

## Inhaltsverzeichnis

### **I. Allgemeines**

### **II. Leistungsfähigkeit eines Sprengstoffs**

1. Definitionen
2. Chemische Umsetzung
3. Brisanz
4. Arbeitsvermögen

### **III. Untersuchung von Sprengstoffen**

1. Detonationsgeschwindigkeit
2. Arbeitsvermögen
3. Brisanz
4. Schlagempfindlichkeit
5. Reibempfindlichkeit

### **IV. Eigenschaften und Verwendung wichtiger Sprengstoffe**

1. Einheitliche Sprengstoffe

#### **1.1 Salpetersäureester**

##### **1.1.1 Nitroglycerin**

##### **1.1.2 Nitroglykol**

##### **1.1.3 Pentaerythrit-tetranitrat**

#### **1.2 Nitroaromaten**

##### **1.2.1 Trinitrotoluol**

##### **1.2.2 Pikrinsäure**

##### **1.3.1 Hexogen**

##### **1.3.2 Octogen**

#### **1.4 Sprengtechnische Eigenschaften**

2. Gewerbliche Sprengstoffmischungen

##### **2.1 Schwarzpulver**

##### **2.2 Ammonite und Donarite**

##### **2.3 Ammon-Gelite**

##### **2.4 Wettersprengstoffe**

##### **2.5 Sprengtechnische Eigenschaften**

### **V. Zündung gewerblicher Sprengstoffe**

### **VI. Geschichte der gewerblichen Sprengstoffe**

### **VII. Literaturverzeichnis**

#### **I. Allgemeines**

Sprengstoffe sind von großer Bedeutung für den Menschen. Die Bodenschätze der Erde werden mit Hilfe der Sprengstoffe gewonnen. Bei der Erschließung von Erdöl- und Erdgasfeldern und Wasserquellen spielen sie eine Rolle. Im Golfkrieg konnten brennende Ölquellen durch Sprengungen gelöscht werden. In der Land- und Forstwirtschaft dienen sie zur Lockerung der Böden und zum Sprengen von Baumwurzeln. Wichtig sind sie außerdem beim Bau von Straßen, Wegen (insbesondere in Felsregionen im Gebirge), Kanälen, Tunneln und Stauseen. In der Industrie werden sie zur Verformung von harten, hitzefesten und spröden Metallen beim Bau von Flugzeugen, Raketen und Strahltriebwerken verwendet. Bei seismischen Untersuchungen kann durch den Einsatz von Sprengstoffen die Tiefe und der Verlauf geologischer Schichten bestimmt werden. Beim Militär werden sie als Sprengmittel in Bomben, Granaten, Minen, Raketen und Torpedos eingesetzt.

Sprengstoffe sind feste, plastische oder flüssige Stoffe, die sich in Form einer exothermen Reaktion mit explosionsartigem Verlauf umsetzen können und deren Sprengwirkung technisch genutzt werden kann. Sprengstoffe können aus einer einheitlichen Verbindung, z.B. Trinitrotoluol, oder aus mehreren Verbindungen, z.B. Schwarzpulver, aufgebaut sein. Nach ihrer Verwendung unterscheidet man gewerbliche und militärische Sprengstoffe. Zu den gewerblichen Sprengstoffen zählen die Gesteins- und Wettersprengstoffe. Gesteinssprengstoffe werden beim Straßen-, Tunnel- und Kanalbau eingesetzt und dienen zur Gewinnung von Erzen und Steinen. Wettersprengstoffe werden im Kohlebergbau verwendet. Sie erfüllen besondere

Sicherheitsansprüche, da in Kohlebergwerken explosionsfähige Gemische entstehen können, die beim Sprengen nicht gezündet werden dürfen. Pro Jahr werden in Deutschland rund 60000 t gewerbliche Sprengstoffe verbraucht.

Um eine Explosion auszulösen, muß die Stabilitätsschwelle durch Zufuhr von Aktivierungsenergie überwunden werden. Diesen Vorgang bezeichnet man als Initiierung oder Zündung. Als Aktivierungsenergie kommen Wärmeenergie, mechanische Energie (Schlag, Reibung, Stoß) und Verdichtungsenergie (Detonation einer Sprengladung) in Frage. Sprengstoffe, die durch mechanische Energie relativ leicht explodieren können, werden phlegmatisiert, d.h. sie werden durch Zusatz von Wachs oder Kunststoffen in ihrer Empfindlichkeit herabgesetzt.

Ob die Initiierung gelingt, hängt neben dem aufgewendeten Energiebetrag von der physikalischen Beschaffenheit und der Ladedichte ab. Ein lockerer, poröser Aufbau mit kleiner Teilchengröße bietet gute Voraussetzungen. Ein homogener Aufbau mit hoher Dichte und kleiner Oberfläche wie z.B. TNT in gegossener Form hingegen erschwert die Initiierung. Ein weiteres Kriterium ist der Durchmesser der Sprengladung. Ist der Durchmesser zu klein, kommt die Reaktion zum Erliegen. Ist die Reaktion ausgelöst worden, läuft sie selbständig weiter. Der energieliefernde Prozeß hierfür beruht auf der Oxidation von verbrennbaren Bestandteilen durch Sauerstoff, der meist an Stickstoff in Form von Nitriten, Nitraten, Nitro- und Nitrosoverbindungen oder an Chlor in Form von Chloraten und Perchloraten gebunden ist. Bei einheitlichen Sprengstoffen liefert die Oxidation von Kohlenstoff und Wasserstoff durch den im Molekül vorhandenen disponiblen Sauerstoff Energie. Bei vollständiger Verbrennung entstehen Kohlenstoffdioxid, Stickstoff und Wasserdampf. Verläuft die Verbrennung unvollständig, können sich daneben noch Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoff in Form von Ruß bilden. Dies ist von der Sauerstoffmenge im Molekül oder in Sauerstoffträgern abhängig. Beurteilen kann man die Sauerstoffmenge an Hand der Sauerstoffbilanz. Die Sauerstoffbilanz ist diejenige Sauerstoffmenge in Gewichtsprozenten, die bei der Umsetzung frei wird (positive Sauerstoffbilanz) oder die zur vollständigen Umsetzung fehlt (negative Sauerstoffbilanz). Sprengstoffe mit negativer Sauerstoffbilanz haben zu wenig Sauerstoff, um die verbrennbaren Bestandteile vollständig zu oxidieren. Sprengstoffe mit positiver Sauerstoffbilanz haben zu viel Sauerstoff. Der Sauerstoff wird nicht vollständig bei der energieliefernden Oxidation verbraucht und entweicht ungenutzt. Ideal ist eine ausgeglichene Sauerstoffbilanz. Bei gewerblichen Sprengstoffmischungen ist der Sauerstoff ganz oder zum Teil in Sauerstoffträgern wie z.B. Kaliumnitrat und Ammoniumnitrat enthalten. Die Sauerstoffträger geben ihren Sauerstoff leicht an Brennstoffe wie z.B. Kohle, Schwefel, Mineralöl und Aluminium ab und sorgen für eine vollständige Oxidation von beigemischten Sprengstoffen mit negativer Sauerstoffbilanz. Durch Beimischen von Sauerstoffträgern in einem leicht positiven Sauerstoffverhältnis erreicht man eine vollständige Verbrennung. Dies ist besonders bei Sprengarbeiten in Bergwerken wichtig, da keine giftigen Gase (Kohlenstoffmonoxid) entstehen dürfen.

