

**Josef Köhler
Rudolf Meyer
Axel Homburg**

Explosiv- stoffe

**Zehnte, überarbeitete
und erweiterte Auflage**

 **WILEY-VCH**

Weinheim • New York • Chichester • Brisbane • Singapore • Toronto

J. Köhler
R. Meyer
A. Homburg

Explosivstoffe

**Josef Köhler
Rudolf Meyer
Axel Homburg**

Explosiv- stoffe

**Zehnte, überarbeitete
und erweiterte Auflage**

 **WILEY-VCH**

Weinheim • New York • Chichester • Brisbane • Singapore • Toronto

Dipl.-Ing. Josef H. Köhler
Fronweg 1
A-4784 Schardenberg

Dr. Rudolf Meyer (†)
(vormals WASAG Chemie AG,
Essen, Deutschland)

Dr.-Ing. Axel Homburg
c/o Dynamit Nobel GmbH
Kaiserstr. 1
D-53839 Troisdorf

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

- 1., Auflage 1932
herausgegeben von der WASAG, Berlin
1. Nachdruck 1941
- 2., erweiterte Auflage 1961
herausgegeben von der WASAG-CHEMIE AG, Essen
- 3., neubearbeitete und erweiterte Auflage 1973
mit Unterstützung des Archivs der WASAG-CHEMIE GmbH
- 4., verbesserte Auflage 1975
1. Nachdruck 1976
- 5., überarbeitete und erweiterte Auflage 1979
- 6., überarbeitete und erweiterte Auflage 1985
- 7., überarbeitete und erweiterte Auflage 1991
- 8., überarbeitete Auflage 1995
- 9., überarbeitete und erweiterte Auflage 1998
- 10., überarbeitete und erweiterte Auflage 2008

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Köhler, Josef: Explosivstoffe / Josef Köhler ; Rudolf Meyer. - 9., überarb. und erw. Aufl. - Weinheim ; New York ; Chichester ; Brisbane ; Singapore ; Toronto : Wiley-VCH, 1998
ISBN 3-527-28864-3

© WILEY-VCH Verlag GmbH, D-69469 Weinheim (Germany), 2008

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche gekennzeichnet sind.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprint, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publishers. Registered names, trademarks, etc. used in this book, even when not specifically marked as such, are not to be considered unprotected by law.

Satz: Typomedia Satztechnik GmbH, D-73760 Ostfildern

Druck und Bindung: Franz Spiegel Buch GmbH, D-89026 Ulm

Printed in the Federal Republic of Germany

Herrn Berthold von Bohlen und Halbach † gewidmet

IN MEMORIAM

Rudolf Meyer

(1908–2000)

Dr. Rudolf Meyer wurde am 4. März 1908 in Spandau (Berlin) geboren und schloss sein Studium auf dem Gebiet der physikalischen Chemie ab. Er begann seine erste wissenschaftliche Arbeit auf dem Gebiet der energetischen Stoffe im Rahmen seiner Promotion über die thermodynamischen Daten der Stickstoffwasserstoffsäure, die er 1931 an dem Berliner Institut von Professor Bodenstein anfertigte. Nach seiner Doktorarbeit trat Rudolf Meyer 1934 als Assistent von Dr. Ph. Naoum in die Dynamit Nobel AG ein, wo er, zuletzt als Laborleiter im Werk Krümmel, von 1936–1945 an gießbaren, ammoniumnitrathaltigen Explosivstoffen und Hohlladungen arbeitete.

Nach dem Krieg nahm er eine Stelle als wissenschaftlicher Berater beider argentinischen Regierung in Buenos Aires an. 1954 kehrte er nach Deutschland zurück und war bis zu seiner Pensionierung technischer Direktor der WASAG Chemie AG, Essen. Er starb am 23. 05. 2000 in Essen und hinterließ seine Ehefrau, mit der er über 60 Jahre verheiratet war, und zwei erwachsene Söhne.

Dr. Meyer hat sein ganzes Berufsleben der Sprengstoffchemie gewidmet.

Vorwort zur zehnten Auflage

Die nunmehr zehnte Auflage der „Explosivstoffe“ trägt jetzt die Namen von drei Autoren. Erfreulicherweise hat sich Herr Dr.-Ing. Axel Homburg, wie auch bereits bei den letzten zwei englischen Auflagen, bereit erklärt, bei der Erstellung dieses Werkes mitzuwirken.

Herr Dr. Homburg war viele Jahre Vorsitzender der Geschäftsführung der Dynamit Nobel AG und ist seit 1996 Mitglied des dortigen Aufsichtsrats. Aufgrund seiner langjährigen, beruflichen Erfahrung darf Dr. Homburg als ein ausgezeichnete und vielseitiger Fachmann auf dem Gebiet der energetischen Materialien bezeichnet werden, der auch weit über den deutschsprachigen Raum hinaus einen ausgezeichneten Ruf genießt.

Leider verstarb im Mai 2000 der bisherige Hauptautor und Initiator dieses erfolgreichen Werkes, Herr Dr. Rudolf Meyer.

Dr. Meyer startete 1961, in seiner damaligen Funktion als technischer Direktor der WASAG Chemie AG in Essen, die erste Nachkriegsauflage der „Explosivstoffe“, wobei seinerzeit eine ehemalige Firmenbroschüre von 1932 als Vorlage diente. Im Jahre 1977 erfolgte dann erstmalig die Veröffentlichung der englischsprachigen „Explosives“, von der bis heute bereits eine sechste Auflage existiert.

Gegenüber der neunten Auflage wurden, neben den üblichen kleineren Korrekturen und Ergänzungen, wieder einige neue, auch technisch interessante Verbindungen mit Explosivstoffcharakter aufgenommen.

Die Autoren sind insbesondere, wie auch bei allen vorangegangenen deutschen und englischen Auflagen, den Mitarbeitern des Fraunhofer Instituts für Chemische Technologie (ICT) für die umfangreiche Hilfestellung zu großem Dank verpflichtet. Dabei wären insbesondere Herr Prof. Dr.-Ing. P. Elsner, Herr Dr. H. Krause, Herr Dr. M. Herrmann, Herr Dr. S. Kelzenberg, Herr Dr. P.B. Kempa, Frau Dr. G. Kistner, Herr Dr. Th. Keicher, Herr Dr. F. Volk (†) und Herr H. Bathelt zu nennen.

