



MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

„Experimentelle Untersuchungen der Auswirkungen von
Laufschwingungen bei Kleinkalibersportgewehren“

Verfasser

Johannes Sequard – Base, BSc

angestrebter akademischer Grad

Master of Science (MSc)

Wien, 2012

Studienkennzahl lt.
Studienblatt:

A 066 876

Studienrichtung lt.
Studienblatt:

Masterstudium Physik

Betreuer:

Dr. phil Johannes Pfannhauser

INHALTSVERZEICHNIS

<i>Punkt</i>	<i>Titel</i>	<i>Seite</i>
1.	Einleitung	4
1.1	Allgemeines	4
1.2	Grundlagen	5
1.3	Aufgabenstellung	9
2.	Das Modell ROSSI	11
2.1	Grundgleichung zur Stab/Laufschwingung	11
2.2	Ballistik	13
2.2.1	Innenballistik	13
2.2.2	Außenballistik	14
2.3	Modellfamilie ROSSI	14
3.	Experimenteller Aufbau und Durchführung	16
3.1	Allgemeine Versuchsbeschreibung	16
3.2	Resultate zu den Laufschwingungen	17
3.2.1	Laufschwingungen beim Versuchsgewehr EVOLUTION	22
3.2.2	Laufschwingungen beim Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER27	
3.2.3	Die Laufschwingungen beim Gewehr „ANSCHÜTZ“	32
3.3	Resultate zu den Trefferbildern	39
3.3.1	Prüfung der Verteilung der Trefferkoordinaten	39
3.3.2	Die Trefferbilder	42
3.4	Einfluss der Lauftemperatur auf die v_0 (Schätzung)	55
3.4.1	Energiebilanz eines Kleinkaliberschusses	55
3.4.2	Mittlere Geschoßreibung und Lauftemperaturerhöhung	62
4.	Theoretische Berechnungen mit ROSSI	74
4.1	Dynamisches Grundverhalten	75
4.2	v_0 - Scan	82
4.3	Bettungstest	83

5.	Zusammenfassung und Diskussion der Resultate	86
5.1	Laufschwingungsuntersuchungen	86
5.2	Schussbildanalyse	87
5.3	Schlussbemerkungen	89
	Literaturverzeichnis	90
	Danksagung	92
	Abstract	94
	Zusammenfassung	95
	Lebenslauf	96

1. Einleitung

1.1 Allgemeines

Es ist eine interessante Tatsache, dass für die meisten Menschen jene Bereiche des Lebens die größte Faszination ausüben, die sie selbst am wenigsten erreichen können. Damit gekoppelt ist der, speziell in der Wissenschaft und im Leistungssport, stark ausgeprägte Drang nach Perfektion, wobei sich immer die Frage nach deren Messbarkeit stellt.

Auch ich habe schon vor vielen Jahren den Wunsch verspürt meine Leistungen im sportlichen Wettkampf zu messen. Dabei ist es mir immer ein Anliegen gewesen einen Sport zu wählen, dessen Leistungskriterium frei von jeglicher menschlicher Willkür, also objektiv ist. Da ich mich schon über viele Jahre für Handfeuerwaffen interessiere, ist es nicht verwunderlich, dass ich mich für den Schießsport entschieden und ihn mit großem Einsatz und Enthusiasmus betrieben habe.

In dieser, in Österreich leider wenig bekannten aber international oft sehr beliebten Sportart, könnte die Leistungserfassung kaum objektiver sein. Es zählt einzig und alleine der Abstand der Treffer vom Scheibenzentrum. Dabei beeindruckt das symbiotische Wechselwirken zwischen menschlicher Höchstleistung und innovativer Technik.

Selbst nach jahrelanger schießsportlicher Erfahrung übt das ständige Bestreben nach dem unerreichbaren „perfekten Schuss“ eine ungeheure Faszination aus. Ein Synonym für die anfangs gestellte Frage nach der Perfektion ist hier die Präzision, deren konkrete Messbarkeit allerdings auch noch näher hinterfragt werden muss.

In den unzähligen Stunden des Trainings hat sich mir allerdings noch eine Vielzahl anderer Fragen aufgedrängt, die weder von Trainern noch von Standardlektüren zum Thema Sportschießen befriedigend beantwortet werden konnten. Deshalb hat schon früh mein Interesse der Physik gegolten, die viele Probleme anschaulich werden lässt und für etliche „Aha – Momente“ gesorgt hat.

Schon meine Fachbereichsarbeit zur Matura hat sich mit den physikalischen Prinzipien des Luftgewehres beschäftigt.

Während meiner Präsenzdienstzeit im Heeresleistungssportzentrum (HLSZ) habe ich die Gelegenheit bekommen mit dem Bundestrainer Großkaliber des Österreichischen Schützenbundes und Kommandant des Bundesheerschützenkaders „Gewehr“ Vizeleutnant Alfred TAUBER in Kontakt zu treten, der auch Konstrukteur des Versuchsgewehres EVOLUTION ist und zu dessen möglicher Verbesserung meine Masterarbeit einen Beitrag liefern soll. Bei diesem Versuchsgewehr EVOLUTION handelt es sich um ein Kleinkalibersportgewehr. Dabei wird ein neuer Ansatz zur Bettung des Gewehrsystems im Schaft verfolgt. Der Kerngedanke besteht hier darin, durch eine variabel positionierbare Bettung den Einfluss der unvermeidbaren Schwingungen eines Gewehrlaufes beim Schuss zu minimieren. Damit einhergehend kommt es zu einer mitunter deutlichen Verringerung der Schussstreuung.

Im Rahmen dreier Verwaltungspraktika, bzw. eines Funktionsdienstes beim Österreichischen Bundesheer sind von mir ausführliche Untersuchungen am Versuchsgewehr EVOLUTION durchgeführt worden.

Primäres Ziel dieser Arbeit soll ein Erkenntnisgewinn über den Einfluss der Laufschrwingungen auf die Präzision von Sportwaffen sein. Dazu ist es einerseits nötig umfangreiche Messungen durchzuführen und andererseits die Resultate mit theoretischen Vorhersagen zu vergleichen und zu beurteilen. Die dafür nötige Infrastruktur ist mir vom Amt für Rüstung und Wehrtechnik, Abteilung Waffen und Flugkörpertechnik, Referat Leichte Waffen, zur Verfügung gestellt worden. Im Rahmen meiner Bachelorarbeit [1] wird die zur Verwendung gekommene Messmethodik detailliert beschrieben, weshalb ich im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit öfters auf meine Bachelorarbeit verweisen werde.

1.2 Grundlagen

Um die Arbeit auch für Personen ohne waffentechnische Vorkenntnisse interessant zu machen, möchte ich an dieser Stelle einige, für das weitere Verständnis wichtige Begriffe kurz erläutern.



Abb. 1.1: Exemplarische Darstellung der Hauptkomponenten eines Kleinkalibersportgewehres am Beispiel eines Wettkampfgewehres ANSCHÜTZ Mod. 1907.

Betrachtet man ein Gewehr, so kann man es in 2 große Baugruppen unterteilen. Das ist einmal der Schaft, der aus Holz, Kunststoffen oder Aluminium besteht und der direkten Verbindung zwischen Waffe und Mensch dient. Um dem Schützen eine möglichst komfortable Schießposition zu ermöglichen weisen moderne Schäfte von Sport - und Scharfschützengewehren eine Vielzahl von Verstellmöglichkeiten auf, die den Schaft zu einer individuell an den Körper des Schützen angepassten Maßanfertigung werden lassen.

Die zweite große Baugruppe einer Handfeuerwaffe ist das sogenannte System. Darunter versteht man die Systemhülse, den Verschluss (der sich in der Systemhülse befindet) und den Lauf (der in die Systemhülse eingeschraubt ist). Weist die Laufinnenwand ein spiralenförmiges Profil auf, so spricht man von einer Büchse, (im Gegensatz zu einer Flinte mit glattem Lauf). Bei diesem Profil handelt es

sich um erhabene Flächen (die Felder) und um Vertiefungen, die als Züge bezeichnet werden. Die Anzahl und der Winkel der Züge können je nach Waffentyp stark variieren. Im Falle von Kleinkalibersportgewehren (darunter werden Waffen des Kaliber .22lr verstanden) ist es üblich, einen Lauf mit Rechtsdrall und 4 – 6 Zügen zu wählen.

Sinn dieses Profils ist es dem Geschoß die nötige Stabilität für den Flug zu verleihen, das in diesem Fall durch den Kreiseffekt geschieht. Eine andere Methode ein Projektil zu stabilisieren, ist die Verwendung von Pfeilgeschoßen, die die auftretenden aerodynamischen Kräfte an den Flügeln nützen. Da für diese Munition allerdings auch so genannte Treibspiegel (eine Abdichtung, die sich nach Verlassen des Laufes vom Geschoß löst) zum Einsatz kommen, ist deren Verwendung als Sportmunition zu teuer. Die meisten Geschoße sind also ogival geformt. Ihr Durchmesser liegt im Allgemeinen zwischen dem Zug - und dem Feldkaliber. Im Kleinkaliberbereich kommen derzeit nur Blei – Vollgeschoße zur Verwendung. Da Blei über einen sehr niedrigen Schmelzpunkt verfügt, ist es nicht möglich, mit solchen Geschoßen die auftretenden Führungskräfte vom Zug – Feldprofil ab einer Geschwindigkeit von ca. 500 m/s, zu übertragen. Aus diesem Grund setzt man bei Großkalibermunition Mantelgeschoße ein. Dabei ist der Bleikern mit Tombak (Kupfer-Zink Legierung) umhüllt, um auch bei hohen Temperaturen noch die Führung in den Zügen zu garantieren.

Ein weiterer Nachteil den Bleigeschoße aufweisen, ist die Laufverbleiung. Es lagert sich bei jedem Schuss etwas Blei in den Zügen ab, das nur durch Reinigen wieder entfernt werden kann. Um diesen Effekt zu minimieren, sind die Bleigeschoße der Kleinkalibermunition gefettet.

Nicht nur die Geschoße unterscheiden sich beim Kleinkaliber von den sonst üblichen Bauarten, auch die Zündung der Patrone erfolgt auf unkonventionelle Weise. Bei herkömmlicher Munition beinhaltet die Patronenhülse nicht nur das Geschoß und das Pulver (Nitrozellulose), sondern auch am Patronenboden ein stoßempfindliches Zündhütchen. Betätigt der Schütze den Abzug, so wird der, durch eine Feder vorgespannte, Schlagbolzen freigegeben und trifft auf das Zündhütchen, wodurch eine Stichflamme in der Patronenhülse erzeugt wird, die das Treibladungspulver

zündet. Diese Methode wird als Zentralfeuerung bezeichnet. Die Kleinkalibermunition ist allerdings randbefeuert. Dabei gibt es kein Zündhütchen im eigentlichen Sinn. Die Zündung erfolgt hier durch eine schlagempfindliche chemische Substanz die hier innen in den Rand der Patrone eingebracht ist. Der Schlagbolzen bewegt sich folglich nicht in der Laufseelenachse sondern darüber, um den hinteren Patronenrand zu treffen.

Durch das rasche Verbrennen des Treibladungspulvers entsteht ein Gasdruck, der das Geschoß, nach Überwinden des Auszieh Widerstandes, in die Züge und Felder des Laufes einpresst und in weiterer Folge bis zur Mündung beschleunigt. Speziell beim Einpressen und kurz danach treten teilweise sehr hohe Drücke (beim Großkaliber bis 4000 Bar) auf, die vom System und vor allem vom Verschluss aufgenommen werden müssen. Dabei hat sich um die vorletzte Jahrhundertwende der Zylinderverschluss als effizienteste Methode herauskristallisiert. Dieser besteht aus einem zylinderförmigen Verschlusskörper dessen Inneres die Schlageinrichtung und damit auch den Schlagbolzen aufnimmt. Am Kopf des Verschlusses befinden sich 2 oder mehrere so genannte Verriegelungswarzen, die bei Drehung des Verschlusses in die dafür vorgesehenen Ausnehmungen in der Systemhülse eingreifen.

Um einen Schuss abzugeben, wird zunächst der Verschluss nach links gedreht und anschließend zurückgezogen. Nun muss eine Patrone auf den Zubringer gelegt und der Verschluss wieder nach vorne geschoben werden. Zuletzt wird der Verschluss nach rechts gedreht womit die Waffe verriegelt und feuerbereit ist. Das Spannen des Schlagbolzens geschieht während dem nach links bzw. nach rechts drehen.

Gezielt wird beim Sportschießen mittels eines Diopters, das praktisch einem Loch entspricht, dessen Position verstellbar ist und einem ringförmigen Korn über der Laufmündung (Ringkorn). Beide Kreisquerschnitte müssen dann um den Scheibenspiegel zentriert werden um zu treffen.

Die Visiereinrichtung ist genauso wie der Abzug am System befestigt. Die Verbindung zwischen Schaft und System stellen in der Regel 2 Schrauben dar, die in die Systemhülse eingebracht werden. Genau darin unterscheidet sich das untersuchte Versuchsgewehr EVOLUTION (siehe Abb. 1.2) von herkömmlichen

Waffen wie dem in Abb. 1.1 gezeigten Wettkampfgewehr ANSCHÜTZ. Beim Versuchsgewehr EVOLUTION wird nämlich der Lauf im hinteren Teil zwischen 2 Halbschalen geklemmt. Sowohl die Position der Schalen als auch deren Füllmaterial ist variabel. Dadurch bietet sich eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten.

Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsgewehrs EVOLUTION kann meiner Bachelorarbeit entnommen werden [1].



Abb.1.2: Das Versuchsgewehr EVOLUTION mit dem die folgenden experimentellen Untersuchungen primär durchgeführt werden.

1.3 Aufgabenstellung

Ziel der Arbeit ist es vor allem, an Hand des Versuchsgewehrs EVOLUTION Faktoren zu erfassen, die die Schussstreuung über eine Schussserie von 50 Schuss minimieren. Das in Abschnitt 1.1 genannte primäre Ziel meiner Masterarbeit soll nun dahingehend präziser ausformuliert werden.

Um dem Verlauf der Arbeit folgen zu können ist es zu Beginn wichtig die untersuchten Messgrößen und deren Schnittstellen mit den theoretischen Berechnungen anzugeben. So kann die Schussstreuung an Hand von Trefferbildern, die die Informationen über die horizontalen und vertikalen Koordinatenwerte der Einzelschüsse liefern und aus denen dann die Streuung bestimmt wird, experimentell ermittelt werden. Weiters können auf die Streuung Einfluss nehmende Informationen über die Laufschrägungen, in Form von Beschleunigungsmessungen an der Laufmündung, und über die Geschossgeschwindigkeit ebenfalls experimentell erhalten werden. Das Simulationsmodell ROSSI (siehe Kapitel 2) ermöglicht im

Allgemeinen auch die Berechnung derselben Größen. Der Unterschied besteht nur darin, dass nicht die Beschleunigung am Ort der Laufmündung, sondern die transversale Position der schwingenden Mündung (Elongation) bestimmt wird, was jedoch für die Frequenz, die letztlich die Verbindung zwischen Theorie und Experiment darstellt, bis auf einen Phasenfaktor, belanglos ist. Die Geschößgeschwindigkeiten und die Tendenzen der Streuung können direkt verglichen werden.

Die Theorie zeigt weiters eine direkte Korrelation zwischen den Anfangsbedingungen (Bettung, v_0 ...), den Schwingungen und der Schussstreuung. Diese Zusammenhänge können nur theoretisch mit dem Modell ROSSI ermittelt werden, da der experimentelle Aufwand dazu den Rahmen der vorliegenden Arbeit bei weitem finanziell und zeitmäßig sprengen würde.

Damit ergibt sich folgende Vorgehensweise. Der experimentelle Bereich wird umfassen:

- Ermittlung von Trefferbildern (50 Schuss) mit dem Versuchsgewehr EVOLUTION und zu Vergleichszwecken mit einem klassischen Sportgewehr der Firma ANSCHÜTZ von einem Schießbock aus. Dabei wird das Gewehr als Ganzes am Schießbock montiert und nicht nur das System alleine eingespannt. Dadurch soll eine größere Nähe zur Realität beim Schießen aus der Schulter erzielt werden.
- Messung der v_2 von jedem Schuss und Diskussion der Geschwindigkeitsverteilung. Die Geschößgeschwindigkeit an der Mündung (v_0) kann aus messtechnischen Gründen nicht erfasst werden, so dass die Geschwindigkeiten ca. 2 m nach der Mündung gemessen werden (daher v_2).
- Messung und Aufzeichnung der Laufschwingungen mit einem Trägheitssensor. Es wird die Beschleunigung bei der innenballistisch wirksamen Laufmündung als Funktion der Zeit erfasst. Die innenballistisch wirksame Laufmündung ist dort wo der Laufinnendurchmesser, das Kaliber, endet und, wie im Falle des Versuchsgewehres EVOLUTION eine so genannte überkalibrige Laufverlängerung beginnt. Siehe Erläuterungen in meiner Bachelorarbeit [1].
- Durchführung der Messungen:
Im 300m-Schießkanal des Amtes für Rüstung und Wehrtechnik / Abteilung Waffen und Flugkörpertechnik (ARWT/WFT) in Felixdorf auf eine Schussdistanz von 50

m. Das entspricht der üblichen Kleinkaliber-Wettkampfdistanz. Die personelle und materielle Beistellung für die direkten Laufschrwingungsmessungen erfolgen durch ARWT/OPMT (Optronik und Physikalische Messtechnik). Bis auf wenige Ausnahmen wird als Standard die Munition R100 der Firma RWS verwendet, wobei mittels Temperaturruhe (20 °C) darauf zu achten ist, stets Munition gleicher Temperatur zu verschießen, um somit thermisch bedingte Schwankungen der spezifischen Energie der Treibladung zu minimieren.

Der theoretische Teil umfasst:

- Die Theorie stützt sich bezüglich der Simulationsrechnungen auf das bei ARWT/WFT Referat Systemanalyse entwickelte Computersimulationsmodell ROSSI (siehe Abschnitt 2).
- Weiters wird theoretisch an Hand der Energiebilanz eines Schusses der Einfluss der sich ändernden Lauftemperatur auf die tendenzielle v_0 -Entwicklung über 50 Schuss untersucht. Die Motivation für den letztgenannten Punkt ergibt sich aus experimentellen wie theoretischen Erkenntnissen bezüglich der unerwartet hohen Sensibilität der Schussstreuung gegenüber der v_0 .

2. Das Modell ROSSI

Der vorliegende Abschnitt ist eine Kurzdarstellung des bei ARWT/WFT, Referat Systemanalyse, entwickelten Computersimulationsmodells ROSSI. ROSSI steht für RohrSchwingungsSimulation und ist ein in FORTRAN geschriebenes Modell zur Beschreibung von transversalen Schwingungen eines Stabes. Somit ist es auch geeignet zur Abbildung von Laufschrwingungen, z.B. von denen eines Gewehres, da zusätzlich noch Unterprogramme für die Innen- und Außenballistik sowie für die Lagerung des Gewehres (z.B. starrer Schießbock oder Schütze) beigelegt sind.

2.1 Grundgleichung zur Stab- / Laufschrwingung

Aus der Literatur [2] wird folgende partielle inhomogene Differentialgleichung 2. Ordnung in der Zeit und 4. Ordnung in x mit konstanten Koeffizienten entnommen:

$$E I \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + c_1 I \frac{\partial^5 y}{\partial x^4 \partial t} + c_2 \frac{\partial y}{\partial t} + k y + \rho S \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \bar{F}(x, t) \quad 1$$

Dabei bedeuten:

x	Richtung in der Stab/Lauf-Achse (m)
y	Richtung quer zur Stab/Lauf-Achse, Auslenkungsrichtung bei transversalen Laufschrwingungen (m)
t	Zeit (s)
E	Elastizitätsmodul des Stabes/Laufes (z.B. hier für Stahl) (N / m^2)
I	Polares Flächenträgheitsmoment des Stab/Lauf-Querschnittes (m^4)
ρ	Dichte des Stabes/Laufes (kg / m^3)
S	Querschnitt des Stabes/Laufes (m^2)
k	Federkonstante (N / m^2)
c_1	Interne Dämpfungskonstante ($N s / m^2$)
c_2	Externe Dämpfungskonstante ($N s / m^2$)
$\bar{F}$	Querkraft (N / m); entspricht einem Störterm der die Krafteinwirkungen von „außen“, z.B. der Schwerkraft, einem gezieltes „Antippen“ an einem Laufsegment oder der Geschoßexzentrizität abbildet.

Für umfassendere Überlegungen ist auch Harris' „Shock and Vibration Handbook“ [3] geeignet. Der zentrale Term zur Beschreibung der Biegung ist $E I \frac{\partial^4 y}{\partial x^4}$.

Mit der Grundgleichung 1 wird eine eindimensionale transversale Stab/Lauf-Schwingung beschrieben. In ROSSI werden die vertikale und horizontale Schwingungsebene als voneinander unabhängig nach jeweils einer Gleichung 1 berechnet.

Für die Randbedingungen gelten die folgenden Festlegungen. Der Stab/Lauf hat stets 2 freie Enden. Die Einspannung/Bettung erfolgt über die Federkonstante k und

den Dämpfungsfaktor c_2 . An den freien Enden gilt ferner $\frac{d^2 y}{dx^2} = 0$, das heißt kein Biegemoment und $\frac{d^3 y}{dx^3} = 0$, das heißt keine Scherbeanspruchung. Die Berechnung der Auslenkung $y(x)$ bzw. der Geschwindigkeiten $\frac{dy(x)}{dt}$ erfolgt nicht analytisch, sondern mit Hilfe einer Differenzenmethode. Der Stab/Lauf wird also in Richtung der Längsachse in kleine Abschnitte Δx geteilt.

2.2 Ballistik

2.2.1 Innenballistik

Die in ROSSI verwendete Innenballistik ist einfach aufgebaut. Ihre Grundlagen werden dem Rheinmetall Taschenbuch [4] entnommen. Ausgangspunkt ist die Energiebilanz (Resalgleichung)

$$m_{c0} Z Q = c_v Z m_{c0} T + \frac{m^*}{2} v_G^2$$

mit

m_{c0} Anfangspulvermasse in der Patrone (kg)

Q Spezifische Energie des Pulvers (J / kg)

$Z = \frac{m_c}{m_{c0}}$ Verhältnis des bereits in Gas umgesetzten Pulvers zur Anfangspulvermasse

m_c Pulvermasse die bereits als Gas vorliegt (kg)

c_v Spezifische Wärme des Pulvergases (bei konstantem Volumen) (J / kg K)

T Temperatur (K)

m^* Effektive Masse (kg), das heißt

$m^* = m_G + \varepsilon m_{c0}$ mit

m_G Geschoßmasse (kg)

$\varepsilon \sim 0.5$ Mitführungsfaktor (Sebertfaktor) für die Pulvermasse. Nicht nur das Geschoß wird beschleunigt, sondern auch die Pulvergase sowie noch nicht verbranntes Pulver.

