiesen, brachten die Aluminiumkugeln bei Aufschlaggeschwindigkeiten ab etwa 500 bis 600 m/s die Dnbz-S-Lösung regelmäßig zur Detonation, obwohl sie wegen ihrer geringen Masse die relativ geringste Energie für die Initiierung verfügbar hatten.

Man kann die Energie, welche beim Eindringen in die Oberfläche der Sprengflüssigkeit an diese abgegeben wird, mit Hilfe der von BAUER abgeleiteten mathematischen Beziehungen be-

Geschoßart	Aufschlaggeschwindigkeit in m/s	Geschwindigkeit nach dem Eindringen in die Oberfläche in m/s	Abgegebene Energie g cm	Ergebnis
4,4-mm-Stahlkugel	1100	1000	370 000	—
4,4-mm-Stahlkugel	600	540	120 000	—
1-mm-Stahlkugel	600	390	4 800	—
1-mm-Al-Kugel	500–600	140–170	1600–2 300	Detonation
Feine Glassplitter	—	—	—	—

rechnen¹⁰. Die wichtigsten Ergebnisse sind in der Tabelle auf S. 60 zusammengestellt.

Der auffällig kleine Energiebetrag, welchen das Aluminiumkugelchen zur Reaktionseinleitung benötigt, beweist, daß das Initiierungsproblem weniger eine Frage der Energie als vorwiegend eine Frage der Begleitumstände ist. In seiner Arbeit über den die Initiierung begünstigenden Effekt kleiner Gasblasen schreibt F. P. BOWDEN¹¹:

«Nur bei Anwesenheit von Bläschen ist es möglich, Detonationen mittels Stoßenergien von nur 370 bis 7000 g cm auszulösen.»

Nun liegt die in der Tabelle angegebene detonationsauslösende Energie für das Aluminiumkugelchen ebenfalls innerhalb dieser Größenordnung. Es ist daher anzunehmen, daß die Wirksamkeit von Bläschen und Aluminiumkugelchen, trotz der äußeren Unterschiede, auf einem in beiden Fällen wesensgleichen Vorgang beruht; d. h. daß auch beim Aufschlag des Aluminiumkugelchens kurzzeitig eine hohe lokal eng begrenzte Druckspitze erzeugt wird, welche den initiiierenden Schwingungs- bzw. Erschütterungsvorgang auslöst. Dies ist aber nur dann vorstellbar, wenn die kinetische Energie des Kugelchens und dessen Eindringwiderstand mit der Dichte und Zähigkeit, mit den elastischen und Oberflächeneigenschaften der Sprengflüssigkeit so aufeinander abgestimmt sind, daß der Aufschlag des Kugelchens oder des Splitters einer Sprengkapsel *als elastischer, nur wenig gedämpfter Stoßvorgang abläuft*, der dann als Ursprung einer Stoßwelle in der gestoßenen Sprengflüssigkeit notwendigerweise eine starke lokale Erschütterung hervorrufen muß. Welcher besonderen Art diese ist, läßt sich ohne entsprechende Messungen nicht mit Sicherheit sagen. Keinesfalls kann es sich um Schallwellen handeln, denn daß diese unwirksam sind, hat sich unter den Bedingungen der Beschußversuche als zusätzliches Ergebnis bereits herausgestellt (siehe auch BERGMANN¹²).

Wie bei den Stahlkugeln von 4,4 mm Durchmesser fanden sich auch bei den Stahlkugelchen von 1 mm Durchmesser die genannten Voraussetzungen für das Zustandekommen eines elastischen Stoßes deswegen nicht hinreichend erfüllt, weil Kleingeschoße von Kugelform im Vergleich zu solchen von z. B. Splitterform strömungstechnisch gesehen einen relativ kleinen Formwiderstand haben; also beim Eindringen in die Sprengflüssigkeit dann zu wenig abgebremst werden, wenn die Massendichte des Kugelmateriales zu groß ist. Der Geschwindigkeitsverlust (Aufschlaggeschwindigkeit minus Geschwindigkeit nach dem Eindringen in die Oberfläche, siehe Tabelle) errechnet sich daher für das Stahlkugelchen nur halb so groß wie für das Aluminiumkugelchen. Kleingeschoße aus Material hoher Massendichte wirken aber dann initiierend, wenn ihre Gestalt einen hohen

Formwiderstand besitzt. So zündeten z. B. die sperrigen Splitter einer Sprengkapsel mit aus Silber gezogener Hülse noch auf Entfernung von über 2 m, wenn passende Silbersplitter die Oberfläche der Sprengflüssigkeit trafen. Unter gleichen Bedingungen tun dies Sprengkapseln mit Aluminiumhülsen nur auf Entfernungen von 60 bis 70 cm, in Einzelfällen bis zu 1 m Abstand.