Mr. Dr. Robert Bickes von den Sandia National Labs, USA stellte einen Artikel zu dem Stichwort Semiconductor Bridge Igniteres (SCB) zur Verfügung, Herr Dr. Alfred Kappl übermittelte Textmaterial zu dem Themenkomplex FAE und thermobare Ladungen.

Weiterhin möchten sich die Autoren auch bei den Mitarbeitern der Fachabteilung II.3 der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) bedanken. Hier wären Herr Dr. D. Eckhardt, Herr Dr. Th. Lehmann und Herr Dr. J. Otto zu nennen.

Aus dem Vorwort bisheriger Auflagen:

Das Molekulargewicht wurde im allgemeinen mit einer für sprengtechnische Berechnungen ausreichenden Genauigkeit mit einer Stelle hinter dem Komma angegeben. Angaben zur Dichte geschahen nach

bestem Wissen, natürlich bei Flüssigkeiten mit mehr signifikanten Stellen als bei Feststoffen. Die Bestimmung der sprengtechnischen Kennzahlen, wie z. B. Bleiblockausbauchung oder Verpuffungspunkt, ist in Stichworten beschrieben, in denen Definitionen und Versuchsbedingungen angegeben sind.

Alle berechenbaren Größen: Explosionswärmen, Normalgasvolumen und spezifische Energie wurden mit Hilfe des, von Herrn Dr. F. Volk, sowie Herrn H. Bathelt, Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT), erstellten FORTRAN-Computer-Programms „ICT-Code“ berechnet.

Eine Demo CD des ICT-Codes und der ICT-Thermodynamischen Datenbank ist dem Buch beigelegt.

Die, zuerst in der englischen Ausgabe aufgenommenen thermoanalytischen Daten, die Dr. G. Krien im Bundesinstitut für Chemisch-Technische Untersuchungen erarbeitete, sind auch in diese Auflage übernommen worden, ferner Ausführungen von W. E. Nolle von der Erprobungsstelle 71 der Bundeswehr, Eckernförde, über Unterwasserdetonationen.

Für die Tabellen thermodynamischer Werte gilt als Standard-Temperatur $25\text{ °C} = 298,15\text{ K}$, für Kohle als Elementarmodifikation Graphit (nicht Diamant). Die Daten für die Bildungswärmen wurden aus der, von Dr. F. Volk und H. Bathelt am Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT) erstellten Datenbank übernommen.

Die Autoren haben allen Gönnern und Fachkollegen zu danken, welche diese und die vorangehenden Auflagen „Explosivstoffe“ zu erstellen halfen. Genannt seien Prof. Dr. E. Büchner (T.U. München), Dr. D. Eckhardt (BAM, Berlin), Dipl.-Ing. W. Franke (BAM, Berlin), Dipl.-Ing. H. Grosse† (WASAG Chemie), Dr. E. Häusler † (BICT), Dr. R. Hagel (DNAG, Fürth), Dr. H. Hornberg† (ICT), Dr. J. Knobloch (WNC-Nitrochemie), Prof. Dr. H. Köhler † (Austron), Dr. A. Kratsch (Rheinmetall Industrie GmbH), Prof. Dr.-Ing. K. Nixdorff (Universität der BW, Hamburg), Dipl.-Ing. J. Prinz (Sprengtechnischer Dienst, Dortmund), Dr. H. J. Rodner (BAM, Berlin), Dr. J. F. Roth † (DNAG, Troisdorf), Prof. Dr. H. Schubert (ICT), Prof. Dr. M. Steidinger (BAM, Berlin), Dipl.-Ing. G. Stockmann (WNC-Nitrochemie), Mr. R. Varosh (RISI, USA), Dr. F. E. Walker (Interplay, USA) und Dr. R. Zimmermann (BVS, Dortmund).

Viele ungenannt gebliebene mögen sich in gleicher Weise angesprochen fühlen!

Besonderer Dank gebührt den Herren RA G. Maibücher und Dr. Karl Meyer †, sowie der WILEY-VCH Verlag GmbH, insbesondere Frau Dr. Oberbeckmann-Winter und Frau Claudia Zschernitz für die hoch erfreuliche Zusammenarbeit bei der Herstellung und Drucklegung dieses Buches.

Auch weiterhin bleiben Verlag und Autoren gerne für Anregungen und Mitteilungen jeder Art offen. Wir hoffen, dass unser Buch auch in dieser Auflage ein nützliches und rasch informierendes Nachschlagewerk bleiben wird.

Schardenberg, Oktober 2007

Josef Köhler

Dr. Axel Homburg

Abbrandgeschwindigkeit

burning rate; vitesse de combustion

Die lineare Brenngeschwindigkeit eines Treibmittels ist die Geschwindigkeit, mit welcher die chemische Umsetzung infolge von Wärmeleitung und Strahlung (senkrecht zur aktuellen Oberfläche des Treibmittels) fortschreitet. Sie ist von der chemischen Zusammensetzung, dem Druck, der Temperatur und dem physikalischen Zustand des Treibmittels (Porosität; Korngrößenverteilung der Komponenten; Verdichtung) abhängig. Die entstehenden Schwaden strömen entgegengesetzt zur Abbrandrichtung (im Gegensatz hierzu: → Detonation).

Die Abbrandgeschwindigkeit bezeichnet die Geschwindigkeit, mit der sich das Volumen des brennenden Treibmittels ändert. Sie ist proportional zur linearen Brenngeschwindigkeit und hängt desweiteren von der speziellen Formgebung des Treibmittels (Größe der Pulverelemente und Gestalt, z. B. Blättchen, Kugeln, Röhren, Mehrlochröhren usw. bis zu den kompliziertesten Formen der Raketen-Treibsätzen) ab.

In der Raketentechnik bezeichnet „Abbrandgeschwindigkeit“ speziell den stationären Abbrandfortschritt in der Raketenkammer.