2.2.2 Außenballistik

Das Unterprogramm zur Berechnung der Außenballistik ist eine für den Geschößflug adaptierte allgemeine Flugkörpermodellierung in 6 Freiheitsgraden, wie sie bei ARWT/WFT entwickelt wurde. Eine detaillierte Beschreibung entfällt hier, da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf den waffenseitigen Laufschrägungen liegt und nicht auf außenballistischen Untersuchungen einer oder mehrerer verschiedener Munitionssorten.

Die aerodynamischen Parameter des Geschößes werden mit dem Modell PRODAS (PC-PRODAS Version 3.82 der Firma Arrow Tech Associates) ermittelt. Die Werte von PRODAS beschreiben eine linearisierte Aerodynamik, sodass auch mit ROSSI die Aerodynamik nur linearisiert abgebildet werden kann.

Es wird die ICAO Standardatmosphäre verwendet, eine Berücksichtigung von Wind ist derzeit nicht möglich. Ebenso sind abgangsbalistische Effekte mit ROSSI nicht modellierbar.

2.3 Modellfamilie ROSSI

Die Modellfamilie ROSSI besteht nicht nur aus dem Leitprogramm das mit ROSSI aufgerufen wird, sondern aus noch einigen anderen Programmen. Folgende Programme bilden die „Familienmitglieder“:

ROSSI

Das Hauptprogramm zur Simulation eines Einzelschusses. Parallel zur Berechnung der Stab-/Laufschrägungen werden die Bewegungen der Laufsegmente auch grafisch dargestellt. Damit lassen sich nicht nur die reinen Stab-/Laufschrägungen bezogen auf die Laufachse grafisch erkennen, sondern auch die Bewegungen des Stabes/Laufes durch die „Schützenbewegungen“. Eingetragen werden die:

- Geometriedaten des Stabes/Laufes
- Munitionsdaten
- Schützenverhalten (hier für die vorliegenden Untersuchungen stets der „starre Bock“)
- Allgemeine Steuerdaten

Die Ausgabe umfasst unter anderem Angaben zur gerechneten Innen- und Außenballistik sowie die Auslenkungsdaten als Funktion der Zeit für eine vorher festgelegte Längsposition entlang der Stab/Lauf-Achse.

ROG

ROG steht für ROSSI Grafik und dient zur grafischen Darstellung einiger Größen im Anschluss an eine Berechnung durch das Programm ROSSI.

ROST

ROST ist das zweite Schlüsselprogramm der Modellfamilie ROSSI. Es dient zur Simulation von Trefferbildern. Daher die Bezeichnung ROST für ROSSI Statistik.

ROST ist ein Monte Carlo Programm, wobei folgende Größen durch Aufrufen eines (Pseudo-) Zufallszahlengenerators von Schuss zu Schuss gestreut werden.

Gleichverteilt:

- Startrollwinkel der radialen Geschoßexzentrizität
- Falls aktiviert, der Rollwinkel der Störquerkraft. Über den Rollwinkel wird festgelegt von welcher Seite (oben, unten, rechts, links) senkrecht auf die Stab/Lauf-Achse die Störquerkraft einwirken soll.

Gaußverteilt:

- Geschoßmasse
- Geschoßexzentrizität radial und axial (siehe auch Kapitel. 4.2)
- Treibladungsmasse
- Korndurchmesser des Pulvers
- Spezifische Verbrennungswärme
- Auszieh Widerstand
- Falls aktiviert die Stärke der Störquerkraft
- Visierwinkel in Azimut und Elevation, zur Modellierung möglicher Schützenfehler beim Visieren
- Die 6 Parameter (Federkonstanten und Dämpfungsfaktoren) zur Modellierung des Schützen mit 3 harmonischen Oszillatoren

Als Resultate mit ROST erhält man neben einer Grafik mit dem Trefferbild folgende Aussagen:

- Auflistung der konkreten Werte für die gestreuten Größen bei jedem einzelnen Schuss
- Die Lage des mittleren Treffpunktes sowie die Standardabweichungen in Azimut und Elevation der Treffer
- Den mittleren Abstand der Einzeltreffer vom mittleren Treffpunkt
- Mittelwert über die maximalen Gasdrücke
- Mittlere v_0 und Standardabweichung der v_0

Da der Ablauf und die Resultate eines Einzelschusses in der Realität unvermeidlich mit statistischen Schwankungen verknüpft sind, sind das Trefferbild bzw. die statistischen Aussagen darüber die wichtigsten Schnittstellen zwischen der Praxis und der Theorie. Dementsprechend ist ROST eines der „stärksten“ Programme der Modellfamilie ROSSI.

3. Experimenteller Aufbau und Durchführung

3.1 Allgemeine Versuchsbeschreibung

Die Arbeiten erfolgen im Jahr 2010 in den Kalenderwochen 27 bis 30 im 300 Meter Schießkanal des ARWT/WFT/Leichte Waffen in Felixdorf.

Um den Einfluss der Laufschrägungen auf die Präzision der Waffe festzustellen, werden bei unterschiedlichen Bettungspositionen jeweils 50 Schuss – Serien abgegeben und mit Excel ausgewertet. Die getesteten Bettungen werden mit einer Nummer und dem verwendeten Material (Stoff an der Innenseite der klemmenden Halbschalen) gekennzeichnet. Die Nummern beziehen sich dabei auf die Positionen der beiden Halbschalen im Schaft, die aus Tabelle 3.1 entnommen werden können. Als Bettungsmaterialien stehen neben Teflon, dass für alle hier vorliegenden Versuche verwendet wird noch Aluminium, Stahl und Gummi zur Verfügung.

Bettung	Lage (cm)				Anmerkungen
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
1	19.5	29.5			10
4	37.5	47.5			10
5	19.5	35.5			10, 6
7	19.5	29.5	41.5	47.5	10, 6

Tabelle 3.1: Die Bettungen des Versuchsgewehres EVOLUTION. Bezugspunkt für die Lagepunkte X₁ bis X₄ ist das hinterste Ende des Systems. In der Spalte Anmerkungen bedeuten 10 und 6 die 10 cm bzw. 6 cm langen halbzylinderförmigen Klemmteile.

Die Beurteilung der Qualität eines Schussbildes erfolgt anhand des mittleren Abstandes vom mittleren Treffpunkt. Parallel zu den Schussbildern werden auch Laufschwingungsmessungen mit Hilfe von Trägheitssensoren vorgenommen. Das Versuchsgewehr EVOLUTION wird dabei, um Schützenfehler auszuschalten, von einem Schießbock aus abgefeuert. Die Trefferanzeige erfolgt mit Hilfe des optisch arbeitenden Systems der Firma MEYTON, wodurch eine Genauigkeit von 0,1 mm erreicht wird [5]. Ein weiteres wichtiges Messmittel stellt der Lichtschranken zur Geschwindigkeitsmessung dar. Um den Einfluss unterschiedlicher Temperaturen des Pulvers zu minimieren, wird die Munition in einer Thermobox bei 20°C gelagert. Für eine detaillierte Beschreibung der Versuchsanordnung und theoretische Überlegungen zum Auflösungsvermögen und zur Genauigkeit der MEYTON-Anlage verweise ich auf meine Bachelorarbeit [1].

3.2 Resultate zu den Laufschwingungen

Bei den hier vorliegenden Resultaten handelt es sich um exemplarisch ausgewählte Ergebnisse an Laufschwingungsmessungen. Die reinen Messresultate zu allen Laufschwingungsmessungen sind in einem internen Bericht von ARWT/OPMT [6] dokumentiert. Ferner werden in den folgenden Abschnitten zwei „Versuchsgewehre EVOLUTION“ untersucht. Das ist einerseits das „Standard Versuchsgewehr EVOLUTION“ wie es für den überwiegenden Teil der Messungen/Schussserien in Verwendung steht und weiterhin mit „Versuchsgewehr EVOLUTION“ bezeichnet wird

und andererseits das tatsächliche Wettkampfgewehr von Herrn Vizeleutnant TAUBER. Dieses EVOLUTION (mit der stets gleich bleibenden Bettung 5/Teflon) wird „Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER“ genannt. Weiters werden auch Messungen am Gewehr ANSCHÜTZ (siehe auch Abb. 1.1) in der klassischen Bettung zu Vergleichszwecken angestellt, sowie die Laufschrwingungen sowohl im scharfen Schuss aufgenommen, als auch für den Fall, dass sich nur eine bereits abgefeuerte, das heißt leere Patronenhülse in der Ladekammer des jeweiligen Gewehres befindet. Der Sinn von letzterem besteht darin, den Einfluss des vor dem pyrotechnischen Zünden des Schusses vorschnellenden Schlagbolzens auf das Schwingungsverhalten des Laufes zu testen. Zur Abrundung werden auch die Laufschrwingungen beim Gewehr ANSCHÜTZ für den Schuss aus der Schulter erfasst. Dadurch soll das Laufschrwingungsverhalten des im Schießbock eingespannten Gewehres mit den Verhältnissen bei einer Wettkampfstellung verglichen werden.

Die Position des Trägheitssensors liegt bei allen 3 Gewehren im Bereich der innenballistisch wirksamen Mündung und bleibt dort stets unverändert. Zum Zweck der leichteren Vergleichbarkeit mit dem Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER wird beim Versuchsgewehr EVOLUTION ebenfalls nur die Bettung 5 verwendet. Die Angaben der Schussnummern beziehen sich auf eine interne Schussnummerierung bei den Versuchen.

Abschätzung der Schlagbolzenbewegungsdauer:

Zur verbesserten Interpretation der nachfolgenden Schwingungsdiagramme wird die Dauer der Schlagbolzenbewegung grob abgeschätzt. Messtechnisch ist die Bestimmung dieser Zeitdauer mit den bei diesen Versuchen verfügbaren Messmitteln nicht möglich.

Annahmen:

- Vernachlässigung der Reibungskräfte im theoretischen Ansatz
- Modellierung des Schlagbolzens daher als ungedämpfter harmonischer Oszillator, wobei der gespannte Schlagbolzen zum Zeitpunkt $t = 0$ die Position mit dem Wert $x = x_0$ annimmt

- Als bewegte Masse m wird die Masse des Schlagbolzens durch Abwiegen bestimmt
- Experimentelle Ermittlung der Federkonstante k mittels Waage und Messung der Längenverkürzung
- Für die Bestimmung der Masse m und der Federkonstante k werden der Schlagbolzen und die Schlagbolzenfeder des Versuchsgewehres EVOLUTION verwendet.

Es gilt:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + k x = 0$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{k}{m} x \text{ mit } \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Ansatz mit $x = e^{\lambda t}$ in der üblichen Form, das heißt die allgemeine Lösung lautet:

$$x = A e^{i\omega t} + B e^{-i\omega t}$$

Die Bestimmung der Integrationskonstanten A und B erfolgt über die Anfangsbedingungen

$$x(0) = x_0$$

$$\frac{dx}{dt}(0) = 0$$

Das heißt,

$$x_0 = A + B \text{ und}$$

$$0 = i\omega A - i\omega B \Rightarrow A = B$$

$$A = \frac{x_0}{2}$$

eingesetzt in die allgemeine Lösung liefert das:

$$x = \frac{x_0}{2} (e^{i\omega t} + e^{-i\omega t})$$

und vereinfacht nach der Eulergleichung

$$x = x_0 \cos \omega t$$

Nachdem der Schlagbolzen ausgelöst wird, bewegt er sich nach $x = x_E$ (es gilt $x_E < x_0$ entsprechend der Bewegung nach $\cos \omega t$) und erreicht die Position x_E zum Zeitpunkt t_E , das heißt:

$$x_E = x_0 \cos \omega t_E$$

$$t_E = \frac{1}{\omega} \arccos \frac{x_E}{x_0} = \sqrt{\frac{m}{k}} \arccos \frac{x_E}{x_0}$$

Durch einfache Messungen werden ermittelt:

$$m \approx m_{\text{Schlagbolzen}} \cong 11 \text{ g}$$

$$k \cong 1000 \text{ N / m}$$

$$x_0 = 28.5 \text{ mm}$$

$$x_E = 25.0 \text{ mm}$$

Damit ergibt sich eine Zeitdauer für die Schlagbolzenbewegung von $\approx 1.7 \text{ ms}$. Ergänzend erhält man auch die Schlagbolzengeschwindigkeit vor dem Einschlag mit $\approx 4.2 \text{ m/s}$ sowie eine kinetische Energie des Schlagbolzens von $\approx 0.1 \text{ J}$.

3.2.1 Laufschwingungen beim Versuchsgewehr EVOLUTION

Die Abbildungen 3.1 bis 3.3 liefern die gemessenen Laufschwingungen im scharfen Schuss. Dabei wird die Munition R100 verwendet.

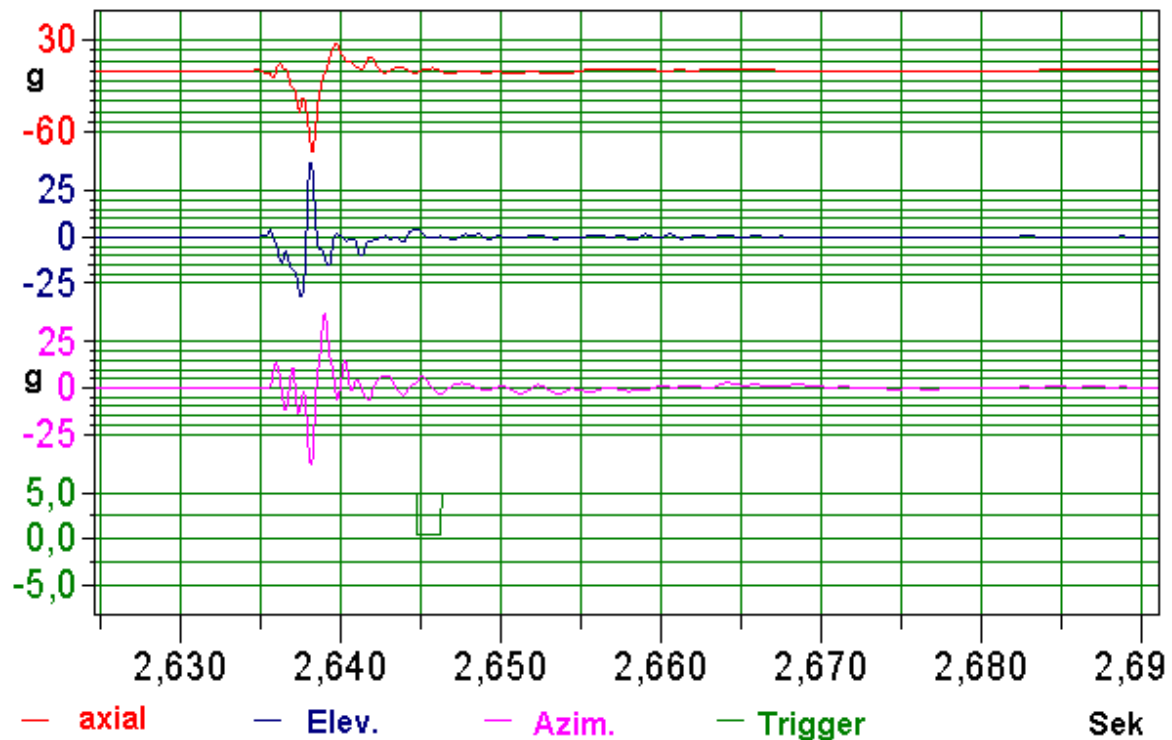


Abb. 3.1: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION;
Bettung5/Teflon, Schuss Nr. 39, $v_2 = 348.2 \text{ m/s}$; 21.07.2010

Es bedeuten:

Ordinatenachsen: Gemessene Beschleunigung in g

Abszissenachse: Zeit in Sekunden

1. Diagramm (Rot): Dynamik in Laufrichtung (longitudinales Schwingen)
2. Diagramm (Blau): Elevation (translatorisches Schwingen)
3. Diagramm (Magenta): Azimut (translatorisches Schwingen)
4. Diagramm (Grün): Markierung, die bei Geschosßdurchgang beim ersten Lichtschranken der Geschwindigkeitsmessanlage abgegeben wird. Über den Abstand zur Mündung (hier mit 2,12 m gemessen) und der Geschosßgeschwindigkeit kann der Zeitpunkt des Mündungsdurchganges ermittelt werden.

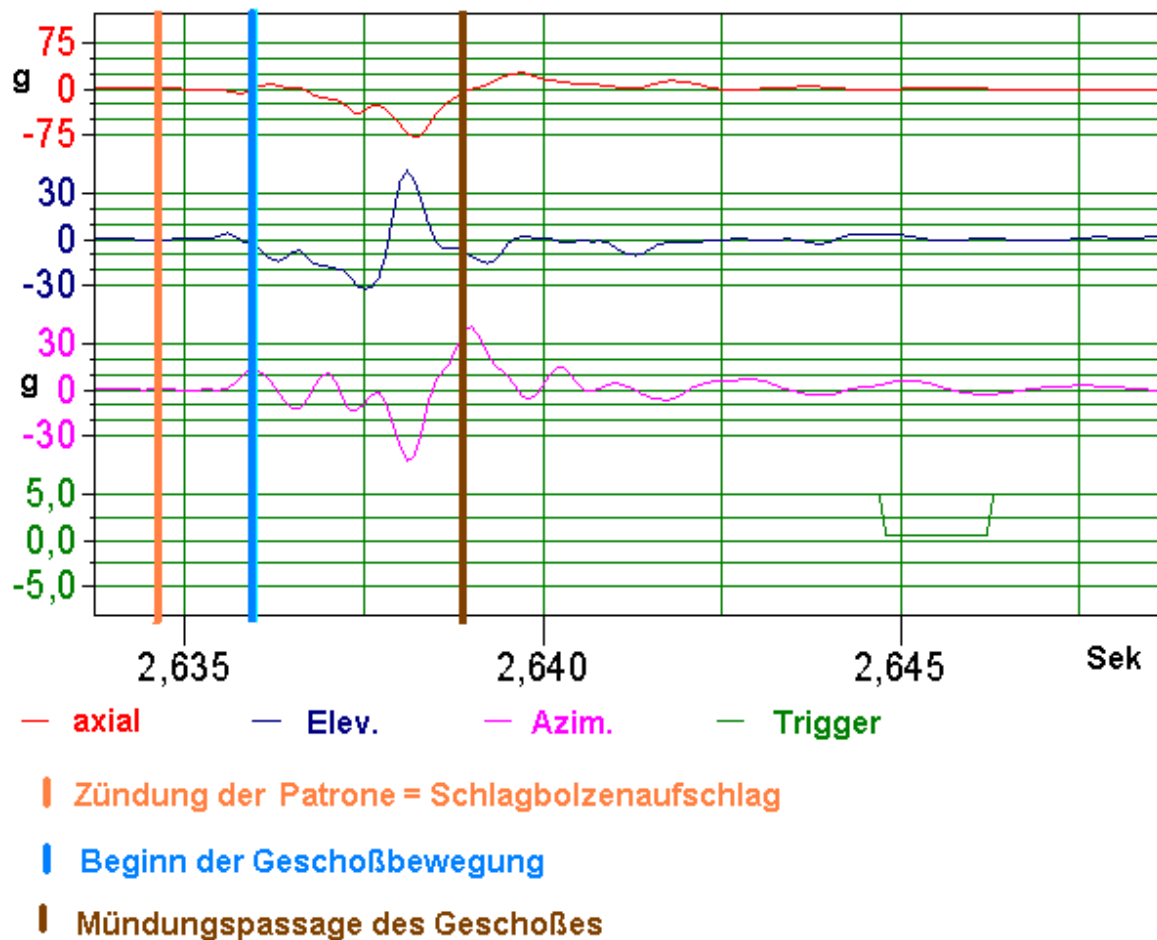


Abb. 3.2: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon, Schuss Nr. 39, $v_2 = 348.2 \text{ m/s}$; Abstand Mündung zur ersten Lichtschranke $\sim 2.12 \text{ m}$; 21.07.2010

Abbildung 3.2 zeigt den gleichen Schuss wie Abbildung 3.1, jedoch mit geänderter Skalierung.

Ferner sind in Abbildung 3.2 die Zeiten für die Mündungspassage des Geschößes, den Bewegungsbeginn des Geschößes im Lauf und des Einschlages des Schlagbolzens in die Patronenhülse (= Zündpunkt) eingetragen. Aus dem Abstand zwischen Mündung und erstem Lichtschranken von 2.12 m und der Geschwindigkeit von 348 m/s erhält man mit Bezug auf die erste Flanke des Triggersignals den Zeitpunkt der Mündungspassage. Weiters wird ein Schuss mit dem Simulationsprogramm ROSSI für eine Geschwindigkeit von $\sim 348 \text{ m/s}$ gerechnet. Die Ausgabe zur Innenballistik von ROSSI liefert die beiden weiteren Zeiten, die in

Abbildung 3.2 eingetragen sind. Dabei wird von der Zeit der Mündungspassage zeitlich nach „hinten“ eingetragen.

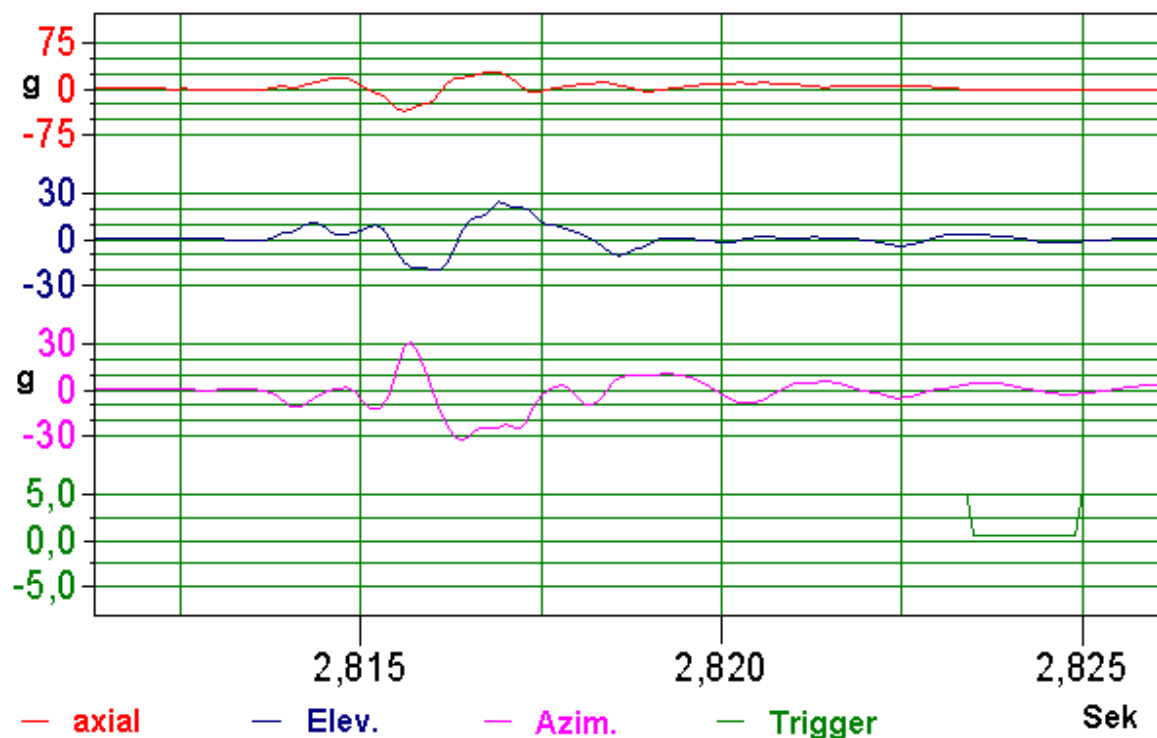


Abb. 3.3: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon, Schuss Nr. 46, $v_2 = 346.4 \text{ m/s}$; 21.07.2010

Die Abbildungen 3.4 und 3.5 zeigen die nur durch die Bewegung des Schlagbolzens ausgelösten Lauschwingungen.

