

Ein Feuerwerk der Effekte

Ein Feuerwerk ist eine Gratwanderung zwischen Schönheit und Gefahr. Daher erfordert die Pyrotechnik ein fundiertes Wissen chemischer aber auch physikalischer Gesetzmäßigkeiten: Professionelle Feuerwerker überlassen nur wenig dem Zufall.

In der Vergangenheit vertrieb man die bösen Geister zum Jahreswechsel noch mit Rasseln, Kirchengeläut, Pauken und Trompeten. Erst mit



Professionelles Feuerwerk wartet mit einer Fülle von Leucht- und Farbeffekten auf. (Foto: Digital Vision).

der Verbreitung des Schwarzpulvers kam das Schießen mit Böllern und Gewehren in Mode. Schwarzpulver besteht aus dem Sauerstofflieferanten Kaliumnitrat und den Brennstoffen Holzkohle und Schwefel. Letzterer dient auch als Sensibilisierer, damit sich das Schwarzpulver schon mit wenigen Funken entzünden lässt. Im Gegensatz zu anderen Sprengstoffen, wie z. B. Trinitrotoluol (TNT), verbrennt Schwarzpulver unter Bildung von großen Gasmen gen relativ langsam und überschreitet dabei nicht seine innerstoffliche Schallgeschwindigkeit. Aus diesem Grund spricht man auch nicht von einer Detonation, bei der die chemische Reaktion des Sprengstoffes mit einer Stoßwelle gekoppelt ist, sondern von einer Deflagration¹⁾. Die Deflagrationsgeschwindigkeit von Schwarzpulver liegt bei 400 Meter pro Sekunde und ist damit um über 16-mal geringer als die Detona-

tionsgeschwindigkeit von TNT. Bei den hohen Detonationsgeschwindigkeiten von TNT durchläuft eine sehr schmale Reaktionszone den Sprengstoff mit einer Geschwindigkeit, die größer ist als die Schallgeschwindigkeit des noch nicht zersetzten Sprengstoffes. Der Druck baut sich schlagartig auf und die Energie wird in kürzester Zeit freigesetzt: Die Reaktionsfront bildet eine Stoßwelle. Bei der für das Schwarzpulver typischen Deflagration dagegen wird der Explosionsdruck nur durch die bei der Reaktion entstehenden Gase hervorgerufen und der Abbrand der Pulvermischung findet kontrolliert durch die bei der Reaktion freiwerdende Wärme statt. Schwarzpulver hat also weniger eine zertrümmernde als eine antreibende Wirkung und wird deshalb heutzutage vor allem für Feuerwerkskörper verwendet, wo es als Treib- und Zerlegerladung dient.

Zu den bekanntesten Feuerwerkskörpern gehört sicher die Rakete. Diese trägt den pyrotechnischen Satz, der aus Treib- und Effektladung besteht. Für den Aufstieg sorgt die verdichtete, in den meisten Fällen aus Schwarzpulver und anderen Zusatzstoffen bestehende Treibladung, die unter hohem Druck in eine Hülse gepresst und mit Hilfe einer Zündschnur gezündet wird. Eine Düse aus nicht brennbarem Material (z. B. Aluminium, Ton oder Graphit) wird vor der Treibladung in Ausströmrichtung angeordnet und erhöht den Schub: Die Verengung bündelt die entstehenden Verbrennungsgase der eingeschlossenen Ladung und erhöht damit den Hül seninnendruck und die Geschwindigkeit der ausströmenden Gase.