Zwischen der Abbrandgeschwindigkeit dz/dt und der linearen Brenngeschwindigkeit \dot{e} besteht der Zusammenhang:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{S(0)}{V(0)} \cdot \varrho(z) \cdot \dot{e}$$

wobei \dot{e} gegeben ist durch

$$\dot{e} = \dot{e}(p_{\text{ref}}) \cdot \left(\frac{p(z)}{p_{\text{ref}}} \right)^\alpha$$

z bezeichnet das Verhältnis von verbranntem zu ursprünglich vorhandenem Volumen $\{V(0)-V\}/V(0)$

$S(0)/V(0)$ bezeichnet das Verhältnis von anfänglicher Oberfläche zum anfänglichen Volumen des Pulvers,

$\varrho(z)$ bezeichnet die Formfunktion des Pulvers, die den geometrischen Verhältnissen (Kugel-, Blättchen-, Zylinder-, N-Lochpulver) beim Abbrand Rechnung trägt ($\varrho(z)$ = aktuelle Oberfläche/Anfangsoberfläche)

$\dot{e}(p_{\text{ref}})$ bedeutet die lineare Brenngeschwindigkeit bei dem Referenzgasdruck p_{ref}

p_{ref} ist der Referenzgasdruck und

α der Druckexponent.

Die Gleichung für die Abbrandgeschwindigkeit dz/dt lässt sich auch in der Form

$$\frac{dz}{dt} = A \cdot \varrho(z) \cdot p^\alpha$$

schreiben und wird dann als Charbonnier'sche Gleichung bezeichnet. Die Größe $A = (S(0)/V(0)) \cdot \rho(z) \cdot \dot{e}(p_{ref})/p_{ref}^\alpha$ heißt „Lebhaftigkeitsfaktor“.

Der Druckexponent α hat für Treibladungspulver (Abbrand bei hohem Druckniveau) typischerweise einen Wert nahe bei 1. Bei niedrigen Druckbereichen (Raketenabbrand) kann er durch geeignete Zusätze zum Treibmittel in die Nähe von Null („Plateau-Abbrand“) oder auch unter Null („Mesa-Abbrand“) gebracht werden.

Die lineare Brenngeschwindigkeit und der Druckexponent eines Treibmittels können bei bekannter Geometrie des Treibmittels in der → ballistischen Bombe experimentell bestimmt werden.

Näheres über theoretische und praktische Zusammenhänge: *Barrère, Jaumotte, Fraeijs de Veubeke, Vandenkerckhove*, „Raketenantriebe“; Elsevier Publishing Company, Amsterdam 1961. Seite 265 ff.; *Dadieu, Damm, Schmidt*, „Raketentreibstoffe“, Springer, Wien 1968.

Abel-Test

Nach diesem von *Abel* im Jahre 1875 vorgeschlagenen Test wird die Zeit beobachtet, innerhalb welcher die von 1 g Explosivstoff bei 82,2 °C entwickelten Gase ein mit Jodkalistärke lösung präpariertes und angefeuchtetes Filtrierpapier blau oder violett färben. Diese Färbung darf z. B. bei gewerblichen Nitroglycerinsprengstoffen erst nach 10 Minuten eintreten. Eine empfindlichere Ausführungsart benutzt Jodzinkstärkepapier.

Während der Abel-Test als Kontrolle bei der Herstellung von Nitrocellulose, Nitroglycerin und Nitroglykol auch heute noch Verwendung findet, wird er zur Stabilitätsprüfung von Treibstoffen kaum noch angewendet.

Abstand

Die Abstände der Gebäude, ihre Bauweise und die Höhe ihrer Belegung mit gefährlichen Stoffen dienen zur Sicherheit in den Sprengstoff herstellenden und verarbeitenden Betrieben und für die Läger der Sprengstoffverbraucher. Sie sind daher behördlich reglementiert durch das Sprengstoffgesetz*), durch die Sprengstofflagerverordnungen der Länder und innerbetrieblich durch die Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit (VGB)**). Die BGV B5 definiert:

*) *Apel-Keusgen*, Sprengstoffgesetz, Carl Heymanns Verlag, Köln

**) Zitate der UVVen siehe → Literaturverzeichnis, S. 390

Abstand (Sicherheitsabstand) der Gebäude untereinander ist die kürzeste Entfernung der einander zugekehrten Begrenzungen (Außenwände). Kleine Anbauten, die nicht dem dauernden Aufenthalt von Personen dienen und die keine Explosivstoffe oder Gegenstände mit Explosivstoff enthalten, bleiben außer Ansatz.

Als Abstand von gefährlichen Plätzen gilt die kürzeste Entfernung der einander zugekehrten Begrenzungen der Explosivstoffe oder Gegenstände mit Explosivstoff.

→ auch: Lagerung von Explosivstoffen

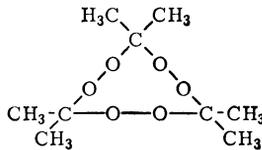
Abstichladungen

– „jet-tapper“ – dienen zum Öffnen von Siemens-Martin-Öfen. Es handelt sich um Hohlladungen, die gegen die Hitze mit Keramikumkleidungen abgeschirmt sind. Durch ihre Sprengung wird der Abstichkanal geschaffen. Andere lanzenförmige Ladungen, die ebenfalls thermisch gut isoliert sind, dienen zum Zerlegen von Hochofensauen; man nennt sie „Ladungen zum Sprengen heißer Massen“.

Acetonperoxid

Tricycloacetonperoxid

tricycloacetonperoxide; peroxyde de tricycloacétone;



Bruttoformel: C₉H₁₈O₆

Mol.-Gew.: 222,1

Sauerstoffwert: –151,3%

Fp: 91 °C

Bleiblockausbauchung: 250 cm³/10 g

Schlagempfindlichkeit: 0,03 kp m = 0,3 Nm

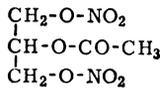
Reibempfindlichkeit: bei 0,01 kp = 0,1 N Stiftbelastung

Explosion

bildet sich aus Aceton in schwefelsaurer Lösung durch Einwirkung von 35–45%igen Wasserstoffperoxid. Es hat Initialsprengstoff-Eigenschaften, fand jedoch wegen seiner Neigung zum Sublimieren keinen Eingang in die Praxis.

Acetyldinitrolycerin

Dinitroacetin; Glycerin-acetat-dinitrat



bläßgelbes Öl

Bruttoformel: $\text{C}_9\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_8$

Mol.-Gew.: 224,1

Sauerstoffwert: – 42,86 %

Stickstoffgehalt: 12,50 %

Dichte: 1,412 g/cm³ (15/4)

Kp. (15 mm): 147 °C

Bleiblockausbauchung: 200 cm³/10 g

Verpuffungspunkt: 170–180 °C

Die Verbindung ist unlöslich in Wasser, leicht löslich in Alkohol, Ether, Aceton, konz. HNO_3 .