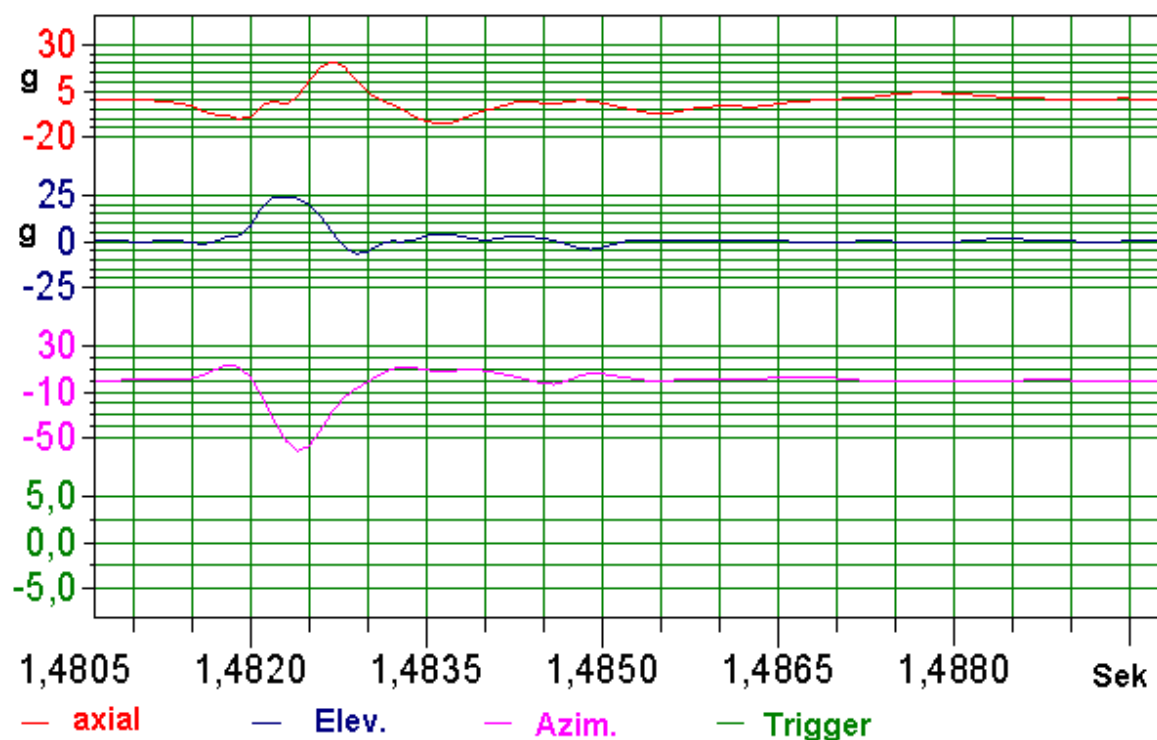


Abb. 3.4: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon, nur Schlagbolzenbewegung (1); 21.07.2010

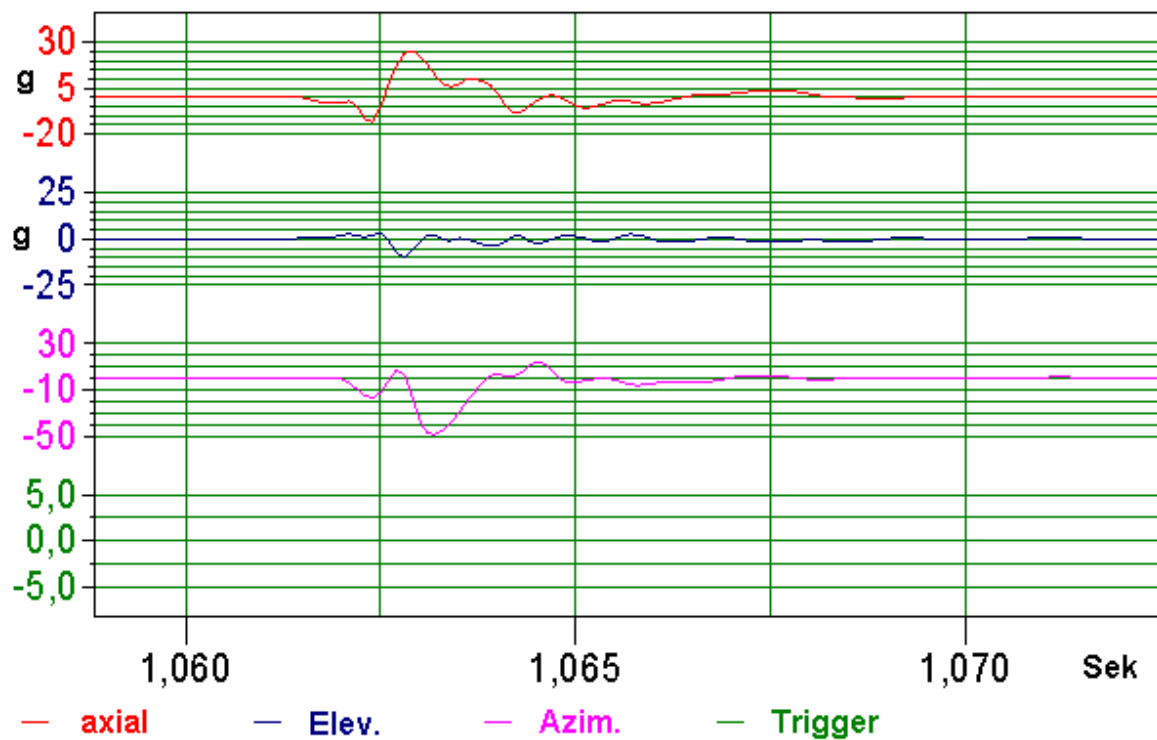


Abb. 3.5: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon, nur Schlagbolzenbewegung (2); 21.07.2010

Diskussion der Laufschwingungsmessungen zum Versuchsgewehr EVOLUTION:

- Unabhängig von der Initiierung der Laufschwingungen (scharfer Schuss oder nur durch den Schlagbolzen) zeigen die Schwingungen kein systematisches Verhalten. Form und Elongationen sind offenbar zufällig. Das heißt, Laufschwingungen sind nicht reproduzierbar in Bezug auf ihren konkreten Ablauf.
- Charakterisierung der Schwingungsdiagramme

	Max. Amplitude (g)	Gesamte Schwingungsdauer (ms)
Scharfer Schuss	~ 50	~ 10 - ~15
Nur Schlagbolzen	~ 50	~ 5

Tabelle 3.2: Allgemeine repräsentative Daten zu den Schwingungsdiagrammen des Versuchsgewehres EVOLUTION. Die angegebenen Maximal-Amplituden müssen nicht bei jedem Schuss und auch nicht in Elevation und Azimut gleichermaßen erreicht werden. Die Angaben stellen daher eine grobe obere Schranke dar.

- Wie aus Abbildung 3.2 ersichtlich ist, können keine relevanten Laufschwingungen vor der Zündung der Patrone erkannt werden. Das heißt, die vorschnellende Bewegung des Schlagbolzens wird messtechnisch, zumindest an der innenballistisch relevanten Laufmündung, unter den hier verwendeten Skalierungen der Ordinatenachse nicht nachgewiesen.
- Die Laufschwingungen, die durch den Schlagbolzen ausgelöst werden sind für jeden „Schuss“ unterschiedlich. Es gibt keine systematisch wiederkehrenden Schwingungsformen und Amplituden.
- Da beträchtliche Amplituden der Laufschwingungen bei alleiniger Wirksamkeit des Schlagbolzens gemessen werden bedeutet dies, dass
 - * die durch den Schlagbolzen induzierten Schwingungen durch dessen Einschlag/Aufschlag auf der Patronenhülse erzeugt werden,
 - * die während der Schussentwicklungsphase erkennbaren Laufschwingungen sich aus der Überlagerung der durch den Aufschlag des Schlagbolzens ausgelösten Schwingungen und den Schwingungen, die das im Lauf bewegte Geschoss translatorisch und rotatorisch erzeugt, zusammensetzen.

- Eine Auswertung von Laufschwingungsdiagrammen hinsichtlich erkennbarer Frequenzen (Eigenfrequenzen des Systems) wird in Kapitel 4.1 aufgezeigt. Es sei aber vorweg festgehalten, dass Frequenzauswertungen vor der Mündungspassage des Geschosses physikalisch nicht sinnvoll sind, da bis dahin die Zeitentwicklung der transversalen Beschleunigungen aus der Überlagerung einer Schwingungsanregung durch das bewegte Geschöß im Lauf und im Laufmaterial bereits vorhandener an den Laufenden reflektierender Wellen besteht.
- Es ist ferner zu beachten, dass die Messung an der innenballistisch wirksamen Laufmündung erfolgt, d.h. Ereignisse die am Laufanfang stattfinden (Schlagbolzenaufschlag) bei ihrer Ausbreitung durch den Lauf verändert/verzerrt werden können.
- Experimentell werden mehrere verschiedene Bettungsvarianten (siehe Tabelle 3.1) getestet. Es können jedoch wegen der stochastischen Natur der Schwingungen bis zur Mündungspassage des Geschosses keine auswertbaren Unterschiede in den Diagrammen der verschiedenen Bettungen erkannt werden. Daher werden jetzt stets Laufschwingungsdiagramme für die Bettung 5 ausgewiesen, da in weiterer Folge die Bettung 5 als nicht veränderbare Bettung beim Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER noch eine zentrale Rolle spielen wird. Ähnliches gilt auch für das Bettungsmaterial. Teflon wird als Bettungsmaterial bei den Experimenten dann stets verwendet, da auch das Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER mit Teflon arbeitet.

3.2.2 Laufschwingungen beim Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER

Die Abbildungen 3.6 und 3.7 liefern exemplarisch zwei gemessene Laufschwingungsdiagramme für den scharfen Schuss mit einer R50 Munition ebenfalls aus RWS Produktion.

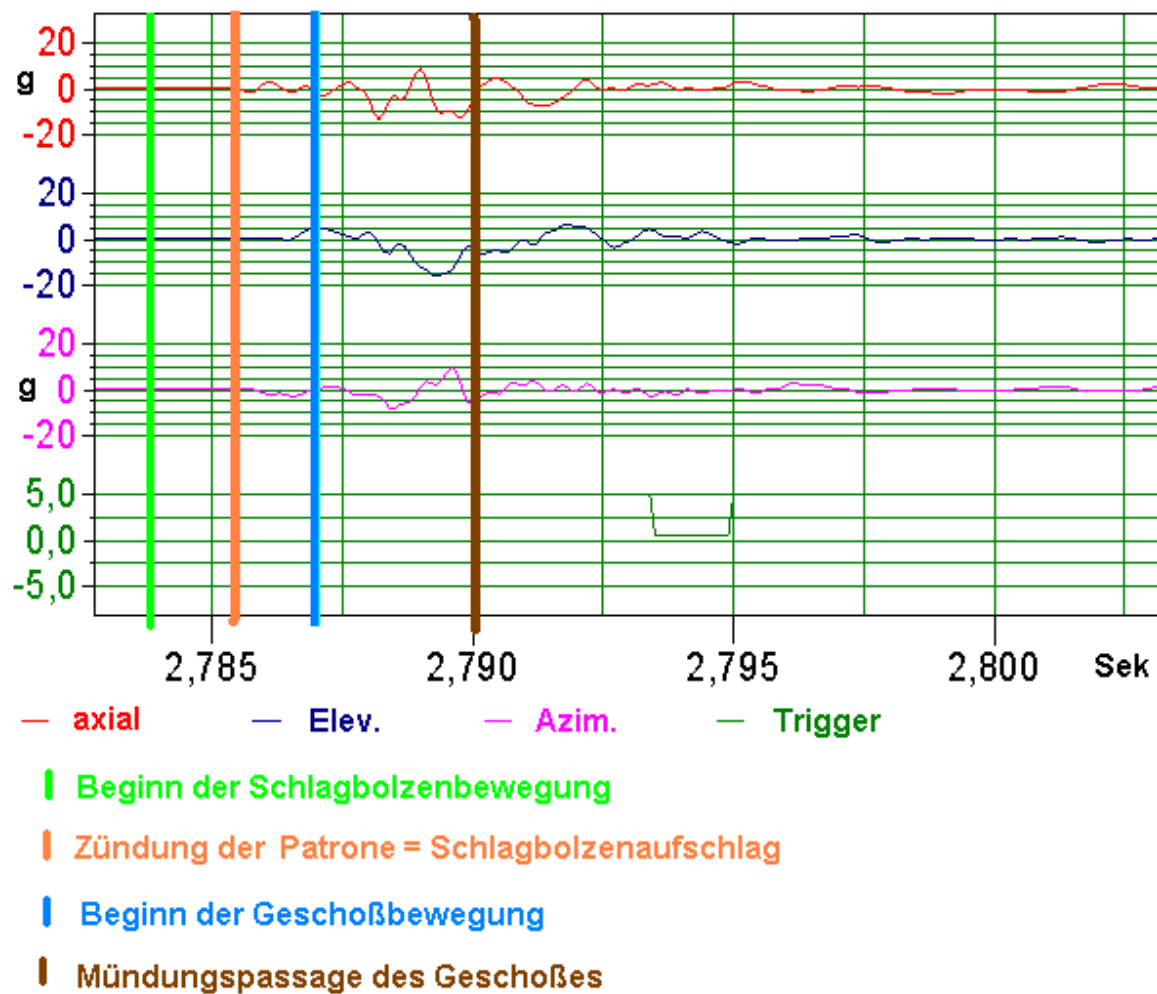


Abb. 3.6: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon, Schuss Nr. 12, $v_2 = 330.4 \text{ m/s}$, Abstand Mündung zur ersten Lichtschranke $\sim 1.12 \text{ m}$; 21.07.2010

Analog zu Abbildung 3.2 sind auch in Abbildung 3.6 die Zeitpunkte für Zündung, Bewegungsbeginn des Geschößes und Mündungspassage des Geschößes eingetragen. Zusätzlich ist auch der Zeitpunkt des Bewegungsbeginnes des Schlagbolzens ($\sim 1.7 \text{ ms}$ vor dessen Einschlag in die Patronenhülse) eingezeichnet.

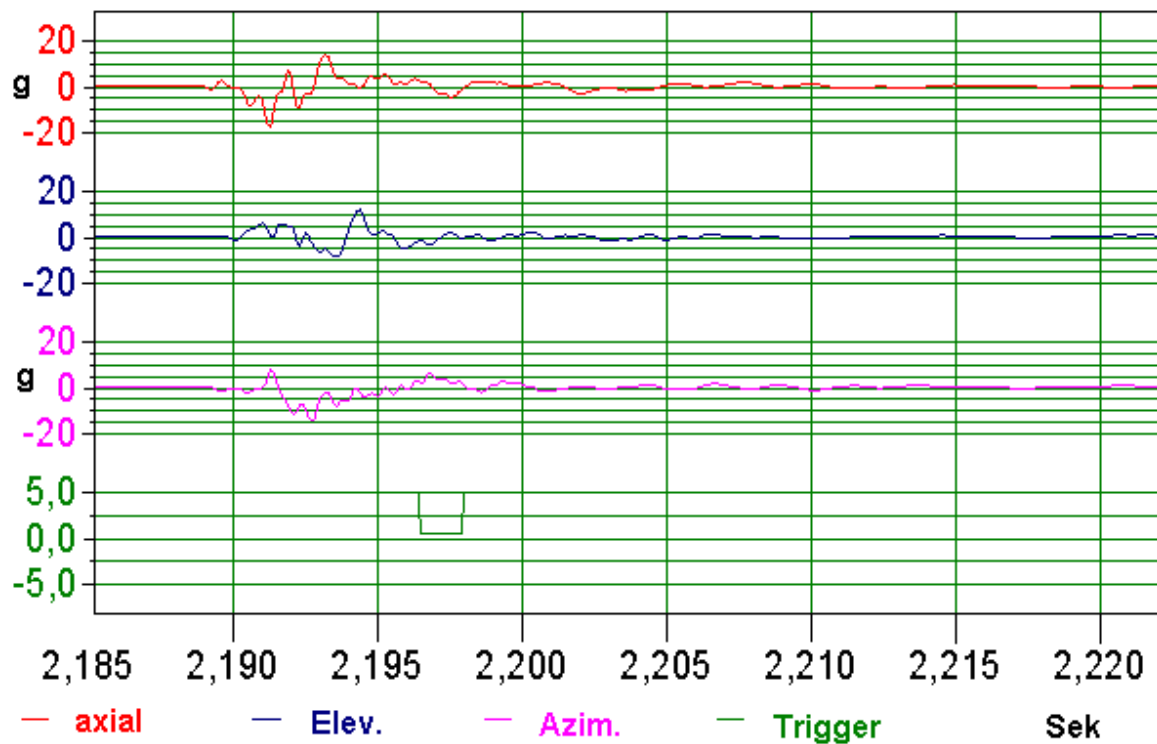


Abb. 3.7: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon, Schuss Nr. 40, $v_2 = 333.7 \text{ m/s}$; 21.07.2010

Die folgenden beiden Abbildungen 3.8 und 3.9 zeigen das nur durch die Schlagbolzendynamik ausgelöste Schwingungsverhalten.

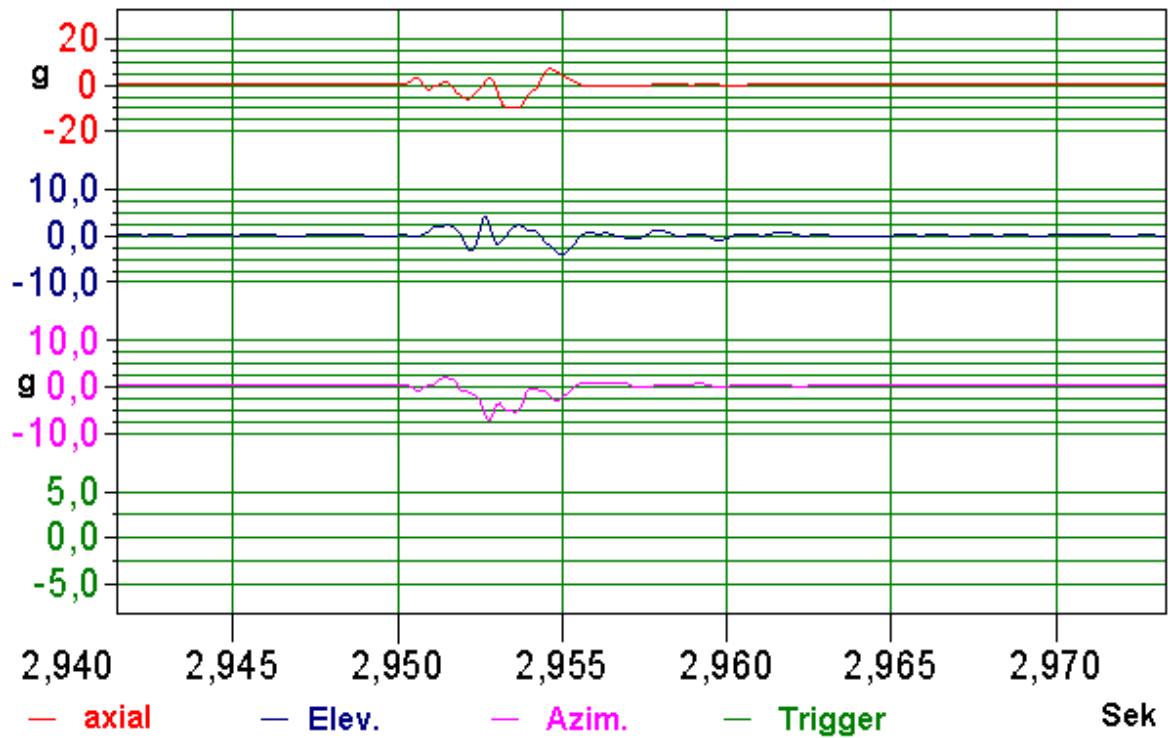


Abb. 3.8: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon, nur Schlagbolzenbewegung (1); 21.07.2010

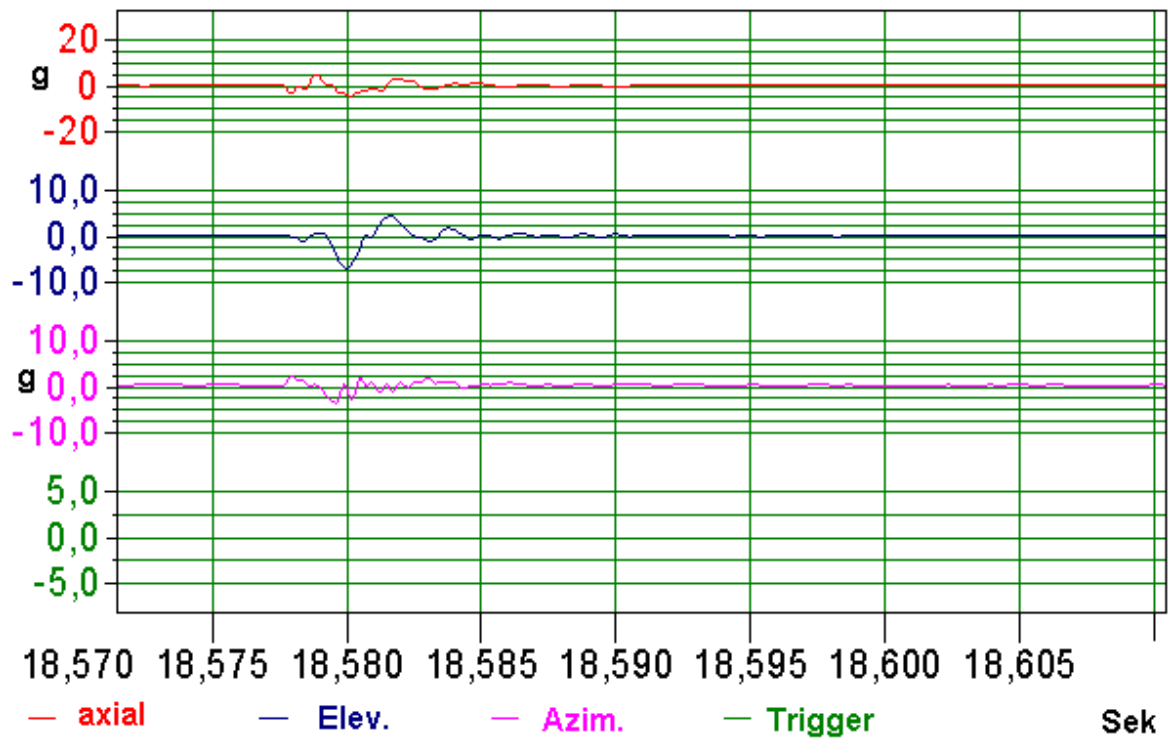


Abb. 3.9: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon, nur Schlagbolzenbewegung (2); 21.07.2010

Diskussion der Lauschkwingungsmessungen zum Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER:

- Auch bei diesem Gewehr sind sowohl die Lauschkwingungen beim scharfen Schuss wie auch bei bzw. nach der alleinigen Schlagbolzenbewegung in Form und Stärke zufällig.
- Charakterisierung der Schwingungsdiagramme

	Max. Amplitude (g)	Gesamte Schwingungsdauer (ms)
Scharfer Schuss	~ 15	~ 12
Nur Schlagbolzen	~ 7.5	~ 5 – 8

Tabelle 3.3: Allgemeine repräsentative Daten zu den Schwingungsdiagrammen des Versuchsgewehres EVOLUTION/TAUBER

Anmerkung:

Die scheinbar längere Schwingungsdauer des Gewehres EVOLUTION/TAUBER gegenüber den Werten in Tabelle 3.2 für Versuchsgewehr EVOLUTION erklärt sich aus dem niedriger angesetzten Schwellwert der relevanten Elongation von 5 g hier gegen 10 g in Tabelle 3.2.

