Sammlung Göschen

Die Explosivstoffe
Einführung in die Chemie der explosiven Vorgänge

Von

Dr. H. Brunswig

Mit 8 Abbildungen und 12 Tabellen

2 Xi
Dyr 1
p 302

Sammlung Göschen

Unser heutiges Wissen
in kurzen, klaren,
allgemeinverständlichen
Einzeldarstellungen

Jeder Band gebunden **1 Mark**

G. J. Göschen'sche Verlagshandlung
G. m. b. H. Berlin W 10 und Leipzig

Zweck und Ziel der „Sammlung Göschen" ist, in Einzeldarstellungen eine klare, leichtverständliche und übersichtliche Einführung in sämtliche Gebiete der Wissenschaft und Technik zu geben; in engem Rahmen, auf streng wissenschaftlicher Grundlage und unter Berücksichtigung des neuesten Standes der Forschung bearbeitet, soll jedes Bändchen zuverlässige Belehrung bieten. Jedes einzelne Gebiet ist in sich geschlossen dargestellt, aber dennoch stehen alle Bändchen in innerem Zusammenhange miteinander, so daß das Ganze, wenn es vollendet vorliegt, eine einheitliche, systematische Darstellung unseres gesamten Wissens bilden dürfte.

Ausführliche Verzeichnisse der bisher erschienenen Nummern umsonst und postfrei

Bibliothek zur Chemie und Chemischen Technologie

aus der Sammlung Göschen

Jeder Band gebunden 1 Mark

Geschichte der Chemie von Dr. Hugo Bauer, Privatdozent an der Technischen Hochschule Stuttgart. 2 Bände. Nr. 264 und 265.

Anorganische Chemie von Dr. Jos. Klein in Mannheim. Nr. 37.

Organische Chemie von Dr. Jos. Klein in Mannheim. Nr. 38.

Chemie der Kohlenstoffverbindungen von Dr. Hugo Bauer, Privatdozent an der Techn. Hochschule Stuttgart. 4 Bde. Nr. 191—194.

Analytische Chemie von Dr. Johannes Hoppe. 1. u. 2. Bd. Nr. 247 u. 248.

Maßanalyse von Dr. Otto Röhm in Darmstadt. Nr. 221.

Technisch-Chemische Analyse von Dr. G. Lunge, Professor an der Eidgenöss. Polytechn. Schule in Zürich. Mit 16 Abbildungen. Nr. 195.

Chemisch-technische Rechnungen von Chemiker H. Degener. Mit 4 Figuren. Nr. 701.

Stereochemie von Dr. E. Wedekind, Professor an der Universität Straßburg. Mit 42 Abbildungen. Nr. 201.

Allgemeine und physikalische Chemie von Dr. Hugo Kauffmann, Professor an der Technischen Hochschule in Stuttgart. 2 Bände. Mit 15 Figuren. Nr. 71 und 698.

Physikalisch-Chemische Rechenaufgaben von Prof. Dr. R. Abegg u. Prof. Dr. O. Sackur. Nr. 445.

Elektrochemie von Dr. Heinrich Danneel. I. Teil: Theoretische Elektrochemie u. ihre physikalisch-chemischen Grundlagen. Mit 16 Fig. Nr. 252.

— — II: Experimentelle Elektrochemie, Meßmethoden, Leitfähigkeit, Lösungen. Mit 26 Figuren. Nr. 253.

Stöchiometrische Aufgabensammlung von Dr. Wilh. Bahrdt, Prof. an der Oberrealschule in Berlin-Lichterfelde. Mit den Resultaten. Nr. 452.

Pharmazeutische Chemie von Professor Dr. E. Mannheim in Bonn. 4 Bände. Nr. 543, 544, 588 und 682.

Toxikologische Chemie von Professor Dr. E. Mannheim in Bonn. Mit 6 Abbildungen. Nr. 465.

Neuere Arzneimittel, ihre Zusammensetzung, Wirkung und Anwendung von Dr. med. C. Bachem, Professor der Pharmakologie an der Universität Bonn. Nr. 669.

Physiologische Chemie von Dr. med. A. Legahn in Berlin. 2 Bände. Mit 3 Tafeln. Nr. 240 und 241.

Agrikulturchemie I: Pflanzenernährung von Dr. Karl Grauer. Nr. 329.

Das agrikulturchemische Kontrollwesen von Dr. Paul Krische. Nr. 304.

Wenden!

Agrikulturchemische Untersuchungsmethoden von Professor Dr. Emil Haselhoff in Marburg. Nr. 470.

Allgemeine chemische Technologie von Gustav Rauter, Charlottenburg. Nr. 113.

Die Fette und Öle sowie die **Seifen- und Kerzenfabrikation** und die **Harze, Lacke, Firnisse** mit ihren wichtigsten Hilfsstoffen von Dr. Karl Braun. **I:** Einführung in die Chemie, Besprechung einiger Salze und die Fette und Öle. Nr. 335.

— — **II:** Die Seifenfabrikation, die Seifenanalyse u. die Kerzenfabrikation. Mit 25 Abbildungen. Nr. 336.

— — **III:** Harze, Lacke, Firnisse. Nr. 337.

Das Wasser und seine Verwendung in Industrie und Gewerbe von Dipl.-Ing. Dr. Ernst Leher. Mit 15 Abbildungen. Nr. 261.

Wasser und Abwässer. Ihre Zusammensetzung, Beurteilung und Untersuchung von Prof. Dr. Emil Haselhoff, Vorsteher der landwirtsch. Versuchsstation in Marburg in Hessen. Nr. 473.

Die Explosivstoffe. Einführung in die Chemie der explosiven Vorgänge von Dr. H. Brunswig in Steglitz-Berlin. Mit 16 Abbildungen. Nr. 333.

Zündwaren von Direktor Dr. Alfons Bujard, Vorstand des Städt. Chem. Laboratoriums in Stuttgart. Nr. 109.

Die Feuerwerkerei von Direktor Dr. Alfons Bujard, Vorstand des Städtischen Chem. Laboratoriums in Stuttgart. Mit 6 Figuren. Nr. 634.

Brauereiwesen von Dr. Paul Dreverhoff, Direktor der Brauer- und Mälzerschule in Grimma. **I:** Mälzerei. Mit 16 Abbild. Nr. 303.

— — **II:** Brauerei. Mit 35 Abbildungen. Nr. 724.

Ätherische Öle und Riechstoffe von Dr. F. Rochussen in Miltitz. Mit 9 Abbildungen. Nr. 446.

Anorganische chemische Industrie von Dr. Gustav Rauter in Charlottenburg. **I:** Die Leblancsodaindustrie und ihre Nebenzweige. Mit 12 Tafeln. Nr. 205.

— — **II:** Salinenwesen, Kalisalze, Düngerindustrie und Verwandtes. Mit 6 Tafeln. Nr. 206.

— — **III:** Anorganische chemische Industrie. Mit 6 Tafeln. Nr. 207.

Metallurgie von Dr. Aug. Geitz. 2 Bände. Mit 21 Figuren. Nr. 313, 314.

Die Industrie der Silikate, der künstlichen Bausteine und des Mörtels von Dr. Gustav Rauter. **I:** Glas- und keramische Industrie. Mit 12 Tafeln. Nr. 233.

— — **II:** Die Industrie der künstlichen Bausteine und des Mörtels. Mit 12 Tafeln. Nr. 234.

Die Teerfarbstoffe mit besonderer Berücksichtigung der synthetischen Methoden von Professor Dr. Hans Bucherer. Nr. 214.

Die Nebenprodukte der Leuchtgasfabrikation v. Diplom-Ingenieur Dr. phil. K. R. Lange. Mit 13 Figuren. Nr. 661.

Weitere Bände sind in Vorbereitung.

Sammlung Göschen

Die Explosivstoffe

Einführung in die Chemie der explosiven Vorgänge

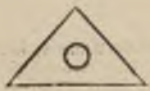
Von

Dr. H. Brunswig

3., verbesserte und vermehrte Auflage

Mit 8 Abbildungen und 12 Tabellen

Berlin und Leipzig
G. J. Göschen'sche Verlagshandlung G. m. b. H.
1918



Alle Rechte, namentlich das Übersetzungsrecht,
von der Verlagshandlung vorbehalten.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
BIBLIOTEKA GŁÓWNA
w Gliwicach

141 183

Monotype-Maschinensatz und Druck
Julius Brandstätter (G. Neumann), Leipzig, Querstr. 18

D323/14

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Literaturübersicht 5

Erster Abschnitt.

Begriffsbestimmung von einem explosiven Vorgange 7

Zweiter Abschnitt.

Bedingungen, an die explosive Vorgänge geknüpft sind 9
1. Exotherme Reaktion 10
2. Sensibilität der Explosivstoffe 15
3. Initialimpuls (Zündmittel) 23

Dritter Abschnitt.

Geschwindigkeit explosiver Vorgänge 31
1. Geschwindigkeit der Auslösung explosiver Vorgänge 33
2. Die Initialsprengstoffe 37
Knallquecksilber (S. 38). Bleiazid (S. 39).
3. Geschwindigkeit der Fortpflanzung explosiver Vorgänge 40
4. Die Explosionswelle 45

Vierter Abschnitt.

Der Explosionsdruck 47
1. Geschwindigkeit der Drucksteigerung 49
2. Die Treibmittel 55
Schwarzpulver (S. 56). Rauchloses Pulver (S. 58).
3. Die Sprengmittel 67
Nitroglyzerin (S. 68). Nitrozellulose (S. 70). Nitrierte aromatische Verbindungen (S. 75). Gurdynamit (S. 77). Sprenggelatine (S. 80). Gelatinedynamit (S. 81). Sprengpulver (S. 82). Chlorat- und Perchloratsprengstoffe (S. 82). Flüssige Luft-Sprengstoffe (S. 83).
4. Maximum des Explosionsdruckes 92

Fünfter Abschnitt.

Die Explosionstemperatur 99

Sechster Abschnitt.

Seite

Die Explosionsgase 105

1. Einfluß des Explosionsdruckes auf die Beschaffenheit der Explosionsgase 108
2. Einfluß der Explosionstemperatur auf die Beschaffenheit der Explosionsgase 110

Siebenter Abschnitt.

Die Explosionsflamme.

1. Bedeutung der Explosionsflamme 111
2. Die schlagwettersicheren Sprengstoffe 119

Ammonite (S. 120). Karbonite (S. 121). Wetterdynamite (S. 124).

Achter Abschnitt.

Der Explosionsstoß 124

1. Geschwindigkeit des Explosionsstoßes 127
2. Intensität des Explosionsstoßes 129

Neunter Abschnitt.

Die physikalische und chemische Beständigkeit der Explosivstoffe 136

Register 146

Literaturübersicht.

1. Geschichte.

Romocki, Geschichte der Explosivstoffe, 2 Bde. 1895—96, Hannover.
Guttmann, Monumenta pulveris pyrii, 1906, London.
Rise and progress of Brit. Explosives Industry, 1909, London.
Noble, Fifty years of explosives, 1907, London.
Kahlbaum-Schaer, Christian Friedrich Schönbein, 2 Bde. 1899—1901, Leipzig.
Hennig, Alfred Nobel, 1912, Stuttgart.
Macdonald, Historical papers on modern explosives, 1912, London.

2. Gesamtgebiet der Explosivstoffe.

Berthelot, Sur la force des matières explosives, 2 Bde. 1883, Paris.
Brunswig, Explosivstoffe, 1909, Leipzig.
Chalon, Les Explosifs modernes, 1911, Paris.
Gody, Traité des matières explosives, 1907, Namur.
Guttmann, Die Industrie der Explosivstoffe, 1895, Braunschweig.
Guttmann, Schieß- und Sprengmittel, 1900, Braunschweig.
Hake-Macnab, Explosives and their power, 1892, London.
Häußermann, Sprengstoffe und Zündwaren, 1894, Stuttgart.
Kast, Spreng- und Zündstoffe, 1908, Braunschweig.

3. Einzelne Explosivstoffe.

Upmann, Das Schießpulver, 1874, Braunschweig.
Escales, Schwarzpulver und Sprengsalpeter, 1914, Leipzig.
Escales, Die Nitrozellulose (Schießbaumwolle), 1905, Leipzig.
Escales, Nitroglyzerin und Dynamit, 1908, Leipzig.
Escales, Ammonsalpetersprengstoffe, 1909, Leipzig.
Förg, Ammonal, 1917, Wien.
Escales, Chloratsprengstoffe, 1910, Leipzig.
Escales, Nitrosprengstoffe, 1915, Leipzig.
Escales-Stettbacher, Initialsprengstoffe, 1917, Leipzig.
Voigt, Herstellung der Sprengstoffe, 2 Bde., 1913—1914, Halle.

Worden, Nitrocellulose Industry, 2 Bde., 1911, New York.
Heise, Sprengstoffe und Zündung der Sprengschüsse, 1904, Berlin.
Schmerber, Recherches sur l'emploi des explosifs, 1900, Paris.
Guttmann, Handbuch der Sprengarbeit, 1906, Braunschweig.
Sanford, Nitro-Explosives, 1906, London.
Buisson, Le problème des poudres, 1913, Paris.
Denker, Elektr. Zündung in Steinbrüchen, 1903, Berlin.
Haßlacher, Hauptbericht der Preußischen Schlagwetterkommission, 1887, Berlin.
Le Chatelier, Le Grisou, Paris.

4. Lexikalische Werke.

Cundill, Dictionary of explosives, 1895, London.
Daniel, Dictionnaire des matières explosives, 1902, Paris.

5. Zeitschriften, Jahrbücher.

Zeitschrift für das gesamte Schieß- und Sprengwesen, München.
Kriegstechnische Zeitschrift, Berlin.
Mitteilungen über Gegenst. des Art.- und Geniewesens, Wien.
Sprengstoffe, Waffen und Munition, Berlin-Lichterfelde.
Mémorial des Poudres et Salpêtres, Paris.
Arms and Explosives, London.
Marine-Rundschau, Berlin.
Annual Report of H. M. Inspectors of Explosives, London.
Zeitschrift für angewandte Chemie, Berlin.
Zeitschrift für physikalische Chemie, Leipzig.

6. Gesetzgebung, Vorschriften.

Die reichs- und landesrechtlichen Vorschriften über den Verkehr mit Sprengstoffen, 1901, Berlin.
Eisenbahnverkehrsordnung vom 1. April 1909, Berlin.
Die Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, 1899, Berlin.
Majendie, Guide Book to the Explosives Act, 1875, London.
Sprengvorschrift, 1910, Berlin.
Phillips, The handling of dangerous goods, 1901, London.

Erster Abschnitt.

Begriffsbestimmung von einem explosiven Vorgange.

Explosive Vorgänge greifen mehr und mehr in das tägliche Leben ein. Man denke nur an die wachsende Bedeutung der Explosionsmotoren im Automobilwesen! Als Triebkraft für die Maschinen unserer Kraftfahrzeuge dient in der Regel die Explosionswärme eines Gemisches aus fein zerstäubtem oder verdampftem Benzin und atmosphärischer Luft.

Ähnliche Vorgänge wie in der Explosionskammer einer Verbrennungsmaschine können sich überall dort abspielen, wo man mit leicht verdampfenden, brennbaren Flüssigkeiten zu tun hat. Wie oft berichten die Zeitungen über entsetzliche Explosionsunfälle infolge unvorsichtigen Umganges mit Spiritus, Petroleum oder auch Leuchtgas!

Eine besonders wichtige Gruppe von Explosionsvorgängen steht in Verbindung mit dem häufigen Vorkommen von Schlagwettern in Kohlengruben. Schon eine fahrlässig gehandhabte Davysche Sicherheitslampe kann zum Ausgangspunkte gewaltiger Explosionen werden, indem sie das aus Methan und Luft bestehende, in der Grube vorhandene Schlagwettergas zur Entflammung bringt, die ihrerseits Verheerungen an Gut und Leben im Gefolge hat.

Alle diese Beispiele erinnern an die Tatsache, daß Explosionsvorgänge recht wohl ohne die Mitwirkung von Sprengstoffen zustande kommen. Zwar gestatten es letztere auf bequemere und zuverlässigere Weise Explosionen ins Werk zu setzen, doch führen auch andersartige Hilfsmittel zum Ziele, die ebenso Berücksichtigung verdienen wie explosible Sub-

stanzen. Die Explosivstoffe sind demnach nur als Teilgebiet des hier behandelten Gegenstandes anzusehen, welcher umfassender sich mit der Chemie der explosiven Vorgänge überhaupt beschäftigt.

Explosionsvorgänge, wie solche von Sprengstoffen oder auch von explosiblen Gasmischungen herbeigeführt werden, sind stets verknüpft mit einer chemischen Umsetzung. Durch die hierbei sich bildende Wärme und andere Ursachen beschleunigt, schreitet die explosive Reaktion lebhaft fort und entwickelt gas- oder dampfförmige Produkte unter wachsendem Drucke. Wo eine Drucksteigerung ausbleibt, hat man es nicht mit Explosionsvorgängen im Sinne der vorliegenden Darstellung zu tun. So können gespannte Dämpfe, komprimierte Gase, gefrierendes Wasser explosionsähnliche Erscheinungen hervorrufen, wenn sie sich plötzlich ausdehnen. Eine bekannte Vorführung besteht darin, dicke eiserne Bomben, welche man in mit Wasser gefülltem Zustande einer starken Kälte aussetzt, durch die Ausdehnung des Wassers beim Gefrieren zu sprengen. Aber als Beispiel eines Explosionsvorganges kann dieses Experiment für die in Frage kommende Auffassung ebensowenig gelten, wie verwandte Erscheinungen, wenn etwa ein überangestrengter Dampfkessel oder eine im warmen Raume aufgestellte Flasche mit flüssiger Kohlensäure platzt. In allen derartigen Fällen ist, abgesehen von der fehlenden chemischen Umsetzung, die Bedingung einer in Betracht kommenden Drucksteigerung nicht erfüllt; denn es findet vielmehr ein Abfall von der ursprünglichen Druckhöhe im Augenblicke der Umwandlung statt.

Auch chemische Reaktionen können sehr raschen Verlauf nehmen, ohne darum das Bild eines Explosionsvorganges darzubieten, sofern sie nicht zugleich Explosionsprodukte von gasförmiger Beschaffenheit freimachen. Die Thermite, innige Mischungen von Metalloxyden, meist Eisenoxyd, mit fein-

verteiltem Aluminium, sind solche Systeme, die bei geeigneter Entzündung sich lebhaft und unter Entbindung von sehr viel Wärme umsetzen, aber nur feste oder flüssige, keine gasförmigen Reaktionsprodukte liefern. Gerade dieser Umstand, daß Gase nicht frei werden, ermöglicht die Verwendung der Thermite zu Schmelz- und Schweißoperationen, was nicht angängig wäre, wenn flüchtige Umsetzungsprodukte den Vorgang begleiteten.

Zweiter Abschnitt.

Bedingungen, an die explosive Vorgänge geknüpft sind.

Die Mannigfaltigkeit der Verwendungsgebiete, auf denen Explosionsvorgänge in Tätigkeit treten, läßt es verständlich erscheinen, daß auch die jeweiligen Bedingungen, unter denen Explosionsvorgänge zustande kommen, überaus wechselnde sein können. Hervorgehoben sei die Tatsache, daß in jedem Falle, der zu einer Explosion geführt hat, mindestens folgende drei Hauptbedingungen erfüllt gewesen sein müssen:

1. Der fragliche Vorgang entwickelte Wärme. Die zugrunde liegende chemische Reaktion war demnach von der Art, welche man als exotherme bezeichnet.

2. Die Umwandlung war auslösbar; das betreffende explosionsfähige System besaß also die Eigenschaft der Sensibilität.

3. Die Auslösung fand in der Richtung, die zu einer Explosion zu führen vermag, tatsächlich statt, was durch einen geeigneten Initialimpuls ermöglicht wurde.

Mit diesen drei Bedingungen, die noch eingehender zu behandeln sein werden, ist der explosive Vorgang notwendigerweise verknüpft, wenn auch nicht immer in gleichem Grade, da ja die Eigenschaften der explosiblen Systeme selbst verschiedene sind. Manche Substanzen, die bei ihrem explosiven Zer-

fall viel Wärme entwickeln, sind zugleich durch hohe Sensibilität ausgezeichnet und werden deswegen in erster Linie genannt, wenn man von explosiblen Stoffen spricht. Hierher gehören die Fulminate, wie Knallquecksilber, und die Halogenverbindungen des Stickstoffes, beispielsweise der Jodstickstoff, welcher schon bei der leichtesten Berührung verpufft; ferner manche Salpetersäureester, darunter das Nitroglyzerin, und noch viele andere Klassen von chemischen Verbindungen. Eine zweite Gruppe umfaßt chemische Präparate, die zwar ebenfalls stark exothermer Umsetzung fähig sind, aber einer ausgeprägten Sensibilität ermangeln und aus diesem Grunde besonders kräftige Initialimpulse erfordern, um explosiv zu zerfallen. Solche Substanzen hat man erklärlicherweise lange Zeit für nicht explosibel gehalten. Auch heute noch begegnet man dem Zweifel, ob Pikrinsäure, Kaliumchlorat, Ammonsalpeter für sich allein Sprengstoffe sind oder nicht.

Von den Bedingungen, an die explosive Vorgänge geknüpft sind, sei zunächst die einer exothermen Reaktion zur Besprechung herausgehoben.

1. Exotherme Reaktion.

Ein Gemenge von poröser Kohle mit flüssigem Sauerstoff ist explosibel, flüssige Kohlensäure dagegen nicht, obgleich beide Systeme einer gleichen Umwandlung, nämlich des Überganges in gasförmige Kohlensäure, fähig sind. Dies ungleiche Verhalten erklärt sich wesentlich aus dem Umstande, daß die einmal eingeleitete Reaktion im ersteren Falle infolge der gewaltigen Wärmeentwicklung sich selber beschleunigt und rasch fortpflanzt, im zweiten Falle hingegen sich selber durch Wärmebindung alsbald fast zum völligen Stillstande bringt. Der erstgenannte Vorgang ist ein exothermer, wärmeentwickelnder, der andere ein endothermer, wärmebindender. Dieses Beispiel erläutert die Tatsache, daß ein chemisches System, welches zu seiner

Umwandlung der ständigen Zufuhr äußerer Energie benötigt, keinen explosiven Charakter besitzt.

Für die hier in Frage kommende exotherme Zersetzung, als eine Hauptbedingung explosiver Vorgänge, ist es an sich gleichgültig, ob der Sprengstoff selbst ein endothermes oder ein exothermes Gebilde ist. Zyan, Azetylen, Schwefelstickstoff sind endotherme Substanzen, weil sie unter Wärmebindung entstanden sind. Daß ihre Wärmetönungen bei der explosiven Zersetzung ungewöhnlich hoch sind, kann nicht auffallen; denn auch die gelegentlich ihrer Bildung verschwundene Wärme kommt hierbei wieder zum Vorschein. Aber aus diesem Umstande darf nicht gefolgert werden, negative Bildungswärme sei eine wesentliche Bedingung der Explosionsfähigkeit, wie hin und wieder geschehen ist, indem man die Begriffe Explosionsfähigkeit und Sensibilität vertauschte oder sie als gleichbedeutend ansah. Nitroglyzerin, Nitrozellulose, Pikrinsäure sind zweifellos Explosivstoffe, ungeachtet ihrer positiven Bildungswärme.

Auf den nahen Zusammenhang der Explosionsvorgänge mit thermochemischen Verhältnissen hat besonders Berthelot hingewiesen. In seinem grundlegenden Werke „Sur la force des matières explosives d'après la thermochimie" finden sich die üblichen Methoden und Apparate zur Bestimmung der bei Explosionsvorgängen frei werdenden Wärmemengen ausführlich behandelt. Auch wird im einzelnen dargelegt, wie man ohne besonderen Versuch, lediglich auf dem Wege der Rechnung nach thermochemischen Grundsätzen, die Wärmetönung einer explosiven Reaktion ermitteln könne.

Zur experimentellen Ermittlung der Explosionswärme bedient man sich allgemein des Explosionskalorimeters. Die explosive Umwandlung wird in einer mit elektrischer Zündvorrichtung versehenen, stark gebauten, stählernen Bombe vorgenommen. Letztere befindet sich in einem Wassergefäß, dessen Temperatur mit Hilfe von Rührwerk und sehr empfindlichem Thermometer sowie einer guten Filzisolierung auf konstanter

Höhe gehalten wird. Was man beobachtet, ist die durch den Explosionsvorgang verursachte Temperatursteigerung des Wassers. Diese, mit dem „Wasserwert"[1]) des erwärmten Apparates multipliziert, ergibt die bei der Explosion frei gewordene Wärmemenge.

Von nur beschränkter Anwendungsfähigkeit gegenüber der experimentellen Ermittlung der Explosionswärme ist die Berechnung dieser Größe nach den Lehren der Thermochemie. Während jene in allen Fällen durchführbar ist, sofern es sich überhaupt um eine explosive Umsetzung handelt, kann diese nur dort einsetzen, wo die Produkte der explosiven Reaktion sowohl nach Menge wie Beschaffenheit genau bekannt sind. Bei vielen explosiven Reaktionen läßt sich indessen die Zusammensetzung der Explosionsprodukte, weil die im Augenblicke der Explosion herrschenden einflußreichen Bedingungen des Druckes, der Temperatur usw. unbekannt sind, nicht ohne weiteres angeben und demgemäß auch die Berechnung der Explosionswärme nicht durchführen. Wo sie aber möglich ist, nimmt die Rechnung folgenden Gang.

Nach den Lehren der Thermochemie ist die bei einer Änderung des chemischen Zustandes eines Systems frei gewordene Wärme Q gleich dem Überschuß der Bildungswärme des Endzustandes über die Bildungswärme des Anfangszustandes. Bezeichnet man daher mit Q_1, Q_2 die durch die Bildung der Körper aus ihren Elementen freigemachten Wärmemengen des Anfangs- und des Endzustandes, so gilt die Beziehung:

$$Q = Q_2 - Q_1.$$

Nitroglyzerin wandelt sich, wenn es explodiert, nach der Reaktionsgleichung um:

$$4\,[C_3H_5(ONO_2)_3] = 12CO_2 + 10H_2O\,(\text{Dampf}) + 6N_2 + O_2.$$

Setzt man für Nitroglyzerin und für seine Explosionsprodukte

[1]) Vgl. Sammlung Göschen, Allgemeine u. physikalische Chemie, Nr. 71.

die bezüglichen Bildungswärmen in Wärmeeinheiten (Kalorien) — sie sind für eine große Zahl explosionsfähiger Substanzen ermittelt worden — in die thermochemische Gleichung ein, dann ergibt sich:

$$Q = 428{,}5 - 98{,}9 = 329{,}6.$$

Diese Zahlen beziehen sich auf konstanten Druck. Wenn aber die Explosion unter konstantem Volum vor sich geht, wie dies in der Explosionsbombe der Fall ist, dann fällt die entwickelte Wärme etwas größer aus und beträgt 333,7 Kalorien. Wenn nun 1 Molekulargewicht Nitroglyzerin, entsprechend 227 g, eine Wärmemenge von 333,7 Kalorien frei macht, dann berechnet sich für 1 kg Nitroglyzerin dessen Explosionswärme zu 1470 Kalorien. Die im Explosionskalorimeter gefundene Wärmemenge ist tatsächlich höher, weil das bei der Explosion gebildete Wasser sich verflüssigt und demnach die Kondensationswärme des Dampfes mitgemessen wird. Rechnung und Befund stimmen aber in ihren Endergebnissen aufs beste überein.

Vergleicht man die sprengkräftigen Substanzen mit unseren gewöhnlichen Heizstoffen hinsichtlich ihres auf ähnliche Weise ermittelten, in Kalorien ausgedrückten Energieinhaltes, so gelangt man zu einem überraschenden Ergebnis. 1 kg Petroleum liefert bei seiner Verbrennung zu Kohlensäure und Wasser etwa 12000 Kalorien, Steinkohle bis zu 8000 und trockenes Holz immer noch 3500 bis 4000 Kalorien, Dynamit hingegen nur 1300 Kalorien. Man ist geneigt, den Energieinhalt der Explosivstoffe für ungewöhnlich groß zu halten, während doch einzig und allein die Möglichkeit, ihn innerhalb eines sehr kurzen Zeitraumes wirken zu lassen, den Sprengstoffen ihren besonderen technischen Wert verleiht. In Wahrheit sind die Explosivstoffe eine wenig ergiebige, recht kostspielige Energiequelle.

Daß übrigens beträchtliche Verschiedenheiten hinsichtlich ihres Energieinhalts unter den Explosivstoffen auftreten, lehrt ein Blick

auf die Tabelle 1. Zu den energiereichsten Explosivstoffen zählen das Nitroglyzerin (Sprenggelatine, Dynamit, Nitroglyzerinpulver) und der Nitromannit. In zweiter Linie folgen Schießwolle (Schießwollpulver), Pikrinsäure, Trinitrotoluol sowie einige Ammonsalpetersprengstoffe. Den Beschluß machen Schwarzpulver, Ammonsalpeter selbst und — was im ersten Augenblicke befremdend erscheint — Knallquecksilber. Das Knallquecksilber dient in der Tat nicht als Sprengmittel, sondern ist fast ausschließlich Zündmittel. In der Praxis stellt sich überhaupt das Wertverhältnis vielfach anders dar, als aus dem Energieinhalte der Explosivstoffe geschlossen werden könnte. Ein tieferes Eindringen in den Gegenstand lehrt, daß die Explosionswärme nur bei einander nahestehenden Explosivstoffen als Maß für ihre relative Wirksamkeit betrachtet werden darf, und zwar deswegen, weil alsdann auch die technische Ausnutzung annähernd die gleiche ist.

Tabelle 1.

Energieinhalt der wichtigsten Explosivstoffe.

Laufende Nr.	Bezeichnung	Explosionswärme Kal.[1])	Arbeit mkg	Wertverhältnis[2])
1	Sprenggelatine (7% Kollodiumwolle)	1640	700000	100
2	Nitroglyzerin	1580	670000	96
3	Nitromannit	1520	645000	92
4	Dynamit (75% Nitroglyzerin)	1290	550000	79
5	Nitroglyzerinpulver (40% Nitroglyzerin)	1290	550000	79
6	Schießwolle (13% Stickstoff)	1000	423000	60
7	Schießwollpulver	900	380000	54
8	Kollodiumwolle (11% Stickstoff)	800	338000	48
9	Ammonsalpetersprengstoff (Ammonsalpeter mit 10% Nitronaphthalin)	930	385000	58
10	Pikrinsäure	810	345000	49
11	Trinitrotoluol	730	312000	44
12	Schwarzpulver	685	290000	41
13	Ammonsalpeter	630	265000	38
14	Knallquecksilber	400	170000	24

[1]) Bezogen auf 1 kg Explosivstoff, konstantes Volum und flüssiges Wasser.
[2]) Sprenggelatine gleich 100 gesetzt.

2. Sensibilität der Explosivstoffe.

Einem System, dem Explosionsfähigkeit erfahrungsmäßig innewohnt, kommt auch die Eigenschaft der Sensibilität zu. Verschieden ist nur der Grad von Sensibilität, welchen die einzelnen Explosivstoffe aufweisen. Ein explosibles System bezeichnet man als um so sensibler, je weniger Energie aufgewendet werden muß, um die explosive Reaktion auszulösen. Es könnte hiernach die Anschauung Platz greifen, ein möglichst hoher Grad von Sensibilität sei erwünscht, um den Widerstand, welcher sich jeder Auslösung entgegensetzt, mit einem Minimum von Energie zu überwinden. In dieser Hinsicht treten aber praktische Rücksichten in den Vordergrund, welche der zulässigen Sensibilität von Explosivstoffen eine Grenze sowohl nach der Seite leichter Auslösbarkeit wie nach der anderen hoher Unempfindlichkeit ziehen. Allzu sensible Substanzen (Diazoverbindungen, Halogenverbindungen des Stickstoffes usw.) erschweren die Handhabung. Die Gefahr einer unbeabsichtigten Explosion ist bei derartigen Substanzen so groß, daß sie aus diesem Grunde keine technische Anwendung finden. Aber auch ein zu geringer Grad von Sensibilität, wie ihn feucht gewordene Explosivstoffe anzunehmen pflegen, erweist sich als nachteilig für die Auswertung der Sprengstoffenergie, da alsdann auch die stärksten zur Verfügung stehenden Initialimpulse die gewünschte Umsetzung nicht auszulösen vermögen.

Die großen Verschiedenheiten, welche unter den explosionsfähigen Substanzen in bezug auf Sensibilität beobachtet werden, führt man teils auf chemische, teils auf physikalische Ursachen zurück.

Gewisse Atomgruppen erscheinen vorzugsweise befähigt zu explosivem Zerfall. Man verbindet diese Eigenart mit der Vorstellung von einem lockeren Bau des Moleküls, namentlich in solchen Fällen, wo schon ein geringer Impuls zur Auslösung der explosiven Reaktion hinreicht. Nach van't Hoff sind folgende Atom-

bindungen durch besonders leichte Lösbarkeit ausgezeichnet:

O — O im Ozon, in den Superoxyden usw., z. B.
$C_2H_2O \cdot O - O \cdot C_2H_2O$ Azetylsuperoxyd;
O — Cl in den Chloraten, Perchloraten usw., z. B.
$CH_3 \cdot O - Cl$ Unterchlorigsäuremethylester;
N — Cl im Chlorstickstoff NCl_3 als Vertreter der Halogenstickstoffverbindungen;
N = O in den anorganischen und organischen Nitraten, in den Nitrokörpern usw., z. B.
$C_2H_5 \cdot O \cdot N = O$ Salpetrigsäureäthylester;
N = N in den Diazoverbindungen, in den Aziden usw., z. B.
$C_6H_5 \cdot N = N \cdot O \cdot NO_2$ Diazobenzolnitrat;
N = C in den Fulminaten, z. B. $Ag \cdot O \cdot N = C$ Silberfulminat;
N ≡ C im Zyan C_2N_2;
C ≡ C im Azetylen C_2H_2, in den Polyazetylenen.

Wenn dem in lockerer Bindung befindlichen Sauerstoffatom Kohlenstoff oder Wasserstoff angeboten wird, wie dies für die organischen Nitrate (Nitroglyzerin, Nitrozellulose) zutrifft, dann erfolgt die Loslösung leicht, weil unter hoher Wärmeentwicklung, indem die hierbei auftretenden Oxydationsprodukte, Kohlensäure und Wasser, hinsichtlich der Höhe der Wärmeentbindung obenan stehen. Endotherme Verbindungen, die bei der Explosion nicht selten größere Wärme entwickeln als exotherme, sind auch als besonders sensibel bekannt. Die endothermen Verbindungen des Stickstoffes mit den Halogenen Chlor, Brom und Jod genießen den Ruf, zu den sensibelsten Substanzen zu gehören.

Sensibilität einerseits und chemische Konstitution des Explosivstoffes wie auch Wärmetönung der explosiven Reaktion sind hiernach offenbar miteinander verknüpft. Wenn dennoch die vorhandenen gesetzmäßigen Beziehungen nicht klar zutage treten, so liegt dies an dem schwierig zu verfolgenden Einflusse, welchen die physikalische Beschaffenheit der explosiven Systeme, ihr Aggregatzustand, ihre Zähigkeit, Kristallgröße, Dichte, ihr Härtegrad auf die Sensibilität ausüben.

Die Sensibilität explosibler Mischungen steht ferner in keinem erkennbaren Verhältnis zu derjenigen ihrer Bestandteile. Auch in bezug auf solche Gemenge, deren Komponenten zum Teil an sich nicht explosibel sind, wie z. B. Kaliumchlorat mit Schwefelzusatz, gilt ähnliches. Von der Erfahrung, daß harte, mit scharfen Kanten versehene Beimischungen, wie Glaspulver, Sand, die Sensibilität gegenüber Stoß und Reibung sehr erhöhen, macht die Technik in der Industrie der Zündmittel mannigfaltigen Gebrauch. Andrerseits vermindern Zusätze die Sensibilität, wenn sie die Materie des Explosivstoffes einhüllen oder ihr das Ausweichen erleichtern. Nach dieser Richtung hin haben Wasser, Kampfer, fette Öle als Zumischstoffe Anwendung in der Sprengtechnik gefunden. Ein höherer Gehalt an Wasser oder Alkohol (30 % und darüber) vermag der Nitrozellulose wie auch dem Nitroglyzerin die Explosionsfähigkeit zu entziehen.

Fig. 1 zeigt den Rückstand von feuchter, gepreßter Schießwolle, nachdem diese, in einer starken Holzkiste verpackt, 1 Stunde lang lebhaftem Holzfeuer ausgesetzt worden war. Auf dem verkohlten Holz befindet sich noch immer ein Block unversehrter feuchter Schießwolle.

Die Schwierigkeit, den Grad der Sensibilität zahlenmäßig zum Ausdruck zu bringen, ist noch nicht überwunden, und daraus erklärt es sich, daß nur für die wenigsten Explosivstoffe Angaben hinsichtlich ihrer Sensibilität unter abweichenden äußeren Bedingungen, insbesondere bei verschiedenen Temperaturen, vorliegen. Die üblichen Methoden zur Ermittlung der Sensibilität von Explosivstoffen beschränken sich im allgemeinen darauf, qualitative Unterschiede zu erkennen.

Bei diesen Prüfungen handelt es sich im wesentlichen um folgende Feststellungen:

1. Schlagprobe. 0,1 g der zu prüfenden Substanz wird in dünne Zinnfolie eingeschlagen und auf eine Unterlage von Messing, Eisen oder anderem Material gelegt. Man setzt hierauf einen Eisenmeißel oder Messingstab von verschieden breiter Schlagfläche auf die Sprengstoffprobe und führt mit einem Hammer von bestimmtem

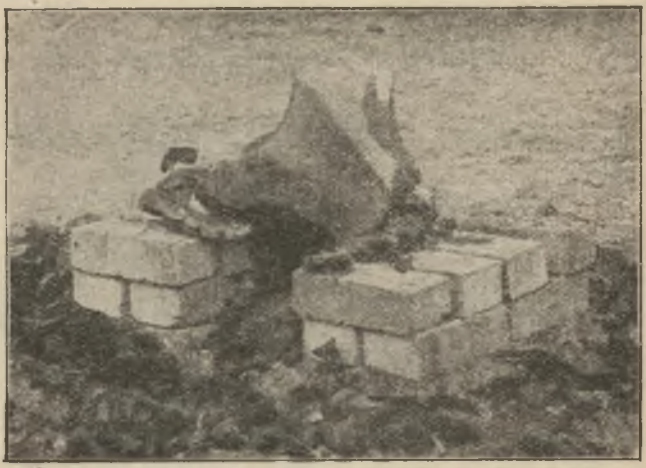


Fig. 1. Feuchte Schießwolle, 1 Stunde im Feuer gelegen.

Gewicht mehrere feste Schläge aus. Diese Art der Prüfung auf Sensibilität gegen Schlag kann etwas zuverlässiger gestaltet werden durch Benutzung einer aus Fallgewicht und Amboß zusammengesetzten Meßvorrichtung.

2. Reibungsprobe. 0,1 g der zu prüfenden Substanz wird in einem rauhen Porzellanmörser heftig gerieben. Erwärmt man die Reibschale oder fügt man dem Explosivstoffe scharfen Sand, grobes Glaspulver und dergleichen hinzu, so wird diese Prüfung verschärft. Man kann auch in der Art verfahren, daß man die explosible Substanz zwischen zwei mit Schmirgelleinen überzogene Holzklötze bringt und diese gegeneinander reibt.

3. Beschußprobe. Die zu prüfende Substanz wird mit einem Gewehr auf kurze Entfernung beschossen, wobei die Dicke der durchschossenen Schicht, die Geschwindigkeit des Geschosses und andere Bedingungen vermannigfaltigt werden können.

4. Entzündungsprobe. 2,5 g der zu prüfenden Substanz werden in einer Eisenschale auf dem Ölbade allmählich erhitzt, worauf man sie mit Hilfe einer Flamme entzündet. Man beobachtet, ob die Verbrennung ruhig verläuft, oder ob sie von Verpuffung,

Explosion begleitet ist. Gemäß einer anderen Ausführungsweise wird 1 g der zu prüfenden Substanz auf ein rotglühendes Eisenblech geworfen. Man kann auch derart verfahren, daß man 3 g der zu prüfenden Substanz in ein Reagensglas einfüllt und eine Pulverzündschnur einlegt, deren Stichflamme beim Abbrennen die Substanz trifft.

5. Verhalten gegen eine Knallquecksilbersprengkapsel. Eine Hülse aus Zinnfolie wird mit der zu prüfenden Substanz gefüllt, in die Mitte derselben eine Knallquecksilbersprengkapsel eingeführt und diese gezündet. Je nach der Stärke der zur Auslösung der Explosion erforderlichen Sprengkapsel beurteilt man den Empfindlichkeitsgrad des Explosivstoffes. Anstatt den Explosivstoff freiliegend zu prüfen, kann man ihn in einen Bleizylinder oder ein Eisenrohr einschließen. Unter diesen Umständen zeigen sich Substanzen noch als explosibel, die an freier Luft keine explosive Zersetzung erfahren.

Tabelle 2 zeigt die Verschiedenheit der Sensibilität von explosiblen Substanzen so, wie sie sich gegenüber der obenerwähnten Fallhammerprobe darstellt.

Welche Bedeutung der Frage nach der Sensibilität explosibler Substanzen beigelegt wird, erkennt man aus den zur Sicherung des Verkehrs mit Explosivstoffen getroffenen Maßregeln. Jene Frage beeinflußt nicht allein die wirtschaftliche Entwicklung der Sprengtechnik, sie greift auch in das Interesse der Allgemeinheit ein. Explosivstoffe, deren Transport wegen ihrer allzu großen Sensibilität mit besonders großer Gefahr verbunden wäre, sind von jeglichem Verkehre ausgeschlossen.

Als nicht transportfähige Explosivstoffe bezeichnet die preußische Polizeiverordnung betreffend den Verkehr mit Sprengstoffen vom 1. Oktober 1905 die folgenden:

1. Nitroglyzerin als solches und in Lösungen;
2. Knallgold, trocken in fester oder pulveriger Form, Knallquecksilber, Knallsilber und die damit dargestellten Präparate;
3. Nitrozuckerarten, Nitrostärkearten und die damit hergestellten Gemische;
4. Gemische, welche Nitroglyzerin abtropfen lassen;
5. Sprengstoffe,

Tabelle 2. Sensibilität von explosiblen Substanzen gegenüber der Fallhammerprobe.