Man erhält Acetyldinitrolycerin durch Nitrierung des Acetylglycerins (Acetins) mit Milchsäure, die sehr viel Salpetersäure enthält.

Acetyldinitrolycerin wurde vorgeschlagen als Zusatz zu Nitrolycerin, um dessen leichte Gefrierbarkeit herabzusetzen. Es wurde in der Praxis nicht eingesetzt.

Acremite

→ Akremit

ADR

bedeutet „Accord Européen relatif au Transport International des Marchandises Dangereuses par Route“ und betrifft Transport- und Verpackungsvorschriften für den Verkehr mit gefährlichen Stoffen und Gegenständen über die Straße.

→ Gefahrgutverordnung Straße und Eisenbahn – GGVSE.

In der GGVSE ist für die dort geregelten Beförderungen die Gültigkeit der Anlagen A und B zum ADR ausdrücklich genannt. In Anlehnung an das ADR und an das Sprengstoffgesetz wurde 1975 für den innerdeutschen Verkehr das Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter*) (Gefahrgutbeförderungsgesetz – GGBefG) erlassen.

*) Text und Kommentar: *Apel-Keusgen*, Sprengstoffgesetz, Carl Heymanns Verlag, Köln

Aerozin

ist ein Brennstoff für Flüssig-Raketen-Antriebe, bestehend aus 50 % Hydrazin, wasserfrei, und 50 % unsymm. Dimethylhydrazin.

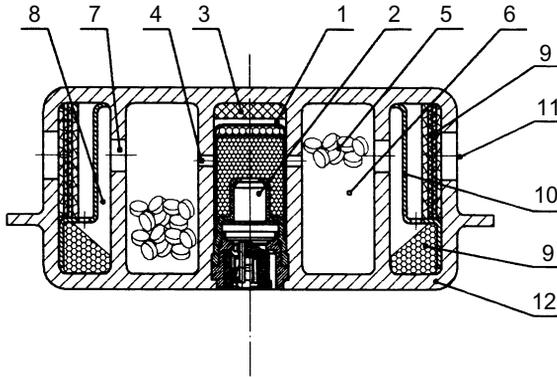
AGARD

Abkürzung für Advisory Group for Aeronautical Research and Development bei der NATO.

Airbag

Die Grundidee des Airbag als passives Rückhaltesystem im Kraftfahrzeug wurde bereits 1951 in Deutschland erstmalig patentiert. Erst Ende der 60er Jahre aber wurde mit der Entwicklung der zwei Grundtypen begonnen, die bis heute (nahezu) ausschließlich in Serie hergestellt und mit 1975 beginnend und ab 1990 fast immer regelmäßiger in Autos eingebaut werden.

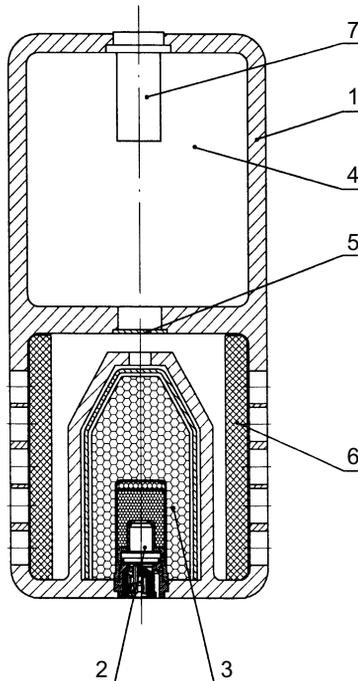
Im ersten Fall wird der Gassack (Airbag) im Heißgas aufgeblasen, im anderen Fall erfolgt die Füllung des Gassackes mittels eines sogenannten hybriden Gasgenerators, bei dem das Gas ständig in einem Druckbehälter vorgelegt ist und nach der pyrotechnischen Zündung ausströmen kann. Da dieses Gas nicht pyrotechnisch erzeugt werden muß, kommt es als Kaltgas zur Wirkung (dieses Gas wird sogar, um beim Expandieren nicht zu stark abzukühlen, meistens pyrotechnisch nachgeheizt). Beide Grundtypen der Gasgeneration für Airbag, der pyrotechnische wie auch der Hybrid-Gasgenerator, werden für Fahrer, Beifahrer und Seitenairbags eingesetzt und besitzen folgenden schematischen Aufbau:



- | | |
|--------------------|---------------------------|
| 1. Anzündkammer | 7. Düsenbohrungen |
| 2. Anzüeinheit | 8. Filterkammer |
| 3. Frühzündeinheit | 9. Filter |
| 4. Düsenbohrungen | 10. Umlenblech |
| 5. Gassatz | 11. Filterkammeröffnungen |
| 6. Brennkammer | 12. Gasgeneratorgehäuse |

AIRBAG

Pyrotechnischer Gasgenerator (Schnittbild)



- | |
|-------------------------------|
| 1. Hybrid-Gasgeneratorgehäuse |
| 2. Anzünder |
| 3. Pyrotechnischer Satz |
| 4. Hochdruckbehälter |
| 5. Dichtscheibe |
| 6. Filterpack |
| 7. Druckmeßvorrichtung |

AIRBAG

Hybrid-Gasgenerator (Schnittbild)

Aus thematischen Gründen werden die *hybriden* Gasgeneratoren nur kurz vorgestellt. Beim Hybridsystem lagern die vorgespannten Gase (Luft, Stickstoff, Argon) in Hochdruckbehältern, die mit einer Platzmembrane versehen sind. Durch pyrotechnisch hervorgerufenes Öffnen dieser Membrane kann das Gas in den Luftsack ausströmen. Ebenso pyrotechnisch wird die Abkühlung des expandierenden Arbeitsgases aus- oder sogar überkompensiert. Da die Gesamtmenge des pyrotechnischen Satzes mengenmäßig gering ist, sind die vorgeschriebenen Grenzwerte der im Arbeitsgas enthaltenen toxischen Verunreinigungen relativ leicht einzuhalten.

Dieses ist, neben der idealen Temperatur des Arbeitsgases, der Hauptvorteil der hybriden Gasgeneratoren. Der Nachteil dieser Version ist das hohe Gewicht der Gasflasche, die der Druckbehälterverordnung unterliegt, und der hohe Geräuschpegel, der beim Öffnen der Dichtscheibe entsteht, da anfangs der volle Gasdruck ansteht.