- Die maximalen Amplituden liegen beim Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER um einen Faktor von ca. 3.3 im scharfen Schuss und 6.6 bei der alleinigen Schlagbolzenbewegung niedriger als beim standardmäßigen Versuchsgewehr EVOLUTION.
- Die Auswertung von Abbildung 3.6 und die Abschätzung der Schlagbolzenbewegungsdauer von ~ 1.7 ms zeigt, dass der scharfe Schuss einen Teil der Lauschkwingungen auslöst, aber ein erheblicher nicht vernachlässigbarer Anteil durch den Schlagbolzen erzeugt wird. Während der Schussentwicklungszeit ($t_{\text{Zündung}}$ bis $t_{\text{Mündung}}$) von hier ca. 4.7 ms „arbeitet“ sowohl die Bewegung des Geschoßes, als auch der „Nachhall“ des Schlagbolzens nach seinem Einschlag in den Patronenboden an den Schwingungserscheinungen. Die eigentliche

Bewegung des Schlagbolzens kann auch hier messtechnisch nicht erkannt werden.

- Aus dem Vergleich der maximalen Schwingungsamplituden beim Versuchsgewehr EVOLUTION mit denen beim Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, wird gefolgert, dass je weniger Schwingungen der Schlagbolzenaufschlag auslöst, desto weniger starke Schwingungen sind im scharfen Schuss zu erwarten.
- Es sei angemerkt, dass die beim Gewehr EVOLUTION/TAUBER kleineren Amplituden der „Schlagbolzenschwingungen“ und der damit einhergehenden Reduktion der Gesamtschwingungen um den Faktor 3 es wahrscheinlich ermöglichen würde, den Einfluss der Bettung auf das Schwingungsverhalten zu untersuchen. Da es sich aber um das tatsächliche Wettkampfgewehr von Vizeleutnant TAUBER handelt, dürfen keine Bettungsveränderungen vorgenommen werden.

3.2.3 Die Laufschrwingungen beim Gewehr „ANSCHÜTZ“

Die folgenden beiden Abbildungen liefern die gemessenen Laufschrwingungen im scharfen Schuss. Dabei wird wieder die Munition R100 verwendet.

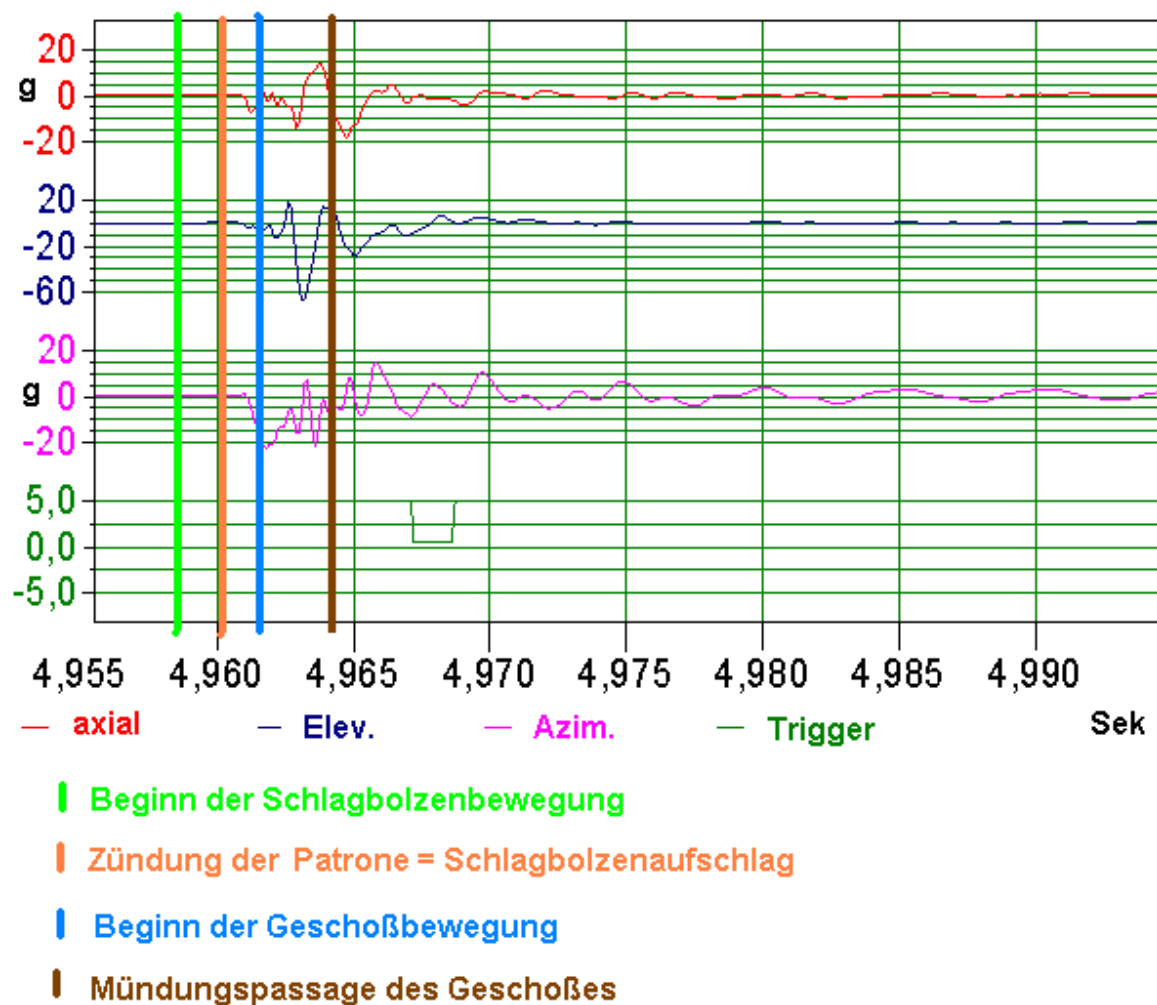


Abb. 3.10: Schwingungsdiagramme für Gewehr ANSCHÜTZ, Schuss Nr. 2,
 $v_2 = 346.9 \text{ m/s}$, Abstand Mündung zur ersten Lichtschranke $\sim 1.0 \text{ m}$;
 19.07.2010

Analog zu den Abbildungen 3.2 und 3.6 sind auch in Abbildung 3.10 die Zeitpunkte für den Beginn der Schlagbolzenbewegung, dem Aufschlag des Schlagbolzens = Zündung der Patrone, dem Bewegungsbeginn des Geschößes und der Mündungspassage eingetragen.

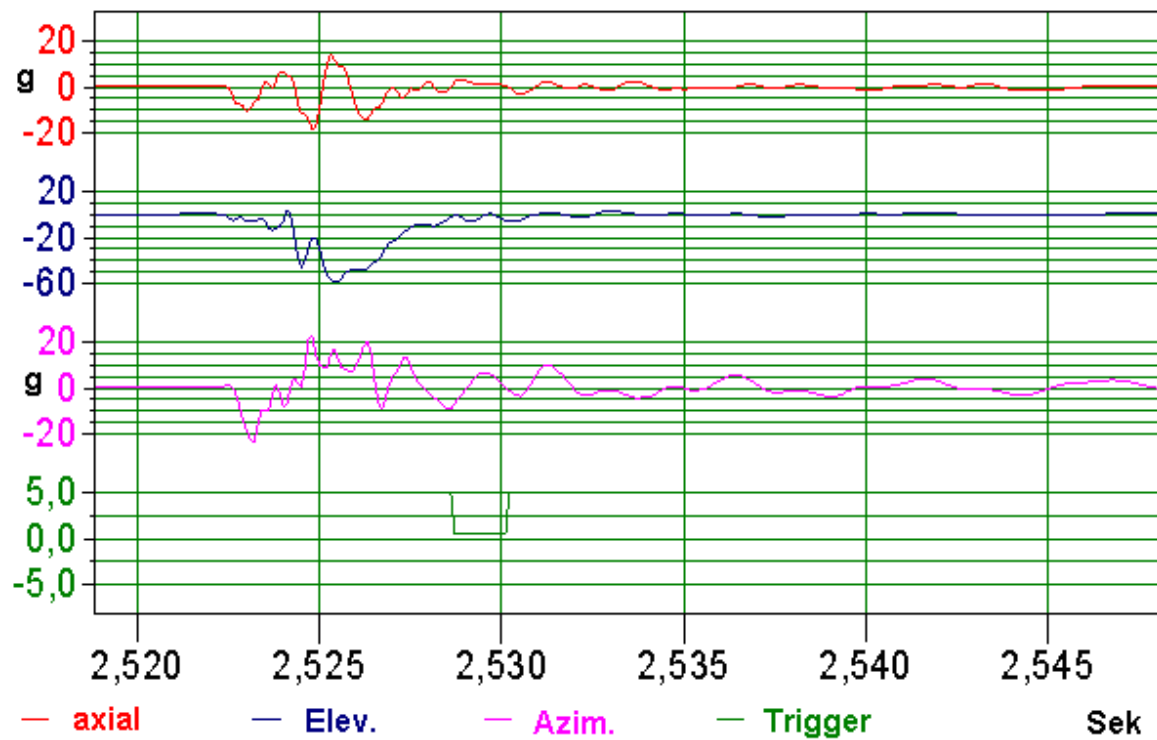


Abb. 3.11: Schwingungsdiagramme für Gewehr ANSCHÜTZ, Schuss Nr. 4,
 $v_2 = 346.8 \text{ m/s}$; 19.07.2010

Die Abbildungen 3.12 und 3.13 zeigen die nur durch die Schlagbolzenbewegung ausgelösten Lauschwingungen.

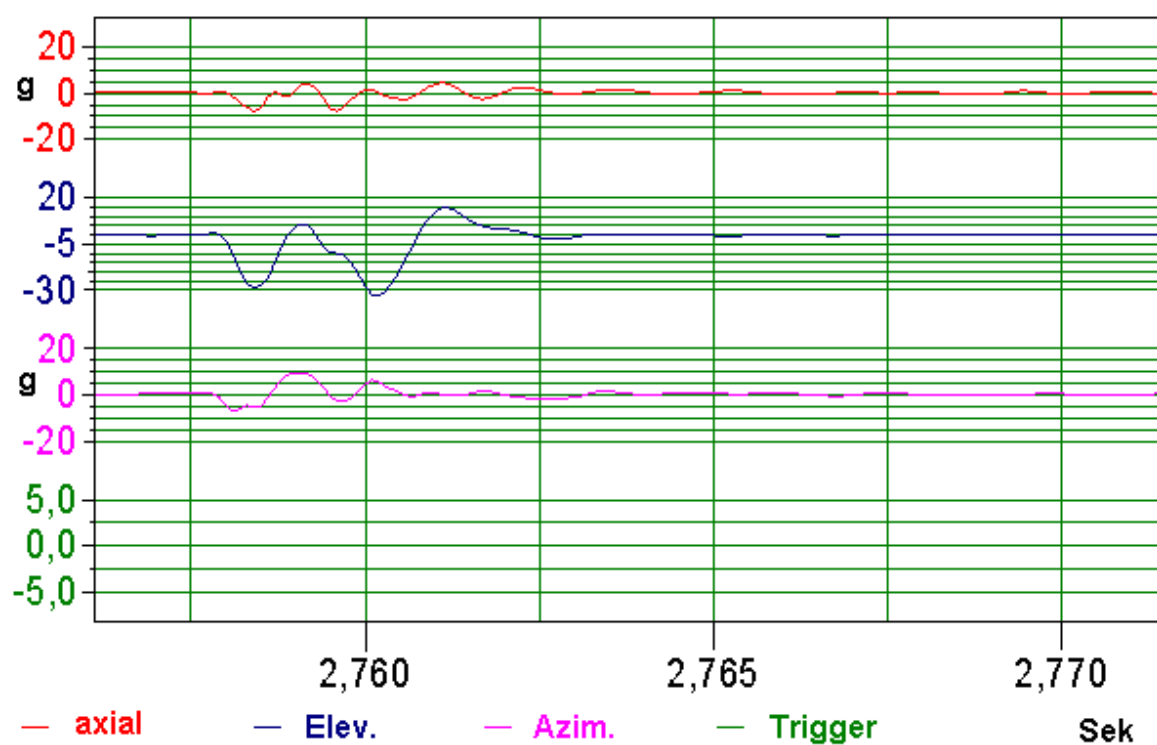


Abb. 3.12: Schwingungsdiagramme für Gewehr ANSCHÜTZ, nur Schlagbolzenbewegung (1); 21.07.2010

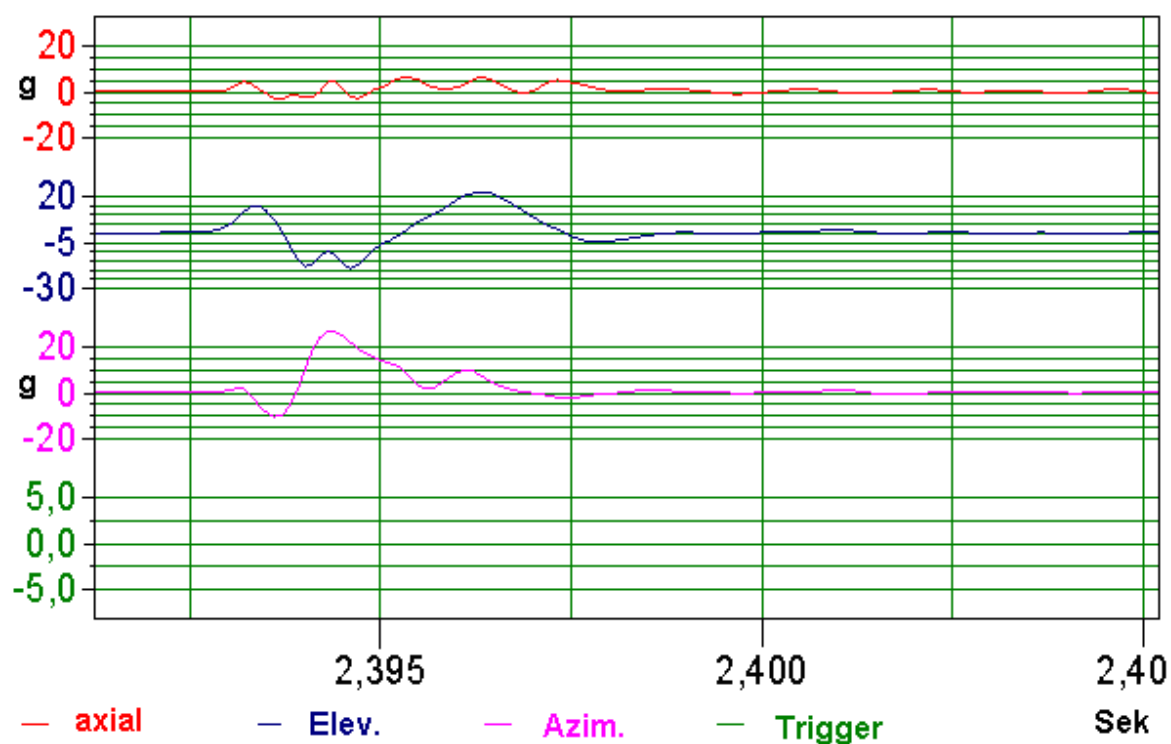


Abb. 3.13: Schwingungsdiagramme für Gewehr ANSCHÜTZ, nur Schlagbolzenbewegung (2); 21.07.2010

Alle bisher gezeigten Schwingungsdiagramme beziehen sich auf Gewehre die in den HLSZ-Schießbock (= Standardschießbock, siehe auch [1]) eingespannt sind. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen nun die Schwingungsdiagramme des Gewehres ANSCHÜTZ beim Schuss aus der Schulter im Liegendanschlag.

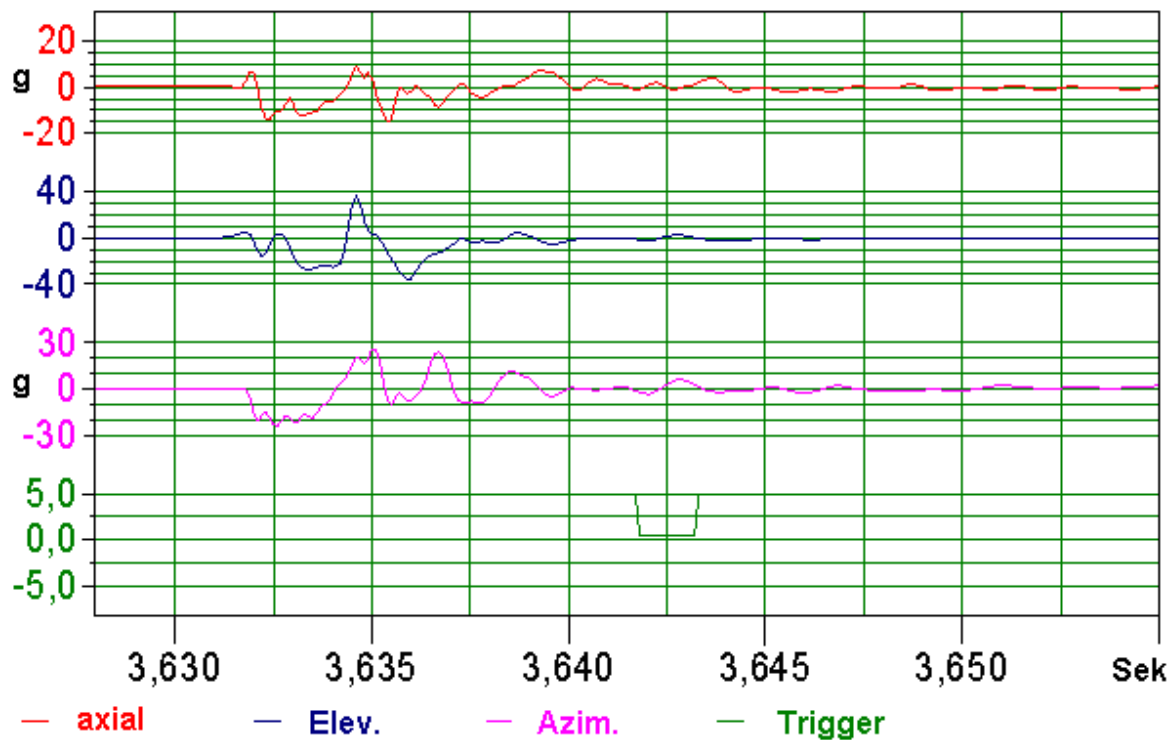


Abb. 3.14: Schwingungsdiagramme für Gewehr ANSCHÜTZ, Schuss Nr. 1, $v_2 = 350.3 \text{ m/s}$; 19.07.2010 im Liegendanschlag.

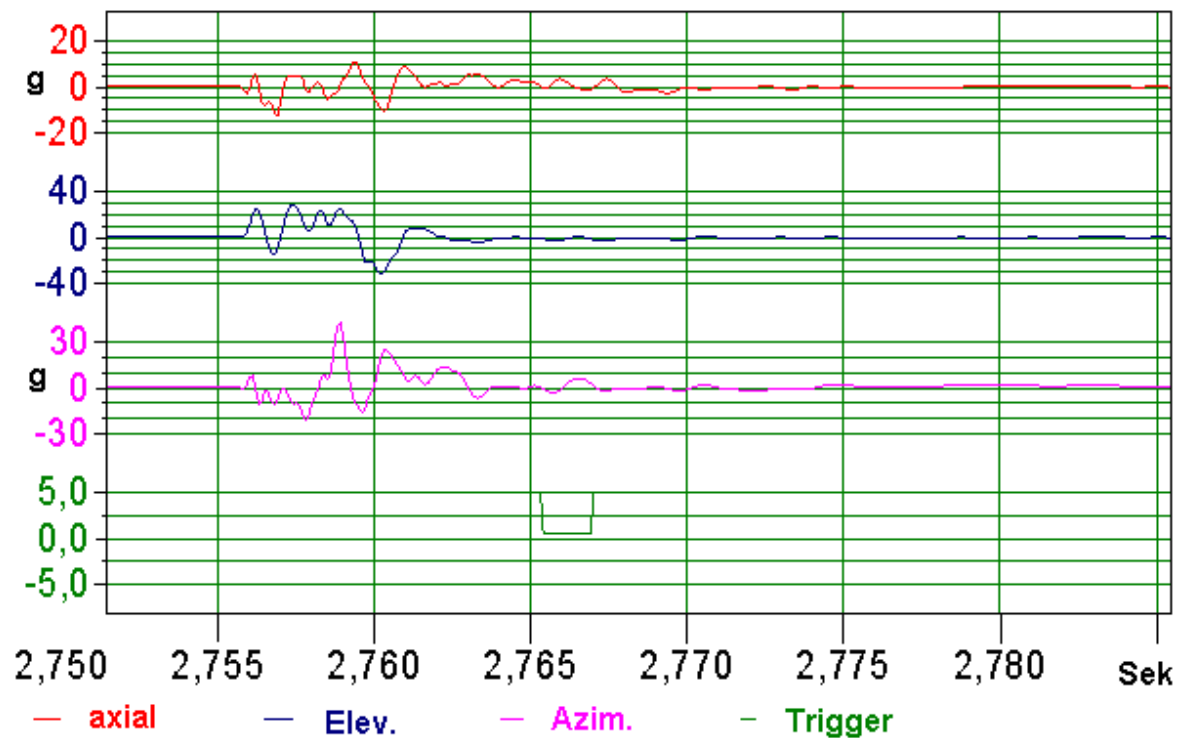


Abb. 3.15: Schwingungsdiagramme für Gewehr ANSCHÜTZ, Schuss Nr. 4, $v_2 = 351.0 \text{ m/s}$; 19.07.2010 in Liegendstellung.