(FALBE/REGNITZ 1990, HENGLEIN 1968, JAKUBKE/JESCHKEIT 1987, NEUMÜLLER 1985)

## II. Leistungsfähigkeit eines Sprengstoffs

### 1. Definitionen

Normalgasvolumen (Schwadenvolumen):

Gasvolumen in l, das bei Normalbedingungen (25°C; 1013 hPa) bei der Explosion von einem kg Sprengstoff entsteht.

Explosionswärme: Wärmeenergie in kJ, die bei der Explosion von einem kg Sprengstoff frei wird.

Detonationsgeschwindigkeit:

Geschwindigkeit in Metern pro Sekunde (m/s), mit der die Reaktionszone einen Sprengstoff durchläuft.

### 2. Chemische Umsetzung

Bei Sprengstoffen existieren zwei unterschiedliche Explosionsarten, deren Leistungsfähigkeit stark variiert. Eine Explosion kann in Form einer Deflagration und einer Detonation auftreten. Eine Deflagration ist eine Umsetzung, die mit Unterschallgeschwindigkeit (104 bis einige 100 m/s) abläuft und unvollständig ist. Es bleiben noch reaktionsfähige Bestandteile erhalten, weswegen die freiwerdende Energie kleiner ist als bei einer Detonation. Die Reaktion pflanzt sich durch Wärmeleitung fort und spielt sich in einer ausgedehnten Zone ab.

Kennzeichnend ist das Auftreten von Flammen und glühenden Teilchen. Die Deflagration gleicht einer rasch ablaufenden Verbrennung.

Bei einer Detonation findet die chemische Umsetzung in einer schmalen Reaktionszone statt, die sich mit Überschallgeschwindigkeit (1000-9100 m/s) fortpflanzt. Die Reaktionszone pflanzt sich durch eine Druckwelle fort. Die Temperatur kann Werte von 2500-6000°C erreichen. Die Detonation ist eine Kopplung von Temperatur, Druck und chemischer Umsetzung. Die bei der chemischen Umsetzung freiwerdende Wärme kann nicht schnell genug an die Umgebung abgeführt werden, wodurch die Temperatur im System rasch zunimmt. Dies beschleunigt die chemische Umsetzung, was zu einer vermehrten Wärmefreisetzung führt und sich erneut auf den Temperaturanstieg im System auswirkt. Die bei der chemischen Umsetzung entstehenden Gase können zunächst nicht entweichen und üben deswegen einen Druck aus. Die Gase werden durch die hohen Temperatur- und Druckbedingungen bis zu einem festkörperähnlichen Zustand verdichtet. Der Druckanstieg beschleunigt den Temperaturanstieg. Es entsteht ein Kreislauf zwischen Temperatur- und Druckanstieg und der Geschwindigkeit der chemischen Umsetzung, d.h. die einzelnen Größen steigern sich gegenseitig mit exponentiellem Verlauf bis es zu einer Detonation kommt, bei der in extrem kurzer Zeit große Mengen Gase ausströmen, die sich schlagartig stark ausdehnen und eine gewaltige Druckwelle (Stoßwelle) hervorrufen. Die Stoßwelle dringt in den noch nicht umgesetzten Sprengstoff ein und erreicht dadurch eine Umsetzung des gesamten Sprengstoffs innerhalb von  $10^{-7}$  bis  $10^{-5}$  s. Die Stoßwelle pulverisiert unmittelbar umliegende feste Materie und durchsetzt sie in einer anschließenden Zone mit Rissen.

### 3. Brisanz

Die Brisanz ist der pulverisierende Effekt auf die unmittelbare Umgebung. Sie hängt hauptsächlich vom Stoßwellendruck ab. Der Stoßwellendruck errechnet sich annähernd aus der Formel  $p \approx \frac{1}{4} \delta D^2$ . Dabei ist  $\delta$  die Ladedichte und  $D$  die Detonationsgeschwindigkeit. Entscheidend für eine hohe Brisanz ist also eine hohe Detonationsgeschwindigkeit. Die Detonationsgeschwindigkeit hängt aber von der Ladedichte ab, denn bei hoher Dichte ist die Konzentration der energieliefernden Moleküle pro Volumeneinheit größer. Bei größerer Energiefreisetzung pro Volumeneinheit liegt die Temperatur und damit die Geschwindigkeit der chemischen Umsetzung in der Reaktionszone höher, die sich dadurch schneller ausbreitet. Um eine hohe Brisanz zu erreichen, ist deswegen eine möglichst hohe Ladedichte wichtig. Bei Sprengstoffen ist die Dichte in gegossener oder gepreßter Form am größten. Eine hohe Brisanz ist bei militärischen Sprengladungen erwünscht.

### 4. Arbeitsvermögen

Detoniert eine Sprengladung in einem Bohrloch, wird das Material in unmittelbarer Nähe pulverisiert und in einer zweiten Zone angerissen. Die Explosionsgase sind im Bohrloch zunächst eingeschlossen und hohen Temperatur- und Druckbedingungen ausgesetzt. Sie dringen dann in die Risse ein und zerreißen das Material unter Fortschleudern der Bruchstücke. Das Zerreißen und Fortschleudern übertrifft die brisante Wirkung und steht deshalb bei gewerblichen Sprengstoffen im Vordergrund (siehe [10] S. 643). Das Zerreißen und Fortschleudern ist für das Arbeitsvermögen ausschlaggebend und hängt hauptsächlich vom Normalgasvolumen und der Explosionswärme ab. Um das Arbeitsvermögen auf mathematischer Ebene zu beurteilen, kann man das Produkt aus Explosionswärme und Normalgasvolumen, das sogenannte Berthelotsche Produkt, berechnen.

Bei einer Deflagration unterbleibt die brisante Wirkung. Bei gutem Einschluß in einem Bohrloch stehen die Explosionsgase aber auch unter einem solch hohen Druck, daß sie das Material unter Fortschleudern der Bruchstücke zerreißen.

