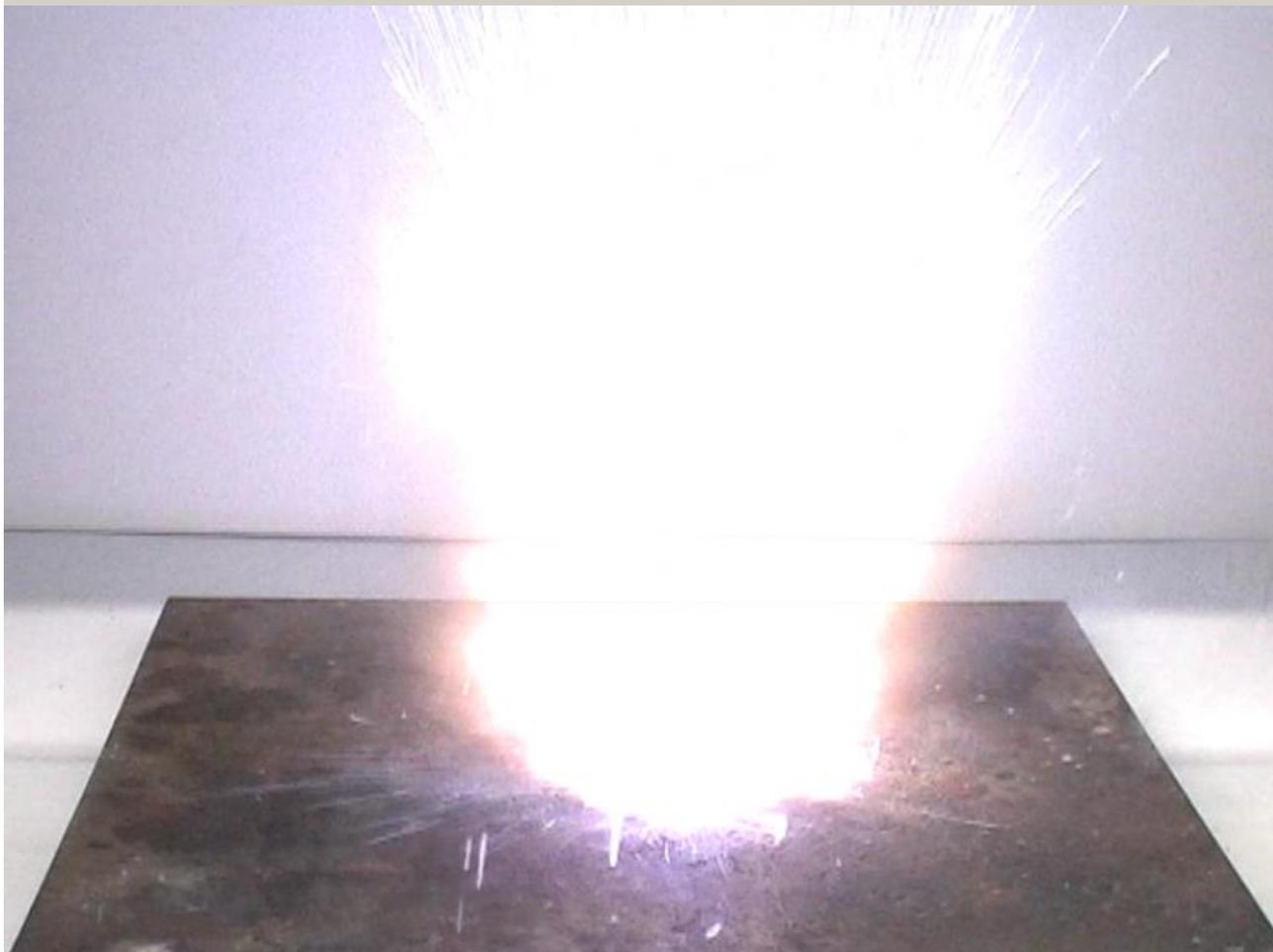


Geschichte der Sprengstoffe

von Manfred Seidl



Inhaltsverzeichnis

1. Wie unterscheiden sich Deflagration, Detonation und Explosion?	1
1.1 Deflagration	1
1.2 Detonation	1
1.3 Explosion	1
2. Das Schwarzpulver und sein Vorläufer	2
2.1 Griechisches Feuer	2
2.2 Schwarzpulver	2
3. Die Initialsprengstoffe der ersten Stunde	4
3.1 Quecksilberfulminat	4
3.2 Silberfulminat	5
3.3 Bleiazid	5
4. 1832 - Eine neue Ära beginnt	6
4.1 Schießbaumwolle	6
4.2 Nitroglycerin und das wenig noble Dynamit	7
4.3 TNT - 2,4,6-Trinitrotoluol	9
4.4 Nitropenta (Pentaerythrittetranitrat)	9
5. Die Sprengstoffe der Nitramingruppe	10
5.1 Hexogen (Cyclotrimethylentrinitramin, Cyclonit, T4 und RDX)	10
5.2 Octogen (Cyclotetramethylentetranitramin, HMX, LX 14-0)	11
6. Alles Plastik?	11
6.1 Die Semtex-Gruppe	12
6.2 Die C-Gruppe	12
7. Ammoniumnitrat und Acetonperoxide	13
7.1 Ammoniumnitrat (ANFO & ANNM)	13
7.2 Acetonperoxide (TATP, APEX)	14
8. Die Zukunft	15
8.1 Hexanitroisowurzitan (HNIW, CL20)	15
8.2 Octanitrocuban (ONC)	15
8.3 Polymerer Stickstoff	15
9. Anhang	16
9.1 Detonationsgeschwindigkeiten	16
9.2 Wichtige Chemiker	16

1. Wie unterscheiden sich Deflagration, Detonation und Explosion?

1.1 Deflagration

Als Deflagration bezeichnet man schnelle Verbrennungsvorgänge. Diese verlaufen mit einer Geschwindigkeit, unterhalb der Schallgeschwindigkeit im verbrennenden Medium (<1000 m/s). Die Fortpflanzung geschieht durch die bei der Reaktion freiwerdende Wärme. Der Verbrennungsdruck (in Luft unter atmosphärischen Ausgangsbedingungen) liegt in der Größenordnung von 10 bar, kann aber abhängig vom Brennstoff höher sein.

1.2 Detonation

1881 entdeckte man Folgendes: Verbrennt in einem Rohr ein Gas erfolgt dies zunächst mit einer Geschwindigkeit von wenigen m/s, aber unter bestimmten Umständen kann eine konstante Umsetzungsgeschwindigkeit von rund 2000 m/s erreicht werden. Dieses Phänomen wird als Detonation und die Umsetzungsgeschwindigkeit mit Detonationsgeschwindigkeit bezeichnet.

Um 1920 wies Walther Nernst darauf hin, dass sich manche Stoffe durch einen Stoß um einige Grad erwärmen könnten und zur Detonation kommen. Im mikroskopischen Bereich sollen lokal hohe Temperaturen entstehen (Hot Spots), die Reaktion einleiten und das gesamte Volumen erfassen. Der detonationsentscheidende Einfluss von Blasen und Rissen wurde über die folgenden Jahrzehnte untersucht, bis sich ein Detonationsmodell auf der Grundlage von Hot-spot-Ansammlungen (Blasenresonanzexplosion) in sphärischen Wellen entwickelte.

