

Optimierung einer Silhouetten-Pistole unter schwingungstechnischen und thermodynamischen Aspekten

Samuel H. Goldstein, SARDEC AG, < goldstein@gmx.li >

ZUSAMMENFASSUNG

Treffer-Streuungen bei Feuerwaffen sind sehr stark von internen Schwingungen abhängig. In der konservativen Waffenindustrie wird dies höchstens empirisch berücksichtigt. Am Beispiel einer Silhouetten-Pistole wurden schwingungstechnische Untersuchungen angestellt und aus den Resultaten eine völlig neue Waffe konzipiert. Zentrales Bauteil ist der Verschluss aus einer Titaniumlegierung, der Schwingungen absorbiert und den Einsatz wesentlich stabilerer Laufe ermöglicht.

Grundsätzliches

Mit Silhouetten-Pistolen wird auf Distanzen bis zu 200 m geschossen. Die Ziele sind Metallsilhouetten von unterschiedlichen Tieren aus 10 -13 mm dickem Panzerstahl.

Die relativ kleine Rumpfhöhe von 12 cm (beim Shootoff) und die hohe Masse bis 25 kg erfordern nicht nur ein hohes Zielmomentum, sondern auch geringe Streuung der ballistischen Bahn. Die wohl momentan präziseste Patrone in dieser Disziplin ist die 7x49 GJW - Kurzform „7 GJW“ - (1) vor allem durch die hochgenaue schweizer Fertigung der Hülse. Dafür wurde eine Waffe konzipiert, die möglichst kompromisslos den heutigen Stand der Technik repräsentieren sollte. Finanzielle Aspekte waren somit fast bedeutungslos - der Traum jedes Entwicklers.

Rahmenbedingungen

Der Weltverband IMSSU (2) legt für die Experimental-Disziplin UNLIMITED ein Maximalgewicht von 2040 g, sowie eine Lauflänge von 381 mm fest. Bei Serienwaffen (PRODUCTION) sind es 1812 g und 273 mm Lauf.

Für schwingungstechnische Untersuchungen sind die Maximalwerte der Patrone 7 GJW interessant:

Auf 34 cm Weg erreicht das Geschoss von 10.9 g in 0.9 ms 657 m/s (Mach 2.0) und 172 440 U/min. Nach 200 m Weg sind rund 19 % Geschwindigkeit, bzw. 38 % Energie der Luftreibung zum Opfer gefallen. Die ballistische Bahn wird in 350 ms durchleitet, wo das Projektil seine Energie an das Ziel abgibt und innerhalb 0,08 ms auf weniger als 1 mm Länge gestaucht wird. Der Maximaldruck von 4700 bar wird nach 23 mm erreicht und fällt bei Mündungsaustritt des Geschosses auf 660 bar zusammen.

Die Brenntemperatur der Treibladung erreicht 2600 Celsius. Die freiwerdende Energie von 6900 Joules verteilt sich auf Geschossenergie: 2350 Joules (34 %), Energie der Gase: 1160 Joules (17 %), Wärme: 830 Joules (12 %), Reibung & Erschütterung: 2560 Joules (37 %).

Zur Bestimmung der thermischen Belastung des Systems sind die Gegebenheiten des Wettkampfes wichtig. Ein Durchgang umfaßt 45 Schuss, die in ca. 45 Minuten abgegeben werden. Eine Serie von 5 Schuss muß innerhalb von 2 Minuten erfolgen. Das Geschöß nimmt rund 1/3 der Gesamtenergie 6900 Joules pro Schuss auf den Weg, sodass rund 23.000 Joules pro Serie die Waffe aufheizen. Nach Pausen von rund 5 Minuten wiederholt sich dies acht Mal.