(ATKINS 1990, MEYR 1979, ULLMANN 1982, WINNACKER/KÜCHLER 1960)

#### III. Untersuchung von Sprengstoffen

### 1. Detonationsgeschwindigkeit

Die Detonationsgeschwindigkeit kann durch das Verfahren von Dautriche ermittelt werden. Bei diesem Vorgang wird der zu untersuchende Sprengstoff in einem Stahlrohr eingeschlossen. In dem Stahlrohr befinden sich zwei Sprengkapseln, die einen bestimmten Abstand voneinander haben. Die Sprengkapseln sind mit einer

Sprengschnur verbunden, die parallel zum Stahlrohr durch eine Bleiplatte verläuft. Die Sprengschnur enthält meist Pentaerythrit-tetranitrat mit einer konstanten Detonationsgeschwindigkeit von ca. 7000 m/s. Wird der Sprengstoff im Stahlrohr gezündet, löst die fortschreitende Detonation nacheinander die Explosionen der Sprengkapseln aus. Die Explosion der Sprengkapseln pflanzt sich an beiden Enden der Sprengschnur fort. Die Stoßwellen der Sprengschnur laufen aufeinander zu und verursachen an ihrem Treffpunkt eine Einkerbung in der Bleiplatte. Aufgrund der Tatsache, daß eine Sprengkapsel früher detoniert, befindet sich die Einkerbung nie in der Mitte der Schnur, sondern stets weiter rechts. Je weiter die Einkerbung von der Mitte abweicht, desto kleiner ist die Detonationsgeschwindigkeit. Die gesuchte Detonationsgeschwindigkeit berechnet man an Hand der Formel  $Dx = D \cdot \frac{1}{2} m a^{-1}$ , wobei D die Detonationsgeschwindigkeit der Sprengschnur ist, m die Länge der Meßstrecke und a der Abstand der Einkerbung von der Schnurmitte.

## 2. Arbeitsvermögen

Eine gängige Methode zur Untersuchung des Arbeitsvermögens stellt die Bleiblockmethode nach Trauzl dar. Zehn g des zu untersuchenden Sprengstoffes werden mit einer Zinnfolie verpackt und in der zentralen Bohröffnung eines Bleizylinders mit Sand abgedeckt. Durch Zündung einer Sprengkapsel wird der Sprengstoff zur Detonation gebracht. Die birnenförmige Ausweitung der Bohröffnung kann durch Einfüllen von Wasser gemessen werden.

Die Bleiblockmethode nach Trauzl ist zur vergleichenden Beurteilung des Arbeitsvermögens nur begrenzt geeignet. Bei Sprengstoffen unterschiedlicher Dichte variiert die Füllhöhe in der Bohrung und damit die angesprengte Fläche. Von dieser Fläche hängt aber u.a. die Größe der Ausweitung ab. Bei einem modernen, ähnlichen Verfahren verwendet man zehn ccm Sprengstoff, der unverpackt in der Bohrung gezündet wird. Die Meßergebnisse liegen zur Zeit noch nicht vor, weshalb die alten Zahlen angegeben sind.

## 3. Brisanz

Die Brisanz eines Sprengstoffs kann mit dem Kastschen Stauchapparat vergleichend bestimmt werden. Dabei wird der Sprengstoff in einem Rohr eingeschlossen und mit einer Verstärkerladung gezündet. Die entstehende Stoßwelle übt eine Kraft auf eine Metallplatte aus, die mit einem Stahlstempel verbunden ist. Der Stempel bewegt sich und staucht dabei einen Kupferzylinder. Zur Auswertung wird die Stauchung des Kupferzylinders in mm gemessen.

## 4. Schlagempfindlichkeit

Die Schlagempfindlichkeit wird mit der Fallhammermethode der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) untersucht. Hierzu werden 40 cmm des Sprengstoffs zwischen zwei Stahlzylindern eingeschlossen. Auf den obersten Zylinder läßt man aus unterschiedlichen Höhen ein Gewicht fallen. Für empfindliche Sprengstoffe verwendet man den kleinen Fallhammer mit Fallgewichten von 25 oder 100 g, für stabilere Sprengstoffe den großen Fallhammer mit Fallgewichten von eins, fünf und zehn kg. Es werden die Fallhöhen bestimmt, bei denen in sechs Versuchen wenigstens einmal eine Detonation auftritt, d.h. ein schwacher bis starker Knall hörbar wird. Die Schlagempfindlichkeit wird durch die Schlagenergie ausgedrückt, die sich mit Hilfe der Formel  $W = m \cdot g \cdot h$  berechnet; m ist die Masse des Fallhammers, g die Fallbeschleunigung (9,81 m s<sup>-2</sup>) und h die Fallhöhe.

## 5. Reibempfindlichkeit

Die Reibempfindlichkeit wird mit dem Reibapparat der BAM geprüft. Der Reibapparat besteht aus einem abgerundeten, aufgerauten Porzellanstift und einer aufgerauten Porzellanplatte, auf der man zehn cmm des Sprengstoffs anhäuft. Das Gewicht des Stifts kann von 0,5 bis 36 kg eingestellt werden. Der Stift fährt über die Probe einmal zehn mm hin und zehn mm zurück. Es ist möglich, daß dabei eine Zersetzung (Verfärbung, Geruch), ein Knistern, eine Entflammung, eine Explosion oder sogar keine Reaktion stattfindet. Zur Beurteilung der Reibempfindlichkeit wird das niedrigste Gewicht des Stifts bestimmt, bei dem in sechs Versuchen wenigstens einmal eine Entflammung, ein Knistern oder eine Explosion ausgelöst wird. Das ermittelte Gewicht wird in Newton umgerechnet und als Wert der Reibempfindlichkeit angegeben.

Flüssige und plastische Sprengstoffe zeigen im Reibapparat keine Reaktion. Durch Zusatz von Feststoffen (z.B. Sand, Rost, etc.) kann die Reibempfindlichkeit dieser Stoffe jedoch stark erhöht werden.

(ULLMANN 1982, WINNACKER/KÜCHLER 1960)

#### IV. Eigenschaften und Verwendung wichtiger Sprengstoffe

### 1. Einheitliche Sprengstoffe

#### 1.1 Salpetersäureester

##### 1.1.1 Nitroglycerin (Glycerintrinitrat)

Reines Nitroglycerin ist bei Zimmertemperatur eine farb- und geruchlose, ölige Flüssigkeit mit süßem, brennendem Geschmack. Das technische Produkt ist gelblich gefärbt. Oberhalb 50°C ist Nitroglycerin ziemlich flüchtig und weist dann einen charakteristischen Geruch auf. Nitroglycerin kristallisiert in zwei Modifikationen. Unter besonderen Bedingungen bildet sich die trikline, labile Kristallform mit dem Schmelzpunkt 2,8°C. Gewöhnlich entsteht die rhombische, stabile Form mit dem Schmelzpunkt 13,5°C. Die Löslichkeit in Wasser ist gering (bei 20°C lösen sich 0,17 g in 100 ml), in vielen organischen Lösemitteln dagegen unbegrenzt (z.B. Aceton, Benzol und Toluol). Nitroglycerin ist nicht leicht entflammbar, die Entzündungstemperatur beträgt 223°C. Wird es an der Luft entzündet, brennt es mit fahler Flamme und schwachem Prasseln ab. Die Verbrennung kann aber plötzlich in eine Detonation umschlagen. Nitroglycerin ist sehr empfindlich gegen Schlag, Stoß, Erschütterung und plötzlichem Erhitzen. In diesem Fall detoniert es heftig.