Die Detonationsgeschwindigkeit eines Sprengstoffes wird von seiner innerstofflichen Schallgeschwindigkeit beeinflusst. Desto dichter ein Stoff, umso größer die Schallgeschwindigkeit (Unterschied Luft und Wasser). Explosivstoffe besitzen eine minimale und eine maximale Detonationsgeschwindigkeit. Bei einer Detonation liegt die Geschwindigkeit bei über 1000 m/s.

1.3 Explosion

Die mechanische Wirkung, des plötzlichen Druck- und Temperaturanstieges, der bei einer Deflagration bzw. Detonation eines Explosivstoffes auftritt, kennzeichnet eine Explosion.

2. Das Schwarzpulver und sein Vorläufer

2.1 Griechisches Feuer

- Bestandteile: Erdöl oder Asphalt, Baumharz, Schwefel. Später wurde auch Salpeter beigemischt.
- Brannte auf Wasser.
- Entdeckt von Kallinikos aus Heliopolis ca. 667 n.Ch.



Der Architekt Kallinikos aus Heliopolis erfand ca. 667 das griechische Feuer, welches flüssig war und bei der Herstellung gekocht werden musste. Mit einer „siphon“ genannten Vorrichtung konnte es eingesetzt werden. Es brannte auch auf Wasser und war kaum zu löschen.

2.2 Schwarzpulver

- Zusammensetzung: 75% Salpeter, 15% Holzkohle (82% C), 10% Schwefel
- Verwendung: Treibladung, Pyrotechnik, Munition, Feuerwerk, Pyrotechnik

Detonationsgeschwindigkeit: 300-600 m/s

Dichte: 1,2 - 1,5 g/cm³

Temperatur: 2300 - 2600 °C

Jochen Gartz (2007) vertritt die Ansicht, dass die Rezeptur des Schießpulvers, entgegen früherer Vorstellung, nicht durch Zufall in China oder Arabien entdeckt wurde, sondern sich im Laufe wiederholter Experimente aus salpeterhaltigen Brandmischungen entwickelt hat, wie sie den Byzantinern bereits seit dem 7. Jahrhundert bekannt waren. Hierbei wurden nach und nach die flüssigen Bestandteile des sogenannten griechischen Feuers (wie z. B. Erdöl) durch festere Brandstoffe ersetzt (wie pulverisierte Kohle).



Das Liber Ignium (Buch des Feuers) von Marcus Graecus, etwa aus dem 11. Jahrhundert, mit noch erhaltenen Abschriften vom Beginn des 13. Jahrhunderts, enthält noch mehrere Rezeptvarianten. Auch Roger Bacon erwähnt in mehreren Schriften von 1242 bis 1267 mehrmals das Pulver, aber mit unterschiedlichen Masseverhältnissen und 1267 sogar als Kinderspielzeug. Ein weiteres, um 1250 geschriebenes Buch, das fälschlich Albertus Magnus zugeschrieben wurde, kopierte nahezu völlig das ältere Buch von Marcus Graecus.

Im Kaiserreich China werden salpeterhaltige Brandsätze im Wu Ching Tsung Yao von 1044 erwähnt. Das Buch ist aber nur in seiner frühesten Kopie von 1550 aus der Ming-Zeit überliefert, daher ist nicht mehr erkennbar, ob die Vermerke zu den Brandsätzen nicht später hinzugefügt wurden. Es ist jedoch nachgewiesen, dass mit Schwarzpulver gefüllte Bomben durch die Chinesen spätestens im 13. Jahrhundert als Waffe eingesetzt wurden.

In seinem Buch über berittenen Kampf und den Einsatz von Kriegsmaschinen (Al-Furu-siyya wa al-Manasib al-Harbiyya) von etwa 1285 beschreibt der syrische Autor Hassan ar-Rammah die Herstellung von Schwarzpulver, insbesondere die erforderliche Reinigung des Salpeters.

Im Mittelalter nannte man das Schwarzpulver auch „Donnerkraut“. Der heutige Name Schwarzpulver geht wohl nicht auf den Franziskanermönch Berthold Schwarz aus Freiburg zurück, der im 14. Jahrhundert einer Legende zufolge die treibende Wirkung der Pulvergase auf Geschosse fand, sondern auf dessen Aussehen; gegen Ende des 19. Jahrhunderts brauchte man eine Unterscheidung des Schwarzpulvers von den neuen (weißen) Cellulosenitratpulvern.

Das Schwarzpulver blieb bis zur Erfindung der modernen Sprengstoffe der einzige militärische und zivile Explosivstoff und einziges Treibmittel für Artillerie- und Handfeuerwaffen. Im 17. Jahrhundert wurde seine Handhabung als Treibmittel für Musketen durch die Papierpatrone mit abgemessener Füllmenge einschließlich Kugel erleichtert. In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts machte die Entwicklung des Hinterladers die noch einfachere Einheitspatrone möglich. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts verdrängten brisante Sprengstoffe wie das Nitroglycerin, das darauf basierende Dynamit, die Nitrocellulose (Schießbaumwolle), Nitroaromaten und Nitramine etc. das Schwarzpulver weitgehend als Explosivstoff und Treibmittel.



3. Die Initialsprengstoffe der ersten Stunde



Die ersten Beschreibungen dieser Stoffgruppe finden sich schon in Schriften aus der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts. Basilius Valentinus beschreibt z.B. das „explosive Gold“. Dabei handelt es sich um eine Komplexverbindung, die aus Goldtrioxid und Ammoniak entsteht.

Initialsprengstoffe sind Stoffe, die andere Sprengstoffe zur Reaktion bringen. Verwendet werden hierfür Metall-Azide, Metall-Pikrate und Metall-Fulminate. Natriumazid (NaN_3) wird z.B. als Zünder für Airbags verwendet.

3.1 Quecksilberfulminat

- Formel: $\text{Hg}(\text{CNO})_2$
- Herstellung: Salpetersäure, Ethanol und Quecksilber
- Verwendung: Initialsprengstoff

Detonationsgeschwindigkeit: 5000 m/s

Dichte: $4,42 \text{ g/cm}^3$

Schlagempfindlichkeit: 1 - 2 Nm



Der Engländer Edward Charles Howard (1774-1816) stellte 1799 das Quecksilberfulminat her, indem er Quecksilber, Ethanol und Salpetersäure vermischte. Auch Johannes Kunkel (Kunkel von Löwenstern) (ca. 1630-1703) wird die Entdeckung zugeschrieben.

Quecksilberfulminat ist ein weißes bis weißgraues Pulver mit der Formel $\text{Hg}(\text{CNO})_2$. Es explodiert bei Erwärmung auf 160 - 180 °C. Die Detonationsgeschwindigkeit beträgt bei einer Dichte von $3,96 \text{ g/cm}^3$ 4740 m/s. Alfred Nobel verwendete Quecksilberfulminat in Sprengkapseln zur Zündung von Dynamit. Eine Menge von 0,36g reicht aus, um TNT zur Detonation zu bringen.

*Wissenschaft, Erfahrung u. Verstand von allen Sachen,
 bilden diesen, rechten Mann nunmehr unvergleichlich machen.
 Und die Wahrheit, die das Ziel vorwärts selbe augenfunckeln;
 Krönt mit hohen Adel, schon daffel, Nahmen KUNCKELN.*
 — Ein. a. Lihbenus von Wöhrd.