Stand der Technik

Heutige Silhouetten-Pistolen sind schon recht präzise, mit Streukreisen um 50 mm auf 200 m, bauen jedoch meist auf herkömmlichen Zylinderverschlüssen von Gewehren auf. Durch die Länge sind sie so schwer, dass die Laufmasse relativ niedrig gewählt werden muss, um das Gesamtgewicht nicht zu überschreiten. Typische Werte sind: Verschluss 1.000 g, Abzug 100 g, Schaft 400 g, Visierung und Befestigung 140 g, sodass für den 273 mm-Lauf bei Serienwaffen nur 180g und bei Unlimited lediglich 400 g für den 380 mm langen Lauf übrigbleiben. Daraus resultieren 15 mm Aussendurchmesser und eine Wandstärke von knapp 4 mm beim langen Lauf. Bei Serienwaffen muss der Lauf unter die erlaubte Maximallänge gekürzt werden, um eine sichere Wandstärke zu erreichen.

Bei den hohen Drücken und Beschleunigungen ist es aus schwingungstechnischer Sicht sinnvoll, Masse und Biegesteife der Läufe deutlich zu erhöhen.

Schwingungsablauf

Basierend auf früheren Untersuchungen (3 & 4) wurde eine typische Silhouetten-Pistole der Unlimited-Klasse „Remington XP-100“ im Kaliber 7 mm BR vermessen. Schwingungen bauen sich beim Schuss in folgender Reihenfolge auf:

1. Der Zündstift schlägt auf den Zünder und löst eine erste Welle aus, die sich über das Patronenlager durch den Lauf bis zur Mündung transversal fortpflanzt. Dort wird sie reflektiert.
2. Der Zünder brennt rund 0,15 ms und entzündet die Treibladung in der Hülse. Knapp 0,1 ms nach Aufschlag des Zündbolzens presst der Gasruck das Geschoss aus der Patronenhülse in den Lauf. Die Felder drücken sich 0,1 mm den Geschossmantel und erzeugen eine zweite Transversalwelle, die weit stärker als die erste ist und sich mit 2000 m/s zur Laufmündung fortpflanzt.

3. Nach 0,15 ms hat die Welle die Mündung erreicht und wird dort reflektiert. Es entstehen Transversal- und Longitudinal-Wellen. Dabei wird die Mündung zu Schwingungen angeregt.

4. Das Geschoss wird im Lauf beschleunigt und der Antriebsdruck erreicht nach 0,3 ms seinen Maximalwert von 4700 bar. Auch die Leistenkräfte, die das Projektil in Drehung versetzen, erreichen ihren Höchstwert. Das Geschoss bewegt sich jetzt mit halber Schallgeschwindigkeit Richtung Mündung. Das Gegenmoment der Drehkräfte versetzt den Lauf in Torsionsschwingungen.

5. Die reflektierte Longitudinalwelle trifft mit der Torsionswelle zusammen und die Phasenaddition läuft wieder Richtung Mündung. Gleichzeitig (0,4 ms vom Start) durchbricht das Geschoss - nach 23 mm Weg - die Schallmauer und eilt den Wellen im Stahl nach. Diese bewegen sich jedoch mit Mach 6 und sind schon wieder auf dem Rückweg.

6. Nach 0,75 ms ist Brennschluss und der momentane Gasdruck von rund 1000 bar erhält keine Energiezufuhr mehr.

7. Die mehrfach hin- und herreflektierten Wellen bilden Resonanzen, sodass die Mündungsauslenkung relativ gross wird, bis das Geschoss 0,9 ms nach der Zündung mit Mach 2 die Mündung verlässt.

8. Durch die Reibung ist der Geschossmantel auf 160 Grad erhitzt, der Mündungsdruck von 660 bar entspannt sich vor der Mündung und beschleunigt das Projektil nur noch marginal, das die einige Dezimeter lange Turbulenz durchheilt und in die reine Aussenballistik entschwindet.