Die Eigenart von nahezu allen *pyrotechnischen* Gasgeneratoren (speziell auf der Fahrerseite) ist ein konzentrischer Aufbau von drei verschiedenen Kammern, die je nach ihren Druckverhältnissen und Funktionen unterschiedlich ausgelegt sind. Die innerste Kammer mit der höchsten Druckfestigkeit enthält die Anzündeinheit, bestehend aus Stecker, elektr. Zündpille und dem Anzündsatz. Je nach Generatoraufbau kann auch eine Frühzündeinheit mit der Aufgabe installiert sein, im Fall von äußerer, starker Hitzeeinwirkung – etwa bei einem Brand – stromlos den Gassatz anzuzünden. Bei normaler, elektrischer Zündung wird der dünne Widerstandsdraht der Zündpille zum Schmelzen gebracht und die Zündkette gestartet. Beim Abbrennen des Anzündsatzes – meistens ein Bor/Kaliumnitrat-Gemisch – strömen die entstandenen heißen Gase und Partikel durch die peripheren Bohrungen in die mit dem Gassatz angefüllte Brennkammer, welche konzentrisch um die Anzündkammer angeordnet und auf einen Arbeitsdruck von 100–180 bar ausgelegt ist. Der Gassatz besteht aus gepreßten Tabletten, die nach ihrer Entzündung zu Arbeitsgas und Schlackestoffen verbrennen. Die Verbrennungsprodukte verlassen die Brennkammer durch die Düsenbohrungen. Um die Brennkammer angeordnet ist der Niederdruckbereich der Filterkammer. Die Filterkammer ist mit verschiedenen Stahlfiltern und Umlenklechen ausgestattet. In der Filterkammer werden die heißen Gase abgekühlt und von den flüssig/festen Schlackestoffen befreit. Das entstandene Arbeitsgas durchströmt die Filterkammeröffnungen in Richtung Gassack. Die flüssigen Schlackestoffe müssen in der Filterkammer bis zu ihrer Erstarrung abgekühlt werden, so daß auch sie dort ausfiltriert werden können. Es ist klar, daß die Beschaffenheit des Gassatzes – früher Treibstoff bzw. Treibsatz genannt – hinsichtlich der Lieferung der Gasschwaden beim Abbrand von eminenter Bedeutung ist. Grundaufgabe eines Gasgenerators ist, im Bedarfsfall binnen ca.

40 ms soviel nichttoxisches Gas zu liefern, daß der Luftsack auf Solldruck aufgeblasen wird. Von Mitte der 70er bis Mitte der 90er Jahre basierte die große Mehrzahl von Gassätzen in pyrotechnischen Generatoren auf \rightarrow Natriumazid. Natriumazid reagiert mit Oxidatoren, die, unter der Freisetzung von Stickstoff, daß entstehende Natrium chemisch binden. Als Oxidatoren setzten sich Alkali- und Erdalkalinitrate, Metalloxyde (z.B. CuO , Fe_2O_3), Metallsulfide (z.B. MoS_2) und Schwefel durch. Bei Bedarf wurden noch Schlackebildner (z.B. SiO_2 , Alumosilikate) zugesetzt.

Fortschreitendes Umweltbewußtsein bewirkt, daß die azidhaltigen Gassatzmischungen wegen ihrer Toxizität des Natriumazids ersetzt werden sollen, und dies trotz niedriger Reaktionstemperatur, reiner Stickstoffausbeute und großer Langzeitstabilität. Gegen Natriumazid spricht jedoch, daß eine weltweite korrekte Entsorgung unbenützter Gassätze, die jährlich im Tausendtonnenmaßstab anfallen, bis jetzt nicht sichergestellt ist.

Bezüglich azidfreier Gassätze gibt es eine Vielzahl von Patenten und erste Anwendungen seit Anfang der 90er Jahre. Diese neuen Gassätze erzeugen mehr Gas pro Gramm (Gasausbeute von NaN_3 -haltigen Gassätzen: 0,30–0,35 l/g) und erlauben so eine kleinere und z. T. leichtere Bauweise der Gasgeneratoren. Sie können in drei Kategorien eingeteilt werden:

- Stickstoffreiche organische Verbindungen (C, H, O, N) werden mit anorganischen Oxidatoren kombiniert:

Als Brennstoff dienen z.B. 5-Aminotetrazol, Azodicarbonamid, \rightarrow Guanidinnitrat, \rightarrow Nitroguanidin, Dicyandiamid, \rightarrow Triaminoguanidinnitrat und ähnliche Verbindungen, aber auch Salze von z.B. 5-Nitrobarbitursäure, Harnstoffderivaten, sowie \rightarrow Nitramine und ähnliche Verbindungen.

Oxidatoren sind z.B. Alkali- oder Erdalkali-Nitrate, \rightarrow Ammonium-, Alkali- oder Erdalkali-Perchlorate, Metalloxyde.

Gasausbeute dieser Sätze: 0,50–0,65 l/g.

- \rightarrow Cellulosenitrate in Kombination (Gelbildung) mit Salpetersäureestern von Polyolen (plus \rightarrow Stabilisatoren und Weichmachern), z.B. NC/NGL (\rightarrow Nitroglycerin) oder NC/EDDN (\rightarrow Ethylendiamidinnitrat).

Aufgrund der ungünstigen Sauerstoffbilanz muß zur Vermeidung von zuviel CO-Bildung nachoxidiert werden (z.B. mit Hopcalit). Trotz günstiger Rohstoffkosten muß hier die ungünstige Langzeitstabilität, s.u. beachtet werden.

Gasausbeute des Satzes: 0,8–0,9 l/g (ohne Einbeziehung der Nachoxidation).

- Sauerstoffreiche, stickstofffreie organische Verbindungen (C, H, O) werden mit anorganischen Oxidatoren abgemischt. Als Brennstoff dienen z.B. Tri- oder Dicarbonsäuren (z.B. Zitronensäure, Wein-

säure, Fumarsäure) oder ähnliche Verbindungen. Für die Oxidation finden speziell Perchlorate und Chlorate unter zusätzlicher Zuhilfenahme von Metalloxiden Verwendung. Auf diese Weise kann jegliche NO_x -Bildung ausgeschlossen werden.