Lfde. Nr.	Bezeichnung der explosiblen Substanz	Zusammensetzung der explosiblen Substanz	Fallhöhen in cm, bei denen Explosion erfolgte[1]) Gewicht des Fallbärs in kg: 0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	5,0	20,0
1	Jodstickstoff	NJ_3	unter 5						
2	Knallquecksilber	$Hg(CNO)_2$	5—10	unter 5					
3	Nitroglyzerin	$C_3H_5(NO_3)_3$	5—10	unter 5					
4	Gurdynamit	75% Nitroglyzerin 25% Kieselgur	5—10	unter 5					
5	Gelatinedynamit	65,5% Nitroglyzerin 1,5% Nitrozellulose 27,0% Natronsalpeter 8,0% Holzmehl	5—10	unter 5					
6	Dinitroglyzerin	$C_3H_5(NO_3)_2OH$	10—15	5—10	unter 5				
7	Gemenge von Kaliumchlorat mit Schwefel	$KClO_3 + S$	15—20	10—15	5—10	unter 5			
8	Nitrozellulose (trocken)	$C_{24}H_{29}O_{12}N_{11}$	30—40	15—20	5—10	5—10	5—10	unter 5	
9	Blättchenpulver	Gelatinierte Nitrozellulose	40—50	20—30	10—15	10—15	10—15	5—10	unter 5
10	Nitrozellulose (feucht, mit 15% Wasser)		über 200	70—80	15—20	10—15	10—15	5—10	unter 5
11	Schwarzpulver	75% Kalisalpeter 10% Schwefel 15% Kohle		über 200	190—200	100—110	30—40	5—10	unter 5
12	Pikrinsäure (lose)	$C_6H_2(NO_2)_3OH$			über 200	190—200	100—110	50—60	unter 5
13	„ (gepreßt)					über 200	140—150	80—90	unter 5
14	Trinitrotoluol (gepreßt)	$C_6H_3(NO_2)_3$				über 200	150—160	80—90	unter 5
15	Ammonsalpeter	$NH_4 \cdot NO_3$							üb. 200[2])
16	Ammonsalpetersprengstoff	95,5% Ammonsalpeter, 4,5% Trinitronaphthalin				über 200	140—150	70—80	unter 5

[1]) Der benutzte Fallapparat gestattete, Fallhöhen zwischen 5 und 200 cm in Anwendung zu bringen.
[2]) Ammonsalpeter detonierte durch Schlag allein überhaupt nicht.

a) welche bei einer Temperatur bis zu + 40° C zur Zersetzung neigen;
b) welche enthalten:
aa) pikrinsaure Salze,
bb) Phosphor (mit Ausnahme der Zündblättchen),
cc) Schwefelkupfer;

6. Sprengstoffe in Patronenhüllen, sofern diese äußerlich mit Nitroglyzerin oder mit anderer Sprengflüssigkeit benetzt oder äußerlich mit festen Sprengstoffen behaftet sind;
7. Sprengpräparate, bei welchen die einzelnen an und für sich nicht sprengkräftigen Bestandteile in einem geschlossenen Behälter durch leicht brechbare Scheidewände oder Hahnvorrichtungen so lange getrennt gehalten werden, bis die Explosion, durch Zertrümmerung, Verschiebung der Scheidewände oder Öffnen der Hahnvorrichtungen veranlaßt, stattfinden soll.

Das Bedürfnis, den Verkehr mit Explosivstoffen nach bestimmten Grundsätzen zu regeln, um nicht nur den Handel zu erleichtern, sondern auch ein ausreichendes Maß von Sicherheit zu verbürgen, ist in allen Ländern hervorgetreten. Großbritannien ist auf diesem Gebiete vorbildlich gewesen durch den Erlaß der Explosives Act vom Jahre 1875. Frankreich, Belgien, Preußen gelangten bald danach zu ähnlichen gesetzgeberischen Maßnahmen. Als zweckmäßig hat sich die Abstufung der verschiedenen Explosivstoffe nach größeren Gruppen oder kleineren Klassen erwiesen, je nach dem Grade von Gefährdung für die Umgebung durch die mit dem Transporte, Verladen, Abladen verknüpften Handhabungen bei einem etwaigen Unfalle.

In Frankreich geschieht dies nach folgenden Gesichtspunkten. In einer ersten, mehrere Klassen zusammenfassenden Gruppe (Schwarzpulver, Dynamit) wird die relativ leicht eintretende Explosionsgefahr mit ihren bis in größere Entfernungen reichenden Folgen in den Vordergrund gestellt. Einer zweiten Gruppe werden Substanzen zugeteilt, welche, wie beispielsweise Pikrinsäure, an sich nicht leicht explodieren, aber infolge ihrer säureartigen Natur leicht sehr sensible chemische Verbindungen eingehen und auf diese Weise einen Initialimpuls für die an sich wenig gefährliche Hauptmasse

des Sprengstoffes schaffen. Die Explosivstoffe der weiter folgenden Gruppen können im allgemeinen nur durch einen Brand ihre Umgebung in Mitleidenschaft ziehen; heftige Stöße oder Entzündung durch Flamme, glühende Körper, werden nicht oder nur unter ganz ungewöhnlichen Umständen zu einer allgemeinen Detonation Anlaß geben. Hierher gehören die Ammoniaksalpetersprengstoffe sowie viele Nitroprodukte der chemischen Großindustrie, die zum Teil in der Färberei ihre Hauptverwendung gefunden haben. Einer besonders sicheren Gruppe kann man schließlich die Munition, Gewehrpatronen, Zündhütchen zuzählen, da diese infolge ihrer weitgehenden Zerteilung in kleine Quantitäten und Isolierung durch die metallenen Hülsen verhältnismäßig große Transportsicherheit bieten.

Ähnliche Erwägungen liegen den Vorschriften der deutschen Eisenbahnverkehrsordnung vom 1. April 1909, Anlage C, über die Zulässigkeit eines Sprengstoffes zum Transport zugrunde.

Daß die Art der Verpackung eine sehr wichtige Rolle hierbei spielt, in dem Maße, daß sogar hochsensible Explosivstoffe durch eine besonders geeignete Verpackung beförderungsfähig werden, sei an einem bekannten Knallpräparat erläutert. Unter dem Namen Amorces kommt eine aus Kaliumchlorat und Phosphor bestehende, zwischen Papierblättchen gelagerte sehr stoß- und reibungsempfindliche Masse in den Handel. Hinsichtlich des Versandes dieser Zündblättchen bestimmt die obengenannte Eisenbahnverkehrsordnung:

1. Dieselben sind zu höchstens je 100 Zündpillen — die im ganzen nicht mehr als 0,75 g Zündmasse enthalten dürfen — in Pappschachteln zu verpacken. Höchstens je 12 Schachteln sind zu einer Rolle zu vereinigen und höchstens je 12 Rollen zu einem festen Pakete mit Papierumschlag zu verbinden.

2. Die Pakete sind in starke, im Innern mit zähem Papier ausgekleidete Holzkisten so fest zu verpacken, daß sie sich nicht bewegen können; leer bleibende Hohlräume müssen mit trockenen Verpackungsstoffen fest verstopft werden. Das Rohgewicht einer Kiste darf höchstens 100 kg, das Gesamtgewicht des Zündsatzes höchstens 20 kg betragen.

3. Initialimpuls (Zündmittel).

Initialzündung oder allgemeiner Initialimpuls nennt man die Anregung, welche ein sensibles, einer exothermen Umwandlung fähiges System nötig hat, um explosiv zu zerfallen. Indem zunächst der Widerstand, welcher dem freiwilligen Eintritt der explosiven Reaktion entgegenwirkt, überwunden werden muß, leistet der Initialimpuls eine für den Explosionsvorgang wesentliche, obschon nur vorbereitende Arbeit. Bekanntlich nennt man eine solche vorbereitende Leistung, die in keinem bestimmten Verhältnis zu dem Betrage der umgewandelten Energie zu stehen braucht und zuweilen selbst verschwindend klein ist, eine Auslösung. Im allgemeinen kann jede beliebige Art von Energie für diesen Zweck in Betracht kommen, sowohl die mannigfaltigen Formen der mechanischen (Stoß, Druck, Reibung usw.), wie die der strahlenden Energie (Wärme, Licht, insbesondere ultraviolettes, Elektrizität usw.) oder auch chemische Energie. Die Auswahl unter diesen verschiedenen Arten der Energie in zweckmäßiger Weise zu treffen, ist eine Hauptaufgabe von Technik und Laboratorium.

Eine gegenseitige Vertretbarkeit der Energien, wie sie sonst nachweisbar ist, scheint in bezug auf Auslösungsvermögen gegenüber explosiblen Substanzen nicht zu bestehen, und es ist daher keineswegs gleichgültig, mit welchen Hilfsmitteln man zur Initiierung eines gegebenen Explosivstoffes schreitet. Manche Umsetzungen werden schon durch einen leichten Schlag explosiv ausgelöst, aber nicht durch eine entsprechende Wärmezufuhr. So ist Schießwolle gegen Stoß empfindlicher als Benzoylsuperoxyd; erwärmt man aber beide Substanzen nebeneinander auf gleiche Weise, dann explodiert das Superoxyd früher als das Zellulosenitrat. Auf andere explosible Systeme wirken selbst heftige mechanische Impulse kaum merklich ein, während schon eine kurze Bestrahlung mit chemisch wirksamem Lichte zur Explosion führt.

Mit der Kenntnis des Verhaltens sensibler Stoffe gegenüber den einzelnen Initialimpulsen ist indessen die Frage nach der zweckmäßigsten Form der Auslösung der Sprengkraft noch nicht erledigt. Denn Beschaffenheit und Intensität eines Initialimpulses beeinflussen nicht nur den Beginn, sondern auch den weiteren Verlauf explosiver Reaktionen und zwar in so hohem Grade, daß man nicht mit Unrecht gesagt hat, die explosive Leistung hänge mehr vom Initialimpulse als von dem Sprengstoffe ab. Verglichen mit der Bedeutung des Initialimpulses treten die sonst so wichtigen physikalischen und chemischen Strukturverschiedenheiten der Explosivstoffe in den Hintergrund. Einem passend gewählten Initialimpulse gegenüber spielt es eine nur untergeordnete Rolle, ob der zu einer bestimmten Leistung befähigte Explosivstoff aus fester Substanz besteht, wie Blättchenpulver, oder teilweise aus flüssigen Komponenten, wie Ballistit, ob die zur Umsetzung kommenden Elementarbestandteile in einem Molekül vereinigt sind, wie in Pikrinsäure, oder in mehreren, wie in Gelatinedynamit, ob die Nitrogruppe an Kohlenstoff gebunden ist, wie bei Trinitrotoluol, oder an Sauerstoff, wie bei Nitromannit. Abel hat zwei eiserne Zylinder, welche an dem einen Ende geschlossen waren, in gleicher Weise mit Schwarzpulver beschickt und die Entzündung der einen Ladung durch Zündschnur, die der anderen vermittels Sprengkapsel bewirkt. Im ersteren Falle blieb der Zylinder unversehrt, im zweiten wurde er in kleine Stücke zertrümmert, obwohl in beiden Fällen der Sprengstoff derselbe war. Eine ältere Auffassung, welche dem „organischen Aufbau des Sprengstoffmoleküls" maßgeblichen Einfluß auf den Explosionsverlauf zuschrieb, kannte noch nicht das weit stärkere Vermögen des Initialimpulses, die Geschwindigkeit und zugleich den Charakter der Umwandlung zu bestimmen.

Wie verschieden die Richtung der Umsetzung bei einem und demselben Explosivstoffe, je nach der Intensität des auslösenden

Initialimpulses, sein kann, lehrt das Verhalten des Ammoniumnitrates. Von den insgesamt sieben verschiedenen möglichen Umwandlungsformen dieses Salzes verlaufen nach Berthelot drei explosiv. Die Umsetzung

$$2\ NH_4 \cdot NO_3 = 2\ N_2 + 4\ H_2O + O_2,$$

wobei sämtlicher Stickstoff als solcher frei wird, ergibt die höchste Leistung; sie erfolgt bei plötzlicher, sehr intensiver Wärmezufuhr unter hohem Druck und kann tatsächlich nur mit Hilfe einer stark geladenen Sprengkapsel ausgelöst werden. Die Umsetzung

$$2\ NH_4 \cdot NO_3 = N_2 + 2\ NO + 4\ H_2O,$$

wobei von dem vorhandenen Stickstoff allein der Ammoniakstickstoff frei wird, pflegt das Ergebnis einer ungenügenden Initiierung mit zu schwacher Sprengkapsel zu sein. Bei allmählich gesteigerter Erhitzung ohne wesentliche Druckerhöhung schließlich, etwa durch eine Flamme, zerfällt das Ammoniumnitrat gemäß der Gleichung

$$NH_4 \cdot NO_3 = N_2O + 2\ H_2O,$$

wobei sämtlicher Stickstoff an Sauerstoff gebunden bleibt.

Von den überhaupt möglichen Initialimpulsen haben Bedeutung nur die wenigen erlangt, welche Zuverlässigkeit mit sicherer Handhabung verbinden. Sie lassen sich zurückführen auf folgende typische Zündungsarten:

a) Funken-, Glüh- und Flammenzündung;
b) Schlag- und Stoßzündung;
c) Sprengkapselzündung;
d) Zündung durch Übertragung (Influenz).

a) Funken-, Glüh- und Flammenzündung.

Die Begründung für diese Art Initialimpuls liegt in der Tatsache, daß chemische Umwandlungen ganz allgemein durch Temperaturerhöhung beschleunigt werden. Merkwürdigerweise erfahren die meisten chemischen Reaktionen, so mannigfaltige Verschiedenheiten sie auch sonst untereinander aufweisen mögen, ziemlich gleichmäßig eine Verdoppelung ihrer Geschwindigkeit durch ein Ansteigen der Temperatur um 10° C. Für Explosivstoffe ist dieser Geschwindigkeitszuwachs beträchtlich

höher, etwa noch einmal so groß, so daß sich für hohe Temperaturen sehr bedeutende Umwandlungsgeschwindigkeiten ergeben. Manche Substanzen, wie Kaliumchlorat, Nitronaphthalin, Pikrinsäure, welche bei allmählich anwachsender Erhitzung nicht explosiv sind, können dennoch explodieren, wenn man sie plötzlich auf eine sehr hohe Temperatur erhitzt.

Die älteste hierhergehörige Zündungsart ist der Halmzünder oder die Stoppine, ein mit feinkörnigem Schwarzpulver gefülltes Röhrchen aus Stroh oder Messing. An den Halm wurde ein kurzer Schwefelfaden („Schwefelmännchen") geklebt und zunächst dieser entzündet; solange derselbe noch am Brennen war, verblieb dem Sprengarbeiter Zeit zur Flucht. Die Halmzündung ist auf den Gebrauch von Schwarzpulver als Sprengmittel beschränkt geblieben. Von größerer Anwendbarkeit, auch für nasse Bohrlöcher, erwies sich die von Bickford im Jahre 1831 erfundene Zündschnur. Sie besteht aus einer Hanfschnur mit eingelegter Seele von langsam brennendem Kornpulver und ist geteert oder mit Guttapercha überzogen. Von einer guten Zündschnur sollen 50—100 cm in der Minute abbrennen. In dem Maße, als Sprengmittel, zu deren sicherer Initiierung die Explosion einer Knallquecksilbersprengkapsel innerhalb der Sprengladung erforderlich ist, in Ausnahme kamen, gewann die Zündschnur an Bedeutung.

Für gewisse Zwecke versuchte man, die Zündschnur in Brand zu setzen, ohne dafür offenes Feuer benutzen zu müssen. In diesem Bestreben verband Roth das Ende der Zündschnur mit einer kleinen Blechhülse, in der ein mit chlorsaurem Kali und Zucker getränkter Wattebausch, sowie ein Glaskügelchen mit konzentrierter Schwefelsäure untergebracht sind. Sobald das Gläschen zerdrückt wird und die Schwefelsäure mit der Chloratmischung in Berührung kommt, entzündet sich die Watte und sogleich auch die mit Schwarzpulver gefüllte Zündschnur.

An Stelle der Schwarzpulverfüllung hat man für Zündschnüre auch Nitrozellulose, Dynamit, ja sogar Knallquecksilber

versucht und auf diese Weise Abbrenngeschwindigkeiten bis zu 7000 m in der Sekunde erzielt. Seit einigen Jahren kommen dünne, mit feinkristallinischem Trinitrotoluol gefüllte Bleirohre in den Handel, deren Sprengstoffseele bei geeigneter Initiierung mit bestimmter Fortpflanzungsgeschwindigkeit detoniert.

b) Schlag-, Stoß- und Reibungszündung.

Diese Art von Initialimpuls läßt sich auf die vorbehandelte zurückführen, indem man sich vorstellt, daß die lebendige Kraft des Schlages, Stoßes oder der Reibung, wenn sie plötzlich vernichtet wird, in einer beträchtlichen Temperaturerhöhung der getroffenen Stelle zur Erscheinung kommt. Hiermit steht die Erfahrung im Einklang, wonach die erforderliche Schlagarbeit, welche zur Explosion führt, um so kleiner zu sein braucht, je höher die Temperatur des Explosivstoffes ist. Man hat indessen auch die Ansicht vertreten, mechanische Erschütterungen könnten schon an sich Explosionen veranlassen, und manche Erscheinungen, namentlich die der Übertragung der Explosion zwischen zwei räumlich getrennten Sprengstoffen, lassen sich zugunsten dieser Auffassung deuten.

Von der Schlag- und Reibungszündung wird vorzugsweise in Verbindung mit Zündhütchen für Feuerwaffen Gebrauch gemacht. Der für Zündhütchen verwendete Knallsatz wechselt in seiner Zusammensetzung je nach Art und Größe der zu zündenden Pulverladung. In der Regel sind es Gemische aus Knallquecksilber, Kaliumchlorat und Schwefelantimon, denen man, um sie empfindlicher zu machen, Glaspulver zusetzt. Das Rosten der Gewehrläufe nach dem Schusse hat man verhütet, indem man das Chlorat in den Zündhütchen durch Nitrat, Superoxyd und andere chlorfreie Sauerstoffträger ersetzte. Die Friktionsschlagröhren für Geschützladungen sind kleine, mit Schwarzpulver gefüllte Röhren aus Messing oder Kupfer, die einen mit sensiblem Zündsatz versehenen Reib-

apparat tragen, welcher durch Herausreißen des Reibers in Tätigkeit gesetzt wird.

c) Sprengkapselzündung.

Die Sprengkapselzündung kann man auffassen als eine Vereinigung von Funken- und Schlagzündung, welche sich unter sehr hohen Drucken abspielt. Hierfür spricht die Tatsache, daß die Explosionsprodukte eines durch Sprengkapsel gezündeten Sprengmittels selbst im Vakuum nicht verschieden sind von den unter hohem Druck durch Funken- oder Schlagzündung erhaltenen, gleiche sonstige Bedingungen vorausgesetzt. Die hohe Bedeutung der Sprengkapselzündung für die Sprengtechnik liegt darin, daß durch diese Zündungsart auch dann noch eine explosive Umsetzung herbeigeführt werden kann, wenn jede andere Zündungsart versagt. Umgekehrt darf man, ohne in einen Fehlschluß zu verfallen, einem chemischen System, welches auf Sprengkapselzündung, selbst unter günstigen Bedingungen, nicht reagiert, den Charakter eines Explosivstoffes absprechen. Durch die Sprengkapselzündung hat der Kreis explosionsfähiger Systeme sehr an Ausdehnung gewonnen, zumal seit der Beobachtung von Sprengel im Jahre 1873, daß jede zu innerer Verbrennung befähigte Substanz oder Mischung aus oxydierenden und verbrennlichen Bestandteilen auch tatsächlich zu einer derartigen Umsetzung unter dem Einflusse einer explodierenden Sprengkapsel veranlaßt werden könne. Die allgemeinere Erkenntnis, daß mit Hilfe von Knallquecksilber als Initialimpuls sich die Sprengkraft anderer Explosivstoffe und detonationsfähiger Mischungen auslösen lasse, verdankt man Nobel, der im Jahre 1867 die noch heute gebräuchliche Knallquecksilber-Sprengkapsel einführte.

Die Sprengkapseln sind zylindrische, an dem einen Ende geschlossene Kupferhülsen, deren lichte Weite, von 5—8 mm wechselnd, dem üblichen Durchmesser der Zünd-

schnüre entspricht. Die Füllung der Sprengkapseln besteht aus einer Mischung von Knallquecksilber und chlorsaurem Kali. Ersetzt man einen Teil dieses Knallsatzes durch Trinitrotoluol oder Tetranitromethylanilin, so gewinnt man erheblich stärkere Zündwirkungen.

Je nach der Sensibilität des zu zündenden Sprengstoffes werden die Sprengkapseln in zehn verschiedenen Größen mit entsprechender Füllung gebraucht und mit den Nummern 1 bis 10 bezeichnet. Füllung und Größenbezeichnung ergeben sich aus folgender Aufstellung:

Bezeichnung Nr. .	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Füllung in g . .	0,3	0,4	0,54	0,65	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0

Die Sprengkapseln sind zur Einleitung einer ordnungsmäßigen Explosion bei fast allen Sprengstoffen notwendig. Für Gelatinedynamite genügen meist Kapseln Nr. 3; für Sprenggelatine und Karbonite braucht man Kapseln Nr. 5 bis 6; Chloratsprengstoffe bedürfen einer Sprengkapsel Nr. 6 bis 8; für Ammonsalpetersprengstoffe sind Nr. 8 bis 10 erforderlich. Hierbei wird vorausgesetzt, daß die Kapseln von gleichmäßiger Beschaffenheit sind, normales Initiierungsvermögen besitzen und auch richtig in die Patrone eingeführt werden. Ist dies nicht der Fall, so kann die Explosion der Sprengladung eine ungenügende werden oder ganz ausbleiben. Figur 2 stellt eine mit Sprengkapsel und Zündschnur versehene Roburitpatrone in zum Teil aufgeschnittenem Zustande dar. Man erkennt die Füllung der Sprengkapsel, die Pulverseele der Zündschnur, sowie die Sprengstoffmasse der Patrone.

In der Praxis werden die mit Sprengkapseln ausgerüsteten Patronen nach Möglichkeit auf elektrischem Wege abgetan, und es ist diese Zündungsart zufolge ihrer Vorzüge ein unentbehrliches Hilfsmittel, namentlich für den Kohlenbergbau, geworden.

Die elektrische Zündung bietet Gewähr dafür, daß der Sprengschuß zu einem genau bestimmbaren Zeitpunkte fällt, nachdem die Mannschaft in Sicherheit ist. Ein anderer Vorzug ist ihre verhältnismäßig große Sicherheit gegen Schlagwettergefahr. Ferner ist die elektrische Zündung — wenn man absieht von den schnell explodierenden, mit Knallquecksilber, Trinitrotoluol oder ähnlich wirkenden Substanzen gefüllten Zündschnüren — die einzige Zündungsart, die es ermöglicht, eine größere Anzahl von Schüssen gleichzeitig abzutun. Manche Sprengleistungen, wie die Abtrennung größerer Blöcke und das augenblickliche Niederlegen ganzer Gesteinswände, kann man nur durch gleichzeitiges Abtun aller Schüsse erreichen. Als Mangel dieser Zündungsart ist ihre Umständlichkeit anzusehen; es muß eine elektrische Stromquelle vorhanden sein, Leitungen müssen gelegt und besonders hergerichtete Zünder gebraucht werden.

Fig. 2. Roburitpatrone mit Sprengkapsel u. Zündschnur. (Zum Teil aufgeschnitten.)

d) Zündung durch Übertragung.

An eine Übertragung von Wärme, als wesentlicher Ursache der Auslösung explosiver Umsetzungen, darf man bei der in Rede stehenden Art der Initiierung durch Übertragung („Influenz") nicht denken, ebensowenig an ein Abschleudern von Materie des auslösenden Explosivstoffes auf den ausgelösten; denn die Wirkung bleibt bestehen, wenn auch in geschwächter Form, durch trennende Schichten von Glas, Metall, Wasser. Ein eigentümliches Merkmal der Erscheinung, um welche es sich hierbei handelt, ist ferner, daß sie von der chemischen und physikalischen Beschaffenheit des Initialsprengstoffes in hohem Grade beeinflußt wird. Während schon 0,3 g Knallquecksilber hinreichen, um Schießbaumwolle zur

Explosion zu bringen, genügen hierfür selbst 6,5 g des so überaus sensiblen, äußerst leicht detonierenden Jodstickstoffes noch nicht.

Abel glaubte, solches Unvermögen, explosive Übertragung zu veranlassen, durch die Annahme verständlicher zu machen, es bestehe in derartigen Fällen kein Synchronismus in den molekularen Schwingungen einerseits des Initialsprengstoffes, andererseits des zur Explosion angeregten, ähnlich wie eine tönende Saite nur eine gleichgestimmte andere zum Mitschwingen veranlaßt. Gegenwärtig neigt man mehr der Ansicht zu, daß als wesentliches Moment die Fortpflanzung einer intensiven Verdichtungswelle zu betrachten sei, welche die Fähigkeit besitzt, sich auch außerhalb des explodierenden Sprengstoffes durch andere Medien, beispielsweise Wasser, zu verbreiten (S. 124).

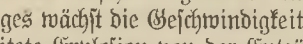
Dritter Abschnitt.

Geschwindigkeit explosiver Vorgänge.

Je nach dem gewählten Initialimpuls sowie den sonst vorliegenden Umständen, unter denen ein explosionsfähiges System initiiert wird, begleiten den Zerfall desselben Erscheinungen, die man bald als rasche Verbrennung, Deflagration, bald als Explosion, bald als Detonation zu bezeichnen pflegt. Bestimmend für den verschiedenen Gesamteindruck, den ein Explosionsvorgang hinterläßt, ist in erster Linie die größere oder geringere Geschwindigkeit, mit welcher die explosive Umwandlung abläuft.

Erwägt man, daß zum Zustandekommen einer Explosion zwei Teilvorgänge ablaufen müssen, nämlich zunächst die Auslösung durch den Initialimpuls und hierauf das Fortschreiten der explosiven Umsetzung, dann ergibt sich, daß auch die Geschwindigkeit eines Explosionsvorganges von zwei Gesichtspunkten aus zu betrachten ist. Um diese Sachlage dem Verständnis näher zu bringen, sei sie an einem Beispiele erläutert. Nach Versuchen von Dixon wirkt eine geringe Menge Wasser-

dampf in Gegenwart eines Gemenges von Kohlenoxyd und Sauerstoff beschleunigend auf die Vereinigung desselben zu Kohlensäure ein, derart, daß ein absolut trockenes Kohlenoxydknallgas durch den elektrischen Funken überhaupt nicht gezündet wird, während dies um so leichter vonstatten geht, je mehr Wasserdampf — innerhalb gewisser Grenzen — zugegen ist. Die Geschwindigkeit der Reaktion:



$$2\ CO + O_2 \rightarrow 2\ CO_2,$$

welche bei Abwesenheit von Wasser praktisch gleich Null ist, steigt also auf immer höhere Werte in dem Grade, als jenes an Quantität und dementsprechend auch an Einfluß gewinnt. Gleichzeitig mit der Geschwindigkeit der Auslösung des Explosionsvorganges wächst die Geschwindigkeit, mit welcher die einmal eingeleitete Explosion von der Entzündungsstelle aus fortschreitet. Als Dixon das Kohlenoxydknallgas mit Phosphorpentoxyd oder Schwefelsäure trocknete oder mit Wasserdampf, entsprechend den Drucken 9,2 mm, 41,8 mm und 148,8 mm, versetzte, betrug die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Explosion in diesen fünf Fällen 36, 119, 175, 244, 317 m in der Sekunde. Das explosionsartige Gepräge solcher Vorgänge ist hiernach nicht nur an eine gewisse Geschwindigkeit der auslösenden, sondern auch der fortgepflanzten Reaktion geknüpft.

Daß die Übertragung der vom Initialimpulse ausgehenden Energie auf das explosible System in einem solchen Grade, daß die explosive Reaktion fortzuschreiten vermag, nicht augenblicklich erfolgen kann, sondern notwendig Zeit beansprucht, leuchtet am ehesten ein in dem besonderen Falle, daß es sich um eine Entzündung durch Flamme handelt. Das explosible System muß an der betreffenden Stelle so hoch erhitzt werden, daß die Wärmeentbindung der eingeleiteten Reaktion überwiegt gegenüber dem unvermeidlichen Wärmeverlust infolge Leitung oder Strahlung. Andernfalls würde der explosive

Vorgang überhaupt nicht zustande kommen. Je intensiver daher der Wärmeimpuls ist, um so rascher erlangt im allgemeinen das System die zu seiner explosiven Umwandlung erforderliche Temperaturhöhe. Was die durch Sprengkapselzündung hervorgerufene Umsetzung für die praktische Verwendung der Sprengmittel so wertvoll macht, das ist die außerordentlich große Geschwindigkeit, mit welcher unter diesen Umständen die Zersetzung sowohl ausgelöst, als auch fortgepflanzt wird.

Alle Faktoren, welche chemische Reaktionen überhaupt in ihrer Geschwindigkeit zu beeinflussen vermögen, haben auch Bedeutung für die Geschwindigkeit der hier betrachteten beiden Teilvorgänge. Es sind demgemäß in erster Linie in Rücksicht zu ziehen: die Temperatur des explosiblen Systems sowie der Druck, unter dem es sich befindet, dann aber auch noch spezifisch wirkende Reaktionsbeschleuniger, sogenannte Katalysatoren.

1. Geschwindigkeit der Auslösung explosiver Vorgänge.

Die Geschwindigkeiten, um die es sich bei Explosionsvorgängen handelt, sind recht ansehnliche. Besondere Schwierigkeit bereitet die Messung der Geschwindigkeit der Auslösung unter den bei einer Explosion herrschenden Bedingungen, also bei sehr rasch anwachsenden, hohe Grade erreichenden Temperaturen und Drucken. Der in dieser Richtung gewonnene Einblick beschränkt sich deshalb auf solche Auslösungsvorgänge, die bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen und Drucken mit entsprechend geringen Geschwindigkeiten vonstatten gehen. Immerhin hat man sich hierdurch eines Anhaltes versichert zur Beurteilung der Geschwindigkeit der Auslösung bei der explosiven Umsetzung selbst.

Um den Einfluß der Temperatur auf die Geschwindigkeit der Auslösung explosiver Vorgänge zu studieren, unterwarf Hoitsema Silberoxalat, Schwefelstickstoff und ähnlich ge-

baute Körper verschieden hohen Temperaturen und maß die entwickelte Gasmenge. Als er den Reaktionsverlauf in Beziehung zur Temperatur graphisch auftrug, fiel ihm eine starke Richtungsänderung der Kurven bei Temperaturen von etwa 160 bis 180° C auf. Diese Erscheinung erklärt sich als notwendige Folgerung aus der oben (S. 25) hervorgehobenen allgemeinen Eigenschaft der Explosivstoffe, nämlich dem überaus raschen Ansteigen ihrer Zerfallgeschwindigkeit mit steigender Temperatur. Bei gewissen, ziemlich genau abgrenzbaren Temperaturen, die übrigens für die verschiedenen Explosivstoffe nicht gleich hoch liegen, kommt es zur Verpuffung, und solche Verpuffungstemperaturen werden als geradezu charakteristische Merkmale für die einzelnen Sprengstoffe angesehen. Man ist übereingekommen, als Verpuffungstemperatur eines Explosivstoffes diejenige Temperatur zu bezeichnen, bei welcher gemäß einer bestimmten Versuchsanordnung Verpuffung eintritt.

Behufs Ermittelung der Verpuffungstemperatur des zu prüfenden Sprengstoffes wird 0,1 g desselben in einem starkwandigen, leicht verkorkten Reagensglase in ein zuvor auf genau 100° C erhitztes Ölbad gebracht. Vermittels eines auf und ab bewegten Rührers wird die Temperatur des Bades gleichförmig gehalten. Man erhitzt langsam und regelmäßig derart weiter, daß die Temperatur um 5° C in der Minute steigt, und setzt dies so lange fort, bis Verpuffung der Probe erfolgt. Dann vermerkt man die Temperatur.

Auf diese Weise wurden die in Tabelle 3 vermerkten Verpuffungstemperaturen erhalten. Vielleicht wird man die angegebenen Zahlen für Substanzen von der Natur der Explosivstoffe unerwartet hoch finden und namentlich für Nitroglyzerin wenig im Einklange mit der leichten Zersetzlichkeit dieses Stoffes. In der Tat ist das Ergebnis der Verpuffungsprobe getrübt durch die Flüchtigkeit des Nitroglyzerins, wodurch es sich der Berührung mit der Wandung des erhitzten Reagensrohres immer von neuem entzieht. Überdies besitzen

nur ordnungsgemäß hergestellte, haltbare Explosivstoffe so hohe Verpuffungstemperaturen. Schlecht gewaschene Schießwolle zum Beispiel kann schon bei 120° C und noch tiefer liegenden Temperaturen verpuffen. Man hat demnach in der Bestimmung der Verpuffungstemperatur zugleich ein Mittel, um den Zustand eines Explosivstoffes zu erkennen und zu überwachen.

Tabelle 3.

Verpuffungstemperaturen einiger Explosivstoffe.

Lfde. Nr.	Bezeichnung des Explosivstoffes	Verpuffungstemperatur °C
1	Schießwolle (13% Stickstoff)	183—186
2	Kollodiumwolle (12% Stickstoff)	186—190
3	Schießwollpulver, gelatiniert, feines Korn	173—176
4	Schießwollpulver, gelatiniert, grobes Korn	168—172
5	Nitroglyzerin	160—220
6	Sprenggelatine (7% Kollodiumwolle)	180—200
7	Nitroglyzerinpulver (40% Nitroglyzerin)	170—180
8	Dynamit (75% Nitroglyzerin)	180—200
9	Pikrinsäure	bis 225 keine Verp.
10	Trinitrotoluol	bis 225 keine Verp.
11	Bleiazid	bis 225 keine Verp.
12	Knallquecksilber	160—165
13	Schwarzpulver	bis 225 keine Verp.
14	Ammonsalpetersprengstoff (Roburit I)	bis 225 keine Verp.

Was den Einfluß des Druckes auf die Geschwindigkeit der Auslösung explosiver Vorgänge anlangt, so lassen sowohl allgemeine Erfahrungen der Sprengtechnik als auch experimentelle Untersuchungen keinen Zweifel darüber, daß Druckzunahme beschleunigend wirkt. Allerdings liegen auch Beobachtungen, unter anderem an den Wasserstoffverbindungen des Phosphors und Siliziums vor, die gerade das Entgegengesetzte anzudeuten scheinen, also Reaktionsbeschleunigung bei Druckverminderung; doch darf man annehmen, daß es sich bei

dem hier als Ausnahme in Frage kommenden Tatsachenmaterial nicht um Einflüsse des Druckes allein gehandelt hat. Welche technische Bedeutung solche anscheinend nebensächlichen Bedingungen für die Auslösung von Explosionsvorgängen gewinnen können, erhellt aus folgendem Vorkommnis. Als das Azetylen als Beleuchtungsmittel aufkam, versuchte man zunächst seine Aufspeicherung im komprimierten Zustande, ohne die Gefahr zu kennen, welche das verdichtete Gas darbot. Die immer häufiger auftretenden Explosionsunfälle veranlaßten schließlich eine Untersuchung der Angelegenheit. Es zeigte sich, daß gasförmiges Azetylen durch einfaches Erhitzen unter gewöhnlichem Druck nicht zur Explosion kommt, wohl aber dann, wenn der Druck auf das Doppelte oder Dreifache erhöht wird.

Eine dritte Ursache, welche bei der Auslösung explosiver Vorgänge in Wirksamkeit treten kann, sind katalytische Einflüsse. Es ist eine seit langem gekannte Tatsache, daß schon winzige Mengen einer fremden Substanz die Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion sehr wesentlich zu ändern, sei es zu erhöhen, sei es zu vermindern, vermögen. Reines, trockenes Kohlenoxydknallgas ist an sich nicht explosionsfähig, wird es aber durch Beimischung von Spuren von Feuchtigkeit. Andererseits kann ein Zusatz von sehr wenig Sauerstoff, wie Bunsen und Roscoe für Chlorknallgas ermittelt haben, dessen Explosionsfähigkeit bei Bestrahlung völlig aufheben. Ebenso ist die Geschwindigkeit, mit welcher sich Wasserstoffknallgas bei hoher Temperatur zu Wasserdampf umsetzt, keineswegs allein von der Höhe dieser Temperatur abhängig, sondern in vielleicht dem gleichen Grade von der mehr oder weniger rauhen Beschaffenheit der umschließenden Gefäßwände. Katalytische Einflüsse scheinen auch unter den Ursachen von Schlagwetterexplosionen in Kohlengruben eine bedeutsame Rolle zu spielen. Als auf Veranlassung der Preußischen Schlagwetterkommission

eingehende Versuche über die Entzündung von Gemengen aus Methan mit Luft durch glühende Drähte ausgeführt wurden, zeigte es sich, daß Kupfer, Eisen, Silber, Platin einen spezifischen Einfluß auf die Geschwindigkeit der Vereinigung von Methan und Sauerstoff ausüben. Unter vergleichbaren Versuchsbedingungen zündete Eisendraht schwieriger als Kupferdraht und dieser wieder schwieriger als Platindraht. Auch Kieselgur, Magnesia und ähnliche poröse Stoffe besitzen die Fähigkeit, die Entzündung explosibler Schlagwettergemische zu beschleunigen. Es ergibt sich hieraus die Notwendigkeit, derartige katalytisch wirksame Substanzen in den Kohlengruben fernzuhalten oder, wenn dies nicht angeht, sie unschädlich zu machen.

2. Die Initialsprengstoffe.

Die Initialsprengstoffe, deren bekanntester Vertreter das Knallquecksilber ist, gehören zu den sensibelsten Explosivstoffen. Sie sind besonders dadurch gekennzeichnet, daß schon eine geringe Menge derselben ausreicht, um eine andere Sprengstoffmasse, etwa eine Sprengladung, zur Detonation zu bringen. Man beurteilt diese Fähigkeit der Initialsprengstoffe entweder nach der Mindestmenge, welche zur Initiierung einer Sprengladung von bestimmter Beschaffenheit notwendig ist, oder nach dem Grade von Unempfindlichkeit, welche die Sprengladung besitzen darf, ohne daß sie unvollständig detoniert.

Die Eigenart der Initialsprengstoffe, der sie ihre technische Bedeutung verdanken, wird auf eine vergleichsweise sehr große Auslösungsgeschwindigkeit ihrer Materie zurückgeführt. Der meist durch Schlag, Stichflamme der Schwarzpulverzündschnur und ähnliche Hilfsmittel eingeleitete Zerfall des Initialsprengstoffes, sein schneller Übergang von langsamer zu detonationsartiger chemischer Umsetzung, vollzieht sich mit ungeheurer Beschleunigung unter fast verschwindend geringem Verbrauch an

eigener Substanz. Es sind demnach die Initialsprengstoffe als Explosivstoffe von überaus großer Auslösungsgeschwindigkeit zu definieren.

Allen gemeinsam ist ihre große Empfindlichkeit gegen Stoß und Reibung, zum Teil auch gegen Erhitzung. Hinsichtlich Sprengkraft, soweit solche durch Explosionswärme und andere noch zu erörternde Meßmethoden nachweisbar ist, stehen die zurzeit gebrauchten Initialsprengstoffe den Sprengmitteln beträchtlich nach. Auch die Geschwindigkeit, mit welcher sich die Detonation innerhalb ihrer Masse fortpflanzt, erreicht nur Mittelwerte. Bis vor kurzem hielt man das Wesen der Initialsprengstoffe geknüpft an eine besonders hohe Dichte derselben und glaubte es beschränken zu müssen auf Schwermetallverbindungen, wie die Quecksilber-, Blei-, Silbersalze der Knallsäure und Stickstoffwasserstoffsäure. Neuerdings hat man aber auch metallfreie Kohlenstoffverbindungen als sehr wirksame Initialsprengstoffe kennengelernt, beispielsweise das Nitrodiazobenzolperchlorat.

Knallquecksilber.

Der wichtigste Initialsprengstoff ist das Knallquecksilber $Hg(CNO)_2$, welches im Jahre 1799 von Howard zuerst dargestellt wurde. Seine Fähigkeit, Schießpulver leicht zu entzünden, veranlaßte frühzeitig, etwa seit dem Jahre 1815, seine Verwendung zur Füllung von Zündhütchen. Durch Liebigs Arbeit über die Knallsäure (1822) erkannte man die in Frage kommende sprengkräftige Substanz als das Quecksilbersalz einer chemischen Verbindung, welche auch mit Silber („Knallsilber"), Natrium usw. salzartige Verbindungen („Fulminate") eingeht, die fast alle durch große Empfindlichkeit gegen Stoß, Reibung und Erwärmung ausgezeichnet sind.

Die technische Herstellung des Knallquecksilbers erfolgt in der Weise, daß in einem Glasballon 1 Teil Quecksilber in 9 Teilen Salpetersäure von 40° Bé aufgelöst und diese Lösung in einen anderen

Glasballon gegeben wird, welcher 9 Teile Alkohol enthält. Nach einiger Zeit beginnt die Umwandlung, welche sich anfangs nur durch eine schwache Gasentwicklung bemerkbar macht. Bald darauf gerät die Flüssigkeit ins Sieden, und unter starkem Schäumen entweichen zuerst farblose, flüchtige Nebenprodukte, wie Kohlensäure, Äthylnitrit, sodann rote Dämpfe von Stickstoffoxyden. Die Reaktion dauert eine Viertelstunde, nach welcher Zeit sich das Knallquecksilber in kleinen, weiß bis grau gefärbten Nadeln abscheidet. Der Inhalt des Glasballons wird nunmehr auf ein Filter gebracht und mit Wasser gewaschen, bis Lackmus keine Rötung mehr zeigt. Den nassen Knallsatz befreit man hierauf von dem größten Teile seiner Feuchtigkeit entweder an freier Luft oder in einem mäßig erwärmten, zuweilen auch evakuierten Raume. Die Ausbeute an Knallquecksilber beträgt 125 Teile auf 100 Teile Quecksilber.

Das Knallquecksilber besitzt einen süßlichen, metallischen Geschmack und ist, wie fast alle Quecksilbersalze, sehr giftig. Von kaltem Wasser wird es nicht gelöst, wohl aber von heißem Wasser, starker Salpetersäure, und kann durch Wiederausfällen aus solchen Lösungen gereinigt werden. Besonders auffallend ist seine hohe spezifische Dichte (4,4), die höchste unter sämtlichen Explosivstoffen vorkommende, ein Umstand, der ehemals als von ausschlaggebender Bedeutung für die eigenartige Wirksamkeit des Knallquecksilbers als Initialsprengstoff angesehen wurde. Mäßige Erhitzung, leichter Stoß oder geringe Reibung bringen es zur Detonation, und es ist eben wegen dieser Eigenschaften weder zum Sprengen noch als Treibmittel geeignet, zumal auch der Energieinhalt und das entwickelte Gasvolum weit hinter denen anderer Explosivstoffe zurückbleiben. In der Technik spielt das Knallquecksilber lediglich als Zündmittel eine Rolle und zwar hauptsächlich bei der Herstellung der Zündhütchen sowie als Hauptbestandteil der Sprengkapseln.

Bleiazid.

Seit der Entdeckung der Stickstoffwasserstoffsäure ist wiederholt die Verwendung der Azide, namentlich des Silber- und Quecksilberazids, für Initialzwecke angeregt worden, und es

haben auch schließlich solche Versuche zum Ziele geführt, indem ein auf bestimmte Art gewonnenes Bleiazid $Pb(N_3)_2$ sich als ein ausgezeichneter, dem Knallquecksilber in mehrfacher Hinsicht überlegener Initialsprengstoff erwiesen hat.

Das zur Herstellung von Initialzündungen brauchbare Bleiazid gewinnt man durch doppelte Umsetzung von Natriumazid mit einem löslichen Bleisalz, Bleiazetat oder Bleinitrat. Da große Kristalle von Bleiazid überaus stoßempfindlich sind, vermeidet man es, sie aus gesättigter Lösung auskristallisieren zu lassen.

Bleiazid ist ein weißes, spezifisch schweres Pulver, welches sich am Lichte oberflächlich dunkel färbt. Durch Erhitzung, Stoß, Reibung kommt es weniger leicht als Knallquecksilber zur Detonation; gleichwohl ist seine Initiierwirkung weit kräftiger und wird auch nicht durch etwas Feuchtigkeit oder starke Pressung beeinträchtigt. Es dient zur Herstellung von Sprengkapseln, meist in Kombination mit einer Füllung aus Trinitrotoluol oder Tetranitromethylanilin.

3. Geschwindigkeit der Fortpflanzung explosiver Vorgänge.

Die Bedeutung des Initialimpulses für die Geschwindigkeit der Auslösung und in nächster Folge für die Geschwindigkeit der Fortpflanzung explosiver Vorgänge blieb lange unerkannt. Man war in früherer Zeit auf Funken oder Flamme als Zündmittel für das in Gebrauch stehende Schwarzpulver angewiesen, und da sich jene Zündmittel hinsichtlich ihrer Intensität wenig beeinflußbar verhielten, bekam man auch nur mäßige Geschwindigkeiten für die Fortpflanzung explosiver Vorgänge. Bunsen, der als einer der ersten Forscher auf diesem Gebiete Ermittelungen über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Entzündungsvorganges in explosiblen Gasmischungen anstellte, fand für das Gemenge Kohlenoxyd — Sauerstoff nur 1 m in der Sekunde und sogar für das als besonders wirkungsvoll erachtete Wasserstoffknallgas nicht mehr als 34 m.