Die Gesamtenergie von rund 6900 Joules wird zu 1/3 dem Geschoss mitgegeben. Somit ist das Ganze eine Wärmekraftmaschine mit beachtlichem Wirkungsgrad. Die restlichen 2/3 der Energie sollten jedoch keine wesentlichen Auslenkungen der Mündung verursachen, zumindest nicht, bis das Geschoss den Lauf verlassen hat. Welche Grössen relevant sind, macht der Stahlsatz deutlich, der besagt, dass eine Bogenminute Differenz schon eine Trefferabweichung von 60 mm auf 200 m Distanz ergibt.

Wünschenswert ist, die Laufachse höchstens 0,3 Minuten auswandern zu lassen.

Lösungen

Aus obigen Zusammenhängen ist ersichtlich, dass die wesentlichen Kriterien für geringe Trefferstreuung sind:

a. Erhöhung der Biegesteife des Laufes

b. Widerstand gegen Torsionsschwingungen

c. Hohe Massenträgheit verzögert die grossen Amplituden und verzögert Resonanzen bis nach dem Austritt des Geschosses aus dem Lauf.

Kurz gesagt: „Der Lauf muss dick und schwer sein“

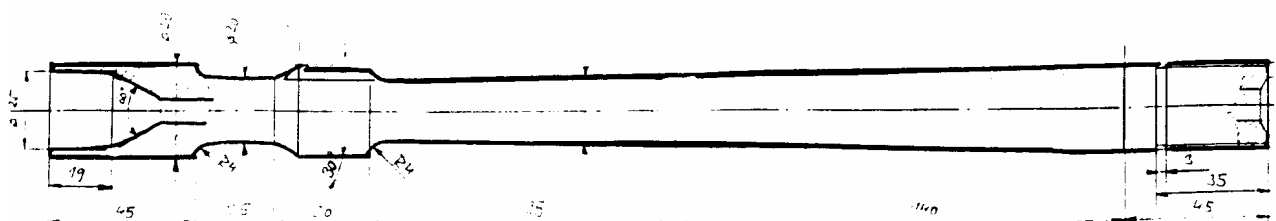
Als erstes bauten wir den Schaft aus einem Aramid-Schaum-Sandwich mit Titanium-Skelett. Dann wurden Abzug und Visierung auch aus Titan hergestellt, um insgesamt 100 g einzusparen. Ein guter Anfang, mehr nicht.

Das grösste Funktionsteil, der Verschluss, wird üblicherweise aus Stahl hergestellt. Es sind zwar auch Konstruktionen aus Alulegierungen mit einem Inlay aus Stahl bekannt. So kann die Masse zwar etwas reduziert werden, Elektrokorrosion und Instabilitäten durch unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit und -Ausdehnung sind jedoch vorprogrammiert.

In der Raumfahrt, wo höchste Festigkeit bei geringer Masse, Stabilität bei plötzlichen Temperaturänderungen und hohe Resistent gegen Materialermüdung erste Priorität haben, wird die Titanium-Legierung Ti6V4A verwandt. Sie ist in Festigkeiten um 1200 N/qcm erhältlich, und wiegt nur 54 % bester Stähle. Dazu ist sie paramagnetisch, löst keine (Nickel-) Allergien aus und lässt sich ohne Zwischenschichten mit TiNi, TiMoNi etc. beschichten, um Oberflächenhärten von 2500 HV zu erreichen. Ein „Wunderwerkstoff“ also, dessen einziger Nachteil die extrem hohen Kosten und die schwierige Bearbeitung ist. Dies ist jedoch ein ökonomisches Problem - kein wissenschaftliches!

Verschlusshülse, Schloss und Abzug wurden aus o.g. Ti-Legierung hergestellt und mit unterschiedlichen Nitriden von 1 Micron Dicke beschichtet, um eine hohe Kratzfestigkeit zu erreichen. Für bessere Gleiteigenschaften trugen wir in Sputter-Technologie auf die Abzugsklinken reinen Kohlenstoff (Diamant) auf. Die Visierung wurde direkt eingearbeitet, um eine höhere Festigkeit und keine Probleme mit unterschiedlichen Materialien zu erhalten.

