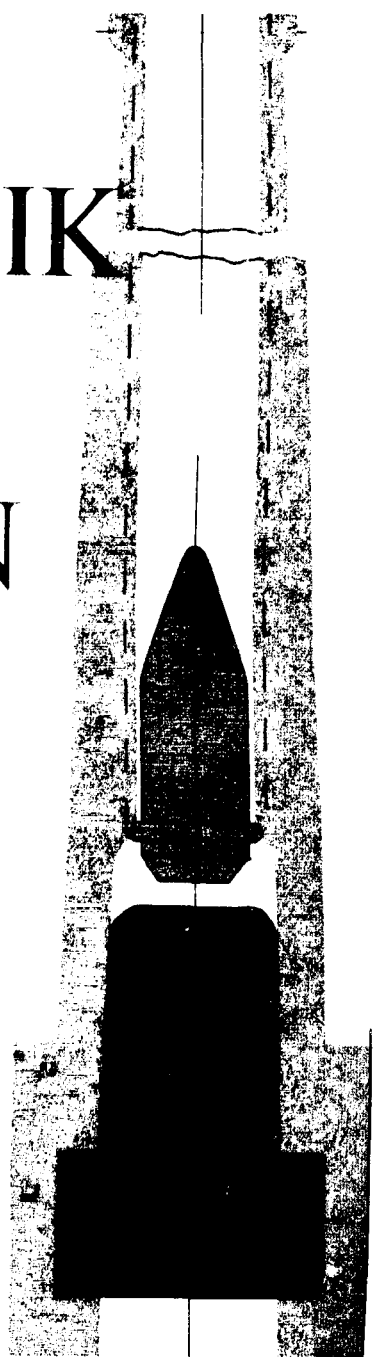


INNERE BALLISTIK VON ROHR- WAFFEN

TSCHURBANOW



E.W. Tschurbanow

Innere Ballistik von Rohrwapfen



Militärverlag
der Deutschen Demokratischen
Republik

Originaltitel:

Е. В. Чурбанов

Внутренняя баллистика артиллерийского орудия

Военное издательство, Москва 1973

Übersetzer:

Dipl.-Ing. Werner Kießhauer

© Militärverlag des Ministeriums für Verteidigung der UdSSR, Moskau 1973

Rechte der deutschen Übersetzung beim Militärverlag

der Deutschen Demokratischen Republik (VEB) – Berlin, 1978

Cheflektorat Militärliteratur

1. Auflage, 1.–2,2. Tausend

Lizenz-Nr. 5

LSV: 0555

Lektor: Dipl.-Ing. Werner Kießhauer

Einband: Wolfgang Ritter

Zeichnungen: Gerda Titze

Typografie: Günter Molinski

Hersteller: Michael Haase

Vorauskorrektor: Gertraut Purfürst · Korrektor: Dieter Heinrich

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb Leipzig – III/18/97

Redaktionsschluß: 15. 09. 1977

Bestellnummer: 745 947 6

DDR 5,— M

Inhaltsverzeichnis

0.	Über die Vertiefung ballistischer Kenntnisse (anstelle eines Vorwortes)	5
1.	Das Artilleriegeschütz als Wärmekraftmaschine	7
1.1.	Die Vielfalt der Eigenschaften eines Geschützes	7
1.2.	Das Geschütz – die älteste Wärmekraftmaschine	8
1.3.	Pulver als Treibstoff besonderer Art	12
1.4.	Die Umwandlung der Energie beim Schuß	17
1.5.	Der Wirkungsgrad eines Geschützes	19
2.	Womit befaßt sich die Innere Ballistik?	21
2.1.	Die Ballistik – die Wissenschaft von der Bewegung der Geschosse	21
2.2.	Das Ziel sind die pyrodynamischen Diagramme	22
2.3.	Die Aufgaben werden von der artilleristischen Praxis gestellt	25
2.4.	Ein breiter Interessenbereich von der Projektierung bis zur Nutzung	27
3.	Der Schußvorgang	30
3.1.	Fünf Perioden in Bruchteilen einer Sekunde	30
3.2.	Haupt- und zweitrangige Prozesse	31
3.3.	Alles beginnt mit dem Abbrand des Pulvers	33
3.4.	Die Abbrandgesetze des Pulvers	35
3.5.	Die Bildung der Pulvergase	39
3.6.	Die Pulvergase leisten Arbeit	44
3.7.	Die Bewegung des Geschosses im Rohr	46
3.8.	Das Ausströmen der Pulvergase	47
4.	Die Parameter der Inneren Ballistik	49
4.1.	Die Rolle der Parameter	49
4.2.	Wir machen uns mit den Parametern bekannt	51
4.3.	Aufmerksamkeit für den Einpreßdruck	53
4.4.	Die Grenzen der Veränderung der Parameter	55
4.5.	Die Vergleichbarkeit von Artilleriesystemen	56

5.	Wovon hängt die Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses ab?	58
5.1.	Über die Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses ..	58
5.2.	Die Messung der Geschößgeschwindigkeit.....	60
5.3.	Der Einfluß der Parameter	63
5.4.	Die Berücksichtigung der Rohrabnutzung	66
5.5.	Nochmals über den Einfluß der Parameter	67
5.6.	Die Geschwindigkeitsbarriere	68
5.7.	Die Streuung der Anfangsgeschwindigkeiten	69
6.	Wie wird die Treibladung bestimmt?	71
6.1.	Die zweifache Wirkung der Treibladung	71
6.2.	Die Messung des Druckes der Pulvergase	71
6.3.	Über Pulvermarken	73
6.4.	Die Berechnung der Treibladung	75
6.5.	Die endgültige Festlegung der Treibladung durch Versuchsschießen	78
7.	Die Innere Ballistik gibt Empfehlungen	81
7.1.	Der theoretische Ausgangspunkt bei der Geschützprojektierung	81
7.2.	Welche Variante soll verwirklicht werden?	83
7.3.	Ein Blick auf die Munition	85
7.4.	Wege zur Modernisierung	86
7.5.	Empfehlungen für die Nutzung	87
8.	Von der Vergangenheit in die Zukunft	90
8.1.	Das Sammeln von Fakten	90
8.2.	Das Spektrum der Experimente	91
8.3.	Theoretische Verallgemeinerungen	92
8.4.	Die Innere Ballistik in der UdSSR	93
8.5.	Ein Wort zur technischen Verwirklichung der Experimente	94
8.6.	Rechenanlagen als Gehilfen	95
8.7.	Probleme, Probleme	96

0. Über die Vertiefung ballistischer Kenntnisse (anstelle eines Vorwortes)

Es gab eine Zeit, zu der die Artilleristen von der Bewegung der Geschosse nur sehr allgemeine und dazu naive Vorstellungen hatten, z. B. diese: «Beim Schuß entstehen große Hitze und Feuer, die die Kugel mit Donner aus dem Geschütz heraus-schleudern» oder «Im Raum vollführt die Kugel anfangs eine erzwungene Bewegung längs einer geneigten Geraden oder eines Kreisbogens, dann fällt sie frei senkrecht herunter».

Zu dieser Zeit umfaßten die praktischen Kenntnisse der Artilleristen einige wenige empirische Regeln, die streng geheimgehalten und gewöhnlich vom Vater an den Sohn «vererbt» wurden.¹ Das Schießen der Artillerie war häufig für die Kanoniere gefährlicher als für den Gegner – die Geschütze explodierten des öfteren.

Seitdem vergingen Jahrhunderte . . .

Jetzt sind die Gesetze der Bewegung der Geschosse im Geschützrohr und im luftgefüllten Raum mit guter Genauigkeit von zwei artilleristischen Wissenschaftszweigen, der **Inneren** und der **Äußeren Ballistik**, untersucht und beschrieben. Anstelle der empirischen Schießregeln entwickelte sich die wichtigste Artilleriewissenschaft – die **Theorie des Schießens**.

Die Beherrschung der Grundlagen dieser fundamentalen Wissenschaften formiert das artilleristische Denken, sichert Klarheit und Entschiedenheit der Handlungen, erlaubt, höchste Resultate zu erzielen.

Die Kenntnis der Gesetze der Ballistik erlaubt festzustellen, wie sich das gegebene Geschöß (Granate, Kugel) unter den konkreten Bedingungen bewegen wird, und folglich zu verstehen, welche Maßnahmen getroffen werden müssen, damit dieses Geschöß sowohl das Ziel trifft als auch eine maximale Wirkung erreicht.

Hervorragendes Beispiel der Anwendung der Ballistik ist die ballistische Vorbereitung des Schießens, deren Hauptaufgabe in

¹ Im Mittelalter war die Artillerie keine Waffengattung, sondern in der Form einer Gilde organisiert, deren Nachwuchs aus Lehrlingen bestand. Die Kanoniere waren vielfach nicht Angehörige der regulären Armeen, sondern wurden erst für die einzelnen Feldzüge in Dienst genommen und erhielten den mehrfachen Sold des gewöhnlichen Soldaten.

der Berücksichtigung der Besonderheiten des Fluges des Geschosses unter den gegebenen technischen Bedingungen (die meteorologischen Bedingungen werden gesondert bei der meteorologischen Vorbereitung des Schießens berücksichtigt) im Vergleich zu den schußtafelmäßigen Bedingungen des Schießens besteht.

Inhalt, Methoden, Organisation und technische Mittel der ballistischen Vorbereitung des Schießens hängen hauptsächlich vom Entwicklungsstand der Ballistik und vom Niveau der ballistischen Kenntnisse der Artilleristen ab.

Die Vielzahl neuer Erkenntnisse, die von der weiteren Entwicklung der Ballistik zu erwarten ist, sowie deren Anwendung in der artilleristischen Praxis lassen sich quantitativ schwer abschätzen. Sicher ist jedoch, daß diese sich positiv auf die Gefechts- und Nutzungseigenschaften der Geschütze und Handfeuerwaffen und deren ökonomische und Produktionskennziffern auswirken werden.

In unserer Zeit hat die Ballistik den Rahmen der Artillerie überschritten: Jetzt findet der Leser auf den Seiten der Zeitungen und Zeitschriften bereits Darlegungen über kosmische Ballistik. Das macht die Forderung nach der Vertiefung der Kenntnisse der Ballistik und ihrer richtigen praktischen Anwendung durch die Artilleristen und alle, die Geschütze und Feuerwaffen schaffen und nutzen, noch deutlicher.

1. Das Artilleriegeschütz als Wärmekraftmaschine

1.1. Die Vielfalt der Eigenschaften eines Geschützes

Auf die Frage «Was ist ein Geschütz?» antworten die meisten: «Das ist das, womit man schießt» oder «Es dient zum Schießen». Diese verbreitete, volkstümliche Beschreibung verbindet den Begriff Geschütz mit dem Begriff Schießen.

Schießen – das ist ein breiter Begriff. In ihn legt man beinahe die gesamte Gefechtstätigkeit der Artillerie hinein, die letztlich auf die Vernichtung von Zielen auf dem Gefechtsfeld wie der lebenden Kräfte des Gegners, seiner Kampftechnik und Verteidigungsanlagen gerichtet ist. Deshalb trifft die volkstümliche Begriffsbestimmung nur sehr allgemein und annähernd zu.

Zum Schießen sind nicht nur Geschütze notwendig. Zur Vernichtung von Zielen dienen z. B. die **Artilleriegranaten**, die mit brisanten Sprengstoffen gefüllt sind. Beim Auftreffen auf das Ziel wirkt die Granate sowohl durch ihr Eindringen in das Ziel als auch durch ihre Vernichtungsfaktoren *Druckwelle*, *Splitter* und *Detonationsprodukte*.

Damit die Granate das Ziel trifft, das sich in einiger Entfernung vom Geschütz befindet, muß es diese Entfernung durchfliegen und dabei Luftwiderstand und Erdanziehungskraft überwinden. Dazu erhält die Granate im Geschütz einen anfänglichen Bewegungsimpuls durch Umsetzung der chemischen Energie, die in der Treibladung enthalten ist. Die **Treibladung** besteht hauptsächlich aus Pulver, einem Explosivstoff mit einer relativ schwachen und deshalb «schiebenden» Wirkung.

Schaut man in Artillerielehrbücher, so kann man folgende wissenschaftliche Definition des Artilleriegeschützes finden:

«Ein Artilleriegeschütz ist ein Bewaffnungsgegenstand, der dazu dient, einem Geschoß eine Anfangsgeschwindigkeit sowie eine Anfangsrichtung seiner Vorwärtsbewegung zu geben.»

In dieser Definition kommen zwei Haupteigenschaften der Artillerie zum Ausdruck: die Fähigkeit, entfernte Ziele zu erreichen (**Reichweite**), und die Fähigkeit, Ziele zu treffen (**gezieltes Feuer**). Allerdings sind damit die Eigenschaften der Geschütze nicht erschöpft.

Ein modernes Artilleriegeschütz beeindruckt einerseits durch Einfachheit und Vollendung seines Aufbaues, andererseits durch die Vielzahl der Eigenschaften, denen jeweils eine selbständige und mitunter sehr komplizierte Aufgabe entspricht, die mit dem Schießen der Artillerie verbunden ist.

Außer der volkstümlichen und der wissenschaftlichen Definition kann man noch bildhafte Begriffsbestimmungen des Geschützes geben, die auf dem Vergleich mit solchen technischen Mitteln beruhen, die ähnliche Funktionen erfüllen. Dann erscheint uns ein Artilleriegeschütz als eine achtunggebietende Konstruktion, die gigantische Belastungen von Hunderten und Tausenden Megapond² aushält, als ein bizarres Aggregat von Mechanismen, das auf den verschiedensten physikalischen Prinzipien und nach unterschiedlichen konstruktiven Schemen aufgebaut ist, als ein Fahrzeug, das sich von einem Schlepper gezogen oder selbständig über Straßen und unwegsames Gelände bewegt, als ein Gerät, mit dem sich Schußentfernungen festlegen bzw. (nach Einschießen auf ein Ziel) genau messen lassen.

Wir wollen uns hier mit nur einer, aber sicher der wichtigsten Eigenschaft des Artilleriegeschützes beschäftigen, die im direkten Zusammenhang mit der Inneren Ballistik steht, nämlich mit der Eigenschaft, eine Wärmekraftmaschine zu sein.

1.2. Das Geschütz – die älteste Wärmekraftmaschine

Es ist berechtigt zu sagen, daß das Geschütz die älteste Wärmekraftmaschine ist, da die mit Feuerwaffen schießende Artillerie bereits rund sechs Jahrhunderte existiert, die erste Dampfmaschine aber erst im 18. Jahrhundert gebaut worden ist.

Ein Wärmekraftmotor ist eine Maschine, in der die Wärmeenergie, die bei der Verbrennung des Treibstoffes frei wird, in mechanische Energie umgewandelt wird. Es gibt Wärmekraftmotoren mit äußerer und mit innerer Verbrennung. Im ersten

² In der Ballistik wird bisher vorzugsweise im technischen Maßsystem gearbeitet, das bei der Übersetzung beibehalten wurde, um den Zahlenvergleich mit der übrigen ballistischen Literatur zu ermöglichen. Dort, wo es ohne Umrechnungen möglich war, wurde vom Gewicht zur Masse übergangen. Die Angabe des Kalibers in dm bzw. der Rohrlänge im Kalibermaß ist in der Ballistik traditionell üblich.

Falle wird der Treibstoff in speziellen Kesseln außerhalb des Motors verbrannt. Solche Motoren sind die Dampfmaschinen. Im zweiten Falle verbrennt der Treibstoff im Inneren des Motors, z. B. im Kolbenmotor oder in der Gasturbine. Hier übernimmt der Arbeitszylinder bzw. die Brennkammer die Rolle des Kessels. Geschütze kann man in die Klasse der Wärmekraftmotoren mit innerer Verbrennung («Verbrennungsmotoren») einordnen.

Treibstoffe sind chemische Stoffe oder Stoffgemische, die nach der Einwirkung eines einleitenden Wärmeimpulses auf eine bestimmte Art und Weise verbrennen. Im Ergebnis der Verbrennung des Treibstoffes geht dessen chemische Energie in Wärmeenergie der Verbrennungsprodukte und des umgebenden Raumes über. Treibstoffe bestehen aus **Brennstoff** (z. B. Benzin), **Oxydator** (z. B. Luftsauerstoff) und **Zusätzen**, die die Eigenschaften des Treibstoffes und den Charakter seiner Verbrennung verbessern.

Die Umwandlung der chemischen in Wärmeenergie erfolgt in Wärmekraftmaschinen mit Hilfe einer Arbeitssubstanz, die als Energieträger fungiert. In Dampfmaschinen ist der in Kesseln erzeugte Wasserdampf die Arbeitssubstanz, in Verbrennungsmotoren mit innerer Verbrennung sind es die Verbrennungsprodukte des Treibstoffes. Der Ausgangszustand der Arbeitssubstanz wird durch hohe Temperatur und vergleichsweise hohen Druck charakterisiert. Im Ergebnis der Ausdehnung der Arbeitssubstanz erfolgt die Umwandlung der Wärmeenergie in mechanische Energie des Antriebsteiles der Maschine und der mit ihm verbundenen, angetriebenen Elemente. Die dabei geleistete mechanische Arbeit hängt von der Bestimmung der Wärmekraftmaschine ab: Bewegung von Transportfahrzeugen, Antrieb verschiedener Aggregate, Erzeugung von elektrischem Strom mittels Generatoren usw.

Als Arbeitsglieder von Wärmekraftmaschinen dienen Kolben (für fortschreitende Bewegungen) und Rotoren (für umlaufende Bewegungen); in reaktiven Triebwerken ist das Arbeitsglied der Gasstrahl, der in der Ausströmdüse beschleunigt wird.

Finden wir die aufgeführten Elemente der Wärmekraftmaschine auch im Artilleriegeschütz, und laufen in ihm die bereits angeführten Prozesse ab? Ja. Allerdings sieht das alles anders aus als z. B. in der Dampfmaschine oder im Verbrennungsmotor.

Das Arbeitsglied des Geschützes als Wärmekraftmaschine ist das Geschöß, dem mechanische Energie in Form der kinetischen

Energie der Vorwärtsbewegung übertragen wird, die man als **Mündungsenergie** E_k bezeichnet:

$$E_k = \frac{m_G v_0^2}{2}.$$

m_G Masse des Geschosses (der Granate, der Kugel)
 v_0 Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses

Mit der Veränderung des Geschützkalibers d verändert sich die Geschossmasse m_G etwa proportional zur dritten Potenz des Kalibers, während die Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses für einen bestimmten Geschütztyp, z. B. für Haubitzen, bei ein und demselben technischen Entwicklungsstand praktisch nicht vom Kaliber abhängig ist.

Wird die kinetische Energie E_k durch d^3 geteilt, so erhält man die vom Kaliber unabhängige Größe C_d :

$$C_d = \frac{E_k}{d^3} = \frac{m_G v_0^2}{2d^3}.$$

Diese Größe wird als **Arbeitsvermögenquotient** bezeichnet. Von C_d hängen die wichtigsten Gefechtseigenschaften eines Artilleriegeschützes und letzten Endes der Typ des Geschützes ab (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1

Geschütztyp	Arbeitsvermögenquotient in Mp m/dm ³	Länge des Rohres in Kalibern
Kanonen großer Leistung	800 ... 1200	75 ... 90
Flugabwehrkanonen (Flak)	600 ... 1000	55 ... 75
Panzerabwehrkanonen (Pak)	400 ... 800	50 ... 60
Divisionskanonen	300 ... 600	45 ... 55
Haubitzen	100 ... 300	20 ... 40
Granatwerfer	10 ... 50	5 ... 15

Mit Veränderung des Arbeitsvermögenquotienten C_d verändern sich Abmessungen und Masse des Geschützes, Panzerdurchschlagskraft, Reichweite, Manövrierfähigkeit usw. In Tabelle 1 ist die Veränderung der Rohrlänge (in Kalibern gemessen) angegeben.

Bei bekannter Größe C_d und Kaliber d kann man die Mündungsenergie errechnen, über die die Granate im Moment des Austritts aus der Rohrmündung verfügt:

$$E_k = C_d d^3.$$

So hat z. B. die Granate eines 203-mm-Geschützes mittlerer Leistung (mit mittlerem Arbeitsvermögenquotienten) bei $C_d = 600 \text{ Mp m/dm}^3$ eine Mündungsenergie:

$$E_k = 600 \cdot 2,03^3 \approx 5000 \text{ Mp m.}$$

Diese Energie würde ausreichen, um einen mittleren Güterzug einschließlich Lokomotive fünf Meter hochzuheben.

Als eine spezielle Art der «Feuerbüchse» dient in Geschützen der **Ladungsraum** – der Teil des Rohrkanals, in dem die Treibladung (2, Bild 1) untergebracht wird. Der übrige Teil des Rohrkanals, der **gezogene Teil des Rohres**, dient als Arbeitszylinder, in dem sich sozusagen als Kolben das Geschöß (die Granate, die Kugel)³ bewegt. Der Arbeitsweg des Kolbens ist gleich dem **vollen Geschößweg** im Rohr.

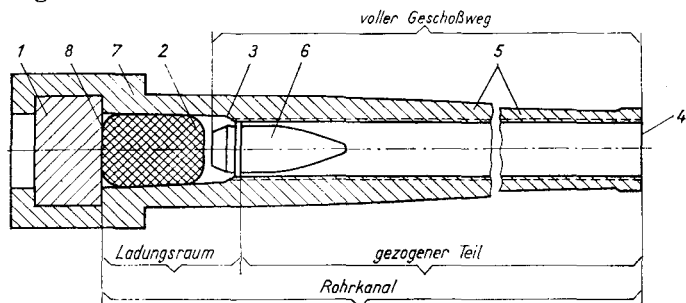


Bild 1 Schematische Darstellung eines Artilleriesystems

- 1 – Verschluss; 2 – Treibladung; 3 – Übergangskegel; 4 – Rohrmündung; 5 – Rohr; 6 – Geschöß (Granate); 7 – Bodenstück; 8 – Rohrboden

Im Bodenstück 7 des Rohres 5 befindet sich der Verschluss 1, der den Rohrkanal nach dem Laden des Geschützes nach hinten verschließt. Beim Laden wird entweder zuerst das Geschöß 6 und danach die Treibladung 2 in das Rohr eingeführt (**getrennte**

3 Im weiteren wird nur der Begriff «Geschöß» verwendet, der für alle Granatarten bei Geschützen und Kugeln aller Art bei Handfeuerwaffen steht.

Munition), oder es wird der gesamte Schuß als fest verbundene Einheit geladen (**patronierte Munition**).

Bei **getrennter Munition** wird die Granate beim Laden so in das Rohr hineingestoßen, daß sich der Führungsring im Übergangskegel 3 in die Züge einpreßt und so die Granate festhält. Der Artillerist sagt dazu, die Granate wird «angesetzt». Bei **patronierter Munition** wird die Granate im Hülsenhals festgehalten.

Der Rohrkanal reicht vom Rohrboden 8 bis zur Rohrmündung 4. Offensichtlich kann man als Wärmekraftmaschine nur ein geladenes Geschütz oder (wie man in der Inneren Ballistik sagt) ein Artilleriesystem ansehen, das aus dem Geschütz (dem Rohr), dem Geschöß und der Treibladung besteht.

Im Unterschied zu den Wärmekraftmaschinen mit kontinuierlicher Arbeitsweise sind Feuerwaffen (Geschütze, Handfeuerwaffen) hingegen Wärmekraftmaschinen mit periodischer Arbeitsweise. Nach jedem Schuß, d. h. nach jedem Arbeitszyklus, erfolgt das Laden der Waffe, das mit einer Neumontage des Wärmemotors vergleichbar ist, wobei der Ladeprozeß eine Zeit erfordert, die bis zu tausendmal länger als der Arbeitszyklus (Durchlaufzeit) sein kann.

1.3. Pulver als Treibstoff besonderer Art

Als Treibstoff dient in Geschützen **Pulver**, das Hauptteil der Treibladung ist. Außer Pulver kann die Treibladung enthalten: **Zündladung**, **Salzvorlage** (Flammenlöcher), **Entkupferungsdraht**, **Phlegmatisator**, **Abdichtungseinrichtung** und andere Zusatzelemente, die zusammen mit dem Pulver verbrennen.

Lange Zeit wurde in der Artillerie **Schwarzpulver** verwendet, das aus einem mechanischen Gemisch von Kalisalpeter (75%), Holzkohle (15%) und Schwefel (10%) besteht. Bei der Verbrennung von Schwarzpulver entstehen etwa zur Hälfte (der Masse) gasförmige und feste Verbrennungsprodukte. Letztere bewirken beim Schießen eine starke Rauchentwicklung. In der heutigen Zeit wird Schwarzpulver hauptsächlich für die Herstellung von Zündladungen und Zündsätzen verwendet.

Ein großer Fortschritt in der Entwicklung der Artillerie war in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts die Erfindung des rauchschwachen Pulvers, welches sich bei seinem Abbrand vollständig in gasförmige Produkte, die *Pulvergase*, umwandelt.

Hauptbestandteil der rauchschwachen Pulver ist die **Nitrozellulose** (Schießbaumwolle), die im Resultat der Behandlung von Zellulose (Baumwolle, Sägespäne u. ä.) mit Salpetersäure unter Zusatz von Schwefelsäure gewonnen wird. Dieser Prozeß wird **Nitrierung** genannt.

Eine der Nitrozellulosesorten, die *Kollodiumwolle*, welche 1890 von *D. I. Mendelejew* dargestellt wurde, unterscheidet sich von den übrigen durch seine völlige Lösbarkeit in einem Äthylalkohol-Äther-Gemisch.

Rauchschwaches Pulver wird im Prozeß der Gelatinierung der Nitrozellulose mit verschiedenen Lösungsmitteln erzeugt: mit Äthylalkohol-Äther-Gemisch, mit Nitroglycerin, mit Nitrodiglykol oder mit Nitroguanidin. Davon werden auch die Bezeichnungen der verschiedenen Pulverarten abgeleitet: *Pyroxilin-pulver*, *Nitroglycerinpulver*, *Nitrodiglykolpulver* oder *Nitroguanidinpulver*. Tabelle 2 enthält die ungefähre Zusammensetzung (in Masseprozenten) der hier genannten Pulverarten.

Tabelle 2

Komponenten	Pulverarten			
	Pyroxilin-pulver	Nitro-glycerin-pulver (Ballistit)	Nitro-diglykol-pulver	Nitro-guanidin-pulver
Pyroxilin Nr. 1	58	—	—	—
Pyroxilin Nr. 2	37	—	—	—
Kolloxilin	—	58	67	42
Nitroglycerin	—	30	—	—
Nitrodiglykol	—	—	30	18
Nitroguanidin	—	—	—	34
Alkohol, Äther und Wasser	4	—	—	—
Zusätze	1	12	3	6

Pyroxilin Nr. 1 und *Nr. 2* unterscheiden sich durch die Technologie ihrer Herstellung, durch ihren Gehalt an Stickstoff und durch ihre Löslichkeit. *Pyroxilin Nr. 1* enthält mehr Stickstoff und löst sich schwerer im Äthylalkohol-Äther-Gemisch.

Kolloxilinpulver ist die Pyroxilinsorte mit dem niedrigsten Stickstoffgehalt.