Bis in die neueste Zeit vermutete man in diesen Zahlen charakteristische Konstanten des betreffenden explosiblen Systems und hielt sie für nur abhängig von dem Mischungsverhältnis der zur Umsetzung gebrachten Gase. Man fand, daß das jeweilige Maximum der Fortpflanzungsgeschwindigkeit bei einem etwa 10 Volumprozente betragenden Überschusse an brennbarem Gase erreicht wurde. Wuchs dieser Überschuß weiter, dann nahm die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Verbrennung wieder ab und wurde schließlich so klein, daß überhaupt keine Explosion mehr zustande kam. Es folgt aus dieser Tatsache, daß für jedes reaktionsfähige Gasgemenge ein oberer und ein unterer Grenzwert der Mischungsverhältnisse bestehen muß, innerhalb deren Entzündungsfähigkeit wahrgenommen wird. Auf Tabelle 4 sind für eine Reihe von Gasen und Dämpfen die Grenzwerte der Explosionsfähigkeit in Mischung mit Luft eingetragen. Derartige Gemenge sind es, welche die Betriebskraft für Explosionsmotoren liefern, beispielsweise 1 Raumteil Benzindampf auf 35 Raumteile Luft; ihre unbeabsichtigte Bildung ist aber auch nicht selten die Ursache von Unglücksfällen. Wie leicht explosionsfähige Mischungen im gewöhnlichen Leben auftreten und sich verhängnisvoll betätigen, sei an einigen Beispielen dargetan, wobei nicht unterlassen wird darauf hinzuweisen, daß Staubaufwirbelungen von Kohle, Mehl, Baumwolle und vielen anderen brennbaren Substanzen sich ähnlich verhalten wie Gemenge von Luft mit entzündlichen Gasen oder Dämpfen.

Am 30. März 1904 entstand in Glasgow, Princes Dock, beim Verladen einiger leeren Azetontrommeln eine Explosion. Die Trommeln waren mit der Bahn am Dock angekommen und sollten auf das Schiff „Szeged" verladen werden. Zwei Mann rollten gerade eine Trommel aufs Schiff, als diese plötzlich explodierte, wobei mehrere Leute verletzt wurden, von denen zwei ihren Verletzungen erlagen. Wahrscheinlich hatte sich der Spund von der Trommel gelöst oder war von den Leuten abgenommen worden,

so daß sich das in der Trommel vorhandene Azeton-Luftgemisch bei zufälliger oder absichtlicher Annäherung eines Streichholzes entzünden konnte. Verbrannte Streichhölzer wurden dicht dabei auf dem Kaj vorgefunden.

Tabelle 4.

Grenzwerte der Explosionsfähigkeit in Mischung mit Luft für einige Gase und Dämpfe.

Bezeichnung	Grenzwerte in Volumprozenten
Wasserstoff	9,5—66,5
Kohlenoxyd	16,5—75
Methan	6 —13
Leuchtgas	8 —19
Azetylen	3,5—52,5
Äther	2,7— 7,7
Spiritus (96° %)	4 —13,7
Benzin	2,4— 4,9
Benzol	2,7— 6,3

Das Sammelbecken der Pumpstation in Weißensee bei Berlin, welches 8 m tief ist und 9 m im Durchmesser hat, sollte gereinigt werden. Zu diesem Zweck hatte sich der Arbeiter mit einem brennenden Licht hinabbegeben. Er hatte kaum den Boden des Bassins erreicht, als eine heftige Explosion erfolgte. Offenbar waren Gase, die sich aus den Abwässern entwickelt hatten, zur Entzündung gekommen. Lichterloh brennend erreichte der Arbeiter noch die Oberfläche, wo er zusammenbrach.

Eine der umfangreichsten Explosionen entzündlicher Gemenge trug sich in St. Louis zu; sie betraf eine ausgedehnte Getreidemühle, tötete mehrere Menschen, vernichtete große Vorräte an Mehl und Korn und zerstörte ungefähr vierzig in der Nähe belegene Gebäude. Der Explosionsunfall begann mit einem anfangs unscheinbaren Brande. Plötzlich aber erreichte die Flamme oder vielleicht auch nur ein fortgewehter Funke den in den Mischkammern aufgewirbelten Mehlstaub, und es erfolgte eine überaus heftige Explosion, in deren Folge das ganze gewaltige Gebäude in sich zusammenstürzte. Die Erschütterung wurde meilenweit gespürt.

Wenngleich, nach den obenerwähnten Versuchen Bunsens zu urteilen, die Fortpflanzung von Entzündungsvorgängen in explosiblen Gasgemischen mit mäßigen Geschwindigkeiten verläuft und dies auch von anderen Forschern bestätigt wurde, so sprachen doch mancherlei Beobachtungen und Vorkommnisse, namentlich Explosionen von Leuchtgas in Leitungsröhren, dafür, daß unter nicht näher gekannten Umständen erheblich größere Fortpflanzungsgeschwindigkeiten möglich sein müßten. Tatsächlich gelang es Berthelot, durch geeignete Abänderung der Versuchsbedingungen, insbesondere durch festeren Einschluß, wobei auch Druck, Temperatur, in höherem Maße zur Geltung kommen, sowie durch Initiierung mit Hilfe energischerer Impulse, sehr kräftiger elektrischer Funken, vor allem aber detonierenden Knallquecksilbers, weit größere Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in explosiblen Systemen gasförmiger, flüssiger und fester Beschaffenheit hervorzurufen. Als Berthelot Knallgas in ein langes Kautschukrohr einschloß und an dem einen Ende desselben eine kleine Knallquecksilberkapsel zur Explosion brachte, erhielt er für die Fortpflanzung der Entzündung unerwartet große Geschwindigkeiten bis hinauf zu etwa 3000 m in der Sekunde. Berthelot war hiermit auf eine Erscheinung gestoßen, die er in der Folge bei allen explosiblen Systemen hervorzurufen vermochte, und die er als „Explosionswelle" (S. 45) bezeichnete.

Unter den in der Regel obwaltenden Umständen vermag nur der eine, sei es der untere oder obere, Grenzwert der Fortpflanzungsgeschwindigkeit sich auszubilden, und man bezeichnet die entsprechenden Vorgänge als Deflagration, wobei die Geschwindigkeit der fortgepflanzten Explosion nach Metern zählt, oder als Detonation mit Fortpflanzungsgeschwindigkeiten von fast ebenso vielen Kilometern in der Sekunde. Doch hat man es nicht mit scharf abgegrenzten Gebieten zu tun; vielmehr vermag die eine Erscheinungsform unter dem Einflusse sich an-

dernder Bedingungen in die andere überzugehen und umgekehrt. Eine Deflagration kann bei rasch gesteigertem Drucke, beispielsweise in Feuerwaffen, mit einer Detonation enden. Andrerseits gibt es Hindernisse für die Fortpflanzung einer Detonation, wodurch deren hohe Geschwindigkeit so weit nachläßt, daß die Umwandlung des explosiblen Systems das Gepräge einer Deflagration gewinnt.

Von den für die Geschwindigkeit chemischer Umwandlungen überhaupt in Betracht kommenden treibenden Ursachen sei der Druck als ein besonders wichtiger, die Geschwindigkeit der Fortpflanzung explosiver Vorgänge wesentlich beeinflussender Faktor herausgehoben. Die Abhängigkeit der Verbrennungsgeschwindigkeit von dem Drucke spielt vorzugsweise in der Behandlung ballistischer Fragen eine Rolle. Während Piobert im Jahre 1839 dem wachsenden Drucke in der Feuerwaffe keinen Einfluß auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Verbrennungsvorganges einräumen zu dürfen glaubte, haben spätere Forscher diese Abhängigkeit wohl erkannt und versucht, sie durch empirische Gesetzmäßigkeiten wiederzugeben. Auffallenderweise gelang es nicht, die Beziehung zwischen Verbrennungsgeschwindigkeit des Pulverkornes und dem gemessenen Drucke in einer allgemein zutreffenden mathematischen Form darzustellen. Man kennt jetzt den Grund der beobachteten Abweichungen. Sie hatten ihre Ursache darin, daß man sich von der allerdings naheliegenden Annahme leiten ließ, das Korn des Schwarzpulvers verbrenne in konzentrischen Schichten; dementsprechend herrsche während des Verbrennungsvorganges Proportionalität zwischen Dauer der Verbrennung und Dicke der abgebrannten Schicht. Für die Mehrzahl der Explosivstoffe trifft aber diese Voraussetzung nicht zu, namentlich auch nicht für Schwarzpulver unter sehr hohen Drucken, wie solche in der Feuerwaffe herrschen. Vieille stellte den wahren Sachverhalt klar, indem er die verschiedenartigsten

Schießpulver in einer Stahlbombe zur Entzündung brachte und in geeigneter Weise die Geschwindigkeit maß, mit welcher der Verbrennungsvorgang fortschreitet. Es ergab sich die bedeutsame Tatsache, daß geometrisch ähnliche, sphärische oder kubische Pulverkörner nur dann in solchen Zeiten völlig verbrannten, die ihren linearen Dimensionen proportional waren, wenn die Pulvermaterie sich in gelatiniertem, kolloidalem Zustande befand. Vieille legte durch diese Feststellung den Grund zu den heutigen, aus kolloidaler Masse bestehenden, gelatinierten rauchschwachen Schießpulvern.

Um eine Vorstellung von den hier in Frage kommenden Geschwindigkeitsverhältnissen in Beziehung zum Druck zu geben, sei erwähnt, daß Petavel die Verbrennungsgeschwindigkeit des englischen Schießpulvers Kordit unter Atmosphärendruck zu etwa 0,5 cm in der Sekunde ermittelte. In einem geschlossenen Gefäße aber, wobei der durch die Pulvergase entwickelte Druck bis auf 500 Atmosphären stieg, betrug die mittlere Verbrennungsgeschwindigkeit bereits das Zehnfache, also 5 cm in der Sekunde, für einen Druck von 1000 Atmosphären 8 cm und für 2000 Atmosphären 11 cm in der Sekunde.

4. Die Explosionswelle.

Die Erscheinung der als Explosionswelle bezeichneten überaus schnellen Fortpflanzung explosiver Umsetzungen ist an die Bedingung geknüpft, daß schon die Auslösung des Vorganges mit sehr großer Geschwindigkeit erfolge. Dixon glückte es in bezug auf explosible Gasgemenge, das ganze Phänomen in seine Einzelheiten aufzulösen, von der Entzündung der Gasmischung durch einen starken elektrischen Funken an bis zur vollen Ausbildung der Explosionswelle, wobei gleichzeitig die Geschwindigkeit in jedem Zeitpunkt photographisch festgelegt wurde. Vollzieht sich die Entwicklung einer Explosionswelle in flüssigen oder festen Explosivstoffen, deren Dichte ja viel hundertmal größer ist als die von Gasgemengen, dann bezeichnet man den entsprechenden Explosionsvorgang als Detonation.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Detonation in den gebräuchlichen Sprengmitteln ist von Berthelot und Vieille im Jahre 1885 eingehend studiert worden. Neuere Forschungen haben das angesammelte, bisher nur wenig auswertbare Material weiter ergänzt, und man hegt die Hoffnung, daß Theorie und Praxis der Explosivstoffe aus solchen Untersuchungen Nutzen ziehen werden.

Tabelle 5.

Geschwindigkeit der Explosionswelle.

Obe. Nr.	Bezeichnung des explosiblen Systems	Geschwindigkeit m
1	2 Vol. Wasserstoff + 1 Vol. Sauerstoff	2810
2	2 „ Kohlenoxyd + 1 „ „	1090
3	Nitroglyzerin, initiiert mit Sprengkapsel Nr. 5	1700
	Nr. 7	8500
4	Gurdynamit in 3 mm weiten Röhren	2300—2700
5	desgl. „ 32 „ „ „	6200
6	Sprenggelatine, in 30 mm weiten Röhren	7700
7	Ammonsalpetersprengstoff, in 30 mm weiten Röhren	2900
8	desgl. „ 50 „ „ „	3900
9	Pikrinsäure, in 30 mm weiten Röhren	7200
10	Knallquecksilber, in 6,5 mm weiten Röhren	3900
11	Nitromannit, in 2 mm weiten Röhren	6900—7700
12	Nitrozellulose, gepreßt auf die Dichte 0,7	3800
13	desgl. „ „ „ „ 1,17	4800
14	desgl. „ „ „ „ 1,27	5400

Um die Detonationsgeschwindigkeit eines Sprengstoffes kennenzulernen, füllt man ihn nach Dautriche in eine Röhre von etwa 30 cm Länge, die an einem Ende mit einer Sprengkapsel versehen ist. Zwei andere Sprengkapseln, welche in genau gemessenem Abstande, etwa 100 mm voneinander, mit ihrem Boden an der Längsseite der Röhre anliegen, übertragen die Detonation des Sprengstoffs auf eine der oben (S. 27) erwähnten Detonationszündschnüre, deren Länge ebenfalls genau gemessen ist. Der mittlere Teil dieser Zündschnur liegt festgebunden auf einer Bleiplatte, auf der in halber Länge der Zündschnur eine Linie gezogen ist. Bei der Detonation des Sprengstoffs in der Röhre kennzeichnet sich die Stelle, auf welcher die in der Zündschnur verlaufenden, aus entgegengesetzter Rich-

tung kommenden Explosionswellen sich auf der Bleiplatte begegnen, durch eine Vertiefung, der auf der Rückseite der Bleiplatte ein Durchschlag entspricht. Man mißt die Entfernung dieser Stelle von der vorerwähnten Linie und hat nunmehr alle erforderlichen Unterlagen für die Berechnung der Detonationsgeschwindigkeit des geprüften Sprengstoffs.

Je nach den Versuchsbedingungen erhält man verschiedene Detonationsgeschwindigkeiten für ein und dieselbe Substanz; besonders großen Einfluß üben (vgl. Tab. 5) Stärke des Initialimpulses, Durchmesser des Explosivstoffstranges, sowie die größere oder geringere Dichte, mit welcher der Sprengstoff in das Rohr eingefüllt ist.

Manche Kennzeichen der Explosionswelle weisen darauf hin, daß es sich um eine dem Schalle verwandte Erscheinung handeln dürfte. Auch der Schall pflanzt sich unter Umständen mit gewaltiger Geschwindigkeit, in Stahldraht beispielsweise mit 4700 m, fort. Beide Bewegungen, die Explosionswelle und die Schallwelle, ähneln sich ferner darin, daß sie mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortschreiten. Aber andererseits ist an der tatsächlich bestehenden Verschiedenheit nicht zu zweifeln, indem die Explosionswelle ihr Dasein einer fortschreitenden chemischen Reaktion verdankt, während die Schallschwingungen sich lediglich auf physikalischem Wege vollziehen. Auch ist es nur in wenigen Fällen, insbesondere bei Gasmischungen, gelungen, Übereinstimmung zwischen den beobachteten Detonationsgeschwindigkeiten und den nach den Gesetzen des Schalles berechneten zu erzielen.

Vierter Abschnitt.

Der Explosionsdruck.

Unter den mannigfaltigen Erscheinungen, welche einen Explosionsvorgang als solchen erkennen lassen, wie Knall, Flamme, Erschütterung der Umgebung, ist die wichtigste eine

plötzliche Drucksteigerung am Orte der Explosion. Der Ausbildung eines hohen Druckes verdanken die explosiv verlaufenden Umwandlungen ganz allgemein ihre Fähigkeit, in überaus kurzer Zeit ein beträchtliches Maß von nützlicher mechanischer Arbeit zu leisten. Als Träger dieses Arbeitsvermögens kommen lediglich die gas- und dampfförmigen Explosionsprodukte in Betracht, indem nur solche zusammendrückbare Substanzen geeignet sind, die frei werdende Energie außer als Wärme auch in Gestalt von Spannkraft in sich aufzunehmen. Mit je größerer Geschwindigkeit die chemische Umsetzung ausgelöst und fortgepflanzt wird, um so weniger Energie geht für den Zweck der Expansionsbewegung verloren. Je langsamer dagegen der Explosionsvorgang verläuft, um so mehr Wärme wird durch Strahlung und Leitung den Explosionsgasen entzogen, die nicht als Expansionsenergie und Druck in Erscheinung treten kann. Zwischen der Geschwindigkeit explosiver Vorgänge und den begleitenden Explosionsdrucken ergibt sich hieraus ein inniger Zusammenhang.

Über den Druck der gasförmigen Explosionsprodukte in dem ersten Abschnitt eines Explosionsvorganges, nämlich unmittelbar nach beendeter Auslösung der explosiven Umsetzung, aber noch vor Beginn der Expansionsbewegung, ist im allgemeinen nichts bekannt. Alle experimentellen Ermittelungen von Explosionsdrucken beziehen sich auf Zustände nach eingeleiteter, zumeist schon weit vorgeschrittener Expansion. Die innerhalb eines geschlossenen Gefäßes durch die explosive Auslösung entbundenen Gase stoßen auf die ihnen Widerstand bietende Umschließung, und die hierbei eintretende, mehr oder weniger schnell sich vollziehende Drucksteigerung, sowie der überhaupt erreichte höchste Druck, der Maximaldruck oder Explosionsdruck im engeren Sinne, sind es, welche gemessen werden.

1. Geschwindigkeit der Drucksteigerung.

Wenn ein Explosionsvorgang in einem geschlossenen, unnachgiebigen Raum, etwa in einer Explosionsbombe, vor sich geht, dann wird die Geschwindigkeit der Drucksteigerung ganz allgemein durch eine gesetzmäßige Beziehung zwischen Zeit und Druck wiedergegeben, wie sie das Kurvenbild Figur 3 veranschaulicht. In dem Punkte A, unmittelbar nach der ersten Berührung der expandierenden Explosionsgase mit der Gefäßwandung, beginnt die Druckzunahme und schreitet mit wachsender Geschwindigkeit fort. In dem Punkte B wendet sich die Druckkurve; hier ist die größte Geschwindigkeit der Druck-

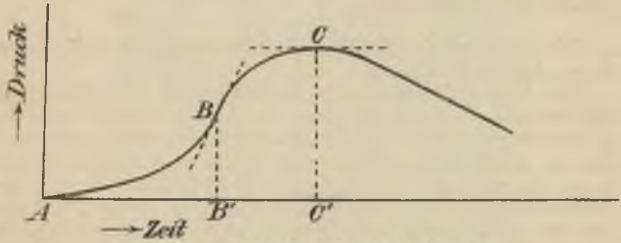


Fig. 3. Geschwindigkeit der Drucksteigerung.

steigerung erreicht, wobei der Explosionsdruck selbst durch die Linie BB' wiedergegeben wird. Hierauf nimmt die Geschwindigkeit der Druckzunahme wieder ab und sinkt auf Null in dem Punkte C; zugleich erreicht aber der Explosionsdruck sein Maximum CC'.

Der mehr oder weniger steile Verlauf dieser Druckkurve steht in naher Beziehung zu einem Verhalten explosibler Systeme, welches man mit dem Worte Brisanz belegt hat. Von brisanter Wirkung am Orte eines Explosionsvorganges spricht man, wenn umgebende träge Massen, die ein relativ langsam anwachsender Explosionsdruck im ganzen oder in größeren Stücken, namentlich auch in vorgeschriebener Richtung, fort-

bewegt hätte, ihren Zusammenhalt bis zum Zerstäuben verlieren. Brisante explosible Systeme sind dadurch ausgezeichnet, daß sie frei aufliegend oder bei schwachem Einschluß, bei leichter Verdämmung und unter ähnlichen Verhältnissen ihre volle Sprengwirkung zu entfalten vermögen. Das Gebiet brisanter Wirkungen pflegt auf die nächste Umgebung des Explosionsherdes beschränkt zu bleiben und erstreckt sich daher vorzugsweise auf das mit dem Explosivstoffe in direkter Berührung stehende Medium.

Von diesen Erfahrungen der Praxis hat man einzelne herausgegriffen, um den Brisanzgrad von Explosivstoffen vergleichsweise festzulegen.

Die gebräuchlichste Vorrichtung zur Erprobung der Brisanz von Sprengkapseln ist folgende:

Eine 5 mm dicke, quadratische Bleiplatte von 45 mm Seitenlänge wird auf einen Stahlring aufgelegt. Auf diese Bleiplatte kommt die zu prüfende Sprengkapsel, die man vermittels einer Zündschnur initiiert, welche durch das Auge eines darüber angebrachten Bügels geführt ist, um zugleich die Sprengkapsel in ihrer senkrechten Stellung festzuhalten. Die Kapsel schlägt bei der Explosion in die Bleiplatte eine Durchlochung oder nur Vertiefung ein, die in Verbindung mit den weiteren Explosionsspuren dem Auge ein Bild von dem Grade der vorhandenen Brisanz und des weiteren ein Urteil über die Gebrauchsfähigkeit der Sprengkapsel als Zündmittel gestattet. In Fig. 4 sind vier Bleiplatten abgebildet, welche die Wirkungen von Sprengkapseln ungleicher Brisanz versinnlichen sollen. Die Bleiplatte I wurde von einer kräftigen Sprengkapsel völlig durchschlagen, Platte II von einer schwächeren Sprengkapsel nur eben durchbohrt. Auf beiden Platten erkennt man die Spuren der zerstäubten Kupferhülse in strahlenförmiger Anordnung. Auf den Bleiplatten III und IV haben schlechte Sprengkapseln nur leichte Vertiefungen erzeugt und einen Strahlenkranz zurückgelassen, der mit seinen zum Teil groben Eindrücken auf eine unvollkommene Zerlegung der Kupferhülse deutet.

Explosivstoffe, welche als Sprengmittel dienen sollen, prüft man üblicherweise im Trauzlschen Bleiblock unter Be-

dingungen, welche den im Bohrloch bei der praktischen Sprengarbeit obwaltenden möglichst angenähert sind.

Die Explosion des Sprengstoffes wird in einem massiven Bleizylinder von 200 mm Höhe und 200 mm Durchmesser vorgenommen, der eine zentrale Bohrung von 125 mm Tiefe und 25 mm Weite besitzt. In die Bohrung des Bleizylinders bringt man 10 g des zu

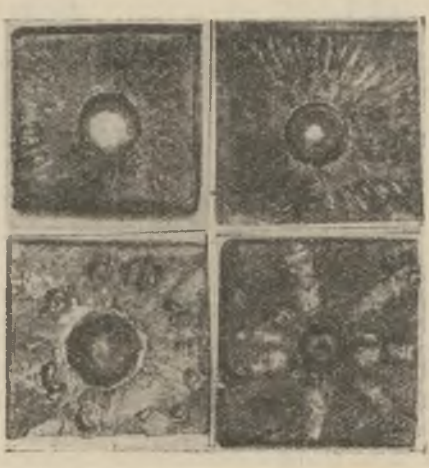
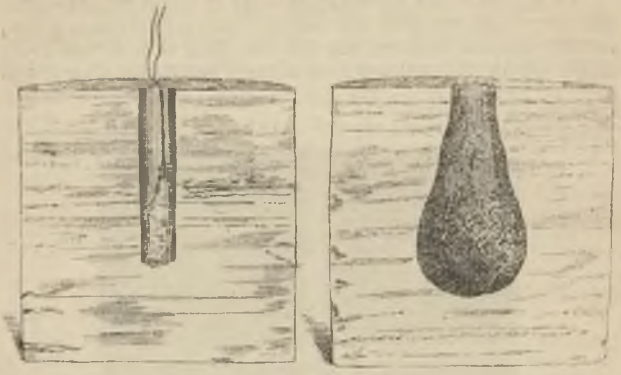


Fig. 4. Wirkungen von Sprengkapseln verschiedener Brisanz.

prüfenden Explosivstoffes, mit Sprengkapsel und elektrischer Zündvorrichtung versehen, füllt den übriggebliebenen Raum der Bohrung mit trockenem Sande und feuert ab. Es entsteht eine flaschenförmige Höhlung, welche durch Eingießen von Wasser aus einem graduierten Gefäße gemessen wird. Der Inhalt der Bohrung soll gemäß Übereinkommen von dem gefundenen Volum in Abzug gebracht werden. Auf Fig. 5 ist je eine Hälfte des Trauzlschen Bleiblockes dargestellt,

teils in dem Zustande vor dem Abschuß (I) nebst Sprengstoffüllung und elektrischer Sprengkapsel, teils nach dem Abschuß (II), wobei der ehemalige Inhalt vollkommen zerstäubt ist.



I. II.

Fig. 5. Trauzlscher Bleiblock vor (I) und nach (II) dem Abschuß. (Im Durchschnitt.)

Die Erfahrung lehrt, daß von der verfügbaren Kraft eines Explosivstoffes im allgemeinen um so mehr zur Ausbauchung des Bleizylinders verwendet wird, je brisanter der Sprengstoff ist. Knallquecksilber erzeugt dementsprechend einen im Verhältnis zu seiner geringen Gesamtenergie großen Hohlraum, Schwarzpulver dagegen und ebenso auch gelatinierte rauchlose Pulver einen geringen, dessen Aussehen und Gestalt darauf schließen lassen, daß die Explosionsgase langsamer entwickelt werden und mehr Zeit haben, durch den mit lockerem Sande besetzten Kanal zu entweichen (vgl. auch Tabelle 6).

Inwieweit durch derartige, rein empirische Prüfungen eine angemessene Vorstellung von dem tatsächlichen Verlaufe brisanter Explosionsvorgänge erworben wird, ist übrigens noch eine offene Frage. Auf der Suche nach exakteren Anordnungen

Tabelle 6.

Brisanz einiger wichtigen Explosivstoffe.

Lfnde. Nr.	Bezeichnung des Explosivstoffes	Ausbauchung[1]) im Bleiblock ccm	Wertverhältnis[2]) nach der Ausbauchung	Wertverhältnis[2]) nach der vorhandenen Energie
1	Nitromannit	650	125	136
2	Nitroglyzerin	600	115	120
3	Sprenggelatine (8% Kollodiumwolle)	520	100	100
4	Schießwolle (13% Stickstoff)	420	81	123
5	Gelatinedynamit (60% Nitroglyzerin)	410	79	132
6	Gurdynamit (75% Nitroglyzerin) . .	350	67	85
7	Kollodiumwolle (12% Stickstoff) . .	250	48	108
8	Pikrinsäure	300	58	118
9	Ammonsalpetersprengstoff	300	58	95
10	Trinitrotoluol	270	52	118
11	Nitroglyzerinpulver (40% Nitroglyzerin)	150	29	37
12	Schießwollpulver	150	29	54
13	Knallquecksilber	150	29	116
14	Schwarzpulver	30	6	15

begegnet man der unüberwindlichen Schwierigkeit, daß die Meßwerkzeuge zerschmettert werden. Soweit daher Bemühungen vorliegen, die Geschwindigkeit der Drucksteigerung in dem oben dargelegten Sinne zu ermitteln, setzen sie eine bereits stattgefundene, vergleichsweise große Expansion der Explosionsgase voraus und können daher gerade über diejenige Entwicklungsstufe des Explosionsvorganges, in welcher brisante Wirkungen überwiegen, keine entscheidende Aussage machen. Immerhin haben sie zu der wichtigen Erkenntnis geführt, daß die Brisanz keine feststehende Eigenheit mancher Sprengstoffgruppen ist, daß vielmehr alle Hilfsmittel, welche die Geschwindigkeit explosiver Vorgänge in den Bereich der Regelbarkeit

[1]) Nach Abzug von 61 ccm für den ursprünglichen Bohlraum, sowie 17 ccm für die 2 g-Sprengkapsel.

[2]) Sprenggelatine gleich 100 gesetzt. Um überhaupt Vergleiche anstellen zu können, wird ferner die Voraussetzung gemacht, daß von je 100 vorhandener Energie bei Sprenggelatine durch die Ausbauchung 100 nachgewiesen werden.

rücken, wie namentlich geeignete Initialimpulse und Änderungen der physikalischen Beschaffenheit des Explosivstoffes, auch die Brisanz zu erhöhen oder zu vermindern gestatten. Ein treffendes Beispiel hierfür bietet die weiter unten besprochene Verwendung von Schießwolle und von Nitroglyzerin als Treibmittel in Feuerwaffen.

Die Geschwindigkeit der Drucksteigerung bei Explosionsvorgängen erwies sich als bedeutungsvoll zuerst in der Ballistik, und zwar nicht nur im Hinblick auf Erhaltung der Feuerwaffe, sondern auch auf sichere Führung und Fortbewegung des Geschosses. Eine Vorrichtung, welche die Geschwindigkeit der Drucksteigerung in Feuerwaffen näher zu verfolgen gestattet, ist der Rücklaufmesser. Es findet darin Verwertung das Gesetz von der Erhaltung des Schwerpunktes, nach welchem bei einem System starr verbundener Körper, sobald deren Zusammenhang nur durch eine innere Kraft zerstört wird, die einzelnen Teile derart sich fortbewegen, daß der Schwerpunkt des ganzen Systems seine Ruhelage beibehält. Eine andere Meßmethode, deren sich Vieille bediente, um die Geschwindigkeit der Druckzunahme in explodierenden Gasgemischen kennenzulernen, besteht im wesentlichen in der Registrierung der Verschiebung eines Kolbens von bekannter Masse und bekanntem Querschnitt. Aus dem Gesetze der Bewegung des Kolbens kann man seine Beschleunigung unter dem Einflusse der expandierenden Gase ableiten und folglich auch die Kräfte, die in den verschiedenen Abschnitten seiner Bewegung auf ihn einwirken. Bei der Explosion flüssiger oder fester Explosivstoffe kommen wegen deren größerer Dichte in der Regel weit höhere Drucke in Frage, und man benutzt in solchen Fällen eine von Noble angegebene Vorrichtung, von der an anderer Stelle (Seite 95) weitläufiger die Rede sein wird. Sarrau und Vieille untersuchten mit deren Hilfe zahlreiche Explosivstoffe hinsichtlich ihrer Verbrennungsgeschwindigkeit bei steigendem Druck-

und insbesondere richteten sie ihr Augenmerk auf den Unterschied zwischen dem verhältnismäßig langsam verbrennenden Schwarzpulver und den brisanten Sprengstoffen Nitrozellulose, Nitrostärke, Kaliumpikrat sowohl in losem wie in stark komprimiertem Zustande. Eine Benutzung der letztgenannten Stoffe als Treibmittel für Schußwaffen schien hiernach zunächst aussichtslos. Man wußte eben noch nicht, daß eine beträchtliche Verminderung und überhaupt Regelung der Explosionsgeschwindigkeit auch bei brisanten Substanzen keineswegs außerhalb jeder Möglichkeit liege.

2. Die Treibmittel.

Treibmittel, zum Unterschiede von Sprengmitteln, können als Explosivstoffe von geregelter Verbrennungsgeschwindigkeit definiert werden. Eine scharfe Begriffsgrenze zwischen beiden Arten von Explosivstoffen läßt sich freilich nicht ziehen, und solange Schwarzpulver das einzige Treib- und zugleich Sprengmittel war, lag überhaupt kein Bedürfnis vor, ein trennendes Merkmal für beide Gattungen aufzustellen. Jedes beliebige explosible System könnte auch Treibmittel sein, sofern es möglich wäre, die Verbrennungsgeschwindigkeit in jedem Falle nach Wunsch zu regeln. Dies hat man indessen keineswegs in der Hand. Es kommt hinzu, daß für die Verwendbarkeit als Treibmittel nicht allein ballistische Gesichtspunkte maßgebend sind, sondern ebensosehr Sicherheit im Gebrauche, Unveränderlichkeit, Handlichkeit. Aus diesem Grunde ist man, ungeachtet der Bekanntschaft mit zahlreichen chemischen Systemen explosibler Natur, dennoch in der Auswahl beschränkt und im großen und ganzen darauf angewiesen, die Verbrennungsgeschwindigkeit auf dem Wege bestimmter Formgebung zu regeln. Schon das Schwarzpulver hat man zu Scheiben oder Prismen gepreßt, welche von einer Anzahl von Löchern durchbohrt waren. Für rauchlose Pulver wählt man

die Gestalt von Blättchen, Streifen, Rollen, Scheiben, Würfeln, Drähten, Röhren, und zwar alles in verschiedenen Dimensionen je nach den Maßverhältnissen der Munition oder den geforderten ballistischen Leistungen.

Schwarzpulver.

Das Schwarzpulver hat sich allmählich aus dem „griechischen Feuer" entwickelt und war bekannt, ehe man an seinen Gebrauch in Gewehren und Geschützen dachte. Ursprünglich handelte es sich um mehr oder weniger innige Mischungen von Salpeter mit Kohle, Harz, Erdwachs, petroleumhaltigem Sande und ähnlichen brennbaren Dingen teils für den Gebrauch der Feuerwerkerei, teils zur Erzeugung von Brand und Rauch als Kampfmittel. Die Zeit der Verwendung derartiger Gemenge als Treibmittel für Geschosse fällt wahrscheinlich erst in die zweite Hälfte des 13. Jahrhunderts. Sechs Jahrhunderte hindurch blieb Schwarzpulver das einzige chemische Treibmittel, bis es im letzten Jahrzehnt des 19. Jahrhunderts von den gelatinierten rauchlosen Pulvern abgelöst wurde. Gegenwärtig wird Schwarzpulver nur noch in untergeordnetem Maße zu ballistischen Zwecken, meist in Form von Jagdpatronen, verwendet.

Die älteste Zusammensetzung des Schwarzpulvers aus Salpeter, Kohle und Schwefel ist nur geringen Schwankungen im Laufe der Zeiten unterworfen gewesen. Das ehemalige deutsche Militärpulver enthielt 74% Kalisalpeter, 16% Holzkohle und 10% Schwefel; die Kriegspulver anderer Staaten hatten eine ähnliche Zusammensetzung. Zu Jagdpulver pflegt man einen etwas höheren Prozentsatz an Salpeter auf Kosten der Kohle zu nehmen. Einzelne Bestandteile des Schwarzpulvers hat man durch Substanzen von verwandter Wirkungsweise zu ersetzen gesucht, so den Kalisalpeter durch Natronsalpeter, Barytsalpeter und selbst durch Ammoniaksalpeter, ungeachtet

dessen Zerfließlichkeit an feuchter Luft; ferner die Holzkohle durch Holzmehl, Stärkemehl.

Brauchbarkeit und Leistungsfähigkeit des Schwarzpulvers hängen nicht allein von der Zusammensetzung ab, sondern ebenso wesentlich von einer sorgfältigen Zerkleinerung und innigen Mischung der Bestandteile, sowie von der Dichte und gleichmäßigen Beschaffenheit des Pulverkorns.

Das Zerkleinern und Mischen der Pulverbestandteile geschieht meist in zylindrischen Trommeln aus Eisen oder Holz unter Mitwirkung von Bronzekugeln, wobei auf möglichst rasche und gefahrlose Arbeit Rücksicht genommen wird. Schwefel und Salpeter werden häufig zusammen gekleint, weil der Schwefel sich allein zusammenballen würde. Wenn die Ausgangsstoffe sämtlich gekleint sind, werden sie in Trommeln von dickem Sohlleder vermittels Pockholzkugeln in dem geforderten Verhältnis gemischt. Das so erhaltene lockere Pulvermehl ist noch kein brauchbares Pulver, sondern zunächst nur für Feuerwerkszwecke verwendbar; in der Regel wird es daher sofort mit 10—20% Wasser angefeuchtet und auf Kollergängen gedichtet. Weil bei diesem Arbeitsvorgange nicht selten Explosionen eintreten, herrührend von der gleitenden Reibung der schweren Läufer auf dem Teller, hat Gruson die Läufer aufgehängt, so daß sie den Läuferteller niemals berühren können. Die Pulvermasse durchläuft danach ein aus paarweise übereinanderliegenden gerifflten Bronzewalzen bestehendes Quetschwerk, wird alsdann gesiebt und hierauf durch Pressen unter hohem Druck zu festen Kuchen vereinigt. Diese werden zerschlagen und die Stücke zwischen längs- und quergerifflten bronzenen Walzenpaaren in annähernd gleichmäßige Körner gebrochen. Das gekörnte Pulver wird in Trommeln aus Eichenholz geglättet, wobei die scharfen, leicht verletzbaren Ecken der Körner beseitigt und etwaige Hohlräume verstopft werden. Das nunmehr polierte Pulver wird bei 40—50° C getrocknet, entstaubt und vermittels Siebe nach Korngrößen geschieden.

Der letzte Schritt in der Vervollkommnung des Schwarzpulvers wurde durch das Bedürfnis nach größerer ballistischer Wirkung der großen Geschütze, hauptsächlich gegen Panzerschiffe, hervorgerufen. Es gelang, die Verbrennungsgeschwindigkeit des Pulvers beim Schuß nicht nur gleichförmiger zu

machen, sondern sie auch wesentlich zu vermindern, indem man das Kornpulver zu Scheiben, Würfeln, Prismen und dergleichen regelmäßigen Formen preßte. Hervorragende Bedeutung errang in dieser Richtung das braune prismatische Pulver, welches vorübergehend von allen größeren Staaten als Treibmittel für die schwere Artillerie angenommen wurde.

Schwarzpulver besitzt eine schiefergraue Farbe und matten Glanz. Gewehrpulver haben ein spezifisches Gewicht von 1,5—1,6, gepreßte Pulver ein solches von 1,7 bis 1,9. Alle Schwarzpulverarten sind gegen feuchte Luft empfindlich; in Berührung mit Wasser verlieren sie ihren Zusammenhalt, indem der Salpeter herausgelöst wird. Funken oder Flamme entzünden loses Kornpulver sehr leicht und bringen es zur Verpuffung, wobei ein dichter, weißer Rauch entsteht. Wenn Blitzschläge Schwarzpulver trafen, war eine heftige Explosion die fast regelmäßige Folge. Auch Schlag, Reibung, vorzugsweise von Eisen auf Eisen, rufen leicht Explosion hervor. Als Produkte der Explosion von Schwarzpulver sind unter den gasförmigen hauptsächlich Kohlensäure, Kohlenoxyd und Stickstoff zu nennen; der feste Rückstand, welcher als Rauch erscheint und nahezu drei Fünftel des ganzen Pulvergewichtes ausmacht, enthält vorwiegend Kaliumkarbonat, Kaliumsulfat und Kaliumsulfid.

Der Transport von Schwarzpulver unterliegt scharfen Bestimmungen. Loses Kornpulver wird in dichte Zwillichsäcke und diese in mit Papier verklebte starke Kisten oder Tonnen verpackt. Mehlpulver, welches zum Stauben neigt, kommt in lederne Säcke. Für den Versand von prismatischem Pulver waren Kasten üblich, in welchen die Prismen fest aneinander eingelegt und durch Filzplatten voneinander getrennt wurden.

Rauchloses Pulver.

Der Hauptanstoß zu der kulturhistorisch denkwürdigen Bewegung, das Schwarzpulver als Geschoßtreibmittel zu ver-

lassen und zum rauchlosen Pulver überzugehen, kam von der fortgeschrittenen Technik der Handfeuerwaffen. Man hatte erkannt, daß eine weitere Verminderung des Gewehrkalibers eine Reihe ballistischer und taktischer Vorteile gewähren würde, sofern es gelänge, die mit der Verkleinerung des Geschoßdurchmessers verbundene Einbuße an Geschoßgewicht durch vergrößerte Anfangsgeschwindigkeit des Projektils wettzumachen. Was in dieser Richtung mit Schwarzpulver als Treibmittel zu gewinnen war, hatte man um die Mitte der achtziger Jahre des 19. Jahrhunderts erreicht, und man musterte und prüfte von neuem die große Zahl der bis dahin bekannt gewordenen explosiblen Substanzen, ob sie nicht ein geeignetes, leistungsfähigeres Ersatzmittel abzugeben vermöchten. Die Eigenschaft der organischen Nitrate und Nitrokörper, ohne Rauch und Rückstand zu verbrennen, kam hierbei vorteilhaft in Anschlag. Die älteren Versuche v. Lenks, Abels und anderer, Nitrozellulose als Treibmittel heranzuziehen, ihre vielfachen Bemühungen, die lose Faser derselben durch Flechten, Pressen usw. zu verdichten, um sie in eine weniger umfängliche Form zu bringen und gleichzeitig ihre große Verbrennungsgeschwindigkeit in der Feuerwaffe nach Wunsch zu regeln, hatten nicht zum Ziel geführt. Inzwischen aber, seit dem Jahre 1869, hatte sich die Zelluloidindustrie entwickelt und den Beweis geliefert, daß durch Bearbeitung der Nitrozellulose mit Lösemitteln es wohl möglich sei, ihre hohe Verbrennungsgeschwindigkeit und Detonationsfähigkeit wesentlich herabzumindern. Auf dieser Erfahrung fußend, fertigten 1882 Reid und Johnson in Stowmarket ein für Jagdzwecke bestimmtes, teilweise gelatiniertes Nitrozellulosepulver und Duttenhofer in Rottweil 1884 ein völlig gelatiniertes Kornpulver aus nitrierter Zellulose für Militärgewehre, dem dann im Jahre 1886 das erste, aus Schießwolle gefertigte, gelatinierte Blättchenpulver von Vieille folgte. 1889 gelang es Nobel, auch Nitroglyzerin für

Treibmittelzwecke verwendbar zu machen, indem er es als Löseflüssigkeit für die Nitrozellulose mitbenutzte.

Fast alle rauchlosen Pulver bestehen in der Hauptsache aus Nitrozellulose, und zwar ist diese mehr oder weniger vollständig gelatiniert. Eine Analyse von Blättchenpulver ergab 97,5% Nitrozellulose, 0,5% kohlensauren Kalk, 0,5% Azeton und 1,5% Feuchtigkeit. Rauchschwache Jagdpulver pflegen neben Nitrozellulose erhebliche Mengen von Zusätzen zu enthalten, welche, wie Barytsalpeter, Ammoniumbichromat, den Verbrennungsvorgang erleichtern, ohne den Gasdruck in der Feuerwaffe unzulässig zu erhöhen. Die nitroglyzerinhaltigen Schießpulver führen neben Nitrozellulose auch Nitroglyzerin als Hauptbestandteil; beide Explosivstoffe sind in dem Zustande der Gelatinierung aufs innigste miteinander verbunden. Der Ballistit, ein rauchloses Gewehrpulver, enthält auf 3 Teile Nitrozellulose 2 Teile Nitroglyzerin. In dem Kordit, dem englischen Militärpulver, sind auf 65% Nitrozellulose 30% Nitroglyzerin und 5% Vaseline. Die genannten beiden Pulverarten besaßen anfänglich erheblich größere Mengen an Nitroglyzerin, die man aber in dem Maße verminderte, als erkannt wurde, daß ein hoher Nitroglyzeringehalt des Pulvers den Feuerwaffen schädlich sei. In einer dritten Klasse von rauchlosen Pulvern spielen neben Nitrozellulose nitrierte aromatische Kohlenwasserstoffe eine Rolle. Hierher gehört der Plastomenit aus 68% Nitrozellulose, 13% Trinitrotoluol, 6% Dinitrotoluol und 13% Bariumnitrat.