Reines Nitroglycerin wird wegen seiner großen Empfindlichkeit nicht als Sprengstoff verwendet, sondern in Form von gelatinösen Mischungen, die auf der Eigenschaft des Nitroglycerins mit Collodiumwolle Gelatinen zu bilden, beruhen. Nachteilig bei der Verwendung von Nitroglycerin ist der hohe Gefrierpunkt (+13°C).

##### 1.1.2 Nitroglykol (Ethylenglykoldinitrat)

Nitroglykol ist eine farblose, merklich flüchtige Flüssigkeit mit schwachem, charakteristischem Geruch. Es löst sich geringfügig in Wasser (bei 20°C 0,68 g in 100 ml). Die Löslichkeit in organischen Lösemitteln ist unbegrenzt. Nitroglykol ist etwas schlagunempfindlicher und bei höheren Temperaturen stabiler als Nitroglycerin. Die Detonation verläuft wegen der ausgeglichenen Sauerstoffbilanz heftiger. Nitroglykol bildet mit Collodiumwolle ähnliche Gelatinen wie Nitroglycerin, die Gelatiniergeschwindigkeit liegt aber höher. Wegen seinem weitaus niedrigerem Gefrierpunkt (-22°C) hat es in Deutschland das Nitroglycerin aus den gelatinösen Sprengstoffen weitgehend verdrängt.

##### 1.1.3 Pentaerythrit-tetranitrat (Nitropenta, PETN)

Nitropenta tritt in farblosen Kristallen auf, die bei 141,3°C schmelzen. Es ist unlöslich in Wasser, wenig löslich in Ethanol und Benzol, aber gut löslich in Aceton. Es ist von allen festen Sprengstoffen am leichtesten zur Detonation zu bringen. Deshalb wird es für den Transport und das Verarbeiten zu Presskörpern durch einen Zusatz von 5-15 % Wachs phlegmatisiert. Aufgrund seiner chemischen Stabilität verbunden mit einer hohen Detonationsgeschwindigkeit und guter Initiierbarkeit ist es ein ausgezeichneter Sprengstoff. Nitropenta wird in Sprengschnüren bevorzugt. Im militärischen Bereich wird es als Mischung mit Trinitrotoluol verwendet.

### 1.2 Nitroaromaten

#### 1.2.1 2,4,6-Trinitrotoluol (TNT, Trotyl)

TNT bildet farblose, monoklinprismatische Kristalle in Form von Säulen oder Nadeln. In Wasser ist es nahezu unlöslich (bei 20°C lösen sich 0,013 g in 100 ml). Gut löslich ist es in organischen Lösemitteln wie z.B. Aceton, Benzol oder Toluol. Unterhalb 35°C ist TNT spröde, oberhalb 35°C zunehmend plastisch. Gegen Erwärmen ist TNT sehr beständig. Zuerst schmilzt es bei 80,6°C, ab 160°C bilden sich gasförmige Zerfallsprodukte und erst bei 300°C entzündet es sich unter starker Rauchentwicklung. TNT ist resistent gegen Säuren, aber empfindlich gegen Alkalien, welche rot- oder braungefärbte Stoffe ergeben, die wesentlich leichter explodieren. Durch

Lichtbestrahlung verliert TNT an der Oberfläche einen Teil des Stickstoffs und geht in eine bräunliche, sauer reagierende Substanz mit höherer Schlagempfindlichkeit über.

TNT ist ein sehr bedeutender militärischer Sprengstoff. Seine Vorteile sind die leichte und sichere Herstellung, die große chemische Stabilität (gute Lagerfähigkeit), die guten sprengtechnischen Eigenschaften und die große Unempfindlichkeit gegen mechanische Beanspruchungen. Das letztere ist von grober Bedeutung, da beim Abschluß von Geschossen große Kräfte auf den Sprengstoff einwirken aufgrund des niedrigen Schmelzpunkts wird TNT überwiegend zu Sprengladungen gegossen. Die Anzahl der militärischen TNT-Sprengstoffe ist beträchtlich. Amatol enthält 50 % TNT und 50 % Ammoniumnitrat, Composition B 40 % TNT und 60 % Hexogen, Pentolit 50 % TNT und 50 % PETN, Tritonal 80 % TNT und 20 % Aluminium, Torpex 40 % TNT, 40 % Hexogen und 20 % Aluminium.

### 1.2.2 Pikrinsäure (2,4,6-Trinitrophenol)

Pikrinsäure besteht aus hellgelben, stark bitter schmeckenden Blättchen, die bei 122,5°C schmelzen. Sie färbt die menschliche Haut, tierisches Gewebe (z.B. Wolle und Seide) und andere Eiweißstoffe intensiv gelb. Pikrinsäure löst sich etwas in kaltem Wasser (bei 25°C 1,4 g in 100 ml), in heißem Wasser ist sie gut löslich (bei 100°C 7,2 g in 100 ml). Gegen mechanische Einwirkungen ist sie etwas empfindlich. Wird Pikrinsäure an der Luft entzündet, verbrennt sie langsam mit stark rußender Flamme. Mit Metallen oder basischen Stoffen bildet sie Salze, die Pikrate. Die Pikrate sind zum Teil sehr stoßempfindlich. Pikrinsäure war früher ein wichtiger militärischer Sprengstoff. Die Neigung mit den Metallwandungen der Geschosse zu reagieren, war jedoch nachteilig, weil sich hochexplosive, ziemlich stoßempfindliche Pikrate bildeten. Außerdem war das Vergießen zu Sprengladungen wegen des hohen Schmelzpunkts problematisch. Pikrinsäure wurde deswegen durch TNT ersetzt, obwohl sie dem TNT an Arbeitsvermögen und Brisanz überlegen ist.

## 1.3 Nitroamine

### 1.3.1 Hexogen (1,3,5-Trinitro-1,3,5-triaza-cyclohexan)

Hexogen bildet farblose, rhombische Kristalle, die sich kaum in Wasser (bei 20°C 0,005 g in 100 ml) und in vielen organischen Lösemitteln nur gering lösen. Hexogen ist gegen mechanischen Einwirkungen etwas empfindlich, weist aber eine hohe thermische Stabilität auf. Bei 100°C ist es lange ohne chemische Veränderungen haltbar, Entzündung tritt erst bei 230°C ein. Der Schmelzpunkt liegt ziemlich hoch, bei 204°C. Hexogen ist empfindlich gegen basische Stoffe. In einer 60°C warmen 4%-igen Natriumhydroxidlösung zerfällt es unter Gasentwicklung. Hexogen wird für den Transport und für das Pressen mit 5% Wachs oder mit Kunststoffen phlegmatisiert.