Gasausbeute des Satzes: 0,5 – 0,6 l/g

Die Herstellung der Gassätze erfolgt gewöhnlich durch Mahlen und Vermischen der Rohstoffe, die nach einem Vorkompaktierungsschritt auf (Rundläufer-)Pressen zu Pellets oder Scheiben verpreßt und anschließend ausgewogen werden. Die \rightarrow nitrocellulosehaltigen Gassätze erfahren ihre Formgebung nach dem Gelatinieren in der üblichen Weise.

Daß der Übergang von azidhaltigen zu azidfreien Gassätzen nicht einfach ist, ist auf folgende Probleme zurückzuführen:

- Die wesentlich höheren Verbrennungstemperaturen stellen sowohl an das Gasgeneratorgehäuse, als auch den Luftsack höhere Ansprüche.
- Die Abkühlungskurve der Verbrennungsgase ist steiler und muß berücksichtigt werden.
- Die Kondensation/Filterung der flüssigen/festen Schlackeanteile ist temperaturbedingt schwieriger (Feinstaubproblematik).
- Nitrocellulosehaltige Gassätze können beim Langzeit-Temperaturtest (400 Stunden bei 107 °C; Gewichtsverlust-Soll: < 3%), sowie bei Wechseltemperaturlagerung (\rightarrow Ausschwitzen) Schwierigkeiten machen.
- Die Langzeitstabilität der diversen azidfreien Gassätze ist noch nicht hinlänglich bekannt.
- Beim Verbrennen organischer Substanzen besteht die Neigung, trotz ausgeglichener Sauerstoffbilanz toxische Gase als Nebenprodukte entstehen zu lassen, die aber wie folgt limitiert sind:

Effluent Gas Limits

Time weighted Average

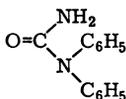
Effluent Gas	Vehicle Level Limit	Driverside Limit
Chlorine (Cl_2)	5 ppm	1,7 ppm
Carbon Monoxide (CO)	600 ppm	200 ppm
Carbon Dioxide (CO_2)	20,000 ppm	6,700 ppm
Phosgene (CoCl_2)	1 ppm	0,33 ppm
Nitric Oxide (NO)	50 ppm	16,7 ppm
Nitrogen Dioxide (NO_2)	20 ppm	60,7 ppm
Ammonia (NH_3)	150 ppm	50 ppm
Hydrogen Chloride (HCl)	25 ppm	8,3 ppm
Sulfur Dioxide (SO_2)	50 ppm	16,7 ppm
Hydrogen Sulfide (H_2S)	50 ppm	16,7 ppm
Benzene (C_6H_6)	250 ppm	83,3 ppm
Hydrogen Cyanide (HCN)	25 ppm	8,3 ppm
Formaldehyde (HCHO)	10 ppm	3,3 ppm

Ein genereller Trend zu einem bestimmten Brennstoff ist bei den azidfreien Gassätzen z. Z. nicht zu erkennen, da die Größe des Marktes ein großes Variantenangebot mit unterschiedlichen Anforderungen nach sich zieht.

So werden z. B. Flüssiggasgeneratoren beschrieben, bei denen kohlenstofffreie Verbindungen zum Einsatz gebracht werden, die sich zudem schlackefrei in Arbeitsgase umsetzen lassen, wie z. B. Systeme aus Hydrazin/Hydrazinnitrat.

Akardit I

diphenylurea; diphénylurée; Diphenylharnstoff



Bruttoformel: $C_{13}H_{12}N_2O$

Mol.-Gew.: 212,2

Bildungsenergie: $-117,3 \text{ kcal/kg} = -491,0 \text{ kJ/kg}$

Bildungsenthalpie: $-138,2 \text{ kcal/kg} = -578,6 \text{ kJ/kg}$

Sauerstoffwert: $-233,7\%$

Stickstoffgehalt: $13,21\%$

Akardit I dient als → Stabilisator für Schießpulver, besonders für Nitroglycerin-Pulver; es geht als Gelatinator in das Pulvergel ein.

Technische Reinheitsforderungen

Schmelzpunkt:

nicht unter 183 °C

Feuchtigkeit: nicht über 0,2 %

Aschegehalt: nicht über 0,1 %

Chloride als NaCl:

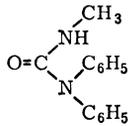
nicht über 0,02 %

Säure, als Verbrauch von

n/10 NaOH/100 g: nicht über 2,0 cm³

Akardit II

*methyl*diphenylurea; *N-méthyl-N'N'-diphénylurée*;
*Methyl*diphenylharnstoff



Bruttoformel: $C_{14}H_{14}N_2O$

Mol.-Gew.: 226,3

Bildungsenergie: $-90,5 \text{ kcal/kg} = -378,7 \text{ kJ/kg}$

Bildungsenthalpie: $-112,7 \text{ kcal/kg} = -471,8 \text{ kJ/kg}$

Sauerstoffwert: $-240,4 \%$

Stickstoffgehalt: $12,38 \%$

Akardit II ist ein besonders wirksamer → Stabilisator für mehrbasige, lösemittelfreie Schießpulver. Sein Stabilisierungsvermögen beträgt ca. das 3fache des sonst hierfür hauptsächlich verwendeten Centralit I.

Technische Reinheitsforderungen

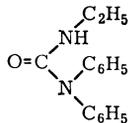
wie für Akardit I, jedoch

Schmelzpunkt:

nicht unter $170 \text{ }^\circ\text{C}$

Akardit III

*ethyl*diphenylurea; *N-éthyl-N'N'-diphénylurée*;
*Ethyl*diphenylharnstoff



Bruttoformel: $C_{15}H_{16}N_2O$

Mol.-Gew.: 240,3

Bildungsenergie: $-128,5 \text{ kcal/kg} = -537,9 \text{ kJ/kg}$

Bildungsenthalpie: $-151,9 \text{ kcal/kg} = -635,9 \text{ kJ/kg}$

Sauerstoffwert: $-264,4 \%$

Stickstoffgehalt: $11,65 \%$

Akardit III wird als → Stabilisator und als Gelatinator in mehrbasigen, lösemittelfreien Schießpulvern verwendet.

Technische Reinheitsforderungen

wie für Akardit I, jedoch

Schmelzpunkt:

nicht unter $69 \text{ }^\circ\text{C}$

Akremit

Acremite

ist eine ältere amerikanische Bezeichnung für → ANC-Sprengstoffe, in neuerer Zeit werden sie mit ANFO bezeichnet.