3.2 Silberfulminat

- Formel: AgCNO
- Herstellung: Salpetersäure, Ethanol und Silber
- Verwendung: Initialsprengstoff, Knallerbsen

Detonationsgeschwindigkeit: 4800-5400 m/s

1802 entdeckte der italienische Arzt und Chemiker Louis Gaspard „Luigi“ Brugnatelli das Silberfulminat. Es wird aus Salpetersäure, Ethanol und Silber gewonnen. Silberfulminat ist ebenfalls ein weißes bis weißgraues Pulver mit der Formel AgCNO . Die Detonationsgeschwindigkeit liegt bei 4800-5400 m/s. 0,095g Silberfulminat reichen aus, um TNT zur Detonation zu bringen. Im trockenen Zustand ist es äußerst berührungs- und reibungsempfindlich. Auch elektrostatische Entladungen führen zur Detonation. Wegen dieser Eigenschaften hat es heute keine Bedeutung mehr. Es wird nur noch in Knallerbsen (Kinderspielzeug) verwendet.



Der junge Justus Liebig hat mit Silberfulminat eine heftige Detonation im Dachgeschoss einer Apotheke ausgelöst.

3.3 Bleiazid

- Formel: $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$
- Herstellung: Natriumazid, Blei(II)-acetat, Dextrin
- Verwendung: Initialsprengstoff, Pyrotechnik

Detonationsgeschwindigkeit: 4630 m/s

Dichte: $4,71 \text{ g/cm}^3$

Schlagempfindlichkeit: 2,5 - 4 Nm



Das Bleiazid wird durch Umsetzung von Natriumazid mit Blei(II)-acetat gewonnen. Es werden Stoffe beigemischt, die das Kristallwachstum hemmen. Lange Kristallnadeln zerbrechen sehr leicht und es kommt zur Detonation.

Bei einer Dichte von $4,71 \text{ g/cm}^3$ hat es eine Detonationsgeschwindigkeit von 4630 m/s. Bleiazid ist relativ unempfindlich gegenüber Reibung, Schlag und Stoß. Weshalb es die Fulminate verdrängt hat.

4. 1832 - Eine neue Ära beginnt



Henri Braconnot

Henri Braconnot (1780-1855) ließ 1832 auf Holzspäne eine Mischung aus Salpetersäure und Schwefelsäure (Nitriersäure) einwirken. Er erhielt einen Stoff, der sehr leicht entflammbar ist. Braconnot nannte es „Xyloidin“. Es handelt sich dabei um ein Stärkenitrat mit einem Stickstoffgehalt von bis zu 13%.



Théophile J. Pelouze

Die Detonationsgeschwindigkeit wird mit 4970 m/s angegeben.

Auch der französische Chemiker Théophile-Jules Pelouze (1807-1867) befasste sich 1838 mit dieser Substanz. Allerdings verwendete er Papier. Das daraus entstandene Produkt nannte er Pyroxylin.

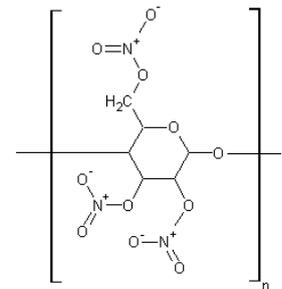
4.1 Schießbaumwolle

- Herstellung: Nitrierung von Baumwolle
- Verwendung: Treibladung, Zelluloid, Pyrotechnik

Detonationsgeschwindigkeit: 6300 m/s

Dichte: 1,3 - 1,7 g/cm³

Schlagempfindlichkeit: 3 Nm



Christian F. Schönbein

1846 beschäftigte sich Christian Friedrich Schönbein (1799-1868) mit Xyloidin und Pyroxylin. Schönbein setzte andere organische Stoffe mit Nitriersäure um. Bei der Verwendung von Baumwolle erhielt Schönbein einen watteähnlichen Stoff, der äußerst leicht entflammbar ist, und nannte ihn Schießbaumwolle. Schießbaumwolle wird auch gerne als Nitrocellulose bezeichnet. Diese Bezeichnung ist aber falsch, da es sich nicht um eine Nitroverbindung, sondern um eine Nitratverbindung handelt. Wird Schießbaumwolle angezündet so deflagriert sie mit einer Geschwindigkeit von 700-900 m/s.

Wird sie jedoch gepresst und initialgezündet erreicht man eine Detonationsgeschwindigkeit von 6300 m/s.

4.2 Nitroglycerin und das wenig noble Dynamit

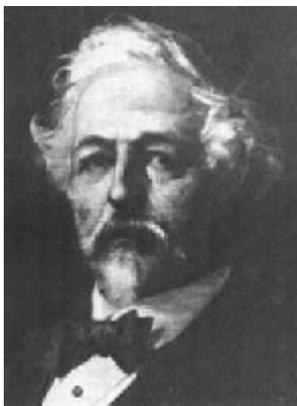
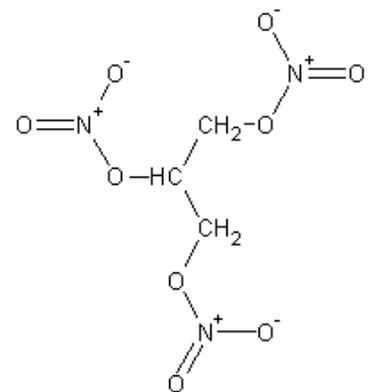
Auch der Name Nitroglycerin ist falsch, auch hier handelt es sich um ein Nitrat. Der richtige Name lautet also Glycerintrinitrat (Propantrioltrinitrat).

- Herstellung: Nitrierung von Glycerin
- Verwendung: Sprengstoff, Dynamitproduktion, Medizin

Detonationsgeschwindigkeit: 7600 m/s

Dichte: 1,599 g/cm³

Schlagempfindlichkeit: 0,2 Nm

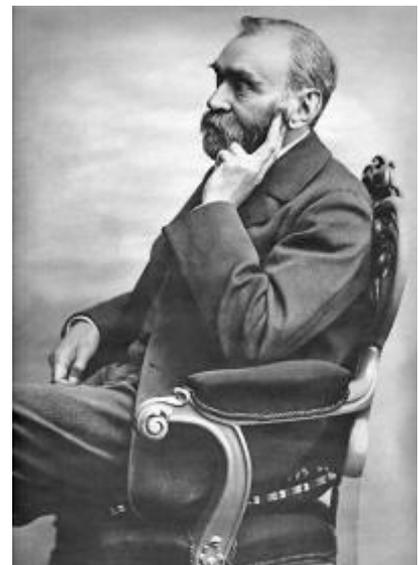


Ascanio Sobrero

Pelouze berichtete seinem ehemaligen Assistenten, von 1840-1842, Ascanio Sobrero (1812-1888), einem Arzt und Chemiker aus Turin, von diesen neuen Stoffen. Sobrero experimentierte am Anfang mit Schießbaumwolle, aber er untersuchte auch andere Stoffe für die Umsetzung mit Nitriersäure. Er versetzte eine Mischung aus Schwefelsäure und Kaliumnitrat mit Glycerin. Sobrero erhielt daraus eine leicht milchige Flüssigkeit, die mit Wasser nicht mischbar ist. Als er einige Tropfen in einem Glas erhitzte, kam es zu einer heftigen Explosion. Daraufhin nannte er seine Entdeckung „pyrophores Glycerin“. Bei einer späteren Explosion von Nitroglycerin wurde Sobreros Gesicht für immer entstellt.