Hexogen besitzt wegen seiner hohen chemischen Stabilität und seiner hohen Brisanz hervorragende Eigenschaften, die nur noch vom Octogen übertroffen werden. Hexogen ist einer der wichtigsten militärischen Sprengstoffe. Zusammen mit TNT (z.B. Composition B und Torpex) wird es unphlegmatisiert zu Sprengladungen gegossen.

### 1.3.2 Octogen (1,3,5,7-Tetranitro-1,3,5,7-tetraaza-cyclooctan)

Octogen tritt in farblosen Kristallen auf, die in vier verschiedenen Modifikationen existieren. Bedeutend ist nur die monokline Kristallform mit der höchsten Dichte (1,96g/cm<sup>3</sup>), die bei 282°C schmilzt ( $\beta$ -Form). Octogen zeigt ähnliche Eigenschaften wie Hexogen. Es ist praktisch unlöslich in Wasser und den meisten organischen Lösemitteln. Die Empfindlichkeit gegen mechanische Beanspruchungen gleicht der des Hexogens, Octogen ist aber wärmeunempfindlicher. Es entzündet sich erst bei 287°C. Außerdem ist Octogen gegen Basen beständig. Octogen erreicht die höchsten Werte für die Dichte und die Detonationsgeschwindigkeit. Damit verbunden ist die höchste Brisanz. Es gewinnt zunehmend Bedeutung als militärischer Sprengstoff, sonst wird aber Hexogen aus wirtschaftlichen Gründen bevorzugt.

## 1.4 Sprengtechnische Eigenschaften

### 1.4.1 Sauerstoffbilanz und Explosionswärme

Die Salpetersäureester haben die günstigsten Sauerstoffbilanzen. Innerhalb der Salpetersäureester weist Nitroglykol die ideale Sauerstoffbilanz von 0 % auf. Die Sauerstoffbilanz von Nitroglycerin bewegt sich geringfügig im positiven Bereich. An Hand der Reaktionsgleichungen erkennt man, dass bei der Umsetzung von Nitroglycerin Sauerstoff frei wird. Bei Nitropenta entsteht neben Kohlenstoffdioxid noch Kohlenstoffmonoxid. Das liegt an der etwas negativen Sauerstoffbilanz.

Die aromatischen Nitroverbindungen besitzen die negativsten Sauerstoffbilanzen. Die des Trinitrotoluols beträgt sogar -73,9 %. Bei der Explosion der Aromaten entstehen deshalb schwarze Rußschwaden, Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff.

Die Sauerstoffbilanzen der Nitroamine liegen zwischen den Aromaten und den Salpetersäureestern.

Die Sauerstoffbilanz spielt eine Rolle bei der Explosionswärme. Dies wird an den hohen Explosionswärmen der Salpetersäureester deutlich. Vergleicht man sie mit den Aromaten, die eine weitaus negativere Sauerstoffbilanz aufweisen, stellt man bei den Explosionswärmen auch deutlich niedrigere Werte fest.

### 1.4.2 Normalgasvolumen

Das entstehende Gasvolumen pro kg hängt von der Molzahl der gasförmigen Produkte ab. Dies läßt sich am Beispiel von Nitroglycerin und Nitroglykol verdeutlichen. Bei der Umsetzung von einem mol Nitroglycerin entstehen 7,25 mol und bei Nitroglykol 5 mol Gase. Da das Volumen aller Gase bei Normalbedingungen (0°C;1013 hPa) annähernd gleich ist und ein mol Gas bei Normalbedingungen 22,4 l einnimmt, kann man davon ausgehen, daß bei der Detonation von Nitroglycerin 162,4 l/mol und bei Nitroglykol 112 l/mol entstehen. Da die molare Masse von Nitroglycerin 227,1 g/mol beträgt, entstehen also 162,4 l Gas pro 227,1 g Nitroglycerin. Auf einen kg bezogen sind das 715,1 l Gas. Bei Nitroglykol ist die molare Masse 152,1 g/mol, es bilden sich also 112 l Gas pro 152,1 g Nitroglykol. Auf einen kg umgerechnet ergibt das 736,4 l. Bezieht man das Gasvolumen auf 25°C, ergibt sich bei Nitroglycerin ein Volumen von 780 l/kg und bei Nitroglykol 804 l/kg. Die in der Praxis gemessenen Werte stimmen damit weitgehend überein.

Die höchsten Schwadenvolumen besitzen die Nitroamine (920 l/kg). Das niedrigste Schwadenvolumen hat TNT. Hier macht sich die negative Sauerstoffbilanz bemerkbar, da bei der Detonation Feststoffe (Rußpartikel) gebildet werden.

### 1.4.3 Detonationsgeschwindigkeit

Die Detonationsgeschwindigkeit hängt hauptsächlich von der Dichte ab. Die Nitroamine haben die höchsten Dichten (bis zu 1,96 g/cm<sup>3</sup>) und erreichen deswegen auch die höchsten Detonationsgeschwindigkeiten (bis zu 9100 m/s).

Die Explosionswärme spielt aber auch eine gewisse Rolle, da die freiwerdende Wärme die chemische Umsetzung beschleunigt, wodurch sich die Reaktionszone schneller ausbreiten kann. Das erkennt man an den Detonationsgeschwindigkeiten von Trinitrotoluol und Nitroglykol. Nitroglykol hat trotz seiner geringeren Dichte gegenüber TNT eine höhere Detonationsgeschwindigkeit, was an der weitaus höheren Explosionswärme liegt. Andererseits übertrifft Nitroglykol Pikrinsäure in gleichem Maße an Explosionswärme, Pikrinsäure besitzt aber eine höhere Detonationsgeschwindigkeit. Das liegt in der höheren Dichte (1,77 g/mol) gegenüber TNT begründet. Innerhalb der Salpetersäureester hat die Dichte den entscheidenden Einfluß auf die Detonationsgeschwindigkeit, weil die Explosionswärmen nicht allzu stark voneinander abweichen. Deswegen hat Nitropenta mit der höchsten Dichte auch die höchste Detonationsgeschwindigkeit.

### 1.4.4 Arbeitsvermögen

Das theoretisch berechnete Berthelotsche Produkt stimmt mit den praktischen Ergebnissen der Bleiblockmethode weitgehend überein. Es fällt aber auf, daß das Berthelotsche Produkt der Nitroamine ungefähr gleich groß ist wie das von Nitroglykol und Nitroglycerin, obwohl die Salpetersäureester höhere Bleiblockausweitungen erreichen. Das liegt an der deutlich höheren Dichte der Nitroamine, die dazu führt, daß die Füllhöhe in der Bohrung entscheidend geringer ist.