Aktive Binder

→ energetische Binder

Alginat

Salze der Alginsäure, die die Fähigkeit besitzen, das 200- bis 300fache ihres Gewichtes an Wasser zu binden. Man setzt sie Sprengstoffmischungen als Quellmittel oder Gelbildner zu, um deren Wasserfestigkeit, und zu Sprengschlämmen (→ „Slurries“), um die Viskosität zu erhöhen.

Aluminium-Pulver

wird vielfach Sprengstoffen und Treibmitteln zugesetzt, um deren schiebende Wirkung zu verbessern. Durch die außerordentlich hohe Bildungswärme von Aluminiumoxid kann man durch diese Beimischung einen erheblichen Zuwachs an Kalorien erreichen und den Schwaden eine höhere Temperatur erteilen. Die Bildungswärme von Al_2O_3 beträgt 396 kcal/Mol bzw. 3884 kcal/kg = 16260 kJ/kg. Es ist denkbar, daß das Aluminium in der Primärdetonation nicht vollständig umgesetzt wird, sondern erst im Schwadenbereich restlos reagiert. Man erklärt so die besonders nachhaltig schiebende Wirkung („Nachheizung“). Wird das Sprengstoffgemisch mit Aluminium überlastet, erreicht man eine typische Gasschlagwirkung, da die Sprenggase bei weiterer Untermischung mit Luftsauerstoff einer Nachexplosion fähig sind. → Unterwasserdetonationen.

Bekannte Mischungen von Sprengstoffen mit Aluminiumpulver sind Ammonale, DBX, HBX-1, Hexal, Minex, Minol, Torpex, Trialen 105, Tritonal und Schießwolle 18, Hexotonal.

Auch bei Raketentreibmitteln (Composite Propellants) haben sich gewisse Zusätze von Aluminium als besonders wirkungssteigernd erwiesen. Andere Metallpulver sind für den gleichen Zweck in Erwägung zu ziehen, wie Zinkpulver, Magnesiumpulver, Calciumsilicid u. a.

Die bekannte Wirkungssteigerung durch Aluminiumpulver wird vielfach in den → Sprengschlämmen („Slurries“) angewendet.

Amatex

ist ein gießbares Gemisch aus Trinitrotoluol, Ammonsalpeter und Hexogen.

Amatole

sind gießbare Gemische aus Ammonsalpeter und Trinitrotoluol, die in weitem Rahmen in der Zusammensetzung variierbar sind (40/60, 50/50, 80/20). Das Gemisch 80/20 läßt sich durch Schneckenpressen verfüllen.

Ammonale

sind preßbare bzw. gießbare Gemische, welche Ammonsalpeter und Aluminiumpulver enthalten. Aus den USA ist eine gießbare Mischung von 67 % TNT, 22 % NH_4NO_3 und 11 % Al-Pulver bekannt, während in Deutschland im ersten Weltkrieg gepreßte Ladungen (30/54/16) eingesetzt wurden.

Im einfachsten Falle sind Ammonale pulverförmige (nicht gepreßte) Gemische aus Ammonsalpeter und Aluminium, wobei etwa 4 % Aluminiumzusatz zum Erzielen der Detonierbarkeit schon ausreichen, das Leistungsmaximum aber etwa bei 17 % Aluminium erreicht wird.

Ammongelite 2 und 3*)

Sprengtechnische Daten	Ammongelit	
	2	3
Beschaffenheit	gelatinös, rot	gelatinös rot
Sauerstoffwert	+1,3	+3,62 %
Normalgasvolumen	864	807 l/kg
Explosionswärme (H ₂ O gas)	4748	4375 kJ/kg
Spezif. Energie	1128	1000 kJ/l
Energiedichte	1648	1500 kJ/l
Dichte	1,44	1,50 g/cm ³
Bleiblockausbauchung	390	370 cm ³
relative weight strength	88	84 %
Detonationsgeschwindigkeit freiliegend	2300	2300 m/s
Detonationsgeschwindigkeit unter Einschuß	5800	5400 m/s
Stauchung nach Kast	5,0	4,6 mm
Stauchung nach Heiß	19	18,5 mm
Schlagempfindlichkeit	4	5 Nm

Die Ammon-Gelite sind handhabungssichere, gelatinöse Ammonsalpeter-Sprengstoffe mit abgestuftem Gehalt an gelatinisiertem Nitroglykol.

In ihrer Arbeitsleistung sind sie der des Dynamits nahezu gleichwertig. Sie eignen sich zum Sprengen von zähen und harten Gesteinen und Erzen. Die gute Wasserbeständigkeit ermöglicht ihren Einsatz auch bei nassen Bohrlöchern. Sie sind praktisch nicht gefrierbar; allerdings ist bei Temperaturen unter 0 °C eine kräftige Initiierung mittels → Sprengschnur mit einem Füllgewicht von mindestens 40 g/m vorgeschrieben.

Ammonite

ammonia dynamites; explosifs nitratés

„Ammonit“ bezeichnet Ammonsalpeter-basierte pulverförmige Gesteinsprengstoffe *ohne* Nitroglycerin bzw. Nitroglykol, jedoch *mit* explosionsfähigen aromatischen Nitroverbindungen, im wesentlichen Nitrotoluolen. Sie werden neuerdings gemäß den Durchführungsverordnungen zum Sprengstoffgesetz von 1969 als „PA-Sprengstoffe“ bezeichnet.

*) Die Fertigung von Ammongelit 1 wurde eingestellt.

Ammonit 3

Sprengtechnische Daten

Beschaffenheit	pulvrig grau
Sauerstoffwert	+1,15 %
Normalgasvolumen	855 l/kg
Explosionswärme (H ₂ O gas)	4702 kJ/kg
Spezifische Energie	1089 kJ/kg
Energiedichte	1039 kJ/l
Dichte	1,0 g/cm ³
Bleiblockausbauchung	405 cm ³ /10 g
relative weight strength	88 %
Detonationsgeschwindigkeit freiliegend	3300 m/s
Detonationsgeschwindigkeit unter Einschluß	4400 m/s
Stauchung nach <i>Kast</i>	4,3 mm
Stauchung nach <i>Heß</i>	19 mm
Schlagempfindlichkeit	12 Nm

Ammonit 3 ist ein aluminiumhaltiger Ammonsalpeter-Sprengstoff hoher Arbeitsleistung. Er kommt hauptsächlich als sogenannter „Lawinensprengstoff“ zum Einsatz und wird zu diesem Zweck in großkalibrigen Patronen mit zweifacher Kunststoffumhüllung (doppelt eingeschlaucht) geliefert.