Diskussion der Laufschiwungsmessungen zum Gewehr ANSCHÜTZ:

- Analog zu den beiden EVOLUTION-Gewehren sind die Laufschiwungsbewegungen auch hier zufällig.
- Die maximalen Amplituden und gesamten Schwiwungsdauern zeigt Tabelle 3.4.

	Max. Amplitude (g)	Gesamte Schwiwungsdauer (ms) Elongation > ~ 10g
Scharfer Schuss (eingespannt)	~ 60	~ 10
Nur Schlagbolzen (eingespannt)	~ 30	~ 5
Scharfer Schuss (liegend)	~ 40	~ 10

Tabelle 3.4: Allgemeine repräsentative Daten zu den Schwiwungsdiagrammen des Gewehres ANSCHÜTZ

- Tendenziell zeigen hier die Amplituden in der Elevation die deutlich höheren Werte als im Azimut. Das gilt speziell für die Fälle mit im Bock eingespanntem Gewehr.
- Unter Beachtung der Tatsache, dass die maximalen Amplitudenwerte als nur grobe Schranke zu sehen sind, zeigen die Diagramme im scharfen Schuss „liegend“ bessere Resultate als für die „Einspannung im Bock“. Die relevanten Schwingungsdauern sind praktisch gleich. Daraus ist ableitbar, dass die Ergebnisse mit dem HLSZ-Bock für Wettkampfbedingungen (Stellung liegend) übertragbar sind (sogar mit einer gewissen „Reserve“).
- Wie schon für die EVOLUTION-Gewehre ist nach Abbildung 3.10 die Bewegung des Schlagbolzens alleine (vor der Zündung der Patrone) in Form von Laufschwingungen nicht nachweisbar. Es kann aber ebenso davon ausgegangen werden, dass während der innenballistischen Schussentwicklung das Laufschwingungsbild sich aus den Schwingungen des Schlagbolzenaufschlages und der Geschoßbewegung zusammensetzt.

Resümee der Schwingungsmessungen

Die Messungen zeigen, dass das Schwingverhalten der Mündung beim Schuss stets als Superposition von schlagbolzen- und geschoßinduzierten Schwingungen zu sehen ist.

In den bisherigen Überlegungen/Interpretationen wird von einem gleichförmigen Pulverabbrand ausgegangen, sodass keine „asymmetrischen“ Gasdrücke in Rechnung zu stellen wären. Kurzzeitige „Asymmetrien“ im Innendruck speziell hinsichtlich der Druckangriffsflächen, sind aber denkbar, da die Patrone nicht vollständig mit Pulver gefüllt ist.

Mögliche Ursachen für die Ausbildung der Schwingungen nur durch den Schlagbolzenaufschlag allein wären der asymmetrische Einschlag am oberen Patronenrand (die Kleinkaliberpatrone 0.22lr ist eine Randfeuerpatrone) bzw. die Tatsache, dass die Schlagrichtung des Bolzens nicht durch den Schwerpunkt der Waffe verläuft. Auch wenn das Gewehr im Bock festgeklemmt ist, so ist es dennoch kein absolut starrer Körper. Nimmt man eine „Bremsstrecke“ des Schlagbolzens im Bodenrand der Patrone von $s_B \sim 0.5 \text{ mm}$ an, erhält man über die kinetische Energie eine Bremskraft von $K_B \sim 200 \text{ N}$, die sehr kurzzeitig ($\sim 0.24 \text{ ms}$) wirkt, bzw. ein Drehmoment bildet.

Bei den Gewehren Versuchsgewehr EVOLUTION und Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ wird der Einfluss der Schlagbolzendynamik auf die Gesamtschwingungen als wesentlich betrachtet. Es ist somit verständlich, dass sich mit den folgenden experimentellen Trefferbildern die dann (siehe Kapitel 4) in ROSSI berechnete theoretische Signifikanz der Abhängigkeit von der gewählten Bettung, experimentell nicht feststellen lässt. Aus diesem Grund soll in der anschließenden Analyse der Trefferbilder nach weiteren präzisionsbestimmenden Faktoren, bei dann aber gleich bleibender Bettung (mit einer Ausnahme) gesucht werden.

3.3 Resultate zu den Trefferbildern

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nicht alle geschossenen Trefferbilder im vorliegenden Abschnitt dargestellt. Der Schwerpunkt wird auf das Versuchsgewehr EVOLUTION mit der Bettung5/Teflon gelegt. (Die Bettung5/Teflon Variante ist auch die, die beim Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER in nicht veränderbarer Form vorliegt.)

Bevor die einzelnen Trefferbilder, oder auch Schussbilder genannt, gezeigt werden, soll die Frage nach der „messtechnischen Qualität“ eines Schussbildes gestellt werden.

3.3.1 Prüfung der Verteilung der Trefferkoordinatenwerte

Betrachtet man die Trefferkoordinatenwerte (egal ob in Azimut oder Elevation) einer Schussserie, so erscheinen diese Werte statistisch verteilt. So soll es auch tatsächlich sein. Wenn man aber nur z.B. die x-Koordinaten für alle Schüsse als Funktion der jeweiligen Schussnummer innerhalb einer Schussserie (also von 1 bis 50) als Diagramm darstellt kann man erkennen, ob neben der statistischen Streuung der Werte auch eine systematische Tendenz erkennbar ist. Letzteres würde auf einen systematischen Fehler hindeuten. So können z.B. die x-Koordinatenwerte mit zunehmender Schusszahl zu stets etwas größeren oder kleineren Werten tendieren; ungeachtet ihrer „normalen“ statistischen Streuung. Es zeigt sich, dass systematische Fehler nicht immer vermeidbar sind. Zum Beispiel liegt ein nicht vermeidbarer systematischer Fehler vor, wenn etwa trotz gleich bleibender Zeitabstände von Schuss zu Schuss die Erwärmung des Laufes dermaßen zunimmt,

dass sich die v_0 tendenziell ändert. Das hätte einen Trend in den Elevationskoordinaten (y-Werte) zur Folge.

Anmerkung:

Auszuschließen wäre dieser konkrete systematische Einfluss schon, wenn die Zeit zwischen den Schüssen verlängert werden würde. Das soll aber hier nicht geschehen, da im realen Wettkampf typische Zeiten von Schuss zu Schuss gegeben sind, die für die vorliegenden Untersuchungen übernommen werden.

Weitere Ursachen von Trends in der Abfolge der Koordinatenwerte wären z.B. eine sich von Schuss zu Schuss verändernde Bettung (die Schrauben wären in diesem Fall nicht fest genug angezogen) oder ein leichtes von Schuss zu Schuss mit freiem Auge nicht erkennbares „Nachgeben“ des Schießbocks. Diese systematischen Fehler müssen erkannt und behoben werden. Zur quantitativen Beurteilung eines solchen Trends wird für jede Koordinate einer Schussserie der Regressionskoeffizient berechnet. Es handelt sich dabei um den Anstieg der Ausgleichsgeraden über alle Koordinatenwerte als Funktion der Schussnummer der Schussserie. Wenn es keinen systematischen Fehler/Einfluss geben würde und die Schusszahl pro Serie sehr hoch (vielleicht einige Hundert) wäre, muss der Regressionskoeffizient dem Wert Null zustreben. Trotzdem die Schusszahl mit 50 pro Serie bereits relativ hoch ist, muss dennoch davon ausgegangen werden, dass der Regressionskoeffizient etwas von Null abweicht. Um einen Anhaltswert für diese notwendigerweise zu tolerierende Grenze zu erhalten, werden mit dem Programm ROST 50 Schuss Trefferbilder für das Versuchsgewehr EVOLUTION mit den Anfangs-SEED-Zahlen 100000, 150000, 200000, 250000 und 300000 gerechnet. Die SEED-Zahl ist ein Parameter des „Pseudozufallszahlengenerators“. Es wird dabei angenommen, dass der „Pseudozufallszahlengenerator“ in ROST ausreichend statistisch verteilte Werte zur Schussberechnung liefert. Abbildung 3.16 zeigt exemplarisch ein derartiges Diagramm für die x-Koordinaten bei der Anfangs-SEED-Zahl 200000.

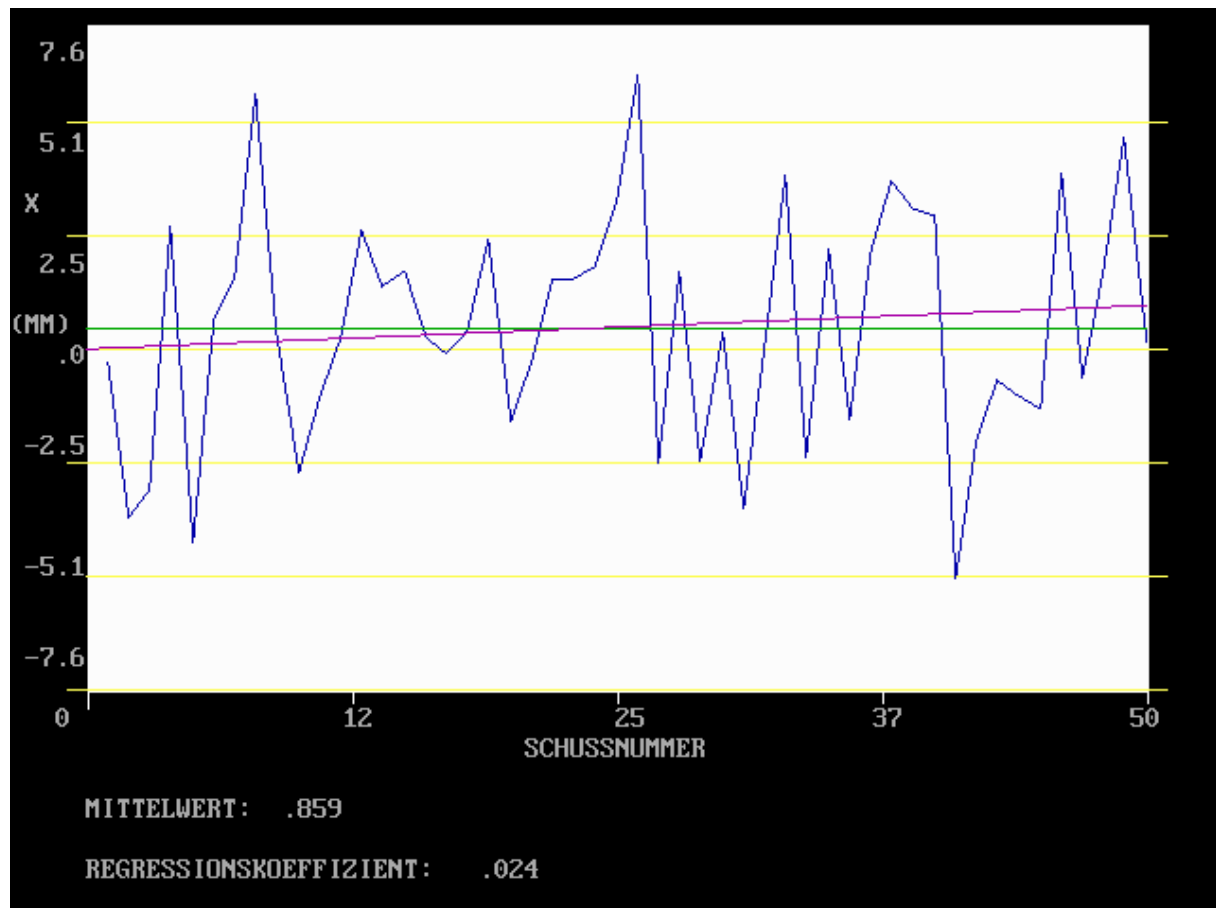


Abb. 3.16: Mit dem Programm ROST gerechnete Verteilung der x-Koordinaten einer 50 Schuss-Serie. Die magentafarbene Linie ist die Trendlinie deren Anstieg der gesuchte Regressionskoeffizient ist. Die grüne waagrechte Linie markiert nur den Mittelwert über 50 Schuss der x-Koordinatenwerte.

Bei Auswertung aller gerechneten Regressionskoeffizienten K_R erscheint ein Bereich von $-0.05 \leq K_R \leq 0.05 \text{ mm}$ als gute Koordinatenverteilung um in Anbetracht von eben nur 50 Schuss von rein statistischer Streuung zu sprechen. Da die beurteilten Wertepaare dimensionsmäßig aus einer Länge (Koordinatenwerte) und einer Zahl (Schuss Nr.) bestehen, resultiert die Längendimension für den Regressionskoeffizienten. Die Koordinatenwerte der MEYTON-Anlage werden in Millimeter angegeben, weshalb korrekterweise der Regressionskoeffizient in Millimeter zu sehen ist. Für jedes fertige Trefferbild werden die Regressionskoeffizienten K_{Rx} und K_{Ry} für die Koordinatenwerte ermittelt und angegeben.

3.3.2 Die Trefferbilder

Für die Beurteilung aller hier vorgestellten Trefferbilder ist zu beachten, dass es nicht darauf ankommt, wo der mittlere Treffpunkt (gelbe Markierung in den folgenden Diagrammen) liegt. Es ist für die gestellte Aufgabe, die Streuung der Einzelschüsse um den mittleren Treffpunkt zu ermitteln völlig unwichtig, wo sich dieser mittlere Treffpunkt in der „Scheibe“ befindet. Im Wettkampf hat der Schütze theoretisch beliebig viele Probeschüsse zur Verfügung um durch Justierung der Visiereinrichtung den mittleren Treffpunkt in die Scheibenmitte zu bringen. Da die Genauigkeit der Koordinatenerfassung mit dem MEYTON-Trefferanzeigesystem für die gesamte Scheibenfläche mit $\pm 0.1\text{mm}$ ausreichend ist, kann und wird in den Schussserien die „ganze Scheibe“ ausgenützt.

Die ersten vier Schussbilder (Abbildung 3.17 bis Abbildung 3.20) zeigen die Trefferlagen für das Versuchsgewehr EVOLUTION mit Bettung5/Teflon. Geschossen werden jeweils 50 Schuss mit der Munition R100. Angegeben werden auch die Regressionskoeffizienten K_{Rx} und K_{Ry} sowie die mittlere Geschwindigkeit als $\langle v_2 \rangle$ und der mittlere Abstand der Einzeltreffer vom mittleren Treffpunkt, mit „<Ablage>“ bezeichnet sowie der Zeitpunkt des Schießbeginns der Schussserie.

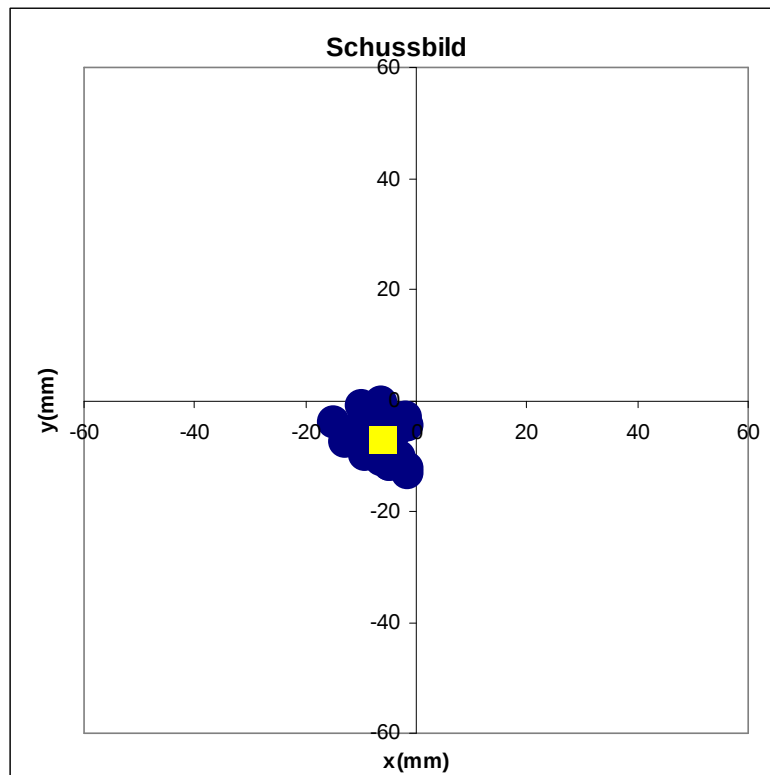


Abb. 3.17: Schussbild für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon, 14.07.2010/15:20

K_{R_x} (mm)	K_{R_y} (mm)	$\langle v_2 \rangle$ (m/s)	$\langle Ablage \rangle$ (mm)
-0.056	0.064	349.0 ± 1.5	3.57

Anmerkung:

Trotz der hier doch etwas über dem Wert ± 0.05 liegenden Regressionskoeffizienten wird die Schussserie verwendet. Es sind keine vermeidbaren systematischen Fehler erkennbar und die Abweichungen der K_R sind nur wenig über dem gewählten Grenzwert.

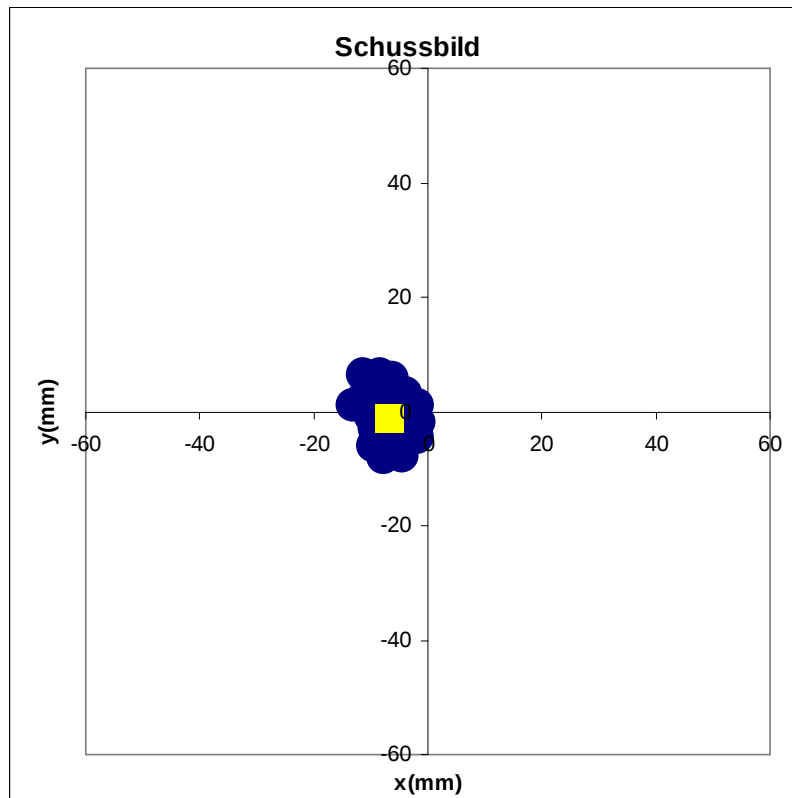


Abb. 3.18: Schussbild für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon, 15.07.2010/08:29

K_{Rx} (mm)	K_{Ry} (mm)	$\langle v_2 \rangle$ (m/s)	$\langle Ablage \rangle$ (mm)
-0.020	0.018	349.1 ± 1.5	3.87

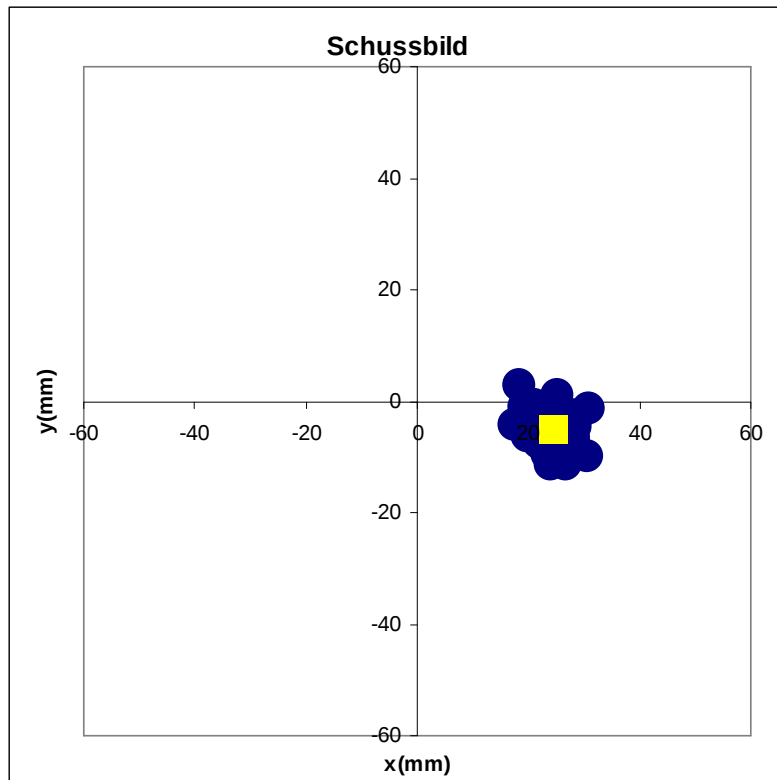


Abb. 3.19: Schussbild für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon, 19.07.2010/15:40

K_{Rx} (mm)	K_{Ry} (mm)	$\langle v_2 \rangle$ (m/s)	$\langle Ablage \rangle$ (mm)
-0.006	0.030	346.5 ± 1.7	3.70

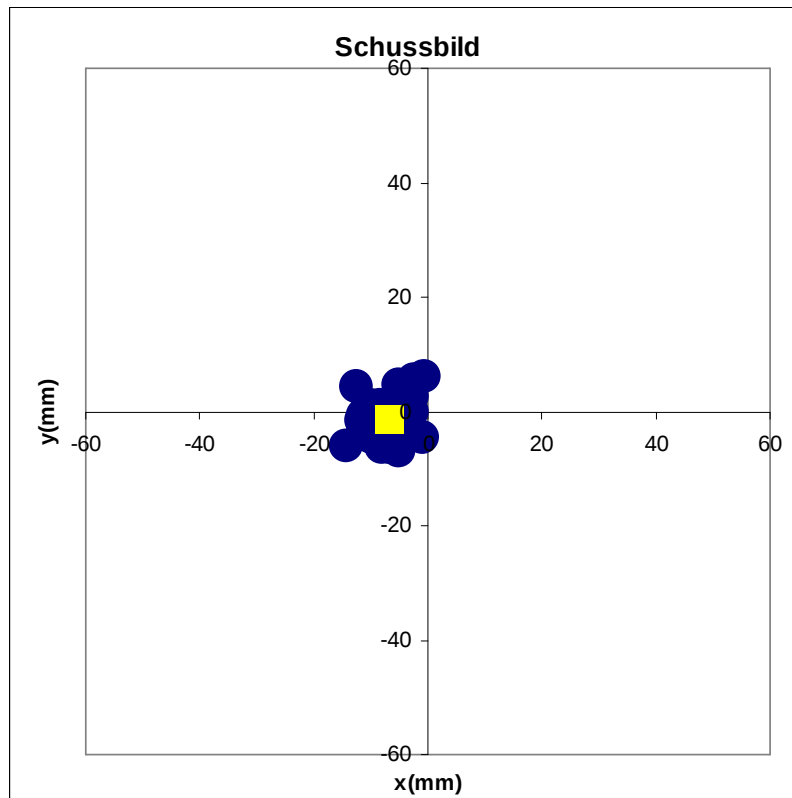


Abb. 3.20: Schussbild für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon, 21.07.2010/08:28

K_{Rx} (mm)	K_{Ry} (mm)	$\langle v_2 \rangle$ (m/s)	$\langle Ablage \rangle$ (mm)
-0.026	0.070	347.1 ± 1.8	3.75

Anmerkung:

Ein vermeidbarer systematischer Fehler kann nicht erkannt werden.