1850 schickte der schwedische Waffenfabrikant Immanuel Nobel (1801-1872) seinen Sohn Alfred auf eine Studienreise durch Amerika und Europa. Alfred Nobel (1833-1896) arbeitete kurzzeitig bei Théophile-Jules Pelouze als Assistent. Dort hörte Alfred Nobel zum ersten Mal von Nitroglycerin. Als er 1853 zurückkehrte, begannen er und sein Vater mit Nitroglycerin zu arbeiten. Eine kontrollierte Zündung des Nitroglycerins blieb auch den Nobels vorerst verwehrt.

Im wahrsten Sinne des Wortes hatte Alfred Nobel eine zündende Idee: Er verwendete, eine mit Quecksilberfulminat gefüllte Kapsel um das Nitroglycerin zur kontrollierten Explosion zu bringen. Die sogenannte Initialzündung war geboren. Diesen Initialzünder meldete Nobel am 15.07.1863 zum Patent an. Dies stellt wohl seine größte und bedeutendste Erfindung dar. Das Nitroglycerin schien „gezähmt“ zu sein.



Alfred Bernhard Nobel



Produktion der Sprengstofffabrik in Krümmel

Am 3.9.1864 kam es in einer Sprengstofffabrik von Alfred Nobel zu einer heftigen Explosion, bei der fünf Personen starben, darunter auch sein jüngerer Bruder Oscar-Emil Nobel.

Dieser Vorfall veranlasste Alfred Nobel das Nitroglycerin ungefährlicher zu machen. Er probierte verschiedenste Bindemittel, u.a. Sägespäne, Holzmehl, Ziegelstaub etc.

Aber erst die Verwendung von Kieselgur brachte 1866 den gewünschten Erfolg. Beim Verühren von Nitroglycerin mit Kieselgur entsteht eine beliebig portionierbare pastöse Masse, die weder schlag-, stoß- oder reibungsempfindlich ist. Wegen der kraftvollen Sprengwirkung nannte Alfred Nobel seinen Sprengstoff „Dynamit“. Die Entdeckung der Sprenggelatine gelang Alfred Nobel 1875. Sprenggelatine besteht aus Nitroglycerin (92%) und Schießbaumwolle (8%) und ist noch stärker als das Gur-Dynamit. Das Dynamit von heute besteht ausschließlich aus diesen gelatinierten Nitroglycerinprodukten.

Das Abfeuern einer Schusswaffe entwickelte, durch die Verwendung von Schwarzpulver, sehr viel Rauch. Ein Schlachtfeld ist durch diesen Qualm lange Zeit nicht überschaubar. Daher entwickelte Nobel aus der Sprenggelatine das rauchschwache Pulver „Ballistit“, welches er 1887 patentieren ließ. Durch seine langsame Verbrennung eignet sich Ballistit hervorragend als Treibladungspulver für Munition. Es ermöglichte die Entwicklung von Maschinengewehren.



Dynamit

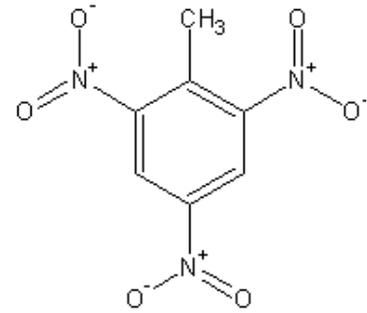
4.3 TNT - 2,4,6-Trinitrotoluol

- Herstellung: mehrfache Nitrierung von Toluol
- Verwendung: Sprengstoff für Handgranaten und Bomben- bzw. Granatenfüllung

Detonationsgeschwindigkeit: 6900 m/s

Dichte: 1,64 g/cm³

Schlagempfindlichkeit: 15 Nm



Joseph Wilbrand (1811-1894) führte 1863 eine mehrfache Nitrierung von Toluol durch. Dabei erhielt er hellgelbe, nadelförmige Kristalle, die zwischen 80-81°C schmelzen. 1891 erfolgt die technische Herstellung durch Häussermann und das Militärversuchsanstalt Berlin erkennt die Tauglichkeit als Sprengstoff. Ab 1902 wurde TNT in Deutschland als Granatfüllung eingesetzt, bis es im 2. Weltkrieg weltweit in militärischer Munition eingesetzt wurde. Wegen seiner Giftigkeit wird TNT immer mehr von anderen Sprengstoffen verdrängt.

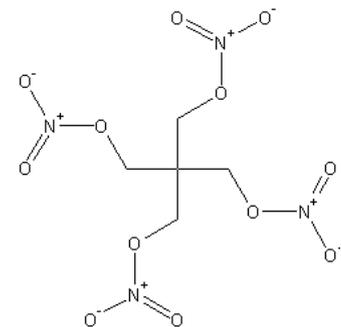
4.4 Nitropenta (Pentaerythritetranitrat)

- Herstellung: Nitrierung von Pentaerythrit mit Salpetersäure (>95%)
- Verwendung: Sprengschnüre, Plastiksprengstoff, Blitzschnüre, Treibladungspulver, Pyrotechnik

Detonationsgeschwindigkeit: 8400 m/s

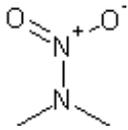
Dichte: 1,77 g/cm³

Schlagempfindlichkeit: 3 Nm



Bernhard Christian Gottfried Tollens (1841-1918) entdeckte 1891 diesen Sprengstoff. Nitropenta wird durch eine Nitrierung von Pentaerythrit mit hochkonzentrierter Salpetersäure (>96%) gewonnen. Die Substanz wurde 1894 als Zusatz für rauchschwache Pulver vorgeschlagen. Nitropenta wird als Bestandteil fast aller Plastiksprengstoffe verwendet.

5. Die Sprengstoffe der Nitramingruppe



Als Nitraminverbindungen bezeichnet man Stoffe die eine stickstoffgebundene Nitrogruppe besitzen.

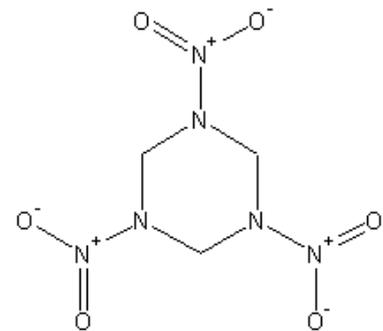
5.1 Hexogen (Cyclotrimethylentrinitramin, Cyclonit, T4 und RDX)

- Herstellung: Nitrierung und oxidativer Abbau von Hexamethylentetramin mit Salpetersäure (>95%)
- Verwendung: Sprengschnüre, Plastiksprengstoff, Blitzschnüre, Bombenfüllung

Detonationsgeschwindigkeit: 8750 m/s

Dichte: 1,82 g/cm³

Schlagempfindlichkeit: 7,4 Nm



Hexogen wurde 1898 von dem Berliner Chemiker und pharmazeutischen Unternehmer Georg Friedrich Henning als Explosivstoff zur technischen Verwertung und als Ausgangsmaterial für pharmazeutische Präparate erstmalig hergestellt und im deutschen Reichspatent unter der Nr. 104280 vom 15. Juli 1898 beschrieben. Im Jahre 1920 erforschte man im Militärversuchsammt in Berlin die Substanz näher und nannte sie nun Hexogen.

Die Herstellungsverfahren waren anfangs unwirtschaftlich. Erst in den 1930er-Jahren wurden vier neue Verfahren in Deutschland entwickelt und Hexogen unter verschiedenen Decknamen wie K-, SH-, E- oder W-Salz im 2. Weltkrieg angewendet. Analoge Verfahren wurden auch auf alliierter Seite entwickelt, z. B. das Bachmann-Verfahren in den USA. Hexogen war auch Bestandteil eines der ersten Plastiksprengstoffe, der von Deutschland unter diesem Namen im 2. Weltkrieg angewendet wurde und aus 88 % Hexogen und 12 % Vaseline bestand.