Als Zusätze zu rauchschwachen Pulvern (Tabelle 2) werden verwendet: Kolophonium, Vaseline, Graphit, Kampfer, Trotyl.

Eine Besonderheit der Pyroxilinpulver ist der lange technologische Prozeß ihrer Herstellung. Das liegt darin begründet, daß nach der Gelatinisierung (Plastifizierung) und dem Pressen der Pulvermasse das Äthylalkohol-Äther-Lösungsmittel in einem längeren Prozeß ausgewaschen werden muß. Anschließend wird das Pulver getrocknet.

Ein grundlegender Nachteil der Pyroxilinpulver besteht darin, daß sich noch vorhandene Lösungsmittelreste mit der Zeit verflüchtigen können, was zu einer Änderung der ballistischen Eigenschaften der Pulver führt.

Nitroglycerinpulver sind bis in die heutige Zeit verhältnismäßig teuer geblieben, da als Ausgangsstoff für die Nitroglycerin-gewinnung Lebensmittel dienen – pflanzliche und tierische Fette. Aus 15 Tonnen Pflanzenfett gewinnt man eine Tonne Glycerin, bei dessen Weiterverarbeitung vier Tonnen Nitroglycerin hergestellt werden.

Rohstoff für die Herstellung von *Nitrodiglykol* ist Äthylen, das seinerseits bei der Verkokung von Kohle, beim Erdöl-Cracking-Prozeß, bei der Kautschuksynthese oder aus Hochofengasen gewonnen wird.

Als Rohstoff für die Herstellung von *Nitroguanidin* dienen Kohle, Kalk und Luft unter Einsatz von Elektroenergie.

Die UdSSR verfügt über große Möglichkeiten für die Herstellung von Nitrodiglykol- und Nitroguanidinpulvern.

Pulver ist ein Treibstoff besonderer Art. Von den verbreiteten Energieträgern wie Steinkohle und Erdöl unterscheidet sich das Pulver dadurch, daß es zu seiner Verbrennung keinen Oxydator benötigt, der Verbrennungsprozeß mit großer Geschwindigkeit bei hoher Temperatur verläuft und sein Wärmegehalt, bezogen auf eine Volumeneinheit, verhältnismäßig hoch ist.

Die chemische Summenformel des Pyroxilinpulvers läßt sich folgendermaßen schreiben: $C_{24}H_{29}O_{42}N_{11}$. Folglich befinden sich in jedem Molekül des Pulvers chemische Elemente, die brennbar sind (24 Atome Kohlenstoff und 29 Atome Wasserstoff) bzw. die oxydierend wirken (42 Atome Sauerstoff). Damit ist in diesem Falle der Koeffizient des Sauerstoffüberschusses gleich 0,86 (also kleiner als 1), d. h., der Sauerstoff reicht zur vollständigen Verbrennung nicht aus; es entstehen nur zum Teil die Endprodukte

Wasser H_2O und Kohlendioxid CO_2 . Aber das Pulver kann in einem abgeschlossenen Raum oder sogar im Vakuum verbrennen.

Rauchschwaches Pulver brennt in der freien Atmosphäre mit einer Geschwindigkeit von 1 bis 2 mm/s ab, was die Verbrennungsgeschwindigkeit z. B. von Kerosin um das Tausendfache übertrifft. Dabei erreicht die Verbrennungstemperatur von Pulver Werte um $3000^\circ C$, während Kerosin eine Verbrennungstemperatur von $1000^\circ C$ entwickelt. In einem abgeschlossenen Raum wächst die Abbrandgeschwindigkeit des Pulvers auf das Hundertfache an. Im Geschütz brennt das gesamte Pulver der Treibladung in weniger als einer tausendstel Sekunde ab. Unter besonderen Umständen, z. B. bei Einwirkung eines mächtigen Detonators, kann Pulver auch explodieren.

Vergleicht man den Wärmegehalt (Kaloriengehalt) verschiedener Treibstoffe, so zeigt es sich, daß er bei Pulvern bedeutend niedriger (600 bis 1000 kcal/kg) als bei Kerosin (11000 kcal/kg) ist; allerdings wird dabei nicht die Masse des Oxydators berücksichtigt, die zur Verbrennung des Kerosins notwendig ist. Stellt man diesen Umstand in Rechnung, so zeigt sich der Vorteil der Pulver bei der Wärmeentwicklung, bezogen auf die Volumeneinheit (1 Liter) Ausgangsstoffe, die an der Verbrennung beteiligt sind, da Pulver bis zu 1400 kcal/l, das Kerosin-Sauerstoff-Gemisch hingegen nur 4 kcal/l freisetzt. Das Produkt des Pulverwärmegehaltes Q_L mit dem mechanischen Wärmeäquivalent $E = 427 \text{ kp m/kcal}$ wird als Potential des Pulvers Π bezeichnet:

$$\Pi = EQ_L.$$

Es erreicht Werte um 300 bis 400 Mp m/kg.

Was die physikalischen Eigenschaften der Pulver betrifft, so gehören die rauchschwachen Pulver zur Gruppe der festen Treibstoffe. Sie werden in der Form geometrischer Körper (Körner) verschiedener Arten und Abmessungen hergestellt. Die Dichte von rauchschwachen Pulvern beträgt im Mittel $1,6 \text{ kg/dm}^3$.

Arbeitssubstanz in der Wärmekraftmaschine Geschütz sind die Pulvergase. Da sich das gesamte rauchschwache Pulver bei seinem Abbrand in Gas verwandelt, so sind Pulvergasmasse und Pulvermasse gleich. In Tabelle 3 ist die ungefähre Zusammensetzung der Pulvergase in Volumenprozenten angegeben, die sich beim Abbrand von Pyroxilinpulver bei einem Druck von 100 bzw. 4000 kp/cm^2 bilden.

Tabelle 3 zeigt, daß mit Anwachsen des Druckes der Anteil an CO_2 und CH_4 etwas größer wird, der Anteil an CO hingegen abnimmt.

Tabelle 3

Gase	Druck	
	100 kp/cm ²	4000 kp/cm ²
Kohlenstoffmonoxid CO	49,3	34,5
Kohlenstoffdioxid CO_2	21,7	30,9
Wasserstoff H_2	12,6	17,4
Stickstoff N_2	16,4	15,6
Methan CH_4	0	1,6
Wasserdampf (über 100%)	14,0	14,8

Eine größere Menge von CH_4 kann sich bei langsamer Abkühlung der Pulvergase unter hohem Druck bilden, da hierbei weitere Reaktionen zwischen den Gasen stattfinden.

Beim Abbrand von 1 kg rauchschwachem Pulver bilden sich 700 bis 1000 l Pulvergase.

Die Pulvergase enthalten CO , H_2 und CH_4 als Produkte der unvollständigen Verbrennung, die sich beim Ausströmen aus dem Rohrkanal in die Atmosphäre unter bestimmten Bedingungen mit dem Luftsauerstoff verbinden und dabei die Mündungs- bzw. eine Rückschlagflamme (im geöffneten Verschuß) erzeugen. Zur Verhinderung der Flamme, die besonders nachts den Standort des Geschützes demaskiert, sind in den Treibladungen zum Teil Flammenlöcher (Salzvorlagen) enthalten.

Im Rohrkanal befinden sich die Pulvergase unter einem sehr hohen Druck, der 3000 und mehr kp/cm² erreicht. Deshalb ist die «Abdichtung» des Verbrennungsraumes, d. h. die Verhinderung des Ausbruches der Pulvergase, eine wichtige technische Aufgabe, die von den Führungsringen der Geschosse (vom Geschößmantel) erfüllt wird. Diese bestehen aus Kupfer oder aus Sintereisen. Auf der Verschußseite des Rohres wird diese Aufgabe von der Hülse oder von einer speziellen Dichtung erfüllt.

1.4. Die Umwandlung der Energie beim Schuß

Bei der Bewegung des Geschosses im Rohrkanal der Waffe erfolgen die Ausdehnung der Pulvergase und der Übergang der Wärmeenergie der Gase in kinetische Energie des Geschosses. Dabei verringert sich die Temperatur der Pulvergase. Nach dem Austritt des Geschosses aus dem Rohr strömen die Pulvergase in die Atmosphäre und vermischen sich mit der Luft.

Betrachten wir das Schema der Energieumwandlung beim Schuß aus einem Geschütz (Bild 2). Die chemische Energie, die in der Treibladung enthalten ist, wird beim Abbrand des Pulvers als *Wärmeenergie der Pulvergase* freigesetzt. Dabei hängt die frei werdende Wärmemenge hauptsächlich von der Masse der Treibladung und von der Pulversorte ab.

Leider wird mehr als die Hälfte der gesamten Wärmeenergie der Pulvergase bei deren Ausströmen aus dem Rohr nutzlos an die Atmosphäre abgegeben, denn Erwärmung der Luft, Abschlußknall, Mündungsflamme, Ionisation der Pulvergase und chemische Reaktionen der Gase spielen im Prinzip nur eine negative Rolle.

Ein bedeutender Teil der Wärmeenergie (25 bis 40%) geht bei der Ausdehnung der Pulvergase in die *kinetische Energie des Geschosses* über. Diese Energie ist als die nützliche Energie zu bezeichnen. Ein weiterer Teil der Energie der Pulvergase (1 bis 10%) wird für die Beschleunigung der Gase im Rohr selbst benötigt (*kinetische Energie der Pulvergase*).

Die kinetische Energie des Geschosses wird im Flug hauptsächlich für die Überwindung des Luftwiderstandes aufgebraucht. Beim Schießen auf große Entfernungen verliert eine Granate im Fluge etwa 60 bis 80% der anfänglichen kinetischen Energie. Beim Schießen im direkten Richten ist dieser Energieverlust bedeutend geringer (bis 20%).

Beim Treffen mit dem Ziel wird die kinetische Energie des Geschosses für die Zerstörung des Hindernisses (Panzer, Beton, Erdschicht usw.) verbraucht; bei der Detonation der Granate bleibt sie Bestandteil der kinetischen Energie der Splitter und Detonationsprodukte.

Die *kinetische und Wärmeenergie der Pulvergase* wird bei Geschützen mit Mündungsbremse in einem begrenzten Umfange (bis zu 1%) nutzbringend bei der Verringerung des Rohrrückstoßes aufgebraucht. Der Hauptteil der Energie der Pulvergase geht beim

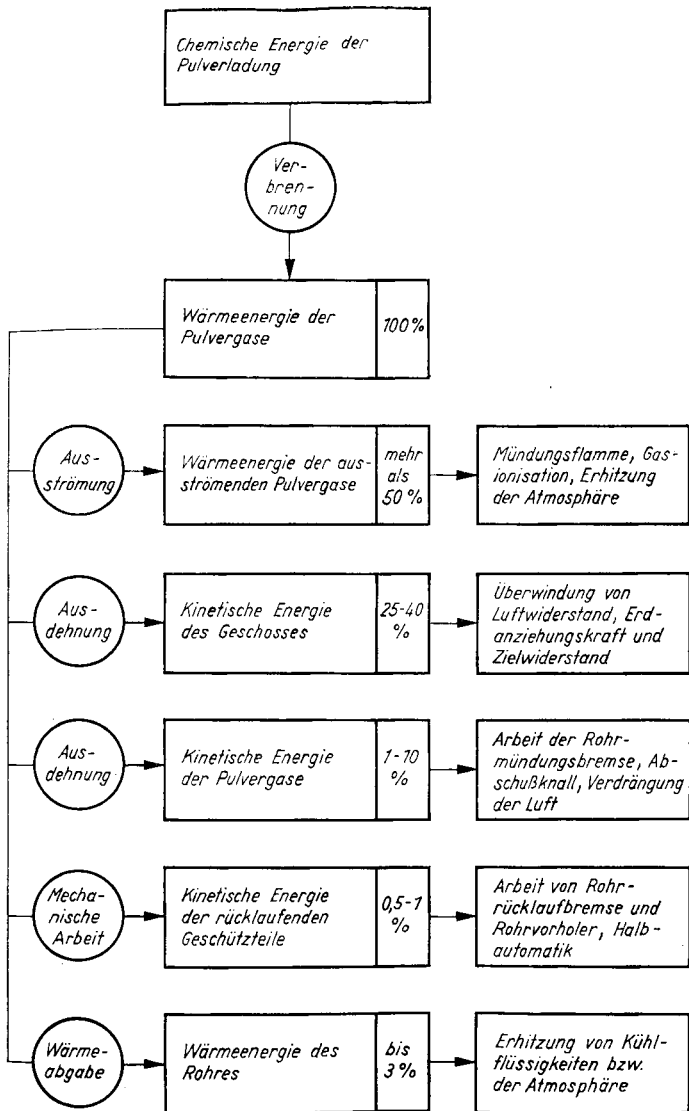


Bild 2 Schema der Energiewandlung beim Schuß

Ausströmen in die Atmosphäre in kinetische und Wärmeenergie der Luft über.

Der Rohrrücklauf, d. h. die kinetische Energie der rücklaufenden Teile des Geschützes, «verschlingt» 0,5 bis 1% der Wärmeenergie des Pulvers. Die Wärmeenergie der Pulvergase und die kinetische Energie der rücklaufenden Teile ihrerseits werden in einem geringen Umfange (unter 1%) nutzbringend eingesetzt für das Nachladen der Geschütze und automatischen Waffen, für den Vorlauf des Rohres, für das Freiblasen der Rohre von Panzern u. ä.

Ein gewisser Teil der Wärmeenergie der Pulvergase (bis 3%) wird an die Rohrwandung abgegeben (Wärmeenergie des Rohres), von der sie an eine Kühlflüssigkeit oder an die Atmosphäre weitergegeben wird.

1.5. Der Wirkungsgrad eines Geschützes

Eine wichtige Charakteristik einer jeden Wärmekraftmaschine ist ihr Wirkungsgrad η_M , der gleich dem Verhältnis der nutzbringenden mechanischen Arbeit zur aufgewendeten Wärmemenge ist. In unserem Falle ist die nutzbringende Arbeit gleich der kinetischen Energie des Geschosses (Mündungsenergie) E_k , und die aufgewendete Wärmeenergie, ausgedrückt in mechanischen Einheiten, ist gleich dem Potential des Pulvers (für 1 kg) Π mal der Pulvermasse m_L .

Folglich kann für den Wirkungsgrad eines Geschützes (einer Waffe) geschrieben werden:

$$\eta_w = \frac{E_k}{\Pi m_L} = \frac{m_G v_0^2}{2\Pi m_L}.$$

Der Wirkungsgrad moderner Artilleriegeschütze liegt zwischen 0,20 und 0,35⁴, was wesentlich höher als bei Dampflokomotiven (0,09) und stationären Dampfmaschinen (0,20) ist und sich dem Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren (bis 0,35) nähert.

Interessant ist die Einschätzung der Leistungsfähigkeit des Geschützes als Wärmekraftmaschine, wenn man die geleistete mechanische Arbeit in das Verhältnis zur Zeiteinheit setzt. Nimmt man

⁴ Hierbei wird die kinetische Energie der Geschoßrotation (des Dralls) nicht berücksichtigt.

das in Abschnitt 1.2. angeführte Beispiel des 203-mm-Geschützes mit $E_k = 5000 \text{ Mp m}$ an und berücksichtigt die Durchlaufzeit t_d mit $0,01 \text{ s}$, so erhält man:

$$P_w = \frac{E_k}{t_d} = \frac{5000}{0,01} = 500000 \text{ Mp m/s},$$
$$\approx 4900000 \text{ kW}.$$

Wie wir sehen, läßt sich die Leistung des Geschützes durchaus mit der moderner Kraftwerke vergleichen (die Leistung des Bratsker Wasserkraftwerkes an der Angara beträgt $4,1 \text{ Mill. kW}$). Dabei darf aber der Impulscharakter der Geschützleistung nicht außer acht gelassen werden.

2. Womit befaßt sich die Innere Ballistik?

2.1. Die Ballistik – die Wissenschaft von der Bewegung der Geschosse

Das Wort *Ballistik* geht auf das griechische Wort «βαλλω» zurück, was soviel wie «ich werfe» bedeutet. Folglich muß sich die Ballistik als Wissenschaft mit dem Werfen (dem Flug, der Bewegung) von Geschossen befassen.

Die **Innere Ballistik** untersucht die Bewegung des Geschosses im Rohrkanal der Waffe. Die weitere Bewegung des Geschosses im Raum (außerhalb der Waffe) ist Gegenstand der **Äußeren Ballistik**.

Die Bewegung des Geschosses studieren heißt für jeden Zeitpunkt feststellen können: den zurückgelegten **Geschoßweg**, die **Geschoßgeschwindigkeit** und die **Geschoßbeschleunigung**. Bei der Bewegung wirken auf das Geschoß verschiedene Kräfte ein, die die Änderung der drei aufgeführten Bewegungselemente bewirken. Deshalb gilt dem Herausfinden und dem Studium der Auswirkung dieser Kräfte besondere Aufmerksamkeit.

Die bewegende Kraft im Geschütz ist der Druck der Pulvergase, die sich beim Abbrand der Pulverladung bilden. Der Druck der Pulvergase im Rohrkanal hängt von einer Reihe von Faktoren ab, in erster Linie vom Prozeß des Pulverabbrandes. Der Abbrand von Pulver in einem unveränderlichen Verbrennungsraum wird von einem Hauptzweig der Inneren Ballistik – der **Pyrostatik** – untersucht.

Der Druck der Pulvergase hängt ebenfalls vom Charakter der Geschoßbewegung im Rohrkanal ab, da sich hierbei der von den Gasen eingenommene Raum verändert, vergrößert. Das zusammenhängende Studium der Geschoßbewegung und der Ausdehnung der Pulvergase ist Gegenstand des zentralen Zweiges der Inneren Ballistik – der **Pyrodynamik**. Diese untersucht die Zusammenhänge zwischen dem chemischen Prozeß des Pulverabbrandes, dem mechanischen Prozeß der Vorwärtsbewegung des Geschosses und dem thermodynamischen Prozeß der Ausdehnung der Pulvergase, d. h., sie beschreibt den sogenannten pyrodynamischen Prozeß.

2.2. Das Ziel sind die pyrodynamischen Diagramme

Die Größen, mit deren Hilfe der pyrodynamische Prozeß beschrieben wird, werden *pyrodynamische Elemente* genannt.

Die wichtigsten pyrodynamischen Elemente sind:

- die Zeit der Bewegung des Geschosses t ,
- der Weg l , der vom Geschöß im Rohr zurückgelegt wurde,
- die Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung des Geschosses v ,
- der Pulvergasdruck im Rohr p .

Die Beschleunigung der Vorwärtsbewegung des Geschosses ist proportional dem Pulvergasdruck und wird deshalb als selbständiges Element betrachtet. Außer den angeführten gibt es noch andere pyrodynamische Elemente.

Die **Zeitmessung** beginnt in der Inneren Ballistik in dem Augenblick, in dem sich das Geschöß in Bewegung setzt. Als **Ausgangspunkt der Geschößbewegung** gilt die Lage des Geschosses im Moment des Beginns seiner Bewegung. Die **Geschwindigkeit** des Geschosses wird relativ zum Rohr gemessen, d. h., sie ist eine relative Geschwindigkeit. Für den **Druck** der Pulvergase nimmt man in der Inneren Ballistik einen gewissen mittleren ballistischen Druck an, der im gegebenen Moment in allen Punkten des Raumes hinter dem Geschößboden gleich sein soll. In Wirklichkeit ist der Druck in den verschiedenen Punkten des Rohres nicht gleich. Der Druck am Rohrboden p_{Rb} ist größer als der Druck am Geschößboden p_{Gb} :

$$p_{Rb} = \left(1 + 0,5 \frac{m_L}{m_G} \right) p_{Gb}.$$

m_L Masse der Treibladung .

m_G Geschößmasse

Der mittlere ballistische Druck p ist ebenfalls größer als der Druck am Geschößboden p_{Gb} :

$$p = \left(1 + \frac{1}{3} \frac{m_L}{m_G} \right) p_{Gb}.$$

Wie wir sehen, wächst die Differenz zwischen den betrachteten Größen des Druckes der Pulvergase mit der Vergrößerung der Masse der Treibladung und der Verringerung der Geschößmasse.

Die grafischen oder analytischen Abhängigkeiten pyrodynamischer Elemente in Form der Funktion eines dieser Elemente werden als

pyrodynamische Diagramme bezeichnet. Man kann auch sagen, daß das Ziel der Inneren Ballistik im Aufstellen und Studium der pyrodynamischen Diagramme besteht.

Die größte Aussagekraft haben die pyrodynamischen Diagramme als Funktionen der Zeit t und des Geschößweges l . Aus den ersteren (Bild 3a) kann man ersehen, wie sich der Druck der Pulvergase, die Geschwindigkeit und der Geschößweg vom Beginn der Geschößbewegung an bis zum Moment des Austrittes des Geschößbodens aus dem Mündungsquerschnitt des Rohres verändern. Der Geschößweg l wächst stetig von Null an, anfangs langsam, dann immer schneller; die Geschößgeschwindigkeit v wächst, ebenfalls mit Null beginnend, anfangs sehr rasch an, dann nimmt der Geschwindigkeitszuwachs ab. Der Druck der Pulvergase p hat im Moment des Beginns der Bewegung schon eine gewisse Größe, da er in der Lage sein muß, das Geschöß in den gezogenen Teil des Rohres einzupressen. Er wächst rasch an, durchläuft ein Maximum und fällt dann ab. Das Maximum des Druckes wird etwa nach der Hälfte der Zeit t_d erreicht, die das Geschöß für seine Bewegung im Rohr benötigt.

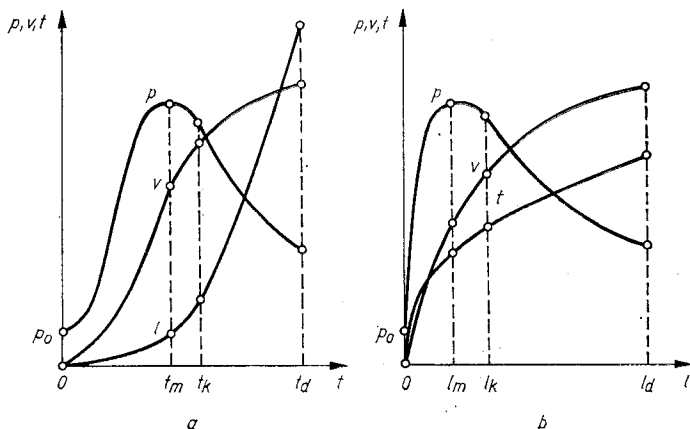


Bild 3 Pyrodynamische Diagramme
a – als Funktion der Zeit; b – als Funktion des Geschößweges

Die pyrodynamischen Diagramme als Funktion des Geschößweges l (Bild 3b) zeigen, wie sich der Druck der Pulvergase, die Geschößgeschwindigkeit und die Zeit als Funktion der Lage des

Geschosses im Rohr verändern. Das ist besonders wichtig für die Berechnung der Stärke der Rohrwandung, für die der Druck der Pulvergase eine innere Belastung ist, die das Rohr zerreißen kann. Die Diagramme als Funktion von l verlaufen anders als die der Funktion von t . Eine eingehendere Untersuchung des Charakters der Änderung der pyrodynamischen Elemente wird etwas später gegeben (im Zusammenhang mit der Erläuterung der physikalischen Prozesse, die im Rohrkanal des Geschützes verlaufen). Die Kurve des Druckes p zeigt, daß der größte Druck auf dem Anfangsabschnitt der Geschößbewegung (Ol_m) erreicht wird, der ein Drittel des vollen Geschößweges l_d nicht überschreitet. Deshalb hat das Rohr auf diesem Abschnitt seinen größten Außendurchmesser, der dann zum Mündungsquerschnitt hin abnimmt.

Die pyrodynamischen Diagramme verlaufen jeweils durch vier aufeinanderfolgende charakteristische Punkte, die den Beginn der Geschößbewegung, den maximalen Druck der Pulvergase, das Ende des Pulverabbrandes und den Moment des Austrittes des Geschößbodens aus dem Mündungsquerschnitt angeben. Wir bezeichnen die pyrodynamischen Elemente in den charakteristischen Punkten entsprechend mit den Indizes 0, m, k und d: $p_0, p_m, p_k, p_d, t_m, t_k, v_d$ usw.

Es kommt vor, daß das Pulver schneller abbrennt und das Maximum des Gasdruckes mit dem Ende der Pulvergasentwicklung (t_k) zusammenfällt. In diesem Falle hat die Kurve anstatt eines Maximums im streng mathematischen Sinne eine ausgeprägte Spitze. Dieser Kurvenverlauf wird öfters in Granatwerfern beobachtet.

Die pyrodynamischen Diagramme können experimentell aufgezeichnet werden. Ihre anschließende Analyse ist einer der wichtigsten Wege der Untersuchung des pyrodynamischen Prozesses.

Von allen Werten der pyrodynamischen Funktionen sind die wichtigsten die *Mündungsgeschwindigkeit des Geschosses* v_d und der *maximale Pulvergasdruck* p_m . Diese Größen bestimmen zusammen mit der Masse des Geschosses und dem Kaliber der Waffe die wichtigsten Gefechtseigenschaften des Systems. In der artilleristischen Praxis wird anstelle der Mündungsgeschwindigkeit v_d meistens die *Anfangsgeschwindigkeit* v_0 des Geschosses verwendet, eine Größe, die der v_d sehr nahe kommt. Den physikalischen Sinn der Anfangsgeschwindigkeit werden wir etwas später erläutern.

Hier soll nur festgestellt werden, daß die Mündungsgeschwindigkeit eine relative Geschwindigkeit des Geschosses, bezogen auf das Rohr, darstellt, während die Anfangsgeschwindigkeit die absolute Geschwindigkeit des Geschosses, bezogen auf die Erde, ist und somit den Ausgangswert der Äußeren Ballistik für die Flugbahnberechnung ergibt.

Die ersten Schritte zur Messung der Geschößgeschwindigkeit und des Pulvergasdruckes wurden bereits im 18. Jahrhundert unternommen, aber erst in der Mitte des 19. Jahrhunderts wurden zuverlässige Geräte für diese Messungen erfunden. In diese Zeit fällt auch die Formierung der Inneren Ballistik als selbständige Wissenschaft, die sich nunmehr auf ein festes Fundament – das Experiment – stützen konnte.

2.3. Die Aufgaben werden von der artilleristischen Praxis gestellt

Die Innere Ballistik dient zusammen mit den anderen artilleristischen Wissenschaften dazu, Aufgaben zu lösen, die von der artilleristischen Praxis gestellt werden.

Eine der wichtigsten praktischen Aufgaben ist die *Schaffung neuer Muster artilleristischer Bewaffnung*: Geschütz (Rohr und Lafette), Fahrteil oder Trägerfahrzeug, Geschöß, Zünder, Treibladung und andere Elemente. Die Innere Ballistik (als Wissenschaft, die den Abschußvorgang maßgeblich untersucht) zeigt Wege für optimale Lösungen auf und gibt Empfehlungen, wie die geforderten Gefechtseigenschaften – Leistung, Reichweite, Treffgenauigkeit und Streuergößen, Feuergeschwindigkeit, Manövrierfähigkeit – bei vertretbarem materiellem Aufwand erreicht werden können.