Schlussendlich konnte die Gesamtmasse von komplettem Verschluss mit Abzug und Visierung auf 670 g reduziert werden. So kann ein Lauf von 1050 g eingesetzt werden. Dieser weist auf der Verschluss-Seite einen Durchmesser von 27 mm auf, bleibt im Bereich des Maximaldrucks konstant, wird dann nach vorne leicht konisch, um wenig parallele Flächen (Resonanz) zu bieten und steigt kurz vor der Mündung auf 29 mm an. Im vorderen Drittel ist noch eine Verdickung angeordnet, welche die Mündung vor Longitudinalwellen abschirmt (Wellenbrecher) und gleichzeitig als Träger des Frontvisiers fungiert (siehe Bild 1).



Ergebnisse

Die Biegesteife des 2,5 mal so schweren Laufes wie bei vergleichbaren Modellen ist rund 6 mal so hoch. Wichtiger ist jedoch das Verhalten bei Impulsanregung:

- Der Impuls nach 2. und 3. ist weit geringer, da es durch unterschiedliche Laufzeiten im dickwandigen Konus zu Phasenauslöschungen kommt.
- Die Torsionschwingungen nach 4. sind an der Mündung kaum mehr nachzuweisen, da deren bewegte Masse um mehr als eine Grössenordnung höher liegt.
- Das Aufschaukeln nach 5. wird zunächst verhindert, da ein Grossteil der Anregung durch die andere Impedanz der Titanhülse (e-Modul) von dieser kurzgeschlossen wird.
- Erst nach dem Verlassen des Projektils durch die Mündung sind Resonanzerscheinungen an der Mündung nachweisbar, die durch die dynamische Masse weit tieffrequenter als üblich ausfallen.

Der vordergründige Nachteil der um Faktor 10 geringeren Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Ti-Legierung gegenüber Stahl ist irrelevant, da die Lafoberfläche mit rund 350 ccm weit mehr Wärme an die Umgebungsluft abgibt. Nach 40 Schuss in 15 Minuten stieg die Temperatur um lediglich 23 Celsius. Zusammen mit der geringen thermischen Expansion werden sogar praktische Vorteile sichtbar: Abzug und Visierung verändern nicht ihre Dimension und können genauer gefertigt werden. Auch entfallen die störenden Hitzeschlieren unter der Visierung.

Der grosse Mündungsdurchmesser ermöglicht zusätzlich eine bessere Gasableitung - durch eine konzentrische Führung - sodass das Projektil weniger von Turbulenzen gestört wird. Details darüber würden jedoch einen eigenen Artikel beanspruchen.

Praktische Auswirkungen

Die erzielten Verbesserungen zeigen sich in Streukreisen, die im Bereich um 20 mm auf 200 m Distanz liegen.

Die Lafoberfläche von 350 qcm gibt in den Schiesspausen so viel Wärme an die Umgebungsluft ab, dass sich der Lauf auch nach 45 Schuss nur geringfügig erwärmt. Das Vergleichsmodell mit 140 qcm kann nach dieser thermischen Belastung jedoch nicht mehr angefasst werden.

Literatur:

(1) DEVA „7x49 GJW“ Wiederladebuch 1994 u. 1999

(2) International Metallic Silhouette Shooters Union (IMSSU) „Rules and Regulations“; Stand 1997

(3) Guido J. Wasser „Laufschwingungs-Messungen: Messverfahren“
Deutsches Waffen Journal 12/87 und 1/88.

(4) Guido J. Wasser „Laufschwingungs-Messungen am Beispiel einer Sportpistole“ DAGA-Jahresband 89, Seiten 303-306

(5) Caliber „Silhouettenschiessen – Waffen, Trends und Sonderbares“ <
[www. caliber.de](http://www.caliber.de) >