Diese vier Schussserien werden experimentell als miteinander vergleichbar beurteilt und dienen zur späteren Beurteilung der Resultate von jeweils nur einer Schussserie mit dem Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER. Zu diesem Zweck werden der Mittelwert und die Standardabweichung für die $\langle Ablage \rangle$ zu

$$\langle\langle Ablage \rangle\rangle = (3.72 \pm 0.12) \text{ mm}$$

ermittelt.

Das nächste Schussbild, Abbildung 3.21, zeigt ein Trefferbild mit stärker streuenden Trefferlagen, geschossen mit der Munition Remington „Standard Velocity Round Nose“ welche offensichtlich über deutlich größere Toleranzen der Munitionskomponenten verfügt.

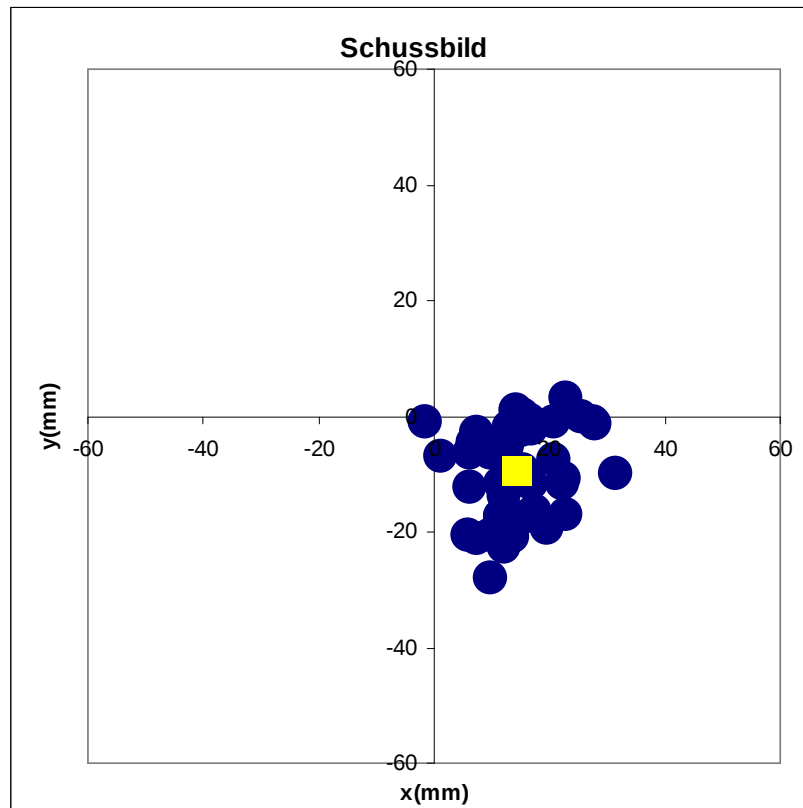


Abb. 3.21: Schussbild für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung1/Teflon, 09.07.2010/08:21

K_{Rx} (mm)	K_{Ry} (mm)	$\langle v_2 \rangle$ (m/s)	$\langle Ablage \rangle$ (mm)
-0.091	0.195	344.0 ± 6.0	8.93

Diese Remington Munition ist zumindest für das Versuchsgewehr EVOLUTION keine taugliche Wettkampfmunition. Sie wird hier nur einmal verwendet, um die Munitionsabhängigkeit der Schussbilder zu demonstrieren. Der große Wert der $\langle Ablage \rangle$ resultiert zum einen aus einer mehr als dreimal so hohen Streuung der Geschwindigkeit v_2 (ein offenkundiger Qualitätsmangel der Munition) und zum anderen, wie in den teilweise sehr großen Regressionskoeffizienten ersichtlich, aus einem deutlichen systematischen Fehler. Beim experimentellen Ablauf werden keine

relevanten Fehler erkannt. Das Vorliegen von Bettung1 statt der sonst „üblichen“ Bettung5 erklärt die hohe $\langle Ablage \rangle$ auch nicht, da die Bettung1 mit der Munition R100 geschossen, deutlich bessere $\langle Ablage \rangle$ -Werte liefert als sie jetzt hier aufscheint. Eine mögliche Ursache der beobachteten Tendenzen zeigt Abbildung 3.22 mit dem Verlauf der v_2 .

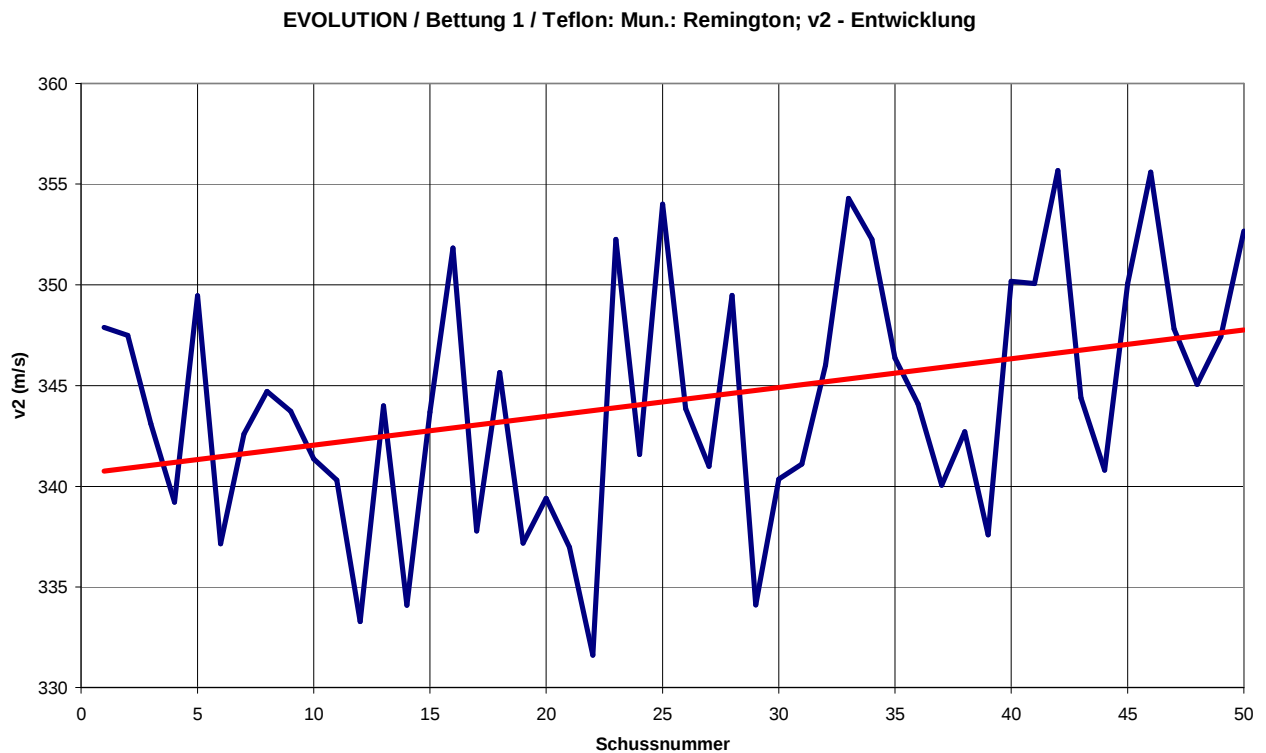


Abb. 3.22: v_2 -Verlauf von Schuss zu Schuss für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung1/Teflon für die Munition „Remington Standard Velocity Round Nose“

Die lineare Trendentwicklung (rote Linie in Abbildung 3.22) zeigt, dass die v_2 mit zunehmender Schusszahl deutlich zunimmt. Damit verbunden ist eine „Aufwärtsbewegung“ der y-Koordinate, wie es auch aus dem sehr hohen Wert von K_{Ry} hervorgeht. Wie später gezeigt wird, ist ein systematisches $\Delta v_2 \sim 6-7 \text{ m/s}$ zwischen dem Schussserienbeginn und dem Serienende als sehr hoch zu bewerten und kann auch aus der theoretischen Betrachtung der Laufschrägungen heraus großen Einfluss auf den $\langle Ablage \rangle$ -Wert haben. Ein Erklärungsversuch wie es zu dieser v_2 -Tendenz kommen kann, wird in Kapitel 3.3.3 unternommen.

Die beiden folgenden Schussbilder zeigen Resultate für das Gewehr ANSCHÜTZ im Vergleich zwischen einem Schießen aus dem Schießbock und in der Wettkampfstellung liegend von der Schulter geschossen. Die Munition ist in beiden Fällen R100.

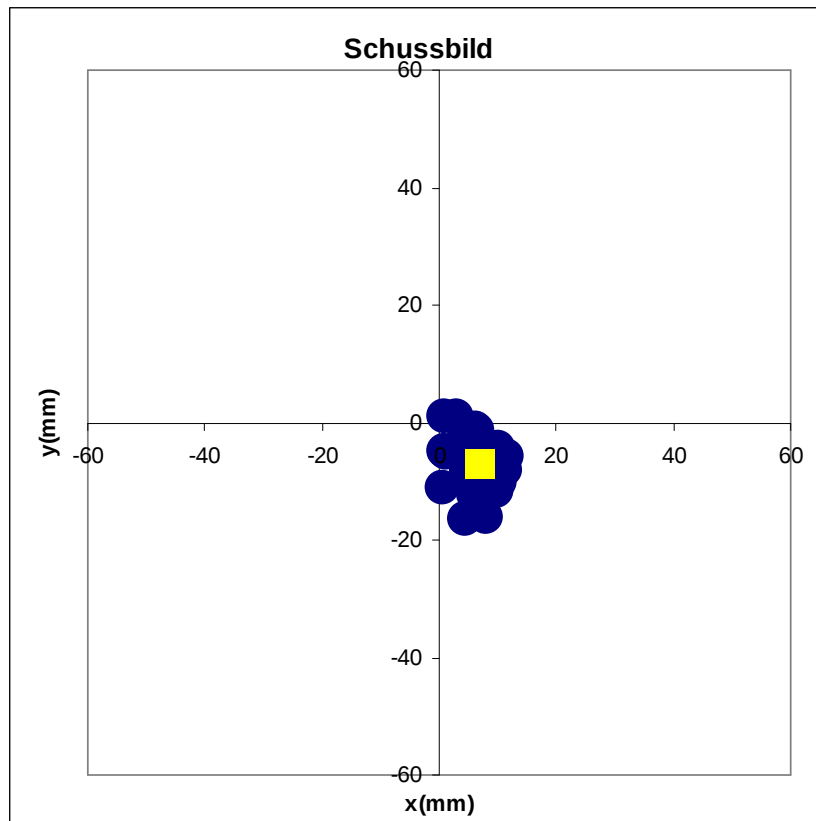


Abb. 3.23: Schussbild für Gewehr ANSCHÜTZ, geschossen aus HLSZ-Schießbock, 09.07.2010 / 09:34

K_{Rx} (mm)	K_{Ry} (mm)	$\langle v_2 \rangle$ (m/s)	$\langle Ablage \rangle$ (mm)
-0.015	0.024	350.6 ± 1.9	4.1

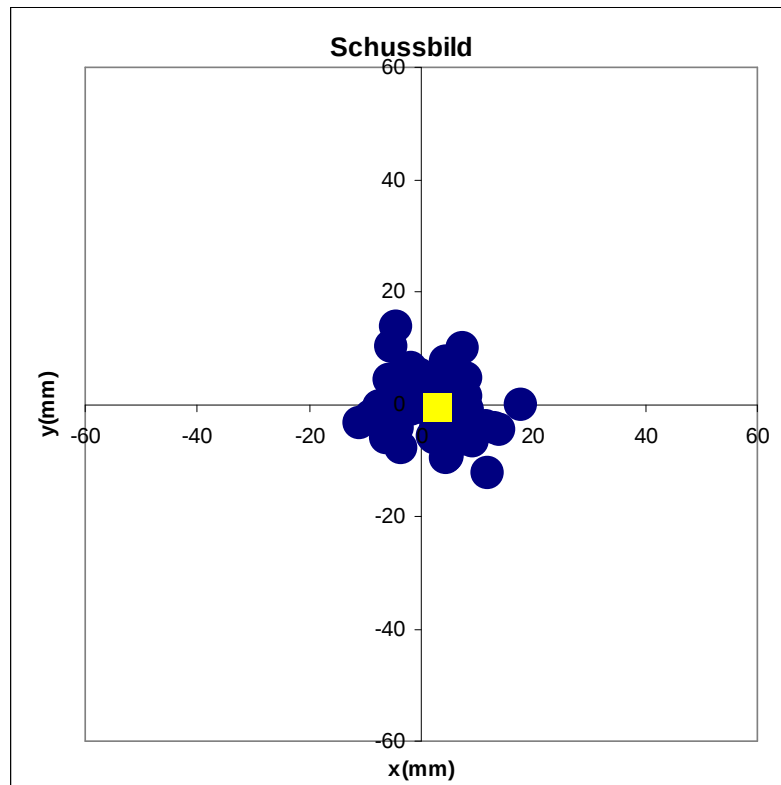


Abb. 3.24: Schussbild für Gewehr ANSCHÜTZ im Liegendanschlag, 09.07.2010/12:29

K_{Rx} (mm)	K_{Ry} (mm)	$\langle v_2 \rangle$ (m/s)	$\langle Ablage \rangle$ (mm)
-0.0165	0.006	-	7.33

Anmerkung:

Bei diesem Schussbild ist ein Schützenfehler inkludiert, der hier stärker ausfällt als gewöhnlich, da die Beleuchtungsverhältnisse im Schießkanal nicht mit jenen auf Schießständen vergleichbar sind.

Irrtümlich ist bei dieser Schussserie die Aufzeichnung der v_2 -Werte ausgefallen.

Die letzten drei Schussbilder zeigen die Ergebnisse mit dem Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER mit den 3 von Vizeleutnant TAUBER zur Verfügung gestellten Wettkampfmunitionen. Dabei handelt es sich um 3 verschiedene Fertigungslose der Munition R50.

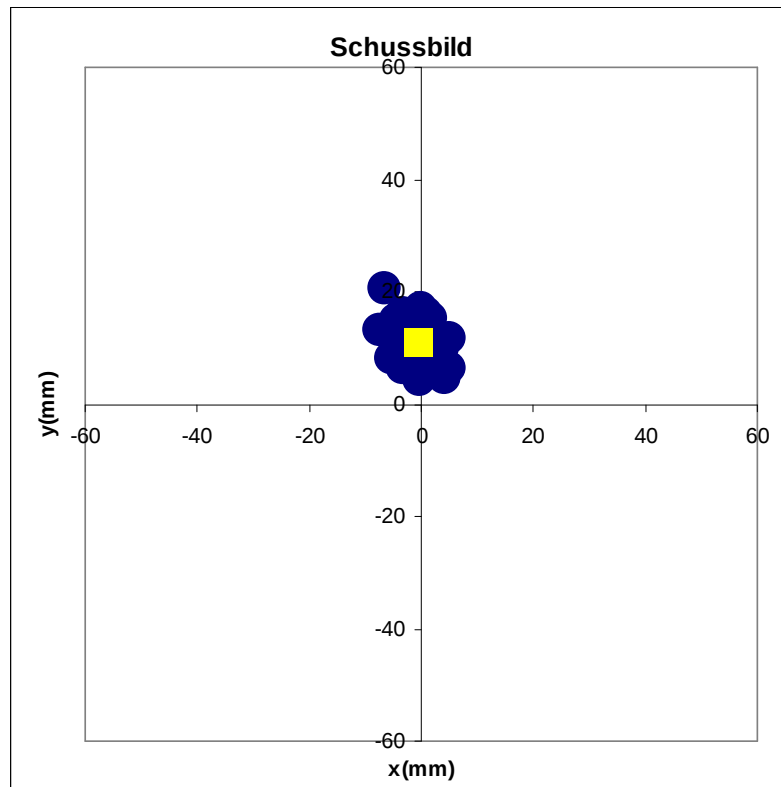


Abb. 3.25: Schussbild für Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon, Munition: R50 Los 476 DC 435 (Kurzbezeichnung Mun A), 21.07.2010/10:53

K_{Rx} (mm)	K_{Ry} (mm)	$\langle v_2 \rangle$ (m/s)	$\langle Ablage \rangle$ (mm)
-0.028	0.012	331.8 ± 1.2	3.86

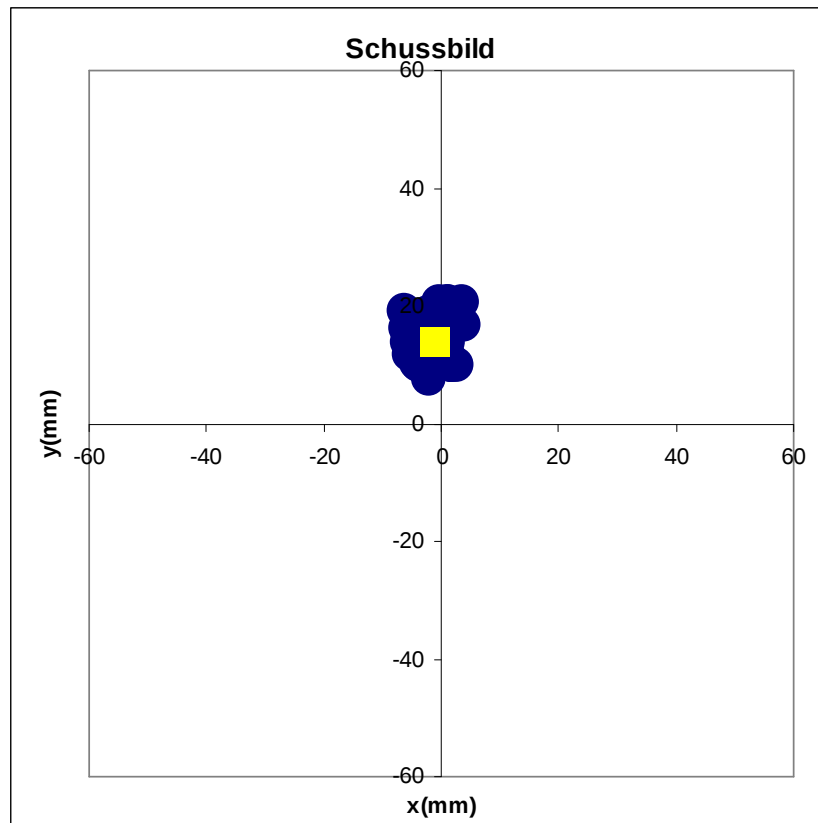


Abb. 3.26: Schussbild für Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon, Munition: R50 Los 597 FB 965 (Kurzbezeichnung Mun B), 21.07.2010/13:58

K_{Rx} (mm)	K_{Ry} (mm)	$\langle v_2 \rangle$ (m/s)	$\langle Ablage \rangle$ (mm)
-0.026	0.021	335.8 ± 1.7	3.46

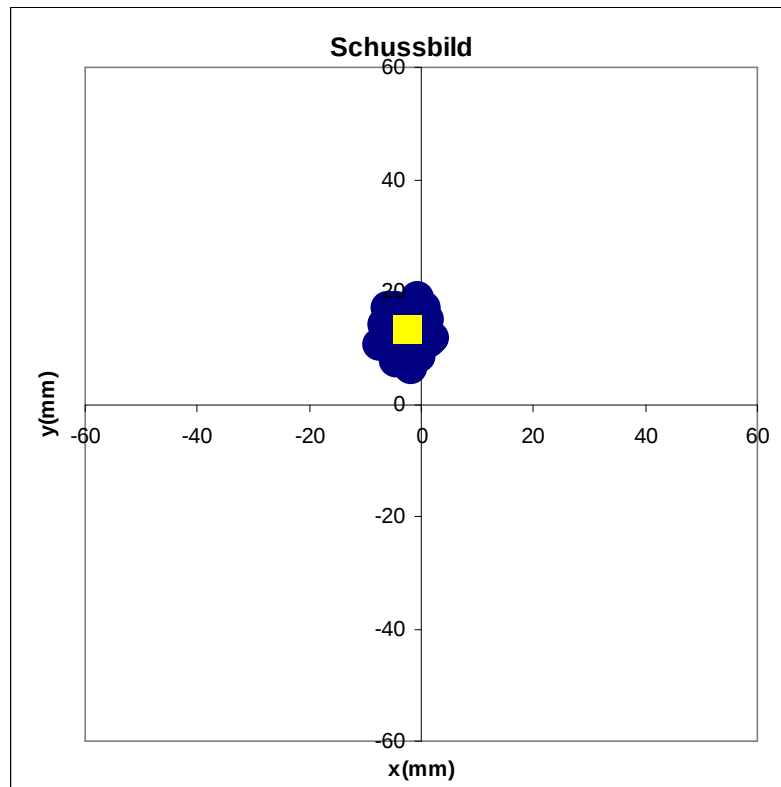


Abb. 3.27: Schussbilder für Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon, Munition: R0 Los 418 ID 176 (Kurzbezeichnung Mun C), 21.07.2010/13:06

K_{Rx} (mm)	K_{Ry} (mm)	$\langle v_2 \rangle$ (m/s)	$\langle Ablage \rangle$ (mm)
-0.015	0.022	333.8 ± 1.9	3.20

Resümee der Trefferbildauswertung

In Tabelle 3.5 sind die Ergebnisse bezüglich der drei Munitionslose die mit dem Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER geschossen werden, zusammen gestellt.