Das höchste Arbeitsvermögen besitzt Nitroglykol. Die Aromaten erreichen im Vergleich dazu auf Grund der geringeren Explosionswärmen relativ geringe Werte. Die relativ geringe Explosionswärme ist neben der Sauerstoffbilanz in der chemischen Struktur der Aromaten begründet, denn sie sind durch Ausbildung einer  $\pi$ -Elektronenwolke mesomeriestabilisiert, weil dabei Mesomerieenergie frei wird.

#### 1.4.5 Schlag- und Reibempfindlichkeit

Die Empfindlichkeit gegen mechanische Beanspruchungen hängt von der Stabilität der Verbindung ab. Am instabilsten sind die Salpetersäureester, weil durch die starke elektronenanziehende Wirkung der Nitrogruppen eine starke Ladungstrennung in den Molekülen vorliegt, wodurch die Bindungen leicht gelöst werden können. Die Energie der Bindungen spielt aber auch eine Rolle. Bei den Salpetersäureestern sind die C-O-Bindungen ziemlich energiereich, wodurch die Bindungsenergie gering ist, d.h. die Bindungen können mit relativ geringem Energieaufwand aufgebrochen werden.

Die Aromaten sind am stabilsten, weil sie mesomeriestabilisiert sind und deswegen energieärmer sind. Außerdem sorgt die  $\pi$ -Elektronenwolke für eine gleichmäßige Verteilung der Elektronen im Ring. Pikrinsäure ist empfindlicher als TNT, weil die Hydroxylgruppe einen stärkeren elektronendrückenden Effekt hat als die Methylgruppe. Bei der Pikrinsäure ist deswegen die Elektronendichte im Ring größer als beim TNT. Da Aromaten mit höherer Elektronendichte im Ring reaktiver sind, ist Pikrinsäure instabiler.

(FALBE/REGNITZ 1990, FIESER/FIESER 1990, MEYR 1979, ULLMANN 1982)

## 2. Gewerbliche Sprengstoffmischungen

### 2.1 Schwarzpulver

Schwarzpulver sind schiefergraue bis blauschwarze Gemenge aus 64-75 % Kaliumnitrat, 10-15 % Schwefel und 15-20 % Holzkohle. Am gängigsten sind Buchen- und Erlenholzkohle. In der Sprengpraxis wird fast nur noch Sprengpulver 2 verwendet, das 70 % Kaliumnitrat, 12 % Schwefel und 18 % Holzkohle enthält. Mit höherem Gehalt an Kaliumnitrat verläuft die Explosion heftiger, weil dadurch eine günstigere Sauerstoffbilanz erreicht werden kann. Mit höherem Schwefelanteil ist die Entzündbarkeit größer, die Abbrandgeschwindigkeit und das Arbeitsvermögen aber geringer. Schwarzpulver explodiert schon bei geringem Einschluß äußerst leicht durch Funken und Flammen. Es kann jedoch niemals detonieren, da die Abbrandgeschwindigkeit maximal nur 600 m/s beträgt. Schwarzpulver hat eine schiebende und treibende Wirkung (Deflagration) ohne brisanten Effekt.

Bei der Zündung durch Funken beginnen die Schwefel- und Kohlepartikel zu glühen. Durch die Wärme zerfällt Kaliumnitrat nach folgender Gleichung:

Der freigesetzte naszierende Sauerstoff ist sehr reaktionsfreudig und beschleunigt die Verbrennung der Schwefel und der Kohle. Durch die erneute Wärmefreisetzung zerfällt Kaliumnitrit nach der Gleichung:

Die erneute Sauerstoffabgabe beschleunigt die Umsetzung schließlich bis zu einem explosionsartigem Verlauf. Die Verbrennungsgase Kohlenstoffdioxid und Schwefeldioxid reagieren mit dem Kaliumoxid zu Feststoffen. Die gesamte Reaktionsgleichung hierfür lautet:

Daneben entstehen noch Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldioxid und Kaliumthiosulfat. Bei der Explosion tritt eine sehr starke Rauchentwicklung auf, die durch entstandene Feststoffe ( $K_2SO_4$ ,  $K_2CO_3$ ,  $K_2S$  und  $K_2S_2O_3$ ) verursacht wird. 57 % der Produkte sind Feststoffe.

Schwarzpulver ist der älteste Sprengstoff. Es war bis Mitte des 19. Jahrhunderts der einzig bekannte Sprengstoff. Seine Verwendung ist seitdem stark zurückgegangen, aber es hat in der Sprengtechnik auch heute noch seinen Platz. Es eignet sich zum schonenden Sprengen von Dachschiefer, Pflaster- und Werksteinen, da diese Materialien in großen Bruchstücken benötigt werden.



## 2.2 Ammonite und Donarite

Als Ammonite bezeichnet man pulverförmige Gesteinssprengstoffe, die auf Ammoniumnitrat und aromatischen Nitroverbindungen basieren. Der Gehalt an Ammoniumnitrat beträgt 70-85 %, an aromatischen Nitroverbindungen (meistens Di- und Trinitrotoluol) 10-22 %. Ammonite können noch verbrennbare Stoffe enthalten wie z.B. Holzmehl oder Aluminium.

Die Sauerstoffbilanz ist ideal, weil der Sauerstoffüberschuß des Ammoniumnitrats (+19,98 %) den Sauerstoffmangel des Trinitrotoluols (-73,9 %) und Dinitrotoluols (-114,4 %) gerade ausgleicht. Bei der Detonation zerfällt das Ammoniumnitrat nach folgender Gleichung:

Der freiwerdende Sauerstoff garantiert eine vollständige Oxidation der Aromaten zu Gasen, was für ein gutes Schwadenvolumen und eine optimale Energieausbeute sorgt. Ammonite sind sehr schlagunempfindlich und weisen eine hohe thermische Stabilität auf. Nachteilig ist die Wasserempfindlichkeit, da sich Ammoniumnitrat sehr leicht in Wasser löst. Ammonite sind nur in feuchten Bohrlöchern geeignet, wenn ein Quellmittel und oberflächenaktive Stoffe zugesetzt werden. Die oberflächenaktive Stoffe verhindern zugleich das Zusammenbacken des Ammoniumnitrats während der Lagerung. Um die Initiierung zu erleichtern, wird manchmal 4-6 % Nitroglycerin oder Nitroglykol zugegeben. Diese Sprengstoffe heißen Donarite.

## 2.3 Ammon-Gelite

Ammon-Gelite sind gelatinöse Gesteinssprengstoffe auf der Basis von Ammoniumnitrat und gelatiniertem Nitroglykol oder einem gelatiniertem Gemisch aus Nitroglykol und Nitroglycerin. Zum Gelatinieren verwendet man Nitrocellulose mit einem Stickstoffgehalt von 12,2 %. Der Gehalt an Gelatine beträgt 20-40 %. Ammon-Gelite können noch geringe Mengen verbrennbarer Stoffe wie z.B. Holzmehl enthalten.