Sehr eng ist die Innere Ballistik mit der Projektierung von Geschützen und Handfeuerwaffen verbunden, die mit der ballistischen Projektierung der Waffe beginnt. Im Ergebnis der ballistischen Projektierung werden die Abmessungen des Rohrkanals und die wichtigsten Parameter für das Laden des Geschützes (des Ladungsraumes) festgelegt. Als Ausgangswerte für die ballistische Projektierung dienen das *Kaliber* der Waffe und die geforderte *Anfangsgeschwindigkeit* des Geschosses, die in vorausgegangen taktisch-ökonomischen und außenballistischen Untersuchungen festgelegt worden sind und mit denen die größte Effektivität des Schießens unter den gegebenen Voraussetzungen

erreicht wird. Mit der ballistischen Projektierung des Geschützes und der Berechnung des Rohres auf Festigkeit beginnt die *allgemeine Projektierung des Artilleriesystems*.

Auf der Grundlage der theoretischen Erkenntnisse der Inneren Ballistik und unter Berücksichtigung der taktischen, technischen und ökonomischen Möglichkeiten der jeweiligen Etappe der Entwicklung von Wissenschaft und Technik werden solche Methoden der ballistischen Projektierung ausgearbeitet, die Wege und Kriterien für den Erhalt optimaler Lösungen aufzeigen.

Die wichtigsten Etappen der ballistischen Projektierung sind: Auswahl der Ausgangsdaten; Auswahl und Berechnung einzelner Varianten; Einschätzung der Varianten und Auswahl der endgültigen Variante; Erhalt der pyrodynamischen Kurven (für die endgültige Variante), die den verschiedenen Bedingungen der Nutzung der Waffe entsprechen.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts bildete sich die **russische Schule** der ballistischen Projektierung heraus, als deren Begründer *N. F. Drosdow* gilt. Herausragende Modelle von Artilleriegeschützen, die von Vertretern dieser Schule geschaffen wurden, sind: die 3-Zoll-Schnellfeuerkanone (76,2 mm) von 1902; die 12-Zoll-Kanone (305 mm) für Panzerkreuzer des Typs «Sewastopol», Baujahr 1910, sowie die 122-mm-Haubitze 38, die sich bis zur heutigen Zeit in der Bewaffnung befindet. Alle hier genannten Geschütze wurden erfolgreich im Großen Vaterländischen Krieg eingesetzt.

Die Innere Ballistik hilft wesentlich bei der *Modernisierung* vorhandener Artilleriesysteme. In der Geschichte der sowjetischen Artillerie gibt es die Periode der zwanziger Jahre, in der es unter den Bedingungen der ausländischen Intervention und der durch den Krieg zerrütteten Volkswirtschaft sowie durch das Fehlen qualifizierter Kader nicht möglich war, eine Umbewaffnung der Artillerie entsprechend den Erfahrungen des ersten Weltkrieges vorzunehmen. Damals wurde der einzig richtige Weg der Modernisierung der vorhandenen Artilleriesysteme eingeschlagen.

Zur erfolgreichen Durchführung dieses Kurses wurde neben der Bewältigung einer umfangreichen organisatorischen Arbeit im Dezember 1918 in Petrograd ein wissenschaftliches artilleristisches Zentrum – die *Kommission für besondere Artillerieversuche (KOSARTOP)* – gegründet. Während des Bestehens der KOSARTOP (bis 1926) wurden viele Fragen des Schießens der Artillerie, der Inneren und der Äußeren Ballistik untersucht und entschieden,

die wesentlich zur erfolgreichen Modernisierung der Artillerie beitrugen und für viele Jahre die weitere Entwicklung der sowjetischen Artillerie mitbestimmten.

2.4. Ein breiter Interessenbereich von der Projektierung bis zur Nutzung

Die Berechnung der Festigkeit der *Rohre* und seiner Elemente, der *Geschoßkörper* und seiner *Ladung*, der *Führungsringe*, der *Hülsen* sowie der *Teile der Zünder* erfolgt auf der Grundlage der Druckkurve der Pulvergase. Kennt man die Höhe des Druckes im gegebenen Punkt des Rohres zum gegebenen Zeitpunkt, so kann man die aktiven Kräfte ermitteln: die Kraft des Druckes der Pulvergase und die Trägheitskraft des Geschosses hinsichtlich seiner Vorwärtsbewegung, die proportional dem Pulvergasdruck ist.

Zur Berechnung der *Lafette* und ihrer Mechanismen (besonders bei der Projektierung der *Rohrrücklaufbremsen* des Geschützes) stützt man sich auf die Kurven des Druckes der Pulvergase und der Geschwindigkeit des Geschosses als Funktion der Zeit sowie auf einige Charakteristiken des Ausströmprozesses der Pulvergase aus dem Rohrkanal nach dem Abgang des Geschosses. Die Kenntnis der Inneren Ballistik erleichtert in vieler Hinsicht die Projektierung der *automatischen Einrichtungen* moderner automatischer Waffen, z. B. der Lade- und der Abschußeinrichtungen.

Die Hauptteile und Mechanismen der Artilleriezünder werden ebenfalls auf der Grundlage von Angaben der Inneren Ballistik über den Charakter der Bewegung der Geschosse und über die Trägheitskräfte, die auf die Zünderteile im Rohr und nach Verlassen des Rohres einwirken, berechnet.

Die Projektierung der Treibladung stützt sich auf die Abbrandgesetze des Pulvers, die von der Inneren Ballistik erforscht werden. Nur in der Inneren Ballistik werden Hinweise zur Auswahl der Pulversorte, der Formen und Abmessungen der Pulverelemente und zur notwendigen Masse der Treibladung gegeben.

Die Innere Ballistik spielt nicht nur eine wichtige Rolle bei der Projektierung und Berechnung der Artilleriebewaffnung, sondern auch bei der *Erprobung* der einzelnen Waffenmuster. 'Sie gibt die theoretischen Grundlagen für die Methodik der Erprobung der

Pulver und Treibladungen, für die Schaffung der notwendigen Erprobungsbedingungen für Geschütze und Munition, für die Berücksichtigung der Abweichungen der Bedingungen des Schießens von den Normalbedingungen, für die Interpretation der Versuchsergebnisse (einschließlich unnormaler Ergebnisse) bei den Erprobungsschießen usw.

Die Innere Ballistik ist auf das engste mit der *Nutzung* der Bewaffnung verbunden. Sie unterstützt im besonderen die Erhöhung der Treffgenauigkeit des Schießens und die Verringerung der Streuung. Die Theorie der Verbesserungen erlaubt die Berechnung der Veränderung der Mündungsgeschwindigkeit des Geschosses und des maximalen Pulvergasdruckes bei veränderten Bedingungen des Schießens (Geschoßmasse, Temperatur der Treibladung u. a.). Die Kenntnis der Inneren Ballistik hilft, das Feuerregime richtig auszuwählen, Lagerung und Wartung von Geschützen und Munition zu organisieren, besondere Vorkommnisse beim Schießen auszuschließen und damit den Einsatz der Artillerie effektiv und für die eigenen Truppen völlig ungefährlich zu machen.

Die Innere Ballistik ist auch eng mit den *anderen artilleristischen Wissenschaften* wie der Theorie und Projektierung der Geschütze und Munition, der Theorie der Pulver und Sprengstoffe, der Äußeren Ballistik und der Theorie des Schießens verbunden. Indem sie die Prozesse untersucht, die in einer Waffe beim Abschuß vor sich gehen, nimmt sie eine führende Stellung inmitten dieser Wissenschaften ein. Ihrerseits erhält sie von den anderen Wissenschaften neue Aufgaben gestellt, die sie ständig zur weiteren Erforschung bestimmter Prozesse und Untersuchung neuer Versuchsergebnisse anregt.

Ihrem Gehalt nach ist die Innere Ballistik eine experimentell-theoretische Wissenschaft. Wegen der Kompliziertheit der zu untersuchenden Prozesse kommt in ihr dem Experiment eine führende Rolle zu; in Verbindung damit steht aber auch die breite Anwendung der Erkenntnisse und Methoden der Mathematik.

Die Innere Ballistik unterscheidet **direkte** und **umgekehrte (inverse) Aufgaben**. Die *direkte Aufgabe* besteht im Finden der pyrodynamischen Elemente entsprechend den vorgegebenen konstruktiven Angaben und Ladungsbedingungen des Geschützes. Die *inverse Aufgabe* besteht im Festlegen der konstruktiven Angaben und der Ladungsbedingungen bei vorgegebenen pyrodynamischen

Parametern. Die Projektierung und die Modernisierung von Geschützen sind inverse Aufgaben in diesem Sinne.
Die Berechnung der pyrodynamischen Diagramme wird als *Hauptaufgabe der Pyrodynamik* bezeichnet.

3. Der Schußvorgang

3.1. Fünf Perioden in Bruchteilen einer Sekunde

Der Begriff «Schuß» hat in der Artillerie mehrfache Bedeutung und bezeichnet:

- die Gesamtheit aller Vorgänge, die im Rohr der Waffe ablaufen;
- einen vollständigen Munitions«satz», der für einen Abschluß notwendig ist (also ein komplettes Geschöß mit Zünder sowie die Hülse mit Treibladung und Schlagzündschraube);
- den Moment des Austrittes des Geschosses aus dem Rohrkanal der Waffe.

In der Inneren Ballistik wird der Begriff des Schusses in seiner ersten Bedeutung verwendet.

Als Schußvorgang bezeichnen wir die Gesamtheit der mechanischen, physikalischen, chemischen, thermodynamischen und gasdynamischen Prozesse, die im Geschütz vom Moment der Entzündung der Treibladung bis zum Zeitpunkt der Beendigung des Ausströmens der Pulvergase aus dem Rohrkanal (nach dem Austritt des Geschosses) ablaufen.

Der Schußvorgang wird durch seine *kurze Zeitdauer* und durch seine Kompliziertheit charakterisiert. Er läuft in Zehnteln, ja in Hundertsteln einer Sekunde ab, wobei in dieser kurzen Zeit eine Vielzahl verschiedenartiger Prozesse, die wiederum miteinander verbunden sind, stattfinden.

Während dieser kurzen Zeit entwickeln sich Drücke von mehreren tausend Kilopond pro Quadratcentimeter, werden hohe Temperaturen bis zu 3000 °C erreicht. Diese extremen Bedingungen erschweren das Studium des Schußvorganges.

Ungeachtet seiner kurzen Zeitdauer wird der Schußvorgang in fünf aufeinanderfolgende Perioden eingeteilt⁵:

1. Die **Vorperiode oder pyrostatiche Periode** – vom Moment der Entzündung der Treibladung bis zum Moment des Beginns der Geschößbewegung.

⁵ Diese Einteilung weicht von der in der Literatur sonst üblichen Einteilung in drei bzw. vier Perioden ab. (Anmerk. d. Übers.)

2. Die **Einpreßperiode** – vom Moment des Beginns der Geschößbewegung bis zum Moment des völligen Einschneidens der Führungsringe in die Züge des Rohres.
3. Die **pyrodynamische Periode** – vom Moment des völligen Einschneidens der Führungsringe bis zum Moment der Beendigung des Pulverabbrandes.
4. Die **thermodynamische Periode** – vom Moment der Beendigung des Pulverabbrandes bis zum Moment des Austrittes des Geschößbodens aus dem Mündungsquerschnitt des Rohres.
5. Die **Periode der Nachwirkung** – vom Moment des Geschößaustrittes bis zum Ende der Gasausströmung aus dem Rohr.

In Artilleriegeschützen sind in der Regel alle aufgezählten Perioden zu beobachten, und nur in den seltenen Fällen, in denen der Abbrand des Pulvers erst nach dem Geschößaustritt beendet ist, fehlt die thermodynamische Periode. In Granatwerfern fehlt gewöhnlich die Einpreßperiode.

3.2. Haupt- und zweitrangige Prozesse

Der Schußvorgang schließt folgende Prozesse ein:

- die Entzündung des Pulvers,
- den Abbrand des Pulvers,
- die Bildung der Pulvergase,
- das Einschneiden der Führungsringe in die Züge,
- die Vorwärtsbewegung des Geschosses,
- die Reibung der Führungsringe über die Oberfläche des Rohrkanals,
- die Drehbewegung des Geschosses,
- die Ausdehnung der Pulvergase,
- die Bewegung der Pulvergase,
- die Bewegung der Elemente der Treibladung,
- die Veränderung der Zusammensetzung der Pulvergase,
- die Wärmeübertragung von den Pulvergasen an die Rohrwandung,
- die Erwärmung des Rohres,
- die Deformation des Rohres, des Geschosses, der Hülse,
- den Verschleiß und den Ausbrand des Rohrkanals,
- die Verdrängung der Luft aus dem Rohrkanal,
- die Bewegung der rücklaufenden Teile des Geschützes,

- das Ausströmen der Pulvergase aus dem Rohrkanal,
- die Bildung des Mündungsknalls,
- die Bildung der Mündungsflamme.

Würde man diese Aufzählung der Prozesse, die in einem Artilleriesystem beim Abschluß ablaufen, verdoppeln, wären allerdings noch nicht alle Prozesse genannt, die bei einem Schußvorgang möglich sind. Diese Bemerkung gilt besonders für spezielle Systeme wie Granatwerfer, rückstoßfreie Geschütze, Leichtgasgeschütze u. a.

Die aufgezählten Prozesse können sowohl in einer als auch über mehrere Perioden des Schußvorganges verlaufen. So erfolgt die Entzündung des Pulvers in der Vorperiode, das Einschneiden der Führungsringe in der Einpreßperiode, die Bildung der Mündungsflamme in der Periode der Nachwirkung. Die Bewegung der Pulvergase erstreckt sich über vier Perioden – die Einpreßperiode, die pyrodynamische und die thermodynamische Periode sowie über die Periode der Nachwirkung. Die größte Anzahl von Prozessen läuft während der pyrodynamischen Periode ab, welche deshalb die für den Schußvorgang komplizierteste und charakteristischste ist.

Die aufgezählten Prozesse sind nicht gleichwertig für die Lösung der Hauptaufgabe der Pyrodynamik, d. h. für die Untersuchung der Geschößbewegung im Rohr. Zu den hauptsächlichsten Prozessen gehören

- der Abbrand des Pulvers,
- die Bildung der Pulvergase,
- die Ausdehnung der Pulvergase,
- die Vorwärtsbewegung des Geschosses und
- das Ausströmen der Pulvergase aus dem Rohrkanal.

Diese Prozesse werden in der Inneren Ballistik ausführlich untersucht.

Es muß gesagt werden, daß der Pulverabbrand anfangs in einem konstanten Verbrennungsraum und dann, vom Moment des Beginns der Geschößbewegung an, in einem veränderlichen Verbrennungsraum vor sich geht; die Ausdehnung der Pulvergase erfolgt sowohl während des Pulverabbrandes als auch danach.

Diejenigen Prozesse, die nicht zu den Hauptprozessen gehören, werden in der Inneren Ballistik, auch wenn sie, für sich gesehen, bedeutungsvoll sind, nur soweit untersucht, wie sie zur Beurteilung des Charakters der Geschößbewegung beitragen können. Sie werden als **zweitrangige Prozesse** bezeichnet.

3.3. Alles beginnt mit dem Abbrand des Pulvers

Die wichtigsten Erkenntnisse über den Abbrand des Pulvers wurden auf dem Wege des Experimentes gewonnen.

Wenn einem Pulver in irgendeinem Punkt seiner Oberfläche (z. B. mit einem glühenden Draht) eine Wärmeimpuls übertragen wird und die Pulvertemperatur in diesem Punkt 200 bis 270 °C erreicht, so entzündet sich das Pulver. Im weiteren beginnt ein spontaner Prozeß der Entflammung und des Abbrandes⁶ des Pulvers, ein Prozeß der Ausbreitung der chemisch-explosiven Umsetzung längs der Oberfläche und in die Tiefe des Pulverkörpers.

Die frühesten Untersuchungen bestanden in der Entzündung von Schwarzpulver, das in die Form von Tabletten oder stabförmig in Metallröhren gepreßt worden war. Durch Abbrandversuche in der freien Atmosphäre wurde festgestellt, daß Schwarzpulver bei einer Dichte, die größer als 1,8 kg/dm³ ist, gleichmäßig in parallelen Schichten unter Beibehaltung der Form der Pulverkörper abbrennt. Diese Beobachtung konnte später auch an rauchschwachen Pulvern gemacht werden.

Bild 4 zeigt Querschnitte durch Pulverkörper (Körner) bis zur Entzündung (gestrichelte Linie) und während des Abbrandes (durchgehende Linie). Theoretisch brennt von allen Punkten der Pulverkörperoberfläche her eine gleich dicke Pulverschicht (sie wird mit e bezeichnet) ab. Dabei bleibt die anfängliche Form des Pulverkörpers (z. B. Röhrenpulver b oder Siebenkanalpulver c bis zum Moment des Zerfalls) erhalten. In dem Moment, in dem sich die brennenden Oberflächen des Siebenkanalpulvers (äußere und innere Oberflächen) berühren, zerfällt das Korn in 12 sternförmige Reststücke. Damit ändert sich die ursprüngliche Pulverform.

Das kleinste Maß $2e_1$, das die Dicke eines Pulverkorns charakterisiert, heißt **Wandstärke des Pulvers** oder **Brenndicke**.

Als bei den ersten Experimenten die Zeit des Abbrandes untersucht wurde, stellte man fest, daß diese proportional der Länge des Pulverstabes bzw. der Dicke der Pulvertablette ist.

Teilt man die Länge eines Pulverstabes (wenn er nur von einer

⁶ In der deutschsprachigen Literatur ist auch der Terminus «Verbrennung» gebräuchlich. Mit dem Terminus «Abbrand» soll der besondere Verlauf der Pulververbrennung betont werden.

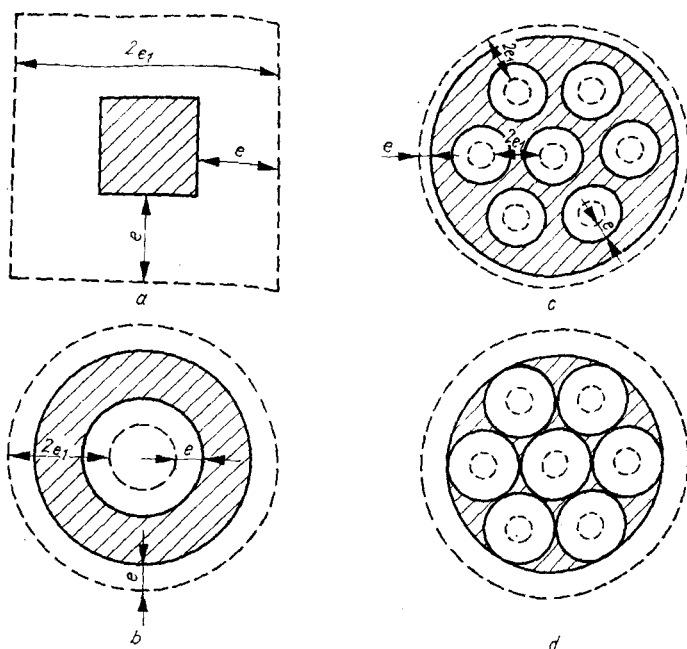


Bild 4 Pulverabbrand in parallelen Schichten
 a – quadratisches Streifenpulver; b – Röhrenpulver; c – Siebenkanalpulver vor dem Zerfall; d – Siebenkanalpulver im Moment des Zerfalls

Seite her abbrennt) oder die halbe Dicke einer Pulvertablette (da sie von beiden Seiten her abbrennt) durch die Dauer des Abbrandvorganges, so erhält man die Abbrandgeschwindigkeit unter den gegebenen Bedingungen. Verändert man die Versuchsbedingungen, so kann man die Abhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit von verschiedenen Faktoren studieren. Es stellte sich heraus, daß sich die Abbrandgeschwindigkeit des Pulvers mit Änderung seiner Zusammensetzung, Dichte, Feuchte und Temperatur verändert. Im Mittel beträgt die Abbrandgeschwindigkeit von Schwarzpulver in der freien Atmosphäre 10 mm/s.

Einfache Berechnungen haben gezeigt, daß bei einer solchen Abbrandgeschwindigkeit das Pulver im Geschütz (bei einer realen

Zeit t_d) nicht vollständig verbrennen könnte. Allerdings beobachtet man beim Schießen keinen Auswurf nichtverbrannten Pulvers. Das heißt aber, daß die Abbrandgeschwindigkeit des Pulvers im Geschütz größer sein muß als in der freien Atmosphäre; der Grund dafür könnte im hohen Druck der Pulvergase liegen.

Um die Abhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit vom Druck bestätigt zu bekommen, stiegen unermüdliche Forscher auf Berggipfel, um dort Pulverproben abzubrennen. Tabelle 4 enthält die Abbrandzeiten für 400 mm lange Schwarzpulverstäbe in 4000 m Höhe über dem Meeresspiegel. Mit Zunahme der Höhe bzw. mit Verringerung des barometrischen Druckes nimmt die Abbrandzeit zu und die Abbrandgeschwindigkeit ab.

Tabelle 4

Barometrischer Druck in mm Hg	Abbrandzeit in s
740,0	35,0
694,1	36,1
610,4	39,0
529,4	44,0

Später wurden zur Untersuchung des Pulverabbrandes unter hohem Druck sogenannte «Bomben» für gleichbleibenden Druck konstruiert. Das sind starkwandige Stahlgefäße, die über Ventile und Düsen einen gleichbleibend hohen Verbrennungsgasdruck gewährleisten.

3.4. Die Abbrandgesetze des Pulvers

Eines der wichtigsten Geräte der experimentellen Inneren Ballistik ist die manometrische Bombe, die ihre Bezeichnung dafür erhielt, daß der Pulvergasdruck in ihr mit Manometern gemessen wird. Beim Abbrand von Pulver im konstanten Verbrennungsraum der manometrischen Bombe, d. h. unter pyrostatischen Bedingungen, wächst der Druck vom normalen Luftdruck an bis zu einem Höchstwert in dem Moment, in dem das Pulver vollständig abgebrannt ist. Dieser Höchstwert ist der volle pyrostatische Druck p_{max} . Die Kurve des Druckes in der manometrischen Bombe wird zusammen mit einem Zeitmaßstab in Form einer Sinusschwingung

auf einen geschwärzten Papierstreifen aufgezeichnet. Die Länge l_t einer Schwingung entspricht einer bestimmten Zeit t (z. B. in Millisekunden). Rechnet man die Druckkurve mit diesem Zeitmaßstab um, so erhält man die Abhängigkeit des Pulvergasdruckes in der manometrischen Bombe von der Zeit, deren Analyse verschiedene Einschätzungen des Pulverabbrandes erlaubt. Im Geschütz ist der Druckverlauf während Vor- und Einpreßperiode dem in der Bombe gleichzusetzen.

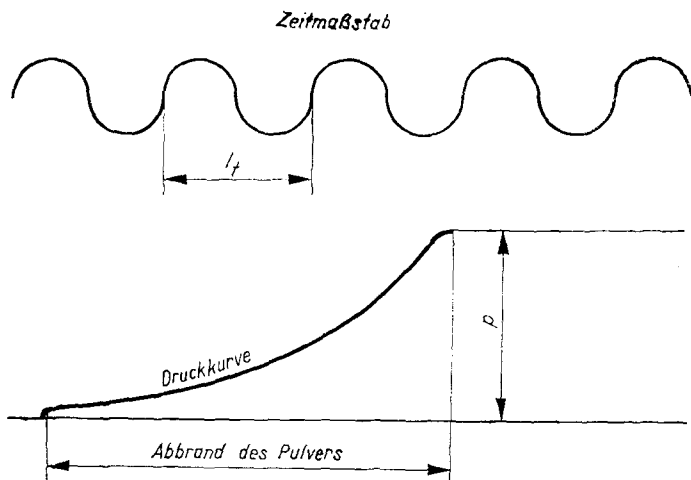


Bild 5 Druckkurve in der manometrischen Bombe

Zahlreiche Versuche haben ergeben, daß der volle pyrostatische Druck nur von der Pulversorte und von der Ladedichte, nicht aber von Form und Abmessungen der Pulverkörper oder von den Abmessungen der manometrischen Bombe abhängt. Unter der **Ladedichte** Δ versteht man das Verhältnis der *Pulvermasse* m_L in Kilogramm zum Inhalt des Ladungsraumes (der Bombe) V_0 in Litern. Die Formel für den vollen pyrostatischen Druck lautet:

$$p_{\max} = \frac{f\Delta}{1 - \alpha\Delta}$$

$$\Delta = \frac{m_L}{V_0}$$

f

α

Ladedichte

Pulverkraft

Kovolumen der Pulvergase

Die **Pulverkraft** f charakterisiert die Arbeitsfähigkeit des Pulvers. Je größer f , desto größer sind die energetischen Möglichkeiten des Pulvers – die Temperatur der Pulvergase und die Arbeit, die von 1 kg Pulvergase geleistet werden kann. Dabei nimmt man zu Berechnungszwecken an, daß die Pulvergasausdehnung ein isobarer Prozeß sei, der bei normalem Luftdruck abläuft.

Das **Kovolumen der Gase** α charakterisiert das Volumen, das von den Molekülen eines Kilogramms Pulvergase eingenommen wird. Aus der Formel ist ersichtlich, daß p_{\max} mit der Erhöhung der Ladedichte (z. B. bei der Vergrößerung der Treibladungsmasse bei gleichbleibendem Ladungsraumvolumen) immer stärker ansteigt und bei $\Delta = \frac{1}{\alpha}$ nach unendlich strebt, da in diesem Falle

der Nenner gleich Null wird. So würde z. B. in der 122-mm-Haubitze 38 bei voller Ladung ein Druck von 20000 kp/cm² erreicht, wenn die gesamte Treibladung bereits bis zum Beginn der Geschößbewegung abgebrannt sein würde.

Wenn in der manometrischen Bombe für zwei verschiedene Ladedichten der volle pyrostatische Druck ermittelt wird, so lassen sich über die Formel für p_{\max} die Pulverkraft f und das Kovolumen α als experimentelle ballistische Charakteristiken des Pulvers ermitteln.

Wenn einerseits die Größe des vollen pyrostatischen Druckes nicht von der Form und den Abmessungen der Pulverkörper abhängt, so ist das andererseits für den Verlauf der Druckkurve typisch. So verhalten sich z. B. die Abbrandzeiten geometrisch ähnlicher Pulverkörper, die sich nur in ihren Abmessungen unterscheiden, genauso wie deren Wandstärken $2e_1$. Die Fläche unter der Druckkurve (Druck in kp/cm², Zeit in s) ist zahlenmäßig gleich dem **Druckimpuls** I_k . Die Größe von I_k , die auf experimentellem Wege in der manometrischen Bombe ermittelt wird, ist eine der Hauptcharakteristiken des Pulverabbrandes, die auf den Schußvorgang in der Waffe übertragen werden kann.

Für eine bestimmte Pulversorte mit einer vorgegebenen Form der Pulverkörper wächst die Größe des Druckimpulses I_k mit der Zunahme der Wandstärke an. Für die Pulver, die in der Artillerie verwendet werden, beträgt I_k von 300 bis 2500 kp s/dm₂.