Die Anfertigung des Blättchenpulvers geht von fein gemahlener Nitrozellulose als Grundsubstanz aus. Diese wird zunächst entwässert, sei es durch Trocknen bei höherer Temperatur, sei es mit Hilfe von Spiritus, welcher die in der Nitrozellulosefaser befindliche Feuchtigkeit verdrängt. Die noch alkoholfeuchte Nitrozellulose gelangt hierauf in Knetmaschinen von der gleichen Art, welche auch in der Brotbäckerei zum Kneten des Teiges dient; hierin wird sie mit dem Lösemittel (siehe S. 73) im Verhältnis von etwa 1 Gewichtsteil

Nitrozellulose auf 1 Gewichtsteil des letzteren gemischt und mehrere Stunden lang innig verknetet. Das von den Knetmaschinen vorbereitete Gemenge wird alsdann durch Walzwerke geführt, welche die noch ungleichförmige Masse in homogene und transparente dünne Blätter umwandeln. Wenn diese Blätter das Walzwerk verlassen, haben sie lederartige Beschaffenheit angenommen, so daß sie mit Hilfe einer Schneidmaschine leicht in Streifen und diese weiter in quadratische Blättchen zerschnitten werden können. Manche Fabriken umgehen das umständliche Walzen der Knetmasse, indem sie letztere in eine Presse einführen, aus deren geschlitztem Mundstück die Streifen in gewünschter Breite heraustreten, um sofort selbsttätig in Blättchen zerschnitten zu werden. Während aller dieser Arbeitsvorgänge entweicht andauernd das der Nitrozellulose einverleibte Lösemittel, freilich nicht in dem Maße, daß nicht noch ein nachfolgendes Trockenverfahren bei höherer Temperatur erforderlich würde. Das frisch gefertigte Pulver zeigt rauhe Kanten, läuft nicht gut und ist auch wegen seiner elektrischen Eigenschaften noch nicht verwendungsfähig. Man beseitigt diese Fehler, indem man es einige Zeit unter Zusatz von Graphit in Poliertrommeln behandelt, aus welchen es geglättet und ladefähig herauskommt. Behufs weiterer Verbesserung der ballistischen Leistung wird das noch nicht graphitierte Pulverkorn einer Oberflächenbehandlung unterzogen, indem man es in eine alkoholische Lösung von Kampfer oder mehrfach substituiertem Harnstoff eintaucht; man gewinnt so ein progressiv verbrennendes Pulver.

Gelatinierte Pulver, welche Nitroglyzerin enthalten, werden in etwas abweichender Weise hergestellt, namentlich im Falle, daß die Anwendung eines besonderen Lösemittels für die Nitrozellulose fortfallen soll. Für die Herstellung von Ballistit wird nach dem Verfahren von Lundholm und Sayers eine besondere Art Nitrozellulose nebst der erforderlichen Menge Nitroglyzerin in warmes Wasser gegeben und die eintretende Emulsion bis zur Gelatinierung der beiden Bestandteile umgerührt. Sobald diese beendet ist, wird der größere Teil des Wassers durch Auspressen entfernt und die krümelige Masse so lange durch geheizte Walzen gezogen, bis eine homogene und transparente Platte von lederartiger Beschaffenheit entstanden ist. Schließlich schneidet man daraus Blättchen oder Würfel, denen ein leichter Graphitüberzug gegeben zu werden pflegt. Für die Erzeugung von Kordit ist ein Zusatz von Lösemittel, in der Regel Azeton, zu der Mischung von Nitrozellulose mit Nitroglyzerin erforderlich, weil die verwendete hochnitrierte Zellulose für

sich allein mit Nitroglyzerin keine Gelatine ergeben würde. Die geknetete Masse wird in Pressen vermittels hydraulischen Druckes durch Düsen in einem ununterbrochenen Strange herausgedrückt. Dieser wird schließlich auf die Länge des Pulverraumes der zu ladenden Patronen abgeschnitten. Röhrenpulver werden in ähnlicher Weise wie Kordit erzeugt, mit dem Unterschiede, daß das Mundstück der Preßform aus Hohlkegeln besteht, in welche Dorne hineinragen.

Die für Jagdzwecke bestimmten rauchschwachen Pulver durchlaufen sehr verschiedenartige Herstellungsverfahren. Besonderes Interesse erregte seinerzeit das in Bomlitz bei Walsrode gefertigte gekörnte, völlig gelatinierte Jagdpulver. Nitrozellulose wurde in Knetmaschinen mit Essigäther bis zur vollständigen Auflösung behandelt, sodann warmes Wasser zugefügt und, während die Knetmaschine weiterarbeitete, Wasserdampf in das Gemenge geleitet, wodurch die steife Gelatine in feine Körner zerfiel. Diese wurden mit kochendem Wasser bis zur vollständigen Vertreibung des Lösemittels behandelt und schließlich getrocknet.

In ihren Eigenschaften stimmen die verschiedenen rauchlosen und rauchschwachen Pulver insoweit überein, als durch den Umstand bedingt ist, daß sie einen gemeinsamen Hauptbestandteil, die Nitrozellulose, enthalten; im übrigen aber weisen sie stark abweichende Züge auf. Schon das äußere Aussehen, die Größenverhältnisse, Farbe, Geruch, ebenso die Dichte können außerordentlich wechseln. Blättchenpulver für Gewehre stellen sich als kleine Vierecke von 1—2 mm Seitenlänge und 0,2 bis 0,4 mm Dicke dar, von brauner oder auch silbergrauer Farbe, hornartiger Beschaffenheit und mit einem spezifischen Gewicht von 1,5—1,6. Gewehrkordit andererseits gleicht hellbraunen Schnüren von 1 mm Durchmesser und 40—50 mm Länge, die so weich sind, daß sie sich mit dem Fingernagel schneiden lassen. Unter den für schwere Geschütze bestimmten Röhrenpulvern trifft man auf Formen wie zolldicke Stangen von 1½ m Länge, die eher einem Spazierstocke aus Hartgummi gleichen, als daß sie der üblichen Vorstellung von einem „Pulverkorn" entsprechen. Die gekörnten Jagdpulver haben zwischen 0,5 und 1 mm Korndurchmesser und

sind häufig leicht zerreiblich; unter der Lupe betrachtet, lassen sie alsdann deutlich die faserige Struktur der Nitrozellulose, je nach der Erzeugungsweise des Pulvers in mehr oder weniger gelatiniertem Zustande, erkennen.

Die völlig durchgelatinierten Pulver verhalten sich, sofern sie nur aus Nitrozellulose bestehen, gegen Wasser unempfindlich und können sogar damit gekocht werden, ohne an Brauchbarkeit dauernd Einbuße zu erleiden. Die nitroglyzerinhaltigen Pulver dagegen werden von Wasser verändert, indem an der benetzten Oberfläche das Nitroglyzerin allmählich heraustritt.

An freier Luft entzündet, verbrennen die durchgelatinierten Pulver mit lebhafter Flamme, ohne Explosion; auch Blitzschläge, welche solche Pulver trafen, riefen nur Brände hervor, wohingegen sie Schwarzpulver regelmäßig zur Explosion brachten.

Heftige Schläge, starke Reibung können die Pulvermasse, selbst wenn es sich um völlig durchgelatinierte handelt, zur Explosion bringen; doch bleibt diese auf den getroffenen Teil beschränkt und pflanzt sich nicht fort, so daß auch hierin ein größeres Maß von Sicherheit für das gelatinierte Pulver gegenüber dem Schwarzpulver liegt.

Die Explosionsprodukte der gelatinierten Pulver sind in der Regel nur gas- oder dampfförmige. Sie bestehen vorwiegend aus Kohlensäure, Wasserdampf, Stickstoff und Kohlenoxyd, enthalten daneben aber auch noch freien Wasserstoff und Methan. Während 1 kg Schwarzpulver nicht mehr als 280 l Gas zu entwickeln vermag, beträgt diese Menge bei den rauchlosen Pulvern bis zu 900 l. Gleichzeitig ist auch die entstehende Wärme, welche das Gas ausdehnt, beträchtlicher und erreicht hier fast 1300 Kalorien, bei Schwarzpulver nur die Hälfte davon.

Zum Zwecke der Beförderung müssen die rauchlosen Pulver fest in haltbare Holzbehälter verpackt sein, deren Fugen gut gedichtet sind und keine eisernen Nägel, Reifen oder dergleichen haben. Auch

metallene Packgefäße sind mit Ausnahme der eisernen zulässig, wenn sie nachgiebig genug sind, um die Entstehung eines eine Detonation bedingenden Innendruckes zu verhindern.

Als Vorteile des rauchlosen Pulvers gegenüber dem Schwarzpulver ergeben sich etwa folgende:

1. Zwei- bis dreifache Leistungsfähigkeit, entsprechend der viel größeren Explosionswärme und dem an sich schon größeren Volum der entstehenden Gase.
2. Fortfall der lästigen Rauchentwicklung infolge des Fehlens fester Rückstände im Verbrennungsraum, ein Umstand, der die volle Ausnutzung der Magazingewehre und Schnelladekanonen überhaupt erst ermöglicht.
3. Viel weitergehendes Anpassungsvermögen an jede Schußwaffe durch entsprechende Änderung der Abmessungen und Gestalt des Pulvers.
4. Größere Gleichmäßigkeit in der Wirkung infolge größerer Gleichförmigkeit der Pulvermasse.
5. Größere Unempfindlichkeit gegen Nässe und feuchte Witterung, indem die Pulverbestandteile von Wasser nur wenig oder gar nicht angegriffen werden.
6. Staubfreiheit, auch nach längeren Transporten.
7. Geringere Gefahr bei der Verarbeitung der meist noch feuchten geschmeidigen Pulvermasse.

Als Nachteile des rauchlosen Pulvers gegenüber dem Schwarzpulver kommen in Betracht:

1. Der zwei- bis dreifach höhere Preis, auf gleiches Gewicht mit Schwarzpulver bezogen.
2. Die größere Abnutzung der Läufe und Rohre infolge der höheren Geschoßgeschwindigkeiten. Bei gleichen Leistungen verhält sich rauchloses Pulver nicht ungünstiger als Schwarzpulver.
3. Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen beeinflussen die Verbrennungsgeschwindigkeit von rauchlosem Pulver in stärkerem Maße als die von Schwarzpulver.
4. Geringere Widerstandsfähigkeit gegen hohe Temperaturen. Nitrozellulose wie Nitroglyzerin, die Hauptbestandteile rauchloser Pulver, sind verhältnismäßig leicht zersetzliche chemische Substanzen.

In Berücksichtigung der Tatsache, daß Fortschritte auf dem Gebiete der Pulverfrage jederzeit Fortschritte in der Aus-

Tabelle 7.

Ballistische Vergleiche zwischen Schwarzpulver und rauchlosem Pulver.

	Schwarzpulver				Rauchloses Pulver	
Jahr	1740	1841	1870	1884	1888	1905
Laufdurchmesser des Gewehres mm	20,1	15,4	15,4	11,0	7,9	7,9
Geschoßgewicht . . . . . g	30	31	21,5	25	14,7	10
Pulverladung . . . . . g	14,5	4,8	4,8	5,0	2,6	3 2
Geschoßgeschwindigkeit v_{25} . . m	100—200	280	340	430	620	860
Kinetische Energie des Geschosses a. d. Mündung . . . . . mkg	30—50	140	140	250	310	400
Bestrichener Raum für 1,7 m Zielhöhe . . . . . m	100	200	250	350	550	700
Gezielte Schüsse in der Minute Anzahl	4	5	8	12	20—25	20—25
Größte Visier-Schußweite . . . m	300	560	1200	1600	2000	2000
Gesamtschußweite . . . . . m	1000—1500	2000	2500	3000	4000	4000

bildung der Feuerwaffen nach sich gezogen haben, dürfte eine Übersicht über die Entwicklung der deutschen Gewehre (Tab. 7) hier am Platze sein. Bis zur Gewehrkonstruktion des Jahres 1884 einschließlich bestand die Pulverladung aus Schwarzpulver, von da ab aus rauchlosem Pulver, und dieser Wechsel kam vor allem zur Geltung in der außerordentlich gesteigerten Feuerschnelligkeit von 20—25 gezielten Schüssen in der Minute. In die Augen fallend ist ferner das mit der Änderung des Treibmittels verwirklichte Ziel, die Flugbahn der Geschosse gestreckt zu gestalten durch sehr vermehrte Anfangsgeschwindigkeit des Projektils bei gleichzeitiger Erleichterung desselben. Ungeachtet des letztgenannten Umstandes hat die kinetische Energie des Geschosses an der Gewehrmündung keine Einbuße erlitten, sondern ist im Gegenteil seit den Tagen Friedrichs des Großen bis auf unsere Zeit in überraschendem Grade angewachsen. Im Jahre 1884 erhielt man von 5 g Schwarzpulver eine Mündungsenergie von 250 mkg; 1 g Pulver leistete also eine Arbeit von 50 mkg. Mit Einführung des rauchlosen Pulvers er-

reichte die Arbeitsleistung von 1 g Pulver 112 mkg und im Jahre 1905 gar 123 mkg.

Auf Tabelle 8 sind die wichtigsten Treibmittel nach ihrer Zusammensetzung und ihren Eigenschaften übersichtlich zusammengestellt.

Tabelle 8.

Charakteristik und Zusammensetzung der wichtigsten Treibmittel.

Gattung	Charakteristik	Bezeichnung	Zusammensetzung
Jagdpulver	Leicht entzündliche Körner oder dünne Blättchen von loderer Beschaffenheit, zum Teil nur oberflächlich gelatiniert	Hirschmarke	78% Kalisalpeter, 12% Kohle, 10% Schwefel
		Schulhepulver	24% Schießwolle, 24% Kollodiumwolle, 13% Zellulose, 33% Salpeter, 4% Paraffin, 2% Feuchtigkeit
		E. C.	26% Schießwolle, 28% Kollodiumwolle, 4% Zellulose, 38% Salpeter, 2% Kampfer, 2% flüchtige Substanzen
		Walsrode	99% Nitrozellulose, 1% Essigäther
		Amberit	77% Nitrozellulose, 11% Barytsalpeter, 10% Paraffin, 2% flüchtige Bestandteile
		Französisches Pulver J.	83% Nitrozellulose, 17% Ammonbichromat
		Englisches Jagdpulver Ballistit	62% Kollodiumwolle, 38% Nitroglyzerin
Gewehrpulver	Derbere Körner oder völlig durchgelatinierte Blättchen, Würfel, Schnüre usw. von hoher Dichte	Gewehrpulver M./71	76% Kalisalpeter, 15% Kohle, 9% Schwefel
		Französisches Pulver B.	65% Schießwolle, 27% Kollodiumwolle, 8% Amylalkohol
		Französisches Pulver B. N.	41% Schießwolle, 29% Kollodiumwolle, 19% Barytsalpeter, 8% Kalisalpeter, 2% Soda, 2% flüchtige Bestandteile
		Schwab	98% Nitrozellulose, 2% flüchtige Bestandteile
		Ballistit	59% Kollodiumwolle, 40% Nitroglyzerin, 1% Diphenylamin

Gattung	Charakteristik	Bezeichnung	Zusammensetzung
		Kordit M. D.	65% Schießwolle, 30% Nitroglyzerin, 5% Vaseline
		Plastomenit	68% Nitrozellulose, 6% Dinitrotoluol, 13% Trinitrotoluol, 13% Barytsalpeter
Geschützpulver.	Grobe Körner oder gelochte Prismen von sehr hoher Dichte oder auch völlig durchgelatinierte Streifen, Stäbe, Zylinder, Röhren von beträchtlichen Abmessungen	Braunes prismatisches Pulver	78—80% Kalisalpeter, 19 bis 20% Kohle, 0—3% Schwefel
		Filit	59% Kollodiumwolle, 40% Nitroglyzerin, 1% Diphenylamin
		Marim-Schüpphaus R. N.	85% Schießwolle, 10% Nitroglyzerin, 5% Rizinusöl
			97% Nitrozellulose, 2% Centralit, 1% flüchtige Bestandteile
		Pyrokollodiumpulver	98% Nitrozellulose, 2% flüchtige Bestandteile

3. Die Sprengmittel.

Als Sprengmittel würde man jedes beliebige explosionsfähige System bezeichnen können, wenn nicht äußere Umstände wie Preisfrage, Handlichkeit, Transportsicherheit vielfach von ausschlaggebender Bedeutung wären und die Auswahl an praktisch verwendbaren Substanzen beschränkten.

Nach ihrer chemischen Zusammensetzung betrachtet, sind die Sprengmittel teils chemisch einheitliche Körper (z. B. Pikrinsäure), teils hat man es mit Mischungen aus mehreren explosiblen Individuen (z. B. Sprenggelatine aus Nitroglyzerin und Nitrozellulose) zu tun, oder es handelt sich, wie bei Schwarzpulver, um innige Gemenge aus an sich nicht explosiblen Bestandteilen. Daneben sind in der Sprengtechnik alle möglichen Übergänge zwischen der einen und der anderen Grundform vertreten. Der Gedanke, erst kurz vor dem Verbrauch die miteinander reagierenden Bestandteile zusammenzubringen und hierdurch alle Gefahr beim Umgang mit Sprengstoffen abzuwenden, ist neuerdings in den Flüssige-Luft-Sprengstoffen verwirklicht worden.

Eine wichtige Gruppe von Sprengmitteln, die namentlich für schlagwetterführende Kohlengruben Bedeutung haben, wird im Hinblick auf ihre Eigenart für eine Besprechung an anderer Stelle (Seite 119) zurückgestellt.

Nitroglyzerin.

Nitroglyzerin $C_3H_5(O \cdot NO_2)_3$ ist das Produkt der Einwirkung von Salpetersäure und Schwefelsäure auf Glyzerin. Der Name Nitroglyzerin hat sich allgemein eingebürgert, obwohl er nicht das Wesen der in Frage kommenden Substanz bezeichnet, da Nitroglyzerin keine Nitroverbindung, sondern ein dreifacher Salpetersäureester des Glyzerins ist. Von dem Glyzerin, einem dreiwertigen Alkohole, sind auch Disubstitutionsprodukte denkbar; in der Tat ist es gelungen, Dinitroglyzerin und auch gemischte Ester desselben, z. B. Chlordinitroglyzerin, Formyldinitroglyzerin, fabrikmäßig darzustellen und daraus Sprengstoffe zu erzeugen.

Nitroglyzerin ist zwar schon seit dem Jahre 1846 bekannt — es wurde von Sobrero in Turin zuerst erhalten —, doch erfolgte die ausgedehntere Verwendung desselben als wichtigen Hilfsmittels der Technik erst etwa 20 Jahre später. Nobel in Stockholm gelang es, in der Kieselgur einen geeigneten Aufsaugestoff für die unbequem zu handhabende, gefährliche Flüssigkeit aufzufinden und, was sich als noch bedeutungsvoller für die Sprengtechnik erwies, dieses Gemisch, Dynamit genannt, vermittels Sprengkapseln sicher zur Detonation zu bringen.

Glyzerin, welches zur Nitroglyzerinfabrikation dienen soll, muß möglichst frei von fremden Bestandteilen, namentlich von Wasser sein. Das zur Nitrierung von 100 Gewichtsteilen Glyzerin erforderliche Säuregemisch im Gewichte von 550 besteht aus 56% H_2SO_4, 42% HNO_3 und 2% H_2O und ergibt 224—228 Gewichtsteile reines Nitroglyzerin. Von Wichtigkeit für den regelrechten Verlauf der Nitrierung war die Ausbildung der Nitrierapparate. Während man

anfänglich mit kleinen Tontöpfen arbeitete, die außen von kaltem Wasser umgeben waren, verwendet man gegenwärtig ausschließlich geräumige, allseitig geschlossene Bleigefäße, die mit einer Innenkühlung, einer Durchmischungsvorrichtung, Einlauf- und Ablaufrohren, sowie Thermometer versehen sind. Man verbindet diese Apparate mit großen Sicherheitsbottichen, um im Falle einer plötzlichen Zersetzung des Nitrierguts, die zur Explosion führen könnte, den ganzen Inhalt rasch in viel Wasser zu entleeren. Die Nitrierung wird so geleitet, daß die Temperatur des Säuregemisches niemals über 30° C steigt. Da Nitroglyzerin spezifisch leichter ist als die zur Herstellung desselben dienende Säuremischung, so schwimmt es obenauf, und man benutzt diese Eigenschaft, um es möglichst vollständig von der Säure zu scheiden. Das noch unreine und deswegen nicht haltbare Nitroglyzerin läuft aus den Scheideapparaten in mit Blei verkleidete Holzbottiche ein, in denen es einer gründlichen Waschung mit Wasser und verdünnter Sodalösung unterzogen wird. Das von Säuren und niederen Nitraten des Glyzerins befreite Nitroglyzerin muß filtriert werden, weil es schleimige Bestandteile und sonstige mechanisch anhaftende Verunreinigungen zu enthalten pflegt. Die hierzu dienenden Filter beschickt man mit trockenem Kochsalz, um gleichzeitig beigemengtes Wasser dem Nitroglyzerin zu entziehen.

Nitroglyzerin ist eine farb- und geruchlose ölige Flüssigkeit von 1,60 spezifischem Gewicht. Es schmeckt brennend süß und ist giftig. Von Wasser wird Nitroglyzerin nicht aufgelöst, leicht aber von Alkohol, Äther, Chloroform. Mit Wasserdämpfen ist es flüchtig und teilt sich daher rasch der feuchten Zimmerluft mit, wie man beim Arbeiten mit Nitroglyzerin an bald sich einstellenden Kopfschmerzen gewahr wird. Bei Temperaturen unter 12° C gefriert Nitroglyzerin und hat dann das spezifische Gewicht 1,735. Nitroglyzerin ist zwar nicht gerade leicht entzündlich, aber doch empfindlich gegen plötzliche Erwärmung; darum hat gewaltsames Auftauen gefrorener Nitroglyzerinsprengstoffe schon in zahlreichen Fällen zu verhängnisvollen Explosionen geführt (s. Seite 143). Heftige Schläge, Reibung, überhaupt jede energische Inanspruchnahme kann Detonation zur Folge haben. Unter den Explosionsprodukten von Nitro-

glyzerin findet man nur Kohlensäure, Wasser, Stickstoff und etwas freien Sauerstoff; giftige Gase treten nicht auf, was für die Verwendung in der Technik von Wichtigkeit ist.

Seinen Hauptnutzen gewährt Nitroglyzerin als Bestandteil der gelatinierten Nitroglyzerinpulver, sowie der verschiedenartigen Dynamite.

Flüssiges Nitroglyzerin selbst darf nicht in den Verkehr gebracht werden. Um es befördern zu können, hat Nobel seinerzeit den Vorschlag gemacht, es in Methylalkohol zu lösen. Mowbray füllte es in der gleichen Absicht in Blechflaschen und brachte es darin zum Gefrieren; auf diese letztere Art sind in Amerika Hunderttausende von Kilogramm Nitroglyzerin versandt worden, angeblich ohne bemerkenswerte Unfälle. Dagegen sind Chlordinitroglyzerin und ähnliche, wenig sensible Ester des Glyzerins im flüssigen Zustande zum Versand zugelassen.

Nitrozellulose.

Analog der Bildung von Nitroglyzerin aus Glyzerin, entsteht Nitrozellulose durch Einwirkung von Salpetersäure und Schwefelsäure auf zellulosehaltige Substanzen, als da sind Baumwolle, Holzfaser, Jute, Papier. Das Produkt der Nitrierung ist jedoch nicht in dem Sinne wie Nitroglyzerin eine einheitliche chemische Verbindung; man hat es vielmehr mit einer Stufenfolge von Salpetersäureestern der Zellulose zu tun, deren Merkmale im einzelnen noch keineswegs festliegen. Je nach Konzentration und Zusammensetzung des Säuregemisches treten in den Vordergrund niedrig nitrierte, durch ihre Löslichkeit in Ätheralkohol ausgezeichnete Nitrozellulosen (Kollodiumwolle, Pyrokollodium) oder höher nitrierte, vorzugsweise in Azeton, Essigäther lösliche Nitrozellulosen (Schießbaumwolle, Pyroxylin).

Als Erfinder der Nitrozellulose gilt Schönbein in Basel, der im Jahre 1846 auf dem Wege der Behandlung von Watte mit starker Salpetersäure und Schwefelsäure zuerst Schieß-

baumwolle erhielt. Mit ähnlichen Untersuchungen beschäftigt, gelangte Böttcher in Frankfurt am Main in demselben Jahre ebenfalls zu einer explosiblen Baumwolle und vereinigte sich alsbald mit Schönbein zu gemeinschaftlicher Verwertung der Erfindung. Die Besitzer des anfänglich geheimgehaltenen Verfahrens zögerten nicht, das neue Schießpräparat dem Deutschen Bunde als ein in jeder Beziehung dem Schwarzpulver überlegenes Treibmittel anzubieten. Unter den vom Deutschen Bunde mit Prüfung der Erfindung betrauten Kommissionsmitgliedern befand sich der österreichische Artillerieoffizier v. Lenk, der die Versuche auch dann noch beharrlich fortsetzte, nachdem man zu der Erkenntnis gelangt war, daß die Schießbaumwolle wegen ihrer unzuverlässigen Wirkung und chemischen Veränderlichkeit als Ersatz für Schwarzpulver vorläufig nicht in Frage kommen könne. v. Lenk richtete sein Augenmerk auf eine sorgfältige Reinigung der für die Nitrierung bestimmten Baumwolle, wie nicht minder auf weitgehendes Auswaschen der Säurereste aus der nitrierten Faser; auch versuchte er, die gefahrbringend hohe Verbrennungsgeschwindigkeit der Nitrozellulose durch Zwirnen der Fäden und ähnliche mechanische Mittel herabzusetzen und zu regeln. Zwei gewaltige Explosionen v. Lenkscher Schießwolle in den Jahren 1862 und 1865 bereiteten indessen allen weiteren Versuchen in Österreich ein vorzeitiges Ende. Inzwischen hatte die englische Regierung von der v. Lenkschen Arbeitsweise Kunde bekommen, und wenn es auch Abel in Woolwich nicht gelang, die Nitrozellulose den Bedürfnissen der Ballistik anzupassen, so fand er doch 1865 in der Zerkleinerung derselben in Mahlholländern mit darauf folgender Verdichtung unter hohem Drucke ein geeignetes Verfahren, um sie dem Sprengwesen dienstbar zu machen. Von Bedeutung für diese Art der Verwendung erwies sich die Entdeckung Browns, daß auch feuchte, gepreßte Schießwolle detonationsfähig ist, sofern man sie mit

etwas trockener Schießwolle unter Zuhilfenahme einer Sprengkapsel initiiert. Die von Schönbein und v. Lenk angestrebte Verdrängung des schwarzen Schießpulvers durch Nitrozellulose blieb einer späteren Zeit vorbehalten, nachdem Vieille im Jahre 1886 die Gelatinierung der Nitrozellulose als Vorbedingung für eine genügende Regelbarkeit ihrer Verbrennungsgeschwindigkeit erkannt und von anderer Seite auch die Vorgänge bei der Stabilisierung von Nitrozellulose eine Klärung erfahren hatten.

Die Erzeugung von Nitrozellulose im großen Maßstabe ist umständlich und verhältnismäßig kostspielig, aber im allgemeinen frei von Explosionsgefahr.

Sie beginnt mit der Reinigung und mechanischen Lockerung des Zellulose-Rohstoffes, wofür in erster Linie Spinnereiabfälle, seltener kurzstapelige Rohbaumwolle, Linters genannt, und am wenigsten Holzfaser oder Papier benutzt werden. Unmittelbar vor der Behandlung mit dem Salpetersäure-Schwefelsäuregemisch wird die Baumwolle möglichst vollkommen getrocknet. Die Nitrieroperation geschieht zweckmäßig in geschlossenen, mit einem Dunstabzuge versehenen eisernen Zentrifugen. Unter Berücksichtigung des großen Volumens und Saugvermögens lockerer Baumwolle bedarf man zu 1 Gewichtsteil Baumwolle etwa 50 Gewichtsteile Mischsäure. Die Baumwolle wird in kleinen Portionen sofort unter die Säureoberfläche gedrückt und eine halbe Stunde der Einwirkung des Nitrierbades ausgesetzt. Die verbrauchte Säure wird alsdann abgelassen und, soweit sie nicht freiwillig aus der nitrierten Faser abfließt, durch Zentrifugieren entfernt. Hierbei ereignen sich zuweilen, vorzugsweise an heißen Tagen, plötzliche Ausbrennungen, die mit einem Verlust des ganzen Inhaltes der Zentrifuge verknüpft sind. Bei normalem Verlaufe der Nitrieroperation kommt das Nitriergut in kleinen Mengen unter einen scharfen Wasserstrahl, der es nach geräumigen Waschbottichen hinschwemmt. In diesen wird die Nitrozellulose mit Wasser, nötigenfalls unter Zusatz von etwas Soda, säurefrei gewaschen. Früher glaubte man, die nitrierte Baumwolle bedürfe nur einer vollkommenen Auswaschung, um haltbar zu werden. Seitdem man aber die Ursache der Instabilität von Nitrozellulose erkannt hat in der gleichzeitigen Bildung fremder, zum Teil ebenfalls nitrierter Substanzen, die auch in Wasser unlöslich sind,

aber bei höherer Temperatur viel leichter zerfallen als Nitrozellulose selbst, unterzieht man das Nitriergut einer mehrstündigen Behandlung mit kochendem Wasser. Hierdurch werden jene Beimengungen zerstört und bei dem nachfolgenden Waschprozeß herausgeschafft; die gereinigte Nitrozellulose ist nunmehr stabil. Will man rauchloses Pulver oder gepreßte Schießwolle für Sprengzwecke herstellen, dann folgt ein Zerkleinerungsverfahren in Mahlholländern, welches die Nitrozellulose in eine dem Papierbrei ähnliche Masse verwandelt. Durch Abschleudern in Zentrifugen bis auf etwa 35% Wassergehalt gewinnt man daraus eine handliche, versandfähige Ware. Will man schließlich diese trocknen, so bringt man sie in geheizte Trockenkammern oder verdrängt die Feuchtigkeit, indem man Alkohol durch die Faser preßt. 100 Gewichtsteile Baumwolle liefern etwa 160 Gewichtsteile Schießwolle oder 150 Gewichtsteile der weniger hoch nitrierten Kollodiumwolle. Erwähnung verdient noch der Umstand, daß man in der Schießwollindustrie Wert darauf legt, die gebrauchte Nitriersäure durch Auffrischung auf die ursprüngliche Zusammensetzung wieder verwendungsfähig zu machen, um die Kosten der an sich nicht billigen Fabrikation zu vermindern.

Die langstapelige, noch unzerkleinerte Nitrozellulose ist nach Aussehen und Struktur kaum von gewöhnlicher Baumwolle zu unterscheiden. Im polarisierten Lichte hingegen erscheint sie mit mattem grauen, orangefarbenen bis blauen Schimmer, je nach ihrem Nitrierungsgrade, während Baumwolle hellleuchtend in allen Regenbogenfarben spielt. Nitrozellulose wird in trockener Luft elektrisch. An feuchter Luft zieht sie etwas Wasser an, und zwar merkwürdigerweise in genau umgekehrtem Verhältnis zu ihrem Nitrierungsgrade, Schießwolle von 13% Stickstoffgehalt demnach um 1% weniger Feuchtigkeit als Kollodiumwolle von 12% Stickstoffgehalt. Ihr spezifisches Gewicht beträgt 1,66 und ist höher als das von Baumwolle (1,58), übertrifft sogar dasjenige des Nitroglyzerins (1,60). In kaltem wie in heißem Wasser ist Nitrozellulose völlig unlöslich, leicht löslich aber in Azeton oder Essigäther. Gegenüber einem Gemisch von 2 Teilen Äther auf 1 Teil Alkohol zeigt sie ein charakteristisch verschiedenes Verhalten, je nachdem man

es mit einer hochnitrierten „Schießwolle" oder niedrignitrierten „Kollodiumwolle" zu tun hat; erstere bleibt ungelöst, letztere löst sich leicht darin auf. Eine besondere Art Kollodiumwolle vermag sich auch in Nitroglyzerin zu lösen und bildet damit eine zähe bis halbfeste Gelatine, welche kein Nitroglyzerin abtropfen läßt (S. 80). Zündet man hochnitrierte, gutgetrocknete, langfaserige Schießbaumwolle an freier Luft an, so verbrennt sie außerordentlich rasch mit gelber Flamme, und man kann deshalb kleine Mengen solcher Schießbaumwolle über Schwarzpulver, ohne es zu entzünden, oder auf der offenen Hand gefahrlos abbrennen. Reibung zwischen harten Körpern sowie heftige Stöße bringen Nitrozellulose zur Explosion, ebenso plötzliche Erhitzung. Der in Nitrozellulose in chemischer Bindung vorhandene Sauerstoff reicht zur vollständigen Verbrennung des Kohlenstoffes und Wasserstoffes nicht aus; die Explosionsprodukte von Nitrozellulose enthalten infolgedessen neben Kohlensäure, Wasser und Stickstoff regelmäßig Kohlenoxyd, unter Umständen auch Methan und Wasserstoff, sowie bei ganz unvollkommener Umsetzung Stickstoffoxyde und Blausäure.

Nitrozellulose hat eine sehr umfangreiche Verwendung gefunden, nicht nur als Explosivstoff, sondern zum Teil für industrielle Zweige, die, wie die Herstellung von Zelluloid, photographischen Films, Kunstfäden, dem Gebiete der Sprengtechnik fern liegen. Für Seeminen und Torpedoladungen bevorzugt man die unter sehr hohem Drucke gepreßte Schießwolle, die sich, dem Holze vergleichbar, sägen, bohren, abdrehen läßt, wobei während der Bearbeitung ständig Wasser auf den Schießwollkörper auftropft, da sonst die Gefahr einer Entzündung durch das sich heiß laufende Werkzeug gegeben wäre. Nitrozellulose ist ferner Bestandteil vieler Sprengstoffmischungen und bildet vor allem die Grundlage der gelatinierten rauchlosen Schießpulver.

Der Versand von Nitrozellulose erfolgt in mit Zinkblech ausgeschlagenen Holzkisten, welche ein Verdunsten von Wasser aus der mit mindestens 25% Feuchtigkeit beladenen und fest eingestampften Masse nicht zulassen. Trockene Nitrozellulose ist in loser Form wegen der mit ihrer leichten Verstaubbarkeit und Empfindlichkeit gegen Stöße verbundenen Gefahr zum Transport nicht geeignet.

Nitrierte aromatische Verbindungen.

Die im Jahre 1788 von Haußmann entdeckte Pikrinsäure $C_6H_2(NO_2)_3 \cdot OH$ wurde als ein besonders echter Farbstoff für Seide und Wolle geschätzt, lange bevor man ihre wertvolle Eigenschaft als sprengkräftige Substanz erkannte. Erst 1872 wies Sprengel auf die Detonationsfähigkeit der Pikrinsäure hin und Turpin hob 1886 ihren Wert als Granatfüllung hervor.

Pikrinsäure wird durch Nitrierung aus Karbolsäure gewonnen.

Man erhitzt Karbolsäure und konzentrierte Schwefelsäure zu gleichen Teilen in mit Rührwerk versehenen eisernen Gefäßen mittels Dampfes auf 100—120° C, und sobald die Mischung in wenig kaltem Wasser leicht löslich ist, läßt man sie abkühlen und gibt die zweifache Menge Wasser hinzu. Das Reaktionsprodukt, Phenolsulfonsäure, läßt man zu verdünnter, etwa 60prozentiger Salpetersäure, welche sich in Steinzeugtöpfen befindet, hinzufließen. Im Anfange verläuft die Umsetzung sehr stürmisch unter Freiwerden von salpetrigen Dämpfen; sobald sie aber nachläßt, erwärmt man das die Nitrierbehälter umgebende Wasser durch Zuleiten von Dampf. Nach dem Erkalten scheidet sich die Pikrinsäure als kristallinischer Kuchen aus. Sie wird dann durch Zentrifugieren von der Mutterlauge getrennt, mit warmem Wasser gewaschen und nötigenfalls aus heißem Wasser umkristallisiert.

Pikrinsäure bildet glänzendgelbe Blättchen, welche sich etwas in Wasser, leichter in Benzol lösen und die menschliche Haut, wie überhaupt tierische Gewebe, intensiv gelb färben. Sie hat einen außerordentlich bitteren Geschmack und ist giftig. Pikrinsäure schmilzt bei 122,5° C ohne Zersetzung, eine Eigenschaft, von der zur Füllung von Sprenggeschossen Gebrauch ge-

macht wurde. Ihr spezifisches Gewicht erreicht fast 1,7, liegt also verhältnismäßig sehr hoch. Angezündet, verbrennt Pikrinsäure langsam mit stark rußender Flamme. Durch vorsichtiges Erhitzen läßt sie sich sublimieren, während plötzliche Erhitzung zur Explosion führen kann. Gegen Reibung, Stoß und Schlag ist sie weit weniger empfindlich als Nitroglyzerin oder Nitrozellulose; doch besitzt sie als Säure die Fähigkeit, mit Metallen oder basischen Substanzen Verbindungen einzugehen, welche, wie das Bleipikrat, durch hohe Sensibilität ausgezeichnet sind, leicht explodieren und zugleich als Initialimpuls für die Pikrinsäure selbst eine unerwünschte Rolle spielen können. Ihre Explosionsprodukte stimmen mit denen von Nitrozellulose nahezu überein.

Pikrinsäure diente bis vor kurzem zu Sprengpatronen und, im geschmolzenen Zustande, als Granatfüllung; sie bildete den Hauptbestandteil des französischen Melinit, des englischen Lyddit, der japanischen Schimose. Auch das Ammoniumsalz sowie die ihr nahe verwandte Kresylsäure wurden für ähnliche Zwecke benutzt.

In den letzten Jahren hat die Pikrinsäure für Sprengzwecke dem Trinitrotoluol $C_6H_2(NO_2)_3 \cdot CH_3$ weichen müssen, einer Substanz, die zwar etwas geringere Sprengkraft besitzt als Pikrinsäure, aber den Vorzug bietet, Metalle nicht anzugreifen, leichter schmelzbar und weniger stoßempfindlich zu sein.

Trinitrotoluol wird in mehreren Stufen aus Toluol erhalten, indem man dieses zunächst in Mononitrotoluol überführt, welches weiter mit Salpeterschwefelsäure in der Wärme in Dinitrotoluol übergeht, das nun seinerseits in schwefelsaurer Lösung mit starker Salpetersäure zu Trinitrotoluol nitriert wird.

Trinitrotoluol bildet hellgelbe, geruchlose Kristalle, die am Lichte nachdunkeln und die Haut etwas färben. Es schmilzt in reinem Zustande bei 81,5° C ohne Zersetzung unter be-

trachtlicher Volumenvergrößerung. Seine Dichte beträgt 1,65, ist also etwas kleiner als die der Pikrinsäure. Die Explosionsgase bestehen zu mehr als der Hälfte aus Kohlenoxyd; daneben enthalten sie hauptsächlich Stickstoff, Wasserdampf und freien Kohlenstoff, welcher die Sprengwolke schwarz färbt. Eine Sprengladung von 10 kg Trinitrotoluol entwickelt genügend Kohlenoxyd, um den Aufenthalt in einem Raume von 1000 cbm Inhalt unmöglich zu machen.

Trinitrotoluol ist Bestandteil vieler Sprengstoffe und wird für sich allein als Sprengladung in Minen und Granaten sowie als Festlegemasse für die Füllkugeln in Einheitsgeschossen verwandt. Das sogenannte flüssige Trinitrotoluol, ein flüssiges Gemenge nitrierter Toluole, eignet sich besonders als Zusatz zu Sprengstoffmischungen, um sie plastisch zu machen.

Das Tetranitromethylanilin, kurz Tetryl genannt, $C_6H_2(NO_2)_3 \cdot N(NO_2) \cdot CH_3$ dient, ebenso wie Trinitrotoluol zur Füllung von Detonationszündschnüren und im Verein mit Knallquecksilber oder Bleiazid zur Herstellung sehr kräftiger Sprengkapseln. Es wird durch Behandeln von Dimethylanilin mit Schwefelsäure und Salpetersäure als blaßgelbe, kristallinische, bei 132° schmelzende, gegen Schlag ziemlich empfindliche Substanz gewonnen.

Zur Beförderung der nitrierten aromatischen Verbindungen dienen starke, dichte Holzbehälter und zwar unter Ausschluß von Blei für den Versand der Pikrinsäure und anderer wasserlöslicher Nitrokörper.

Gurdynamit.

Obwohl das Nitroglyzerin unter der Bezeichnung „Sprengöl“ willige Aufnahme in die Sprengtechnik fand, so bildete doch seine flüssige Beschaffenheit, die dadurch bedingte Unbequemlichkeit und Gefahr bei Handhabung und Transport ein ernstes Hindernis für ausgedehntere Verwendung desselben. Seit

dem Jahre 1863 war daher Nobel bemüht, Nitroglyzerin durch Vermengung mit festen, porösen Körpern, wie Schwarzpulver, Kohle, Papierbrei, in eine Form zu bringen, in welcher es zu gefahrlos zu handhabenden Patronen verarbeitet werden könne. Durch Zufall soll das ausgezeichnete Aufsaugevermögen von Kieselgur für Nitroglyzerin entdeckt worden sein, als nämlich bei einer Verfrachtung flüssigen Nitroglyzerins in Blechkannen eine davon undicht wurde und das ausfließende Nitroglyzerin von der einhüllenden Kieselgur aufs vollständigste aufgenommen wurde. Nobel nannte die aus Nitroglyzerin mit Kieselgur hergestellte Masse „Dynamit", und diese Bezeichnung ist seitdem üblich geworden für alle Sprengmittel aus Nitroglyzerin und irgendeinem Aufsaugstoff, der jenes am Abtropfen verhindert.

Um Kieselgurdynamit herzustellen, werden Nitroglyzerin und Kieselgur in dem gewünschten Verhältnis miteinander gemischt, und zwar nimmt man für den gebräuchlichsten, den 75prozentigen Gurdynamit, 3 Teile Nitroglyzerin auf 1 Teil Kieselgur. Dies Gemenge muß die Konsistenz von Brotkrume annehmen, nachdem es wiederholt durch Drahtsiebe gerieben ist, wodurch auch größere Gleichmäßigkeit der Mischung erzielt wird. Die so vorbereitete Masse kommt in die Patronenpresse und verläßt sie in Gestalt von Würsten von etwa 10 cm Länge bei in der Regel 19 mm Durchmesser, die sofort in Paraffin- oder Pergamentpapier eingewickelt werden.

Gurdynamit ist eine geruchlose, gelbe bis braune, plastische Masse von 1,5—1,7 spezifischem Gewicht. Am Feuer entzündet, brennt er mit lebhafter, leuchtender Flamme ab; bei größeren Mengen, wie auch unter Einschluß, steigert sich die Verbrennung leicht bis zur Explosion. In bezug auf Empfindlichkeit gegen Stoß und Reibung verhält sich Gurdynamit nicht erheblich günstiger als Nitroglyzerin selbst und teilt auch sonst dessen Eigenschaften, unter anderem die leichte Gefrierbarkeit, welche den Gurdynamit eines seiner besten Vorzüge, der Plastizität und Schmiegsamkeit an die Bohrlochswandung, beraubt und

ferner dessen gute Imitierbarkeit in Frage stellt. Feuchtigkeit ist dem Gurdynamit schädlich, da sie das Nitroglyzerin verdrängt und in Freiheit setzt; für nasse Bohrlöcher muß man deswegen von der Verwendung des Gurdynamits absehen. Die Bedeutung dieses Sprengmittels hat überhaupt sehr nachgelassen, seitdem die leistungsfähigeren gelatinierten Dynamite auf fast allen Gebieten der Sprengtechnik die Vorherrschaft gewonnen haben.

Der Frachtverkehr mit Gurdynamit wie auch dynamitartigen Sprengmitteln im allgemeinen erheischt die Innehaltung sehr weitgehender Vorschriften.

Die Patronen sind durch eine feste Umhüllung von Papier in Pakete zu vereinigen und müssen vermittels Wellpappe schichtweise in ihrer Lage festgehalten werden. Die Pakete sind in hölzerne, haltbare und dem Gewichte des Inhaltes (meist 25 kg in 10 Paketen) entsprechend starke Kisten oder Tonnen, deren Fugen so gedichtet sind, daß ein Ausstreuen nicht stattfinden kann, und welche nicht mit eisernen Reifen oder Bändern versehen sind, fest zu verpacken. Die Behälter, deren Bruttogewicht 35 kg nicht übersteigen darf, müssen mit der Aufschrift „Dynamitpatronen" versehen sein, sowie Angabe des Inhalts und Fabriksmarke tragen.