Ammon-Gelite haben ebenso wie die Ammonite eine ausgeglichene Sauerstoffbilanz, sie sind aber schlag- und wärmeempfindlicher. Die Wasserfestigkeit ist gut, weil die Gelatine die Ammoniumnitratkörner umhüllt. Die Detonationsgeschwindigkeit und die Brisanz sind wesentlich höher als bei den Ammoniten. Voraussetzungen dafür sind eine ausreichende Anzahl von Luftblasen in der Gelatine, eine starke Initiierung (Sprengschnur) und ein guter Einschluß. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, verläuft die Umsetzung mit der unteren Detonationsgeschwindigkeit (2000-2500 m/s). Bei günstigen Voraussetzungen stellt sich die obere Detonationsgeschwindigkeit (5000-6000 m/s) ein. Ammon-Gelite eignen sich auf Grund des Nitroglykolanteils zum Sprengen bei Temperaturen bis zu -20°C. Sie sind die am meisten verwendeten Gesteinssprengstoffe.

## 2.4 Wettersprengstoffe

In Kohlebergwerken können sich Schlagwetter (Methan-Luft-Gemische) und Kohlenstaub-Luft-Gemische bilden. Beim Sprengen mit Gesteinssprengstoffen besteht die Gefahr, das eine Detonation dieser Gemische ausgelöst wird. Deshalb hat man spezielle Sicherheitssprengstoffe, die sogenannten Wettersprengstoffe, entwickelt. Nach ihrem Sicherheitsgrad unterteilt man sie in die Klassen I-III, wobei die Klasse III am sichersten ist. Die Zündung eines Schlagwetters hängt von der Temperatur und der Dauer der Einwirkung ab, z.B. detonieren Schlagwetter bei 650°C nach 10 s, bei 1000°C nach 1 s. Das Prinzip der Wettersprengstoffe beruht auf dem Herabsetzen der Explosionstemperatur durch das Verdampfen von inerten Stoffen. Die Wettersprengstoffe der Klasse II und III enthalten neben einem Nitroglycerin-Nitroglykol-Gemisch (ca. 10 %) ein Salzpaar aus einem Alkalinitrat und Ammoniumchlorid. Bei der Zündung eines Wettersprengstoffs setzt sich zuerst das Nitroglycerin-Nitroglykol-Gemisch um. Befindet sich der Sprengstoff in einem Bohrloch, werden die Salzkörner eine Zeit lang zusammengehalten und reagieren durch die freiwerdende Energie nach folgender

Das gebildete Ammoniumnitrat zerfällt sofort unter Energieabgabe:

Der entstandene Inertstoff Kaliumchlorid nimmt ein Teil der Wärme durch Verdampfen auf. Dadurch wird eine Abnahme der Explosionstemperatur bewirkt. Detoniert ein Wettersprengstoff ohne Einschluß in einem Bohrloch, werden die Salzkörner durch die Detonation des Nitroglycerin-Nitroglykol-Gemisches sofort weggeschleudert und können nicht miteinander reagieren. Das ist von Bedeutung, da bei einer freiliegenden Detonation die freiwerdende Energie vollständig auf Schlagwetter einwirken kann und nicht durch das Zertrümmern von Kohle

vorher abgeschwächt wird. Bei Wettersprengstoffen besteht in diesem Fall auch kaum eine Gefahr, da die Explosionswärme bei unvollständiger Umsetzung zu kleine Werte erreicht. Die Wettersprengstoffe der Klasse I enthalten den Inertstoff (Natriumchlorid) schon in der Mischung. Sie bieten jedoch bei einer freiliegenden Detonation keine ausreichende Sicherheit, da die Umsetzung auch dann vollständig verläuft. Wettersprengstoffe der Klasse I enthalten ca. 30 % gelatiniertes Nitroglycerin/glykol, ca. 25 % Ammoniumnitrat, ca. 40 % Natriumchlorid und ca. 5 % andere Stoffe wie z.B. Calciumnitrat und Holzmehl.

## 2.5 Sprengtechnische Eigenschaften

\* Abbrandgeschwindigkeit

(GÖTZ 1981, HOFMANN/RÜDORFF 1973, MEYR 1979, ULLMANN 1982)

VI.Zündung gewerblicher Sprengstoffe

In der Praxis wendet man zur Zündung von gewerblichen Sprengstoffen Schwarzpulverzündschnüre, Sprengkapseln, Sprengschnüre, Zündpillen, Sprengzünder und Verstärkerladungen an.

### 1. Schwarzpulverzündschnüre

Schwarzpulverzündschnüre sind gesponnene Schnüre aus Baumwoll- und Jutegarn, die mit einem thermoplastischen Kunststoff umhüllt sind und Schwarzpulver (4-5 g/m) enthalten. Sie können leicht mit einer Flamme angezündet werden. Der Funkenstrahl des Schwarzpulvers löst dann die Explosion von Sprengkapseln und Schwarzpulverladungen aus.

### 2. Sprengkapseln

Sprengkapseln bestehen aus einer Aluminiumhülse, die mit einem sehr empfindlichen Initialsprengstoff und einem energiereichen Sekundärsprengstoff gefüllt ist. Als Initialladung enthalten sie 0,3 g einer Mischung aus Bleiazid und Bleinitroresorcinat, als Sekundärladung 0,8 g Tetryl. Die Hülse besitzt einen leeren Teil, in den durch eine kleine Öffnung eine Sprengschnur, eine Schwarzpulverzündschnur oder eine Zündpille eingeführt werden, mit deren Hilfe die Initialladung gezündet wird. Die Explosion des Initialsprengstoffs überträgt sich auf den Sekundärsprengstoff. Die Explosion des Sekundärsprengstoffs löst dann die Umsetzung der eigentlichen Sprengladung aus.

### 3. Sprengschnüre

Sprengschnüre sind 5-9 mm starke, gesponnene Schnüre aus Textil- oder Kunstfasern, die einen brisanten Sprengstoff (meistens Nitropenta mit 12,5 g/m) enthalten. Ein Überzug aus einem thermoplastischen Kunststoff verleiht ihnen Wasserdichte. Sprengschnüre werden mit Sprengkapseln oder Sprengzünder initiiert. Verzweigte Sprengschnüre eignen sich zur Zündung von mehreren, weiter auseinanderliegenden Sprengladungen. Die hohe Detonationsgeschwindigkeit der Sprengschnur sorgt für eine nahezu gleichzeitige Detonation aller Sprengladungen.

### 4. Zündpillen

Zündpillen enthalten einen leicht brennbaren Stoff (Bleitricinat), der entweder durch die Glühwirkung eines Widerstanddrahts oder durch Überschlag eines elektrischen Funkens angezündet wird. Durch die entstehende Flamme wird die Initialladung in Sprengkapseln gezündet.

### 5. Sprengzünder

Sprengzünder sind eine Kombination aus Sprengkapsel und Zündpille. Die Zündpille wird bereits bei der Herstellung fest an die Sprengkapsel montiert.