Bei sehr feinen Splittern aus spezifisch leichtem Material ist wegen der hohen Dämpfung keine Wirkung zu erwarten. Das bewiesen z. B. feine Glassplitter, welche durch detonierendes Nitroglycerin aus unmittelbarer Nähe auf die Dnbz-S-Lösung aufgeschleudert wurden.

Das Vorhandensein des an so viele Voraussetzungen geknüpften elastischen Stoßvorganges an der Oberfläche einer Flüssigkeit läßt sich auf sehr einfache Weise sinnlich wahrnehmbar machen. Es genügt, abwechselnd mit einer dünnen Eisenstange bzw. mit einer schlanken Holzgerte auf eine Wasseroberfläche zu schlagen. Während die Eisenstange beim Aufschlag verhältnismäßig nur wenig gebremst in das Wasser eindringt, hat man bei der Gerte das Gefühl, daß diese von der Wasseroberfläche abprallt. Dieser einfache Vorgang bietet die Möglichkeit, die gesuchte Charakteristik des initiierenden Stoßes mit seiner im Wasser angeregten Stoßwelle oszillographisch aufzunehmen und mit jenen Charakteristiken zu vergleichen, wie sie beim Aufschlag einer Eisenstange erhalten bzw. durch das auffitzende haardünne Ende einer fein auslaufenden Gerte verursacht werden.

Es ist auch unschwer möglich, mittels geeignet modifizierter Vorrichtungen abstimmbare Aufschläge unter verschiedenen Bedingungen auf Spreng- oder auf sonstige reaktionsbereite Flüssigkeiten vorzunehmen, um festzustellen, unter welchen Umständen sich Initiierung oder überhaupt die Einleitung einer chemischen Reaktion herbeiführen läßt. Es konnten aber solche Untersuchungen wegen Fehlens der nötigen instrumentellen Voraussetzungen leider nicht durchgeführt werden.

Folgerungen

Vergegenwärtigt man sich die Ergebnisse der Versuche, so können etwa folgende Überlegungen zu Gesichtspunkten über die Vorgänge im molekularen Bereiche führen:

In einer von einer Vielzahl frei beweglicher und zusammenhangsloser Einzelmoleküle erfüllten Sprengflüssigkeit wäre das festgestellte widerspruchsvoll erscheinende Verhalten gegenüber den aufschlagenden Kugelgeschossen und Splittern nicht zu erwarten. Denn da ein Impuls thermischer Art als Ursache der Initiierung ausscheidet, so müßte eine Reaktionseinleitung in erster Linie als Folge einer durch den Aufschlag bewirkten direkten Molekülanregung angesehen werden. Wiederstehen aber die Moleküle den hohen Kompressionsbeanspruchungen des Stahlkugelaufschlages – was ja die Versuche bestätigen –, so besteht kein plausibler Grund, daß ein Einzelmolekül der sicher geringeren Beanspruchung eines mit dem Aufschlage in Zusammenhang stehenden Expansionsvorganges nicht gewachsen sein sollte. Man dürfte den wahren Verhältnissen vielleicht näherkommen, wenn

¹⁰ *Explosivstoffe* 3 (1955) 35–6.

¹¹ *Proc. Roy. Soc. A*, 188 (1947) 291 ff. Tab. III.

¹² *Der Ultraschall* 1949, 612 ff.

man nicht einen direkten Angriff auf das Molekül, sondern eine Folge indirekter Wirkungen annimmt, wobei vorausgesetzt werde, daß die Moleküle der Sprengflüssigkeit durch gegenseitige Anziehungskräfte zu einem komplexen Gebilde zusammengekoppelt, innerhalb dieses Verbandes aber verschieblich sind. Ein solcher innerer Zusammenhang kann durch rein zusammenpressende Kräfte nicht gestört werden, eher ist es möglich, daß durch abrupt einsetzende Zug- oder auch Scherbeanspruchungen es stellenweise zu Rissen (Zerreißen) im Molekülverbände kommt, welche dann der Anlaß zu einer Reaktionseinleitung sein könnten. Die für diesen Vorgang nötigen sehr hohen Beschleunigungen, welche – wie der Splitter- und der Bowdensche Bläscheneffekt zeigen – nur kleinsten Flüssigkeitsmengen erteilt zu werden brauchen, haben eine kurzzeitig auftretende (gleichsam aufblitzende), lokal begrenzte Druckspitze mit anschließendem steilem Druckfall zur Voraussetzung; bei hinreichender Heftigkeit derartiger Kräfte kann der Trägheitswiderstand der erfaßten Molekülgruppen so bedeutend sein, daß er die Koppelungskräfte, anders ausgedrückt: die Zerreißfestigkeit des flüssigen Sprengstoffes, übersteigt.