Heutzutage werden unterschiedliche Kombinationen verwendet, so z.B. Torpex (auch HTA genannt). Torpex besteht aus 40% Hexogen, 42% TNT und 18% Aluminiumpulver.

Hexogen wurde früher als Rodentizid (Bekämpfung von Nagetieren), eingeknetet in Brotteig, verwendet. Heute ist diese Art der Nutzung untersagt.

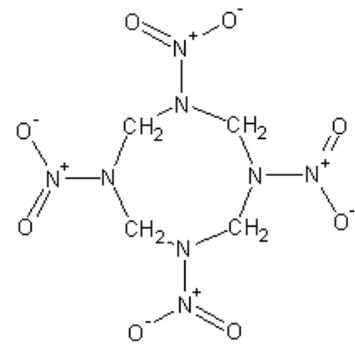
5.2 Octogen (Cyclotetramethyltetranitramin, HMX, LX 14-0)

- Herstellung: Nitrierung und oxidativer Abbau von Hexamethyltetramin mit Salpetersäure (>95%) bei Anwesenheit von Bortrifluorid
- Verwendung: Plastiksprengstoff, Raketensprengköpfe

Detonationsgeschwindigkeit: 9100 m/s

Dichte: 1,89 g/cm³

Schlagempfindlichkeit: 7,4 Nm



Die Substanz wurde 1942 in Deutschland als Nebenprodukt der technischen Synthese des Hexogens (KA-Verfahren) isoliert, chemisch charakterisiert und sprengtechnisch untersucht, wobei es keine Vorteile gegenüber dem Hexogen zeigte. Etwa zur gleichen Zeit wurde es analog in den USA als Nebenprodukt des identischen, neuen Bachmann-Verfahrens abgetrennt und untersucht. Durch Zusatz von Bortrifluorid kann die Ausbeute an Octogen wesentlich erhöht werden.



Die Löslichkeit in Aceton ist viel geringer als die von Hexogen, wodurch die Abtrennung von Octogen durch fraktionierte Kristallisation möglich ist.

6. Alles Plastik?

Der Name „Plastiksprengstoff“ suggeriert es Handle sich um Sprengstoff, der aus Plastik (Kunststoff) besteht. Dies ist aber nicht richtig. Es werden nur Plastifizierungsmittel, wie Polyisobutylen, zugesetzt, was den Sprengstoff knetfähig werden lässt. Sie lassen sich also in jede Form bringen. PE-808-Plastiksprengstoff, eine britische Vorkriegserfindung bestand aus 91% Hexogen und 9% Plastifizierungsmittel. Es hatte eine Konsistenz wie Fensterkitt und konnte in Behälter gefüllt oder direkt aufgetragen werden. PE-808 eignete sich daher perfekt für Sabotageakte. Auch in Deutschland wurde im 2. Weltkrieg ein Plastiksprengstoff verwendet. Dieser bestand aus 88% Hexogen und 12% Vaseline.

Plastiksprengstoffen werden heute bei der Herstellung Markierungsstoffe beigemischt, um diese durch Spürhunde oder durch Detektionsgeräte besser auffinden zu können.

6.1 Die Semtex-Gruppe

Erfunden wurde Semtex 1966 von Stanislav Brebera, einem Chemiker der tschechischen Firma Semtin Glassworks. Er besteht zu großen Teilen aus Nitropenta und Hexogen, der Rest ist Styrol-Butadien-Kautschuk.

Semtex A



- Bestandteile: 94,3% Nitropenta, 5,7% Hexogen, Farbstoff (Sudan IV / rot), Bindemittel & Weichmacher

Semtex H



- Bestandteile: 49,8% Nitropenta, 50,2% Hexogen, Farbstoff (Sudan I / gelb-ocker), Bindemittel & Weichmacher

6.2 Die C-Gruppe

- Bestandteile: 90% Hexogen, 10% Polyisobutylene



Während und kurz nach dem 2. Weltkrieg kamen eine ganze Reihe Hexogen-basierter Sprengstoffe auf den Markt (C, C2, C3). C3 war sehr effektiv, aber bei Kälte brüchig. In den 1960er-Jahren wurde der bekannte C4, ebenfalls auf Hexogen basierend, mit Polyisobutylene und Di(2-ethylhexyl)sebacat als Binde- und Knetmittel entwickelt. Die Lagerung von C4 ist relativ ungefährlich, da es handhabungssicher ist. Weder Feuer, Elektrizität, noch Stöße rufen eine Explosion hervor.

Allerdings kann Druckeinwirkung kombiniert mit Erhitzung durchaus zur Explosion führen.

7. Ammoniumnitrat und Acetonperoxide

7.1 Ammoniumnitrat (ANFO & ANNM)

Detonationsgeschwindigkeit: 2500 m/s ($1,4 \text{ g/cm}^3$)

Dichte: $1,72 \text{ g/cm}^3$

Schlagempfindlichkeit: 49 Nm

Der Kunstdünger Ammoniumnitrat kann auch als Sprengstoff verwendet werden. Dieser Umstand führte am 21. September 1921 zu einer Explosionskatastrophe im Stickstoffwerk Oppau der Firma BASF. Das Ammoniumnitrat war mit 45% Ammoniumsulfat versetzt, was Explosionen eigentlich unwahrscheinlich macht. Die Mischung wird durch Wasseraufnahme steinhart. Um es zu lockern, wurde in Oppau Dynamit eingesetzt, was über 20.000 Mal problemlos verlief.

Aber an diesem Tag detonierten bei einer solchen Lockerung 4500 t Düngemittel. Die Explosivkraft entsprach einer kleinen Atombombe von ungefähr ein bis zwei Kilotonnen TNT. Von 1000 Wohnungen in Oppau wurden 900 zerstört, wodurch 7500 Menschen obdachlos wurden. An der Stelle des Lagergebäudes entstand ein Krater von 125 Meter Länge, 90 Metern Breite und 19 Metern Tiefe. Der Explosionsknall soll bis in das 80 Kilometer entfernte Frankfurt am Main zu hören gewesen sein. Selbst in München wurden zwei dumpfe Schläge gehört.



ANFO = AmmoniumNitrat-Fuel-Oil

- Bestandteile: 94% Ammoniumnitrat, 6% Dieselöl
- Verwendung: Bergbau (Salzgewinnung)

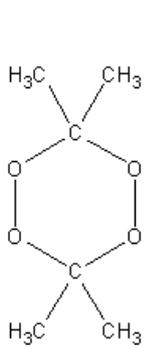
ANNM = AmmoniumNitrat-NitroMethan

- Bestandteile: 94-96% Ammoniumnitrat, 6-4% Nitromethan
- Verwendung: Bergbau (Salzgewinnung)

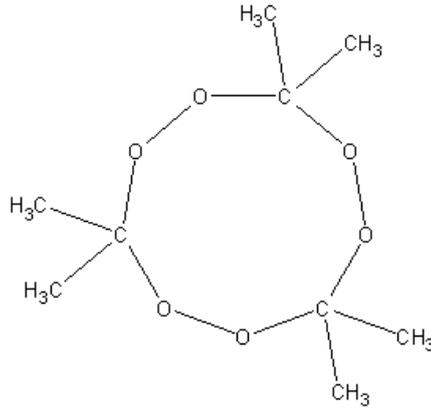
ANNM wurde auch für den Terroranschlag am 19.5.1995 in Oklahoma City eingesetzt. 2,4t des Sprengstoffes wurden zur Detonation gebracht. Dabei kamen 168 Menschen ums Leben, 800 Personen wurden verletzt und 300 Gebäude beschädigt. Die Explosion war noch in 1,5km Entfernung zu spüren.