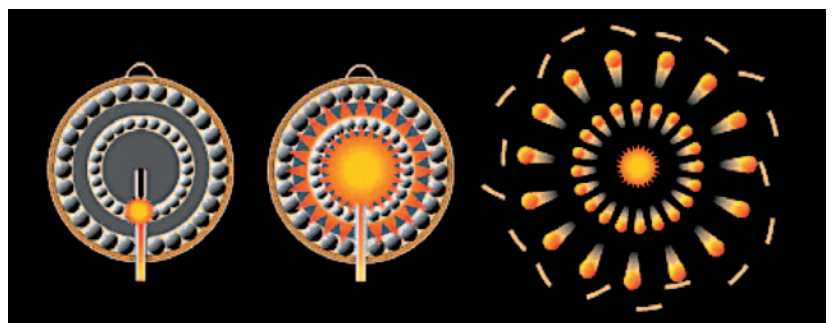
Es zischt und pfeift

Soll die Rakete mit einem hohen Pfeifton in den Himmel zischen, wird die Treibladung aus Schwarzpulver durch einen so genannten

Pfeifsatz ersetzt, der aus einer Perchloratmischung besteht. Diese Mischung wird in eine einseitig verschlossene Hülse gepresst, allerdings verzichten die Feuerwerker in diesem Fall auf die schuberhöhende Düse: Die Geschwindigkeit der ausströmenden Gase reicht aus, um die pfeifende Rakete in den Himmel zu transportieren. Auch wenn das Abbrandverhalten des Pfeifsatzes einem Beobachter kontinuierlich erscheint, so besteht der Abbrand in Wirklichkeit aus einigen Tausend Miniexplosionen pro Sekunde. Durch die Zündung des Pfeifsatzes findet eine erste Explosion statt, welche die unterhalb liegende Luftsäule in Schwingung versetzt. Durch die entweichenden Gase entsteht in der Hülse ein Unterdruck, es strömt Luft ein und der Pfeifsatz verbrennt stoßweise in dünnen Schichten. Da das menschliche Ohr bei etwa 4000 Hz am empfindlichsten ist, nehmen wir diese enorm große Anzahl von Miniexplosionen bzw. die dadurch erzeugten Luftdruckschwankungen als Pfeifen wahr. Die Oberfläche des Pfeifsatzes ist ausschlaggebend für die Art des Pfeiftons: Werden z. B. bei der Pressung Löcher in den Satz gedrückt, so geht aufgrund der Oberflächenvergrößerung der Pfeifton der aufsteigenden Rakete in ein schrilles Kreischen über.

Kugelbomben

Die an Silvester meist gezündeten Feuerwerksraketen spielen bei einem professionellen Großfeuerwerk eine untergeordnete Rolle. Hier verwendet man in der Regel sog. Kugelbomben, die wesentlich mehr Effektladung für das prächtige Farben- und Formenspiel am Himmel transportieren können. Die (oft handgefertigten) Kugelbomben sind zwischen 1,5 und 30 Zentimeter groß und werden aus bis zu zwei Meter langen Rohren ähnlich einer Kanonenkugel abgeschossen.²⁾ Das



Zündung der zentralen Zerlegerladung und Explosion einer Warimono-Bombe: Aufgrund ihrer sphärischen Anordnung treiben die Effektladungen kugelförmig

auseinander und verglimmen als farbig leuchtende Sterne hoch in der Luft. (Quelle: Fireworks Photo Library)

1) vom lateinischen „deflagrare“ für „niederbrennen“

2) Je nach Kaliber, Gewicht und der Menge der verwendeten Ausstoßladung variiert die Flugzeit der Kugelbomben zwischen drei und fünf Sekunden. In dieser Zeit können sie bis zu 200 Meter aufsteigen.

verbrennende Schwarzpulver der Ausstoßladung entzündet gleichzeitig einen Verzögerungszünder, der in das Innere der Bombe führt. Prinzipiell besteht eine Bombe aus zwei mit Effekt- und Zerlegerladung gefüllten Papp-Halbschalen, die zusammengesetzt und mit in Leim getränkten Papierstreifen gleichmäßig verklebt werden.

Am häufigsten werden Bomben des Warimono-Typs abgeschossen, bei denen eine Vielzahl von kleinen, kugelförmigen oder zylindrischen Effektladungen in einer Lage konzentrisch um eine Zerlegerladung angeordnet sind. Am höchsten Punkt ihrer Flugbahn entzündet der Verzögerungszünder die Zerlegerladung, die im Fall kleiner Bomben aus grobkörnigem Schwarzpulver besteht, und durch die Druckzunahme explodiert die Bombe. Durch diesen Prozess werden die einzelnen Effektladungen entzündet, die für das Form- und Farbspiel des eigentlichen Feuerwerks am Himmel verantwortlich sind.