Auch die Gesetzgebung hat dem Gurdynamit, als dem Vertreter aller brisanten Substanzen, besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Als im Anfange der achtziger Jahre des 19. Jahrhunderts die anarchistischen Dynamitattentate in Belgien, England und schließlich auch in Deutschland um sich griffen, entschloß sich die deutsche Gesetzgebung, dem gemeingefährlichen Treiben mit Dynamit und ähnlichen Sprengmitteln durch gewerbepolizeiliche und strafrechtliche Bestimmungen entgegenzutreten. Das Ergebnis war das Gesetz vom 9. Juni 1884 „gegen den verbrecherischen und gemeingefährlichen Gebrauch von Sprengstoffen". Durch dieses Gesetz wird mit harten Strafen auch derjenige bedroht, der sich unbefugterweise mit Explosivstoffen zu schaffen macht.

Wie leicht man mit dem Sprengstoffgesetz in Berührung geraten kann, lehrt folgendes Vorkommnis: Kollodiumwolle, mit 50% Alkohol angefeuchtet, ist nicht explosionsfähig (S. 17) und deshalb kein Sprengstoff im Sinne des Sprengstoffgesetzes, solange durch geeignete Maßnahmen die Verdunstung des Alkohols verhindert wird. Um solche Kollodiumwolle zur Herstellung von Flaschenlack zu benutzen, wurde sie in einem Laboratorium abends auf Tische ausgebreitet, so daß der in ihr enthaltene Alkohol sich verflüchtigen konnte. Die Kollodiumwolle war nun ein Sprengstoff geworden, und da der Geschäftsführer keine polizeiliche Erlaubnis zur Aufbewahrung und Benutzung von Sprengstoffen besaß, wurde er auf Grund des Sprengstoffgesetzes zu drei Monaten Gefängnis verurteilt.

Sprenggelatine.

In Verfolg seiner Versuche, für Nitroglyzerin ein geeigneteres Aufsaugmittel als Kieselgur zu finden, machte Nobel 1875 die Entdeckung, daß schon geringe Mengen einer auf bestimmte Weise gewonnenen Kollodiumwolle genügen, um das flüssige Nitroglyzerin in eine Masse von gelatineartiger Beschaffenheit überzuführen, welche weit kräftiger als Gurdynamit wirkt, nicht unvergaste Rückstände läßt und kein Nitroglyzerin an Feuchtigkeit abgibt. Dies Präparat war die „Sprenggelatine".

Die Sprenggelatine besteht aus 90—93% Nitroglyzerin und 7—10% einer besonderen Art Kollodiumwolle, welche beide unter Erwärmen und Umrühren zu einem homogenen, durchsichtigen und elastischen Gummi vereinigt sind.

Eine Vorstellung von dem wechselseitigen Zustande der genannten Bestandteile, Nitroglyzerin und Nitrozellulose, kann man sich verschaffen, indem man auf dem Wasserbade 0,2 g Agar-Agar in 7,8 g Glyzerin auflöst, gut durchrührt und erkalten läßt. Man erhält eine gelatinöse, in der Wärme fadenziehende, in der Kälte elastische Masse, deren äußeres Ansehen vollkommen dem der Sprenggelatine gleicht und die wahrscheinlich auch beide Komponenten in derselben Art gebunden zeigt, welche in der Sprenggelatine vorliegt.

Sprenggelatine ist eines der kräftigsten Sprengmittel und deshalb zur Bewältigung sehr fester, zäher Widerstände be-

sonders geeignet. Gegen Stoß und Reibung ist die gelatinöse Masse beträchtlich weniger empfindlich als Gurdynamit; ein Zusatz von wenigen Prozenten Kampfer kann sogar fast völlige Unempfindlichkeit bewirken. Die Explosionsprodukte der Sprenggelatine enthalten nur Kohlensäure und Wasser. Auch dieses Sprengmittel hat, ebenso wie Gurdynamit, den gelatinierten Dynamiten neuerer Art weichen müssen, namentlich im Bergbau, da es wegen seiner federnden Beschaffenheit den Bohrlochsraum nicht gut ausfüllt und überdies in unerwünschter Weise zermalmend wirkt. Die eigenartige Bindungsform zwischen Nitroglyzerin und Nitrozellulose, welche die Sprenggelatine kennzeichnet, kehrt aber auch in den gelatinierten Dynamiten neuerer Zusammensetzung wieder.

Gelatinedynamit.

Von sämtlichen Nitroglyzerin-Sprengmitteln ist der Gelatinedynamit mit seinen Abarten das wichtigste. Die bequeme Handhabung, gute Arbeitsleistung, fast überall gleich vorteilhafte Verwendung und nicht zum wenigsten Billigkeit haben dem Gelatinedynamit diesen Vorzug verschafft.

Die Zusammensetzung des Gelatinedynamits ist eine in weiten Grenzen schwankende, und ebenso sind auch dessen Konsistenz und Plastizität den jeweiligen Zwecken angepaßt. Ein viel gebrauchter Gelatinedynamit besteht aus 62,5% Nitroglyzerin, 2,5% Kollodiumwolle, beide miteinander durch Gelatinierung verbunden, 25,5% Natronsalpeter, 8,7% Mehl, 0,8% Soda. Manche Gelatinedynamite, wie die Gelignite, enthalten an Stelle von Natronsalpeter Kalisalpeter; auch Ammonsalpeter kommt darin vor.

Zur Herstellung von Gelatinedynamit wird zunächst Nitroglyzerin mit der erforderlichen Menge Kollodiumwolle und dann noch mit dem Zumischpulver, welches eine innige Mischung der übrigen Bestandteile darstellt, in Knetmaschinen sorgfältig durchgearbeitet. Die Patronierung erfolgt in gleicher Weise wie bei Gurdynamit.

Da Gelatinedynamit, vorzugsweise solcher, welcher hygroskopische Salpeterarten enthält, gegen Feuchtigkeit nicht unempfindlich ist, so kommt er sofort in eine wasserdichte Umhüllung aus paraffiniertem Papier.

Sprengpulver.

Die erste sichere Nachricht über die Verwendung eines Sprengmittels im Bergbau findet sich nach Guttmann im Protokolle des Schemnitzer Berggerichtsbuches vom 8. Februar 1627, wonach ein Tiroler, namens Kaspar Weindl, an diesem Tage die erste Sprengung im Ober-Biberstollen in Ungarn durchgeführt hat. Im Jahre 1632 wurde sodann die Sprengarbeit bei Clausthal, 1645 bei Freiberg und seit 1670 auch in außerdeutschen Ländern eingeführt. Zwei Jahrhunderte hindurch blieb Schwarzpulver das einzige Sprengmittel, bis die Neuzeit in rascher Folge Nitroglyzerin, Schießbaumwolle, Pikrinsäure zur Geltung brachte und das Schwarzpulver immer weiter in eine untergeordnete Rolle zurückdrängte.

Sprengpulver enthält weniger Salpeter und dafür mehr Kohle als schwarzes Schießpulver; seine Zusammensetzung ist 65—75% Kalisalpeter, 10—15% Schwefel und 15—20% Kohle. Der in England als Sprengpulver für Kohlengruben viel gebrauchte Bobbinit ist ein schwarzpulverähnliches Gemenge aus 63—65% Kalisalpeter, 19—21% Holzkohle, 1—2% Schwefel, 7—9% Stärkemehl, 3—4% Paraffin. Aus wirtschaftlicher Rücksicht wird auch an Stelle von Kalisalpeter der billigere Natronsalpeter verwendet, so im Sprengsalpeter, Petroklastit und ähnlichen Abarten von Sprengpulver.

Chlorat- und Perchloratsprengstoffe.

Während Sprengstoffe, welche chlorsaure Salze enthalten, ehemals wegen ihrer Empfindlichkeit gegen Stoß und Reibung wenig Beachtung fanden und sogar vom Transporte ausgeschlossen waren, hat in den letzten Jahren die Fabrikation der

Chlorat- und Perchloratsprengstoffe einen großen Umfang angenommen. Indem man die Chlorate mit fetten Ölen und anderen geeigneten Substanzen innig vermischte, ist es gelungen, ihre Sensibilität so weit abzuschwächen, daß sie sich gegen Stoß und Reibung nicht empfindlicher verhalten als Gelatinedynamit.

Einer der bekanntesten Chloratsprengstoffe ist der Cheddit, welcher in vielen Abarten in den Handel kommt; der Typ 60 besteht aus 79% Kaliumchlorat, 1% Nitronaphthalin, 15% Dinitrotoluol, 5% Rizinusöl. Er stellt eine feinkörnige Masse dar, die sich infolge ihrer plastischen Beschaffenheit gut der Bohrlochswandung anpaßt. Um die gefährliche Arbeit des Mischens von Chloraten mit festen brennbaren Substanzen zu umgehen, empfahl Sprengel 1873, das Kaliumchlorat zunächst in poröse Würfel oder Kuchen zu pressen und diese alsdann brennbare Flüssigkeit aufsaugen zu lassen. Nach demselben Vorbilde ist der Miedziankit, bestehend aus 90% Kaliumchlorat und 10% Petroleum, gefertigt.

Noch reicher an Sauerstoff als die Chlorate, gleichwohl beständiger, sind die Perchlorate, ausgezeichnet durch diese Eigenschaften, welche sie für die Verwendung als Sprengstoffkomponente wertvoll machen. Der Permonit hat die Zusammensetzung: 37% Kaliumperchlorat, 38% Ammonsalpeter, 7% Natronsalpeter, 10% Trinitrotoluol, 7% Mehl, 1% Leimglyzeringelatine.

Flüssige-Luft-Sprengstoffe.

Im Jahre 1897 von der Gesellschaft für Lindes Eismaschinen angestellte Versuche hatten gelehrt, daß Gemenge aus flüssiger Luft mit verbrennlichen Substanzen, z. B. Watte, ein dem Schwarzpulver und den brisanten Sprengmitteln ähnliches Verhalten zeigen. Wenn Mischungen solcher Art, Oxyliquit genannt, nur langsam in die Technik Eingang fan-

den, so erklärt sich dies aus der großen Flüchtigkeit der flüssigen Luft und der wechselnden Beschaffenheit der damit hergestellten Sprengstoffe, welche dazu zwingt, sie erst unmittelbar vor Ort fertig zu machen.

Auf die Fähigkeit, flüssige Luft in genügender Menge aufzunehmen und sie ausreichend lange zu bewahren, kommt es bei Wahl des oxydablen Bestandteils von Sprengluftpatronen in erster Linie an. Als vorteilhafte Aufsaugstoffe haben sich feinporige Körper, wie Korkkohle, Ruß, Korkmehl, Sägemehl, auch Kieselgur mit kohlenstoffhaltigen Zusätzen, erwiesen. Da poröse Kohle weniger Sauerstoff zur völligen Verbrennung bedarf, als sie in Gestalt der flüssigen Luft aufzunehmen vermag, können ihr beträchtliche Mengen anderer Kohlenstoffträger, wie Petroleum, Paraffin, Naphthalin, beigemengt werden. Den Aufsaugstoff füllt man in Hülsen aus Papier, Leinwand oder ähnlichen Stoffen durchlässiger Beschaffenheit und verwendet zuweilen mehrfache Patronenhüllen, welche den Zweck haben, die Lebensdauer des Sprengstoffs zu verlängern. Nach Ausrüstung der Patrone mit dem Zünder wird sie in ein mit flüssiger Luft beschicktes Tauchgefäß eingesenkt und darin bis zur völligen Tränkung belassen.

Frische Sprengluftpatronen sind durch kräftige Wirkung ausgezeichnet, die derjenigen anderer Sprengmittel nicht nachsteht. Das gute Wirkungsvermögen bleibt aber nur kurze Zeit erhalten, und wenn die flüssige Luft im Verlaufe von 15 bis 30 Minuten aus der Patrone verdampft ist, besitzt diese keine Sprengfähigkeit mehr. Ihre leichte Veränderlichkeit hat weiter zur Folge, daß die Patrone bald nicht mehr vollständig detoniert oder mit großer Flamme ausbrennt und dann Unfälle veranlassen kann. Andererseits darf es als Vorzug gelten, daß der Sprengstoff von sehr begrenzter Lebensdauer ist, sowie daß die Gefahren, welche die übrigen Sprengstoffe während der Beförderung und Lagerung darbieten hier fortfallen, indem

nur unexplosibles Patronenmaterial in den Verkehr gelangt.

Gegen Schlag und Reibung sind die Flüssige-Luft-Sprengstoffe den empfindlicheren Sprengmitteln zu vergleichen; die petroleumhaltigen teilen mit ähnlich gebauten Chloratsprengstoffen die Fähigkeit, schon durch Flammenzündung zur Detonation gebracht werden zu können. Ihre Explosionsgase bestehen nur aus Kohlensäure und Wasser.

Über die praktische Leistungsfähigkeit der Sprengmittel lassen sich nur wenige, allgemein zutreffende Angaben machen. Der gesamte Explosionsverlauf und insbesondere die Geschwindigkeit der Druckentwicklung sind ja nicht nur von dem chemischen oder physikalischen Charakter des Explosivstoffes abhängig, sondern ebensosehr von der Beschaffenheit des umgebenden Mediums, dessen Widerstand überwunden werden soll. Je nachdem es sich um die Förderung weicher Kohle oder mehr oder weniger harten Gesteins, um die Zertrümmerung elastischen Holzes oder zähen Eisens, um Sprengungen an freier Luft oder bei kräftiger Verdämmung handelt, wird auch die Leistung eines gegebenen Sprengmittels ungleicher Beurteilung unterliegen können. Lediglich um eine Andeutung von den in Frage kommenden Verhältnissen zwischen Sprengstoffverbrauch und Sprengleistung zu geben, sei angeführt, daß nach den Aufzeichnungen beim Bau des Gotthardtunnels im Jahre 1880 auf je 1000 kg ausgesprengten Felsbodens — es war mittelharter Gneisgranit — etwa 1 kg Sprengstoff kam. Für Gurdynamit stellte sich der Verbrauch auf etwa 3,3 kg pro cbm Gestein, für die kräftigere Sprenggelatine auf nur 2,3 kg. Die tatsächliche Ausnutzung der dem Sprengmittel innewohnenden Energie ist in der Regel eine überraschend geringe; man schätzt sie günstigenfalls auf 15—20% der rechnungsmäßigen Leistungsfähigkeit. Nicht viel besser verhalten sich in dieser Beziehung die Treibmittel; die nutzbare Arbeit des

Geschosses an der Laufmündung einer Feuerwaffe erreicht allerhöchstens 35% der vorhandenen Pulverenergie. Auch die Grenze der Auswertung unserer Brennstoffe für den Zweck der Leistung von mechanischer Arbeit kann mit 32% (im Dieselmotor) angesetzt werden.

Die Nützlichkeit der Sprengstoffe für technische Zwecke, die Möglichkeit, mit deren Hilfe Leistungen zu vollbringen, welche auf andere Weise und mit anderen Mitteln unausführbar oder nur unter Aufwand außerordentlich großer Mengen an Zeit und Geld möglich gewesen wären, kann hier nicht besser zur Anschauung gebracht werden, als durch Wiedergabe von Berichten über bestimmte, tatsächlich ausgeführte Sprengungen, wobei hinzugefügt sei, daß ähnliche Fälle sich auf dem Erdenrunde wohl alle Tage abspielen.

In der Ostsee zwischen den Inseln Bornholm und Rügen befindet sich der „Adlergrund", eine Untiefe, die durch große, auf dem Meeresgrunde liegende ehemalige Gletscherblöcke gebildet wird. An den seichtesten Stellen hat die preußische Regierung behufs Vertiefung Steine vermittels Schiffe, die mit Kränen versehen waren, heraushoben lassen. Taucher stiegen hinunter, schlugen Ketten um die Steine oder befestigten Klauen an dieselben; die Steine wurden gehoben. Um nun die schwersten Blöcke zu lockern und bequemer die Hebewerkzeuge an ihnen befestigen zu können, wurden häufig auf dem Meeresgrunde bei 4—6 m Tiefe Ladungen von je 10 kg Schießwolle zur Detonation gebracht. Diese Explosionen lockerten je zwei bis vier Blöcke von etwa 2 cbm Größe, drängten sie auch wohl vollständig aus ihrem Lager heraus, so daß sie hernach leicht gehoben werden konnten.

In einem strengen Winter hatten sich auf dem Rhonefluß kurz vor Lyon Eismassen von durchschnittlich 18—20 cm Stärke angesammelt, die beseitigt werden sollten, um den freien Abfluß des Wassers zu sichern und bei plötzlich eintretendem Tauwetter einer Überschwemmung vorzubeugen. Als man auf der Oberfläche der Eisschollen Dynamitpatronen, mit einer leichten Tonschicht bedeckt, zur Explosion brachte, wurden nur wenig befriedigende Wirkungen erzielt. Man schnitt hierauf Rillen ins Eis von etwa 1 m Länge und 4—5 cm Tiefe in einer Entfernung von 14 m vom Rande der

Scholle und füllte sie mit etwa 210 g Dynamit, welches mit einer Sandschicht von 3—4 cm Höhe bedeckt wurde. Unmittelbar nach der Explosion zeigten sich im Eise Sprünge von 40—50 m Länge; einer davon erstreckte sich sogar auf 220 m. Aber auch dieses Verfahren führte noch nicht zu dem gewünschten Ziele. Es wurden deshalb Löcher von 8—10 cm Durchmesser senkrecht ins Eis gebohrt und Dynamitpatronen von 17—30 g Gewicht hindurchgesteckt bis etwa 70 cm unter die Oberfläche des Eises. Auf solche Weise gelang es ohne Schwierigkeit, täglich eine Fläche von 50000 qm des dicken Eises zu zertrümmern.

Der Dampfer Milwaukee, ein großes Viehtransportschiff von 7300 Registertonnen, strandete am 16. September 1898 während eines Nebels an den Klippen der Crudenbucht in der Nähe von Aberdeen. Da das Schiff, welches mit Wasserballast fuhr, vorn nur 10 Fuß, hinten aber 20 Fuß Tiefgang hatte, demnach vorn erheblich höher aus dem Wasser herausragte als hinten, so begann es auf dem Felsen wie auf einer schrägen Bahn zu gleiten, wobei der Bugteil auf eine Länge von 80 Fuß aufriß, während das Heck zwischen den Klippen fest eingeklemmt wurde. Dieser hintere, wertvollere Teil des Schiffes mit seinen Kesseln und Maschinen blieb in gutem Zustande, und so wurde beschlossen, ihn von dem Vorderende abzutrennen und, wenn möglich, zu retten. Der Dampfer, welcher 470 Fuß Länge und 56 Fuß Breite besaß, wurde mittschiffs zerschnitten, indem man Reihen von Sprengpatronen an den eisernen Platten und Verbänden anlegte und zur Explosion brachte. Im ganzen wurden 850 kg Dynamit in 50 bis 60 getrennten Ladungen verbraucht. Nach Beendigung der Sprengarbeit überließ man den vorderen Teil des Schiffes dem Spiel von Wind und Wellen, während das Heck abgeschleppt wurde und auch glücklich am 4. Oktober 1898 im Dock anlangte. Von dem Gesamtwerte des Schiffes im Betrage von 1½ Millionen Mark hatte man auf diese Weise etwa 800000 Mark gerettet.

In Schwechat mußte im Jahre 1876 ein Hochofen ausgeblasen werden, da sich eine Gußsau von selten großem Umfange darin gebildet hatte. Ihr unterer halbkugelförmiger Teil bestand aus ungemein zähem, an Festigkeit dem Bessemerstahl fast gleichkommendem Eisen und hatte bei 4 m Durchmesser eine Dicke von 0,65 m. Der obere zylindrische Teil dieser Hochofensau enthielt ein Gemisch von Eisen, Schlacke, Stein, Graphit und war im Mittel 2,15 m hoch und 2,45 m im Durchmesser. Da dieser obere Teil ohne Wert war, so sollte er nur von der unteren Kalotte abgetrennt und vergraben

werden, die untere große Metallmasse aber sollte mit möglichst geringem Aufwande an Zeit und Kosten zerteilt werden, um das Material der weiteren Wiederverwendung zuzuführen. Die Rücksicht auf den Hochofen selbst und die in unmittelbarer Nähe befindlichen Gebäude und Maschinen zwang zur Anwendung schwacher, oft wiederholter Ladungen. Um die Eisenkalotte zu zerteilen, wurden zunächst 19 Löcher von 25 cm Tiefe gebohrt, mit je 55 g Gelatinedynamit geladen und gruppenweise gesprengt. Die von der Oberfläche sich ablösenden Schalen verringerten die Bohrlochtiefe, so daß die meisten Löcher nachgebohrt werden mußten. Dieselben Bohrlöcher wurden mehrmals, einzelne sogar noch fünfmal mit Ladungen von 187—300 g versehen und gruppenweise gezündet, bis die Zerkleinerung so weit gediehen war, daß die Stücke entfernt werden konnten. Die brauchbaren zerteilten Eisenstücke hatten ein Gesamtgewicht von 135000 kg. An Sprengstoff wurden 32,5 kg verwendet, und die Gesamtkosten betrugen nur etwa 500 Mark.

Eine merkwürdige Nutzanwendung haben die Sprengstoffe, ausnahmsweise auch das flüssige Nitroglyzerin, auf den pennsylvanischen Petroleumfeldern gefunden. Wenn ein Petroleumbohrloch erschöpft zu sein scheint, wird flüssiges Nitroglyzerin oder auch Dynamit auf dem Grunde des Bohrloches zur Explosion gebracht, worauf sich in der Regel eine neue Ergiebigkeit desselben einstellt. Die Wirkung der Explosion besteht offenbar darin, daß neue Spalten im Erdinnern gebildet werden, welche getrennte Petroleumquellen miteinander in Verbindung setzen.

Die Behandlung der Explosivstoffe richtet sich nach allgemeinen Grundsätzen, die, den Eigenschaften explosibler Systeme Rechnung tragend, ergänzt werden durch besondere Maßnahmen, welche die Gefahr möglichst verringern sollen. In der Hauptsache handelt es sich darum, keinen Anlaß zu unbeabsichtigter Auslösung explosiver Vorgänge zu bieten und für den Fall, daß dennoch eine unerwünschte Explosion eintritt, durch Schutzmaßregeln darauf vorbereitet zu sein.

Einer der wirksamsten Gesichtspunkte ist, nicht mehr Explosivstoff in Arbeit zu nehmen, als benötigt wird. Die Hauptmenge desselben halte man gesichert gegen Funkenflug.

Sonnenstrahlen, Regen, zufällige Stöße, Explosionsübertragung und ähnliche äußere Einflüsse.

Die Arbeit werde an einem hellen, sauberen, gegen strahlende Wärme, Sonnenlicht geschützten Orte vorgenommen. Für die Abwesenheit leicht entzündlicher Gegenstände, von Streichhölzern, namentlich von Initialzündsätzen, ist Sorge zu tragen.

Zum Schutz gegen Explosionsgefahr empfiehlt sich ausgiebiger Gebrauch von Glasschutzwänden, Drahtnetzschirmen, Hanfseilvorhängen oder gleichartigen Vorrichtungen.

Die mechanische Bearbeitung der Explosivstoffe mit harten Werkzeugen, insbesondere das Kratzen, Bohren, Stoßen mit eisernen Geräten, kann gefährliche Folgen haben. Zweckmäßig bedient man sich des Hartgummi, Hornes, Holzes und unter den Metallen der nicht funkengebenden wie Kupfer, Bronze, Aluminium, Zinn. Zu beachten bleibt, daß selbst weiche Metalle, wie Messing und Zink, sofern sie bei höherer Temperatur auf den, etwa geschmolzenen, Sprengstoff verändernd einwirken, diesen zur Explosion bringen können.

Angetrocknete, explosionsfähige Krusten soll man durch feuchtes Aufwischen, nicht auf mechanischem Wege zu beseitigen suchen.

Unter den Zündursachen kann auch elektrische Erregung eine Rolle spielen, der man durch Ableitung oder einen bestimmten Feuchtigkeitsgrad entgegenwirken kann.

Explosivstoffe bedürfen einer dauernden Überwachung, andernfalls bedeuten sie eine Gefahr, und schon aus diesem Grunde ist es geboten, Fabrikationsabfälle, Reste von Sprengstoffen, Kehrichtmengen, die explosible Stoffe enthalten, auf zweckmäßige Weise unschädlich zu machen.

In früherer Zeit glaubte man, Sprengstoffabfälle in der Weise beseitigen zu können, daß man sie an einer abgelegenen Stelle vergrub. Als dann später Bedenken auftauchten, daß bei baulichen Ver-

änderungen an solchen Stellen eine Gefährdung der Arbeiter eintreten könnte, wollte man die Rückstände wieder ausgraben. Diese Arbeit mußte aber bald wieder eingestellt werden, nachdem ein Arbeiter, der mit seinem Arbeitsgerät in die Sprengstoffabfälle geraten war, durch die darauffolgende Explosion getötet wurde.

Die Art der Vernichtung hat sich, wenn sie zum Ziele führen soll, dem Charakter des betreffenden Sprengstoffes anzupassen.

Schwarzpulver wird am besten in Wasser gebracht. Durch Umrühren des Pulvers befördert man die Auflösung des Salpeters. Rauchschwaches Pulver streut man in eine lange, dünne Linie aus und entzündet es an dem einen Ende vermittelst Zündschnur oder Streichholzes. Ähnlich verfährt man mit Nitrozellulose sowie mit Abgängen der leicht brennbaren aromatischen Nitrokörper.

Zur Vernichtung von Dynamiten aller Art ist Wasser in keinem Falle geeignet, da es das Nitroglyzerin in Freiheit setzt und dieses unter Umständen noch nachträglich Unheil anrichten kann. Kleinere Mengen Dynamit schiebt man brockenweise in offenes Feuer. Ganze Patronen von Dynamit befreit man zunächst von ihrer Papierumhüllung, legt sie mit den Enden aneinander und zündet die erste Patrone vermittelst Zündschnur an. Da mit der Möglichkeit einer Explosion der Masse zu rechnen ist, hat man sich in angemessene Entfernung zurückzuziehen. Zweckmäßigerweise nimmt man eine derartige Arbeit nur bei trockener, ruhiger Luft vor. Nitroglyzerin für sich allein wird am besten durch Behandlung mit alkoholischer Natronlauge zerstört.

Sprengstoffe, welche Ammoniumnitrat enthalten und daneben kein Nitroglyzerin, werden in Wasser geworfen oder auch in offenem Feuer stückweise verbrannt. Ebenso verfährt man mit Chlorat- und Perchloratsprengstoffen.

Sprengkapseln werden am sichersten beseitigt, indem man sie vermittelst Zündschnur zur Explosion bringt.

Auf Tabelle 9 sind die wichtigsten Sprengmittel nach ihrer Zusammensetzung und ihren Eigenschaften zusammengestellt.

Tabelle 9.

Charakteristik und Zusammensetzung der wichtigsten Sprengmittel (unter Ausschluß der schlagwettersicheren).

Gattung	Charakteristik	Bezeichnung	Zusammensetzung
Schwarzpulver	Sprengstoffe, welche nicht einer Sprengkapsel zur Zündung bedürfen	Sprengpulver	65—75% Kalisalpeter, 10 bis 15% Schwefel, 15—20% Kohle
		Sprengsalpeter	76% Natronsalpeter, 10% Schwefel, 14% Kohle
		Petroklastit	69% Natronsalpeter, 5% Kalisalpeter, 10% Schwefel, 15% Steinkohlenpech, 1% Kaliumbichromat
		Bobbinit	63—65% Kalisalpeter, 19 bis 21% Holzkohle, 1—2% Schwefel, 7—9% Stärkemehl, 3—4% Paraffin
Gurdynamit	Sprengstoffe mit Nitroglyzerin in nichtgelatiniertem Zustande	Dynamit I	75% Nitroglyzerin, 25% Kieselgur
		Dynamit II	18% Nitroglyzerin, 72% Kalisalpeter, 10% Holzkohle
		Rhexit	61—67% Nitroglyzerin, 18% Natronsalpeter, 11% Lohmehl, 4—7% Holzmehl
		Dynammon	45% Nitroglyzerin, 47,2% Ammonsalpeter, 7,8% Rotkohle
—	—	Sprenggelatine	90—93% Nitroglyzerin, 7 bis 10% Kollodiumwolle
Gelatinedynamit	Sprengstoffe mit Nitroglyzerin in gelatiniertem Zustande nebst Zumischpulver	Gelatinedynamit	62,5% Nitroglyzerin, 2,5% Kollodiumwolle, 25,5% Natronsalpeter, 8,75% Mehl, 0,75% Soda
		Gelignit	54—63% Nitroglyzerin, 3 bis 5% Kollodiumwolle, 26 bis 34% Kalisalpeter, 6—9% Holzmehl, 0,5% Kreide
		Ammonsprenggelatine	38—47% Nitroglyzerin, 2 bis 3% Kollodiumwolle, 46 bis 55% Ammonsalpeter, 8,5 bis 5% gedörrtes Mehl, 0,5% Soda

Gattung	Charakteristik	Bezeichnung	Zusammensetzung
—	—	Donarit	80% Ammonsalpeter, 3,8% Nitroglycerin, 0,2% Kolloidumwolle, 12% Trinitrotoluol, 4% Mehl
Ammonit	Ammonsalpeter-sprengstoffe ohne Zusatz von Nitroglyzerin	Sekurit	37% Ammonsalpeter, 31% Kalisalpeter, 29% Mono- und Dinitrobenzol
		Gesteinskroburit	82,5% Ammonsalpeter, 17,5% Dinitrobenzol
		Dynamon I	88% Ammonsalpeter, 12% Rotkohle
		Densit	19,8% Ammonsalpeter, 33,7% Strontiumsalpeter, 16,5% Trinitrotoluol
Ammonal	Ammonsalpeter-sprengstoffe mit Zusatz von Aluminium	Ammonal	72% Ammonsalpeter, 23,5% Aluminiumpulver, 4,5% Rotkohle
		Anagor-Sprengpulver	84,5% Ammonsalpeter, 1,5% Kalisalpeter, 8% Holzkohle, 5,5% Aluminiumpulver, 0,5% Baryumsalpeter
—	Sprengstoffe mit Chlorat oder Perchlorat	Cheddit	80% Kaliumchlorat, 10% Nitronaphthalin, 2% Dinitrotoluol, 8% Rizinusöl
		Permonit	37% Kaliumperchlorat, 38% Ammonsalpeter, 7% Natronsalpeter, 10% Trinitrotoluol, 7% Mehl, 1% Leimglyzingelatine
	Chemisch einheitliche Substanzen	Schießwolle	Nitrierte Zellulose
		Pikrinsäure	Nitrierte Karbolsäure
		Trinitrotoluol	Nitriertes Toluol

4. Maximum des Explosionsdruckes.

Auf die Notwendigkeit, dem Maximaldrucke von Explosivstoffen im geschlossenen Raume Beachtung zu widmen, wurde man schon frühzeitig durch Unfälle, namentlich bei Beschädigungen von Feuergewehren, hingewiesen. Es ist in der Tat kein zufälliges Zusammentreffen, wenn die Technik der Schußwaffen in dem Maße Fortschritte machte, als sie bemüht war,

die Schwierigkeiten zu überwinden, denen die Ermittelung eines hohen, nur äußerst kurze Zeit andauernden Gasdruckes begegnet. Ähnliche Vorteile ergaben sich für die Beurteilung der zu Sprengzwecken dienenden Explosivstoffe im allgemeinen, sowie ihrer Leistungsfähigkeit unter den wechselnden Verhältnissen der Praxis im besonderen. Aber auch rein wissenschaftliche Fragen, beispielsweise die Lehre von den Eigenschaften der gasförmigen Körper, haben aus derartigen Forschungen Nutzen gezogen. Den großen Einfluß des Druckes auf den Dissoziationsgrad und auf das chemische Gleichgewicht von Gasen, die beträchtliche Änderung der spezifischen Wärme im Bereiche hoher Temperaturen und manches andere hat man in seiner Tragweite im Gefolge solcher Arbeiten erkannt.

Den bei der Explosion von Gasgemischen auftretenden Maximaldruck hat zuerst Bunsen gemessen. Er belastete ein Ventil mit Gewichten und vermerkte die Bedingungen, unter denen das Ventil durch den Explosionsvorgang gelüftet wurde. So fand er für ein Gemisch aus Kohlenoxyd mit Sauerstoff einen Maximaldruck von 11 Atmosphären. Weit umfangreichere Versuche rühren von Mallard und Le Chatelier her. Als Explosionsgefäß diente ihnen eine mit der Gasmischung gefüllte Bombe von etwa 4 l Inhalt. Die Zündung wurde durch einen starken elektrischen Funken in der Mitte der Bombe eingeleitet. Zur Registrierung des Druckes bedienten sie sich eines Bourdonschen Federmanometers, welches an seinem verschlossenen Ende einen Zeiger trug, der seinen Ausschlag auf einem berußten Papierstreifen auf gleichmäßig umlaufender Trommel aufzeichnete. Die registrierten Kurven lieferten ein Maß für den Maximaldruck. Das Gemisch von 1 Vol. Methan mit 2 Vol. Sauerstoff und 9 Vol. Luft ergab bei dieser Versuchsanordnung einen Explosionsdruck von 6,5 Atmosphären. Da eine ähnliche Zusammensetzung auch die Schlagwetter in Kohlengruben besitzen, so genügt der experimentell ermittelte

Maximaldruck vollauf zur Erklärung der verheerenden Wirkungen, welche Schlagwetterexplosionen zu begleiten pflegen. Berthelot und Vieille benutzten zu ihren Messungen des Explosionsdruckes explosibler Gasgemenge die schon früher angewandte Methode, aus dem Gesetze der Vorwärtsbewegung eines Kolbens von bekanntem Querschnitte und bekannter Masse auf die wirkenden Drucke zu schließen. Das Maximum des Explosionsdruckes, welches bei diesen Versuchen festgestellt wurde, war 26 Atmosphären für die Mischung von 1 Vol. Zyan auf 2 Vol. Stickoxydul. Im ganzen wurden 42 verschiedene explosible Gemenge untersucht, und zwar vorzugsweise solche Serien, die zur Aufstellung systematischer Vergleiche geeignet erscheinen, wie beispielsweise Gemenge von Sauerstoff oder Stickoxydul mit Zyan, Azetylen, Äthan, Äthylen, Methyläther, Äthyläther. Indem die Versuchsansteller die mit solchen verschiedenen Gasmischungen erhaltenen Druckwerte untereinander verglichen, gelangten sie zu wichtigen Folgerungen bezüglich der spezifischen Wärmen bei hohen Temperaturen sowie hinsichtlich der Dissoziation in Abhängigkeit von dem Maximaldrucke für die in Frage kommenden Explosionsprodukte.

Die technische Verwendung der festen und halbfesten Explosivstoffe im Bohrloch oder in der Schußwaffe, wobei man selbstverständlich das Maximum an praktischer Wirkung zu erzielen wünscht, ist an eine zweckmäßige Festlegung der Ladedichte gebunden. Unter Ladedichte versteht man allgemein das Verhältnis:

$$\frac{\text{Ladungsgewicht in g}}{\text{Verbrennungsraum in ccm}}.$$

Zur Herstellung der Ladedichte = 1 sind demnach, wenn der Verbrennungsraum 10 ccm beträgt, 10 g Sprengstoff erforderlich. Das von 10 g Sprengstoff eingenommene Volum ist aber für die verschiedenen Explosivstoffe meist sehr ungleich.

10 g Sprenggelatine beanspruchen nur etwa 6,3 ccm Raum; 10 g Knallquecksilber gar nur 2,3 ccm. Die Ladedichte jeweilig passend auszuwählen, ist Sache der praktischen Erprobung. Man kann indessen auch an Hand von Vorversuchen in der Explosionsbombe den gewünschten Anhalt gewinnen, sofern man sich die Gesetzmäßigkeit zunutze macht, welche die Beziehung zwischen Maximaldruck und Ladedichte beherrscht. Noble — nicht zu verwechseln mit Nobel, dem Erfinder des Dynamits — und Abel haben in dieser Richtung eine der wichtigsten Untersuchungen auf dem Gebiete der Sprengtechnik ausgeführt. Sie bedienten sich einer äußerst starkgebauten Bombe, welche bis zu 1 kg Schwarzpulver aufnehmen konnte, und ermittelten den bei verschiedenen Ladedichten auftretenden Maximaldruck mit Hilfe einer von Noble im Jahre 1867 vorgeschlagenen Stauchvorrichtung.

Das Wesentliche dieser Einrichtung, welche wegen ihrer Einfachheit und Zuverlässigkeit allgemeine Verbreitung gefunden hat, ist ein kleiner Kupferzylinder aus weichem, reinstem Kupfer. Derselbe hat seinen Platz zwischen einem feststehenden Widerlager und einem beweglichen Stempel, welcher den Explosionsdruck zunächst aufnimmt und an den weichen Kupferzylinder weitergibt. Aus der Größe der Stauchung, welche der Kupferzylinder erleidet, schließt man auf die Höhe des übertragenen Maximaldruckes.

In Figur 6 ist eine Explosionsbombe für sehr hohe Drucke im Durchschnitte dargestellt. Den Explosionsraum A umschließt ein Stahlzylinder Z. Die Kopfschraube R trägt die elektrische Zündvorrichtung und dient zugleich, um den Sprengstoff einzuführen. S ist ein Stahlstempel, welcher bei der Explosion seine Bewegung gegen den Kupferzylinder K richtet, ihn an das feste Widerlager preßt und denselben, da er aus verhältnismäßig weichem Metall besteht, zusammenstaucht. Die Versuche von Noble und Abel, wie auch solche späterer Forscher, ergaben eine bestimmte Beziehung zwischen Maximaldruck und

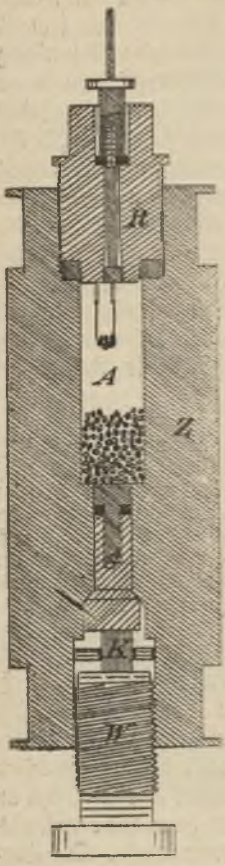


Fig. 6. Explosionsbombe für hohe Drucke. (Im Durchschnitt.)

Ladedichte. Wie aus Tabelle 10 ersichtlich, ist bei gleicher Ladedichte der Druck zunächst abhängig von den besonderen Eigenschaften eines explosiblen Systems. Beispielsweise ist der von Pikrinsäure bei einer Ladedichte von 0,5 entwickelte Maximaldruck größer als derjenige von Schwarzpulver bei einer Ladedichte von 1. Dieser für eine Ladedichte von 1 sich ergebende Maximaldruck ist für die Mehrzahl der Explosivstoffe so überaus hoch, daß er sich nur auf rechnerischem Wege, nicht experimentell ermitteln läßt; er ist eine nur theoretische Größe. Berthelot hat diesen Druck als den spezifischen Druck des betreffenden Explosivstoffes bezeichnet und ihn als Vergleichsmaßstab für die tatsächliche Leistung der Sprengstoffe geeignet befunden.

Von vornherein wäre anzunehmen gewesen, daß der Maximaldruck proportional mit der Ladedichte wachsen würde und im übrigen nur abhängig sein könne von der Eigenart, insonderheit von der Leistungsfähigkeit des explosiblen Systems. Bezeichnen wir mit P den Maximaldruck, mit Δ die Ladedichte und mit f den obengenannten „spezifischen Druck", also die theoretische Leistungsfähigkeit oder „Kraft"

Tabelle 10.

Beziehung zwischen Ladedichte und Maximaldruck (in Atm. pro qcm) für einige wichtige Explosivstoffe.

Ladedichte Δ	Schwarzpulver	Nitroglyzerin	Schießwolle	Pikrinsäure	Ammonsalpeter	Knallquecksilber
0,1	336	1098	1061	983	542	468
0,2	708	2351	2343	2174	1217	966
0,3	1123	3847	3921	3650	2077	1501
0,4	1587	5640	5912	5523	3211	2072
0,5	2112	7829	8502	7882	4779	2686
0,6	2708	10560	12000	11350	7082	3347
0,7	3393	14060	17020	16240	10800	4062
0,8	4201	21520	24810	24030	17870	4952
0,9	5126	25270	38500	38310	36250	5683
1,0	6236	35010	—	—	—	6602
1,2	9255	—				8726
1,4	14130					11320
1,6	29340					14560
1,8	—					18790
2,0						24350
2,4						43970

des betreffenden Explosivstoffes, so sollte die Gleichung gelten:

$$P = f \cdot \Delta .$$

Die Erfahrung lehrt aber, daß diese Gleichung die in Frage kommende Gesetzmäßigkeit nicht einmal angenähert zutreffend wiedergibt; der Maximaldruck wächst rascher als die Ladedichte, und zwar ist die Zunahme um so beträchtlicher, je höher die Ladedichte an sich schon ist. Hieraus geht hervor, daß ein Einfluß sich geltend macht, der seinerseits von der Ladedichte abhängt. Was hier ins Spiel kommt, das ist das sogenannte „Kovolum" der Sprengstoffmaterie. Dieses Kovolum, gewöhnlich mit α bezeichnet, vermindert den dem Explosionsgase zur Verfügung stehenden Raum um den Betrag $\alpha \cdot \Delta$ derart, daß tatsächlich die Differenz $1 - \alpha \cdot \Delta$ für die Druckhöhe maßgebend wird. Die gesuchte Beziehung zwischen Maximaldruck und Ladedichte nimmt demnach die Form an:

$$P = \frac{f \cdot \Delta}{1 - \alpha \cdot \Delta} .$$

Bei $\alpha \cdot \Delta = 1$ müßte der Maximaldruck unendlich groß werden, wenn nicht die Festigkeit auch des besten Stahles eine begrenzte

wäre. f und a werden die Abelschen Konstanten des Explosivstoffes genannt, weil Abel diese für den Maximaldruck der Explosionsprodukte wichtigen Konstanten zuerst als charakteristische Merkmale für das explosible System erkannte und einführte.

Eine Aufgabe, welche in der Technik der Treibmittel häufig gestellt wird, betrifft die Ermittelung des Maximaldruckes der Pulvergase in Feuerwaffen, zum Beispiel in Militärgewehren unter Verwendung kriegsmäßiger Munition. Für diesen Zweck befindet sich die Noblesche Stauchvorrichtung an einem kräftiggebauten gewehrähnlichen Instrumente angebracht, dessen innere Abmessungen genau mit denjenigen der in Frage kommenden Gewehrkonstruktion übereinstimmen. Das Patronenlager derartiger „Gasdruckmesser" ist durchbohrt zur Aufnahme eines Druckstempels von etwa 11 mm Durchmesser, für dessen möglichst gute Abdichtung Sorge getragen werden muß, da andernfalls die Explosionsgase an unrechter Stelle entweichen könnten. Gegen den zu einem Kopfe von etwa 15 mm Durchmesser verbreiterten Schaft des Stempels wird ein Noblescher Kupferzylinder von 10 mm Durchmesser und 15 mm Höhe vermittelst Schraube fest angedrückt. Vor sowie nach dem Schusse stellt man die Länge des zu stauchenden Zylinders auf 0,01 mm genau fest und erfährt dadurch die Größe der Stauchung. Üblicherweise überträgt man diese Druckgrößen in die bequemere Form von Atmosphären pro qcm. Eine solche Umrechnung ist leicht, wenn man vor Eintritt in die Messungen an gleichgestalteten Kupferzylindern ermittelt, wie große Stauchungen sie bei ruhender Belastung mit bekannten Gewichten erleiden, und hiernach eine Stauchtabelle aufstellt, aus der man den Druck für die beim Schuß stattgefundene Stauchung entnehmen kann.