Munition	$\langle v_2 \rangle$ (m/s)	$\langle Ablage \rangle$ (mm)
Mun A	331.8 ± 1.2	3.86
Mun C	333.8 ± 1.9	3.20
Mun B	335.8 ± 1.7	3.46

Tabelle 3.5: Vergleich der $\langle Ablage \rangle$ -Werte für die drei mit dem Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER geschossenen Munitionen, gereiht nach aufsteigender $\langle v_2 \rangle$

Wie aus Tabelle 3.5 ersichtlich ist, unterscheiden sich die $\langle v_2 \rangle$ der 3 Munitionen nur um jeweils 2 m/s, also um einen sehr geringen Betrag. Die zugehörigen $\langle Ablage \rangle$ -Werte durchlaufen ein Minimum (Mun C). Die verwendete Bettung (Bettung5/Teflon) ist für EVOLUTION und EVOLUTION/TAUBER gleich. Unter der Annahme einer ähnlichen Standardabweichung der $\langle Ablage \rangle$ wie bei der Verwendung der R100 Munition beim Versuchsgewehr EVOLUTION von $\sigma = \pm 0.12 \text{ mm}$ wäre das Minimum der $\langle Ablage \rangle$ bei Mun C mit einer $\langle Ablage \rangle = 3.20 \text{ mm}$ bezogen auf die $\langle Ablagen \rangle$ der beiden anderen Munitionslose (Mun A und Mun B) signifikant. In Kapitel 5 werden diese experimentellen Ergebnisse den Berechnungsergebnissen die mit dem Modell ROSSI erhalten werden (sie werden dann in Kapitel 4 diskutiert) gegenüber gestellt.

Aus den Resultaten mit der Munition „Remington Standard Velocity Round“ beim Versuchsgewehr EVOLUTION (siehe Abbildung 3.21 und Abbildung 3.22) ist ferner ersichtlich, dass etwa diese Munition innerhalb einer Schussserie eine weit höhere Drift in der $\langle v_2 \rangle$ aufweist, als es der „Breite“ des $\langle Ablage \rangle$ -Minimums, bezogen auf das $\langle v_2 \rangle$ -Intervall soweit dies hier experimentell erfassbar war, entspricht. Aus der Gegenüberstellung der ausgeprägten $\langle v_2 \rangle$ -Sensitivität der $\langle Ablage \rangle$ einerseits und den offensichtlich möglichen $\langle v_2 \rangle$ -Driften innerhalb einer Schussserie andererseits

folgt die Motivation nach dem Grund einer solchen $\langle v_2 \rangle$ -Drift zu suchen. Weitere Untersuchungen zu den Tendenzen der $\langle v_2 \rangle$ innerhalb einer Schussserie bei den anderen verwendeten Munitionen zeigen im Ausmaß zwar schwächere Driften aber stets einen Trend zu höheren $\langle v_2 \rangle$ -Werten am Serienende. Eine Größe die ebenfalls mit der Schusszahl innerhalb der Serie leicht steigt ist die Lauftemperatur. Daher soll im folgenden Abschnitt der Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Lauftemperatur und der $\langle v_0 \rangle$ während einer Schussserie eingehender theoretisch untersucht werden. Aus Gründen der Einfachheit wird bei den folgenden theoretischen Überlegungen die v_0 und nicht die experimentelle v_2 betrachtet.

3.4 Einfluss der Lauftemperatur auf die v_0 (Schätzung)

Der vorliegende Abschnitt versucht auf der Basis einer Schätzung den Einfluss einer sich langsam ändernden Lauftemperatur auf die v_0 zu untersuchen. Damit sollen systematische Trends in den v_0 -Werten der einzelnen Schüsse einer Serie besser verstanden werden. Die Stabilität der mittleren v_0 über eine volle Wettkampfdistanz ist von sehr wesentlicher Bedeutung. Abbildung 3.32 zeigt sehr deutlich den Trend einer im Mittel über die 50 Schuss einer Serie zunehmenden v_0 (bzw. hier gemessen als v_2).

Um die erforderlichen Basisdaten für diese Untersuchung der v_0 zu gewinnen, ist zuerst die Energiebilanz eines Schusses erforderlich.

3.4.1 Energiebilanz eines Kleinkaliberschusses

Für die Abschätzung verwendete Grunddaten und Annahmen:

Gewehr: Versuchsgewehr EVOLUTION im Schießbock (starr) eingespannt.

Lauf: Länge $L = 69$ cm

Kaliber: $D_i = 5.56$ mm

Laufaußendurchmesser: $D_a = 23.4$ mm

Material: Rostfreier Stahl „Grade 416“ nach [7] für Sportgewehre gewählt.

Munition:

Pulvermasse $m_p = 0.0841 g$

Spezifische Energie des Pulvers angenommen mit $\varphi_E = 3700 kJ / kg$

Geschoßmasse $m_G = 2.6 g$

Rollträgheitsmoment des Geschoßes $I_{xx} = 9.23 \cdot 10^{-6} g m^2$

Gleitreibungskoeffizient Blei-Stahl $\mu \sim 0.5$ trocken [8], $\mu \sim 0.3$ gefettet

Anmerkung:

In der offenen Literatur sowie mittels Anfragen bei einem Munitions- und einem Laufhersteller ist es nicht gelungen einen Wert für den Gleitreibungskoeffizienten „Bleigeschoß gefettet“ gegen „Laufstahl“ zu erhalten. Daher wird als Näherung folgender Analogieschluss angestellt: In Wikipedia [9] werden Richtwerte für verschiedene Stoffpaarungen unter den Bedingungen „trocken“ und „geschmiert“ angegeben. Es liegt aber keine Aussage über die Art und den Umfang dieser Schmierung vor. Das Verhältnis

$$F = \frac{\mu_{\text{geschmiert}}}{\mu_{\text{trocken}}}$$

wird für Bronze auf Stahl mit $F \sim 0,39$, das von Weißmetall auf Stahl mit $F \sim 0,20$ aus [9] ermittelt. Für die Paarung Stahl auf Stahl gilt sogar $F \sim 0,08$.

Es wird für Blei gefettet (geschmiert) auf Stahl ein Bereich um $F \sim 0,60$ gewählt. Daraus resultiert ein Schätzwert für den Gleitreibungskoeffizient $\mu = \mu_{\text{gefettet}} \approx 0,3$.

Diese Wahl ergibt sich aus folgender Überlegung:

Am plausibelsten erscheint die Paarung Bronze auf Stahl für die Verhältnisse Blei auf Stahl zu sein. Das heißt $F \sim 0,40$. Es muss auch bedacht werden, dass die Schmierung/Fettung des Geschoßes durch die große Wärmeentfaltung während der Schussentwicklung möglicherweise nur auf einem beschränkten Wegstück des Geschoßes im Lauf wirksam ist. Diesem Faktum wird mit einer 50% Erhöhung von F Rechnung getragen.

Die Geometrie des Geschoßes wird von einem realen Geschoß per Schublehre abgenommen und das Rollträgheitsmoment mit dem Programm PRODAS 3.82 der Firma „Arrow Tech Associates“ ermittelt.

Mit dem Innenballistikmodul des Modells ROSSI werden folgende Daten für den Zeitpunkt der Mündungspassage des Geschoßes zu diesem „Testschuss“ berechnet.

Geschwindigkeit $v_0 = 346 \text{ m/s}$

Rollrate (Drall) $\omega_0 = 865 \text{ U/s}$

Gasdruck $p = 25.8 \text{ bar}$

Gastemperatur $T = 1628^\circ\text{C}$

Es wird bei folgendem Ansatz davon ausgegangen, dass das Pulver vollständig verbrennt und somit seine gesamte chemische Energie umsetzt. Die hohe Abbrandgeschwindigkeit des Pulvers, welches in Kleinkaliberpatronen zur Verwendung kommt, in Kombination mit der großen Lauflänge macht diesen Ansatz plausibel.

Ein Vergleich mit der Ballistik Software QUICKLOAD Version 3.1 zeigt, dass 99,79% des Pulvers verbrennen, womit die obige Annahme untermauert wird.

Die grundlegende Energiegleichung/Energiebilanz lautet:

$$E_0 = E_{kt} + E_{kr} + E_{kGas} + E_{Gas} + E_{Einpr} + E_{Pat} + E_{L+G} \quad 3.1$$

Die einzelnen Summanden bedeuten im Detail:

E_0 Gesamtenergie, also die Energie im Pulver

$$E_0 = m_p \varphi_E = 311.17 \text{ J}$$

E_{kt} Translatorische kinetische Energie im Geschöß

$$E_{kt} = \frac{m_G v_0^2}{2} = 155.63 \text{ J}$$

E_{kr} Rotatorische kinetische Energie im Geschöß

$$E_{kr} = \frac{I_{xx} \omega_0^2}{2} = 0.14 \text{ J}$$

E_{kGas} Kinetische mittlere translatorische Energie im Gas in Schussrichtung. Ansatz mit halber Pulvermasse.

$$E_{kGas} = 0.5 \frac{m_P v_0^2}{2} = 2.52 \text{ J}$$

E_{Gas} Die thermische Restenergie im Gas ergibt sich zu:

$$E_{Gas} = pV = 43.34 \text{ J} \text{ mit } V = \frac{D_i^2 \pi}{4} L = 16.810^{-6} \text{ m}^3$$

E_{Einpr} Geschößeinpressenergie in die Felder/Züge

Nach der Literatur [10] (Truppendienst TB Waffentechnik 1, Band 2): $\sim 7\%$ von E_0 bei Gewehren. Da es sich bei typischen (Großkaliber)-Gewehrsgeschoßen um Vollmantel bzw. Teilmantelgeschoße handelt, die typischen Kleinkalibergeschoße aber reine Bleigeschoße sind, werden hier nur 6% von E_0 als Einpressenergie angesetzt.

$$E_{Einpr} = 18.67 \text{ J}$$

E_{Pat} Energie welche in die Dehnung und Erwärmung der Patronenhülse geht.
Nach gleicher Literatur [10] gilt: $\sim 2\%$ von E_0

$$E_{Pat} = 6.22 \text{ J}$$

E_{L+G} Reibungsinduzierte Wärmeenergie im Lauf (Stahl) und im Geschoß (Blei).
Diese Energie ergibt sich aus der Grundgleichung 3.1 zu:

$$E_{L+G} = E_0 - E_{kt} - E_{kr} - E_{kGas} - E_{Gas} - E_{Einpr} - E_{Pat}$$

$$E_{L+G} = 84.65 \text{ J} = Q_R \text{ der gesamten Reibungsenergie}$$

Diese Energie wird nun aufgeteilt in

$$E_{L+G} = E_L + E_G$$

Mit E_L dem Anteil der Reibungsenergie der in den Lauf eingebracht wird und E_G dem Reibungsenergieanteil der vom Geschoß aufgenommen wird. Die Aufteilung der Reibungsenergie zwischen Lauf und Geschoß erfolgt über das Verhältnis der Wärmeleitkoeffizienten [11] für den rostfreien Stahl Grade 416 und für Blei mit z.B. [12]:

$$\lambda_{Stahl} = 24.9 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \quad \lambda_{Blei} = 35.3 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$$

$$E_L = \frac{\lambda_{Stahl}}{\lambda_{Stahl} + \lambda_{Blei}} E_{L+G} = 35.01 \text{ J}$$

$$E_G = E_{L+G} - E_L = 49.64 \text{ J}$$

Nun soll geprüft werden, ob die mit der Energie E_G verbundene Erwärmung des Bleigeschoßes in einem physikalisch plausiblen Bereich liegt. Mit der

spezifischen Wärme von Blei von $c = 0.129 \frac{J}{g K}$ z.B. nach [13] ergibt sich aus $E_G = m_G c \Delta T$ eine Temperaturerhöhung von

$$\Delta T = \frac{E_G}{m_G c} = 148 K$$

Bei einer angenommenen Umgebungstemperatur von 300 K ergibt sich somit eine Gesamttemperatur von $T_{Geschoß} = 448 K$. Dieser Wert liegt passabel unter der Schmelztemperatur von Blei [14] $T_{Schmelz} \cong 600 K$.

Als nächstes soll die Erwärmung des Laufes pro Schuss abgeschätzt werden. Der Energieeintrag auf den Lauf pro Schuss setzt sich aus zwei Teilen zusammen.

- a) Durch die Reibung und ist mit $E_L \sim 35 J$ bereits ermittelt worden.
- b) Durch die heißen Pulvergase. Die Energie $E_{L Pulver}$ die von den Pulvergasen auf den Lauf in seiner vollen Länge L übertragen werden könnte, ergibt sich zu

$$E_{L Pulver} = \alpha A (T_{Pulver} - T_{Lauf}) t_W$$

mit

$$A = D_i \pi L = 12.1 \cdot 10^{-3} m^2$$

der gesamten Laufinnenfläche und α dem Wärmeübergangskoeffizienten Luft $\Rightarrow$ Stahl. Nach [15] gilt:

$$\alpha \sim 10 \frac{W}{m^2 K} \text{ bei mäßiger Gasbewegung}$$

$$\alpha \sim 300 \frac{W}{m^2 K} \text{ bei stark bewegtem Gas}$$

Es wird $\alpha = 200 \frac{W}{m^2 K}$ gewählt.

Bei einer Pulvergastemperatur von $T_{Pulver} \sim 1900 K$ und einer durchschnittlichen Lauftemperatur $T_{Lauf} \sim 300 K$ sowie einer Einwirkungsdauer $t_w \sim 3 ms$ (entsprechend der Zeit der innenballistischen Schussentwicklung einer ROSSI-Berechnung) ergibt sich

$$E_{L Pulver} \sim 12 J$$

Der gesamte Energieeintrag pro Schuss wäre demnach $E_{L ges} = E_L + E_{L Pulver} = 47 J$

Anmerkungen:

- Der Lauf erwärmt sich durch die heißen Pulvergase im hinteren Teil mehr als an der Mündung da hinten die heißen Pulvergase länger verweilen.
- Da man sich für die mittlere Temperaturzunahme über eine Wettkampfdistanz von z.B. 60 Schuss interessiert, muss korrekterweise auch die Abkühlung zwischen den Schüssen in Rechnung gestellt werden. Da es mit den derzeit hierorts vorhandenen Mitteln nicht möglich ist alle diese Effekte exakt zu berechnen, wird mit der Näherung gearbeitet für $E_{L ges}$ nur den reibungsbedingten Energieeintrag $E_L \sim 35 J$ zu verwenden.

Das Laufvolumen V_L erhält man zu:

$$V_L = \frac{\pi}{4} L (D_a^2 - D_i^2) \cong 280 \cdot 10^{-6} m^3$$

Mit der Dichte von Stahl von $\rho_{Stahl} = 7750 kg / m^3$ [11] wird die Laufmasse m_L ohne Verschluss und sonstigen Anbauten an den Lauf wie z.B. die Visiereinrichtung mit

$$m_L = \rho V_L = 2.17 kg$$

erhalten. Mit der spezifischen Wärme von rostfreiem Stahl Grade 416 nach [11] von

$$c_{\text{Stahl}} \cong 460 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

ergibt sich die Temperaturerhöhung pro Schuss näherungsweise zu

$$\Delta T = \frac{E_L}{c m_L} = 0.035 \text{ K / Schuss}$$

Dieser Wert erscheint auf den ersten Blick sehr nieder. Es darf nicht vergessen werden, dass die Abkühlung von Schuss zu Schuss nicht berechnet wird und dieser Wert $\Delta T \sim 0.035 \text{ K / Schuss}$ als mittlere Temperaturerhöhung anzusehen ist die unmittelbar vor dem nächsten Schuss am Lauf anliegt. Bei 100 Schuss ergibt sich eine Temperaturerhöhung von ca. 3.5 K . Dieser Wert ist aus der Praxis gesehen realistisch. Es kommt tatsächlich zu keinen starken Erwärmungen. Man beachte, dass

- der Lauf extrem dick ausgeführt ist (etwa im Gegensatz zu einem Jagdgewehr) und
- die Patrone (Pulvermasse) klein ist. Es wird im Gegensatz zu Großkaliberwaffen viel weniger Energie umgesetzt.

3.4.2 Mittlere Geschoßreibung und Lauftemperaturerhöhung

Die Grundüberlegung baut auf der durch die geringe zunehmende Erwärmung/Schuss bedingten leichten Ausdehnung des Laufes auf. Allgemeine weitere Voraussetzungen dieser Abschätzung sind:

- Die Temperatur des Geschoßes wird für die jetzt folgenden Überlegungen konstant gehalten
- Die plastische Verformung des Geschoßes erfolgt vollständig und in von Schuss zu Schuss konstanter Weise beim Einpressen in den Lauf (Züge/Felder)
- Die Wirkung der Temperaturerhöhung gibt es nur im Laufteil der nach dem Einpressvorgang kommt $\Rightarrow$ sequenzielles Verhalten als Modellannahme
- Der Anpressdruck des Geschoßes an die Laufwandung liegt im elastischen (Hookschen) Bereich von Blei. Die Änderungen im Laufinnendurchmesser durch

die Erwärmung wirken sich – in dieser einfachen Modellierung – als kleine Störung der Druckverhältnisse am Bleigeschoß im elastischen Bereich aus

- Der Ansatz mit dem Hookschen Bereich folgt aus der Überlegung, dass sonst keine ausreichende Dichtung zwischen Geschoß und Lauf sichergestellt ist
- Vereinfachenderweise wird ein glatter Lauf angenommen

Die gesamte Reibungsenergie ist in Kapitel 3.4.1 mit $Q_R = 84.65 \text{ J / Schuss}$ ermittelt worden. Aus dem einfachen Ansatz für eine mittlere Reibungskraft F_R zwischen Blei und Laufstahl folgt:

$$Q_R = F_R L \Rightarrow F_R = \frac{Q_R}{L} \sim 123 \text{ N}$$

Unter Zugrundelegung eines mittleren Gleitreibungskoeffizienten $\mu \sim 0.3$ zwischen gefettetem Blei und Stahl erhält man die Normalkraft F_N betragsmäßig zu.

$$F_N = \frac{F_R}{\mu} = 410 \text{ N}$$

Diese Normalkraft wirkt über die Geschoßoberfläche mit der Fläche A auf die Laufinnenfläche mit dem Druck p

$$p = \frac{F_N}{A} \cong 36 \text{ bar} = 36 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

wobei die berührende Geschoßoberfläche aus dem Kaliber D_i und der Auflagelänge $l = 6.5 \text{ mm}$ des Geschoßes im Lauf mit $A = 0.114 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ zu Buche schlägt. Abbildung 3.28 illustriert die idealisierten Verhältnisse des Geschoßes im Lauf.

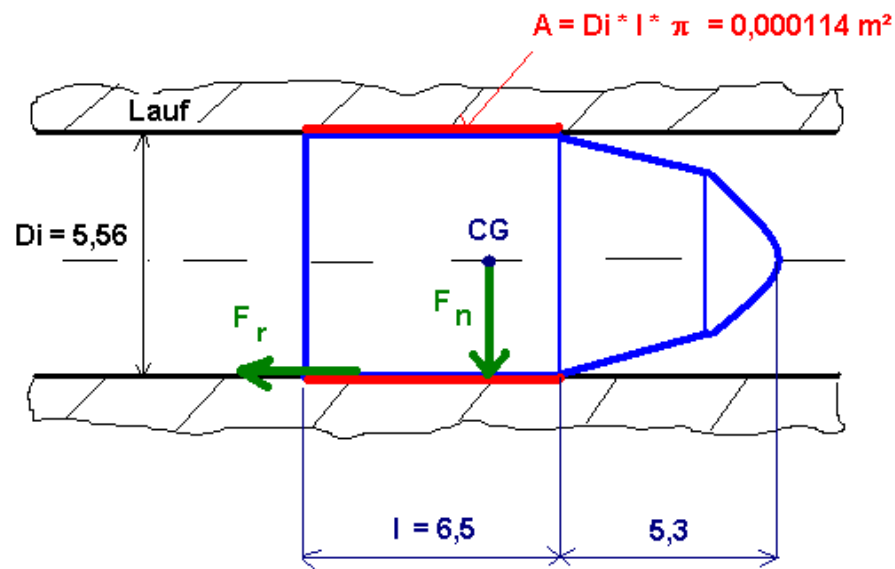


Abb. 3.28: Das Bleigeschoß im Lauf, Geometrie und Kräfte (idealisierte Bedingungen, Längenmaße in mm)

Die Grenze des Hookschen Bereichs von Blei liegt nach z.B. [16] bei einer Spannung von $\sigma_{S\text{Blei}} = 5,5 \frac{N}{mm^2} = 55 \cdot 10^5 Pa$. Der Druck des Bleigeschoßes an die Laufinnenwand liegt mit $36 \cdot 10^5 Pa$ damit deutlich darunter und somit im elastischen Bereich. Der Druck ergibt sich zusammenfassend zu:

$$p = \frac{Q_R}{\mu L A} \quad 3.2$$

Gemäß der grundlegenden Annahme ändert sich die v_0 (der systematische Trend; nicht zu verwechseln mit der rein statistischen Streuung) durch eine Änderung der Reibungsenergie. Der Prozess der Steigerung der v_0 durch Reduktion des Drucks und damit der Reduktion der Reibungsenergie wird im Sinne einer vereinfachten Annahme als völlig reversibel gedacht. Die folgenden Ausführungen gehen der leichteren Anschauung wegen genau den umgekehrten Weg. Das heißt, die Lauftemperatur nimmt ab, der Innendurchmesser des Laues nimmt (sehr, sehr wenig) ab, dadurch steigt der Druck auf das Bleigeschoß und damit der

Reibungswiderstand. Es sei vereinbart, dass die Größen vor der Temperaturänderung „ungestrichen“, die Größen nach der Temperaturänderung „gestrichen“ geschrieben werden. Da jetzt eine Temperaturabsenkung betrachtet wird, gilt für die Lauftemperaturänderung $\Delta T < 0$.

Der Laufinnenumfang ist

$$U = D_i \pi \quad 3.3$$

Die allgemeine thermische Längenänderung $\frac{dU}{dT}$ angewendet auf den Laufinnenumfang U ist durch

$$\alpha = \frac{1}{U} \frac{dU}{dT} \quad 3.4$$

gegeben. Der Wärmeausdehnungskoeffizient α für den Laufstahl (Grade 416) ist nach [11]

$$\alpha = 9.9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$$

Da hier nur sehr kleine Änderungen betrachtet werden, muss die Differentialgleichung 3.4 nicht analytisch gelöst werden. Es genügt eine Linearisierung $dU \Rightarrow \Delta U$ und $dT \Rightarrow \Delta T$. Aus den Gleichungen 3.3 und der linearisierten Gleichung 3.4 folgt für den Laufinnendurchmesser nach der Temperaturänderung die lineare Gleichung

$$D_i' = D_i (1 + \alpha \Delta T) \quad 3.5$$

Es gelte ferner die Abkürzung

$$k = 1 + \alpha \Delta T \quad 3.6a$$

und somit

$$D_i' = D_i k$$

3.6b

Aus Abbildung 3.29 werden die weiteren Überlegungen ersichtlich.