Ammoniumazid

ammonium azide; azoture d'ammonium; stickstoffwasserstoffsäures Ammonium



wasserhelle Kristalle

Bruttoformel: N₄H₄

Mol.-Gew.: 60,1

Bildungsenergie: 1587,2 kJ/kg

Bildungsenthalpie: 1422,1 kJ/kg

Sauerstoffwert: -53,3 %

Stickstoffgehalt: 93,23 %

Dissoziationsdruck:

Millibar	Temperatur °C
1,3	29,2
7	49,4
13	59,2
27	69,4
54	80,1
80	86,7
135	95,2
260	107,7
530	120,4
1010	138,8

Die Darstellung von Ammoniumazid erfolgt durch die Umsetzung einer Lösung von Ammoniumchlorid und Natriumazid in Dimethylformamid bei 100 °C und anschließendem Abdestillieren des Lösungsmittels im Vakuum.

Wegen ihres hohen Dissoziationsdruckes hat die Verbindung noch keine praktische Bedeutung erlangt.

Ammoniumchlorid

ammonium chloride; chlorure d'ammonium



farblose Kristalle

Molekulargewicht: 53,49

Bildungsenergie: $-1368 \text{ kcal/kg} = -5724 \text{ kJ/kg}$

Bildungsenthalpie: $-1401 \text{ kcal/kg} = -5862 \text{ kJ/kg}$

Sauerstoffwert: $-44,9 \%$

Stickstoffgehalt: $26,19 \%$

Sublimationspunkt: 335 °C

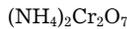
Ammoniumchlorid dient zusammen mit Alkalinitraten als Reaktionspartner in den sog. Salzpaar-Wettersprengstoffen (→ Wettersprengstoffe).

Technische Reinheitsforderungen

Reingehalt: mindestens	99,5%
Feuchtigkeit: nicht über	0,04%
Glührückstand: nicht über	0,5%
Ca; Fe; SO ₄ ; NO ₃ : nicht über	Spuren
pH-Wert:	4,6–4,9

Ammoniumdichromat

ammonium dichromate; dichromate d'ammonium



orangerote Kristalle

Mol.-Gew.: 252,1

Bildungsenergie: $-1693 \text{ kcal/kg} = -7084 \text{ kJ/kg}$

Bildungsenthalpie: $-1713 \text{ kcal/kg} = -7167 \text{ kJ/kg}$

Sauerstoffwert: $\pm 0 \%$

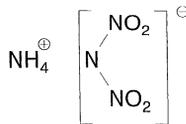
Dichte: $2,15 \text{ g/cm}^3$

Stickstoffgehalt: 11,11 %

zersetzt sich beim Erwärmen, ist jedoch kein Sprengstoff. Es findet in pyrotechnischen Sätzen Verwendung und gilt als wirksamer Zusatz bei Treibmitteln auf Ammoniumnitrat-Basis, um die Zerfallreaktion zu katalysieren.

Ammoniumdinitramid

ammonium dinitramide; ADN



Bruttoformel: $\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_4$

Mol.-Gew.: 124,06

Bildungsenergie: $-259,96 \text{ kcal/kg} = -1086,6 \text{ kJ/kg}$

Bildungsenthalpie: $-288,58 \text{ kcal/kg} = -1207,4 \text{ kJ/kg}$

Sauerstoffwert: +25,8 %

Stickstoffgehalt: 45,1 %

Normalgasvolumen: 1084 l/kg

Explosionswärme

(H_2O fl.): $798 \text{ kcal/kg} = 3337 \text{ kJ/kg}$

(H_2O gas): $638 \text{ kcal/kg} = 2668 \text{ kJ/kg}$

Spezif. Energie: $85,9 \text{ mt/kg} = 843 \text{ kJ/kg}$

Dichte: $1,812 \text{ g/cm}^3$ bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$

F.: $92,9 \text{ }^\circ\text{C}$ (Zersetzung ab $135 \text{ }^\circ\text{C}$)

Schlagempfindlichkeit: $0,4 \text{ kp m} = 4 \text{ Nm}$

Reibempfindlichkeit: $6,5 \text{ kp} = 64 \text{ N}$

Man gewinnt Ammoniumdinitramid durch Ammonolyse von Dinitroaminen, welche durch stufenweise Nitrierung von Urethanen, β,β -Iminodipropionitril oder Nitramid entstehen. Die jeweils letzte Nitrierstufe erfordert stärkste Nitrierreagenzien wie Nitroniumtetrafluoroborat oder

Distickstoffpentoxid. Ein anderes Verfahren führt über die direkte Nitrierung von Ammoniak mit Distickstoffpentoxid zu einem Produktgemisch von ADN und → Ammonsalpeter. ADN erscheint aufgrund seiner guten → Sauerstoffbilanz und hohen → Bildungsenthalpie als halogenfreies Oxidationsmittel für Raketenfesttreibstoffe interessant und ist derzeit Gegenstand intensiver Untersuchungen.

Ammoniumperchlorat

ammonium perchlorate; perchlorate d'ammonium; APC



farblose Kristalle

Mol.-Gew.: 117,5

Bildungsenergie: $-576,5 \text{ kcal/kg} = -2414 \text{ kJ/kg}$

Bildungsenthalpie: $-602,0 \text{ kcal/kg} = -2518 \text{ kJ/kg}$

Sauerstoffwert: +34,04 %

Dichte: $1,95 \text{ g/cm}^3$

F.: Zersetzung beim Erhitzen

Bleiblockausbauchung: 195 cm^3

Normalgasvolumen: 803 l/kg

Explosionswärme ($\text{H}_2\text{O fl.}$): $471 \text{ kcal/kg} = 1972 \text{ kJ/kg}$

Spezif. Energie: $52,4 \text{ mt/kg} = 532 \text{ kJ/kg}$

Verpuffungspunkt: $350 \text{ }^\circ\text{C}$

Schlagempfindlichkeit: $1,5 \text{ kpm} = 15 \text{ Nm}$

Man gewinnt Ammoniumperchlorat durch Neutralisieren von Ammoniak mit Überchlorsäure. Durch Kristallisation wird es gereinigt.

Ammoniumperchlorat dient als wichtigster Sauerstoffträger für Raketenfesttreibstoffe („composite propellants“).