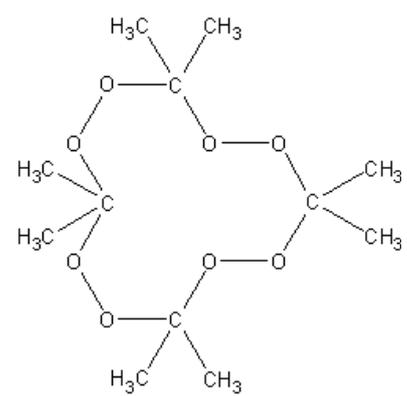
7.2 Acetonperoxide (TATP, APEX)



dimeres Acetonperoxid



trimeres Acetonperoxid



tetrameres Acetonperoxid

- Herstellung: säurekatalysierte Kondensation von Wasserstoffperoxid und Aceton

Detonationsgeschwindigkeit: 4500 – 5500 m/s

Dichte: 0,9 – 1,2 g/cm³ (trimer)

Schlagempfindlichkeit: 0,3 Nm

Acetonperoxid wurde im Jahre 1895 von Richard Wolffenstein an der Technischen Hochschule Berlin zufällig entdeckt. Ein Herstellungsverfahren für Acetonperoxid wurde von ihm im Jahre 1895 unter der Nummer D.R.P. 84953 in Deutschland zum Patent angemeldet. Die extreme Schlagempfindlichkeit, Flüchtigkeit (6,5 % in 24 h bei 14–18 °C) und mangelnde Stabilität verhinderten jedoch jegliche praktische Nutzung. Es sind bisher drei verschiedene Peroxide des Acetons bekannt. Je nach Herstellungsverfahren erhält man ein dimeres, trimeres oder tetrameres Produkt, welches erst 1999 durch chinesische Forscher entdeckt wurde. Wegen der einfachen Herstellung wird Acetonperoxid gerne von Jugendlichen, sogenannte APEX-Kiddies und Terroristen verwendet. Bei dem Terroranschlag auf die U-Bahn in London wurde Acetonperoxid eingesetzt.

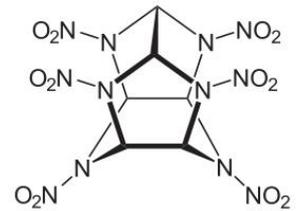
8. Die Zukunft

8.1 Hexanitroisowurzitan (HNIW, CL-20)

- Herstellung: dreistufiges Verfahren, sehr zeitaufwendig
- Verwendung: Raketensprengköpfe

Detonationsgeschwindigkeit: max. 10300 m/s

Dichte: 1,90 g/cm³



Arnold T. Nielsen und seinen Mitarbeitern am Naval Surface Weapons Center in **China Lake**, Kalifornien, USA, gelang es erstmals 1987 nach **20** Syntheseversuchen das HNIW (**Hexa**Nitro**hexa**azal**iso**Wurzitan), ein Nitramin mit einer Käfigstruktur herzustellen. Deshalb ist für HNIW auch der Name **CL-20** gebräuchlich.

Die Synthese ist äußerst langwierig, was diesen Stoff sehr teuer macht. Es wird daher nur für ganz spezielle Sprengstoffe verwendet, z.B. in Raketensprengköpfen.

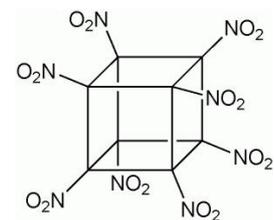
8.2 Octanitrocuban (ONC)

Detonationsgeschwindigkeit: > 10000 m/s

Dichte: 1,979 g/cm³

Temperatur: 6000 °C

Druck: 300000 bar



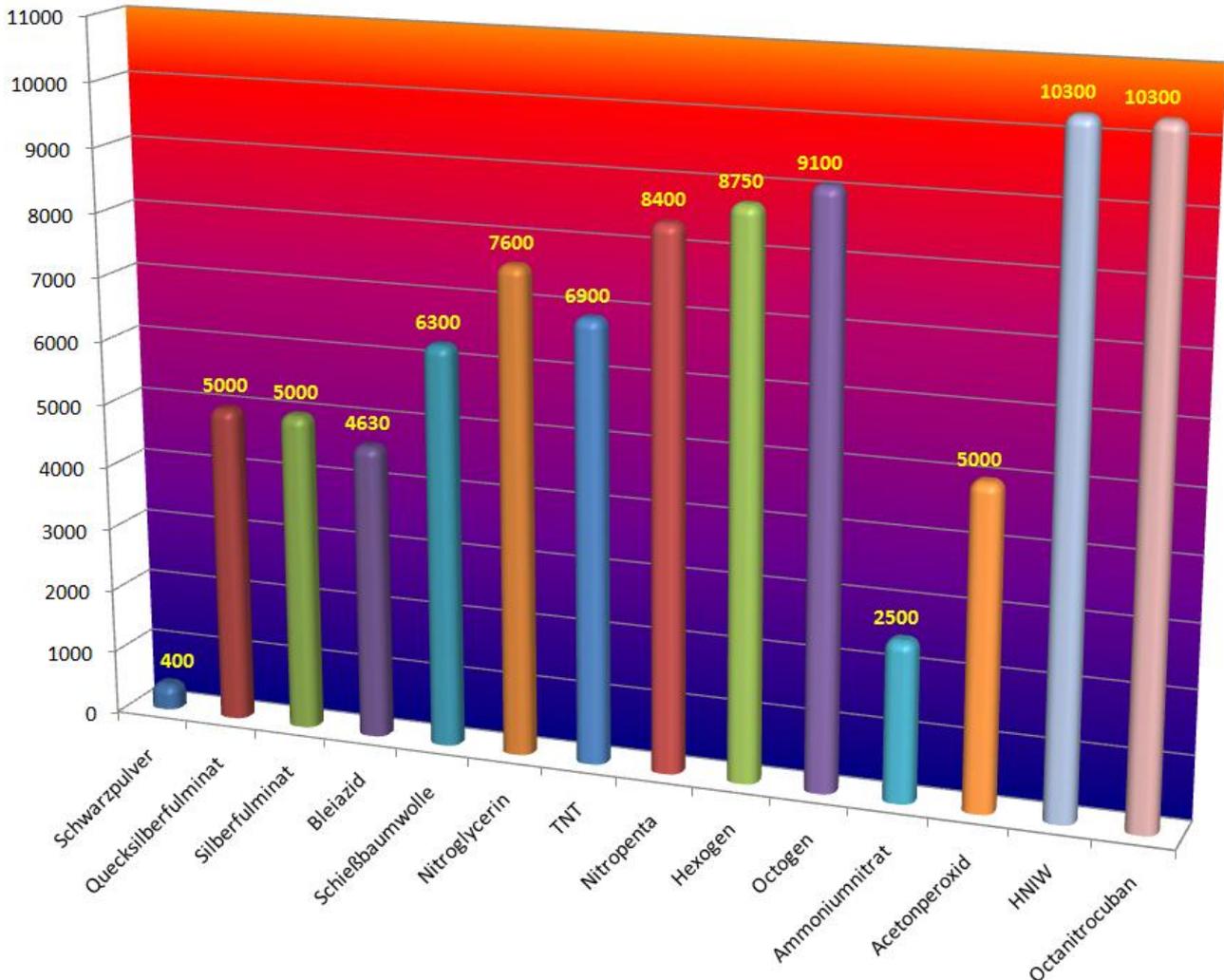
Octanitrocuban wurde erstmals 1999 an der Universität von Chicago von den Chemikern Philip E. Eaton und Mao-Xi Zhang synthetisiert. Das Molekül hat ein Gerüst von acht Kohlenstoffatomen, die einen Würfel bilden. An jedes Kohlenstoffatom ist eine Nitrogruppe gebunden. Auch diese Synthese ist kompliziert und teuer.