Die besondere Bedeutung der Expansionsphase für die Einleitung einer explosiven Zerfallsreaktion läßt sich auch aus den von MURAOUR und BASSET¹³ gemachten Feststellungen ableiten, nach denen Sprengstoffe, welche unter einem Drucke von 10000 at und darüber stehen, nicht mehr zur Explosion zu bringen sind. Dies offenbar deswegen, weil unter so hohen Drucken der die explosive Reaktion einleitende Expansionsvorgang das zu seinem Wirksamwerden erforderliche Ausmaß nicht mehr erreichen kann. Die Tatsache, daß hiezu 10000 at nötig sind, wie andere Feststellungen erlauben mit einer gewissen Berechtigung die zwischen benachbarten Molekülen herrschenden Koppelungskräfte abzuschätzen. Sie dürften zwischen ungefähr hundert und einigen tausend Atmosphären betragen.

Das Vorhandensein starker Koppelungskräfte im Innern von Flüssigkeiten wurde bereits von DEBYE und seinen Mitarbeitern aus ihren Versuchen über die Streuung von monochromatischem Lichte an Flüssigkeiten gefolgert.

Arbeiten anderer Autoren

Ergänzend zu diesen Darlegungen sei noch kurz auf die Arbeiten anderer Autoren eingegangen, welche auf meine Untersuchungen Bezug nahmen.

In «The Ignition Mechanism of High Explosives» von C. H. JOHANSSON und HENRIK L. SELBERG¹⁴ sind Untersuchungen veröffentlicht, welche sich mit der Wärmeübertragung von durch Kompression erhitzter Luft auf glatte und rauhe Flächen, auf brennbare wie auch explosive Partikel und Dämpfe befassen.

Eine auf eine ebene Glasplatte aufgebrachte 0,4 μ dünne Silberschicht erwärmte sich z. B. auf 33°C, wenn die mittlere Temperatur des umgebenden Luftraumes auf 410°C gestiegen war. Daher blieb auch eine dünne, auf ebener Messingplatte glatt ausgebreitete Sprenggelatineschicht innerhalb des auf 400 bis 450°C erhitzten Luftraumes völlig unversehrt; sie verbrannte aber, wenn als Unterlage ein 0,01 mm dickes Glimmerblättchen verwendet wurde. Aus diesem und anderem Grunde halten die Autoren die Möglichkeit, daß kleine Gasblasen in Sprengflüssigkeit durch Wärmeabgabe zünden könnten, für nicht gegeben. Einen weiteren Beweis hierfür lieferten Versuche, bei welchen Proben von Gelatinedynamit und von Sprenggelatine innerhalb eines Stahlzylinders mittels eines 10 kg Fallgewichtes schlagartig einem Druck von 4000 bzw. 5000 at ausgesetzt wurden, ohne daß Explosion eintrat.

Diese Ergebnisse stimmen mit den bei meinen Versuchen gemachten Erfahrungen überein, und auch die folgenden bilden hiezu keinen Gegensatz.

Zündungen konnten immer dann im Kompressionsraume erhalten werden, wenn dieser entflammbare Dämpfe oder solche Partikel enthielt. Unter diesen Voraussetzungen genügten schon relativ geringe Verdichtungen, um Zündung und damit weitere Erhitzung des Gasinhaltes im Kompressionsraume herbeizuführen. In diesem Zusammenhange wird die Möglichkeit besprochen, daß bei dem BOWDENschen Bläscheneffekt verschiedene Dämpfe oder abgeschleuderte Tröpfchen oder Teilchen eine Rolle spielen könnten. In bestimmt gelagerten Fällen wird dies sicher zutreffen; es spricht auch F. P. BOWDEN in seinem mit A. D. YOFFE verfaßten Buche von «explosion initiated in the vapour phase»¹⁵. Man stößt aber auf Schwierigkeiten, wenn man versuchen wollte, damit die initiiierende Fernwirkung einer stoßkomprimierten Gasblase durch eine relativ dicke Paraffinölschicht hindurch zu erklären.

Eine interessante theoretische Betrachtung stellt HENRIK E. SELBERG in seiner Arbeit «Initiation of Nitroglycerine by Shock Waves» an¹⁶.