Der Abbrandprozeß des Pulvers wird durch das *Gesetz der Abbrandgeschwindigkeit* charakterisiert. Darunter versteht man die Abhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit u vom Druck der

Pulvergase. Bei den hohen Drücken, die in Artilleriegeschützen üblich sind, gilt folgende lineare Abhängigkeit:

$$u = u_1 p.$$

u_1 Proportionalitätsfaktor (Koeffizient der Abbrandgeschwindigkeit)

p Druck der Pulvergase

Wie wir sehen, ist die Abbrandgeschwindigkeit des Pulvers im Geschütz direkt proportional dem Druck der Pulvergase. Die Größe u_1 ist somit gleich der Abbrandgeschwindigkeit des Pulvers (in mm/s) bei einem Druck von 1 kp/cm², d. h. in der freien Atmosphäre.

In Tabelle 5 sind die Charakteristiken f , α , u_1 und u für einige Pulverarten bei einem Druck von 2000 kp/cm² aufgeführt.

Tabelle 5

Pulverart	Pulverkraft f	Kovolumen α der Pulvergase	Koeffizient der linearen Abbrandgeschwindigkeit u_1	lineare Abbrandgeschwindigkeit u bei
				$p = 2000 \text{ kp/cm}^2$ in mm/s
	in kpm/kg	in m ³ /kg	in mms ⁻¹ /at	
Schwarzpulver	28000	$0,50 \cdot 10^{-3}$	1,00	2000
Pyroxilinpulver	95000	$1,00 \cdot 10^{-3}$	0,07	140
Nitroglyzerinpulver	100000	$0,95 \cdot 10^{-3}$	0,20	400
Nitrodiglykolpulver	87000	$1,13 \cdot 10^{-3}$	0,04	80
Nitroguanidinpulver	90700	$1,06 \cdot 10^{-3}$	0,06	120

Der Koeffizient der Abbrandgeschwindigkeit u_1 hängt von allen Faktoren (außer dem Druck) ab, die Einfluß auf die Abbrandgeschwindigkeit des Pulvers haben. Für rauchschwache Pulver sind solche Faktoren die Zusammensetzung (Tabelle 2) sowie Feuchtigkeit und Temperatur des Pulvers. Die letzten beiden Faktoren hängen von den Lagerbedingungen des Pulvers ab.

Mit der Vergrößerung des Feuchtigkeitsgehaltes von Pyroxilinpulver um 1% verringert sich deren Koeffizient u_1 um 13%; mit der Erhöhung der Pulvertemperatur um 10 °C vergrößert sich u_1 um 1,6%.

Bei theoretischen Untersuchungen zum Pulverabbrand greift man auf das sogenannte *geometrische Abbrandgesetz* zurück, das folgendes annimmt:

- alle Pulverkörper (Körner) der Treibladung sind gleich in Form und Abmessungen;
- die Entzündung aller Pulverkörper der Ladung erfolgt augenblicklich;
- der Pulverabbrand erfolgt in parallelen Schichten.

Das geometrische Gesetz ist nur eine angenäherte Widerspiegelung des wirklichen, des physikalischen Abbrandgesetzes.

3.5. Die Bildung der Pulvergase

Im Ergebnis des Pulverabbrandes bilden sich die Pulvergase, wobei die Masse der gebildeten Gase bei rauchschwachen Pulvern gleich der Masse des abgebrannten Pulvers $m_{L,ab}$ ist.

Bezeichnet man die **relative Masse des abgebrannten Pulvers** mit y , so ist

$$y = \frac{m_{L,ab}}{m_L}.$$

Dabei ändert sich y von Null im Moment der Entzündung ($m_{L,ab} = 0$) bis Eins im Abbrandschluß ($m_{L,ab} = m_L$).

Die **relative Wandstärke des abgebrannten Pulvers** wird mit

$$z = \frac{e}{e_1}$$

bezeichnet. Sie ändert sich in denselben Grenzen wie y .

Da die Pulvergase die Träger der Wärmeenergie sind, muß zur Bestimmung der energetischen Möglichkeiten des Geschützes der Zuwachs an Pulvergasen, d. h. die in der Zeiteinheit gebildete Gasmenge, bekannt sein.

Angenommen, in einem bestimmten Moment ist die brennende Oberfläche einer Pulverladung gleich S (Bild 6), und in einer bestimmten Zeiteinheit (z. B. in einer Mikrosekunde) brennt von der Oberfläche eine Pulverschicht mit der Stärke Δe^7 ab. Dann bestimmt man die Menge der in der Zeiteinheit gebildeten Pulver-

⁷ Das Symbol Δ wird hier und im folgenden für die Veränderung der für den Abbrand charakteristischen Größen eingesetzt.

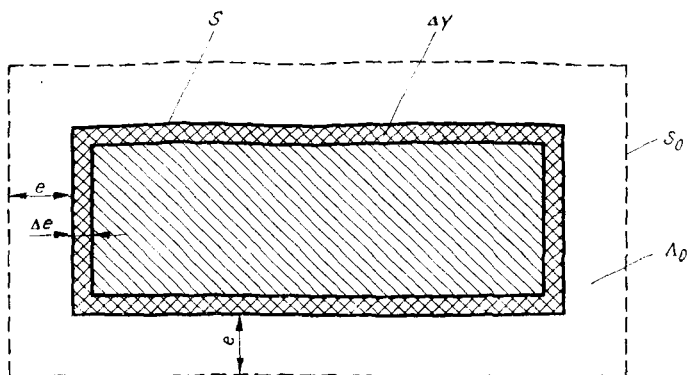


Bild 6 Bildung der Pulvergase

gase $\Delta m_{L,ab}$, indem man die **Pulverdichte** δ mit dem Schichtvolumen des in dieser Zeit abgebrannten Pulvers multipliziert:

$$\Delta m_{L,ab} = \delta S \Delta e.$$

Wir gehen zu **relativen Größen** des Zuwachses an Pulvergase und der abgebrannten Pulverschicht über:

$$\Delta y = \frac{\Delta m_{L,ab}}{m_L},$$

$$\Delta z = \frac{\Delta e}{e_1}.$$

Diese Größen haben den Vorteil, daß sie unabhängig von der Ladungsmasse sind.

Durch Substitution erhält man die Gleichung

$$\Delta y = S \frac{\delta e_1}{m_L} \Delta z,$$

die man verbal so ausdrücken kann: *Der relative Zuwachs an Pulvergase Δy ist proportional der relativen Zunahme der abgebrannten Pulverschicht Δz .*

Wir bezeichnen die **anfängliche Abbrandoberfläche des Pulvers** mit S_0 und führen die Größe σ ein, die **Formfunktion** des Pulverkörpers heißt:

$$\sigma = \frac{S}{S_0}.$$

Ändert sich im Verlaufe des Pulverabbrandes die Oberfläche nicht ($S = S_0$ und $\sigma = 1$), so wird das Pulver als *neutral* bezeichnet. Nimmt die Abbrandoberfläche ab ($\sigma < 1$), so heißt das Pulver *degressiv*, im umgekehrten Falle ($\sigma > 1$) wird es als *progressiv* bezeichnet.

Eine **neutrale Pulverform** hat Röhrenpulver mit gepanzerten (nichtbrennenden) Stirnflächen. Gewöhnliches Röhrenpulver kommt dieser Form nahe. **Degressive Pulverformen** sind Kugeln, Würfel, Plättchen, Streifen, Stangen u. ä. Eine **progressive Pulverform** hat z. B. ein Röhrenpulver, dessen äußere Oberflächen gepanzert sind und das nur von innen her abbrennt. Erhält der Pulverkörper anstelle nur eines Kanals eine Vielzahl von Kanälen, so wird er auch ohne Panzerung der äußeren Oberfläche progressiv abbrennen.

Der bekannte russische Pulverchemiker *G. P. Kisnemski* schlug ein progressives Pulver in Form einer quadratischen Säule mit quadratischen Kanälen vor. Theoretisch müßte ein solches Pulver eine hohe Progressivität aufweisen. Allerdings zeigt es sich im Experiment, daß die Kanäle ihre Form im Verlaufe des Abbrandes verändern, indem sie sich in den Ecken abrunden. Deshalb zerfallen die Pulverkörper zum Ende des Abbrandes hin in degressiv brennende Stangen, deren Masse etwa 10% der anfänglichen Pulvermasse beträgt.

Mit einem ähnlichen Zerfall brennen die Siebenkanalpulver ab. Anfangs brennen sie progressiv, nach ihrem Zerfall in 12 Reststangen (mit mehr als 15% der Ausgangsmasse) sind sie degressiv.

Daraus folgt, daß die Pulverform von erheblichem Einfluß auf die Bildung der Pulvergase ist.

Wir kehren zu der Gleichung für den relativen Zuwachs der Pulvergase zurück und schreiben sie in folgender Form:

$$\Delta y = \sigma \kappa \Delta z,$$

worin

$$\kappa = \frac{\delta e_1 S_0}{m_L}$$

ist.

Berücksichtigt man, daß das Verhältnis der Masse der Treibladung m_L zur Dichte des Pulvers gleich dem Volumen A_0 (Bild 6)

zum Abbrandbeginn ist, so zeigt es sich, daß κ nur von geometrischen Parametern abhängt:

$$\kappa = \frac{e_1 S_0}{A_0}.$$

Diese Größe charakterisiert die Form des Pulvers und heißt deshalb auch **Formfaktor**. Zahlenmäßig ist κ gleich dem Verhältnis einer angenommenen Platte mit der Stärke e_1 und der Seitenfläche S_0 zum wirklichen Pulvervolumen A_0 .

In Tabelle 6 sind die Größen von κ und eines anderen Formfaktors λ für verschiedene Pulverformen aufgeführt.

Tabelle 6

Pulverform	Nr. der Kurve in Bild 7	κ	λ
Würfel, Kugel	1	2,50	-- 0,60
Streifen	2	1,06	-- 0,06
Röhre	3	1,007	-- 0,007
Röhre, außen gepanzert	4	0,67	0,50
Siebenkanalpulver:	5		
- bis zum Zerfall		1,10	0,31
- nach dem Zerfall		1,88	-- 0,47

Neutrale Pulverformen ändern ihre Abbrandoberfläche nicht, folglich gilt für sie: $\sigma = 1$; $\kappa = 1$ und $\lambda = 0$. Das bedeutet, daß der relative Zuwachs an Pulvergasen zahlenmäßig gleich der Änderung der relativen Wandstärke des abgebrannten Pulvers ist. Wenn z. B. ein solches Pulver um ein Zehntel seiner Wandstärke abbrennt, so wird dabei ein Zehntel der gesamten Pulvergasmenge gebildet.

Wir stellen die Abhängigkeit der relativen Masse des abgebrannten Pulvers y zur relativen abgebrannten Wandstärke z grafisch dar. Zum Abbrandbeginn im Punkt O (Bild 7) gilt für alle Pulverformen: $z = 0$ und $y = 0$. Im Abbrandschlußpunkt K gilt: $z = 1$ und $y = 1$. Für **neutrale** Pulver verläuft die Abhängigkeit in Form einer Geraden vom Punkt O zum Punkt K , da, wie schon festgestellt wurde, Δz und Δy gleich sind. Für **degressive** Pulver verlaufen die Kurven oberhalb der Geraden OK ⁸ mit einer Krüm-

8 In Bild 7 fällt die Kurve 3 faktisch mit der Linie OK zusammen, da Röhrenpulver praktisch als neutral betrachtet werden kann.

mung nach oben (Kurven 1, 2 und 3), für progressive Pulver, darunter, mit einer Krümmung nach unten (Kurve 4). Die Kurve 5 für Siebenkanalpulver ist von kombinierter Form: Ihr erster Abschnitt ist nach unten, der zweite Abschnitt nach oben gekrümmt.

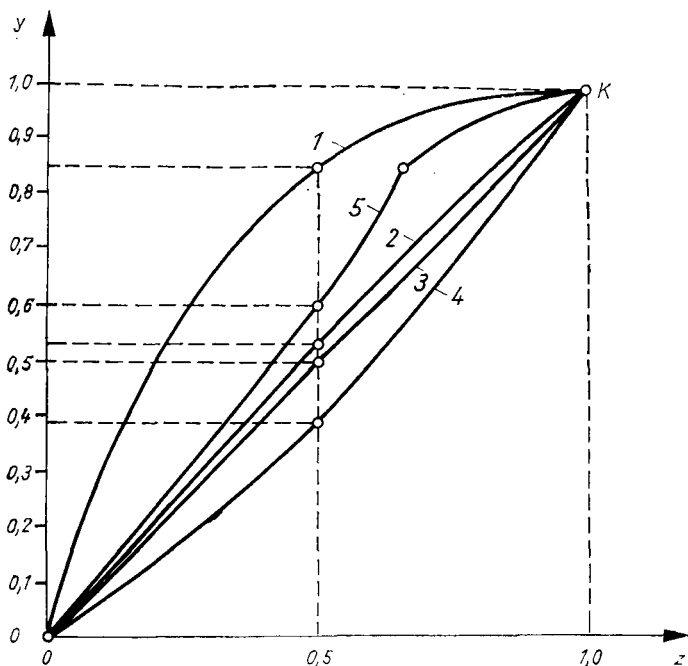


Bild 7 Grafische Darstellung des Gesetzes der Bildung der Pulvergase

Die Abhängigkeit des y von z heißt *Bildungsgesetz der Pulvergase*. Ausgehend von geometrischen Überlegungen kann es für alle in der Artillerie gebräuchlichen Pulver durch folgende Formel analytisch ausgedrückt werden:

$$y = \kappa z (1 + \lambda z).$$

Diese Gleichung charakterisiert die Veränderung des Zuwachses der Gase beim Pulverabbrand. Bild 7 zeigt, daß degressive Pulver im ersten Moment mehr Gase erzeugen als progressive. Zum Abbrandschluß hin kehrt sich das Bild um. So haben sich bei

$z = 0,5$, also wenn das Pulver zur Hälfte der Wandstärke abgebrannt ist, bei Würfelpulver 85%, bei ungepanzertem Röhrenpulver mehr als 50% und bei außen gepanzertem Röhrenpulver etwa 40% der Pulvergase gebildet.

Für Geschütze sind progressive Pulver vorteilhafter, da sich der Hauptanteil der Pulvergase dann bildet, wenn das Geschöß schon einen bestimmten Weg zurückgelegt hat (damit ist der maximale Gasdruck nicht so hoch).

3.6. Die Pulvergase leisten Arbeit

Bei der Bewegung des Geschosses im Rohrkanal vollzieht sich die Ausdehnung der Pulvergase und damit ein thermodynamischer Prozeß der Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit.

Infolge der Kurzzeitigkeit des Schußvorganges darf man annehmen, daß ein Wärmeaustausch zwischen den Gasen und den sie einschließenden Teilen während des Ausdehnungsvorganges nicht stattfindet. Bei dieser Einschränkung erhält man eine Gleichung der adiabatischen Ausdehnung der Pulvergase im Geschütz, die als **Grundgleichung der Pyrodynamik** bezeichnet wird:

$$\frac{sp(l_y + l)}{\Theta} = \frac{fm_L y}{\Theta} - \frac{\varphi m_G v^2}{2}.$$

Die Grundgleichung der Pyrodynamik widerspiegelt das *Energieerhaltungsgesetz beim Schuß*. Es gilt für einen beliebigen Moment, in dem der Anteil y der Ladung abgebrannt ist, das Geschöß den Weg l zurückgelegt hat und eine Geschwindigkeit v aufweist.

Die rechte Seite der Gleichung ist die Differenz zwischen der Wärmeenergie der bereits gebildeten Pulvergase vor ihrer Ausdehnung (ausgedrückt in der Einheit der Arbeit kpm) und der mechanischen Arbeit, die diese Gase in dem betrachteten Zeitmoment geleistet haben.

Wenn die Pulverkraft f das Arbeitsvermögen von 1 kg Pulver in einem isobaren Prozeß darstellt, so drückt das Produkt fm_L das Arbeitsvermögen der Treibladung mit der Masse m_L und das Produkt $fm_L y$ das Arbeitsvermögen des abgebrannten Ladungsanteils aus.

Bei einem isobaren Prozeß wird ein Teil der Energie, die beim Pulverabbrand frei wird, für die Aufrechterhaltung eines gleichbleibenden Druckes aufgewendet. Beim adiabatischen Prozeß wird

alle Wärme in Arbeit umgesetzt. Deshalb teilt man bei der Ermittlung der Wärmeenergie im Geschütz das Produkt $fm_{L,y}$ durch einen **Ausdehnungsparameter** θ . Dieser Parameter ist zahlenmäßig gleich dem Verhältnis der Ausdehnungsarbeiten der Gase beim isobaren und beim adiabatischen Prozeß. Für die im Geschütz entstehenden Pulvergase beträgt er im Mittel 0,20; die Ausdehnungsarbeit beim isobaren Prozeß beträgt also etwa 20% der Arbeit beim adiabatischen Prozeß.

Die Hauptarbeit, die die Pulvergase bei ihrer Ausdehnung leisten, besteht darin, das Geschöß in eine Vorwärtsbewegung zu versetzen.

Zahlenmäßig ist diese Arbeit gleich der kinetischen Energie $m_G v^2/2$ des Geschosses mit der Masse m_G und der Geschwindigkeit v .

Außer der Hauptarbeit leisten die Pulvergase zweitrangige Arbeiten, die bei der Untersuchung der Geschößbewegung berücksichtigt werden müssen. Solche zweitrangige Arbeiten sind:

- die Übertragung der Rotationsenergie auf das Geschöß;
- die Überwindung der Reibung zwischen dem Führungsring (dem Geschößmantel) und dem Rohr;
- die Bewegung der Pulvergase;
- die Bewegung der rücklaufenden Teile des Geschützes.

Die zweitrangigen Arbeiten sind im Vergleich zur Hauptarbeit geringfügig und werden daher mittels eines **Koeffizienten der zweitrangigen Arbeiten** φ berücksichtigt. Die Größe von φ gibt an, mit welchem Faktor die Hauptarbeit multipliziert werden muß, damit die zweitrangigen Arbeiten mit berücksichtigt werden. Damit ist $\varphi m_G v^2/2$ gleichbedeutend mit der Summe aller bei der Untersuchung der Geschößbewegung berücksichtigten Arbeiten.

Tabelle 7 enthält einige Angaben über die zweitrangigen Arbeiten für Kanonen und Haubitzen. Aus ihr ist zu entnehmen, daß die zweitrangigen Arbeiten bei Kanonen 15% ($\varphi = 1,15$), bei Haubitzen 8% ($\varphi = 1,08$) der Hauptarbeit betragen. Die größte ist die zweitrangige Arbeit, die für die Bewegung der Pulvergase und der (bis zum betrachteten Moment) noch nicht abgebrannten Pulverteile geleistet wird. Zur Verringerung dieser Arbeit werden im Ausland Versuche mit sogenannten Leichtgaskanonen angestellt, in denen die Geschosse nicht durch die Pulvergase, sondern mittels leichter Gase (Wasserstoff oder Helium) in Bewegung versetzt werden. Diese Gase werden ihrerseits beim Abschuß von einem durch Pulvergase angetriebenen Kolben zusammengepreßt.

Tabelle 7

Geschütz	Anteil der zweitrangigen Arbeiten in % der Hauptarbeit des Geschützes				Koeffizient zur Berücksichtigung der zweitrangigen Arbeiten φ
	Drall der Granate	Reibung im Rohr	Bewegung Rohr- der Pul- vergase	Rohr- rücklauf	
100-mm- Kanone	0,6	1,2	11,2	1,9	1,15
152-mm- Haubitze	1,4	1,3	3,0	2,6	1,08

Auf der linken Seite der Hauptgleichung der Pyrodynamik steht in Übereinstimmung mit dem Gesetz der Erhaltung der Energie die Wärmeenergie der gebildeten Pulvergase *nach* ihrer Ausdehnung, ausgedrückt in der Einheit der Arbeit. Zahlenmäßig ist sie gleich der Arbeit der isobaren Ausdehnung der Gase von einem Volumen, das dem ihrer Moleküle entspricht, bis zu einem Volumen $sp (l_y + l)$, das von den Gasen eingenommen wird und durch den Parameter Θ zu teilen ist. Die veränderliche Größe l_y heißt **reduzierte Länge des freien Volumens des Ladungsraumes**.

Die Grundgleichung der Pyrodynamik dient zur Bestimmung der Größe des Pulvergasdruckes im Rohr der Waffe.

3.7. Die Bewegung des Geschosses im Rohr

Die Vorwärtsbewegung des Geschosses im Rohr erfolgt nach den Gesetzen der Mechanik für die geradlinige beschleunigte Bewegung eines Massepunktes. Das Produkt aus Geschossmasse und **Geschosßbeschleunigung** a muß daher gleich der Summe aller Kräfte sein, die längs der Rohrachse auf das Geschosß einwirken.

Die Vorwärtsbewegung des Geschosses in bezug auf das Rohr kann man in vereinfachter Form so schreiben:

$$\varphi m_G a = sp.$$

Die Vereinfachungen beziehen sich vor allem auf die Berücksichtigung der auf das Geschosß einwirkenden Kräfte. Die bewegende Kraft ist der Druck der Pulvergase auf den Geschosßboden, der gleich dem Produkt des Druckes p_{Gb} und der Rohrquerschnittsfläche ist. In der Gleichung wird jedoch anstelle von p_{Gb} der

mittlere ballistische Druck p eingesetzt, der, wie bereits dargelegt wurde (Abschnitt 2.2.), etwas größer als p_{Gb} ist.

Außerdem fehlt auf der rechten Seite der Gleichung die Kraft des Widerstandes gegen die Geschößbewegung (infolge der Reibung der Führungsringe in den Zügen und der Reibung des Geschosses im Rohr), was ebenfalls zu einer Vergrößerung des Produktes $m_G a$ führt.

Da wir hier die relative Bewegung des Geschosses untersuchen, müßte im rechten Teil der Gleichung ebenfalls die Trägheitskraft infolge der beschleunigten Rückwärtsbewegung des Rohres enthalten sein.

Für gezogene Geschützrohre mit zylindrischem Kanal ist es möglich, diese Vereinfachungen mittels des Koeffizienten der zweit-rangigen Arbeiten φ zu berücksichtigen, der dazu in den linken Teil der Gleichung aufgenommen wird. Aus dieser Gleichung der Vorwärtsbewegung des Geschosses leitet sich eine neue Begriffsbestimmung für φ ab. Indem die Geschößmasse m_G durch Multiplikation mit φ zur **fiktiven Geschößmasse** φm_G wird, ist unsere Gleichung für die absolute geradlinige Geschößbewegung gültig: Das Produkt aus der (fiktiven) Masse und der Beschleunigung ist gleich der Antriebskraft.

Die Gleichung der Geschößbewegung zeigt, daß die Geschößbeschleunigung a proportional dem Druck der Pulvergase ist und genauso wie dieser ein Maximum durchläuft. Die Geschößbeschleunigung verringert sich mit Anwachsen der Geschößmasse bzw. bei Verkleinerung der Rohrquerschnittsfläche.

Bei der Veränderung des Kalibers der Waffe ändert sich die Geschößmasse proportional zur dritten Potenz des Kalibers, die Rohrquerschnittsfläche aber nur proportional dem Quadrat des Kalibers. Deshalb ist die Geschößbeschleunigung in großkalibrigen Geschützen bei gleichem Pulvergasdruck geringer als in Geschützen mit kleinerem Kaliber; großkalibrige Geschütze haben wegen der für hohe v_0 notwendigen längeren Geschößdurchlaufzeiten deshalb lange bis überlange Rohre.

3.8. Das Ausströmen der Pulvergase

Nach dem Geschößaustritt aus dem Rohrkanal des Geschützes (bei Granatwerfern und rückstoßfreien Geschützen bereits während der Geschößbewegung im Rohr) strömen die Pulvergase aus.

Die wichtigste Charakteristik des Ausströmprozesses ist der **Pulvergasdurchsatz**, d. h. die Pulvergasmenge, die in der Zeiteinheit ausströmt. Offensichtlich hängen vom Pulvergasdurchsatz der Gasdruck und damit auch die Druckkräfte ab, die auf den Geschosboden einerseits und auf das Rohr andererseits einwirken.

Der Pulvergasdurchsatz ist proportional dem Gasdruck und dem Austrittsquerschnitt. Nach dem Geschosaustritt verlassen die Pulvergase das Rohr durch den Mündungsquerschnitt innerhalb weniger Hundertstel einer Sekunde, was gleich der Dauer der Periode der Nachwirkung auf die Waffe ist. Eine geringe Menge von Pulvergasen, die im Rohr verblieben sind, kann nach dem Öffnen des Verschlusses auch nach hinten ausströmen.

In Granatwerfern strömen beim Abschuß durch den ringförmigen Spalt zwischen Zentrierwulst und Rohrkanaloberfläche bis zu 10% der Pulvergase aus.

In rückstoßfreien Geschützen müssen zur Herstellung der stabilen Lage des Rohres bis zu 75% der Pulvergase durch die Düse im Verschuß nach hinten ausströmen. Deshalb haben die Treibladungen solcher Geschütze, wenn sie die v_0 vergleichbarer normaler Geschütze erreichen sollen, die mehrfache Masse der «normalen» Ladung.

4. Die Parameter der Inneren Ballistik

4.1. Die Rolle der Parameter

Parameter der Inneren Ballistik sind physikalische Größen, die diese oder jene Eigenschaften eines Geschützes oder einer Handfeuerwaffe charakterisieren und Einfluß auf die Bewegung des Geschosses im Rohrkanal der Waffe haben.

So sind z. B. die **Geschoßmasse** und die **Pulverkraft** Parameter der Inneren Ballistik, da die erstere unmittelbar in die **Gleichung der Vorwärtsbewegung des Geschosses**, die zweite Größe in die **Grundgleichung der Pyrodynamik** eingeht, welche sie mit der Größe des Pulvergasdruckes in Zusammenhang bringt, der seinerseits ebenfalls in die Gleichung der Geschosßbewegung eingeht.

In der Inneren Ballistik wird die Geschosßbewegung vollständig durch die pyrodynamischen Diagramme charakterisiert. Folglich bestimmen die Parameter der Inneren Ballistik in ihrer Gesamtheit die pyrodynamischen Diagramme oder einzelne ihrer Elemente.

Vergleichen wir das am Beispiel des menschlichen Organismus, in dem reichlich komplizierte und schwer erfaßbare biologische, chemische und physikalische Prozesse ablaufen. Äußeres Ergebnis dieser Prozesse ist – neben anderen – die vom Menschen geleistete mechanische Arbeit. Die Leistung, die ein Mensch vollbringen kann (z. B. bei Klimmzügen am Reck), hängt von vielen Faktoren ab, die durch bestimmte Parameter ausgedrückt werden. Solche Parameter sind der Umfang einiger Muskelgruppen (Bizeps, Rückenmuskulatur), Körpergewicht, Lungenvolumen u. a. So sehr sich der Mensch auch anstrengen würde, er kann keine Leistung erreichen, die eine gewisse Grenze überschreitet, die für ihn existiert.

Durch Training kann die Leistungsfähigkeit erhöht werden, indem in geeigneter Weise die Parameter verändert werden, von denen sie abhängt. In unserem Beispiel sind das: Kräftigung der Muskulatur, Befreiung von überflüssigem Körpergewicht, Vergrößerung des Lungenvolumens usw.

Bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit verschiedener Menschen ist es angebracht, mit relativen Parametern zu arbeiten, z. B. mit einem Muskelumfang, der auf das Körpergewicht bezogen wird.

Eine analoge Rolle spielen die Parameter der Inneren Ballistik. Aufgrund der komplizierten Prozesse, die im Rohr beim Schuß ablaufen, erhält das Geschöß eine bestimmte Anfangsgeschwindigkeit, die von den innenballistischen Parametern abhängt. Verändern kann man die Anfangsgeschwindigkeit nur durch Variation eines oder mehrerer Parameter. Umgekehrt ist es so, daß eine veränderte Anfangsgeschwindigkeit die Abweichung eines oder mehrerer Parameter von ihrer ursprünglichen Größe voraussetzt. Daraus folgt, daß die *Kenntnis der Parameter der Inneren Ballistik und des Charakters ihrer Auswirkungen erlaubt, bewußt den Vorgang der Geschößbewegung im Rohr zu untersuchen und zu steuern*, was für die artilleristische Praxis sehr wichtig ist.

Die innenballistischen Parameter werden beim Studium des Schußvorganges herausgearbeitet, wie das im vorhergehenden Kapitel bereits gezeigt worden ist. Sie gehen in die mathematischen Gleichungen ein, die die dort genannten Prozesse beschreiben. Faßt man alle diese mathematischen Abhängigkeiten zusammen und ergänzt sie durch die notwendigen Definitionsgleichungen, so erhält man ein Gleichungssystem der Inneren Ballistik, das die pyrodynamischen Elemente und innenballistischen Parameter untereinander verbindet.

Die Lösung des Gleichungssystems der Inneren Ballistik besteht in der Berechnung der pyrodynamischen Elemente mit der Ausnahme eines, das als Argument eingesetzt wird. Die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Parametern können als Formeln, als Zahlenwerte oder in Tabellenform vorliegen. Dementsprechend unterscheidet man **analytische, numerische und tabellenmäßige** Lösungsmethoden.

Zur Lösung des innenballistischen Gleichungssystems ist es notwendig, die sogenannten **Anfangsbedingungen**, d. h. die Anfangswerte der pyrodynamischen Elemente, anzugeben. Gewöhnlich geht man davon aus, daß sowohl Geschößweg als auch Geschößgeschwindigkeit im Moment des Beginns der Geschößbewegung gleich Null sind und daß der Pulvergasdruck eine gewisse Größe hat, die *Einpreßdruck* genannt wird.

Nehmen wir an, daß der Geschößweg l im Rohr als *Argument* ausgewählt wurde. Dann hängen die wichtigsten pyrodynamischen Elemente – die *Zeit* t , die *Geschößgeschwindigkeit* v und der *Pulvergasdruck* p von der zurückgelegten Wegstrecke l und von denjenigen Parametern ab, die in das innenballistische Gleichungssystem eingehen.

4.2. Wir machen uns mit den Parametern bekannt

Die Parameter der Inneren Ballistik kann man in zwei Gruppen einteilen: in *konstruktive Parameter* und in *Parameter der Ladebedingungen*.

Zu den **konstruktiven Parametern** gehören:

- das Geschützkaliber d ;
- die Querschnittsfläche des Rohrkanales s ;
- das Volumen des Ladungsraumes V_0 ;
- die Länge des Ladungsraumes l_{LR} ;
- die volle Länge des Geschößweges l_d ;
- die Länge des Rohrkanales $l_R = l_{LR} + l_d$;
- die Rohrlänge $l_{Rohr} = l_R + (1 \dots 2) d$;
- das Volumen des Rohrkanales V_R .

Zu den **Parametern der Ladebedingungen** gehören:

- die Geschößmasse m_G ;
- die Treibladungsmasse m_L ;
- die Pulverdichte δ ;
- die Pulverkraft f ;
- das Kovolumen der Pulvergase α ;
- der Ausdehnungsparameter Θ ;
- der Druckimpuls I_k ;
- der Koeffizient der Abbrandgeschwindigkeit u_1 ;
- die Wandstärke (Brenndicke) des Pulvers $2e_1$;
- der Koeffizient φ ;
- die Ladedichte Δ ;
- der Einpreßdruck p_0 .

Die Parameter werden außerdem in *einfache* und in *abhängige* eingestuft, wobei letztere ihrerseits von mehreren einfachen Parametern abhängen. Zu den einfachen Parametern gehören: d , V_0 , l_d , m_G , m_L , δ , f , α , Θ , u_1 , $2e_1$. Die übrigen sind abhängige Parameter. Jeder innenballistische Parameter hat einen klaren physikalischen Sinn und wird empirisch oder rechnerisch ermittelt. Von der Genauigkeit dieser Ermittlung hängt die Genauigkeit der Lösung der Aufgaben der Inneren Ballistik ab.

Die konstruktiven Parameter bedürfen der weiteren Erläuterung. Das **Geschützkaliber** ist gleich dem Innendurchmesser des Rohres, der zwischen zwei gegenüberliegenden Feldern gemessen wird. Die **Querschnittsfläche des Rohrkanales** ist proportional dem Quadrat des Kalibers. Sie schließt die Querschnittsflächen der Züge mit ein, hängt also von der Zahl und der Form der Züge ab.

Als **Volumen des Ladungsraumes** wird der Raum hinter dem Geschoß im Moment der Zündung bezeichnet. Bei patronierter Munition ist das Volumen des Ladungsraumes gleich dem inneren Volumen der mit dem Geschoß verbundenen Hülse. Bei getrennter Munition gilt sinngemäß das gleiche, nur ist hier das Geschoß mit der Hülse nicht fest verbunden, sondern wird im Übergangskegel des Rohres «angesetzt».

Die **Länge des Ladungsraumes** ist gleich der Entfernung zwischen dem Boden des Rohrkanales und dem Geschoßboden im Moment des Beginns der Geschoßbewegung. Praktisch ist die Länge des Ladungsraumes mit dem Lineal vom Geschoßboden bis zur Auflagefläche des Hülsenrandes an den Verschlußblock zu messen. Dabei ist aber zwischen der *wirklichen* und der *fiktiven* Länge des Ladungsraumes zu unterscheiden. Die fiktive Länge wird mit der Ladungsraumlehre gemessen. Sie ist um die Entfernung zwischen dem Geschoßboden und der vorderen Kante des Führungsrings größer als die wirkliche Länge.

Die **volle Länge des Geschoßweges** ist gleich der Entfernung vom Geschoßboden bis zum Mündungsquerschnitt (ohne Mündungsbremse) im Moment des Beginns der Geschoßbewegung.

Die **Rohrlänge** unterscheidet sich von der **Länge des Rohrkanales** etwa um die Verschlußlänge (1 bis 2) d .

Von den Parametern der Ladebedingungen erfordern die abhängigen Parameter A , I_k , φ und besonders p_0 einige Erläuterungen.

Die **Ladedichte** A ist das Verhältnis der Treibladungsmasse zum Volumen des Ladungsraumes. Sie charakterisiert den Füllungsgrad des Ladungsraumes mit Pulver.

Der **Druckimpuls** I_k kann als Vielfaches des Verhältnisses der halben Brenndicke des Pulvers e_1 zu dessen Koeffizienten der Abbrandgeschwindigkeit u_1 dargestellt werden. Dieser Parameter ist eine Charakteristik des Pulvers und hängt von der Pulversorte, der Brenndicke (Wandstärke) der Pulverkörper sowie von deren Temperatur ab.

Der Koeffizient φ hängt hauptsächlich vom Verhältnis m_L/m_G ab, das als *relative Treibladungsmasse* bezeichnet wird. Er kann nach einer von Professor *W. E. Sluchozki* angegebenen Formel berechnet werden ($k = 1,03$ bis $1,06$):

$$\varphi = k + \frac{1}{3} \frac{m_L}{m_G}.$$

4.3. Aufmerksamkeit für den Einpreßdruck

Der Einpreßdruck erfordert eine eingehende Erläuterung. Wie schon erwähnt, ist er der einzige der innenballistischen Parameter, der nicht in das Gleichungssystem, sondern in die Anfangsbedingungen eingeht.

Der Einpreßdruck ist eine Hilfsgröße der Inneren Ballistik für eine wenigstens angenäherte Berechnung des Einpreßvorganges der Führungsringe in die Züge des Rohres (der Bewegung des Geschosses während der Einpreßperiode).

Betrachten wir die Kurven 1, 2 und 3 in Bild 8. Im Moment des Bewegungsbeginns des Geschosses ist eine gewisse Pulvermenge abgebrannt. Dabei hat der Pulvergasdruck die Größe p_A erreicht, die notwendig und ausreichend dafür ist, daß sowohl das Geschöß aus dem Hülsenrand herausgepreßt wird (bei patronierter Munition) als auch die plastische Deformierung der Führungsringe im Übergangskegel beginnt. Der von der Hülse und den Führungsringen dabei ausgeübte Widerstand wird als **Einpreßwiderstand** bezeichnet.

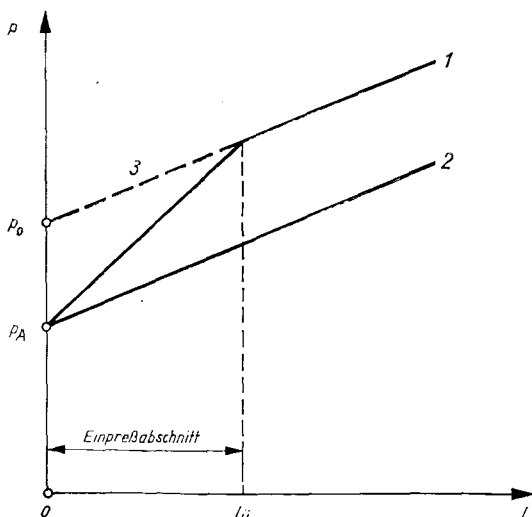


Bild 8 Verlauf der Druckkurve im Einpreßabschnitt
1 – reale Kurve; 2 – berechnete Kurve ohne Berücksichtigung des Einpreßdruckes; 3 – berechnete Kurve mit Berücksichtigung des Einpreßdruckes

Die reale (empirische) Kurve 1 des Pulvergasdruckes zeigt, daß dieser auf dem Abschnitt O/O_0 intensiver anwächst, was durch den Einpreßwiderstand bedingt ist.

Würde man bei der Berechnung der Geschößbewegung diesen Widerstand nicht berücksichtigen, so würde man die theoretische, den Tatsachen nicht entsprechende Kurve 2 erhalten, die einer größeren Geschößgeschwindigkeit entspricht.

Um den komplizierten Einpreßvorgang nicht berechnen zu müssen und trotzdem reale pyrodynamische Diagramme, die den empirischen nahe kommen, zu erhalten, verfährt man anders. Man extrapoliert die außerhalb des Einpreßabschnittes reale Druckkurve 1 rückwärts bis zum Schnittpunkt mit der Ordinate (Kurve 3). Dieser Schnittpunkt ist der **Einpreßdruck** p_0 .

Nimmt man also für den Moment des Bewegungsbeginns des Geschosses an, daß die Pulvergase unter dem Druck p_0 stehen, und führt die Berechnung der pyrodynamischen Diagramme ohne Berücksichtigung des Einpreßprozesses aus, so erhält man Kurven, die sich von den realen nur auf dem Anfangsabschnitt, eben dem Einpreßabschnitt, unterscheiden. In dieser für Theorie und Praxis entscheidenden Erleichterung besteht der Sinn des Parameters Einpreßdruck.

Professor *N. F. Drosdow* schlug vor, für Geschütze einen Einpreßdruck von 300 kp/cm^2 anzunehmen.

Weitere Untersuchungen haben gezeigt, daß sich der Einpreßdruck in einem weiten Bereich bewegt: von 10 kp/cm^2 bis zu 1000 kp/cm^2 . Er hängt *erstens* von Parametern ab, die die Bewegung des Geschosses auf dem Einpreßabschnitt beeinflussen, wie Konstruktion der Führungsringe und des Übergangskegels. Er hängt *zweitens* von Parametern der Ladebedingungen ab (Ladedichte, Geschößmasse, Wandstärke der Pulverkörper). So beträgt der Einpreßdruck in der 122-mm-Haubitze 38 z. B. bei voller Ladung und neuem Rohr 379 kp/cm^2 , bei der 6. Ladung 307 kp/cm^2 .

Unter Gefechtsbedingungen ändert sich der Zustand (Abmessungen, Form, Sauberkeit) der Rohrinneflächen bzw. der Führungsringe durch Abnutzung, Erhitzung, Fett usw. Das beeinflusst den Einpreßdruck und damit den maximalen Pulvergasdruck und die Mündungsgeschwindigkeit des Geschosses.

4.4. Die Grenzen der Veränderung der Parameter

Zur Bestimmung der pyrodynamischen Elemente in einem beliebigen Punkt müssen neben dem Argument die folgenden innenballistischen Parameter gegeben sein: der Einpreßdruck p_0 , die Pulvercharakteristiken f , α , δ , Θ , \varkappa und I_k und die Angaben zu Geschütz, Geschoß und Treibladung s , V_0 , m_G und m_L .

Die pyrodynamischen Elemente für den Moment des maximalen Pulvergasdruckes und für den Abbrandschluß werden nur durch die Größen der oben aufgeführten Parameter bestimmt. Für den Rohrmündungsquerschnitt ist außerdem die Angabe des vollen Geschoßweges l_d erforderlich.

Somit hängt bei den in der Inneren Ballistik üblichen Annahmen der maximale Pulvergasdruck von 11 Parametern ab. Für die Mündungsgeschwindigkeit erhöht sich diese Zahl um den vollen Geschoßweg l_d .

Alle Parameter, außer δ und Θ , können sich in ziemlich breiten Grenzen ändern. Die Parameter p_0 , f , α , δ , Θ und \varkappa hängen nicht direkt vom Kaliber ab, wie es bei V_0 , s , m_G , m_L , l_d und I_k der Fall ist. Bei I_k ist das durch die Abhängigkeit der Wandstärke der Pulverkörper vom Kaliber bedingt.

Tabelle 8

Parameter		Kaliber der Waffe in mm	
		7,62	203
$2e_1$	in mm	0,20	1,70
$2e_1/d$	in mm/mm	0,026	0,008
l_d	in dm	3,68	41,65
l_d/d	in dm/dm	48,3	20,5
I_k	in kp s/dm	250	1340
I_k/d	in kp s/dm ²	3280	660
s	in dm ²	0,0048	3,32
s/d^2	in dm ² /dm ²	0,827	0,806
V_0	in dm ³	0,0019	27,8
V_0/d^3	in dm ³ /dm ³	4,29	3,32
m_G	in kg	0,0079	100
m_G/d^3	in kg/dm ³	17,9	12,0
m_L	in kg	0,0016	15,0
m_L/d^3	in kg/dm ³	3,62	1,79

Um Parameter zu erhalten, die nur wenig vom Kaliber beeinflusst werden, geht man zu relativen Größen über, indem man durch d , d^2 oder d^3 teilt. Tabelle 8 enthält einen solchen Parametervergleich.

Aus der Tabelle ist ersichtlich, daß sich die relativen Parameter von Waffen unterschiedlichen Kalibers zum Teil sehr wenig unterscheiden. So beträgt die relative Geschossmasse des 7,62-mm-Geschosses $17,9 \text{ kg/dm}^3$ und die des 203-mm-Geschosses $12,0 \text{ kg/dm}^3$; sie haben also die gleiche Größenordnung.

4.5. Die Vergleichbarkeit von Artilleriesystemen

In der artilleristischen Praxis ist es mitunter notwendig, einen Parameter eines Artilleriesystems anhand der bekannten Parameter eines anderen Systems zu bestimmen. So stützt man sich z. B. bei der Projektierung eines neuen Geschützes auf die vorhandenen, die über gute Gefechtseigenschaften und ökonomische Kennziffern verfügen. Es ist nur zu verständlich, gelungene Konstruktionen und positive Eigenschaften in neue Geschütze zu übernehmen.

Das kann in einem gewissen Grade mit Hilfe der *Theorie der ballistischen Ähnlichkeit* geschehen, die für das zu projektierende System solche Parameter liefert, die denen des Vorbildsystems ähnlich sind.

Unter ballistisch ähnlichen Artilleriesystemen versteht man solche, die geometrisch ähnliche pyrodynamische Diagramme aufweisen, also solche Diagramme, die sich nur um einen Maßstabsfaktor unterscheiden.

Die wohl vollständigste Theorie der ballistischen Ähnlichkeit ist in den Arbeiten von Professor *B. N. Okunjew* enthalten.

Im einfachsten Falle der Ähnlichkeit von Artilleriesystemen, in dem die Mündungsgeschwindigkeit, der maximale Gasdruck, die Ladedichte, die relative (auf die Geschossmasse bezogene) Ladungsmasse und die Pulversorte unverändert bleiben, aber die Rohre geometrisch ähnlich sind, gibt es zwischen den Parametern folgende Verhältnisse:

- die linearen *Rohrabmessungen*, die *Wandstärke* des Pulvers, der *Druckimpuls*, die *Abschußdauer* verhalten sich so wie die *Kaliber* der Geschütze;

– die *Massen* der Geschosse und Treibladungen sowie die *Volumen* verhalten sich untereinander wie die *dritten Potenzen* der Kaliber.

Die hier angeführten Verhältnisse können für die angenäherte Einschätzung der Parameter eines Geschützes anhand eines bekannten Geschützes der gleichen Verwendungsgruppe sein, das aber ein anderes Kaliber aufweist.

Beispiel:

Von der 122-mm-Haubitze 38 sind bekannt:

$$\begin{array}{ll} d = 122 \text{ mm} & m_G = 21,76 \text{ kg} \\ l_{\text{Rohr}} = 2,80 \text{ m} & m_L = 2,08 \text{ kg} \\ 2e_1 = 1,05 \text{ mm} & V_0 = 3,6 \text{ dm}^3 \\ I_k = 900 \text{ kps/dm}^2 & \\ t_d = 0,01 \text{ s} & \end{array}$$

Von diesen Parametern soll auf eine 203-mm-Haubitze geschlossen werden.

Lösung: Das Verhältnis beider Kaliber beträgt 1,66, das der 3. Potenzen 4,61. Multipliziert man die Parameter der 122-mm-Haubitze entsprechend den oben angegebenen Verhältnissen, so ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{array}{ll} d = 203 \text{ mm} & m_G = 100,3 \text{ kg} \\ l_{\text{Rohr}} = 4,65 \text{ m} & m_L = 9,59 \text{ kg} \\ 2e_1 = 1,74 \text{ mm} & V_0 = 16,6 \text{ dm}^3 \\ I_k = 1494 \text{ kps/dm}^2 & \\ t_d = 0,0166 \text{ s} & \end{array}$$

Diese Werte kommen den wirklichen Parametern der 203-mm-Haubitze, Baujahr 1931, sehr nahe.

5. Wovon hängt die Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses ab?

5.1. Über die Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses

Für den Artilleristen gilt die Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses wohl als die wichtigste aller in der Inneren Ballistik behandelten Größen.

In der Tat, von dieser Größe hängen die maximale Schußentfernung, die Entfernung des direkten Schusses⁹, die Flugzeit des Geschosses bis zum Ziel, die Aufschlagwucht des Geschosses auf das Ziel (z. B. auf eine Panzerung) und andere, die Leistung eines Geschützes mitbestimmende Parameter ab.

Deshalb verdienen die Anfangsgeschwindigkeit, die Methoden ihrer Messung sowie die Untersuchung ihrer Abhängigkeit von der Änderung der innenballistischen Parameter und der Bedingungen des Schießens besondere Aufmerksamkeit.

Die **Innere Ballistik** untersucht die Bewegung des Geschosses *in bezug auf das Rohr* und arbeitet deshalb mit einer *relativen Mündungsgeschwindigkeit*. Das Rohr bewegt sich zusammen mit dem Geschöß mit einer Rücklaufgeschwindigkeit nach hinten, die im Moment des Geschößaustrittes 2 bis 5 m/s erreicht. Offensichtlich ist die Geschößgeschwindigkeit *in bezug auf die Erdoberfläche*, die als die absolute Geschwindigkeit betrachtet werden soll, im Moment des Austrittes aus dem Rohr geringer als die Mündungsgeschwindigkeit, und zwar um die Größe der Rohrrücklaufgeschwindigkeit in diesem Moment.

Die **Äußere Ballistik**, die die Geschößbewegung *in bezug auf die Erdoberfläche* untersucht, arbeitet mit der absoluten Geschwindigkeit des Geschosses, die sich nach dem Geschößaustritt aus dem Rohr in bestimmter Weise verändert.

Den realen Geschwindigkeitsverlauf zeigt Kurve 1 in Bild 9. Auf dem Abschnitt der Nachwirkung OI_N wirken die aus dem Rohr ausströmenden Pulvergase weiter beschleunigend auf das Geschöß ein, indem sie einen beachtlichen Druck auf den Geschößboden

⁹ Unter der Entfernung des direkten Schusses versteht man die größte Schußentfernung beim direkten Richten auf sichtbare Ziele (Panzer, Verteidigungsanlagen), bei der die Flugbahnhöhe die Zielhöhe nicht überschreitet.

ausüben. In einer bestimmten Entfernung erreicht die Geschößgeschwindigkeit ihr Maximum; die sich mit zunehmender Entfernung verringernde Nachbeschleunigung durch die ausströmenden Gase wird in diesem Punkt voll vom Luftwiderstand des Geschosses aufgehoben. Nach Beendigung der Periode der Nachwirkung fliegt das Geschöß frei in der Atmosphäre und verliert durch den Luftwiderstand ständig an Geschwindigkeit.

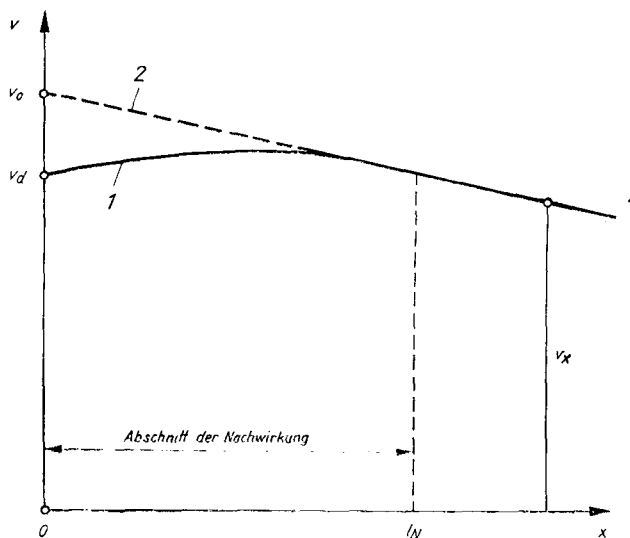


Bild 9 Veränderung der Geschößgeschwindigkeit nach Verlassen der Rohrmündung
1 – realer Verlauf; 2 – theoretischer Verlauf

Die Periode der Nachwirkung der Pulvergase auf das Geschöß dauert nur Tausendstel einer Sekunde. In dieser Zeit legt das Geschöß nur wenige Meter zurück. Die Einwirkung des Gasstrahles auf Gegenstände, die sich in der Nähe der Rohrmündung befinden, erstreckt sich auf größere Entfernungen (bis auf einige Dutzend Meter).

Die Geschößgeschwindigkeit v_x (Bild 9) wird außerhalb der Wirkungsweite des Gasstrahles gemessen. Auf ihrer Grundlage wird anschließend die Anfangsgeschwindigkeit v_0 errechnet.

Dabei geht man davon aus, daß es keine Periode der Nachwirkung gibt und daß das Geschöß nach seinem Austritt aus

dem Rohr ständig an Geschwindigkeit verliert. Mit anderen Worten: Wir extrapolieren die reale Geschwindigkeitskurve 1 vom Punkt der v_x -Messung her rückwärts bis zur Rohrmündung. Die dabei entstehende theoretische Kurve 2 schneidet die Ordinate im Punkt der gesuchten Anfangsgeschwindigkeit v_0 . Damit ist die Periode der Nachwirkung zeitlich voll berücksichtigt worden.

Als **Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses** v_0 wird also eine *fiktive Geschwindigkeit* bezeichnet, die das Geschöß im Moment des Austrittes aus dem Rohr haben müßte, damit es ohne die Nachwirkung der Pulvergase nur unter der Einwirkung des Luftwiderstandes die real gemessene Geschwindigkeit v_x erreicht. Die v_0 ist um 1 bis 2% größer als die Mündungsgeschwindigkeit v_d .

Wenn es die v_0 faktisch auch nicht gibt, so ist sie jedoch Voraussetzung für die Flugbahnberechnung, da die Äußere Ballistik die Periode der Nachwirkung in ihre Untersuchungen nicht einbezieht.

Damit kann der Eindruck entstehen, daß es einen gewissen Zwiespalt zwischen Innerer und Äußerer Ballistik gibt. Das ist aber deshalb nicht der Fall, weil die Innere Ballistik bei der Lösung praktischer Aufgaben ebenfalls nicht von der Mündungsgeschwindigkeit, sondern von der Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses ausgeht, die durch praktisches Schießen ermittelt und durch die entsprechende Festlegung der Treibladungsmasse gewährleistet wird. Darüber wird im nächsten Kapitel mehr dargelegt.

5.2. Die Messung der Geschößgeschwindigkeit

Es gibt eine Vielzahl von Methoden zur Messung der Geschößgeschwindigkeit.

Die Geschößgeschwindigkeit kann in einem *Punkt* der Flugbahn oder für einen gewissen *Abschnitt* der Flugbahn experimentell bestimmt werden. Im zweiten Falle trifft der erhaltene Wert für die Mitte des Abschnittes zu.

Die Geschößgeschwindigkeit in einem bestimmten Punkt erhält man mittels eines **ballistischen Pendels**. Dieses Pendel stellt einen massiven stählernen Kugelfänger dar, der an Scharnieren aufgehängt ist. Der Kugelfänger nimmt mit der Kugel (dem Geschöß) dessen kinetische Energie auf und pendelt um einen gewissen Winkel aus, von dessen (zu messender) Größe auf die Geschößgeschwindigkeit geschlossen werden kann.

Das ballistische Pendel ist das älteste Gerät zur Messung von Geschößgeschwindigkeiten. Es wird seit der Mitte des 18. Jahrhunderts verwendet.

Die mittlere Geschwindigkeit v_x (Bild 10) wird in der Entfernung x vom Mündungsquerschnitt der Waffe bestimmt, indem man die Flugzeit des Geschosses t_x für den Abschnitt Δx mißt und anschließend

$$v_x = \frac{\Delta x}{t_x}$$

errechnet. Die Geräte zur Messung von Geschößgeschwindigkeiten werden auch als **Chronographen** bezeichnet.

Der ausgewählte Flugbahnabschnitt wird durch zwei Impulsgeber festgelegt, die es gestatten, die jeweiligen Zeitpunkte des Eintrittes bzw. des Austrittes des Geschosses aus diesem Abschnitt zu fixieren. Solche Impulsgeber können Drahtgitterscheiben, Solenoide, Funkmeßstrahlen, gebündelte Lichtstrahlen u. a. sein.