8.3 Polymerer Stickstoff

In einer Veröffentlichung im August 2004 gaben Forscher vom Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz bekannt, dass sie unter Drücken von über 110 GPa bei einer Temperatur von über 2000 K eine neue kristalline Form, sogenannten polymeren Stickstoff mit Einfachbindungen erzeugt haben. Diese Modifikation besitzt eine einzigartige kubische Struktur, die sogenannte „cubic gauche“-Struktur. Durch die hohe Instabilität sind die Einsatzmöglichkeiten begrenzt, man könnte sich polymeren Stickstoff aber zum Beispiel als Sprengstoff oder Energiespeicher vorstellen. Polystickstoff wäre dann mit Abstand der stärkste, nicht nukleare Sprengstoff.

9. Anhang

9.1 Detonationsgeschwindigkeiten



9.2 Wichtige Chemiker

Kallinikos aus Heliopolis war ein im 7. Jahrhundert lebender byzantinischer Architekt und Erfinder. Kallinikos war Grieche und stammte ursprünglich aus dem syrischen Heliopolis (Baalbek im heutigen Libanon). Nur sehr wenig ist über sein Leben bekannt. Er flüchtete wohl in den 60er oder frühen 70er Jahren des 7. Jahrhunderts aus dem arabisch beherrschten Syrien nach Konstantinopel. Ihm wird die Erfindung des griechischen Feuers zugeschrieben.

Basilus Valentinus ist der vorgebliche Autor einer Reihe alchemistischer Schriften, die in Erstdrucken aus der Zeit 1599-1626/45 und in Handschriften des 17. Jahrhunderts überliefert sind, mehrfach nachgedruckt, kommentiert und in mehrere europäische Sprachen übersetzt wurden.

Edward Charles Howard (* 28. Mai 1774 † 27. September 1816) war ein englischer Chemiker.

Johannes Kunckel (* um 1630 in Hütten bei Eckernförde in Schleswig; † 20. März 1703 in Bernau bei Berlin auf Gut Dreißighufen) war ein deutscher Alchimist und erfolgreicher Glasmacher. Vom Schwedenkönig Karl XI. wurde er zu „Johann Kunckel von Löwenstern“ geadelt.

Louis Gaspard „Luigi“ Brugnatelli (* 1761; † 1818) war ein italienischer Arzt und Chemiker.

Henri Braconnot (* 29. Mai 1780 in Commercy; † 15. Januar 1855 in Nancy) war ein französischer Chemiker, Botaniker und Pharmazeut. Er entdeckte und beschrieb unter anderem Aminosäuren, Pektin und verschiedene organische Säuren und Fette. Er entwickelte auch die Stearin-Kerze.

Théophile-Jules Pelouze (* 26. Februar 1807 in Valognes; † 31. Mai 1867 in Paris) war ein französischer Chemiker. Mit sehr großer Genauigkeit bestimmte er das Atomgewicht mehrerer Elemente. Sein Name ist einer von 72, die auf dem Eiffelturm in Paris verewigt sind.

Christian Friedrich Schönbein (* 18. Oktober 1799 in Metzingen; † 29. August 1868 in Baden-Baden) war ein deutsch-schweizerischer Chemiker. Nach einem Studium der Chemie in Erlangen und an der Sorbonne in Paris und Reisen nach England und Schottland wurde er schließlich Professor an der Universität Basel und später Stadtrat von Basel. Er war Entdecker des Ozons (1839), Entdecker des Prinzips der Brennstoffzelle (1838) und der Schießbaumwolle (1846).

Ascanio Sobrero (* 12. Oktober 1812 in Casale Monferrato; † 26. Mai 1888 in Turin) war ein italienischer Chemiker, Arzt und Entdecker des Nitroglycerins. Bei seinen Experimenten mit Nitroglycerin erlitt er schwere Gesichtsverletzungen.

Immanuel Nobel (* 24. März 1801 in Gävle; † 3. September 1872 in Heleneborg) war ein schwedischer Ingenieur, Architekt, Erfinder und Industrieller. Sein Sohn Alfred Nobel, der das Unternehmen des Vaters fortführte, war der Begründer des Nobelpreises und Erfinder des Dynamits.

Alfred Bernhard Nobel (* 21. Oktober 1833 in Stockholm; † 10. Dezember 1896 in San Remo) war ein schwedischer Chemiker und Erfinder. Es wurden ihm insgesamt 355 Patente zugesprochen. Nobel ist der Erfinder der Initialzündung, des Dynamits, des rauchlosen Pulvers und Stifter des Nobelpreises.

Joseph Wilbrand (* 1811; † 1894) war ein deutscher Chemiker.

Bernhard Christian Gottfried Tollens (* 30. Juli 1841 in Hamburg; † 31. Januar 1918 in Göttingen) war ein deutscher Agrikulturchemiker, der sich insbesondere mit der Chemie und Struktur der Zuckermoleküle beschäftigte. Er entwickelte eine besondere Form der Ringformeln für Zucker.

Georg Friedrich Henning (* 15. Oktober 1863 in Wietstock, Pommern; † 21. Februar 1945 in Berlin) war ein deutscher Pharmazeut und Unternehmer.

Stanislav Brebera (* 10. August 1925) ist ein tschechischer Chemiker. In dem tschechoslowakischen Staatsbetrieb VÚPCH (Výzkumný ústav průmyslové chemie - Forschungsinstitut für industrielle Chemie), heute Explosia, in Pardubice entwickelte er 1966 den Plastiksprengstoff Semtex.

Richard Wolffenstein (* 21. August 1864 in Berlin; † 5. Juni 1926 in Berlin) war ein deutscher Chemiker, der um die Jahrhundertwende vom 19. zum 20. Jahrhundert wirkte.