Ausgehend von den bekannten Vorstellungen über die Vorgänge in der Detonationswelle wird mit Hilfe der Grundgleichung der chemischen Kinetik und mit den nur angenähert bestimmbaren Zustandsgrößen des hochverdichteten Nitroglycerins versucht, jene Teilchengeschwindigkeit zu ermitteln, welche beim Nitroglycerin wahrscheinlich Initiierung nach sich ziehen müßte. Der Verfasser gelangte dabei zu Werten gegen 1300 m/s.

Die Tatsache, daß bei 1130 m/s Geschwindigkeit der aufschlagenden Stahlkugel noch keine Initiierung erfolgte, schließt keineswegs aus, daß Geschosse mit höheren Geschwindigkeiten (etwa von der Größenordnung der Schallgeschwindigkeit, wie sie der betreffenden Sprengflüssigkeit zukommt) initiiierend wirken können. Dieser Umstand läßt Versuche mit höheren Geschossgeschwindigkeiten als sehr wünschenswert erscheinen. Es könnten damit auch Aufschlüsse über die Größe der Geschwindigkeitskonstante bzw. über die interessierenden Zustandsgrößen möglicherweise gewonnen werden;

¹³ C. R. Acad. Sci. 208 (1939) 809.

¹⁴ Appl. Sci. Res. A 5 (1955) 439.

¹⁵ The Initiation and Growth of Explosions in Liquids and Solids, Cambridge Monographs of Physics (1952) S. 49.

¹⁶ Appl. Sci. Res. A. 5 (1955) 450.

zumindest aber wäre damit eine Kontrolle der bisherigen Erfahrungen ermöglicht.

Unter dem Titel «Über das Verhalten flüssiger Explosivstoffe gegen mechanische und thermische Beanspruchungen» stellt Dr. A. SCHMIDT, Freiburg im Breisgau, kritische Betrachtungen über meine Publikation an¹⁷. Da der Autor infolge ungenügenden Studiums der einschlägigen Literatur meine Ausführungen unrichtig interpretiert und überdies meine Schlußfolgerungen unzutreffend wiedergibt, erübrigt es sich, auf Einzelheiten einzugehen.

Zusammenfassung

Bei der Initiierung flüssiger Sprengstoffe sind Stoßvorgänge von ausschlaggebender Bedeutung. Die Versuche zeigten aber, daß nur Stöße elastischer Art Zerfallsreaktionen einzuleiten vermögen, wobei unter optimalen Bedingungen hiezu schon minimale Stoßenergien genügen. Der Druck, unter welchem die Sprengflüssigkeit im Augenblick der Initiierung steht, begünstigt in begrenztem Umfange den Eintritt der Detonation. Erfolgt der Stoß unter stark dämpfenden Umständen, also unelastisch, so bleiben selbst große Stoßenergien wirkungslos, weil in der unelastisch gestoßenen Sprengflüssigkeit initierende Erschütterungen nicht entstehen können.

Die «thermische Initiierung» kann im Hinblick auf diese Ergebnisse als ein mit hoher Dämpfung behafteter Anregungs-

vorgang angesehen werden. Es führt ja auch ein einmal gesetzter Temperatursprung stets zu einem Ausgleich mit der Umgebung, nicht aber zu einer periodischen Wechselwirkung in Form von Temperaturschwingungen. Eine solche Betrachtungsweise läßt auch die Tatsache verständlich erscheinen, daß die mit mechanischen Mitteln bewerkstelligten Molekülanregung viel wirkungsvoller ist als die thermische.

Das scheinbar so unterschiedliche und widerspruchsvolle Verhalten der flüssigen Sprengstoffe gegenüber den verschiedenen Beanspruchungen beruht zum größten Teile auf den nicht immer augenscheinlichen und vorauszusehenden Umständen, unter welchen ein erfolgter Stoß sich als elastisch erweisen kann.

Instruktive Demonstrationen für diese Folgerungen bilden die sichere Detonationsauslösung durch kleine stoßkomprimierte Gasbläschen bzw. durch ein winziges mit 500 bis 600 m/s aufgeschleudertes Aluminiumkügelchen, während die mit Geschwindigkeiten bis zu 1100 m/s aufschlagende Stahlkugel wie auch das in die Dnbz-S-Lösung tropfende flüssige Eisen nicht zu zünden vermögen.

Den Versuchen ist zu entnehmen, daß die Initiierung durch elastischen Stoß nicht im Zuge der Kompressionsphase erfolgt, sondern erst während der Expansionsphase einsetzt.

Abschließend wurde versucht, eine befriedigende Vorstellung über das Wesen des die explosive Reaktion einleitenden Vorganges zu gewinnen.

¹⁷ *Explosivstoffe* 5 (1957) Heft 9.