Drahtgitterscheiben sind Holzrahmen, die mit einem 0,20 bis 0,25 mm starken Kupferdraht in parallelen Zügen so bespannt sind, daß sie eine einzige elektrische Leiterschleife bilden. Das Geschöß, das die Scheibe durchfliegt, zerreißt den Draht und unterbricht damit einen elektrischen Stromkreis, was vom Chronographen fixiert wird.

Solenoide sind elektrische Spulen mit großem Durchmesser, die an den Chronographen elektrische Impulse geben, wenn sie von aufmagnetisierten Geschossen durchflogen werden.

Funkmeßstrahlen sind scharfgebündelte Signale von hochfrequenten Radiowellen, die auf die Flugbahn gerichtet werden. Durchläuft das Geschöß die Strahlen, so reflektiert es einen Teil dieser Energie, der von der Funkmeßstation wieder aufgefangen wird und als Impuls an den Chronographen weitergegeben wird.

Die modernen Chronographen lassen sich in zwei Gruppen einordnen: in *elektromechanische* und in *elektronische*.

Einer der ersten elektromechanischen Chronographen wurde 1842 von dem bekannten russischen Artilleristen und Raketenkonstrukteur *K. I. Konstantinow* geschaffen.

Die wohl größte Verbreitung in der artilleristischen Praxis fand der **elektromechanische Chronograph von Le Boulengé**. Die wichtigsten Elemente dieses Chronographen sind die zwei Elektromagneten 2 (Bild 10), von denen der eine an die Drahtgitter-

scheibe I angeschlossen ist und das Chronometer 3 festhält und der andere in den Stromkreis der Scheibe II eingeschaltet ist und das Fallgewicht der Schlageinrichtung I festhält. Außerdem hat der Chronograph ein unter Federdruck stehendes Messer 4, das zur Markierung des Chronometers dient.

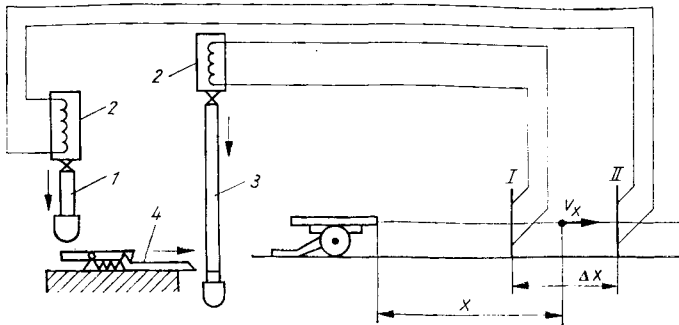


Bild 10 Messung der Geschößgeschwindigkeit

- 1 – Fallgewicht der Schlageinrichtung; 2 – Elektromagneten;
- 3 – Fallgewicht-Chronometer; 4 – Messer der Schlageinrichtung;
- I und II – Drahtgitterscheiben

Vor dem Schießen werden beide Stromkreise gleichzeitig unterbrochen. Dabei lösen sich beide Fallgewichte im selben Moment von den Magneten. Das Fallgewicht der Schlageinrichtung I setzt das Messer 4 frei, welches auf der Hülse des Fallgewicht-Chronometers 3 eine *erste Marke* einschlägt. Anschließend werden die Stromkreise wieder eingeschaltet und die Fallgewichte wieder angehängt.

Beim Schießen zerreißt das Geschoß den Draht der Scheibe I und unterbricht damit den Stromkreis des Elektromagneten, der das Fallgewicht-Chronometer 3 hält. Das Chronometer beginnt zu fallen. Der Stromkreis des anderen Elektromagneten wird erst dann unterbrochen, wenn das Geschoß die Scheibe II durchfliegt. Dabei löst sich das Fallgewicht der Schlageinrichtung I und setzt das Messer 4 frei, welches auf der Hülse des Chronometers 3 eine *zweite Marke* einschlägt. Anhand der Entfernung zwischen den beiden Marken auf der Hülse kann man die Zeit t_x errechnen, die das Geschoß für die Strecke Δx benötigt. Daraus leitet sich die Geschwindigkeit v_x direkt ab.

Elektronische Chronographen messen die Zeit zwischen den beiden

Impulsen anhand der Anzahl elektrischer Schwingungen, die von einem Meßgenerator geliefert werden.

Bei der Verwendung von Funkmeßstationen, die nach dem *Dopplerprinzip* arbeiten, wird ein Dopplersignal erzeugt, dessen Frequenz proportional zur Geschwindigkeit ist. Mißt man die Zeit, die für eine bestimmte Anzahl Schwingungen der Dopplerfrequenz notwendig ist, kann man daraus die Geschwindigkeit errechnen.

Somit haben wir erfahren, wie die Geschwindigkeit in der Nähe der Waffe experimentell ermittelt wird und wie daraus die Anfangsgeschwindigkeit errechnet wird.

5.3. Der Einfluß der Parameter

Die Anfangsgeschwindigkeit hängt von denselben Parametern ab wie die Mündungsgeschwindigkeit. Sie hängt praktisch¹⁰ nicht von der Entfernung zwischen dem Geschütz und dem Punkt der Flugbahn, in dem die Messung erfolgt, ab.

Mit einer für die Praxis genügenden Genauigkeit kann man annehmen, daß die relative Veränderung der Anfangsgeschwindigkeit (z. B. ausgedrückt in Prozent) gleich der relativen Veränderung der Mündungsgeschwindigkeit ist. Deshalb wird im weiteren, wenn auch von der Anfangsgeschwindigkeit gesprochen wird, praktisch von der Mündungsgeschwindigkeit ausgegangen.

Im vorhergehenden Kapitel wurde festgestellt, daß die Mündungsgeschwindigkeit von 12 Parametern abhängt: von s , κ , Θ , δ , m_L , m_G , V_0 , I_k , f , α , p_0 und l_d .

Für ein gegebenes Geschütz wird der Einfluß der Veränderung der ersten vier Parameter von uns nicht berücksichtigt. Die Veränderung der übrigen Parameter wird mit Hilfe von innenballistischen Störungskoeffizienten in Berechnungen einbezogen.

Als **Störungskoeffizient** bezeichnet man die Größe, die gleich der Änderung der Anfangsgeschwindigkeit (in Prozent) ist, die hervorgerufen wird, wenn sich der die Veränderung verursachende («störende») Parameter um 1% ändert. Das Vorzeichen des Störungskoeffizienten gibt dabei an, in welche Richtung sich die

¹⁰ Es gibt eine geringfügige Abhängigkeit der v_0 von der Entfernung des Meßpunktes von der Rohrmündung wegen einer Pendelbewegung des Geschosses auf dem Anfangsabschnitt der Flugbahn. Bei der v_0 -Berechnung wird diese Geschosbewegung nicht berücksichtigt.

Anfangsgeschwindigkeit ändert: Beim Vorzeichen «-» verringert sich die Anfangsgeschwindigkeit mit Anwachsen des Parameters, beim Vorzeichen «+» vergrößert sie sich.

Die Störungskoeffizienten selbst hängen von denselben Parametern ab wie die Anfangsgeschwindigkeit. Hauptsächlich werden sie von der Ladedichte, dem maximalen Pulvergasdruck und dem relativen Geschößweg (der relativen Rohrlänge)

$$l_r = \frac{l_d}{l_0}$$

beeinflußt.

Es gibt Tabellen der innenballistischen Störungskoeffizienten, denen die notwendigen Werte für alle Geschütze entnommen werden können.

In Tabelle 9 sind die Störungskoeffizienten für das Schießen mit voller Ladung aus der 122-mm-Haubitze 38 angegeben.

Außer den Störungskoeffizienten für acht bekannte Parameter sind in Tabelle 9 noch zwei zusätzliche Koeffizienten enthalten, die den Einfluß des Wärmegehaltes der Pulverladung Q_L und der Ladungstemperatur t_L auf die Anfangsgeschwindigkeit charakterisieren.

Tabelle 9

Bezeichnung des sich ändernden Parameters	Symbol	Größe des Störungskoeffizienten
Masse (Gewicht) der Treibladung	$m_L (L)$	0,75
Masse (Gewicht) der Granate	$m_G (q)$	- 0,32
Ladungsraumvolumen	V_0	- 0,29
Gesamtdruckimpuls	I_k	- 0,33
Pulverkraft	f	0,63
Kovolumen der Pulvergase	α	0,11
Einpreßdruck	p_0	0,03
volle Geschößweglänge	l_d	0,18
Wärmegehalt des Pulvers	Q_L	0,81
Treibladungstemperatur	t_L	0,08

Da die Innere Ballistik eine direkte Abhängigkeit der Anfangsgeschwindigkeit von den zwei genannten Parametern nicht geben kann, muß diese Abhängigkeit indirekt über andere Parameter erfolgen. So ruft die Veränderung des Wärmegehaltes des Pulvers

die Änderung von Pulverkraft, Kovolumen und Abbrandgeschwindigkeit (Druckimpuls) hervor. Die Ladungstemperatur beeinflusst Pulverkraft und Abbrandgeschwindigkeit (Druckimpuls).

Während des Schießens können sich die Bedingungen des Schießens ändern (z. B.: Temperatur des Rohres; Schmierung des Rohrrücklaufes; stärkeres Ansetzen der Geschosse). In allen diesen Fällen kann sich die v_0 ändern.

Um zu verstehen, wie sich dabei die Geschwindigkeit ändert, muß die Verbindung zwischen den Veränderungen der Bedingungen des Schießens mit diesen oder jenen Parametern hergestellt werden, die die v_0 unmittelbar beeinflussen. Besonders häufig wirken sich die veränderten Bedingungen des Schießens auf den Einpreßdruck aus.

Aus Tabelle 9 folgt:

- Die Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses wächst mit dem Anwachsen der betrachteten Parameter, außer bei der Granatmasse, dem Ladungsraumvolumen und dem Druckimpuls (oder der Brenndicke des Pulvers); mit Vergrößerung der Parameter m_G , V_0 und I_k nimmt die Anfangsgeschwindigkeit ab.
- Am stärksten wirkt sich auf die Anfangsgeschwindigkeit eine Veränderung der Treibladungsmasse, der Pulverkraft und des Wärmegehaltes des Pulvers aus, am wenigsten die Änderung des Kovolumens, des Einpreßdruckes und der Ladungstemperatur (um 1°C).

Die Größe der Störungskoeffizienten charakterisiert die Empfindlichkeit der Anfangsgeschwindigkeit in bezug auf die Änderung der innenballistischen Parameter.

Um zu bestimmen, um wieviel sich die v_0 verändert, wenn Parameter von ihren Normwerten abweichen, ist zuerst die Abweichung des Parameters selbst (in Prozenten) zu bestimmen, danach ist diese Größe mit dem entsprechenden Störungskoeffizienten zu multiplizieren.

Angenommen, die Geschossmasse weicht um zwei Gewichtsprozent, d. h. um $4/3\%$, ab. Die Anfangsgeschwindigkeit verändert sich dann um $0,32 \cdot 4/3 = 0,43\%$. Weicht die Ladungstemperatur von der schußtafelmäßigen ($+15^\circ\text{C}$) um 20°C ab, so ändert sich die v_0 um $0,08 \cdot 20 = 1,6\%$.

Offensichtlich ändert sich die Anfangsgeschwindigkeit spürbar, wenn sich ein Parameter erheblich verändert, zu dem die v_0 nur eine geringe Empfindlichkeit aufweist. Das gilt besonders für den

Einpreßdruck, der sich infolge der Rohrabnutzung bis um 100% verändern kann.

In dem Falle, wenn sich gleichzeitig mehrere Parameter ändern, dazu noch mit verschiedenen Vorzeichen, kann man ohne Berechnung nichts darüber aussagen, wie sich die Anfangsgeschwindigkeit ändern wird. Es ist möglich, zwei oder mehrere Parameter so zu verändern, daß die v_0 unverändert bleibt. So verfährt man z. B. bei der Festlegung der Treibladungsmasse, wenn diese aus Teilladungen der Serienproduktion zusammengestellt wird.

5.4. Die Berücksichtigung der Rohrabnutzung

Betrachten wir nun den Einfluß der Rohrabnutzung auf die Anfangsgeschwindigkeit. Die Abnutzung des Rohres beim Schießen beruht auf der komplexen mechanischen, thermischen, gasdynamischen und chemischen Einwirkung von Geschoß und Pulvergasen auf die Oberfläche des Rohrkanales, durch die sich der Innendurchmesser des Rohres (besonders im Anfangsteil) vergrößert.

Bei getrennter Munition wird das Geschoß in einem abgenutzten Rohr «tiefer», also weiter vorn angesetzt, was zum einen zur Vergrößerung des Ladungsraumes und zum anderen zur Verkürzung des Geschoßweges im Rohr führt.

Die Verlängerung des Ladungsraumes infolge der Rohrabnutzung kann mit einem speziellen Gerät, der Ladungsraumlehre, festgestellt werden, die aus einem Meßstab mit einer Skale, der Meßkartusche und der Meßgranate (Metallring mit einem Durchmesser, der etwa dem Durchmesser des Führungsrings entspricht) besteht. Weiter verlängert sich im Prozeß der Abnutzung auch der Übergangskegel des Rohres, in dem das Einschneiden der Führungsrings erfolgt. Das führt in der Regel zur Verringerung des Einpreßdruckes.

Berücksichtigt man den Charakter der Änderung von v_0 , l_d und p_0 sowie das Vorzeichen der Störungskoeffizienten laut Tabelle 9, so kommt man zu dem Schluß, daß *der Rohrverschleiß zur Verringerung der Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses führt.*

In einigen Fällen (z. B. bei Haubitzen beim Schießen mit verringelter Ladung) kann die Verlängerung des Einpreßabschnittes zur Erhöhung des Einpreßdruckes und damit zum Anwachsen der v_0 führen. Deshalb ist bei Haubitzen mit noch geringer

Rohrabnutzung die v_0 bei verringerter Ladung größer als ihr Schußtafelwert.

Bei patronierter Munition ist die Anfangslage des Geschosses unabhängig von der Abnutzung des Rohres, da es fest mit der Hülse verbunden ist. Ladungsraumvolumen und voller Geschossweg ändern sich nicht. Infolge der Rohrabnutzung verlängern sich aber der sogenannte freie Geschossweg (der Weg des Geschosses bis zum Einschneiden) und der Einpreßabschnitt. Mit Verlängerung des freien Geschossweges verringert sich p_0 ; bei einem verlängerten Einpreßabschnitt kann sich p_0 verringern oder vergrößern, wobei sich der Einpreßdruck nach einem längeren freien Geschossweg vorzugsweise erhöht. Deshalb kann sich die Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses bei patronierter Munition durch die Rohrabnutzung sowohl erhöhen als auch verringern. Das hängt vom Zusammenspiel der Ladebedingungen des Geschützes und der Streckung des freien Geschossweges und des Einpreßabschnittes ab. Bei geringer Abnutzung des Rohres, wenn der freie Geschossweg noch minimal ist, wächst die v_0 vielfach an. Diese Erscheinung wird in der artilleristischen Praxis als «Entkorken» des Geschützes bezeichnet; sie wird bei der 85-mm-Kanone und bei einigen anderen Geschützen beobachtet.

5.5. Nochmals über den Einfluß der Parameter

Im weiteren soll untersucht werden, wie sich die Veränderung der übrigen innenballistischen Parameter s , κ , Θ und δ auf die Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses auswirkt.

Für ein gegebenes Geschützmuster kann sich die Rohrquerschnittsfläche s infolge der Produktionstoleranzen für das Rohr oder durch die Abnutzung beim Schießen ändern. Bei einer geringfügigen Vergrößerung des Rohrquerschnittes wachsen die antreibende Kraft, die auf den Geschosßboden einwirkt, und damit die Anfangsgeschwindigkeit an (wenn man von einem möglichen Gasdurchbruch absieht).

Im Falle des Gasdurchbruches zwischen Geschosß und innerer Oberfläche des Rohres (z. B. beim Granatwerfer) führt die Rohrquerschnittsvergrößerung zum Anwachsen der Gasverluste und damit zur Verringerung der v_0 . Dieser Fall ist aber ein Sonderfall, der hier nicht weiter untersucht werden soll.

Vergleicht man ähnliche Geschütze verschiedenen Kalibers, so

unterscheiden sich deren Rohrquerschnittsflächen wesentlich (weil proportional zum Kaliber). Wie wirkt sich das auf die Anfangsgeschwindigkeiten aus? Hier gilt es zu beachten, daß sich eine Reihe von Parametern ebenfalls unterscheiden, wie m_G , m_L und V_0 , die proportional der 3. Potenz des Kalibers sind, und l_d , der proportional dem Kaliber ist.

Im Ergebnis kann festgestellt werden, daß die Anfangsgeschwindigkeiten ballistisch ähnlicher Geschütze gleich sind bzw. sich nur wenig unterscheiden. Eine vorgegebene v_0 läßt sich also mit gleichem Erfolg mit Geschützen beliebiger (in vernünftigen Grenzen gesehen) Kaliber erzielen.

Der Formkoeffizient des Pulvers κ charakterisiert den Grad der Degressivität des Pulvers. Mit Anwachsen von κ brennt das Pulver degressiver ab, was unter sonst unveränderten Bedingungen zur Erhöhung des maximalen Gasdruckes p_m und (als Folgeerscheinung) der v_0 führt, wobei 1% v_0 -Erhöhung einen um 8% größeren p_m voraussetzt. Diese Abhängigkeit ist mit ein Grund dafür, daß für Geschütze progressive bzw. schwach degressive Pulver bevorzugt werden.

Bei einer alleinigen Vergrößerung des Ausdehnungsparameters θ oder der Pulverdichte δ sinkt die Anfangsgeschwindigkeit ab, wobei der Einfluß von $\Delta\delta$ außerordentlich gering, der von $\Delta\theta$ jedoch bedeutend ist.

5.6. Die Geschwindigkeitsbarriere

Interessant ist die Frage, wie sich die Anfangsgeschwindigkeiten verhalten, wenn man den Geschößweg (das Rohr) unbegrenzt verlängert.

Aus den physikalischen Vorstellungen zum Schußvorgang geht hervor, daß zusammen mit der Geschößbewegung im Rohr ein Ausdehnungs- und Wärmeumwandlungsprozeß abläuft, bei dem die Wärmeenergie der Pulvergase in die kinetische Energie des Geschosses umgesetzt wird. Dabei wächst die Geschößgeschwindigkeit unaufhörlich an, der Gasdruck nimmt ab. Infolge dieser Druckverringerung (theoretisch bis Null) nimmt der Geschwindigkeitszuwachs ab, die Geschwindigkeit selbst strebt zu einem gewissen (theoretischen) Grenzwert v_{Gr} .

Die Größe des Grenzwertes der Geschwindigkeit kann man einfach aus der Hauptgleichung der Pyrodynamik erhalten, wenn

man darin $y = 1$ und $p = 0$ setzt. Unter Berücksichtigung des Koeffizienten φ (nach Professor *W. E. Sluchozki*) erhält man:

$$v_{Gr} = \sqrt{\frac{2fm_L}{\Theta \left(Km_G + \frac{1}{3} m_L \right)}}$$

Die Anfangsgeschwindigkeit ist für ein Geschütz um so größer, desto höher der Grenzwert v_{Gr} ist. Wie von Professor *B. N. Okunjew* bewiesen wurde, liegt die v_0 für optimal projektierte Kanonen etwa bei der Hälfte des theoretischen Grenzwertes v_{Gr} .

Anhand der Formel kann man also feststellen, von welchen Parametern die Anfangsgeschwindigkeit in welchem Maße abhängt. So sieht man z. B., daß sich die v_0 beim Anwachsen von Θ um 1% ihrerseits um 0,5% verringert.

Weiter zeigt die Formel Möglichkeiten zur v_0 -Erhöhung auf: durch Vergrößerung der Pulvermasse m_L und der Pulverkraft f sowie durch die Verringerung der Geschossmasse m_G (z. B. bei der Anwendung von Unterkalibergeschossen).

Schließlich ist aus der Formel ersichtlich, daß unsere Möglichkeiten zur Erhöhung der Anfangsgeschwindigkeit nicht unbegrenzt sind. Verringert man die Geschossmasse bei sonst unveränderten Bedingungen bis auf Null, so erhält man:

$$v_{Gr}^* = \sqrt{\frac{6f}{\Theta}}$$

Setzt man in die letzte Formel Θ mit 0,2 und f mit 1 000 000 Nm/kg ein, so erhält man einen maximal denkbaren Grenzwert von $v_{Gr}^* = 5426$ m/s.

Das heißt aber, daß *die größte reale Anfangsgeschwindigkeit eines Geschosses*, die mit einem Geschütz klassischer Bauart erreicht werden kann, *prinzipiell 2500 bis 3000 m/s nicht übersteigen kann*. Diese Erkenntnis hat mit dazu geführt, daß sich die Menschheit bei ihrem Bestreben, in den Kosmos vorzudringen, ausschließlich dem reaktiven Antriebsprinzip zugewandt hat.

5.7. Die Streuung der Anfangsgeschwindigkeiten

Die Streuung der Anfangsgeschwindigkeiten ist prinzipiell auf die Streuung der innenballistischen Parameter zurückzuführen. Die Parameter mit dem entscheidenden Einfluß auf die v_0 sind:

die Geschößmasse, die Masse von Treib- und Zündladung, das Ladungsraumvolumen, der Einpreßdruck und die Wandstärke (Brenndicke) des Pulvers.

Für die Streuung der genannten Parameter gibt es zwei Kategorien von Gründen: *erstens* herstellungsbedingte Gründe (Produktionstoleranzen) und *zweitens* die während der Nutzung (beim Schießen) auftretenden verschiedenen Bedingungen und unterschiedlicher Umgang mit Waffen und Munition in den Truppenteilen.

Es gibt eine minimale, vom technischen Entwicklungsstand abhängende *technische Streuung der Anfangsgeschwindigkeiten*, die als **wahrscheinliche Abweichungen** der v_0 bezeichnet werden. Tabelle 10 enthält einige von Professor *S. J. Jermolajew* gegebene empirische Werte der mittleren Abweichungen für Geschütze der Serienproduktion.

Tabelle 10

Anfangsgeschwindigkeit in m/s	100	200	300	≥ 400
wahrscheinliche Abweichung in %	0,58	0,39	0,28	0,22

Beim Schießen unter Gefechtsbedingungen sind die v_0 -Streuungen angesichts zusätzlicher Störfaktoren (unterschiedliche physikalisch-chemische Eigenschaften und Temperaturen der Treibladungen, ungleiches Ansetzen der einzelnen Geschosse beim Laden usw.) größer. Die Streuung der Anfangsgeschwindigkeit wächst dabei mit dem Grad der Nichteinhaltung der Vorschriften über den Umgang mit Munition und der Schießregeln an.

6. Wie wird die Treibladung bestimmt?

6.1. Die zweifache Wirkung der Treibladung

Für die Innere Ballistik ist von den drei Hauptelementen eines Artilleriesystems – Geschütz, Geschöß, Treibladung – das letzte, nämlich die Pulverladung, das problematischste.

Bis zum Ende des vorigen Jahrhunderts wurde die Innere Ballistik auch als die «Theorie der Pulverwirkung» bezeichnet. Der bekannte russische Ballistiker *A. F. Brink* gab seinem 1901 erschienenen Buch «Innere Ballistik» den Untertitel «Die Eigenschaften der Pulver und ihre Wirkung in abgeschlossenen Gefäßen und in Artilleriegeschützen».

Die Pulverladung bestimmt wesentlich die ballistischen Eigenschaften eines Geschützes, d. h. dessen Vermögen, einem Geschöß bei minimalem materiellem Aufwand eine bestimmte Anfangsgeschwindigkeit zu geben.

In vergangenen Zeiten sagte man dem Pulver eine zweifache Wirkung nach – eine nützliche und eine schädliche.

Die *nützliche Wirkung* des Pulvers besteht darin, daß es dem Geschöß seine chemische Energie in Form von kinetischer Energie überträgt. Die nützliche Wirkung kann man durch die Fläche charakterisieren, die auf dem Pulvergasdruckdiagramm zwischen der Kurve und der Abszisse eingeschlossen wird. Der Artillerist schätzt sie aber nach der Höhe der Anfangsgeschwindigkeit der Geschosse ein.

Die *schädliche Wirkung* des Pulvers besteht in seinem Anteil am Verschleiß des Rohres, der Lafette und anderer Geschützteile. Diese Wirkung kommt im besonderen in der Form der Pulvergasdruckkurven zum Ausdruck, die auf die zerstörende Wirkung des Maximalgasdruckes hinweisen.

Um also nützliche und schädliche Wirkung des Pulvers einschätzen zu können, muß der Pulvergasdruck bekannt sein.

6.2. Die Messung des Druckes der Pulvergase

Die am weitesten verbreitete Methode zur Druckmessung im Rohr ist die *Stauchmethode*, die auf dem Zusammenpressen eines Stauchkörpers beruht. Die Stauchkörper oder Stauchzylinder (Bild 11)

können unterschiedlich geformt sein und bestehen aus reinem Kupfer. Sie werden mit zwei Ziffern gekennzeichnet, deren kleinere den Durchmesser, die größere die Höhe (jeweils in mm) angibt. Zur Zeit werden folgende Stauchzylinder verwendet: 10×15 ; 8×13 ; $6 \times 9,8$; $5 \times 8,1$; $4 \times 6,5$ und $3 \times 4,9$.

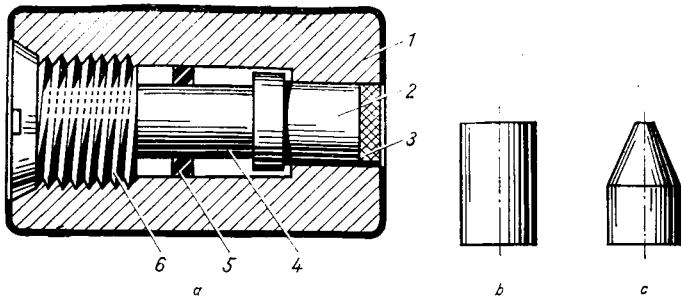


Bild 11 Messung des Druckes der Pulvergase
 a – Meßei; b – Stauchzylinder; c – konischer Stauchzylinder
 1 – Gehäuse; 2 – Stempel; 3 – Abdichtung; 4 – Stauchzylinder;
 5 – Gummiring; 6 – Widerlager

Die konischen Stauchzylinder wurden von Professor *M. E. Serebrjakow* mit dem Ziel der Verbesserung ihrer Empfindlichkeit vorgeschlagen.

Zur Übertragung des Pulvergasdruckes auf die Stauchzylinder dienen sogenannte *Meßeier*, die in die Ladungsräume eingelegt werden, oder *Stauchapparate*, die in Bohrungen an der Waffe angeschraubt werden, die mit den Ladungsräumen verbunden sind. Der Aufbau eines Meßeies ist in Bild 11 dargestellt. Es gibt unterschiedlich große Meßeier mit einem Gesamtvolumen von 4; 35; 50 und 78 cm^3 . Dieses Volumen darf 2,5% des Ladungsraumvolumens nicht überschreiten. Kann diese Bedingung nicht eingehalten werden, so sind von außen anzuschraubende Stauchapparate zu verwenden. Beim Einlegen der Meßeier ist darauf zu achten, daß sie am Hülsenboden liegen und somit nicht durch das Rohr ausgeworfen werden können.