## 6. Verstärkerladungen

Einige Sprengstoffe (z.B. Andex und Slurries) können mit gewöhnlichen Mitteln nicht oder nur schwer gezündet werden, da sie zu unempfindlich sind. Man benötigt daher starke Sprengladungen (Verstärkerladungen), die ihre Detonation auf den Sprengstoff übertragen. Als Verstärkerladung kommen z.B. Ammon-Gelite in Frage. (ULLMANN 1982)

### V. Geschichte der gewerblichen Sprengstoffe

Im 12. Jahrhundert tauchten die ersten Sprengstoffe in China auf. Diese schwarzpulverähnlichen Mischungen erhielt man durch Mischen von Brennstoffen mit Salzen der Salpetersäure. Ab Mitte des 13. Jahrhunderts waren sie auch in Westeuropa bekannt. In der zweiten Hälfte des 13. Jahrhunderts erfand der Mönch Berthold Schwarz das Schwarzpulver und entdeckte es als Treibmittel. Dieser Eigenschaft verdankte es seine jahrhundertelange Verwendung in Schußwaffen und Kanonen. Zum Sprengen wurde es erst ab dem 17. Jahrhundert häufiger benutzt. 1627 setzte man in einem Bergwerk zum ersten Mal Schwarzpulver ein. Seine wirtschaftlichen Vorteile führten zu einer raschen Verbreitung als Sprengmittel.

Ein großer Fortschritt waren die Entdeckung der Nitrocellulose 1845 und des Nitroglycerins 1846. Das Arbeiten mit diesen Sprengstoffen war jedoch auf Grund der großen Empfindlichkeit sehr gefährlich. Der schwedische Ingenieur Alfred Nobel konnte durch mehrere bahnbrechende Erfindungen diese Schwierigkeit lösen. 1867 verarbeitete er Nitroglycerin durch Zusatz von 25 % gebranntem Kieselgur zu einer weichen, krümeligen Masse, das sogenannte Gurdynamit. In dieser Form war Nitroglycerin wesentlich handhabungssicherer. Nachteilig war das geringere Arbeitsvermögen, da das Kieselgur nicht an der Umsetzung beteiligt war, und die Wasserempfindlichkeit. Diese Probleme löste Nobel 1875 mit der Einführung der Sprenggelatine, einer gelatinös-elastischen Masse, die sich aus 93 % Nitroglycerin und 7 % Collodiumwolle zusammensetzte. Sprenggelatine war der stärkste gewerbliche Sprengstoff, der jemals zum Einsatz kam. Sie wurde zum Sprengen von härtesten Gesteinen verwendet. Sie wies eine hohe Wasserbeständigkeit auf und enthielt Nitroglycerin in einer sicheren Form als Gurdynamit.

Später entwickelte Nobel aus der Sprenggelatine die Gelatinedynamite. Sie bestanden aus 20-80 % Sprenggelatine mit einem geringem Gehalt an Collodiumwolle (2,5-4 %), sauerstoffabgebenden Salzen, meistens Natriumnitrat, und Brennstoffen wie Mehl und Holzmehl. Gelatinedynamite waren die sichersten Nitroglycerinsprengstoffe und die Vorstufe zu den Ammon-Geliten.

Durch die kurz darauffolgende Erfindung der Ammonite und Chloratsprengstoffe, verlor das Schwarzpulver wegen seiner unzureichenden Leistung endgültig an Bedeutung. Chloratsprengstoffe wurden meist aus 90 % Kaliumchlorat und 10 % Brennstoffen wie z.B. Petroleum, Öle und Holzmehl hergestellt. Problematisch war jedoch die große Reibempfindlichkeit und die leichte Entflammbarkeit, weswegen sie heute nicht mehr eingesetzt werden.

Nach dem Zweiten Weltkrieg entwickelte man in den USA die Andex- und die wasserhaltigen Sprengstoffe. Andex-Sprengstoffe bestehen aus porösen Ammoniumnitrat-Kügelchen (Durchmesser 1-2 mm), die mit Dieselöl aufgesaugt sind. Sie werden lose in die Bohrlöcher geschüttet, die dadurch sehr gut ausgefüllt werden. Dies ist für einen optimalen Verlauf der Sprengung wichtig. Sie zeichnen sich durch hohe Handhabungssicherheit, preiswerte Herstellung und ein großes Schwadenvolumen aus.

Wasserhaltige Sprengstoffe basieren auf Ammoniumnitrat und Wasser. Die anfänglichen Sprengstoffe enthielten 55 % Ammoniumnitrat, 15 % Wasser und 30 % TNT. Später verwendete man statt TNT auch andere Sprengstoffe wie z.B. Hexogen und Nitrocellulose. Heutzutage sind die Sprengstoffe ganz durch Brennstoffe wie z.B. Mineralöl, Glykol und insbesondere pulverförmiges Aluminium ersetzt worden und enthalten ein Andickmittel, z.B. Agar-Agar, Stärke oder Polyacrylamid. Die Art und Menge des Andickmittels, der Gehalt an Wasser (8-18 %) und die Teilchengröße entscheiden über die Konsistenz. Man unterscheidet schlammförmige (Schlammsprengstoffe oder Slurries) und plastische (Wassergele) Sprengstoffe. Die Slurries zeichnen sich durch eine besonders hohe Handhabungssicherheit aus und füllen wegen ihrer mehr oder weniger flüssigen Konsistenz die Bohrlöcher sehr gut aus.

1962 erfand man in den USA die Emulsionssprengstoffe, die in Deutschland seit 1983 hergestellt werden. Sie sind die neueste Entwicklung auf dem Gebiet der wasserhaltigen Sprengstoffe. Siehe dazu die Informationsmappe der Firma Dynamit Nobel im Anhang.

(FALBE/REGNITZ 1990, MEYR 1979, ULLMANN 1982, WINNACKER/KÜCHLER 1960)

## VII. Literaturverzeichnis

Atkins, P. (1990): Physikalische Chemie, Weinheim

Jakubke, H. D., Jeschkeit, H. (1987): Fachlexikon ABC Chemie, 3. Auflage, Frankfurt am Main

Falbe, J., Regnitz, M. (1990): Römpp-Chemie Lexikon, 9. Auflage, Stuttgart

Fieser, F., Fieser, M. (1979): Organische Chemie, 2. Auflage, Weinheim

Götz, H. D. (1981): Vorderlader, 7. Auflage, Stuttgart

Henglein, F. A. (1968): Grundriss der chemischen Technik, 12. Auflage, Weinheim

Hofmann, V., Rüdorff, W. (1973): Anorganische Chemie, 21. Auflage, Braunschweig

Neumüller, O.-A. (1985): Römpps Chemie Lexikon, 8. Auflage, Stuttgart

Meyr, R. (1979): Explosivstoffe, Weinheim

ULLMANN (1982): Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, Band 21, Weinheim

Winnacker, K., Küchler, L. (1960): Chemische Technologie. Band 4: Organische Technologie II, 2. Auflage, München