Die Form der einzelnen Effektladungen ist entscheidend dafür, wie das Feuerwerk am Himmel verglüht: Werden wie z. B. im Fall der Warimono-Bombe kugelförmige Effektladungen eingesetzt, so verglimmen diese als leuchtende Sterne über unseren Köpfen. Durch eine geschickte Anordnung der einzelnen Effektladungen innerhalb einer Bombe wird die Form des Feuerwerkes gesteuert – hier sind der Fantasie des Feuerwerkers keine Grenzen gesetzt und die Formenvielfalt reicht vom einfachen

Funkenregen bis hin zu ineinander geschachtelten und die Farbe wechselnden Sphären. Bei Warimono-Bomben mit mehreren Lagen befindet sich auch zwischen den Effektladungen eine Zerlegerladung, sodass sich die außen liegenden Kugelladungen weiter ausbreiten als die innen liegenden.

... und jetzt wird es bunt

Verantwortlich für die Farbenvielfalt der verschiedensten Feuerwerkskörper ist die Pulvermischung der einzelnen Effektladungen. Diese besteht generell aus Oxidationsmitteln, Brennstoffen und Zusatzstoffen wie Farbgebern, Bindemitteln und Katalysatoren. Die Oxidationsmittel, z. B. Nitrate oder Perchlorate, stellen einer Verbrennung den nötigen Sauerstoff zur Verfügung und erlauben den Abbrand einer pyrotechnischen Mischung unabhängig vom Luftsauerstoff. In Verbindung mit dem Brennstoff, gebräuchlich sind Magnesium, Aluminium, Titan und andere Legierungen, erreicht man beim Abbrand eines solchen pyrotechnischen Satzes Temperaturen von über 2000 °C. Die der Effektladung beigemengten Metallpulver erzeugen zum einen die sehr hohen Temperaturen, die notwendig sind, um die farbgebenden Zusatzstoffe der Effektladung zum Leuchten anregen zu können, zum anderen oxidieren sie bei der Verbrennung und emittieren ein starkes und helles Licht. Bei Temperaturen um 1500 °C lässt sich eine beginnende Weißglut beobachten, die für das starke und helle

Leuchten eines Feuerwerkskörpers verantwortlich ist.

Erst die zusätzlichen Farbgeber, die der Pulvermischung zugemischt werden, verleihen der hellen Flamme der brennenden Effektladung die leuchtenden Farben. Dafür eignen sich besonders Metalle und Metallverbindungen: So erzeugen Natriumsalze ein gelbes, Kalziumsalze ein orange-gelbes, Strontiumsalze ein tiefrotes, Bariumsalze ein grün-gelbes und Kupfersalze ein blaues Leuchten (siehe Tabelle).

Metallsalze und ihre Farbeffekte

Element	Farbe	charakteristische Linien / nm
Natrium	gelb	589,00 und 589,59
Kalzium	orange-gelb	553,3 und 622,0
Strontiumnitrat	rot	600 – 650 (mehrere)
Bariumnitrat	gelb-grün	513,9 und 524,2

Der professionelle Feuerwerker schichtet Pulvermischungen mit verschiedenen Farbgebern geschickt übereinander und erzielt mit den so präparierten Kügelchen einer Effektladung faszinierende Farbwechseleffekte. Damit lassen sich dann nicht mehr nur böse Geister vertreiben, sondern auch die Betrachter immer wieder begeistern und verblüffen.

KATJA BÄMMEL

Nachtrag zu „Die schnelle Welle“, November 2005, S. 72: Mehr zur Physik der Mikrowelle findet sich in: *K.-P. Möllmann* und *M. Vollmer*, „Kochen mit Zentimeterwellen“, *Physik in unserer Zeit*, Nr. 1 (2005), S. 38