Die Druckmessung basiert auf folgendem Prinzip. Der maximale Gasdruck wird über den Stempel 2 auf den Stauchzylinder 4 übertragen, der durch den Gummiring 5 in seiner Lage gehalten wird. Dabei wird der aus weichem Kupfer bestehende Zylinder gestaucht. Nach dem Grad der Stauchung bestimmt man anhand

einer Stauchtabelle den maximalen Pulvergasdruck. Die Stauchtabelle wird für jede Produktionsserie von Stauchzylindern neu aufgestellt. Dazu preßt man 50 Zylinder unter den verschiedenen Drücken jeweils 30 Sekunden auf einer hydraulischen Presse und erhält so die notwendigen Vergleichswerte. Da jedoch der Druck auf der Presse länger ausgeübt wird, als der maximale Gasdruck im Rohr anhält, kann diese Meßmethode nur angenäherte Werte liefern, die nach den Angaben von Professor *W. E. Sluchozki* etwa 12% unter den realen Größen liegen.

Die Stauchapparate können nur Angaben über den Maximaldruck liefern. Daneben gibt es Methoden, die es, zusammen mit einem Zeitgeber, ermöglichen, den gesamten Druckverlauf als Funktion der Zeit aufzuzeichnen.

Die *piezoelektrische Methode* beruht auf den Eigenschaften der Kristalle von Quarz, Turmalin, Seignettesalz o. a., bei einem Druck längs ihrer elektrischen Achsen eine elektrische Ladung abzugeben, die dem Druck proportional ist.

Die *tensometrische Methode* beruht auf der Eigenschaft bestimmter Metalldrähte (z. B. von Mangandrähten), ihren elektrischen Widerstand bei der Dehnung durch Belastung zu verändern.

6.3. Über Pulvermarken

Eine Pulverladung wird durch ihre Masse und die Pulvermarke charakterisiert. Unter **Pulvermarke** versteht man die Pulversorte (oder Art), die Form und die Abmessungen der Pulverkörper zusammengenommen. Von den Abmessungen der Pulverkörper ist die wichtigste der Parameter $2e_1$, genannt Wandstärke oder (charakteristische) Brenndicke des Pulvers.

Pulvermarke und Angaben über die Pulverserie sind in den Pulverkurzbezeichnungen enthalten. So sagt die Kurzbezeichnung НДТ – 3 $^{17}/_1$ Пер $^{5}/_{46}$ 0 $^B/_B$ folgendes aus: Nitroglyzerinpulver der Gruppe 3 nach dem Wärmegehalt; Röhrenform mit einem Kanal und 1,7 mm Wandstärke; aufgearbeitet; 5. Serie; Produktionsjahr 1946; Werk «0»; Kriegsproduktion.

Ein anderes Beispiel: $^{12}/_7$ СВ $^6/_49$ 0 уф bezeichnet ein Pyroxilin-pulver (deshalb ohne Buchstabensymbol); gekörnt; mit 7 Kanälen und einer Wandstärke von 1,2 mm; aus frischem Pyroxilin; 6. Serie; Produktionsjahr 1949; Werk «0»; beschleunigter Herstellungsprozeß.

Bei der Schaffung eines neuen Artilleriesystems ist man bestrebt, die Pulverladung so auszuwählen, daß sie eine maximale nützliche Wirkung bei minimaler Schädlichkeit für das System erbringt.

Die Festlegung der Treibladung erfolgt parallel zur Festlegung der konstruktiven und der Ladeparameter während der ballistischen Projektierung.

Die Innere Ballistik verfügt über Methoden der ballistischen Projektierung, die die Wege zu einer günstigsten Variante der ballistischen Lösung aufzeigen, die die taktisch-technischen Anforderungen an das Geschütz so gut wie möglich erfüllt.

Die Auswahl der endgültigen Lösungsvariante erfolgt mit Hilfe spezieller Kriterien, die aus der Kombination verschiedener Parameter gebildet werden, welche die taktisch-technischen und ökonomischen Eigenschaften des Geschützes charakterisieren.

Sorte und *Form* des Pulvers werden bei der Festlegung der Ausgangswerte bestimmt. Allgemeinste Charakteristik der Pulversorte ist ihr Wärmegehalt. Mit dessen Vergrößerung wächst bei sonst unveränderlichen Bedingungen die Anfangsgeschwindigkeit an. Allerdings verringert sich damit in ansteigendem Maße die Lebensdauer des Rohres wegen verstärkten Ausbrennens.

Zur Erhöhung der Lebensdauer der Rohre ist man bestrebt, möglichst Pulver mit niedrigem Wärmegehalt (600 bis 700 kcal/kg) zu verwenden. In Granatwerfern, bei denen die Frage der Lebensdauer der Rohre von geringerer Bedeutung ist, werden Nitroglyzerinpulver mit einem hohen Wärmegehalt von mehr als 1000 kcal/kg eingesetzt.

Die verschiedenen Pulversorten unterscheiden sich durch ihre Zusammensetzung und durch die Technologie ihrer Herstellung. Deshalb muß bei der Auswahl der Pulversorte stets von den vorhandenen (strategischen) Rohstoffen und den Produktionsmöglichkeiten des Landes ausgegangen werden. Daher ist es zweckmäßig, stets auf Pulversorten zurückzugreifen, die im eigenen Lande bereits produziert werden.

Bei der Wahl der Pulverform greift man auf die Empfehlungen der Inneren Ballistik über die Zweckmäßigkeit der Erhöhung der Progressivität des Pulvers zurück. Außerdem sind die technologischen Möglichkeiten der Herstellung dieser oder jener Pulverformen sowie Gleichförmigkeit und Zuverlässigkeit der daraus gefertigten Ladungen zu berücksichtigen.

In unserer Zeit werden für Geschütze hauptsächlich Röhrenpulver

sowie Siebenkanalpulver verwendet: die ersteren in leistungsstarken Geschützen mittlerer und schwerer Kaliber, die letzteren vorwiegend in Haubitzen bzw. in kleinkalibrigen Geschützen. Diese Auswahl der Pulverform wird durch die Bedingungen für eine gute Entzündung der Ladungen beim Abschluß einerseits und durch eine hohe Produktivität der Massenherstellung von Pulvern und Ladungen andererseits bestimmt. In Granatwerfern werden gewöhnlich Pulver in Blättchen- und Streifenform verwendet.

6.4. Die Berechnung der Treibladung

Betrachten wir den **Koeffizienten der Ausnutzung der Pulverladung** η_L , der zahlenmäßig gleich der auf 1 kg Pulver bezogenen kinetischen Energie des Geschosses ist:

$$\eta_L = \frac{m_G v_0^2}{2m_L}$$

Tabelle 11 gibt einige statistisch gewonnene Werte für η_L wieder. Es ist zu erkennen, daß η_L mit zunehmendem Arbeitsvermögenquotienten leicht abnimmt.

Tabelle 11

Arbeitsvermögenquotient des Geschützes C_d in Mp m/dm ³	200	500	1000	1500
Koeffizient der Ausnutzung der Treibladung η_L in Mp m/kg	130	116	104	100

Für die Treibladungsmasse läßt sich damit schreiben:

$$m_L = \frac{m_G v_0^2}{2\eta_L}$$

Aus dieser Formel ist zu entnehmen, daß die Masse der Treibladung hauptsächlich durch die Geschößmasse und durch die Anfangsgeschwindigkeit bestimmt wird und nicht von der Größe des maximalen Gasdruckes abhängt. Sind Geschößmasse, Anfangsgeschwindigkeit und innenballistische Parameter bekannt, so kann die Treibladungsmasse bestimmt werden.

Durch Veränderung der Treibladungsmasse kann man die Anfangsgeschwindigkeit für ein und dieselbe Granatart, die aus ein und demselben System verschossen wird, in einem breiten Bereich verändern. So verfährt man z. B. in der Praxis, wenn auf verhältnismäßig kurze Entfernungen Steilfeuer geschossen werden soll.

Die Ladungen von Haubitzen, Granatwerfern und sogar einiger Kanonen sind deshalb veränderliche Ladungen, die aus verschiedenen Teilladungen bestehen. So setzt sich die Ladung der 122-mm-Haubitze 38 aus der **Grundladung** mit Pulver der Marke ⁴/1 und **sechs zusätzlichen Treibladungsbeuteln** mit Pulver der Marke ⁹/7 zusammen. Durch Herausnehmen eines oder mehrerer Beutel werden sogenannte verringerte Ladungen hergestellt, mit denen kleinere Anfangsgeschwindigkeiten erzielt werden. Beim Schießen auf eine vorgegebene Entfernung ist bei geringerer v_0 ein größerer Rohrerhöhungswinkel notwendig, wodurch das Schießen zum Steilfeuerschießen wird.

Die einzelnen veränderlichen Ladungen werden entsprechend der v_0 -Abstufung festgelegt, die auf außenballistischen Berechnungen beruht. Für jede geforderte v_0 wird die Ladungsmasse errechnet. Danach werden die Differenzen zwischen den einzelnen Ladungsmassen gebildet und verglichen. Anhand dieser Berechnung wird dann eine einheitliche Ladungsmassendifferenz ausgewählt, die sowohl maximal den Forderungen der v_0 -Skale entspricht als auch gewährleistet, daß die zusätzlichen Treibladungsbeutel gleich sind, was für das praktische Schießen von großer Erleichterung ist und Fehler in der Ladungszusammensetzung weitgehendst ausschließt. Die Vorteile dieser Verfahrensweise für die Produktion der Ladungen braucht wohl nicht weiter erläutert zu werden.

Tabelle 12 enthält Angaben über Pulvermasse und Anfangsgeschwindigkeiten für die 122-mm-Haubitze 38 (Ladung Ж 11).

Die zerstörende Wirkung der Pulvergase auf das Rohr wird in erster Linie von der Brenndicke (Wandstärke) des Pulvers bestimmt. Fertigte man die Ladung aus einem sehr dünnen Pulver an, so würde diese bereits bis zum Beginn der Geschößbewegung abgebrannt sein, was bei einer Ladedichte von $0,70 \text{ kg/dm}^3$ zu einem Druck von 20000 kp/cm^2 im Ladungsraum und damit zur sicheren Zerstörung des Rohres führen müßte.

Mit Vergrößerung der Brenndicke bei ansonsten unveränderten Bedingungen verringert sich der maximale Pulvergasdruck; das Abbrandende des Pulvers verschiebt sich (auf dem pyrodyna-

mischen Diagramm) zur Rohrmündung hin. Ab einer bestimmten Größe $2e_1$ brennt das Pulver bis zum Geschoßaustritt nicht mehr vollständig ab; die Pulverkörperreste werden zusammen mit den Gasen aus dem Rohr herausgeschleudert. Dabei verringert sich natürlich die Anfangsgeschwindigkeit, was unerwünscht wäre. Deshalb müssen Maximaldruck und Brenndicke im Zusammenhang gesehen und vor der Festlegung der Ladung berechnet werden.

Tabelle 12

Nr. der Ladung	Bestand der Treibladung	m_L in kg	v_0 in m/s
Volle	Grundladung + 2 untere TL + 4 obere TL	2,100	515
Erste	Grundladung + 2 untere TL + 3 obere TL	1,775	458
Zweite	Grundladung + 2 untere TL + 2 obere TL	1,450	402
Dritte	Grundladung + 2 untere TL + 1 oberer TL	1,125	346
Vierte	Grundladung + 2 untere TL	0,800	290
Fünfte	Grundladung + 1 unterer TL	0,685	269
Sechste	Grundladung	0,570	248

Anmerkung: TL = Treibladungsbeutel

Die Brenndicke (Wandstärke) der Pulverkörper muß so ausgewählt werden, daß bei voller Ladung und bei einer Pulvertemperatur von $+ 50^\circ\text{C}$ der für die Rohrfestigkeit maximal zulässige Pulvergasdruck nicht überschritten wird. Gleichzeitig muß bei einer Ladungstemperatur von $- 50^\circ\text{C}$ und bei abgenutztem Rohr noch ein solcher Gasdruck erreicht werden, bei dem das sichere Funktionieren der Zünder (Schärfungsmechanismen) und der Geschützautomatik (wenn vorhanden) garantiert ist. Aus dem zulässigen maximalen Pulvergasdruck und den bekannten innenballistischen Parametern kann der Druckimpuls I_k errechnet und danach die Brenndicke des Pulvers bestimmt werden:

$$2e_1 = (2u_1) I_k.$$

Der Koeffizient der Abbrandgeschwindigkeit u_1 ist nach der

Auswahl der Pulversorte bekannt. In der Praxis verwendet man auch empirische Verhältniswerte zwischen $2e_1$ und I_k .

Nach der Festlegung von $2e_1$ wird entweder ein vorhandenes Pulver dieses Parameters ausgewählt oder ein neues Pulver in Auftrag gegeben. Da die Formeln der Inneren Ballistik nicht absolut genau sind und die geforderten Eigenschaften des Pulvers schwer zu verwirklichen sind, ist es zweckmäßig, mehrere Pulver auszuwählen bzw. in Auftrag zu geben, deren Brenndicken sich jeweils um 10% unterscheiden.

6.5. Die endgültige Festlegung der Treibladung durch Versuchsschießen

Die endgültige Entscheidung über die Auswahl der Pulvermarke wird im Verlaufe der Versuchsschießen mit dem zu erprobenden Geschütz auf dem Schießplatz getroffen. Dabei legt man auch die Masse der Treibladung fest.

Nach der Bestätigung des erprobten Geschützes für die Einführung in die Bewaffnung wird für jede Produktionsserie des Pulvers (wegen deren herstellungsbedingten Unterschiede) durch praktisches Schießen diejenige Ladungsmenge ermittelt, mit der die *schußtafelmäßige* Anfangsgeschwindigkeit gewährleistet wird. Deshalb schwankt die reale Treibladungsmasse von Pulverserie zu Pulverserie, was in Tabelle 13 am Beispiel der 100-mm-Kanone ($v_0 = 900$ m/s) demonstriert wird.

Tabelle 13

Pulverserie	1	2	3	4	5
Treibladungsmasse in kg	5,700	5,740	5,950	5,605	5,553

Die Art und Weise der Ermittlung der Masse der Treibladung durch praktisches Schießen ist durch eine spezielle Dokumentation vorgegeben.

Zur Durchführung dieser Schießen werden speziell ausgewählte Rohre und Schüsse verwendet, die als *Muster* bezeichnet werden. Beim Schießen mit einem Musterrohr und mit Mustergeschossen wird bei normaler Ladungstemperatur die *schußtafelmäßige* Anfangsgeschwindigkeit erreicht.

Die dabei verwendeten Meßgeräte und -einrichtungen werden ständig kontrolliert und nachgeeicht, um an allen Einsatzorten gleiche Meßbedingungen zu gewährleisten.

Musterrohre werden der Serienproduktion entnommen und so ausgewählt, daß sie im mittleren Toleranzbereich für den Ladungsraum und den Querschnitt des Rohrkanales liegen. Musterrohre dienen nur zur Festlegung der Ladungsmasse und zur v_0 -Kontrolle von Mustergeschossen.

Musterschüsse werden aus Geschossen einer Herstellungsserie mit gleichen mittleren Toleranzen für den Führungsring und mit Ladungen aus einer Musterserie des Pulvers zusammengesetzt.

Eine *Musterpulverserie* muß in voller Übereinstimmung mit der vorgeschriebenen Technologie hergestellt sein und eine maximale Stabilität aufweisen.

Rohre, die für das Schießen zur Festlegung der Masse der Treibladungen aus den Produktionsserien bestimmt sind, werden als *ballistische Rohre* bezeichnet. Sie werden aus neuen oder wenig abgenutzten Rohren ausgewählt und so lange verwendet, bis ihr v_0 -Verlust (infolge der Abnutzung) 2% noch nicht erreicht.

Es gibt zwei Methoden, die Schießen zur Ladungsbestimmung durchzuführen: Schießen aus einem wenig abgenutzten Geschütz mit Ladungen aus der Serienproduktion und vergleichendes Schießen mit Ladungen aus der Serienproduktion und mit Musterschüssen.

Im ersten Falle wird die Anfangsgeschwindigkeit vom Grad der Rohrabnutzung und von den Toleranzen der Rohrherstellung beeinflußt.

Im zweiten Falle werden aus ein und demselben Geschütz wechselseitig Versuchsschüsse und Musterschüsse abgefeuert, wodurch der Vergleich der Schüsse ohne Beeinträchtigung möglich ist.

Der moderne Entwicklungsstand der Inneren Ballistik erlaubt, das Problem der Bestimmung der Masse der Treibladungen für die einzelnen Produktionsserien ohne Schießen durch den Vergleich der physikalisch-chemischen Daten der Produktionsserien mit denen einer Musterserie zu lösen. Dadurch ergeben sich große Möglichkeiten der Einsparung von Material, Zeit und Kapazität.

Die Methode der Massenbestimmung der Ladungen ohne Schießen wird in erster Linie für Geschütze angewendet, die im direkten Richten oder ohne volle Vorbereitung der Anfangsangaben eingesetzt werden.

Bei der Projektierung der Treibladungen spielt der Ladungs-

aufbau eine entscheidende Rolle, da von ihm die Zuverlässigkeit und Einförmigkeit des Abbrandes, die Anfangsgeschwindigkeit der Geschosse und der maximale Pulvergasdruck mitbestimmt werden. Deshalb wird die endgültige Auswahl der Treibladung für ein neues Geschütz noch lange ein experimentelles Vorhaben bleiben müssen.

7. Die Innere Ballistik gibt Empfehlungen

7.1. Der theoretische Ausgangspunkt bei der Geschützprojektierung

Die Innere Ballistik dringt tief in die Prozesse ein, die beim Schußvorgang in der Waffe ablaufen und alle Teile und Elemente des Systems berühren. Deshalb tragen viele ihrer Schlußfolgerungen den Charakter von Empfehlungen. Indem sie die allererste Phase der Geschößbewegung untersucht, bestimmt sie so die Anfangsbedingungen für die Geschößbewegung im Raum.

Als Grundlagen für die Empfehlungen der Inneren Ballistik dienen:

- die experimentellen und theoretischen Ergebnisse der Untersuchung einzelner Prozesse, einzelner Teilbereiche des Schußvorganges;
- die Analyse des Gleichungssystems der Inneren Ballistik und der Zusammenhänge zwischen den pyrodynamischen Elementen und den Parametern der Inneren Ballistik;
- die Analyse und Verallgemeinerung der Ergebnisse von Versuchs- und Gefechtsschießen.

Bei der Projektierung eines neuen Geschützes ist es zweckmäßig, ein Geschütz mit dem kleinsten Volumen des Rohrkanales zum Ausgangspunkt der Überlegungen zu wählen. Diese Variante wird kurz «Geschütz des kleinsten Volumens» genannt. Unter einem *Geschütz des kleinsten Volumens* versteht man ein solches Geschütz, dessen Rohrkanalvolumen bei vorgegebenen Parametern d , m_G , v_d , f , α , δ , Θ , \varkappa und p_0 und unter der Bedingung, daß der maximale Pulvergasdruck unverändert bleibt, einen minimalen Wert einnimmt.

In diesem Falle ist die Größe des auf die Geschößmasse umgerechneten Rohrkanalvolumens nur eine Funktion der Ladedichte Δ und der relativen Ladungsmasse m_L/m_G . In einer räumlichen Darstellung hätte diese Funktion das Aussehen einer Hängematte.

Die Aufgabe des «Geschützes des kleinsten Volumens» wurde erstmalig 1942 von Professor *M. E. Serebrjakow* behandelt. Sie ist äquivalent der Aufgabe über das «Geschütz der größten

Leistung», die bereits schon früher von *A. F. Brink*, *N. F. Drosdow* und anderen Ballistikern gelöst wurde.

Die mathematische Lösung der Aufgabe besteht in der Ermittlung des Minimums des Rohrkanalvolumens bei konstantem maximalem Pulvergasdruck in Gestalt der Parameter Δ_g und m_{Lg}/m_G , die auch als **günstigste** Parameter bezeichnet werden.

Anstelle der relativen Ladungsmasse wird häufig mit dem Wirkungsgrad des Geschützes (der Waffe) η_w gearbeitet, der bei Verringerung von m_L anwächst.

Die **günstigste Ladedichte** Δ_g hängt vom maximalen Pulvergasdruck, vom Wärmegehalt und von der Form des Pulvers sowie vom Einpreßdruck ab; der **günstigste Wirkungsgrad** hängt zusätzlich von der Anfangsgeschwindigkeit ab.

In Tabelle 14 sind einige Angaben für η_{wg} , in Tabelle 15 für Δ_g enthalten (für Röhrenpulver).

Aus Tabelle 14 ist zu entnehmen, daß sich der günstigste Wirkungsgrad mit Anwachsen von v_0 und p_m und bei der Verringerung des Wärmegehaltes Q_L vergrößert.

Tabelle 14

Maximaler Druck der Pulvergase p_m in kp/cm^2	Günstigster Wirkungsgrad des Geschützes η_{wg}			
	Mündungsgeschwindigkeit der Granate v_d in m/s			
	600		1400	
	Wärmegehalt des Pulvers Q_L in kcal/kg			
	500	1100	500	1100
1000	0,192	0,183	0,243	0,224
3000	0,217	0,198	0,261	0,234
6000	0,246	0,216	0,282	0,250

Tabelle 15

Maximaler Druck der Pulvergase p_m in kp/cm^2	Günstigste Ladedichte Δ_g			
	Einpreßdruck p_0 in kp/cm^2			
	0		600	
	Wärmegehalt des Pulvers Q_L in kcal/kg			
	500	1100	500	1100
1000	0,43	0,38	0,24	0,17
3000	0,76	0,75	0,68	0,67
6000	> 1,00	1,00	> 1,00	0,95

Tabelle 15 sagt aus, daß sich die günstigste Ladedichte bei Erhöhung des p_m und bei Verringerung von p_0 und Q_L vergrößert. Wenn die günstigste Ladedichte und der günstigste Wirkungsgrad bekannt sind, können die übrigen Parameter des «Geschützes des kleinsten Volumens» (darunter die Rohrlänge) ermittelt werden.

7.2. Welche Variante soll verwirklicht werden?

Verläßt man die günstigsten Werte von Δ_g und η_{wg} in Richtung ihrer Vergrößerung oder Verkleinerung, so ist das stets mit der Vergrößerung des Rohrkanalvolumens oder der Rohrlänge verbunden.

Ist die Rohrlänge, die für das «Geschütz des kleinsten Volumens» ermittelt wurde, zu groß, so darf sie nicht durch Änderung der Ladedichte oder der Ladungsmasse verringert werden. In diesem Falle müssen solche Ausgangswerte wie der Wärmegehalt des Pulvers, der maximale Pulvergasdruck u. a. geändert werden.

Die Variante «Geschütz des kleinsten Volumens» ist als theoretischer Ausgangspunkt nützlich und interessant. Die endgültige (optimale) Variante kann sie in der Regel nicht sein. Es empfiehlt sich, von dieser Variante in Richtung eines höheren Wirkungsgrades abzuweichen, was gleichbedeutend mit der Verringerung der Ladungsmasse und des Ladungsraumvolumens sowie der Verlängerung des Rohres ist. Weiter kann von der günstigsten Ladedichte in beiden Richtungen abgegangen werden.

Für das ausgewählte Volumen des Rohrkanales gibt es **drei Grenzvarianten** des künftigen Geschützes: mit kleinster Ladungsmasse, mit kleinstem Ladungsraumvolumen und mit kleinster Ladedichte. Die letzte Variante ist für die Praxis undiskutabel, da sie einen niedrigen Wirkungsgrad aufweist (niedriger als beim «Geschütz des kleinsten Volumens»).

Die *Variante des Geschützes mit der kleinsten Ladungsmasse* zeichnet sich durch die günstigste Ladedichte aus.

Die Vergrößerung der Ladedichte über die günstigste hinaus führt zur Variante mit dem kleinsten Ladungsraum, was bei der Projektierung automatischer Waffen erwünscht ist.

Allerdings kann die Vergrößerung der Ladedichte durch das Fassungsvermögen des Ladungsraumes (der Hülse) begrenzt sein. Der Grenzwert der Ladedichte wird dabei von der Pulverform beeinflusst: für Röhrenpulver kann Δ den Wert von 0,75, für

gekörntes Pulver 0,80 und mehr erreichen. Zur Erhöhung des Grenzwertes der Ladedichte ist man z. B. bestrebt, das Röhrenpulver «unverbogen» herzustellen, Pulverkörner zu graphitieren oder sogar große Pulverkörper mit einer Vielzahl von Kanälen herzustellen, die die gesamte Hülse einnehmen.

Professor *M. E. Serebrjakow* hat auf der Grundlage des Systems der Gleichungen der Inneren Ballistik ein *Direktivdiagramm* ausgearbeitet, das eine Vielzahl von Isolinien der Hauptcharakteristiken eines Artilleriesystems enthält. Der Wert dieses Diagramms besteht darin, daß es die funktionellen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Parametern anschaulich darstellt und so ein nützliches Hilfsmittel bei der Suche nach einer optimalen ballistischen Lösung ist.

Berechnungen zeigen, daß die optimale Variante eines Geschützes stets eine Ladedichte aufweist, die der günstigsten nahe kommt.

Um eine gute Ausnutzung der Treibladung bei einer günstigen Länge des gezogenen Teiles des Rohres zu erreichen, ist nach Professor *B. N. Okunjew* ein optimaler Wirkungsgrad des Geschützes von 0,27 anzustreben.

Werden an die Ausnutzung der Ladung höhere Anforderungen gestellt, d. h., wenn Masse und Volumen der Ladung sehr gering gehalten werden sollen (für automatische Waffen), so ist der Wirkungsgrad größer (bis 0,33) zu wählen.

Ist es dagegen notwendig, den gezogenen Teil des Rohres stärker auszunutzen, d. h., muß das Rohr im Verhältnis zu seinem Kaliber verhältnismäßig kurz sein (z. B. bei überschweren Geschützen), so ist der optimale Wirkungsgrad geringer und nähert sich 0,24.

Professor *W. E. Sluchozki* hat vorgeschlagen, zur Festlegung einer optimalen Treibladungsmasse die Forderungen bezüglich der ökonomischen Ausnutzung der Ladung, der Rohrlänge und der Lebensdauer des Rohres aufeinander abzustimmen. Dazu wird das Maximum einer speziellen mathematischen Beziehung ermittelt, in die der Koeffizient der Ausnutzung der Ladung, der Koeffizient der Ausnutzung der Rohrlänge und eine fiktive Schußzahl als Charakteristik der Lebensdauer des Rohres eingehen. Der optimale Wirkungsgrad des Geschützes liegt in diesem Falle zwischen 0,26 und 0,33.

Die Schaffung eines neuen Geschützes bedeutet stets einen Schritt vorwärts. Deshalb geht diesem Schritt immer eine gründliche

Analyse bereits vorhandener Geschütze voraus. Die Ergebnisse dieser Analyse faßt man in Form von Empfehlungen, Regeln oder Tabellen der Ausgangswerte zusammen.