Fünfter Abschnitt.

Die Explosionstemperatur.

Unter der Explosionstemperatur oder Verbrennungstemperatur versteht man diejenige Temperatur, bis zu welcher die Explosionsprodukte durch die bei der Umwandlung entwickelte Wärme erhitzt werden können. Beträgt die Explosionswärme eines explosiblen Systems Q Kalorien und wird die mittlere spezifische Wärme seiner Explosionsprodukte mit c bezeichnet, dann ist die Temperatursteigerung t gegeben durch die Gleichung:

$$t = \frac{Q}{c}.$$

Bekanntlich ist die mittlere spezifische Wärme c der in Rücksicht zu ziehenden Gasgemenge keine Konstante, sondern eine Funktion der Temperatur t, und zwar nicht unbeträchtlich wachsend mit zunehmender Temperatur. Nimmt man an, daß der Wert von c für jede Temperatur durch den Ausdruck:

$$c = a + b \cdot t,$$

worin a und b empirisch ermittelte Größen bedeuten, wiedergegeben wird, dann erhält man für Q die Beziehung:

$$Q = a \cdot t + b \cdot t^2$$

und für t die gesuchte Temperatur:

$$t = \frac{a + \sqrt{a^2 + 4\,b \cdot Q}}{2\,b}$$

Aus neueren Versuchen über den Explosionsdruck gasförmiger Gemische ergeben sich als wahrscheinlichste Werte von c für:

CO_2, SO_2	$c = 6{,}8 + 0{,}0033\,t$
H_2O	$c = 6{,}065 + 0{,}0005\,t$
N_2, O_2, CO	$c = 4{,}9 + 0{,}00045\,t$
H_2	$c = 4{,}7 + 0{,}00045\,t$.

Bezeichnet man nun mit α, β, γ, δ ... die relativen Mengen, in welchen bei einem Explosionsvorgange die genannten gasförmigen Produkte auftreten, dann ergibt sich für die Konstanten a und b:

$$a = 6{,}8\,\alpha + 6{,}065\,\beta + 4{,}9\,\gamma + 4{,}7\,\delta$$
$$b = 0{,}0033\,\alpha + 0{,}0005\,\beta + 0{,}00045\,(\gamma + \delta)$$

und für die Explosionstemperatur, beispielsweise von höchstnitrierter Schießbaumwolle, wenn sie nach der Gleichung

$$C_{24}H_{28}O_{42}N_{11} = 12\,CO_2 + 6\,H_2O\,(\text{Dampf}) + 12\,CO + 8{,}5\,H_2 + 5{,}5\,N_2 + 1\,129\,000\ \text{cal}$$

zerfällt, $t = 2840^\circ$ C. Nitroglyzerin liefert, nach der gleichen Anleitung behandelt, als Explosionstemperatur die beträchtlich höhere Ziffer $t = 3780^\circ$ C.

Von dieser Berechnungsweise macht man in der Sprengtechnik häufig Gebrauch hauptsächlich angeregt durch die entscheidende Bedeutung, welche in manchen Kohlenbergbau treibenden Ländern den theoretischen Explosionstemperaturen als Anhalt für die Schlagwettersicherheit der Sprengstoffe beigemessen wird. Man stützt sich hierbei auf die Ergebnisse einer von Mallard und Le Chatelier 1880—82 ausgeführten Arbeit über die Höhe der Temperatur, welche zur Zündung von Schlagwettern erforderlich ist. Die genannten Physiker ermittelten, daß Schlagwettergas bis auf 650° C erwärmt und daß diese Temperatur wenigstens 10 Sekunden lang andauern muß, um eine Entzündung herbeizuführen. Infolge dieser Verzögerung bei der Entzündung ist es möglich, Explosivstoffe anzuwenden, deren Explosionstemperatur 650° C weit übersteigt. Die französische Schlagwetterkommission kam zu dem Schlusse, daß die rechnungsmäßige Explosionstemperatur des Sprengstoffes 2200° C erreichen dürfe, ohne daß Schlagwetter von einer bestimmten Zusammensetzung entzündet werden. Diese Erwägung führte in Frankreich und Belgien weiter dahin, Sprengstoffmischungen herzustellen, deren rechnungsmäßige Explosionstemperatur unter dem genannten Maxi-

mum liegt, und nur solche allein im Kohlenbergbau zu verwenden.

Der oben dargelegte Begriff der Explosionstemperatur t läßt sich auch zum Maximaldrucke P in Beziehung setzen, und zwar durch die Gleichung:

$$P = \frac{V_2}{V_1}\left(1 + \frac{t}{273}\right).$$

V_1 und V_2 bedeuten hierin die Volumina der an dem Explosionsvorgange beteiligten Stoffe vor und nach der Explosion, bezogen auf 0° C und 760 mm Druck. Der Raum nämlich, welchen die von 1 g des explosiblen Systems erzeugten Gase bei 0° C und 760 mm Druck einnehmen, ausgedrückt in Kubikzentimeter, ist ein im allgemeinen konstantes, nur von der Zusammensetzung der Explosionsgase abhängiges und daher für Explosivstoffe charakteristisches Merkmal. Analog der Definition des spezifischen Gewichtes spricht man hierbei vom spezifischen Gasvolumen eines explosiblen Systems. Dieses spezifische Gasvolum kann man mit Hilfe geeigneter Gasometer ermitteln, nachdem man den Explosionsvorgang in einer Bombe vollzogen hat, wobei zugleich der Explosionsdruck zu messen sein würde, falls man daraus t errechnen will. Mallard und Le Chatelier haben aus ihren Messungen des Maximaldruckes explosibler Gasmischungen nach einer ähnlichen Formel die zugehörigen Explosionstemperaturen errechnet und sie in guter Übereinstimmung mit den auf thermochemischem Wege abgeleiteten gefunden. Für feste und flüssige Explosivstoffe ist eine Übereinstimmung von vornherein nicht zu erwarten im Hinblick auf die hierbei nicht zu vernachlässigende Rolle der Ladedichte und insbesondere des Kovolums, welches die Gültigkeit des Gay-Lussac-Mariotteschen Gesetzes bei den in Frage kommenden hohen Drucken aufhebt.

Von Berthelot ist das Produkt aus spezifischem Gasvolumen und Temperatursteigerung $V_0 \cdot t = \frac{V_0 \cdot Q}{c}$ als relatives Maß für die mechanische Arbeitsleistung der Explosivstoffe vorgeschlagen worden oder auch, sofern es sich um Explosionsgase annähernd gleicher spezifischer Wärme c handelt, der Ausdruck $V_0 \cdot Q$, den er als das charakteristische Produkt des Sprengstoffes bezeichnet. Mit dieser Größe ist man indessen keineswegs im Besitze eines durchaus zuverlässigen Wertmessers für Explosivstoffe. Gemäß den Zahlen der letzten Spalte in Tabelle 11 müßte beispielsweise Sprenggelatine etwa sechsmal wirksamer sein als Schwarzpulver; das ist aber ein Verhältnis, dem die praktische Erfahrung nicht entspricht.

Man hat sich viel Mühe gegeben, die mit Explosionsvorgängen Hand in Hand gehenden Temperatursteigerungen auf irgendeine verläßliche Weise messend zu verfolgen; aber selbst unsere empfindlichsten pyrometrischen Hilfsmittel, die Thermosäulen, lassen im Stich, sobald es sich um sehr schnell aufeinanderfolgende Temperaturänderungen handelt. Aus diesem Grunde ist man über die Höhe der bei Explosionsvorgängen tatsächlich auftretenden Maximaltemperaturen im ungewissen. Man zweifelt nicht, daß sie höher sind, als unsere Instrumente anzeigen; aber sicherlich sind sie auch niedriger, als aus der thermochemischen Rechnung hervorgeht, die den idealen Grenzfall einer ohne Wärmeverlust verlaufenden exothermen Reaktion zugrunde legen muß.

Macnab untersuchte, ob über die verhältnismäßige Größe der von verschiedenen rauchschwachen Schießpulvern bei ihrer explosiven Zersetzung erzeugten Höchsttemperaturen Anhaltspunkte zu gewinnen seien. Innerhalb der Bombe, in welcher das Pulver zur Verbrennung gebracht wurde, befand sich die Lötstelle eines Le-Chatelierschen Pyrometers. Der Ausschlag des damit in Verbindung stehenden Galvanometers wurde durch einen reflektierten

Tabelle 11.

Spezifisches Volum, berechnete Explosionstemperatur und charakteristisches Produkt für die wichtigsten Explosivstoffe.

Laufende Nr.	Bezeichnung des Explosivstoffes	Spezifisches Volum[1] l	Berechnete Explosionstemperatur °C	Charakteristisches Produkt $V_0 \cdot Q$	Charakteristisches Produkt Wertverhältnis[2]
1	Sprenggelatine (7% Kollodiumwolle)	710	3400	1164000	100
2	Nitroglyzerin	712	3780	1125000	97
3	Nitromannit	723	3760	1099000	95
4	Dynamit (75% Nitroglyzerin)	628	3500	810000	70
5	Nitroglyzerinpulver (40% Nitroglyzerin)	840	3100	1084000	93
6	Schießwolle (13% Stickstoff)	859	2840	945000	81
7	Schießwollpulver	830	2500	747000	64
8	Kollodiumwolle (11% Stickstoff)	974	2160	711000	61
9	Ammonsalpetersprengstoff (Ammonsalpeter mit 10% Nitronaphthalin)	925	1900	860000	74
10	Pikrinsäure	877	2400	710000	61
11	Trinitrotoluol	885	2200	646000	55
12	Schwarzpulver	285	2700	195000	17
13	Ammonsalpeter	937	1530	590000	50
14	Knallquecksilber	314	3500	129000	11

Lichtstrahl auf einer schnell bewegten photographischen Platte festgehalten. Die gewonnenen Kurvenbilder waren also das Ergebnis der miteinander verschmelzenden Bewegungen des Lichtstrahles und der fallenden photographischen Platte. Beim Vergleich der nach vorstehendem Verfahren erhaltenen Ausschläge am Galvanometer mit den in einer kalorimetrischen Bombe ermittelten Explosionswärmen zeigten beide Versuchsreihen einen weitgehenden Parallelismus.

Vielfach sind Versuche gemacht worden, Unterschiede in den entwickelten Verbrennungstemperaturen verschiedener Schießpulvertypen dadurch festzustellen, daß man Drähte ungleicher Dicke aus Platin oder einem anderen schwer schmelzbaren

[1]) Bezogen auf 1 kg Explosivstoff und dampfförmiges Wasser in den Explosionsprodukten.

[2]) Sprenggelatine gleich 100 gesetzt.

Stoffe in die Geschützkartusche hineinbrachte und aufzeichnete, welche Drahtstärke noch eben geschmolzen wurde. Oder man ließ die heißen Explosionsgase durch enge Kanäle hindurchschlagen und stellte den Umfang der eingetretenen Abschmelzerscheinungen fest.

Vieille ging in der Weise vor, daß er den Sprengstoff in einer kleinen Explosionsbombe zerlegte, welche außer der üblichen Stauchvorrichtung sowie einer elektrischen Zündung einen dritten seitlichen Ansatz zur Aufnahme eines durchbohrten Metallzylinders trug. Dieser Probezylinder von 40 mm Höhe und 22 mm Dicke besaß einen mittellinigen Kanal von 1 mm Weite, durch welchen die Explosionsgase nach dem Schusse ihren Weg ins Freie nahmen. Er wurde dann sorgfältig gereinigt und gewogen. In der Gewichtsabnahme, welche je nach der Eigenart des betreffenden Explosivstoffes und dem entwickelten Drucke bis zu mehreren Prozenten betragen konnte, hatte man ein Maß für die thermische Intensität der Explosionsgase. Unter sonst gleichen Verhältnissen, insbesondere gleichem Explosionsdrucke, sowie gleichem Metall, verlor der Probezylinder an Gewicht am meisten bei Sprenggelatine, Nitromannit, nitroglyzerinhaltigen Schießpulvern. Mittelgroße Gewichtsverluste zeigten die Nitrozellulosepulver und nur geringe das Schwarzpulver.

Auch nach diesen Versuchen ergab sich für die Temperatur der Explosionsgase der verschiedenen geprüften Substanzen eine Stufenfolge, wie sie auf dem Wege der Rechnung auf thermochemischer Grundlage zuvor ermittelt worden war. Schon früher wurde erkannt, daß die Abnutzung der Läufe von Feuerwaffen in Beziehung stehe zu der Höhe der während der Verbrennung des Pulvers auftretenden Temperaturen. In dem Maße, als man dazu überging, die Explosionswärme der gelatinierten Pulver durch Zusatzstoffe, wie Vaseline, Nitronaphthalin, substituierte Harnstoffe (Centralit), herabzudrücken, verminderten sich auch die Abschmelzerscheinungen im Geschoßraum und in der Seele der Feuerwaffe. Das englische Kriegspulver Kordit enthält aus diesem Grunde eine Beimischung von 5% Vaseline.

Sechster Abschnitt.

Die Explosionsgase.

Als Träger der bei Explosionsvorgängen frei werdenden Energie kommen fast allein die gasförmigen Reaktionsprodukte in Betracht. Es sind dies vorzugsweise Kohlensäure, Wasser, Stickstoff, seltener Kohlenoxyd, Wasserstoff, Methan, in Ausnahmefällen auch Stickstoffoxyde, Zyanwasserstoff, Schwefelwasserstoff. Daß einige der genannten Gase, namentlich Kohlenoxyd, giftige Eigenschaften besitzen, andere, wie wiederum Kohlenoxyd, in Mischung mit Luft ihrerseits explosible Systeme zu bilden vermögen, sind Erfahrungen, denen man im Bergwerksbetriebe, in der Artillerie usw. Rechnung zu tragen bemüht ist.

Bei bergmännischen Arbeiten wird der Frage nach der Zusammensetzung der Explosionsgase von Sprengmitteln hervorragende Bedeutung beigelegt, da Bergleute nicht selten genötigt sind, vor Orten mit ungenügendem Luftwechsel zu verweilen. Enthalten die Sprengstoffschwaden auch nur ½% Kohlenoxyd, wie dies bei Verwendung von Dynamit in der Kohle mehrfach beobachtet worden ist, dann sind Vergiftungen möglich.

Ein derartiges Vorkommnis trug sich am 6. November 1895 auf einer Zeche bei Oberhausen zu. In dem „Aufhauen" und in dem „Auslenken" eines Stollens waren je ein Schuß von 2½ und 3½ Patronen, entsprechend 195 g und 270 g Gelatinedynamit abgegeben worden. Sechs Stunden später stieg ein Schlepper in dem Aufhauen in die Höhe, um Kohle herabzuwerfen. Ein benachbarter Hauer hörte ihn eine Zeitlang arbeiten. Alsdann wurde es stille. Wieder nach einer Weile stieg der Hauer in das Aufhauen und fand den Schlepper neben seiner brennenden Lampe bewußtlos liegen. Von schädlichen Wettern, welche sich durch ein mattes Licht der Sicherheitslampe zu erkennen geben, war nichts zu bemerken. Die Leichenöffnung wurde veranlaßt, und die spektralanalytische Blutunterfuchung ergab, daß der Tod durch Kohlenoxydvergiftung eingetreten war.

Im Bergwerksbetriebe hat man hin und wieder auch mit unvollkommen detonierenden, sogenannten „auskochenden" Sprengschüssen zu tun. Diese bedeuten nicht nur Verlust an Arbeit und Sprengstoff, sondern sie bergen zugleich Gefahr für die Bedienungsmannschaft, insbesondere wegen ihres hohen Gehaltes an nitrosen, stark giftigen Dämpfen. Der die giftigen Gase einatmende Mensch wird zunächst mehrere Stunden lang scheinbar gar nicht belästigt, und erst nach Ablauf von 6 bis 8 Stunden treten dann plötzlich schwere Krankheitsäußerungen ein, die innerhalb weniger Tage zum Tode führen.

Die Schußgase rauchschwacher Pulver pflegen reich an Kohlenoxyd und Wasserstoff zu sein. Vermischen sich diese Produkte, während sie noch im Rohre verweilen, mit Luft, dann können sie entzündliche Gemenge bilden, die unter ungünstigen Umständen zu einer gefährlichen Nachexplosion Anlaß geben.

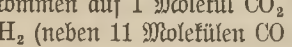
Einem derartigen „Nachflammer" wird der Unfall zugeschrieben, welcher sich am 13. April 1904 auf dem amerikanischen Kriegsschiffe „Missouri" zutrug und 32 Mann der Besatzung das Leben kostete.

Die Zusammensetzung der gasförmigen Explosionsprodukte im Augenblicke der Explosion, bevor noch die Abkühlung der sich ausdehnenden Gase und Dämpfe Bedeutung gewinnt, ist von mancherlei Umständen abhängig. Im allgemeinen läßt sie sich nur für solche explosible Systeme voraussagen, welche genügend Sauerstoff enthalten, um eine vollkommene Verbrennung der Elemente Kohlenstoff und Wasserstoff zu Kohlensäure und Wasser zu ermöglichen. Diese Bedingung ist beispielsweise erfüllt für Nitroglyzerin, wofern sich die Zersetzung nach folgender Gleichung abspielt:

$$4\,C_3H_5O_9N_3 = 12\,CO_2 + 10\,H_2O + 6\,N_2 + O_2.$$

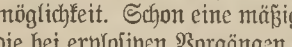
Wenn trotz Sauerstoffüberschusses Produkte einer unvollkommenen Umsetzung, namentlich die obenerwähnten Stickstoffoxyde, in den Explosionsgasen auftreten, so können eine un-

genügende Initiierung des explosiblen Systems, gestörte Fortpflanzung der Explosion und ähnliche Unregelmäßigkeiten vorliegen. Enthält ein explosibles System andrerseits zu wenig Sauerstoff, um allen Kohlenstoff in Kohlensäure und allen Wasserstoff in Wasser umzuwandeln, dann werden diese Elemente nur zum Teil oxydiert, die Oxydation bleibt auf Zwischenstufen (z. B. CO) stehen, und die tatsächliche Zusammensetzung der Explosionsgase im Augenblicke der vollendeten Umwandlung ist von den das chemische Gleichgewicht jeweilig bestimmenden Umständen abhängig. Dies gilt beispielsweise hinsichtlich der explosiven Zersetzung von Pikrinsäure. Nach der üblichen Formel:



$$2\ C_6H_2(NO_2)_3OH = CO_2 + H_2O + 11\ CO + 2\ H_2 + 3\ N_2$$

kommen auf 1 Molekül CO_2 nicht weniger denn 2 Moleküle H_2 (neben 11 Molekülen CO und 1 Molekül H_2O). Ein derartiges Mengenverhältnis zwischen Kohlensäure und Wasserstoff hat aber nur Bestand bei Abwesenheit jeder Reaktionsmöglichkeit. Schon eine mäßige Wärmezufuhr, jedenfalls aber die bei explosiven Vorgängen sich betätigende gewaltige Temperaturerhöhung veranlaßt weitere Umsetzung unter vermehrter Bildung von CO und H_2O gemäß der Gleichung:



$$xCO_2 + yH_2 = (x—a)\ CO_2 + aCO + (y—b)\ H_2 + bH_2O.$$

In welchem Grade diese Umsetzung im Augenblicke der Explosion tatsächlich erfolgt, richtet sich nach dem chemischen Massenwirkungsgesetz[1]) und den dasselbe beherrschenden Geschwindigkeits- und Gleichgewichtsbedingungen. In dieser Beziehung ist nicht nur die hohe Umwandlungstemperatur der explosiven Reaktionen, sondern auch die begleitende Drucksteigerung von ausschlaggebender Bedeutung.

Die zahlreich vorliegenden Analysenergebnisse über die Zu-

---

[1]) Vgl. Sammlung Göschen, Allgemeine u. physikalische Chemie, Nr. 71.

sammensetzung der Explosionsgase, auch Schwaden genannt, beziehen sich naturgemäß auf deren Beschaffenheit nicht bei der Explosionstemperatur, sondern nach erfolgter Abkühlung auf Zimmertemperatur. Wasserdampf hat sich zu Wasser kondensiert; Substanzen, die nur bei hoher Temperatur nebeneinander Bestand hatten, sind bei der Abkühlung miteinander in Reaktion getreten; überhaupt kann das Gleichgewicht, welches sich im Augenblicke der Explosion einstellte, wesentlich verschoben worden sein. Inwieweit diese Möglichkeit einen Einblick in den Gleichgewichtszustand der Explosionsgase im Augenblicke der sich vollziehenden Explosion selbst verhindert, ist eine Frage, die sich zurzeit noch in lebhaftem Flusse befindet.

1. Einfluß des Explosionsdruckes auf die Beschaffenheit der Explosionsgase.

Über den Einfluß des Explosionsdruckes auf die Beschaffenheit der Explosionsgase machten Noble und Abel die ersten Beobachtungen, als sie Schwarzpulver bei verschiedenen Ladedichten in der Explosionsbombe zur Verpuffung brachten. Weit ausgesprochener als bei Schwarzpulver, dessen Mischungsverhältnisse auf eine mehr oder weniger vollständige Oxydation der verbrennlichen Elemente abzielen, zeigt sich der Einfluß des Explosionsdruckes bei verhältnismäßig sauerstoffarmen Substanzen, wie Pikrinsäure und Nitrozellulose. Sarrau und Vieille benutzten für ihre Untersuchungen mit Stickstoffgas gefüllte Explosionsbomben, deren innere Wandung mit Platin ausgelegt war, um jede Einwirkung derselben auf die Zusammensetzung der Explosionsgase auszuschließen. Als sie Pikrinsäure bei Ladedichten von 0,1—0,5, entsprechend den Maximaldrucken 1000 beziehungsweise 8000 Atmosphären, in der Bombe zur Explosion brachten, ergaben sich folgende Analysenzahlen (in Volumprozenten):

Explosionsgase (ohne H_2O)	Ladedichte		
	0,1	0,3	0,5
CO_2	7,61	15,40	20,55
CO	61,56	54,34	48,80
CH_4	1,19	5,75	7,83
H_2	12,52	6,31	3,06
N_2	17,12	18,20	19,76

Man erkennt den Einfluß des Explosionsdruckes mit wachsender Ladedichte an der stetigen Zunahme der Kohlensäure bei gleichzeitiger Abnahme des Kohlenoxyds. Der Wasserstoff, der zunächst bei noch geringen Ladedichten auch wächst, nimmt dann bei den höheren Ladedichten dauernd ab. Der Gehalt der Explosionsgase an Stickstoff (sowie an Wasserdampf) zeigt keine erhebliche Verschiebung. Sehr bemerkenswert ist aber das Einsetzen von Methan und dessen ständiger Zuwachs.

Nach der Auffassung der genannten Forscher kann die Zusammensetzung der gasförmigen Explosionsprodukte von Pikrinsäure, Nitrozellulose und ähnlichen Substanzen, denen es an Sauerstoff zur völligen Oxydation der verbrennlichen Elemente mangelt, dargestellt werden als das Ergebnis zweier Reaktionsvorgänge:

(1) $$\underset{1\ \text{Vol.}}{CO} + \underset{1\ \text{Vol.}}{H_2O} = \underset{1\ \text{Vol.}}{CO_2} + \underset{1\ \text{Vol.}}{H_2}.$$

(2) $$\underset{2\ \text{Vol.}}{2\,CO} + \underset{2\ \text{Vol.}}{2\,H_2} = \underset{1\ \text{Vol.}}{CO_2} + \underset{1\ \text{Vol.}}{CH_4}.$$

Beide verlaufen, solange hohe Temperaturen herrschen, mit solch großer Geschwindigkeit, daß sich das betreffende Gasgemisch jeden Augenblick im Gleichgewichte befindet. Je höher der gleichzeitig vorhandene Druck ist, um so mehr verschiebt sich das Gleichgewicht nach derjenigen Seite hin, die mit einer Volumverminderung (Gleichung 2) verknüpft ist. Würde es möglich sein, über die durch die Festigkeit der Explosionsbombe beschränkte Ladedichte von 0,5 hinauszugehen, etwa bis auf die Ladedichte 1,0, entsprechend einem Drucke von mehr als 40000 Atmosphären, dann würden als End-

produkte der explosiven Umwandlung derartiger Explosivstoffe vorwiegend die unter den gegebenen Bedingungen kondensiertesten Molekülе, also CO_2, Kohlensäure, und CH_4, Methan, auftreten.

Nach anderen theoretischen Vorstellungen erfolgt die Bildung des Methans nicht unter dem Einflusse des hohen Explosionsdruckes, sondern in der Periode der Abkühlung der Gase nach dem Schusse, und zwar wird die Entstehung von Methan mit wachsender Ladedichte begünstigt, weil zugleich die Abkühlung der Explosionsgase eine Verlangsamung erfährt.

Mit der Frage nach der Beschaffenheit der Explosionsgase steht die andere im Zusammenhange, ob bei explosiven Vorgängen Dissoziationserscheinungen in erheblichem Grade beteiligt sind. Als dissoziationsfähige Endprodukte würden hauptsächlich Kohlensäure und Wasser in Betracht kommen. Den augenblicklichen Stand der vorliegenden Frage kann man dahin zusammenfassen, daß die bekannten Dissoziationserscheinungen bei einer Reihe explosiver Vorgänge infolge des gleichzeitig herrschenden hohen Druckes, der dem Zerfall in eine größere Anzahl von Molekülen entgegenwirkt, keine erhebliche Rolle spielen und daß, zumal bei den für die Technik wichtigeren Explosionsvorgängen im Bohrloch und in der Schußwaffe, die sich meist unter sehr hohem Druck vollziehen, bis jetzt kein Bedürfnis vorliegt, auf die sonst freilich nicht zu vernachlässigende Dissoziation Rücksicht zu nehmen.

2. Einfluß der Explosionstemperatur auf die Beschaffenheit der Explosionsgase.

Wenngleich die Bedeutung der Dissoziation infolge des überwiegenden Einflusses der hohen Explosionsdrucke praktisch sehr zurücktritt, so können, wie neuere Untersuchungen gezeigt haben, dafür einige andere, freilich ebenfalls nur untergeordnete Veränderungen in der Beschaffenheit der Explosionsgase Platz greifen. Die Thermodynamik lehrt nämlich, daß chemische Verbindungen, die sich unter Wärmeabsorption

bilden, bei hohen Temperaturen im allgemeinen immer beständiger werden. Da sich ferner das Gleichgewicht bei den sehr hohen Temperaturen der Explosion rasch einstellt, so darf man annehmen, daß in der Regel die bei der betreffenden Temperatur möglichen Verbindungen sich auch in einer dem Gleichgewicht nahe entsprechenden Menge bilden werden. So entstehen bei der Explosion von Knallgas bei Gegenwart von atmosphärischer Luft nachweisbare Mengen von Stickoxyd, wie schon Bunsen erkannte. Bringt man Knallgas mit einem Überschuß von Sauerstoff zur Explosion, so wird der Wasserdampf teilweise zu Wasserstoffsuperoxyd oxydiert. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß noch andere, vorläufig unbekannte Verbindungen bei den hohen Temperaturen der Explosion entstehen, und es könnte eine nähere Untersuchung der Explosionsvorgänge nach dieser Richtung hin, wie solche namentlich von Nernst in Angriff genommen worden ist, für die Chemie der hohen Temperaturen von Bedeutung werden.

Siebenter Abschnitt.

Die Explosionsflamme.

1. Bedeutung der Explosionsflamme.

Die Bildung einer mehr oder weniger ausgedehnten Explosionsflamme gehört zwar nicht zu den unabweislichen Begleiterscheinungen explosiver Vorgänge; doch ist sie als fast regelmäßige Folge der hohen Temperatur der Explosionsgase anzusehen und verdient schon aus diesem Grunde mit in Rücksicht gezogen zu werden. Begründeterer Anlaß, ihrem Wesen näher zu treten, bot sich dar, seitdem die Auffassung an Geltung gewann, daß die mangelnde Schlagwettersicherheit bei der Sprengarbeit mit Schwarzpulver, Dynamit und mehreren an-

deren Sprengmitteln im wesentlichen auf die Eigenart der dabei auftretenden Explosionsflamme zurückzuführen sei.

Eine Vorstellung von der Größe der Explosionsflamme unter wechselnden Bedingungen suchte man zunächst auf dem Wege zu erlangen, daß man leicht entzündliche Substanzen, wie feines Schwarzpulver oder trockene Nitrozellulose, im Umkreise einer explodierenden Sprengstoffmasse aufstellte. Indessen lehrten diese Versuche nicht das Gewünschte, indem oft keine Zündung stattfand, wo anscheinend alle Bedingungen für eine Zündung erfüllt waren. Siersch machte photographische Aufnahmen von den in Frage kommenden Lichterscheinungen und sprach im Anschluß daran die Meinung aus, daß die Größe der Explosionsflamme einen unmittelbaren Maßstab für die Schlagwettersicherheit eines Sprengmittels bilde. Die Versuche wurden in dunkler Nacht ausgeführt, wobei in angemessener Entfernung vor dem geöffneten Objektiv die Explosion der freihängenden Sprengpatrone bewirkt wurde. Aus diesen photographischen Aufnahmen geht zweifellos hervor, daß die einzelnen Sprengstofftypen durch charakteristische Lichterscheinungen ausgezeichnet sind. Im allgemeinen erwies sich die Größe der Explosionsflamme als in Parallele stehend mit der Höhe der Explosionswärme des betreffenden Sprengmittels. Sprengmittel mit sehr hoher Explosionswärme, wie Gurdynamit, erzeugten weitreichende Bilder auf der lichtempfindlichen Platte; Sprengmittel mit verhältnismäßig niedriger Explosionswärme, wie namentlich die Ammonnitratgemische, ergaben weit weniger hervortretende Flammenerscheinungen. In einzelnen Fällen schien die Explosionsflamme überhaupt zu fehlen.

Mancherlei Beobachtungen, wie besonders auch hier wieder die mangelnde Schlagwettersicherheit von Schwarzpulver, sprechen dafür, daß nicht nur die Größe der Explosionsflamme, sondern auch ihre Dauer einer zahlenmäßigen Festlegung be-

dürftig ist. Von diesem Gesichtspunkte aus hat man die obengenannten Versuche weitergeführt.

Eine von Will mitgeteilte Einrichtung gestattete gleichzeitig zwei getrennte photographische Aufnahmen, von denen die eine Ausdehnung und Gestalt der auftretenden Explosionsflamme, die andere deren Zeitdauer registrierte. Der Sprengstoff wurde lose in einen kleinen Stahlzylinder eingeschüttet und mittels Sprengkapsel in einem gegen Licht abgeschlossenen Raume zur Detonation gebracht. Der Apparat zur Aufnahme der Zeitdauer des Lichtbildes bestand in einer mit regelbarer Geschwindigkeit drehbaren Aluminiumscheibe, die mit Ausschnitten versehen war und sich vor einem photographischen Film bewegte. Die Flamme des detonierenden Sprengstoffes bildete durch den sich rasch umdrehenden Ausschnitt der Aluminiumscheibe hindurch den Ausschnitt auf dem Film ab. Je länger die Lichtwirkung dauerte, um so länger war der von dem Ausschnitte der Aluminiumscheibe zurückgelegte Weg, um so länger das photographische Abbild des Ausschnittes auf dem Film.

Bei näherer Prüfung der Flammenbilder von Sprengstoffen verschiedener Zusammensetzung nach Lage, Ausdehnung und Dauer der Lichterscheinung erkennt man charakteristische Unterschiede in bezug auf die Dauer der Lichterscheinung, die bei den verschiedenen untersuchten Sprengstoffen sich in den Grenzen von weniger als 0,0002 Sekunde bis zu 0,25 Sekunde bewegte. Als zu einer ersten Gruppe gehörig (Fig. 7 I) kann man Flammenbilder von großer Ausdehnung und Dauer bis zu 0,25 Sekunde zusammenfassen; es gehören hierher die Flammenbilder von Schwarzpulver, Nitroglyzerin, Gurdynamit, Sprenggelatine. Alle diese Sprengstoffe entwickeln bei der Explosion verhältnismäßig viel Wärme. Der Umstand, daß sie gleichzeitig Flammenbilder von großer Ausdehnung und langer Dauer erzeugen, steht im Einklange mit der Tatsache, daß diese Sprengstoffe keine Schlagwettersicherheit besitzen, deswegen für Kohlengruben, auch wenn darin keine Gasausströmungen stattfinden, sondern allein Kohlenstaub in Frage kommt, nicht anwendbar sind. Eine zweite Gruppe

Flammenbilder (Fig. 7 II) umfaßt Bilder von nur geringer Ausdehnung und so ungemein kurzer Zeitdauer, daß hierfür keine bestimmte Zahlengröße, sondern nur eine obere Grenze von etwa 0,0002 Sekunde angegeben werden kann. Zu dieser Gruppe von Flammenbildern gehört die Mehrzahl der auf Basis des Ammonnitrats konstruierten schlagwettersicheren Sprengstoffe, z. B. Ammonkarbonit, Wetterastralit. Diese Sprengstoffe sind durch relativ geringe Wärmeentwicklung bei der Explosion gekennzeichnet, und da auch die Dauer der Flamme nur eine ungemein kurze ist, so liegt die Folgerung nahe, ihre geringe Neigung, Schlagwetter und Kohlenstaub zu zünden, mit jenen Eigenschaften in Verbindung zu bringen. Eine dritte Gruppe von Flammenbildern (Fig. 7 III) zeigt an Stelle einer Flamme deren zwei, örtlich und zeitlich voneinander getrennt, und zwar folgt auf eine kleinere Flamme von kurzer Dauer eine meist viel umfangreichere, in wechselnder Entfernung von der Mündung des Stahlzylinders auftretend, die später, oft erst

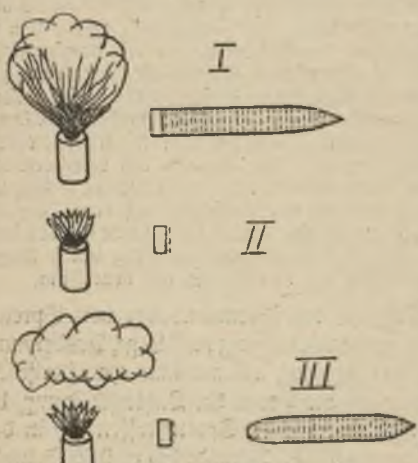


Fig. 7. Lage, Ausdehnung und Dauer von Explosionsflammen (schematisch). I. Große, lange andauernde Flamme. II. Kleine, unmeßbar kurze Zeit dauernde Flamme. III. Doppelflamme, davon die erste klein und von sehr kurzer Dauer, die zweite umfangreich, wolkenartig, lange andauernd.

lange nach dem Verlöschen der ersten, erscheint und stets eine viel längere Dauer hat. Diese später auftretende, sekundäre Flamme bildet sich aus den verbrennlichen Anteilen der Schußgase nach deren Mischung mit Luft, und zwar unter der weiteren Bedingung, daß nach der Vermischung noch eine zur Verbrennung hinreichend hohe Temperatur herrscht. Die Aufnahmen der Flammenbilder von Schießbaumwolle, Pikrinsäure, Trinitrotoluol zeigen ein immer ausgesprochener werdendes Abrücken des sekundären Flammenbildes vom primären, entsprechend einem in der genannten Reihenfolge der Sprengstoffe regelmäßig wachsenden Gehalt der Explosionsgase an brennbaren Bestandteilen. Je größer die Entfernung des sekundären Flammenbildes von dem primären ist, um so größer ist auch die zeitliche Trennung der beiden Vorgänge. Die Zeit von dem Erlöschen der primären Flamme bis zum Beginn der sekundären beträgt bei Pikrinsäure etwa 0,002 Sekunde, die Dauer der sekundären Flamme selbst etwa 0,01 Sekunde.

Daß das Auftreten einer solchen, verhältnismäßig lange dauernden Flamme unter Umständen zu einer Gefahr werden kann, insbesondere gegenüber einer leicht entflammbaren Wolke aus feinem Kohlenstaube, ist begreiflich, und in der Tat zündet der in diese Gruppe fallende Kohlenkarbonit, so hoch seine Schlagwettersicherheit auch gegenüber Methan-Luftgemengen ist, Kohlenstaub-Luftgemenge relativ leicht. Bemerkenswert ist ferner der Parallelismus, daß bei Zusatz geringer Mengen Alkalisalz zu Sprengstoffen dieser Gruppe nicht allein die sekundäre Flamme verschwindet, sondern auch die Sicherheit der Sprengstoffe gegen Kohlenstaubentzündung außerordentlich zunimmt.

Aus allen diesen Beobachtungen geht hervor, daß die Explosionsflamme bei Sprengstoffen von ungleicher chemischer Zusammensetzung einen sehr verschiedenen Charakter besitzt.

Das in der zweiten und dritten Gruppe auftretende kleine, überaus kurze Zeit andauernde Flammenbild entspricht der Detonation des Sprengstoffes selbst. Das in der dritten Gruppe auftretende sekundäre Flammenbild, gekennzeichnet durch seine Trennung von der eigentlichen Sprengstofflamme sowie durch Größe, wolkenartiges Aussehen und vor allem lange Dauer, hat völlig den Charakter einer Gasexplosion, entstanden durch nachträgliche Entflammung der Explosionsgase des Sprengstoffes auf Kosten des Luftsauerstoffs. Es ist eine Schlagwetterexplosion kleinen Maßstabes, deren Bildung verhütet werden muß, wenn es sich um möglichst gefahrlose Sprengarbeit in Kohlengruben handelt.

Um den Umfang zu kennzeichnen, welchen die durch entzündete Schlagwetter hervorgerufenen Explosionsunfälle annehmen können, seien sechs der größten Schlagwetterexplosionen aufgeführt, welche allein den preußischen Steinkohlenbergbau, und zwar nur während zweier Jahrzehnte, betrafen und nahe an 500 Menschen Leben oder Gesundheit kosteten. Es trugen sich diese zu am 20. Oktober 1864 auf Grube Reden-Merchweiler (Saarbrücken) mit 34 tödlich Verunglückten und 7 Verletzten; am 15. Januar 1868 auf Zeche Neu-Iserlohn (Westfalen) mit 81 Toten und 10 Verletzten; am 12. Dezember 1870 auf der nämlichen Zeche mit 35 Toten und 3 Verletzten; am 8. Juni 1880 auf der gleichen Zeche mit 23 Toten und 3 Verletzten; am 10. Mai 1882 auf Zeche Pluto (Westfalen) mit 65 Toten und 12 Verletzten; am 18. März 1885 auf Grube Camphausen (Saarbrücken) mit 181 Toten und 28 sonst Beschädigten.

Die Bemühungen zur Beseitigung der durch Schlagwetter hervorgerufenen Massenunfälle waren anfänglich, als der Gebrauch von Sprengstoff beim Abbau der Kohle nur vereinzelt vorkam, lediglich auf eine ausgiebige Ventilation der Grube gerichtet, um etwa sich ansammelnde entflammbare Gasgemische unschädlich zu machen. Als an Stelle des offenen Grubenlichtes die im Jahre 1816 von Davy empfohlene Sicherheitslampe, deren Wirksamkeit bekanntlich darauf

beruht, daß Flammen engmaschige Drahtgewebe nicht leicht durchdringen, in Aufnahme kam, glaubte man sogar jeglicher Schlagwettergefahr nunmehr überhoben zu sein. Es stellte sich indessen bei zunehmender Schießarbeit mit Sprengmitteln heraus, daß auch diese zu den in Frage kommenden Ursachen gehöre, und man versuchte in der Folge allerlei Vorrichtungen, um den hieraus entspringenden Gefahren zu begegnen und die Sicherheit bei Verwendung von Pulver und Dynamit im Bergbaue zu erhöhen.

Macnab schlug im Jahre 1876 vor, zur Löschung der Explosionsflamme bei Schwarzpulverschüssen eine Wasserpatrone als Besatz, anstatt des üblichen Letten, auf die Ladung zu bringen. Settle vervollkommnete die Form der Wasserpatrone in der Richtung, daß er die eigentliche Sprengpatrone ganz und gar in einem weiteren Wassersack unterbrachte derart, daß der Explosionsdruck nur unter Vermittelung des Wassers gleichmäßig nach allen Seiten auf das Gestein oder die Kohle übertragen wurde. Weitere Versuche gingen darauf hinaus, als einen die Explosionsflamme löschenden Besatz kristallwasserhaltige Salze, z. B. Kristallsoda, zu benutzen. Man war der Meinung, daß solche Salze durch die Hitze der Flamme sich entwässern und die Flamme abkühlen würden. Von der Überlegung, Salze mit Kristallwasser als Besatz anzuwenden, bis zu dem Gedanken, sie dem Sprengmittel selbst einzuverleiben, um die Temperatur der Explosionsflamme schon bei ihrem Entstehen zu mäßigen, war ein kurzer Sprung; es entstanden auf diese Weise seit 1887 die „Wetterdynamite"" (S. 122).

Inzwischen waren auch die Regierungen an die Lösung der Schlagwetterfrage herangetreten und hatten zunächst besondere Schlagwetterkommissionen zum Studium derselben berufen. Gestützt auf die oben (S. 100) erwähnten Versuche von Mallard und Le Chatelier über die Entzündungstemperatur von Gemischen aus Methan und Luft, gelangte die französische Schlagwetterkommission 1887 zu der Ansicht, daß die Entzündung der Schlagwetter von der Flammentemperatur des Schusses abhängig sei. Sie stellte deshalb (auf rechneri-

schem Wege, vgl. S. 99) die Explosionstemperatur der verschiedenen in Gebrauch befindlichen Sprengmittel fest und zog den Schluß, daß ein Explosivstoff um so wettersicherer sei, je tiefer seine Explosionstemperatur liege. In anderen Ländern gründete man Versuchsanstalten, die sogenannten Versuchsstrecken, zur Erprobung der Sicherheit der Sprengmittel im Verhältnis zueinander und ließ den praktischen Schießversuch in einem Versuchsstollen über die tatsächliche Schlagwettersicherheit der verschiedenen angebotenen Sprengstoffmischungen entscheiden. Allgemeine Anwendung hat auf den bergbaulichen Versuchsstrecken das Verfahren von Winkhaus gefunden, welches darin besteht, die Wettersicherheit eines Sprengmittels nach dem Gewichte der Höchstladung zu beurteilen, die noch, ohne zu zünden, in ein entzündliches Gasgemisch bestimmter Zusammensetzung aus einem Schießmörser abgetan werden kann. Hierbei ergibt sich, daß zwar große Unterschiede hinsichtlich Schlagwettersicherheit der Sprengmittel vorhanden sind, daß aber absolute Schlagwettersicherheit bei der Schießarbeit überhaupt nicht zu erreichen ist; sämtliche Sprengmittel zünden die Schlagwetter, wenn genügend große Ladungen zur Explosion gebracht werden.

Die Statistik läßt erkennen, daß infolge der getroffenen Sicherheitsmaßnahmen die Zahl der tödlichen Verunglückungen durch Schlagwetterexplosionen in ständigem Rückgange begriffen ist.

Während früher die Schlagwetterexplosionen in der Mehrzahl auf den nicht ordnungsmäßigen Gebrauch der Sicherheitslampen zurückzuführen waren und die Sprengarbeit nur in geringem Grade in Betracht kam, hatte sich dies Verhältnis allmählich zu ungunsten der Sprengarbeit geändert. Nach 1890 ist aber wieder eine Verschiebung zugunsten der Sprengarbeit eingetreten, so daß im Jahrzehnt 1891—1900 von den auf je 10000 beschäftigte Arbeiter in

Belgien vorgekommenen 2,08 tödlichen Verunglückungen 1,63 auf Schlagwetterexplosionen entfallen, die durch die Lampen, und nur 0,45 auf Explosionen, die durch die Sprengarbeit verschuldet waren.