2,4,6-Trinitrotoluol	10	Christian Friedrich Schönbein	7, 18
2. Weltkrieg	10ff	CL-20	16
Aceton	12, 15	CL20	16
Acetonperoxid	15	Cyclonit	11
Acetonperoxide	14f	Cyclotetramethylenetetranitramin	12
Airbags	5	Cyclotrimethylenetrinitramin	11
Al-Furusiyya wa al-Manasib al-Harbiyya	4	Deflagration	2
Albertus Magnus	3	Detektionsgeräte	12
Alfred Bernhard Nobel	18	Detonation	2, 5f, 14
Alfred Nobel	9	Detonationsgeschwindigkeit	2f, 5ff, 10ff, 14ff
Alfred Nobel	5, 8f, 18	Detonationsgeschwindigkeit:	6
Aluminiumpulver	11	Detonationsmodell	2
Ammoniak	5	Deutschland	10ff, 15
Ammoniumnitrat	14	Dextrin	6
Ammoniumsulfat	14	Di(2-ethylhexyl)sebacat	13
ANFO	14	Dichte	3, 5ff, 10ff, 14ff
ANNM	14	Dieselöl	14
APEX-Kiddies	15	Donnerkraut	4
APEX	15	Druck	16
Arabien	3	Düngemittel	14
Arnold T. Nielsen	16	Dynamit	4f, 8f, 14, 18
Ascanio Sobrero	8, 18	Dynamitproduktion	8
Asphalt	3	Edward Charles Howard	5, 18
Atombombe	14	Einheitspatrone	4
Bachmann-Verfahren	11f	Energiespeicher	16
Ballistit	9	Erdöl	3
BASF	14	Ethanol	5f
Basilus Valentinus	5, 17	Explosia	19
Baumharz	3	Explosion	2, 8f, 13f
Baumwolle	7	Explosionskatastrophe	14
Bergbau	14	explosive Gold	5
Bernhard Christian Gottfried Tollens	10, 19	Explosivkraft	14
Berthold Schwarz	4	Explosivstoff	4, 11
Bindemittel	9, 13	Farbstoff	13
Blasenresonanzexplosion	2	Feuerwerk	3
Blei-II-acetat	6	Flüchtigkeit	15
Bleiazid	6	fraktionierte Kristallisation	12
Blitzschnüre	10f	Fulminate	6
Bomben	4	Georg Friedrich Henning	11, 19
Bombenfüllung	11	Geschosse	4
Bortrifluorid	12	Glycerin	8
Brandmischungen	3	Glycerintrinitrat	8
Brandsätze	4	Goldtrioxid	5
Brandstoffe	3	Granatenfüllung	10
Buch des Feuers	3	Granatfüllung	10
Byzantinern	3	Griechisches Feuer	3
C-Gruppe	13	Gur-Dynamit	9
C 13		Handfeuerwaffen	4
C2	13	Handgranaten	10
C3	13	Hassan ar-Rammah	4
C4	13	Häussermann	10
Cellulosenitratpulver	4	Henri Braconnot	7, 18
Chicago	16	Hexamethylenetetramin	11f
China Lake	16	Hexanitroisowurzitan	16
China	3	Hexogen	11ff

Hexogens	12	Musketen	4
Hinterlader	4	Natriumazid	5f
HMX	12	Naval Surface Weapons Center	16
HNIW	16	Nitramin	16
Holzkohle	3	Nitramine	4
Holzmehl	9	Nitramingruppe	11
Holzspäne	7	Nitraminverbindungen	11
Hot Spots	2	Nitrat	8
Hot-spot-Ansammlungen	2	Nitratverbindung	7
HTA	11	Nitriersäure	7f
Immanuel Nobel	8, 18	Nitrierung	7f, 10ff
Initialsprengstoff	5f	Nitroaromaten	4
Initialsprengstoffe	5	Nitrocellulose	7
Initialzündler	8	Nitroglycerin	8f, 18
Initialzündung	8, 18	Nitroglyzerin	4
Instabilität	16	Nitrogruppe	11, 16
Jochen Gartz	3	Nitromethan	14
Johannes Kunckel	5, 18	Nitropenta	10, 13
Joseph Wilbrand	10, 19	Nitroverbindung	7
Justus Liebig	6	Nitrozellulose	4
KA-Verfahren	12	Nobelpreis	18
Käfigstruktur	16	Octanitrocuban	16
Kaliumnitrat	8	Octogen	12
Kallinikos aus Heliopolis	3	Oklahoma City	14
Kallinikos von Heliopolis	17	ONC	16
Kieselgur	9	Oppau	14
Kilotonnen	14	Oscar-Emil Nobel	9
Kinderspielzeug	3, 6	Papier	7
Knallerbsen	6	Papierpatrone	4
Knetmittel	13	Pardubice	19
Kohlenstoffatom	16	PE-808	12
Kondensation	15	Pentaerythrit	10
Kriegsmaschinen	4	Pentaerythrittetranitrat	10
Kristallnadeln	6	Peroxide	15
Kristallwachstum	6	Personen	
Kugel	4	Kallinikos aus Heliopolis	3
Kunkel von Löwenstern	5	Philip E. Eaton	16
Kunstdünger	14	Plastifizierungsmittel	12
Kunststoff	12	Plastik	12
Liber Ignium	3	Plastiksprengstoff	10ff, 19
London	15	Plastiksprengstoffe	10, 12
Louis Gaspard „Luigi“ Brugnatelli	6, 18	Polyisobutylen	12f
LX 14-0	12	Polymerer Stickstoff	16
Mao-Xi Zhang	16	Polystickstoff	16
Marcus Graecus	3	Propantrinitrat	8
Markierungsstoffe	12	Pulvergase	4
Maschinengewehre	9	pyrophores Glycerin	8
Max-Planck-Institut für Chemie	16	Pyrotechnik	3, 6f, 10
Medizin	8	Pyroxylin	7
Metall-Azide	5	Quecksilber	5
Metall-Fulminate	5	Quecksilberfulminat	5, 8
Metall-Pikrate	5	Raketensprengköpfe	12, 16
Militärversuchsanstalt Berlin	10	Raketensprengköpfen	16
Mittelalter	4	rauchschwache Pulver	9f
Munition	3, 9f	RDX	11

Reibung	6	Universität	16
Richard Wolffenstein	15, 19	USA	11f, 16
Rodentizid	11	Vaseline	11f
Roger Bacon	3	Verbrennungsdruck	2
Sabotageakte	12	VÚPCH	19
Sägespäne	9	Výzkumný ústav průmyslové chemie	19
Salpeter	3f	Wasserstoffperoxid	15
salpeterhaltige Brandsätze	4	Weichmacher	13
Salpetersäure	5ff, 10ff	Wu Ching Tsung Yao	4
Salzgewinnung	14	Xyloidin	7
Schallgeschwindigkeit	2	Zelluloid	7
Schießbaumwolle	4, 7ff, 18	Ziegelstaub	9
Schießpulver	3	Zünder	5
Schlag	6	Zündung	8
Schlagempfindlichkeit	5ff, 10ff, 14f	„cubic gauche“-Struktur	16
Schusswaffe	9		
Schwarzpulver	3f, 9		
Schwefel	3		
Schwefelsäure	7f		
Semtex A	13		
Semtex H	13		
Semtex-Gruppe	13		
Semtex	13, 19		
Semtin Glassworks	13		
Silber	6		
Silberfulminat	6		
Sprengelatine	9		
Sprengkapseln	5		
Sprengschnüre	10f		
Sprengstoff	8, 10, 12, 14, 16		
Sprengstoffe	4f, 11, 13, 16		
Sprengstofffabrik	9		
Spürhunde	12		
Stanislav Brebera	13, 19		
Stärkenitrat	7		
Stickstoff	16		
Stickstoffgehalt	7		
Stickstoffwerk Oppau	14		
Stoß	6		
Styrol-Butadien-Kautschuk	13		
Sudan I	13		
Sudan IV	13		
T4	11		
TATP	15		
Temperatur	3, 16		
Terroranschlag	14f		
Terroristen	15		
Théophile-Jules Pelouze	7f, 18		
TNT	5f, 10f, 14		
Toluol	10		
Torpex	11		
Treibladung	3, 7		
Treibladungspulver	9f		
Treibmittel	4		
Umsetzungsgeschwindigkeit	2		