Eine wichtige Rolle bei der Schaffung eines neuen Geschützes spielt auch die Fähigkeit des Konstrukteurs, einerseits den bereits existierenden Modellen das Rationelle zu entnehmen, es auszuwerten, und andererseits den Reifegrad der Neukonstruktion richtig einzuschätzen. So gesehen, ist die Projektierung eine Kunst mit Erfolgen und Mißerfolgen, für die Empfehlungen eine stimulierende Rolle im Schaffensprozeß des Konstrukteurs spielen.

7.3. Ein Blick auf die Munition

Der Munitionsprojektant erhält von der Inneren Ballistik Empfehlungen für die Konstruktion des Führungsteiles des Geschosses und für die Erhöhung der Treffgenauigkeit des Schießens.

Der *Führungsteil* des Geschosses und speziell die Führungsringe sind in Abstimmung mit dem gezogenen Teil des Rohres (Übergangskegel, Züge und Felder) festzulegen. Ihr Aufbau hängt vom Einpreßdruck ab, der, wie bereits bekannt, viele Charakteristiken des Artilleriesystems beeinflusst. Eine optimale Konstruktion des Führungsteiles des Geschosses unterstützt wesentlich die optimale Auslegung des gesamten Systems, indem sie die Streuung der Anfangsgeschwindigkeit und deren Veränderung bei der Rohrabnutzung verringert.

Im Prinzip wäre es günstig, einen Einpreßdruck nahe Null zu haben, wodurch bei gleichbleibendem maximalem Pulvergasdruck die Rohrlänge verringert werden könnte. Schwankungen des Einpreßdruckes durch Produktionstoleranzen und Rohrabnutzung würden sich dann sehr wenig auf die Anfangsgeschwindigkeit auswirken.

Zum Vergleich verschiedener Konstruktionsvarianten der Führungsteile von Geschosß und Rohr werden empirisch oder theoretisch die sogenannten Einpreßkurven ermittelt und aus ihnen die entsprechenden Einpreßdrücke errechnet.

Die *Treffgenauigkeit des Schießens*, d. h. die Charakteristik des Schießens, deren Umkehrung die Streuung ist, wird über die Prozesse der Inneren Ballistik entscheidend von der Streuung der Anfangsgeschwindigkeiten beeinflusst. Um die v_0 -Streuung zu verringern, sind ihrerseits die Abweichungen der Masse von Ge-

schossen, Treib- und Zündladungen, des Ladungsraumes, des Einpreßdruckes und der Brenndicke des verwendeten Pulvers gering zu halten. Auf die besondere Rolle des Führungsteiles wurde bereits hingewiesen.

Außerdem ist bei der Schaffung neuer Geschütze und neuer Munition darauf hinzuwirken, daß die Streuung der innenballistischen Parameter durch die entsprechende Auswahl der Parameterwerte möglichst verringert wird, was wiederum die Streuung der Anfangsgeschwindigkeiten und damit die Treffgenauigkeit des Schießens positiv beeinflußt.

7.4. Wege zur Modernisierung

Die Aufgabe der Modernisierung der Artillerie existiert ständig, obwohl man sagen muß, daß die Artillerie (im Vergleich zu anderen Gebieten der Technik) sehr konservativ gegenüber technischen Veränderungen an vorhandenen Geschützen ist. Das ist in erster Linie durch die Forderung nach Sicherheit beim Schießen begründet, liegt aber auch wesentlich daran, daß eine Veränderung an Geschütz oder Munition eine sehr aufwendige Änderung an Schußtafeln, Schießvorschriften und anderen Dokumentationen nach sich ziehen kann, von den Nachschubproblemen abgesehen. Bei der Modernisierung der Artillerie wird das Ziel der *Erhöhung der Leistungsfähigkeit* der Geschütze gestellt. Welche Wege dafür gibt es?

Der einfachste Weg ist die **Vergrößerung des Kalibers**. Da die Geschoßmasse proportional zur 3. Potenz des Kalibers anwächst, vergrößert sich die Geschoßwirkung im Ziel dementsprechend. Außerdem wächst bei gleichbleibender Anfangsgeschwindigkeit die Reichweite der Geschosse.

So verlief die Entwicklung der Artillerie in bestimmten Etappen ihrer Geschichte immer dann, wenn die Möglichkeiten der v_0 -Erhöhung ausgeschöpft erschienen. Dazu einige Beispiele.

In der Mitte des vorigen Jahrhunderts kletterte das Kaliber der glattrohrigen Küstenartilleriegeschütze für den Kampf mit Panzerkreuzern bis auf 500 mm. 1870 wurde auf der Allrussischen Manufaktureausstellung eine 20-Zoll-(508-mm)-Kanone vorgestellt.

In den dreißiger Jahren unseres Jahrhunderts stieg das Hauptkaliber der Flaggschiffe der Kriegsflotten – der Linienschiffe – bis auf 406 mm (16 Zoll).

In den letzten 40 Jahren stieg das Kaliber der Panzerabwehrartillerie beständig von 37 mm auf 100 mm an.

Damit sich mit der Zunahme der Leistungsfähigkeit der Geschütze die Auswirkungen des Abschusses auf die Lafette und die Masse des Systems in zulässigen Grenzen bewegen, war es notwendig, die Rohrrücklaufeinrichtungen zu verbessern und Mündungsbremsen zu entwickeln.

Kann das Kaliber nicht weiter vergrößert werden, so ist eine verbesserte Leistungsfähigkeit hauptsächlich durch eine **Erhöhung der Anfangsgeschwindigkeit der Geschosse** zu erreichen.

Der Konstrukteur hat zur v_0 -Erhöhung folgende Möglichkeiten:

- Vergrößerung der Masse der Treibladung;
- Verringerung der Geschossmasse;
- Erhöhung des Wärmegehaltes des Pulvers;
- Erhöhung des maximalen Pulvergasdruckes;
- Verlängerung des Rohrkanales des Geschützes;
- Anwendung aktiv-reaktiver Geschosse;
- Anwendung von Leichtgasgeschützen.

Dabei darf nicht vergessen werden, daß jede dieser Möglichkeiten mit vielen technischen Schwierigkeiten verbunden ist, deren Lösung den Einsatz der neuesten technischen und wissenschaftlichen Erkenntnisse erfordert.

7.5. Empfehlungen für die Nutzung

Auch für die Nutzung der Artilleriesysteme gibt die Innere Ballistik eine Reihe von Empfehlungen. Besondere Aufmerksamkeit richtet sich dabei auf das Registrieren und die Analyse der Nutzungsbedingungen eines Artilleriesystems.

Unter den *Nutzungsbedingungen eines Artilleriesystems* versteht man die Gesamtheit der äußeren Einwirkungen auf Geschütz, Geschosß und Treibladung auf allen Etappen ihrer Nutzung in der Truppe – von der Lieferung vom Werk bis zur Gefechtsverwendung und vollen Ausschöpfung der Gefechtsseigenschaften.

Aus der Erfahrung der langjährigen artilleristischen Praxis heraus sind optimale Nutzungsbedingungen ausgearbeitet und in Nutzungsdokumentationen für verbindlich erklärt worden, deren Forderungen streng einzuhalten sind.

An den **Geschützen** können sich im Verlaufe der Nutzung infolge Rohrverschleißes die innere Oberfläche sowie die diametralen

Maße des Rohrkanales verändern. Die Gründe dieses Verschleißes sind die Rohrabnutzung durch den Schußvorgang, der ständige Wechsel zwischen starker Erhitzung und Abkühlung, Schmutz und Fettrückstände, Verkupferung durch die Führungsringe, Deformation und Ausreißen der Züge, Rohrdeformationen (Aufbauchungen).

Geschosse können im Verlaufe von Transport und Lagerung an ihrer Oberfläche, am Farbanstrich, an der ballistischen Haube (Spitze), an Leitflächen, an den Führungsringen beschädigt werden. Beim Laden des Geschützes kann das Geschosß verschmutzt oder noch eingefettet sein. Die einzelnen Geschosse können infolge der Produktionstoleranzen unterschiedliche Massen haben (verschiedene Gewichtsklassen), in ihrer Form und in den Charakteristiken der Führungsringe voneinander abweichen. Beim Laden (von getrennter Munition) können sie unterschiedlich angesetzt werden. Das alles wirkt sich auf den Flug des Geschosses aus.

Besonders stark können nach längerer Lagerung und bei Änderung der Nutzungsbedingungen die Eigenschaften der **Treibladungen** von den Normwerten abweichen. Leider haben die Pulver die Eigenschaft, zu «altern» und dabei ihre ballistischen Eigenschaften zu verändern. Am stärksten verändern sich im Verlaufe der Zeit Pyroxilinpulver, die einen hohen Anteil an flüchtigen Stoffen (Lösungsmittel, Feuchte) aufweisen. Außerdem ändern sich die Charakteristiken von Pulverladungen bei Temperaturänderungen, Zerstörungen an Pulverkörpern, Feuchtwerden der Zündsätze, Zerstörung des Ladungsaufbaues.

Die **erste Empfehlung** der Inneren Ballistik besteht darin, die Nutzungsbedingungen während der Lagerung, bei der Vorbereitung des Schießens und während des Schießens möglichst stabil zu halten. Dazu ist Munition bei gleichbleibender Temperatur und Luftfeuchtigkeit aufzubewahren. Die Treibladungen sind hermetisch verschlossen zu halten. In der Feuerstellung ist die Munition nach Herstellungsserien und anderen Kennzeichen zu sortieren. Die Geschosse sind beim Laden gleichmäßig anzusetzen. Das Rohr ist vor dem Schießen sorgfältig zu reinigen usw.

Die **zweite Empfehlung** besteht darin, die Auswirkungen von Änderungen der Nutzungsbedingungen so gering wie möglich zu halten. Hierbei liegt die Aufgabe bei den Konstrukteuren, die die richtige Auswahl von Konstruktion und Material treffen müssen. So kann z. B. die Oberfläche des Rohrkanales durch schwer schmelzbare Beläge widerstandsfähiger gegen den Verschleiß ge-

macht werden. Führungsringe können bei Lagerung und Transport durch Schutzkappen vor Schäden geschützt werden. Neue Pulverkompositionen können weniger temperaturempfindlich sein usw.

Die **dritte Empfehlung** besteht darin, größere Änderungen der Bedingungen des Schießens und damit der Anfangsgeschwindigkeit der Geschosse mit genügender Genauigkeit bei der Vorbereitung des Schießens zu berücksichtigen.

Eben das geschieht, wenn die Verbesserungen für die Abweichung der v_0 infolge der Rohrabnutzung, Ladungstemperaturabweichung oder Änderung der ballistischen Eigenschaften der Pulver errechnet werden. Vielleicht wäre es notwendig, solche Verbesserungswerte für die Rohrerwärmung, den Verschmutzungsgrad des Rohres oder für neu zu definierende Geschosßklassen (z. B. anhand der Produktionstoleranzen der Führungsringe) aufzustellen.

Neben allgemeinen und speziellen Empfehlungen ist die Innere Ballistik in der Lage, eine Antwort auf viele Fragen zu geben, die den Artilleristen und Konstrukteuren von Geschützen durch die Praxis ständig neu gestellt werden.

8. Von der Vergangenheit in die Zukunft

8.1. Das Sammeln von Fakten

Ungeachtet dessen, daß die Artillerie schon sechs Jahrhunderte auf den Schlachtfeldern vertreten ist – die Innere Ballistik ist eine vergleichsweise junge Wissenschaft. Selbständig wurde sie in der Mitte des vorigen Jahrhunderts.

Das war eine Zeit der stürmischen Entwicklung des Maschinenbaues, des Aufblühens der Physik und der Chemie, eine Epoche großer Entdeckungen. Für die Artillerie war es die Zeit des Überganges von glatten zu gezogenen Rohren.

Durch vielfältige Beobachtungen beim Schießen mit Geschützen wurden nach und nach viele Fakten gesammelt, die mittelbar den Schußvorgang charakterisieren. Die seit Anbeginn beobachteten Fälle der Explosion von Geschützrohren zeigten, daß die Pulververbrennung einen Stoff erzeugen muß, der die Kugel aus dem Rohr herausschleudert und im ungünstigsten Falle, wenn er zu stark ist, das Rohr zum Bersten bringt. Die Beobachtung der Flugweite der Kugeln lehrte sehr bald, daß diese nicht gleichbleibend ist, sondern von der Pulvermenge abhängt, aber auch davon, wie stark das Pulver im Rohr festgestampft wurde und wo sich die Kugel im Zündmoment im Rohr befand. In Auswertung der gesammelten Fakten entstanden empirische Regeln, die zwar den Schußvorgang noch nicht erläutern konnten, aber dennoch halfen, die Geschütze ihrer Zeit zu verbessern.

Bei den ersten Versuchen, die beobachteten Fakten zu erklären, richtete sich die Hauptaufmerksamkeit auf das Pulver, dessen Eigenschaften seit dem 16. Jahrhundert systematisch untersucht werden. In dieser Zeit wurde der Begriff der Pulverkraft als Charakteristik seiner energetischen Möglichkeiten geprägt. Als erstes Resultat der Erforschung des Pulvers wurde zu Beginn des 18. Jahrhunderts anstelle des einfachen staubförmigen Gemenges das gekörnte Pulver eingeführt. Im weiteren befaßte man sich viel mit der Verbesserung der Zusammensetzung des Schwarzpulvers durch ein optimales Mischungsverhältnis der Grundstoffe Schwefel, Holzkohle und Salpeter sowie durch verschiedene Zusätze, z. B. Arsen, Salmiakgeist, Essig, ja sogar Wein.

Die sich im 17. Jahrhundert entwickelnde Theorie der Gase begünstigte erste mechanische Vorstellungen über den Schußvorgang, wobei man die Elastizität der Pulvergase als Ursache der Geschößbewegung ansah.

Daniel Bernoulli machte in seiner Arbeit «Hydrodynamik», die 1738 erschien, einen der ersten Versuche, den Prozeß der Gasausdehnung und die Geschößbewegung zu beschreiben. Er erhielt dabei eine theoretische Formel zur Berechnung der Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses.

Weitaus umfangreichere Angaben über die Geschößbewegung im Rohr sind in dem Buch des englischen Artilleristen *Robins* «Neue Prinzipien der artilleristischen Wissenschaft» enthalten, das 1742 veröffentlicht wurde.

In der Mitte des 18. Jahrhunderts legte das Mitglied der Petersburger Akademie der Wissenschaften *L. Euler* seine Theorie der Gasausdehnung im Geschütz vor.

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts wußten die Artilleristen vom Schußvorgang noch sehr wenig. Der bekannte russische Artillerist und Gelehrte *Platow* schrieb 1839: «Man kann ohne großen Fehler feststellen, daß die Pulvertheorie für die Artilleristen bisher mehr ein Gegenstand der Neugierde als etwa eine nützliche Angelegenheit war.»

8.2. Das Spektrum der Experimente

In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden die Vorstellungen über die Verbrennung des Pulvers und die Umwandlung der chemischen Energie in die mechanische Energie des Geschosses dank der Entwicklung von Chemie und Thermodynamik umfangreicher.

1823 hatte *Gay-Lussac* als erster die chemische Zusammensetzung der Pulvergase sowie der Pulverreste ermittelt.

Die Pulververbrennung an der freien Atmosphäre untersuchte in den dreißiger Jahren der französische General *Piobert*, der herausfand, daß verdichtetes Schwarzpulver fähig ist, in parallelen Schichten abzubrennen; damit wurde es möglich, die Frage des Gesetzes der Gasbildung zu lösen.

In Rußland wurden Gasbildungsgesetze für prismatische und sphärische Pulver zuerst von dem Lehrer der Inneren Ballistik an der Artillerieakademie Oberst *P. M. Albizki* aufgestellt. 1869 er-

hielt er dafür den großen Michailowski-Preis, die an Artilleristen für hervorragende wissenschaftliche Arbeiten und Erfindungen verliehen wurde. 1870 stellte *P. M. Albizki* die erste russische gedruckte Vorschrift über Fragen der Inneren Ballistik zusammen.

Eine umfangreiche Arbeit zum Studium der Pulververbrennung unter niedrigem Druck führte der bekannte russische Chemiker *L. N. Schischkow* 1857 im Ausland, im Laboratorium von *Bunsen*, durch.

Ein weiterer Schritt in der Untersuchung der Pulververbrennung war die Arbeit von Oberst *N. P. Fedorow*, die er 1868 in dem von *L. N. Schischkow* geschaffenen erstklassigen chemischen Laboratorium der Artillerieakademie leistete.

1868 wurde zur Untersuchung des Pulverabbrandes von den beiden Gelehrten *Noble* und *Abel* die manometrische Bombe geschaffen. Mit der 1883 von den französischen Artilleristen *Sarrau* und *Viéille* erfundenen Apparatur zum Aufzeichnen der Druckverlaufskurve in der manometrischen Bombe waren alle Voraussetzungen dafür geschaffen, den Pulverabbrand und die Gasbildung unter hohen Drücken zu untersuchen.

8.3. Theoretische Verallgemeinerungen

Zur Berechnung der Wandstärke des Rohres ist es notwendig, die Druckkurve als Funktion des Geschossweges zu kennen. Bereits 1856 erarbeitete der hervorragende russische Gelehrte und Artillerist *N. W. Majewski* eine Methode zum experimentellen Aufzeichnen dieser Kurve; zehn Jahre später gab er eine theoretischen Berechnungsmethode dafür an. Die von *N. W. Majewski* auf dieser Grundlage projektierte 60-Pfund-Kanone erwies sich besser als andere russische und ausländische Geschütze.

Neben der mechanischen Betrachtung des Schußvorganges entwickelten sich im 19. Jahrhundert auch energetische Vorstellungen (besonders nach der Entdeckung des Gesetzes der Erhaltung der Energie). In die Innere Ballistik wurde das Energieerhaltungsgesetz von dem französischen Gelehrten *Résal* eingeführt, der 1864 die Gleichung der Energiebilanz im Rohr aufstellte.

Die Erfindung der rauchschwachen Pulver zum Ende der achtziger Jahre stellte an die Innere Ballistik neue Anforderungen. Dieser Aufgabe widmete sich mit großem Erfolg der Oberst der

Schiffsartillerie *A. F. Brink*, der ab 1892 an der Artillerieakademie Vorlesungen über Innere Ballistik hielt. 1901 veröffentlichte *A. F. Brink* das für diese Zeit wohl vollständigste Lehrbuch der Inneren Ballistik, das in Deutschland und in den USA übersetzt wurde.

Die erste mathematisch exakte Lösung des Gleichungssystems der Inneren Ballistik gab der russische Artillerist Professor *N. F. Drosdow* (veröffentlicht 1904). Allerdings verwendete man in der Praxis vorzugsweise empirische Methoden, die einfacher zu handhaben waren. So stellte der große russische Ballistiker *N. A. Sabudski* im Jahre 1904 die bekannten empirischen Formeln zur Bestimmung der Anfangsgeschwindigkeit und des maximalen Gasdruckes auf.

8.4. Die Innere Ballistik in der UdSSR

Besonders erfolgreich entwickelte sich die Innere Ballistik in der UdSSR nach dem Sieg der Großen Sozialistischen Oktoberrevolution. Von 1918 bis 1926 wurden die Grundprobleme der Inneren Ballistik, wie schon in Kapitel 2 erwähnt, von der Kommission für besondere Artillerieversuche (KOSARTOP) bearbeitet, die der bekannte russische Artillerist *W. M. Trofimow* leitete. Der Kommission gehörten die bekannten Gelehrten unseres Landes *N. E. Shukowski*, *S. A. Tschaplygin*, *A. N. Krylow* und die Artillerie-Wissenschaftler *N. F. Drosdow*, *I. P. Grawe*, *W. A. Paschkewitsch* und viele andere an. In der KOSARTOP wurden junge Ballistiker ausgebildet, aus denen die bekannten Gelehrten *M. B. Serebrjakow*, *D. A. Wentzel*, *B. N. Okunjew*, *W. E. Sluchozki* hervorgingen.

In der Artillerieakademie arbeitete Professor *I. P. Grawe* viele Jahre schöpferisch auf dem Gebiet der Inneren Ballistik. Er gründete das ballistische Laboratorium und schrieb einen umfangreichen Kurs der Inneren Ballistik. Große Aufmerksamkeit widmete *Grawe* dem Studium des Pulverabbrandes in nicht vollständig geschlossenen Kammern, was unmittelbar in Verbindung mit reaktiven Feststofftriebwerken steht.

In den zwanziger Jahren stellte *N. F. Drosdow* auf der Basis seiner genauen Lösungsmethode die ersten innenballistischen Tabellen auf.

Einen großen Beitrag leistete der Ingenieur *N. A. Upornikow*,

unter dessen Leitung 1934 die vollständigen Tabellen der pyrodynamischen Elemente (Tabellen ANII) aufgestellt wurden. Auf der Basis der Tabellen ANII entstanden später unter der Redaktion von *S. I. Jermolajew* und *W. E. Sluchozki* die Tabellen der Inneren Ballistik GAU.

Professor *B. N. Okunjew* schlug 1935 relative veränderliche Größen vor, die es ihm gestatteten, noch universellere Tabellen aufzustellen.

Für das Aufstellen der Tabellen der Inneren Ballistik waren entsprechende Methoden der numerischen Integration und Differentiation von besonderer Wichtigkeit. Mit der Entwicklung und Anwendung solcher Methoden in der Inneren Ballistik befaßten sich besonders *A. N. Krylow*, *W. M. Trofimow*, *N. A. Upornikow*, *G. W. Oppokow*, *B. W. Orlow*.

Mit der Entwicklung neuer Methoden bei der Untersuchung der gasdynamischen Prozesse während des Schußvorganges befaßten sich die Professoren *M. S. Gorochow*, *M. A. Mamontow*, *B. W. Orlow*.

In der heutigen Zeit arbeiten in der UdSSR eine Vielzahl von Wissenschaftlern in vielen Institutionen weiter an der Entwicklung der Inneren Ballistik.

8.5. Ein Wort zur technischen Verwirklichung der Experimente

In der Mitte unseres Jahrhunderts wurde eine Etappe der Entwicklung der Inneren Ballistik abgeschlossen, die im wesentlichen auf experimentellen Erkenntnissen beruhte, die zum Teil noch aus den letzten Jahren des vorigen Jahrhunderts stammten.

Heute haben wir die Möglichkeit, tiefer in den Schußvorgang einzudringen, wobei das Experiment nach wie vor im Vordergrund steht. Experimentelle Untersuchungen haben in der Ballistik stets eine große Rolle gespielt. Zu diesem Zweck wurden originelle Meßverfahren und eine vielgestaltige Meßtechnik entwickelt, die zum Teil Allgemeingut der Experimentiertechnik wurden. So entstanden ursprünglich für ballistische Zwecke der Windkanal, die Funkenfotografie, statische und dynamische Meßmethoden für hohe Drücke, Zeitmeßgeräte für extrem kurze Vorgänge, Temperaturmeßgeräte für hohe Temperaturen usw.

Man kann mit Sicherheit sagen, daß der weitere Fortschritt der

Inneren Ballistik hauptsächlich von den Fortschritten in der Entwicklung der Experimentiertechnik abhängen wird.¹¹

Nach wie vor steht die experimentelle Erforschung des Pulverabbrandes (des Abbrandes von Pulverladungen) im Mittelpunkt des Interesses. Es wird notwendig sein, das bisherige System der Pulvercharakteristiken zu überprüfen, es durch neue Parameter zu ergänzen, genauere Methoden ihrer Bestimmung auszuarbeiten. Vor- und Einpreßperiode sind weiter experimentell zu erforschen. Die Genauigkeit der Druck- und v_0 -Meßgeräte ist zu erhöhen. Besondere Bedeutung für die Auswertung der Experimente hat die Theorie der Ähnlichkeit, deren Entwicklung von seiten der Inneren Ballistik stets große Aufmerksamkeit gewidmet wurde. Der reale Schuß aus dem Geschütz mit genau festgehaltenen Bedingungen des Schießens und einer möglichst umfangreichen Ermittlung einer möglichst großen Zahl von Parametern ist und bleibt die wichtigste Quelle experimenteller Ergebnisse. Deshalb sind Versuchsschießen nach den neuesten Erkenntnissen von Wissenschaft und Technik auszurüsten, vorzubereiten, durchzuführen und auszuwerten.

8.6. Rechenanlagen als Gehilfen

Wenn früher die handbetriebenen Rechenmaschinen die Entwicklung und vor allem die Anwendung genauer Methoden der Lösung der Aufgaben der Inneren Ballistik gehemmt haben, so sind diese Schranken mit der heutigen Entwicklung der Rechen-technik gefallen.

Heute hat die Innere Ballistik die Möglichkeiten dazu erhalten, auch diejenigen Prozesse exakt zu erfassen, die früher den zweit-rangigen zugeordnet und über empirische Koeffizienten berücksichtigt wurden. Die Hauptprozesse können noch weitgehender berechnet werden. Das Gleichungssystem der Inneren Ballistik kann durch weitere Abhängigkeiten ergänzt werden, ohne daß zu befürchten ist, daß der Rechenaufwand ihre Lösung erschwert.

Die Rechenmaschinen sind in der Lage, schnell und exakt eine Vielzahl von Varianten einer ballistischen Aufgabe zu lösen und zu vergleichen, was die ballistische Projektierung neuer Geschütze wesentlich erleichtert.

¹¹ Hier und im weiteren werden Meinungen dargelegt, die der offenen Literatur entnommen sind.

8.7. Probleme, Probleme . . .

In der Geschichte einer Wissenschaft gibt es Perioden, in denen es scheint, daß alle wichtigen Probleme gelöst sind. In den fünfziger Jahren drückte sich angesichts einer solchen Situation ein bekannter Ballistiker halb im Ernst, halb im Scherz so aus: «Ich sehe keine Probleme mehr, die zu lösen wären.»

Die wissenschaftlich-technische Revolution hat den Forschern neue Denkanstöße gegeben, neue Aufgaben gestellt, aber auch neue Mittel zur Lösung dieser Aufgaben in die Hand gegeben.

Die weitere Entwicklung der Inneren Ballistik liegt auf der Linie der Vertiefung unserer Erkenntnisse über die chemischen, thermodynamischen, gasdynamischen, mechanischen und anderen Prozesse, die im Geschütz ablaufen.

Es sind solche Fragen zu beantworten wie der Abbrand der Pulverladung unter den Bedingungen der Bewegung der Pulverkörper im Rohr oder die Bedeutung thermochemischer Prozesse für den Schußvorgang. Weiter ist als sehr wichtige praktische Aufgabe die Ermittlung der Treibladungsmasse aus Pulvern der Serienproduktion ohne Erprobungsschießen auszuarbeiten und einzuführen. Voraussetzung dafür sind genauere Gleichungssysteme der Inneren Ballistik und verbesserte Methoden zur Bestimmung der Pulvercharakteristiken. Genauere Gleichungssysteme sind aber nur bei einer besseren Kenntnis des Widerstandes des Geschosses im Rohr und der Wärmeabgabe der Pulvergase an das Rohr aufzustellen.

Die Geschütze komplizierterer Art machen das Studium der Prozesse erforderlich, die für ihr Konstruktionsprinzip typisch sind, damit diese im Zusammenhang mit den Aufgaben der Inneren Ballistik gelöst werden können.

Damit ist auch für die Innere Ballistik als eine der artilleristischen Wissenschaften in der Zukunft ein reiches Betätigungsfeld vorhanden.