In das Gebiet der Explosionsflamme gehört auch eine Flammenerscheinung, die beim Schuß aus Feuerwaffen, zumal solchen größeren Kalibers, oft beobachtet wird: das „Mündungsfeuer". Sie beruht, in gleicher Weise wie die oben besprochenen „Nachflammer", auf einer nachträglichen Verbrennung der in den Explosionsgasen vertretenen Bestandteile Kohlenoxyd, Wasserstoff, Methan, wenn diese bei hinreichend hoher Temperatur Gelegenheit finden, sich mit der Außenluft in geeigneten Verhältnissen zu mischen. Die Mündungsfeuer lassen sich durch angemessenen Aufbau des Treibmittels und passende Wahl der Pulverladung vermindern oder sogar ganz unterdrücken; auch besondere Zusätze zur Pulvermasse stehen für diesen Zweck im Gebrauch.

2. Die schlagwettersicheren Sprengstoffe.

Wie bereits des näheren ausgeführt wurde, machte sich im Anfang der achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts ein erhöhtes Bedürfnis geltend, den Ursachen der verheerenden Schlagwetterexplosionen auf den Grund zu gehen. Dabei wurde auch der Schießarbeit, die einen wesentlichen Anteil der die Schlagwetterexplosionen veranlassenden Ursachen ausmacht, größere Beachtung geschenkt. Es entstand das Bestreben, Sprengstoffe herzustellen, welche die gefährliche Eigenschaft der Schlagwetterzündung nicht besitzen.

Als schlagwettersichere Sprengstoffe bezeichnet man feste oder plastische explosible Gemenge, welche einen hinreichenden Grad von Schlagwettersicherheit besitzen, d. h. in den üblichen Grenzen des Gebrauches die in der Grube auftretenden Schlagwetter und Kohlenstaubaufwirbelungen nicht zünden.

Wenngleich die Mehrzahl solcher Sprengstoffe auch durch große Sicherheit in der Handhabung ausgezeichnet ist, so kommt doch diese Eigenschaft nicht allen zu, und es decken sich daher keineswegs die Begriffe Schlagwettersicherheit und Handhabungssicherheit. Neuerdings hat man sich dahin geeinigt, unter „Sicherheitssprengstoffen" nur die handhabungssicheren zu verstehen.

Die nähere Betrachtung der schlagwettersicheren Sprengstoffe erfolgt zweckmäßig in drei zusammenfassenden Gruppen, entsprechend ihrer verschiedenen Zusammensetzung, unter den Sammelnamen der Ammonite, Karbonite, Wetterdynamite. Naturgemäß sind auch Übergangstypen zu verzeichnen.

Ammonite.

Die Ammonite oder Ammonsalpetersprengstoffe im engeren Sinne bestehen in der Hauptsache, zu etwa 70—95%, aus Ammonsalpeter und enthalten außerdem brennbare Bestandteile, Kohlenstoffträger genannt, wie Harz, Mehl, Naphthalin. Häufig finden sich überdies darin Beimischungen anderer Salpeterarten, wie Natronsalpeter, oder gewisser Salze, wie Kaliumbichromat, die auf Erhöhung der Schlagwettersicherheit hinwirken sollen. Seitdem man die Beobachtung gemacht hat, daß eine Staubwolke von Alkalisalz die Entzündung der Schlagwettergase durch die Sprengschußflamme wesentlich erschwert, ist es üblich geworden, Kochsalz, Chlorkalium und ähnlich wirkende Salze in erheblichen Mengen den an sich nicht hinreichend schlagwettersicheren Mischungen einzuverleiben, um deren Sicherheitsgrad zu steigern.

Das Köln-Rottweiler Sicherheitssprengpulver ist beispielsweise ein Gemenge von 93% Ammonsalpeter, 4,9% Leinöl, 1,2% Schwefel, 0,9% Barytsalpeter.

Behufs Herstellung dieses Sprengmittels werden die vorher sehr fein gemahlenen Bestandteile zunächst mit der Hand vorgemischt,

dann in Holztrommeln längere Zeit innig miteinander gemengt und in Kollergängen oder hydraulischen Pressen verdichtet. Der entstandene Kuchen wird getrocknet und vermittels Körnmaschinen zerkleinert. Das durch feinmaschige Siebe fallende Korn verpackt man in Patronenpapier, welches zum Schutze der Patronen gegen äußere Feuchtigkeit mit Stanniol beklebt ist.

Die Ammonite sind, mit wenigen Ausnahmen, gegen Stoß und Schlag unempfindlich. Auch Funken oder Flammen verursachen, solange nicht Initialzündungen, namentlich Sprengkapseln oder andere Sprengstoffe in der Nähe sind, keinerlei Gefahr. Als Nachteil sind die hygroskopischen Eigenschaften aller Ammonsalpetersprengstoffe hervorzuheben. Diese Sicherheitssprengstoffe müssen daher besonders gut verpackt sein und dürfen nicht allzulange in feuchten Magazinen lagern; andernfalls nehmen sie Feuchtigkeit auf und verlieren ihre Explosionsfähigkeit. Die Schlagwettersicherheit der Ammonite ist als eine im allgemeinen ausreichende anzusehen.

Der Transport der Ammonite unterliegt keinen einschränkenden Bestimmungen. Diese Art Sprengmittel ist auf den Eisenbahnen als Stückgut zugelassen.

Karbonite.

Eine eigentümliche Klasse von Sprengmitteln, die zugleich durch Zusammensetzung wie ausnehmend hohe Sicherheit gegen schlagende Wetter sich auszeichnet, ist die der Karbonite, wozu auch die Ammonkarbonite und wettersicheren Gelatinedynamite gerechnet werden können. Sie enthalten neben den verschiedenen Salpeterarten und verbrennlichen Bestandteilen an sich explosible Substanzen, namentlich Nitroglyzerin und zuweilen auch nitrierte Chlorhydrine. Besonders genannt zu werden verdient der Kohlenkarbonit als ältester und wettersicherster aller hierhergehörigen Sprengmittel, eine nach Brotteig riechende graue Masse von der Zusammensetzung 25,0%

Nitroglyzerin, 34,0% Kalisalpeter, 39,5% Mehl, 1,0% Barytsalpeter, 0,5% Soda.

Zur Herstellung dieses Sprengstoffes werden zunächst Salpeter und Mehl, nach voraufgegangener sorgfältiger Trocknung und feinster Vermahlung, miteinander gemischt. Die weitere Verarbeitung erfolgt in besonderen Mischmaschinen, wobei in das durch Flügel umgerührte Pulver in feinem Strahle Nitroglyzerin einfließt. Die fertige Masse wird schließlich zu Patronen geformt.

Die Karbonite nebst den der gleichen Gruppe zuzuzählenden verwandten schlagwettersicheren Sprengstoffen sind, zum Unterschiede von den Ammoniten, empfindlich gegen heftige mechanische Impulse und bedürfen daher sorgsamer Behandlung; auch unterliegen sie, soweit sie nicht durch geeignete Zusätze (S. 145) davor geschützt sind, dem Gefrieren infolge ihres Gehalts an Nitroglyzerin. Andererseits besitzen sie den Vorzug hoher Schlagwettersicherheit, der sie für den Betrieb von schlagwetterführenden Gruben unentbehrlich gemacht hat.

Wetterdynamite.

Unter dem Namen „Wetterdynamite" verstand man ursprünglich nur Gurdynamite, denen kristallwasserhaltige Salze, wie Glaubersalz, Magnesiumsulfat, Ammoniumoxalat, zugesetzt worden waren in der Absicht, sie für schlagwetterführende Gruben verwendbar zu machen. Ein in England noch heute gebrauchter Wetterdynamit besitzt die Zusammensetzung 31 bis 34% Nitroglyzerin, 11—14% Kieselgur, 47—51% Magnesiumsulfat und 4—6% Kalisalpeter. Die Schlagwettersicherheit und auch die Sprengleistung dieser Dynamite ist indessen verhältnismäßig gering, und ihre Bedeutung gegenüber den vorgenannten Arten von Sicherheitssprengstoffen hat daher ständig abgenommen.

Tabelle 12 enthält eine Übersicht über Zusammensetzung und Eigenschaften der wichtigsten schlagwettersicheren Sprengmittel.

Tabelle 12.

Charakteristik und Zusammensetzung der wichtigsten schlagwettersicheren Sprengmittel.

Gattung	Charakteristik	Bezeichnung	Zusammensetzung
Ammonite	Sprengstoffe von kräftiger Wirkung, gegen Schlag unempfindlich, ungefrierbar, aber hygroskopisch. Schlagwettersicherheit ausreichend hoch	Dahmenit A	91,3% Ammonsalpeter, 6,5% Naphthalin, 2,2% Kaliumbichromat
		Roburit 1	87,5% Ammonsalpeter, 7% Dinitrobenzol, 0,5% Kaliumpermanganat, 5% Ammonsulfat
		Westfalit	91% Ammonsalpeter, 4% Kalisalpeter, 5% Harz
		Wetterfulmenit	76% Ammonsalpeter, 4% Nitrozellulose, 1% Holzkohle, 3% Paraffinöl, 5% Trinitrotoluol, 11% Kochsalz
Ammonkarbonite	Sprengstoffe, welche ihrem Charakter nach eine Zwischenstufe zwischen Ammoniten und Karboniten bilden	Ammonkarbonit	82% Ammonsalpeter, 10% Kalisalpeter, 3,8% Nitroglyzerin, 0,2% Kollodiumwolle, 4% Mehl
		Grisoutine E	88% Ammonsalpeter, 11,75% Nitroglyzerin 0,25% Kollodiumwolle
Karbonite und wettersichere Gelatinedynamite	Sprengstoffe von mäßiger Leistungsfähigkeit, lagerbeständig, aber gefrierbar. Schlagwettersicherheit sehr hoch	Kohlenkarbonit	25% Nitroglyzerin, 34% Kalisalpeter, 39,5% Mehl, 1% Barytsalpeter, 0,5% Soda
		Phönix 1	30% Nitroglyzerin, 32% Natronsalpeter, 38% Roggenmehl
		Wettersicherer Gelatinedynamit II	29,6% Nitroglyzerin, 0,4% Kollodiumwolle, 32% Ammonsalpeter, 6% Kalisalpeter, 10% Seife, 17% Roggenmehl, 3% flüssiger Kohlenwasserstoff, 2% Holzmehl
		Gelatinekarbonit	25,3% Nitroglyzerin, 0,7% Kollodiumwolle 6,9% (Leim-Glyzerin-) Gelatine, 25,6% Kochsalz, 41,5% Ammonsalpeter
		Nobelit	28% Nitroglyzerin, 0,7% Kollodiumwolle, 11% Dextrin, 0,5% Holzöl, 39,7% Ammonsalpeter, 2,5% Holzmehl, 17,6% Kochsalz

Gattung	Charakteristik	Bezeichnung	Zusammensetzung
Wetterdynamite	Sprengstoffe von verhältnismäßig geringer Sprengkraft, gefrierbar. Schlagwetter-sicherheit nicht ausreichend hoch	Wetterdynamit	52% Nitroglyzerin, 13% Kieselgur, 35% kristallisierte Soda
		Grisoutine D	40—45% Nitroglyzerin, 10 bis 12% Kieselgur, 42—49% kristallisiertes Magnesiumsulfat, 1% Soda
		Grisoutite	42—46% Nitroglyzerin, 9 bis 12% Holzmehl, 44—46% kristallisiertes Magnesiumsulfat
		Nobel Ardeer Powder	31—34% Nitroglyzerin, 11 bis 14% Kieselgur, 4—6% Kalisalpeter, 47—51% kristallisiertes Magnesiumsulfat

Achter Abschnitt.

Der Explosionsstoß.

Gleichzeitig mit den in die Augen fallenden Veränderungen, welche die nächste Umgebung eines Explosionsherdes erfährt, sei es infolge des rasch anwachsenden Druckes der mit großer Geschwindigkeit entwickelten Gase, sei es als Begleiterscheinung ihrer hohen Temperatur, verläuft ein Vorgang mehr verborgener Art, der seinen Einfluß auf weit größere Entfernungen auszuüben vermag. In der plötzlichen Gleichgewichtsstörung, von der bei jeder Explosion auch das umgebende Medium — Luft, Wasser, Erdboden — ergriffen wird, nimmt eine Wellenbewegung ihren Ursprung, die mit der oben besprochenen Explosionswelle hohe Intensität und große Geschwindigkeit gemein hat, sich aber dadurch von letzterer unterscheidet, daß sie mit wachsender Entfernung vom Explosionsherde ihre Eigenart rasch verliert und schließlich in eine gewöhnliche Schallwelle übergeht.

Die Möglichkeit einer Art von Fernwirkung bei explosiven

Vorgangen wurde schon lange vermutet auf Grund gewisser Beobachtungen bei Schwarzpulverexplosionen, ohne daß es jedoch gelungen wäre, ihr Dasein unzweideutig zu erweisen. Erst Abel und vornehmlich Trauzl haben deren regelmäßiges Auftreten bei Explosionsvorgängen außer Zweifel gesetzt, indem sie zeigten, daß unterseeische Minen von Schießbaumwolle andere gleichartige Minen zur Explosion zu bringen vermögen, und zwar auf Entfernungen hin, die es als ausgeschlossen erscheinen lassen, daß Wurfstücke oder etwa durch die Wasserschicht dringende heiße Gase den zweiten Explosionsvorgang veranlaßt hätten. Man hat die hier in Frage kommende Art der Explosionsauslösung als Initiierung durch Influenz (S. 30) bezeichnet. Ursprünglich als verhängnisvolle Begleiterscheinung großer Explosionsunfälle nicht anders als gefürchtet, hat sie allmählich praktische Bedeutung gewonnen und spielt nunmehr eine wichtige Rolle in der Sprengtechnik. Von einem für Sprengzwecke geeigneten Explosivstoffe verlangt man unter anderem, daß er die Explosion zuverlässig von einer Patrone auf die andere übertrage, selbst in dem Falle, daß zwischen beiden ein nicht gänzlich zu vermeidender Zwischenraum vorhanden sein sollte.

Ob Beziehungen zwischen der chemischen Zusammensetzung eines Explosivstoffes und seiner Fähigkeit, durch Vermittelung des Explosionsstoßes übertragend zu wirken, bestehen, unterliegt dem Zweifel. Bei manchen Explosivstoffen, beispielsweise Pikrinsäure, tritt diese Fähigkeit, Detonationswirkungen auf weitere Entfernungen zu übertragen, überhaupt sehr wenig hervor. Andererseits hat man beobachtet, daß nahe miteinander verwandte Sprengmittel, wie Sprenggelatine, Gurdynamit, die verschiedenen Gelatinedynamite, hinsichtlich der Entfernung, auf welche sie unter vergleichbaren Verhältnissen übertragen, ein fast willkürlich hin und her schwankendes Verhalten zeigen.

Was das innere Spiel der Kräfte bei dem in Rede stehenden Vorgange der explosiven Fernwirkung anlangt, so hat man (nach Wolff) darüber folgende Vorstellung: An der Berührungsfläche der im ersten Entwicklungsabschnitte eines Explosionsvorganges stark zusammengedrängten Explosionsgase mit dem umgebenden Medium, z. B. Luft, wird infolge des großen Widerstandes, welchen die Luft im ersten Augenblick gegen das Ausweichen leistet, eine hochgesteigerte Luftverdichtung mit unmittelbar darauf folgender Luftverdünnung erzeugt, die sich beide nach den Gesetzen der longitudinalen Wellenbewegung fortpflanzen. Die Explosionsgase selbst werden dabei nur bis in eine vergleichsweise geringe Entfernung vom Explosionsherde fortgeschleudert. Was sich tatsächlich fortbewegt, und was bei großen Explosionen ein umfangreiches Gebiet erschüttert, sind zwei Wellenzüge, ein vom Explosionsherde fort-eilender, positiver Druckimpuls (Explosionsstoß im engeren Sinne) und ein entsprechender, nach dem Explosionsherde hin-gerichteter, negativer Druckimpuls, der sich mit der gleichen Geschwindigkeit nach der Explosionsstelle hin bewegt, wie die positiv gerichtete Kraft in entgegengesetzter Richtung. Wolff hebt hervor, daß diese Deutung eine befriedigende Erklärung für die in Berichten über Explosionsunfälle häufig wiederkehrende Bemerkung liefere, danach neben den direkten Explosionswirkungen, also vom Explosionsherde fort, auch indirekte Wirkungen zu verzeichnen gewesen sind, durch welche die Trümmer, Fensterscheiben, abgerissene Kleidungsstücke in der Richtung zum Explosionsherde hin geworfen wurden, gleichsam als ob sie zu ihm hingesaugt worden wären. Ein Strömen der Luft vom Explosionsherde fort nach fernergelegenen Punkten und umgekehrt, wie vielfach angenommen worden ist, braucht demnach nicht Platz zu greifen.

Versuchserfahrungen über den Explosionsstoß liegen begreiflicherweise nur in beschränkter Anzahl vor. Immerhin ist

man darüber nicht im Zweifel, daß Geschwindigkeit sowie Intensität des Explosionsstoßes diejenigen Bedingungen sind, welche bei der Übertragung explosiver Wirkungen auf größere Entfernungen hauptsächlich in Betracht kommen.

1. Geschwindigkeit des Explosionsstoßes.

Als Mach eine geringe Menge Jodstickstoff durch leichte Berührung mit einem Holzstabe zur Explosion brachte und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des erzeugten Luftstoßes in der Nähe dieser Schallquelle maß, ergaben sich ihm nachfolgende Geschwindigkeiten für die angegebenen Abstände von der Schallquelle:

Abstand mm	80	137	254	400	977
Geschwindigkeit m	756	540	453	416	373

Die normale Schallgeschwindigkeit in Luft (340 m) wurde erst in einem Abstande von mehreren Metern von der gewählten Schallquelle gefunden. Dies Ergebnis schien anfänglich so überraschend, daß lange an seiner Tatsächlichkeit gezweifelt wurde, zumal da andere Beobachter, die sich nicht ebenfalls eines Explosivstoffes als Schallquelle bedienten, nur normale Geschwindigkeiten auffanden. Man weiß jetzt, daß die von Mach beobachtete Schallwelle mit anscheinend regelwidrig hoher, rasch abnehmender Fortpflanzungsgeschwindigkeit nichts anderes ist, als die schon seit vielen Jahren an ihren zerstörenden Wirkungen auf weite Entfernungen bei großen Pulver- oder Sprengstoffexplosionen bekannte Erscheinung des Explosionsstoßes.

Eine nähere Untersuchung auf experimenteller Grundlage erfuhr der Explosionsstoß durch Vieille. Dieser Forscher beobachtete gelegentlich des Studiums der Fortpflanzungsgeschwindigkeit explosiver Vorgänge in gasförmigen entzündlichen Mischungen, daß eine Wellenbewegung mit großer Ge-

schwindigkeit die explosible Gasmischung auch dann durchlief, wenn diese selbst gar nicht zur Entzündung gekommen war, sondern nur die benutzte Sprengkapsel, derart, daß die Gasmasse lediglich die Rolle eines beiläufig beteiligten Mediums bei seinen Explosionsvorgängen gespielt hatte. Die anfänglich große Geschwindigkeit dieser Art Explosionswelle verminderte sich mit der Entfernung von der Sprengkapsel so schnell, daß das Phänomen an dem Ende eines mehrere Meter langen Rohres schon nicht mehr aufgefunden werden konnte.

Vieille bediente sich zu diesen Versuchen starker Stahlrohre von 22 mm lichter Weite, 25 mm Wandstärke und bis zu 32 m Länge. An beiden Enden oder auch seitlich des Rohres waren leicht verschiebbare, gut gedichtete Stempel angebracht, deren Bewegung in der mehrfach angedeuteten Weise mittels Schreibfeder auf umlaufenden Zylindern sichtbar gemacht wurde. Als Quelle des Explosionsstoßes diente ihm meist eine kleine Sprengkapsel, welche durch einen elektrisch glühenden Draht zur Explosion gebracht wurde. Nachfolgende Zahlen veranschaulichen das Ergebnis dieser Versuche, wobei die Röhre mit Luft von Atmosphärendruck gefüllt war:

Abstand	cm	32,6	53,2	131,1	235,9	386,4
Geschwindigkeit	m	1073	1015	969	821	575

Noch auf 16 m Abstand vom Explosionsherde war die Geschwindigkeit des Explosionsstoßes höher als die normale Schallgeschwindigkeit.

Wie nicht anders zu erwarten, erwiesen sich die gemessenen Geschwindigkeiten als beeinflußbar durch die Menge des detonierenden Explosivstoffes. Vieille gibt für eine Entfernung von 113 cm vom Explosionsherde folgende Zahlen an:

Füllung der Sprengkapsel	g	0,04	0,63
Geschwindigkeit	m	524	1151

Die chemische Beschaffenheit des Mediums, in welchem sich die Explosion vollzieht, wie auch seine Dichte beeinflußten in hohem Grade die Geschwindigkeit des Explosionsstoßes. Daß auch die Hülle, in welche das explodierende Knallquecksilber

eingewickelt war, von Bedeutung sein würde, ließ sich wohl voraussehen, wenn die vorliegende Erscheinung tatsächlich auf einer Übertragung von Wellenbewegungen beruhte.

Noch weitergehende Beobachtungen machten Wöhler und Martin an einer Stufenfolge neu von ihnen dargestellter Initialsprengstoffe aus der Reihe der Fulminate und Azide. Sie fanden unter anderem, daß der Geschwindigkeits- und Druckwert des vom Explosionsherde forteilenden Explosionsstoßes („Knallwelle") als Vergleichsmaßstab für die ungleiche Brisanz und Initiierfähigkeit der geprüften Initialsprengstoffe benutzt werden könne.

Eine wertvolle Bestätigung und Erweiterung der auf diesem Gebiete mit nur geringen Sprengstoffmengen gewonnenen Erfahrungen lieferten die in großem Maßstabe in Cummersdorf angestellten Explosionsversuche, wobei bis zu 1500 kg Gelatinedynamit auf einmal zur Detonation gebracht wurden. Zur Messung der Geschwindigkeit des Explosionsstoßes dienten Luftstoßanzeiger, bestehend aus elektrischen Kontakten, welche durch den Ausschlag einer Metallmembran geöffnet oder geschlossen werden, sobald diese ein Luftstoß, z. B. die Kopfwelle eines Geschosses, trifft. Die Geschwindigkeit der durch die Luft fortgepflanzten Erschütterung in nächster Nähe des Explosionsherdes kam aus Rücksicht auf die Erhaltung der Apparate nicht zur Ermittelung; sie muß sehr groß gewesen sein, da sie noch auf der 50 m entfernten ersten Messungsstelle gegen 800 m betrug und auch auf 250 m Entfernung nicht die normale Geschwindigkeit des Schalles angenommen hatte.

2. Intensität des Explosionsstoßes.

Man hat sich vielfach bemüht, auf dem Wege des praktischen Versuches ein Urteil darüber zu gewinnen, wie weit unterseeische Minen voneinander entfernt angebracht werden müssen, um bei etwaiger Explosion der einen nicht die übrigen

zu gefährden. Nach Versuchen von Abbot über die Größe der unter Wasser fortgepflanzten Stoßenergie stand diese nicht im geraden Verhältnis zur explodierenden Sprengstoffmenge, sondern war weit geringer; sie wuchs, wenn man von der einfachen auf die doppelte Sprengstoffladung überging, nicht auf das Doppelte, sondern nur um etwa ein Viertel. Blochmann benutzte zur Messung der Intensität des Explosionsstoßes unter Wasser die aus der Dampfmaschinentechnik bekannte Vorrichtung der Verbindung eines Federdruckmanometers mit einer umlaufenden Trommel, so daß auch der zeitliche Verlauf der auftretenden Erscheinungen verfolgt werden konnte. Der durch das Wasser fortgeleitete Explosionsstoß wurde von Stempeln bekannten Querschnittes aufgefangen, welche auf vorher geeichte Federn wirkten, deren Verkürzung aufgezeichnet wurde.

Die mit diesem Apparate gewonnenen Kurvenlinien sind durch eine Reihe hervortretender Druckmaxima ausgezeichnet, von denen die beiden ersten ein besonderes Interesse beanspruchen. Das erste Druckmaximum verdankt seine Entstehung einem mit mindestens Schallgeschwindigkeit fortschreitenden Impulse, der als der eigentliche Explosionsstoß aufgefaßt werden kann. Das zweite, anscheinend größere Druckmaximum deutet auf eine andere, weit langsamere, nur mit wenigen Metern Geschwindigkeit sich fortpflanzende dynamische Ursache, wie sie durch die Fortbewegung von Wassermassen selbst gegeben sein kann.

Thomas berichtet über Versuche, die den Zweck hatten, zu ermitteln, ob durch Verladen großer Mengen Dynamit in einer Entfernung von 12 km von Antwerpen für diese Stadt eine Gefahr bestehe. Auf freiem Felde wurden vom gewählten Explosionsorte aus nach allen Richtungen in Entfernungen von 5 bis zu 1000 m im ganzen fünfzig, teils bewegliche, teils feste Scheiben aufgestellt. Außerdem wurden innerhalb des voraussichtlichen Bereiches des Explosionsstoßes zwei Holzhütten erbaut, mit Dachziegeln gedeckt und mit Türen sowie verglasten Fenstern versehen. Die Sprengstoffladungen be-

standen aus 25, 50, 150 und 1000 kg Gelatinedynamit in der üblichen Verpackung von je 25 kg patronierten Sprengmittels in Kisten; sie wurden freiliegend nacheinander zur Explosion gebracht. Die zerstörende Wirkung äußerte sich, entsprechend den steigenden Sprengstoffmengen, bis auf 17,5, 40, 55 und 125 m vom Explosionsherde. Weiter folgte eine schmale neutrale Zone, und über diese hinaus machte sich die obenerwähnte gegen den Explosionsherd gerichtete Wirkung geltend, durch welche die Scheiben nach dem Orte der Explosion hin umgelegt, in den Hütten die Fensterrahmen herausgedrückt und die Verglasung zumeist nach außen geworfen wurde.

Wichtige Erfahrungen über die Wirkung größerer Mengen detonierender Sprengstoffe verdanken wir den zahlreichen Explosionsunfällen, über welche die Geschichte der Sprengstoffindustrie zu berichten weiß. Leider bleibt die nähere Ursache derartiger Vorkommnisse oft in Dunkel gehüllt, nicht allein aus Mangel an redenden Zeugen, sondern auch, wie die Erfahrung lehrt, weil Überlebende oder sonstige Beteiligte sich des Herganges nur in äußerst seltenen Fällen klar bewußt geworden sind. So kam gelegentlich einer Dynamitexplosion einer der betroffenen Arbeiter mit dem Leben und ohne erhebliche Verletzung davon; aber eine Nervenerschütterung hatte ihn dermaßen verwirrt, daß er acht Tage hindurch sich auf die stattgefundene Explosion überhaupt nicht besinnen konnte und allmählich erst eine schwache Erinnerung daran zurückgewann. Zu derartigen Schwierigkeiten gesellt sich der Umstand, daß die Trümmerstätte selten einige Anhaltspunkte über die wahrscheinliche Ursache gewährt. Immerhin hat man durch sorgfältige Sammlung und kritische Sichtung der bei Explosionsunfällen gemachten Beobachtungen ein Material gewonnen, welches wertvolle Winke für die Behandlung von Explosivstoffen gibt und auf die bei Umgang mit solchen Substanzen drohenden Gefahren aufmerksam macht.

Die bekannten Zündblättchen (Amorces) können einzeln genommen als ungefährlich angesehen werden. Anders liegt die Sache, sobald eine größere Anzahl davon zur Explosion kommt. In Vanves, in der Nähe von Paris, war ein Kind damit beschäftigt, Zündblättchen mit der Schere durchzuschneiden, als sich plötzlich die kleinen Einzelexplosionen auf zwei Pakete übertrugen, die auf dem Tische lagen und 600 Zündblättchen enthielten. Das Kind wurde zerrissen und der Stuhl, auf dem es saß, völlig zerschmettert.

Zwei Arbeiterinnen der Sprengstoffabrik in Westquarter waren beauftragt, eine Ladung Sprengkapseln nebst Zündsatz aus dem Magazin in den Arbeitsraum zu schaffen. Sie setzten den Transportkasten auf die Erde und begannen miteinander zu tanzen. Unglücklicherweise stolperte das eine der Mädchen und warf dabei den Kasten um, wodurch die ganze Ladung zur Explosion kam und beide Mädchen in Stücke gerissen wurden.

Am 23. Januar 1892 flog auf der Pulverfabrik Saint-Chamas eine Poliertrommel mit 500 kg Schwarzpulver in die Luft. Dieser Fall ist weniger durch den Umfang der angerichteten Zerstörung, als vielmehr durch den Umstand bemerkenswert, daß als Ursache der Explosion unzweifelhaft nachgewiesen werden konnte, daß Streichhölzer in dem Pulver enthalten waren, die sich mit zunehmender Erwärmung der Pulvermasse entzündeten. Bei sorgfältiger Nachsuche fand man auch in einer anderen Poliertrommel mehrere Streichhölzer; hier aber war das Pulver feuchter gewesen und die Trommel erst kurze Zeit gelaufen, weswegen sich die Streichhölzer nur mit einer Schicht Pulver umgeben hatten, ohne in Entzündung zu geraten.

Am 15. Dezember 1902 explodierten auf der Fabrik von Curtis und Harvey bei Lower Hope Point, Kent, 14 Kisten mit Kordit-Rohmasse im Gesamtgewicht von etwa 450 kg. Gemäß der Fabrikationsvorschrift war das aufgeflogene Gebäude dazu bestimmt, daß in demselben die aus trockener Schießwolle in Mengung mit Nitroglyzerin bestehende Kordit-Rohmasse durch ein engmaschiges Sieb gedrückt werde. Es ist möglich, daß während dieser Operation, vielleicht durch einen elektrischen Funken veranlaßt, die Explosion erfolgte. Für wahrscheinlicher gilt die andere Annahme, wonach die mit Bronzeecken beschlagenen, ziemlich schweren Holzkisten heftig aneinander gestoßen sind; verschüttete Rohmasse konnte unter diesen Umständen einem reibenden Stoße ausgesetzt gewesen sein, der die Explosion herbeiführte. Da Gebäude und Inhalt völlig der Zerstörung anheimfielen, auch die zwei dabei beschäftigten Arbeiter ge-

tötet wurden, so ist es nicht möglich, mit Sicherheit anzugeben, was den Anlaß zur Explosion gab.

Am 16. Februar 1903 erfolgte auf dem Arsenal in Woolwich eine Selbstentzündung von sehr dicht gepreßter, getrockneter Schießwolle. Einen großen Block solcher Schießwolle, welcher fast völlig trocken war, hatte man mit Hilfe eines Meißels aus Phosphorbronze langsam abgebrochen, um zu erkennen, ob er auch in seinen inneren Teilen trocken sei. Im Laufe dieser Arbeit fing eines der aufgebrochenen Stücke plötzlich Feuer, wobei die Entzündung vermutlich durch die Reibung mit dem Werkzeuge hervorgerufen worden ist. Sechs Personen waren in dem Raume anwesend. Eine hiervon konnte sich unverletzt retten; vier andere, welche das Gebäude nicht so rasch verlassen konnten, wurden so furchtbar verbrannt, daß zwei davon nachträglich starben; die sechste Person konnte nicht mehr entweichen und verbrannte mitsamt etwa 240 kg trockener Schießwolle, welche in einem anderen Teile des Gebäudes aufgestapelt war.

Am 3. November 1893 kam der spanische Dampfer Cabo Machichaco in dem Hafen Santander an mit einer Ladung von etwa 2000 Tonnen Eisen, 1810 Kisten Dynamit, vielen Kisten Petroleum, Säcken mit Mehl und anderer Handelsware. Bevor das Schiff am Kai anlegte, entdeckte man an Bord desselben ein Feuer, und, entgegen der Vorschrift, wurde es dem Lande noch weiter genähert. Dreißig Kisten Dynamit wurden schleunigst entladen und in Sicherheit gebracht. Der kaufmännische Vertreter behauptete auf Anfrage, daß kein weiteres Dynamit an Bord befindlich sei. Die Feuersbrunst auf dem Schiffe nahm inzwischen rasch zu, und auf dem Kai sammelte sich eine große Zuschauermenge, um das ungewöhnliche Schauspiel eines brennenden Schiffes zu betrachten. Etwa 2½ Stunden, nachdem das Feuer entdeckt worden war, erfolgte eine fürchterliche Explosion, wobei Eisenteile nach allen Richtungen und mit solcher Wirkung umhergeschleudert wurden, daß 510 Personen sofort getötet und etwa 1000 mehr oder weniger schwer verwundet wurden, abgesehen von dem schweren Schaden an den umgebenden Gebäuden.

Am 21. April 1901 wurde in der chemischen Fabrik Elektron in Griesheim durch ein Feuer, welches in der Pikrinsäureanlage ausbrach, eine furchtbare Explosion herbeigeführt, bei welcher 24 Personen ums Leben kamen, eine große Zahl von Arbeitern und sonstigen Angestellten der Fabrik Verletzungen erlitten und ein erheblicher Schaden an Hab und Gut der Einwohner der umliegenden Ortschaften verursacht wurde. Die Ursache der Entzündung ist nicht

aufgeklärt. Das Feuer war etwa 20 Minuten im Gange, als zunächst eine kleinere und dann eine größere Detonation erfolgte. Es explodierte, wie aus den aufgeworfenen Erdtrichtern nachträglich zu ersehen war, der Inhalt der steinernen Tröge, in welchen die Pikrinsäure gewaschen wurde. Man nimmt an, daß diese Explosion zurückzuführen ist auf das Herabstürzen eiserner Teile der Transmission oder des Daches in die durch den Brand ausgetrocknete und auf erhöhte Temperatur gebrachte Pikrinsäure. Möglich ist auch, daß Pikrinsäure mit gühendem Eisen oder Steinmaterial in Berührung kam. Bemerkenswert ist, daß die unmittelbare Wirkung der Explosion eine verhältnismäßig beschränkte blieb gegenüber der verheerenden Wirkung, die sich als die Folge des nach dem Explosionsherde hin gerichteten Stoßes darstellt. Ein großer Teil der ausgedehnte Flächen bietenden Gebäudemauern in einer Entfernung von 30—50 m war nach der Explosionsstelle zu eingestürzt, die Dächer ebendahin abgehoben und die ganze innere Einrichtung zusammengebrochen.

Von praktischem Interesse ist es, eine Vorstellung von den Entfernungen zu gewinnen, bis auf welche Explosionsunfälle in der einen oder anderen Weise sich bemerkbar zu machen pflegen. In Stowmarket explodierte am 11. August 1871 ein Magazin mit 13500 kg Schießwolle. Das Geräusch der Explosion war vernehmbar auf eine Entfernung von 45—50 km. Der Explosionsstoß wurde als Erschütterung der Fensterscheiben empfunden auf 11 km und soll vereinzelt sogar die Ursache des Zerbrechens von Fensterscheiben gewesen sein. Auf 8 km Entfernung wurde eine Eisenstange, mit welcher eine Tür gesichert war, infolge des auf diese ausgeübten plötzlichen Druckes gesprengt. Auf eine Entfernung von 1600 m fand man die Fensterrahmen in mehreren Fällen zerbrochen. Von 1200—400 m abwärts wurden schwache Mauern umgeworfen, Kirchenfensterpfosten gesprengt, Giebel zerstört und ähnliche leichtere Schäden verursacht; im allgemeinen blieben Materialschädigungen auf eine Entfernung von 400—450 m beschränkt. Auf eine Entfernung von 250—350 m wurden mehrere Landhäuser fast ganz zerstört. Die Beschädigungen

an Fabrikgebäuden bis auf 50 m von dem aufgeflogenen Magazin kamen vollständiger Vernichtung gleich.

Wie man aus Vorstehendem erkennt, ist selbst bei sehr großen Explosionen das Gebiet heftiger Zerstörung ein verhältnismäßig beschränktes, und man kann annehmen, daß eine Entfernung von 500 m vor den Folgen einer Explosion ausreichenden Schutz zu bieten vermag. Um größeren Schädigungen nach Möglichkeit vorzubeugen, wird deshalb die Herstellung und Lagerung von Sprengstoffen von einer behördlichen Erlaubnis abhängig gemacht, welche erst nach Berücksichtigung aller für die Sicherheit nötigen Bedingungen erteilt wird. Hierzu gehört in erster Linie eine genügende Entfernung der einzelnen Werkstätten untereinander sowie von umliegenden bewohnten Häusern, belebten Verkehrsstraßen und Wegen.

In Österreich-Ungarn werden die Gebäude einer Explosivstoffabrik in mehrere Gefahrsklassen eingeteilt und danach die Entfernung derselben voneinander bemessen. Die erste Gruppe umfaßt Räume zur Herstellung der Ausgangsstoffe, die zweite solche zur Erzeugung der Sprengmittel, die dritte solche zur Herstellung von Patronen und deren Verpackung, die vierte die Vorratsräume für die fertigen Sprengmittel und die fünfte die Wohngebäude. Die Gebäude der ersten drei Gruppen müssen von denen einer anderen Gruppe mindestens 50 m, die beiden letzten Gruppen voneinander sowie von den Gebäuden der übrigen Gruppen mindestens 200 m entfernt sein. Die Magazine müssen bei einem Fassungsraume von 2000 kg wenigstens 100 m und bei einem größeren Fassungsraume von 10000 kg wenigstens 200 m voneinander entfernt stehen. Alle jene Fabrikgebäude, welche Explosivstoffe enthalten, müssen von wenig benutzten Wegen und Straßen mindestens 500 m entfernt sein, von stark benutzten Wegen, Eisenbahnen, Wasserstraßen, bewohnten Häusern mindestens 1000 m entfernt sein. In Großbritannien, dem Mutterlande derartiger Vorschriften, sind die einzuhaltenden Entfernungen für verschiedene Verhältnisse noch sorgsamer abgestuft. So beträgt die für ein Magazin mit 10000 kg Sprengstoff vorgesehene Entfernung von einer öffentlichen Straße etwa 100 m, von einer öffentlichen Eisenbahn etwa 300 m und von einem öffentlichen Gebäude etwa 800 m.

Weitere Maßregeln zur Sicherung großer Mengen von Explosivstoffen betreffen die Bauart der zu ihrer Unterbringung bestimmten Räumlichkeiten. Diese müssen mit Blitzschutz versehen sein und sollen in der Regel aus einem Baumaterial bestehen, welches, wie Hartgipsdielen, Kieszementbeton, Schwemmsteine, bei etwaigen Explosionsunfällen zu Staub zerfällt, nicht aber durch schwere Wurfstücke auch die weitere Umgebung gefährdet. Die Sprengstoffmagazine pflegen von Erdwällen umgeben zu sein, und man führt diese bei etwa 0,5 m Kronenbreite bis etwas über die Höhe des Dachfirstes der Gebäude hinaus. Auch von unterirdischer Bauart wird neuerdings wieder häufiger Gebrauch gemacht. Für die Beleuchtung kommt fast nur noch elektrisches Glühlicht in Frage. Selbstverständlich entbindet auch diese verhältnismäßig ungefährliche Beleuchtungsart keineswegs von der Beachtung der allgemeinen Vorschriften im Beleuchtungswesen.

Neunter Abschnitt.

Die physikalische und chemische Beständigkeit der Explosivstoffe.

Die in den voraufgegangenen Abschnitten gemachten Darlegungen verfolgen den Zweck, zu zeigen, daß es sich bei Explosionen um einheitliche Vorgänge handelt, deren mannigfaltige Erscheinungsform in erster Linie auf die Bedingungen ihres Entstehens, sodann auf die Eigenart der verschiedenen in Betracht kommenden explosiblen Systeme zurückzuführen ist. In diesem Sinne wurden die gesetzmäßigen Beziehungen behandelt, welche den Explosionsverlauf mit der chemisch-physikalischen Beschaffenheit der Explosivstoffe verknüpfen. Es finden sich aber an den technisch wichtigen Explosivstoffen weitere spezifische Merkmale, welche zwar an passender Stelle kurz

aufgeführt wurden, aber noch nicht eine ihrem Einflusse auf die explosive Umwandlung entsprechende Würdigung erfuhren. Diese Eigentümlichkeiten können entscheidende Bedeutung gewinnen, wenn es darauf ankommt, aus einer gegebenen Sprengstoffmenge eine bestimmte Nutzleistung zu erzielen. Ein Mindestmaß von Unveränderlichkeit der Eigenschaften ist in der Tat ein praktisch wichtiges Erfordernis der Explosivstoffe. Daß die Flüssige-Luft-Sprengstoffe diesem Gesichtspunkte keine Rechnung tragen, ist eine durch besondere Umstände gerechtfertigte Ausnahme.

Sprengmittel nach dem Urbild des Schwarzpulvers, die aus mehreren, für sich nicht explosiblen Bestandteilen gemischt sind, bedürfen eines gewissen ausgeprobten Grades von Verdichtung, nicht nur um ihren Zusammenhalt sicherzustellen gegenüber den beim Transporte unvermeidlichen Erschütterungen, welche zu teilweiser Entmischung der Bestandteile führen könnten, sondern auch um der ballistischen und sprengtechnischen Verwertung willen. Bei gelatinierten Treibmitteln oder Sprengmitteln können sich Dichteänderungen, etwa infolge von Verflüchtigung des Gelatiniermittels nach beendeter Fabrikation, in einer wechselnden Verbrennungsgeschwindigkeit beziehungsweise Detonationsgeschwindigkeit und dementsprechend unbestimmter Leistung ausdrücken.

Wichtig ist auch die Frage, wie sich ein Explosivstoff unter dem Einflusse der durch das Klima oder die Lagerungsverhältnisse bedingten Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen verhalten werde. Ein leicht zersetzliches Präparat, wie beispielsweise nitrierter Zucker, würde unter diesem Gesichtspunkte keine Aussicht auf technische Verwendbarkeit besitzen. Es steht heute fest, daß die in größerem Umfange erprobten Explosivstoffe der Gegenwart eine für alle praktischen Zwecke hinreichende chemische Beständigkeit, „Stabilität", besitzen. Diese fällt in der Regel zusammen mit dem höchsten

Grade chemischer Reinheit. Soweit man es mit gut kristallisierenden chemischen Individuen zu tun hat, wie im Falle der anorganischen Nitrate, Nitroverbindungen, Chlorate, liegt daher keine Schwierigkeit vor, sich von deren chemischer Haltbarkeit zu vergewissern. Auch Nitroglyzerin, obwohl dessen Kristallisationsfähigkeit keine Anwendung in der Fabrikation gefunden hat, läßt sich leicht reinigen, auf seinen Reinheitsgrad prüfen und dauernd stabil erhalten. Begründeter sind in dieser Richtung die Zweifel, welche man der Schießwolle lange Zeit entgegengebracht hat, was mit dem Umstande zusammenhängt, daß es sich hierbei um einen Salpetersäureester handelt, dem ein verwickelt gebautes, organisiertes Gebilde, die Pflanzenfaser, zugrunde liegt.

Zu den ältesten über die chemische Stabilität von Nitrozellulose angestellten planmäßigen Beobachtungen gehören die von Abel. Dieser schloß Nitrozellulose in einen luftleer gemachten Glasballon ein, der mit einer Barometerröhre in Verbindung stand, und erwärmte sie Monate hindurch auf Temperaturen von 65° C. Die allmählich entwickelte Gasmenge wurde gemessen und etwaige Änderungen im Aussehen der Nitrozellulose vermerkt. Es zeigte sich, daß ganz reine Nitrozellulose dem zersetzenden Einflusse einer längeren Einwirkung höherer, selbst beinahe 100° C erreichender Temperaturen in überraschendem Grade widersteht. Abel hebt hervor, daß die niederen Nitrierungsstufen der Zellulose, sofern sie rein seien, keine größere Neigung sich zu verändern zeigten, als höchst nitrierte Schießwolle, daß demnach das Vorhandensein niederer Nitrierungsstufen von Zellulose in solcher Schießwolle an sich noch keineswegs die chemische Stabilität derselben beeinträchtigen müsse, wie irrtümlicherweise bis dahin angenommen wurde. Ein weiteres Ergebnis dieser Forschungen über das Verhalten von Nitrozellulose bei höherer Temperatur war die sogenannte Abelsche Testprobe. Sie beruht auf dem Grund-

gedanken des Nachweises der ersten Spuren frei werdender Stickstoffoxyde mit Hilfe von Jodkaliumpapier und wird allgemein zur Prüfung von Explosivstoffen jeder Art auf chemische Stabilität herangezogen.

In Fig. 8 ist der Abelsche Testapparat in seiner einfachsten Form dargestellt. In ein mit heißem Wasser gefülltes Becherglas tauchen ein Thermometer sowie mehrere Reagensgläser ein. Letztere dienen zur Aufnahme der Sprengstoffprobe und tragen das mit Jodzinkstärkelösung getränkte Indikatorpapier. Mit Hilfe dieses Papiers will man erkennen, ob der Explosivstoff bei einer bestimmten Temperatur, z. B. 80° C, innerhalb einer gewissen Zeit, etwa 10 Minuten, nachweisbare Mengen von Stickstoffoxyden abgibt.

Fig. 8.
Abelscher Testapparat.

Man macht freilich dabei die Voraussetzung, daß erstens das, was die Färbung des Reaktionspapieres erzeugt, in allen Fällen Stickstoffoxyde und nichts anderes sei, daß zweitens das entbundene Agens eine beginnende Zersetzung des Sprengstoffes anzeige. Manche neuere Erfahrungen in betreff der chemischen Beständigkeit von Explosivstoffen decken sich indessen nicht mit jenen Annahmen. Es hat sich gezeigt, daß auf der einen Seite Explosivstoffe, welche den Abel-Test ursprünglich bestanden, in kurzer Zeit von einer Zersetzung ergriffen wurden, während auf der anderen Seite den Abel-Test nicht erfüllende Sprengstoffe einen hervorragenden Grad von Lagerbeständigkeit unter den un-

günstigsten Bedingungen bewiesen. Aus solchen unerwarteten Vorkommnissen heraus entstand das Bedürfnis nach weiteren, insbesondere auch quantitativen Prüfungsmethoden.

Die gegenwärtig verbreitetste derartige Untersuchungsweise für Nitrozellulose rührt von Bergmann und Junk her. Der Beständigkeitsgrad wird ermittelt durch Messen der nach zweistündigem Erhitzen bei 132° C abgespaltenen Stickstoffoxyde. Eine gute Schießwolle soll nicht mehr als 2,5 cm NO pro Gramm abgeben.

Die chemische Beständigkeit der gelatinierten Nitrozellulose ist merkwürdigerweise nicht selten eine weit geringere als die der ungelatinierten. Da es bei der Überführung von loser Nitrozellulose in gelatinierte sich im wesentlichen um Vorgänge handelt, welche die chemische Beschaffenheit der Nitrozellulosefaser unberührt lassen und nur eine physikalische Umwandlung derselben zum Zwecke der Herabsetzung der Verbrennungsgeschwindigkeit bewirken sollen, so ist nicht ohne weiteres einzusehen, weswegen die chemische Stabilität eines aus gelatinierter Nitrozellulose bestehenden rauchschwachen Pulvers nicht einfach der Stabilität der zugrunde liegenden Nitrozellulose entsprechen sollte. Die Erfahrung lehrt aber, daß, ungeachtet sorgfältiger Auswahl der Rohstoffe und gewissenhafter Herstellung der Nitrozellulose, gelatinierte Pulver in verhältnismäßig kurzer Zeit Zersetzung erlitten haben. Die Ursache dieser Erscheinung dürfte noch nicht in vollem Umfange aufgeklärt sein; auch fehlen zurzeit untrügliche Kennzeichen für den Haltbarkeitsgrad des aus einer stabilen Nitrozellulose gefertigten gelatinierten Pulvers. Eine von Simon Thomas empfohlene Prüfungsweise für gelatiniertes Pulver besteht darin, das Präparat täglich 8 Stunden auf etwa 100° C in einer geschlossenen Probierröhre zu erhitzen und den Gewichtsverlust in bestimmten Zeiträumen festzustellen. Nach der in Frankreich üblichen Methode von Vieille erwärmt man das zu untersuchende Pulver zusammen mit blauem Lackmuspapier auf 110° C und ver-

merkt die Zeit, nach welcher das Papier eine bestimmte Rötung annimmt. Es scheint, daß diese Art der Prüfung besonders geeignet ist irrezuführen, indem danach Pulversorten als haltbar beurteilt werden, die es in Wirklichkeit nicht sind; so mögen sich die häufigen Unfälle mit dem französischen B-Pulver erklären.

Am 25. September 1911 erfolgte an Bord des auf der Reede von Toulon liegenden Schlachtschiffes Liberté in der Gegend der Munitionskammern eine dumpfe Detonation, und unmittelbar darauf stiegen aus den vorderen Luken Rauch und gelbgefärbte Flammen empor. In kurzen Zeitabständen ereigneten sich vier weitere Explosionen, von denen die letzte und heftigste das Vorschiff in einer Länge von 60 m zertrümmerte und zum Sinken brachte. Das Panzerdeck des Mittelschiffs wurde auf eine Länge von 40 m abgehoben und mit den beiden darüberliegenden Decks und den Geschütztürmen hinterwärts geschleudert, so daß es umgekehrt auf das Achterschiff zu liegen kam. Die in die Luft geschleuderten Trümmer im Gewichte von mehreren Tonnen fielen zum Teil auf die in der Nähe der Liberté vertäuten Schlachtschiffe und brachten diesen Beschädigungen ernster Natur bei. Ferner kamen 200 Seeleute dabei zu Tode. Als Ursache der Katastrophe wurde in diesem Falle eine ungenügende Haltbarkeit des B-Pulvers erkannt.

Von praktischem Interesse ist ferner die Fähigkeit mancher Explosivstoffe, aus der Luft Feuchtigkeit anzuziehen — ist es doch gerade diese Eigenschaft, welche das Anwendungsgebiet einiger als Komponenten von Sprengstoffmischungen wertvollen Substanzen, wie Natronsalpeter und Ammonsalpeter, in unliebsamer Weise einschränkt. Für ballistische Zwecke sind die genannten Substanzen wegen dieser Neigung immer wieder verworfen worden. Für Sprengzwecke ist zwar eine geringe Schwankung in der Unveränderlichkeit des Wirkungswertes zulässig, sofern die gute Detonationsfähigkeit erhalten bleibt; doch auch diese kann schon durch geringe Mengen Feuchtigkeit in Frage gestellt werden. Patronen, aus 95,5% Ammonsalpeter und 4,5% Trinitronaphthalin bestehend,

welche in trockenem Zustande tadellos den Explosionsstoß übertragen und völlig explodieren, tun dies nicht mehr, nachdem sie 3—4% Feuchtigkeit aufgenommen haben. Ebenso büßen feucht gewordene Knallquecksilbersprengkapseln ihr Initiierungsvermögen ein.

Der Umstand, daß Nitrozellulose vorwiegend für ballistische Zwecke Anwendung findet, wobei auf die Sicherung einer bestimmten Wirkung besonderer Wert gelegt werden muß, hat dazu geführt, auch deren hygroskopische Eigenschaften näher zu verfolgen. Will hat das Verhalten der wichtigsten Nitrierungsstufen von Zellulosen verschiedener Art in den Kreis seiner Untersuchungen gezogen. Wurde der Feuchtigkeitszustand der Atmosphäre hoch gehalten, etwa auf 90% Sättigungsgrad, aber dennoch weit genug von der Grenze, bei der schon infolge geringfügiger, fast unvermeidlicher Temperaturschwankungen teilweise Kondensation von Wasser auf der Nitrozellulosefaser erfolgt, dann zeigten sich eine Reihe bemerkenswerter Regelmäßigkeiten zwischen Nitrierungsgrad der Zellulose und deren Feuchtigkeitsaufnahme.

Für die in der Technik eine Rolle spielenden Nitrierungsstufen von etwa 13,3% Stickstoffgehalt bis hinunter zu 9% ergab sich, wenn das Präparat bei 40° C auf Gewichtskonstanz abgetrocknet worden war, als Summe von Stickstoffgehalt und Feuchtigkeitsaufnahme in Prozenten im Mittel die Zahl 14,6. Dieser Wert erwies sich als unabhängig sowohl von der Zellulosеart, welche zur Nitrierung gedient hatte (Baumwolle, Flachs, Hanf, Jute), als auch von der Behandlung, welche man dem Ausgangsmaterial oder dem fertigen Nitriergut mit Hilfe von Säuren, Bleichmitteln, Alkalien hatte zuteil werden lassen.

Das Nitroglyzerin gefriert leicht, schon bei mäßig kühler Witterung, etwa von 12° C abwärts, und taut nur langsam bei höherer Temperatur wieder auf. Diese Eigenschaft findet sich bei fast allen Nitroglyzerinsprengstoffen, namentlich Gurdynamiten und Gelatinedynamiten, in verschieden hohem

Grade wieder; sie verursacht Unbequemlichkeiten und selbst Gefahren, indem gefrorene Nitroglyzerinsprengstoffe im Bohrloch nur schwierig zur Detonation kommen und infolgedessen als Versager oder Ausbläser nach dem Schusse gefährlich werden können. Deswegen sollen gefrorene Dynamitpatronen vor dem Gebrauche aufgetaut werden, obschon das Verfahren des Auftauens zeitraubend, umständlich ist und besondere Vorrichtungen voraussetzt. Zweckmäßig bedient man sich dazu wasserdichter Blechbüchsen, die in mäßig warmes Wasser gesetzt werden. Auch hat man Auftauapparate, sogenannte Thermophore, im Gebrauch, welche längere Zeit eine mäßige Wärme von etwa 50° C Temperaturhöhe abzugeben imstande sind. Ihre Wirkung beruht darauf, daß erwärmtes und geschmolzenes essigsaures Natron langsam unter Wärmeabgabe auskristallisiert. Würde man gefrorene Patronen unmittelbar in warmes Wasser eintauchen, so träte das Nitroglyzerin teilweise aus, sammelte sich am Boden des Wasserbehälters an und könnte zu Verunglückungen Anlaß geben. Ebensowenig darf man gefrorenen Dynamit an sehr warme Orte, in die unmittelbare Nähe von Öfen, Dampfleitungen oder gar an offenes Feuer bringen. In jedem Falle hat man beim Auftauen die größte Vorsicht walten zu lassen. Das unvorsichtige Auftauen gefrorenen Dynamits hat schon zahlreiche Unfälle im Gefolge gehabt. Sie ereignen sich meist in den ersten drei Monaten des Jahres, da die Sprengstoffe in den Lagern erst einige Zeit nach dem Eintritt kalten Wetters frieren, einmal gefroren aber längere Zeit höheren Temperaturen widerstehen, ohne ihren plastischen Zustand wieder anzunehmen.

Am 26. November 1890 versuchte ein Bergmann gefrorene Dynamitpatronen durch Eintauchen in einen Eimer mit warmem Wasser aufzutauen, besann sich aber dann auf die richtige Art des Auftauens in einem geeigneten Warmwasserapparat, benutzte indessen zum Anfüllen des Zwischenraumes dieser Vorrichtung das Wasser aus dem Eimer, welches bereits Nitroglyzerin aufgenommen

hatte. Ein anderer Arbeiter, dem dieser Vorgang unbekannt war, entnahm nach einiger Zeit dasselbe Wasser aus dem Warmwasserapparat, um es von neuem anzuwärmen, und setzte den damit gefüllten Topf aufs Feuer. Nun erfolgte eine Explosion, welche zwei Mann tötete und einen verletzte.

Am 27. März 1895 trug sich folgendes Ereignis zu. Jemand hatte gefrorene Dynamitpatronen auf noch warme Asche gelegt und einen anderen mit deren Beaufsichtigung betraut. Die plötzlich eintretende Explosion riß dem Manne den Kopf vom Leibe.

Am 15. Februar 1881 kam ein Bergmann auf den Gedanken, gefrorene Dynamitpatronen auf die Weise aufzutauen, daß er je zwei Stück derselben zwischen den Händen gegeneinander rieb. Das schlimme Ende war eine Explosion, welche ihn aufs schwerste verletzte.

Ein anderer Arbeiter wurde am 9. April 1886 dadurch getötet, daß er gefrorenen Dynamit über einer brennenden Kerze zum Auftauen bringen wollte.

Sehr häufig ist es vorgekommen, daß Bergleute ihre gefrorenen Dynamitpatronen in Schüsseln, Tiegeln und dergleichen Geschirr auf den geheizten Ofen setzten. Explosionen waren die fast regelmäßige Folge derartiger unvorsichtiger Handlungsweise. Sogar ein vorschriftsmäßiger Warmwasserapparat kann bei unsachgemäßer Behandlung zu Unfällen Anlaß geben.

In einem Kalksteinbruch bei Bergisch-Gladbach verbrannten plötzlich 20 Dynamitpatronen während des Auftauens in einem Apparate, glücklicherweise ohne daß Explosion eintrat. Die Ursache der anfänglich auffallenden Erscheinung wurde schließlich darin erkannt, daß der innere Blecheinsatz nicht genügend gereinigt und daher mit Nitroglyzerin beschmutzt war, welches sich im Laufe der Zeit bei der wiederholten Erwärmung zersetzt hatte und so auch die Verbrennung der Patronen einleitete.

Um diesen Übelständen, welche die Gefrierbarkeit von Nitroglyzerin nach sich zieht, von Grund aus zu begegnen, hat man dem Nitroglyzerin Stoffe zugesetzt, die teils den Gefrierpunkt desselben erniedrigen, teils das Erstarren durch Bildung unterkühlter Lösungen verhindern, mindestens verzögern. Dahin

gehören Nitrobenzol, Dinitrotoluol und viele andere nitrierte Kohlenwasserstoffe, die in einer Menge von 5—10% des Nitroglyzerins dessen Gefrierpunkt merklich erniedrigen. Größere Zusatzmengen davon zu machen, so daß eine ausreichende Erniedrigung des Gefrierpunktes erzielt wird, verbietet sich aus einer Reihe von praktischen Rücksichten, worunter die Abnahme der Sprengkraft sowie die der Initiierungsfähigkeit die Hauptrolle spielen. Unter denjenigen Substanzen, welche durch Bildung unterkühlter Lösungen das Gefrieren von Nitroglyzerin verzögern, ohne die Sprengkraft erheblich zu beeinträchtigen, haben sich Chlordinitroglyzerin und Tetranitrodiglyzerin bewährt. Es ist auf diesem Wege möglich, praktisch ungefrierbare Dynamite zu erzeugen.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA w Gliwicach

Register.

Abbildung 18, 30, 49, 51, 52, 96, 114, 139.
Abbot 130.
Abel 24, 30, 59, 71, 95, 98 108, 125, 138.
Abelsche Gleichung 97.
Abelsche Testprobe 138, 139.
Abnutzung s. Ausbrennung.
Agar-Agar 80.
Aggregatzustand 16.
Alkalisalz 115, 120.
Alkohol 17, 39, 69, 73, 80.
Alkoholische Natronlauge 90.
Aluminium 9, 89, 92.
Amberit 66.
Ammonal 92.
Ammonit s. Ammonnitratsprengstoff.
Ammoniumbichromat 60, 66.
Ammoniumoxalat 122.
Ammonkarbonit 114, 121, 123.
Ammonnitrat 10, 14, 20, 24, 56, 81, 83, 90, 91, 92, 97, 103, 114, 120, 123, 141.
Ammonnitratsprengstoff 14, 20, 22, 29, 35, 46, 53, 92, 103, 112, 120, 122, 123.
Ammonsalpeter s. Ammonnitrat.
Ammonsprenggelatine 91.
Ammonsulfat 123.
Amorces s. Zündblättchen.
Amylalkohol 66, s. auch Zusätze.
Anagonsprengpulver 92.
Anlage O, s. Eisenbahnverkehrsordnung.
Arbeitsleistung s. Energieinhalt u. Leistungsfähigkeit.
Äthan 94.
Äther 42, 69, 73, 94.
Ätheralkohol 70
Äthylen 94.
Äthylnitrit 16, 39.
Atomgruppen 15.
Aufbau s. Struktur.
Auffrischung der Säure 73.
Auftauapparat s. Thermophor.
Auftauen 69, 143.
Ausbeute 39, 68, 73.
Ausbrennung 64, 104.
Auskochender Sprengschuß 106, 143.
Auslösung 23, 24.
Ausnutzung der Explosivstoffe 85.
Azeton 42, 60, 61, 70, 73.
Azetylen 11, 16, 36, 42, 94.
Azetylsuperoxyd 16.
Azid 16, 39, 129.

Ballistische Vergleiche 65.
Ballistit 24, 60, 66.
Bariumnitrat 56, 60, 66, 67, 92, 120, 122, 123.
Bauart, unterirdische 136.
Baumwolle 41, 70, 72, 73, 142.
Bedingungen der Explosion 9 ff.
Beförderung der Explosivstoffe s. Verkehr.
Behandlung der Explosivstoffe 88, 131.
Beleuchtung 136.
Benzin 7, 41, 42.
Benzol 42, 75.
Benzoylsuperoxyd 23.
Bergmann u. Junk 140.
Berthelot 11, 25, 43, 46, 91, 96, 102.
Besatz 51.
Beschußprobe 18.
Beständigkeit s. Chemische u. Physikalische Beständigkeit.
Bestrahlung 23, 36, 89.
Bickford 26.
Bildungswärme 12, s. auch negative u. positive Bildungswärme.
Blättchenpulver 20, 24, 59, s. auch Nitrozellulosepulver.
Blausäure 74 105.
Blei 77.
Bleiazetat 40.
Bleiazid 35, 39, 40, 77.
Bleiazidsprengkapsel s. Sprengkapsel.
Bleinitrat 40.
Bleipikrat 76.
Bleiplattenprobe 46, 50.
Bleizylinderprobe 19, 50, 51.
Blitzschlag 58, 63.
Blitzschutz 136.
Blochmann 130.
BN-Pulver 66.
Bobbinit 82, 91.
Böttcher 71.
Bourdon s. Federdruckmeter.
B-Pulver 66, 141.
Braunes s. prismatisches Pulver.
Brisanz 49, 53, 129.
Bronze 57, 89, 132.
Brown 71.
Bunsen 36, 40, 43, 93, 111.

Centralit 67, 104, s. auch Zusätze u. Harnstoff, substituierter.
Charakteristisches Produkt 102.
Cheddit 83, 92.
Chemische Beständigkeit 136 ff., 140, s. auch Zusätze.
Chlorat 16, 138.
Chloratsprengstoff 29, 82, 83, 85, 90.

Chlordinitroglyzerin 68, 70, 145.
Chlorhydrin 121.
Chlorknallgas 36.
Chlornatrium 69, 120, 123.
Chloroform 69.
Chlorstickstoff 16.
Chronograph s. Flugzeitmesser.
Clausthal 82.
Cummersdorf 129.

Dahmenit 123.
Dämpfe, gespannte 8.
Dampfkessel 8.
Dämpfung des Explosionsstoßes 128.
Dauer der Explosionsflamme 112.
Dautriche 46.
Davy s. Sicherheitslampe.
Deflagration 31, 43.
Densit 92.
Detonation 31, 43, 45, 141.
Detonationsgeschwindigkeit s. Explosionswelle.
Detonierende Zündschnur s. Zündschnur.
Diazobenzolnitrat 16.
Diazokörper 15, 16.
Dichte 38, 39, 54, 58, 62, 69, 73, 76, 77, 78, 137.
Dichte des Mediums 128.
Dieselmotor 86.
Dimethylanilin 77.
Dinitrobenzol 92, 123.
Dinitroglyzerin 20, 68.
Dinitrotoluol 60, 67, 76, 83, 92, 145.
Diphenylamin 66, 67, s. auch Zusätze.
Dissoziation 93, 94, 110.
Dixon 31, 45.
Donarit 92.
Drahtnetzschirm 89.
Druck, Einfluß von 35, 44.
Drucksteigerung 8.
Duttenhofer 59.
Dynamit 13, 14, 20, 21, 26, 35, 46, 53, 68, 77 ff., 81, 85, 86, 87, 90, 91, 95, 103, 105, 111, 112, 113, 117, 122, 125, 130, 133, 142, 144.
Dynamit I 91.
Dynamit II 91.
Dynammon 91.
Dynammon I 92.

E.O.-Pulver 66.
Einfluß der Umhüllung 128.
Einheitsgeschoß 77.
Eisen 17, 37, 57.
Eisenbahnverkehrsordnung 22.
Eisenblech, rotglühendes 19.
Eisenoxyd 8.
Elektrische Funken s. Elektrische Zündung.
Elektrische Zündung 29, 43, 45, 51, 93, 132.
Elektrizität s. Reibungselektrizität.
Empfindlichkeit s. Sensibilität.
Endotherme Reaktion 10.
Endotherme Substanzen 11, 16.
Energie, strahlende 23.
Energieinhalt 13, 14, 39.
Entmischung 137.
Entzündungsgrenzen 42.
Entzündungsprobe 18.
Entzündungstemperatur s. Verpuffungstemperatur.
Erdwachs 56.
Erdwälle 136.
Essigäther 62, 66, 70, 73.
Exotherme Reaktion 9, 10 ff., 102.
Expandierende Gase s. Expansion.
Expansion 48, 53, 54.
Explosible Gasmischung 93, 101, 106, 128.
Explosion unter Wasser 130.
Explosionsähnliche Erscheinungen 8.
Explosionsbedingungen 9ff.
Explosionsbombe 11, 49, 95, 101, 104, 108, 109.
Explosionsdruck 47 ff., 104, 108, 109, 110.
Explosionsflamme 111 ff.
Explosionsgase 58, 63, 69, 74, 77, 81, 85, 104, 105ff., 115, 116, 119, 126.
Explosionsgrenzen s. Entzündungsgrenzen.
Explosionskalorimeter 11.
Explosionsmotor 7, 41.
Explosionsprodukte 58, 63, 76, 99, s. auch Explosionsgase.
Explosionsstoß 31, 89, 124ff., 142, s. auch Influenz.
Explosionstemperatur 99ff., 108, 110, 118.
Explosionsunfall 36, 41, 42, 71, 90, 116, 118, 126, 131, 141, 143, 144.
Explosionswärme 7, 38, 64, 99, 103, 104, 112, 113, 114.
Explosionswelle 43, 45, 46, 124, 128, 137.
Explosives Act 21.

Fallhammerprobe 18, 19.
Farbe 62.
Federdruckmesser 93, 130.
Fernwirkung 124, 134.
Fette Öle s. Öl.
Feuchtigkeit s. Wasser.
Feuerschnelligkeit 65.
Figur s. Abbildung.
Filit 67.
Film, photographischer 74.
Flachs 142.
Flammenzündung 25, 32, 40.
Flüchtige Bestandteile 66, 67, 137.
Flüssige Kohlensäure 8, 10.
Flüssige Luft-Sprengstoffe 67, 83, 84, 85, 137.
Formgebung 55, 56, 58, 62.
Formylbinitroglyzerin 68.
Freiberg 82.
Friktionsschlagröhre 27.
Fulminat 10, 16, 38, 129.
Funkenflug 88.
Funkenzündung 25, 40, 43.

Gasdruck s. Explosionsdruck.
Gasdruckmesser 98.
Gase, komprimierte 8.
Gasexplosion s. Explosible Gasmischung.
Gasvolum 39, 64.
Gay-Lussac-Mariottesches Gesetz 101.
Gefahrsklassen 21, 135.
Gefrieren von Nitroglyzerin 69, 78, 122, 142—145.

Gefrieren von Wasser 8.
Gefrierverzögerungsmittel 145.
Gelatinedynamit 20, 24, 29, 53, 79, 81 ff., 88, 91, 105, 121, 125, 129, 142.
Gelatinekarbonit 123.
Gelatiniertes Pulver 59, s. auch Rauchloses Pulver.
Gelatinierung 60, 61, 72, 74, 80, 140.
Gelignit 81, 91.
Geruch 62.
Geschützpulver 67.
Geschwindigkeit der Auslösung 32, 33 ff., 38.
Geschwindigkeit der Drucksteigerung 49, 53, 85.
Geschwindigkeit des Explosionsstoßes 127 ff.
Geschwindigkeit explosiver Vorgänge 31 ff.
Geschwindigkeit der Fortpflanzung 32, 38, 40 ff., 46, 127.
Gespannte Dämpfe 8
Gesteinsroburit 92.
Gewehrpatronen 22.
Gewehrpulver 66.
Gewehrpulver M/71 66.
Glas 30.
Glaspulver 17, 18, 27.
Glasschutzwand 89.
Glaubersalz 122.
Gleichgewicht 93, 107, 108, 109, 111.
Glühzündung 25.
Glyzerin 68, 80.
Gotthardtunnel 85.
Granatfüllung 75, 76, 77.
Graphit 60.
Grenzwert der Explosionsfähigkeit s. Explosionsgrenzen.
Grenzwert der Fortpflanzungsgeschwindigkeit 43.
Griechisches Feuer 56
Grisoutine B 123.
Grisoutine D 124.
Grisoutite 124.
Größe der Explosionsflamme 112.
Gruson 57.
Gurdynamit s. Dynamit.
Guttmann 82.
Hahnvorrichtung 21.
Halmzünder 26.
Halogenverbindung des Stickstoffs 10, 15, 16.
Haltbarkeit von Pulver 140.
Handhabung von Explosivstoffen 15, 77, 120.
Handlichkeit 55, 67, 81.
Hanf 142.
Hanfseilvorhang 89.
Harnstoff, substituierter 60, s. auch Centralit u. Zusätze.
Härtegrad der Explosivstoffe 16.
Hartgipsdielen 136.
Hartgummi 89.
Harz 56, 120, 123.
Haußmann 75.
Heizstoff 13.
Hirschmarke 66,
Hochofensau 87.
Hoff, van't 15.
Hoitsema 33.
Holz 13, 57, 70, 72, 89.
Holzgeist s. Methylalkohol.
Holzkohle 10, 57, 66, 67, 82, 91, 92, 123.
Holzmehl 57, 91, 124.
Holzöl 123.
Horn 89.
Howard 38.
Hygroskopizität 57, 58, 73, 82, 121.

Jagdpatronen 56.
Jagdpulver 62, 66.
Influenz, Zündung durch 30, 89, 125.
Initialimpuls 9, 15, 21, 23 ff., 31, 32, 43, 107, 121, 129, 142, s. auch Influenz.
Initialsprengstoff 37 ff., 129.
Initialzündung s. Initialimpuls.
Initiierung s. Initialimpuls.
Instabilität 72.
Intensität des Explosionsstoßes 127, 129 ff.
Jodkaliumpapier 139.
Jodstickstoff 10, 20, 30, 127.
Jodteslprobe 139.
J-Pulver 66.
Jute 70, 142.
Kaliumbichromat 91, 120. 123.
Kaliumchlorat 10, 17, 20, 22, 26, 27, 29, 83, 92
Kaliumkarbonat 58.
Kaliumnitrat 56, 57, 58, 66, 67, 81, 82, 91, 92, 122, 123, 124.
Kaliumperchlorat 83, 92.
Kaliumpermanganat 123.
Kaliumpikrat 55.
Kaliumsulfat 58.
Kaliumsulfid 58.
Kalorie s. Wärmeeinheit.
Kalorimetrische Bombe s. Explosionskalorimeter.
Kampfer 17, 60, 66, 81.
Kanonenpulver s. Geschützpulver.
Kapsel s. Sprengkapsel.
Karbolsäure 75, 92.
Karbonit 29, 120, 121, 123.
Katalytische Einflüsse 33, 36.
Kieselgur 37, 68, 78, 80, 84, 91, 122, 124.
Kieselgurdynamit s. Dynamit.
Kieszementbeton 136.
Knallgas s. Wasserstoffknallgas.
Knallgold 19.
Knallquecksilber 10, 14, 19, 20, 26, 27, 29, 30, 35, 37, 38, 40, 43, 46, 52, 53, 77, 97, 103, 128.
Knallquecksilbersprengkapsel s. Sprengkapsel.
Knallsatz 29.
Knallsäure 38, s. auch Fulminat.
Knallsilber 19, 38.
Knallwelle 129.
Kochsalz s. Chlornatrium.
Kohle 56, 78, 91, s. auch Holzkohle u. Steinkohle.
Kohlenkarbonit 115, 121, 123.
Kohlenoxyd 32, 42, 58, 63, 74, 77, 99, 105, 106, 107, 109, 119.
Kohlenoxyd-Knallgas 32, 36, 40, 46, 93.
Kohlensäure 13, 39, 58, 63, 70, 74, 81, 85, 99, 105, 106, 107, 109, 110.

Kohlensäure, flüssige 8, 10.
Kohlensaurer Kalk 60, 91.
Kohlenstaub 113, 115, 119.
Kohlenstoff 16, 77, 106, 107.
Kohlenstoffträger 84, 120.
Kollergang 57.
Kolloidumwolle 14, 35, 53, 66, 67, 70, 74, 80, 91, 92, 103, 123, s. auch Nitrozellulose.
Kolloidaler Zustand 44.
Köln-Rottweiler Sicherheitssprengpulver 120.
Komprimierte Gase 8.
Konstanter Druck 13.
Konstantes Volum 13.
Kordit 45, 60, 61, 67, 104, 132.
Korkkohle 84.
Korkmehl 84.
Kornpulver 58.
Kovolum 97, 101.
Kraft eines Explosivstoffes 96.
Kreide s. Kohlensaurer Kalk.
Kresylsäure 76.
Kristallgröße 16.
Krusten 89.
Kunstfäden 74.
Kupfer 27, 37, 89, 95.

Lackmusprobe 140.
Ladedichte 94, 95, 96, 97, 101, 108, 109, 110.
Lagerung von Explosivstoffen 135.
Le Chateliers Pyrometer s. Pyrometer.
Leim-Glyzerin-Gelatine 83. 92, 123.
Leinöl 120.
Leinwand 84.
Leistungsfähigkeit der Sprengmittel 81, 85, 93, 96, 102, 137.
Lenk, v. 59, 71.
Leuchtgas 7, 42, 43.
Licht, polarisiertes 73.
Lichtwirkung 23.
Liebig 38.
Linde 83.
Linters 72.
Lohmehl 91.
Lösemittel 59, 60, 61, 62.
Luftstoßanzeiger 129.
Lundholm u. Sayers' Gelatinierverfahren 61.
Lyddit 76.

Mach 127.
Macnab 102, 117.
Magnesia 37.
Magnesiumsulfat 122, 124.
Mallard u. Le Chatelier 93, 100, 101, 117.
Massenwirkungsgesetz 107.
Maxim-Schüpphaus-Pulver 67.
Maximum des Explosionsdrucks 49, 92 ff., 100, 101.
Mehl 41, 81, 82, 83, 91, 92, 120, 122, 123.
Mehlpulver 57, 58.
Melinit 76.
Messing 17, 27, 89.
Methan 37, 42, 63, 74, 93, 105, 109, 110, 115, 117, 119.
Methoden zur Messung des Maximaldrucks 93.
— — Prüfung auf Brisanz 50 ff.
— — — — chemische Beständigkeit 138, 139, 140.
— — — — Sensibilität 17.
Methylalkohol 70.
Methyläther 94.
Miedziankit 83.
Minen s. Seeminen.
Mischsäure 68, 72, 76, 77.
Mowbray 70.
Mündungsenergie 65.
Mündungsfeuer 119.
Munition 22.

Nachflammer 106, 119.
Nachschwaden s. Schwaden.
Nachteile des rauchlosen Pulvers 64.
Naphthalin 84, 120, 123.
Natriumazetat 143.
Natriumazid 40.
Natriumkarbonat 66, 69, 72, 81, 91, 117, 122, 124.
Natriumnitrat 56, 81, 83, 91, 92, 120, 123, 141.
Natronsalpeter s. Natriumnitrat.
Negative Bildungswärme 11.
Nernst 111.
Nitrierapparat 68, 75.
Nitrierungsgrad 138, 142.
Nitrobenzol 145.
Nitrodiazobenzolperchlorat 38.
Nitroglyzerin 10, 11, 12, 14, 16, 17, 19, 20, 21, 34, 35, 46, 53, 54, 59, 60, 61, 63, 66, 67, 68 ff., 73, 76, 77, 78, 80, 82, 88, 90, 91, 92, 97, 100, 103, 106, 113, 121, 122, 123, 124, 138.
Nitroglyzerinpulver 14, 35, 52, 53, 55, 103, 104.
Nitrokörper 16, 22. 59, 90. 138.
Nitromannit 14, 24, 46, 53, 103, 104.
Nitronaphthalin 14, 26, 83, 92, 104.
Nitrose Dämpfe s. Stickstoffoxyde.
Nitrostärke 19, 55.
Nitrozellulose 11, 14, 16, 17, 20, 23, 26, 30, 35, 46, 53, 54, 55, 59, 60, 63, 66, 67, 70 ff., 76, 80, 82, 86, 90, 92, 97, 100, 103, 108, 109, 112, 115, 123, 125, 138.
Nitrozellulosepulver 14, 35, 44, 52, 53, 55, 103, 104.
Nitrozucker 19, 137.
Nobel 28, 59, 68, 70, 78, 80, 95.
Nobel-Ardeer-Powder 124.
Nobelit 123.
Noble 54, 95, 108.

Oberflächenbehandlung 60.
Öl 17, 83.
Oxyliquit 83.
Ozon 16.

Papier 70, 72, 78, 79, 84
Paraffin 66, 78, 82, 84, 91
Paraffinöl 123.
Paraffinpapier 78, 82.
Patronierung 78, 84.
Pech 91.
Perchlorat 16.

Perchloratsprengstoff 82, 83, 90.
Permonit 83, 92.
Petavel 45.
Petroklastit 82, 91.
Petroleum 7, 13, 83, 84.
Phenolsulfonsäure 75.
Phönix I 123.
Phosphor 21, 22.
Phosphorpentoxyd 32.
Phosphorwasserstoff 35.
Photographische Aufnahme 45, 103, 112, 113.
Physikalische Beschaffenheit 16.
Physikalische Beständigkeit 136 ff.
Pikrat 21.
Pikrinsäure 10, 11, 14, 20, 21, 24, 26, 35, 46, 53, 67, 75, 77, 22, 92, 96, 97. 103, 107, 108, 109, 115, 125, 133.
Piobert 44.
Plastomenit 65, 66.
Platin 37, 103, 108.
Pockholz 57.
Polizeiverordnung 19.
Polyäthylen 16.
Positive Bildungswärme 11.
Preisfrage 67.
Prismatisches Pulver, braunes 58, 67.
Progressives Pulver 60.
Pulverrauch 64.
Pulverzündschnur s. Zündschnur.
Pyrokollodium 67, 70.
Pyrometer 102.
Pyroxylin 70, s. auch Nitrozellulose.

Quecksilber 38.
Quecksilberazid 39.

Rauchloses Pulver 55, 58 ff., 74, 90, 140, s. auch Nitroglyzerinpulver und Nitrozellulosepulver.
Reaktionsbeschleuniger s. Katalytische Einflüsse.
Reaktionsgleichung 12, 25, 32, 100, 106, 107, 109.
Reibungselektrizität 60, 73, 89.
Reibungsprobe 18.
Reibungszündung 27.
Reid und Johnson 59.
Rhexit 91.
Richtung der Umsetzung 24.
Rizinusöl 67, 83, 92.
Roburit 29, 35, 123.
Röhrenpulver 62.
Roscoe 36.
Rosten der Gewehrläufe 27.
Rothsche Zündung 26.
Rottweil 59.
R.-R.-Pulver 67.
Rücklaufmesser 54.
Rückschlag der Explosion 126, 134.
Ruß 84.

Sägemehl 84.
Salpeter s. Kaliumnitrat.
Salpetersäure 38, 75, 76.
Salpetersäureester 10, 138.
Salpetrigsäureäthylester s. Äthylnitrit.
Sand 17, 18, 51, 56.
Sarrau 54, 108.
Sauerstoff 32, 36, 37, 70, 74, 84, 94, 99, 106, 107, 111.
— flüssiger 10, 84.
Schallwelle 47.
Scheidewand 21.
Schießbaumwolle, Schießwolle 74, s. auch Nitrozellulose.
— gepreßte 17, 71, 74, 133.
Schießmittel s. Treibmittel.
Schießwollpulver s. Nitrozellulosepulver.
Schimose 76.
Schlagprobe 17.
Schlagwetter 37, 93, 116, 118, 119.
Schlagwetterexplosion 36. 94, 116.
Schlagwetterkommission 100, 117.
Schlagwettersicherheit 30, 100. 111, 112, 113, 117.
Schlagzündung 27.
Schmirgel 18.
Schönbein 70.
Schutzepulver 66.
Schwabpulver 66.
Schwaden 105, 108.
Schwarzpulver 14, 20, 21, 24, 26, 27, 35, 40, 44, 52, 53, 55, 56 ff., 63, 67, 71, 74, 78, 82, 83, 90, 91, 96, 97, 102, 103, 108, 111, 112, 113, 132, 137.
Schwefel 17, 20, 56, 57, 66, 67, 82, 91, 120.
Schwefelantimon 27.
Schwefelkupfer 21.
Schwefelmännchen 26.
Schwefelsäure 26, 32, 75.
Schwefelstickstoff 11, 33.
Schwefelwasserstoff 105.
Schwefligsäure 99.
Schwemmstein 136
Seeminen 74, 125, 129.
Seid. 75.
Seife 123.
Sekurit 92.
Sensibilität 9, 15 ff., 58, 63. 69, 74, 76, 77, 78, 81, 82 83, 85, 89, 121.
Settle 117.
Sicherheitslampe 7, 105, 116, 118.
Sicherheitssprengstoffe 120.
Sicherung gegen Explosionsunfälle 136.
Siersch 112.
Silber 37.
Silberazid 39.
Silberfulminat 16.
Silberoxalat 33.
Siliziumwasserstoff 35.
Simon Thomas 140.
Sobrero 68.
Soda s. Natriumkarbonat.
Sonnenlicht 89.
Spezifische Dichte s. Dichte.
Spezifischer Druck 96.
Spezifisches Gasvolum 101.
Spezifische Wärme 93, 94, 99, 102.
Spinnereiabfälle s. Baumwolle.
Spiritus 7, 42, 60.
Sprengel 28, 75, 83.
Sprengelsche Sprengstoffe 28.
Sprenggelatine 14, 29, 35, 46, 53, 67, 80, 85, 91, 102, 103, 104, 113, 125.
Sprenggeschoß 75, 76, 77.

Sprengkapsel 19, 24, 29, 39, 43, 46, 50, 51, 77, 90, 113, 121, 128, 132, 142.
Sprengkapselzündung 28, 33.
Sprengleistung s. Leistungsfähigkeit.
Sprengmittel 67 ff., 119 ff.
Sprengöl s. Nitroglyzerin.
Sprengpulver 82, 91.
Sprengsalpeter 91.
Sprengstoffabfall 89.
Sprengstoffgesetz 79, 80.
Sprengungen 36.
Stabilisator s. Zusätze.
Stabilisierung 73.
Stabilität s. Chemische Beständigkeit.
Stanniol s. Zinnfolie.
Stärkemehl 57.
Statistik 118.
Stauberplosion 41.
Stauchapparat 95, 98. 104.
Stauchtabelle 98.
Steinkohle 13, 41.
Stickoxydul 94.
Stickstoff 25, 58, 63, 70, 74, 77, 99, 105, 108, 109.
Stickstoffoxyd 39, 74, 75, 105, 106, 111, 139.
Stickstoffwasserstoffsäure 38, 39, s. auch Azid.
Stoppine s. Halmzünder.
Stoßzündung 27.
Stowmarket 59.
Streichhölzer 132.
Strontiumnitrat 92.
Struktur der Explosivstoffe 16, 24.
Superoxyd 16, 27.

Tabelle 14, 20, 35, 42, 46, 53, 65, 66, 91, 97, 103, 123.
Tauchgefäß 84.
Temperatur, Einfluß der 33.
Temperaturkoeffizient explosiver Reaktionen 25.
Testprobe s. Abelsche.
Tetranitrodiglyzerin 145.
Tetranitromethylanilin 29, 40, 77.
Tetryl s. Tetranitromethylanilin.
Thermit 8.
Thermochemie 11, 12, 104.
Thermodynamik 110.
Thermophor 143, 144.
Thermosäule 102.
Thomas 130.
Toluol 76, 92.
Torpedoladung 74.
Transport s. Verkehr.
Trauzl 125.
Trauzische Bleiblockprobe 50, 52.
Treibmittel 55 ff.
Trinitronaphthalin 20, 141.
Trinitrotoluol 14, 20, 24, 27, 29, 30, 35, 40, 53, 60, 67, 76, 77, 83, 92, 103, 115, 123.
Trotyl s. Trinitrotoluol.
Turpin 75.

Übertragungsfähigkeit 142.
Ungefrierbare Dynamite 145.
Unglücksfälle s. Explosionsunfälle.
Unterchlorigsäuremethylester 16.
Unterirdische Bauart s. Bauart.
Unveränderlichkeit von Explosivstoffen 137.

Vaseline 60, 67, 104, s. auch Zusätze.
Ventilation 116.
Verbrauch an Sprengstoffen s. Leistungsfähigkeit.
Verbrennungsgeschwindigkeit 44, 55, 57, 71, 72, 74, 137.
Verbrennungstemperatur 99.
Vergiftung 105.
Verkehr mit Explosivstoffen 19, 21, 58, 63, 67, 70, 75, 77, 78, 121.
Vernichtung von Explosivstoffen 90.
Verpackung 22, 79.
Verpuffungstemperatur 34, 35.
Versager 143.
Versand s. Verkehr.
Versuchsstrecken 118.
Vieille 44, 46, 54, 59, 72, 94, 104, 108, 127, 140.
Vorsichtsmaßregeln s. Behandlung.
Vorteile des rauchlosen Pulvers 64.

Walsrode-Pulver 66.
Wärmebeständigkeit s. Chemische Beständigkeit.
Wärmebindung 110.
Wärmeeinheit 13, 63, 99.
Wärmeentwicklung 10.
Wärmeleitung 32, 48.
Wärmestrahlung 32, 48.
Wärmetönung 11, 16.
Wasser 13, 17, 30, 31, 40, 51, 57, 61, 70, 74, 75, 81, 85, 90, 107, 108, 109.
Wasser, Einfluß von 32, 36, 63, 64, 89, 137, 141, 142.
— gefrierendes 8.
Wasserdampf 36, 63, 69, 77, 99, 105, 106, 108.
Wassergehalt 60, 66, 75.
Wasserpatrone 117.
Wasserstoff 16, 42, 63, 74, 99, 105, 106, 107, 109, 119.
Wasserstoffknallgas 36, 40, 43, 46, 111.
Wasserstoffsuperoxyd 111.
Wasserwert 12.
Watte 26, 70, 83.
Weindl 82.
Wellpappe 79.
Westfalit 123.
Wetterastralit 114.
Wetterdynamit 117, 120, 122, 124.
Wetterfulmenit 123.
Wettersicherer Gelatinedynamit 123.
Will 113, 142.
Winkhaus 118.
Wöhler und Martin 129.
Wolff 126.
Wolle 75.

Zähigkeit der Explosivstoffe 16.
Zellulosid 59, 74.
Zellulose 66, 92.

Zersetzungsgeschwindigkeit 34.
Zink 89.
Zinn 89.
Zinnfolie 17, 19, 121.
Zucker 26.
Zucker, nitrierter, s. Nitrozucker.
Zumischpulver s. Zusatzstoffe.
Zündblättchen 21, 22, 132.
Zündhütchen 22, 27, 38, 39.
Zündmittel s. Initialimpuls.
Zündschnur 19, 24, 26, 30, 37, 90.
— detonierende 27, 46, 77.
Zündungsarten 25.
Zusätze zur Erhöhung der chemischen Beständigkeit 66, 67.
Zusatzstoffe 17, 81.
Zyan 11, 16.
Zyanwasserstoff s. Blausäure.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GLIWICE

c80
332,80

BG Politechniki Śląskiej
nr inw.: 102 - 141183
Dyr.1 141183