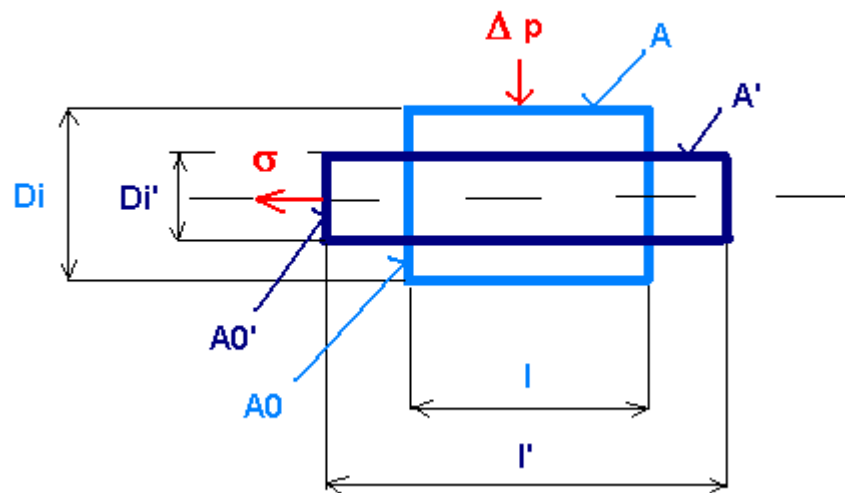


Abb. 3.29: Schematische Darstellung der Formänderung des Bleigeschoßes bei Temperaturabnahme. Hellblau: Geschoß vor der Abkühlung des Laufes, Dunkelblau: Geschoß nach der Abkühlung des Laufes; Das Geschoß sei nun einfachheitshalber als Zylinder dargestellt.

Der steigende Druck des abkühlenden Laufes auf das Geschoß muss gleich groß der Zunahme der im Geschoß wirkenden Normalspannung an der Geschoßflanke sein (Kräftegleichgewicht). Es gilt nun:

$$\Delta p = p' - p \quad 3.7$$

Die Verformung durch den Druck auf die Zylinderseite und damit die Verkleinerung des Zylinderquerschnittes von $A_0 \Rightarrow A_0'$ bzw. die Veränderung der Zylinderseitenfläche von $A \Rightarrow A'$ sowie die Verlängerung des Zylinders von $l \Rightarrow l'$ sei nun gleichwertig mit einer Zugbelastung σ entlang der Geschoß- bzw. Zylinderlängsachse. Diese Gleichwertigkeit wird im Rahmen der Schätzung allgemein und im Hinblick auf die linearisierten Ansätze als vertretbar bewertet. Es werden ferner nur sehr kleine Veränderungen betrachtet. Daraus muss nun folgen:

$$\sigma A_0' = \Delta p A' \quad 3.8$$

Es gilt das Hooksche Gesetz

$$\sigma = E \varepsilon \quad 3.9$$

mit $E = 16 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2}$, dem Elastizitätsmodul für Blei [16] und der Dehnung ε zu

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l' - l}{l} \quad 3.10$$

Mit der Längsdehnung ε ist auch eine Änderung der Querdimension verbunden mit

$$\varepsilon_q = \frac{D_i' - D_i}{D_i} \quad 3.11$$

Einsetzen der Gleichungen 3.5 und 3.6 in Gleichung 3.11 liefert

$$\varepsilon_q = \alpha \Delta T \quad 3.12$$

Den Zusammenhang zwischen ε und ε_q liefert der Betrag der Poissonzahl m_{po} .

Nach [17] beträgt die Poissonzahl $m_{po} = 2.326$. Es gilt im Zusammenhang mit der Poissonzahl:

$$\varepsilon = -m_{po} \varepsilon_q \quad 3.13$$

Mit Gleichung 3.12 folgt

$$\varepsilon = -m_{po} \alpha \Delta T \quad 3.14$$

Für die Zylinderseitenflächen (Geschoßflanken) gilt

$$A = D_i \pi l \quad 3.15a$$

$$A' = D_i' \pi l' \quad 3.15b$$

Aus Gleichung 3.10 kann l' zu

$$l' = l (\varepsilon + 1) \quad 3.16$$

ausgedrückt werden. Einsetzen der Gleichungen 3.16 und 3.6b in Gleichung 3.15b liefert:

$$A' = A k (\varepsilon + 1) = D_i \pi l k (\varepsilon + 1) \quad 3.17$$

Für die Zylinderstirnflächen gilt:

$$A_0 = \frac{D_i^2 \pi}{4} \quad 3.18a$$

$$A_0' = \frac{D_i'^2 \pi}{4} \quad 3.18b$$

Gleichung 3.6b in 3.18b eingesetzt ergibt

$$A_0' = \frac{D_i^2 k^2 \pi}{4} \quad 3.19$$

Jetzt können die Gleichungen 3.9, 3.17 und 3.19 in Gleichung 3.8 eingesetzt werden. Damit folgt

$$\Delta p = \frac{E D_i k \varepsilon}{4l (1 + \varepsilon)}$$

Mit den Gleichungen 3.6a und 3.14 folgt damit weiter

$$\Delta p = - \frac{E D_i}{4l} \frac{m_{p0} \alpha \Delta T + m_{p0} \alpha^2 \Delta T^2}{1 - m_{p0} \alpha \Delta T}$$

Da α sehr klein ist und nur kleine Temperaturänderungen ΔT untersucht werden, wird der Term $m_{p0} \alpha^2 \Delta T^2$ vernachlässigt, sodass sich die Druckdifferenz mit

$$\Delta p = - \frac{E D_i m_{p0} \alpha \Delta T}{4l (1 - m_{p0} \alpha \Delta T)} \quad 3.20$$

ergibt. Eine Abkühlung bedeutet $\Delta T < 0$, sodass eine Drucksteigerung $\Delta p > 0$ folgt, während eine Erwärmung mit $\Delta p < 0$ ebenfalls physikalisch richtig wiedergegeben wird. Unter Einschluss von Gleichung 3.20 soll jetzt im nächsten Schnitt die – linearisierte – Abhängigkeit der Reibungsenergie von der Temperaturänderung berechnet werden. Aus Gleichung 3.2 folgt:

$$Q_R = p A \mu L$$

beziehungsweise

$$Q_R' = p' A' \mu L$$

Man erhält die Änderung der Reibungsenergie zu

$$\Delta Q_R = Q_R' - Q_R = (p' A' - p A) \mu L \quad 3.21$$

Mit $p' = p + \Delta p$ und Gleichung 3.17 folgt

$$\Delta Q_R = [(p + \Delta p) A k (\varepsilon + 1) - p A] \mu L$$

und mit den Gleichungen 3.6a, 3.14 und 3.20 ergibt sich

$$\Delta Q_R = \left[\left(p - \frac{E D_i m_{p0} \alpha \Delta T}{4l(1 - m_{p0} \alpha \Delta T)} \right) (1 + \alpha \Delta T) (1 - m_{p0} \alpha \Delta T) - p \right] \mu A L \quad 3.22$$

Nach der Ausmultiplikation der []-Klammer von Gleichung 3.22 werden alle Terme $(\alpha \Delta T)^n$ mit $n \geq 2$ wegen ihrer Kleinheit vernachlässigt. Das Resultat wäre

$$\Delta Q_R = \frac{\mu A L \alpha \Delta T}{4l} [4l p (1 - m_{p0}) - E D_i m_{p0}]$$

Da $p \ll E$ gilt, wird der Term $4l p (1 - m_{p0}) \ll E D_i m_{p0}$, sodass als Näherung

$$\Delta Q_R = - \frac{\mu A L \alpha E D_i m_{p0}}{4l} \Delta T = - \frac{\mu E m_{p0} D_i^2 \pi L \alpha}{4} \Delta T \quad 3.23$$

erhalten wird.

Um nun die durch eine Temperaturänderung hervorgerufene Veränderung der mittleren Geschwindigkeit v_0 zu v_0' zu berechnen gilt:

$$\frac{m_G v_0^2}{2} - \Delta Q_R = \frac{m_G v_0'^2}{2}$$

beziehungsweise

$$v_0' = \sqrt{v_0^2 - \frac{2 \Delta Q_R}{m_G}} \quad 3.24$$

Ausgehend von den in diesem Kapitel niedergeschriebenen Daten zum Versuchsgewehr EVOLUTION kann Gleichung 3.23 vereinfacht werden zu

$$\Delta Q_R = K \mu \Delta T \text{ mit } K = 6.198 \frac{J}{K}$$

Bei einer 50 Schussserie ($\Delta T_{\text{gesamt}} \sim 1.75 K$) und einer $\langle v_0 \rangle = 346 m/s$ ergeben sich nach Gleichung 3.24

$$\mu = 0.30 \quad v_0' = 349.6 m/s \quad \Delta v = 3.6 m/s$$

$$\mu = 0.25 \quad v_0' = 349.0 m/s \quad \Delta v = 3.0 m/s$$

Die experimentellen Resultate zeigen, dass, wenn es Änderungen der mittleren v_0 bzw. v_2 gibt, diese stets als Zunahme auftreten.

- Versuchsgewehr EVOLUTION mit der Munition R100 $\Delta v: 0 - 0.5 m/s$
- Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER bei 3 Losen der Munition R50 $\Delta v: 0.5 - 1.5 m/s$
- Versuchsgewehr EVOLUTION mit der Munition Remington $\Delta v: \sim 6.5 m/s$
- Gewehr ANSCHÜTZ mit der Munition R100 $\Delta v: \sim 0.5 m/s$

Schlussfolgerungen:

- Die theoretischen Werte liegen in der Größenordnung der experimentell beobachteten Werte
- Die Munition R100 ist eine sehr stabile Munition. Das gleiche gilt im Wesentlichen auch für die Munition R50.
- Die Näherungsrechnungen zeigen welche Größen wie Einfluss auf die Stabilität der $\langle v_0 \rangle$ haben.
- Man könnte argumentieren, dass die beobachteten v_0 -Tendenzen auch durch die Endlichkeit der Schussserien (50 Schuss) bestimmt sind. Das heißt, je länger die Schussserie desto eher würde $\Delta v \Rightarrow 0$ streben. Es muss aber angemerkt werden, dass alle beobachteten $\langle v_0 \rangle$ -Änderungen positive Vorzeichen tragen, das heißt es kommt stets zu einer, wenn auch kleinen Erhöhung der $\langle v_0 \rangle$. Die Tatsache des gleichen Vorzeichens der v_0 -Änderungen bestätigt ein systematisches Verhalten nach den Gleichungen 3.23 und 3.24.
- Auf die Menge und die Qualität der Geschoßfettung ist zu achten. Wenig oder ungeeignetes Fett wird rasch abgebaut und die Reibung steigt. Damit verbunden

ist eine mittlere Temperaturerhöhung und somit ein systematischer Anstieg der $\langle v_0 \rangle$.

- Eng verknüpft mit der Dauer einer Schmierwirkung ist auch die Frage der Toleranzen seitens Lauf und Geschoßgeometrie. Ein relativ zur Züge/Felder-Querschnittsfläche des Laufes großer Durchmesser des Geschoßes bedeutet viel Pressarbeit und stärkeren/schnelleren Abbau von Fett.
- An die hier angestellten vereinfachten Überlegungen sind keine Einflüsse von Pulvermenge, Pulverkörnung, Abbrandverhalten, Geschoßmasse, etc. gekoppelt.

Zur Illustration werden in den folgenden Abbildungen 3.30 bis 3.32 drei v -Verläufe dargestellt.

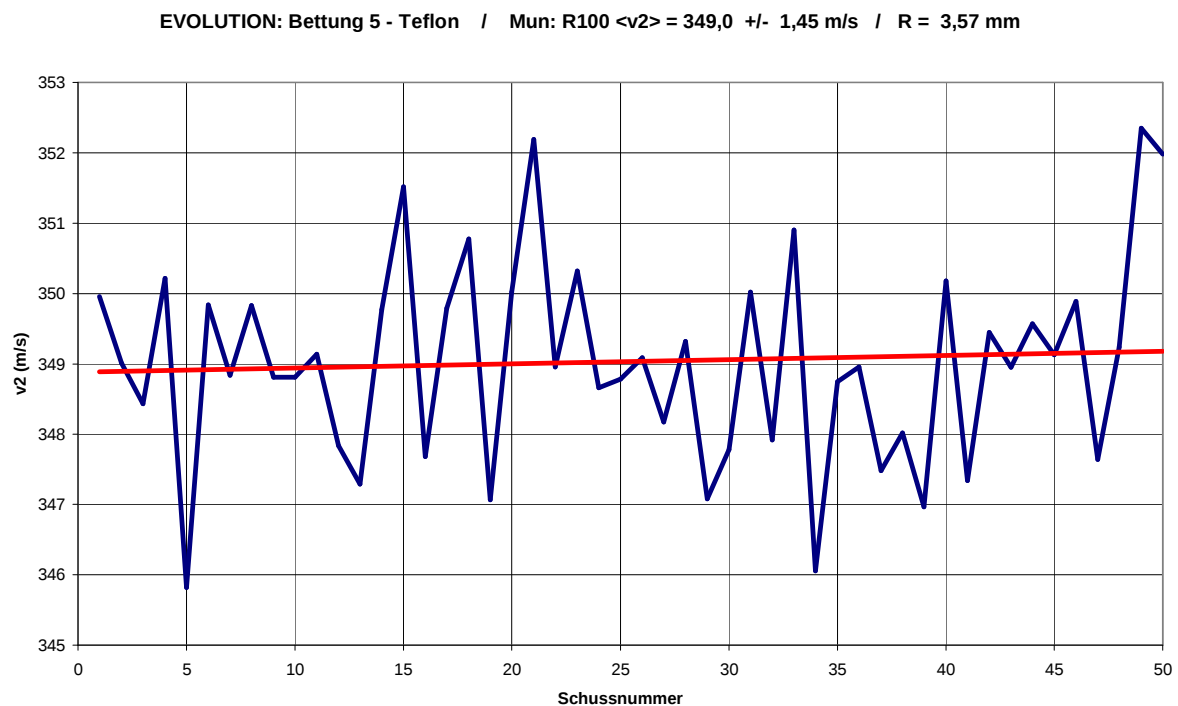


Abb. 3.30: Geschwindigkeitsverlauf bei Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon mit der Munition R100

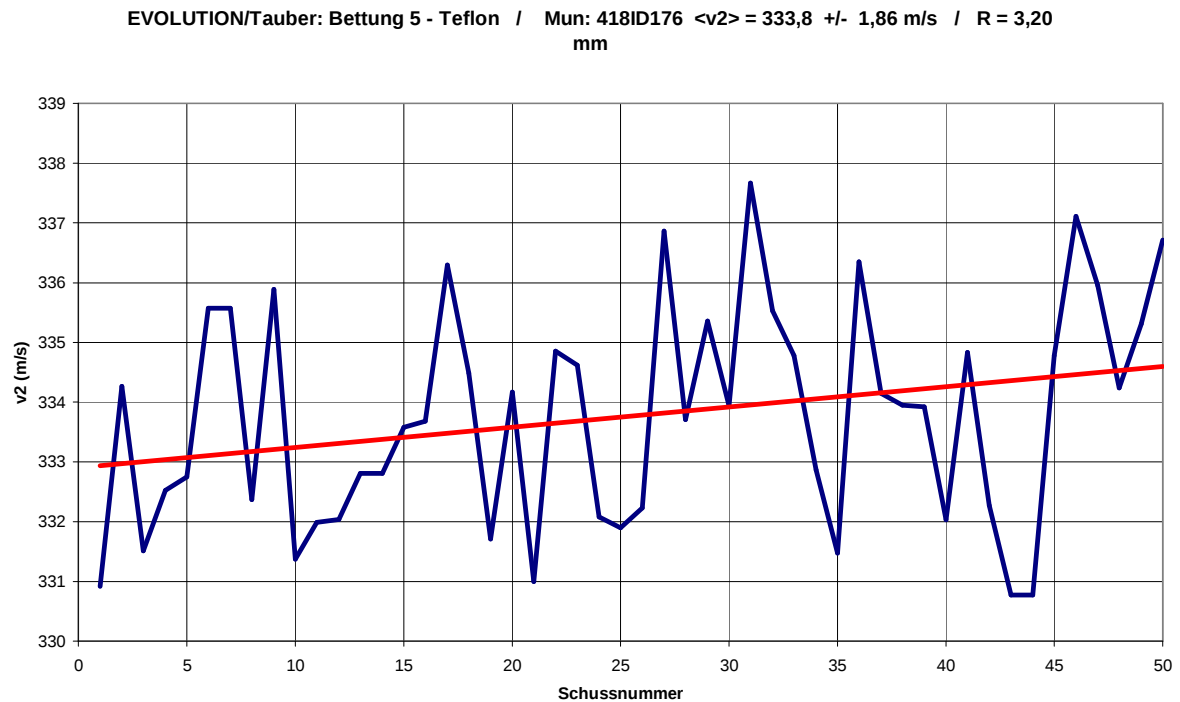


Abb. 3.31: Geschwindigkeitsverlauf bei Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon mit der Munition R50 Los 418ID176

Der experimentell gemessene stärkste v -Drift wird beim Versuchsgewehr EVOLUTION mit der Munition Remington erhalten. Die folgende Abbildung ist eine Wiederholung von Abbildung 3.22.

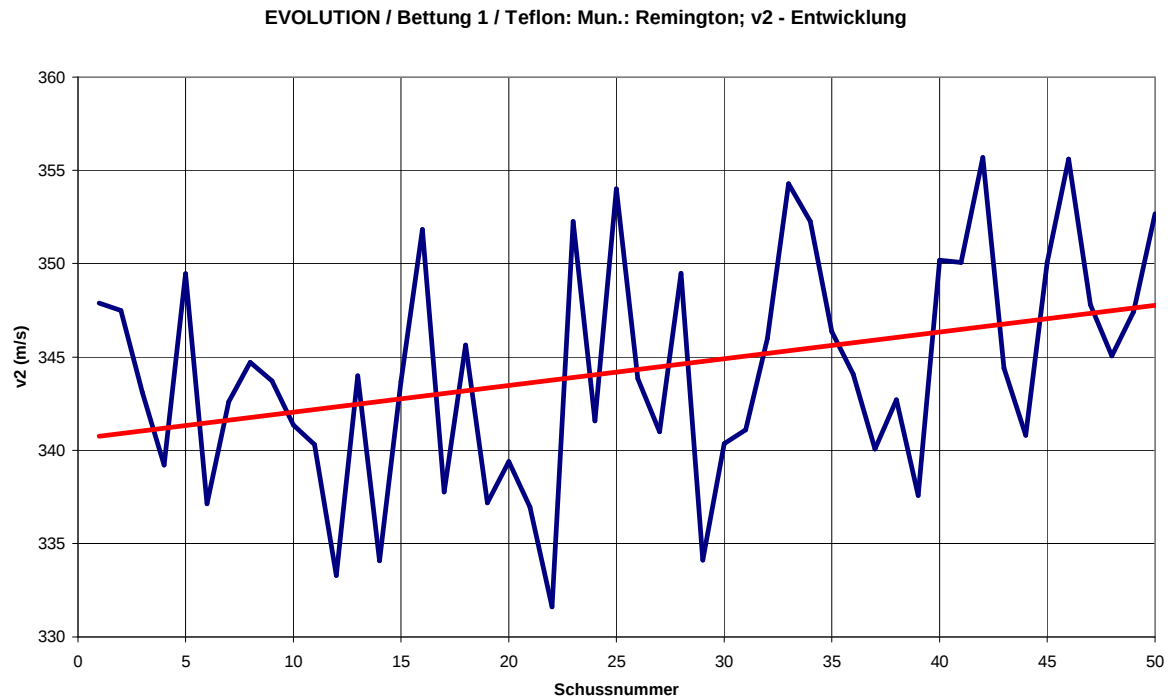


Abb. 3.32: Geschwindigkeitsverlauf bei Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung1/Teflon mit der Munition Remington

Die drei Abbildungen zeigen, dass es einen sehr entscheidenden Einfluss der verwendeten Munition gibt!

4. Theoretische Berechnungen mit ROSSI

Zur Unterstützung der Interpretation der experimentellen Untersuchungen werden das Versuchsgewehr EVOLUTION und das Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ mit ROSSI modelliert.

Zuerst wird die jeweilige Modellierung hinsichtlich des dynamischen Grundverhaltens, das ist primär ein Vergleich gerechneter und experimentell ermittelter Eigenfrequenzen der schwingenden Läufe, geprüft. Im Anschluss daran soll das experimentell beobachtete <Ablage>-Minimum beim Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER (siehe Tabelle 3.5) mit ROSSI im Zuge eines v_0 -Scans nachgeprüft werden. Der Abschluss der theoretischen Untersuchungen mit ROSSI widmet sich dann der Frage nach einer optimalen Bettung beim Versuchsgewehr EVOLUTION. Dabei soll bei einer $v_0 \approx 346 \text{ m/s}$ die freischwingende Lauflänge variiert werden.

4.1 Dynamisches Grundverhalten

Zum Testen der geometrischen und materialtechnischen Modellierung bezüglich des dynamischen Verhaltens werden Laufschrwingungen in der Realität vermessen wie auch mit ROSSI berechnet. Die Phase der Schussentwicklung, wenn sich das Geschoß mit wachsender translatorischer Geschwindigkeit und zunehmendem Drall bewegt, bedeutet physikalisch eine dynamische Belastung für den Lauf, die mathematisch als Störterm in Gleichung 1 (rechter Gleichungsteil) in Kapitel 2.1 abgebildet wird. Um aber den für die Modellierung sehr wesentlichen und bedeutend umfangreicheren linken Teil von Gleichung 1 hinsichtlich des dynamischen Verhaltens zu testen, soll die rein homogene Form von Gleichung 1 untersucht werden. Die homogene Gleichungsform von 1 liegt physikalisch dann vor, wenn das Geschoß den Lauf bereits verlassen hat und der Lauf in ungestörter Form frei schwingen kann. Aus den experimentell aufgenommenen Laufschrwingungsdaten wird je Gewehrbauart ein typisches Diagramm hinsichtlich der in den Laufschrwingungen festgestellten Frequenzen ausgewertet. Mit ROSSI werden nach dem Schussabgang noch über 400 ms die Laufschrwingungen gerechnet und die so erhaltenen rechnerischen Daten dann mit Hilfe einer Diskreten Fourieranalyse untersucht. Das Frequenzspektrum kann dann mit den experimentellen Daten verglichen werden. Die Messungen werden wie bereits ausführlich erwähnt mit dem Trägheitssensor, der mittels Adapter im innenballistisch relevanten Mündungsbereich montiert wird, durchgeführt. Auch die Berechnungen mit ROSSI werden für die Position an der innenballistisch wirksamen Mündung ausgeführt.

Exemplarisch werden hier die diesbezüglichen Untersuchungen für das Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ dargelegt. Der Grund das dynamische Grundverhalten in dieser Arbeit für das Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ aufzuzeigen liegt in seiner klassischen Bettung und der daraus resultierenden Möglichkeit die Ergebnisse auf ähnliche andere Systeme / Kleinkalibersportgewehre zu übertragen beziehungsweise zu vergleichen. Selbstverständlich gibt es analoge Untersuchungen auch zum Versuchsgewehr EVOLUTION. Die Abbildungen 4.1 und 4.2 liefern die Messresultate des Schwingverhaltens für das Gewehr ANSCHÜTZ.

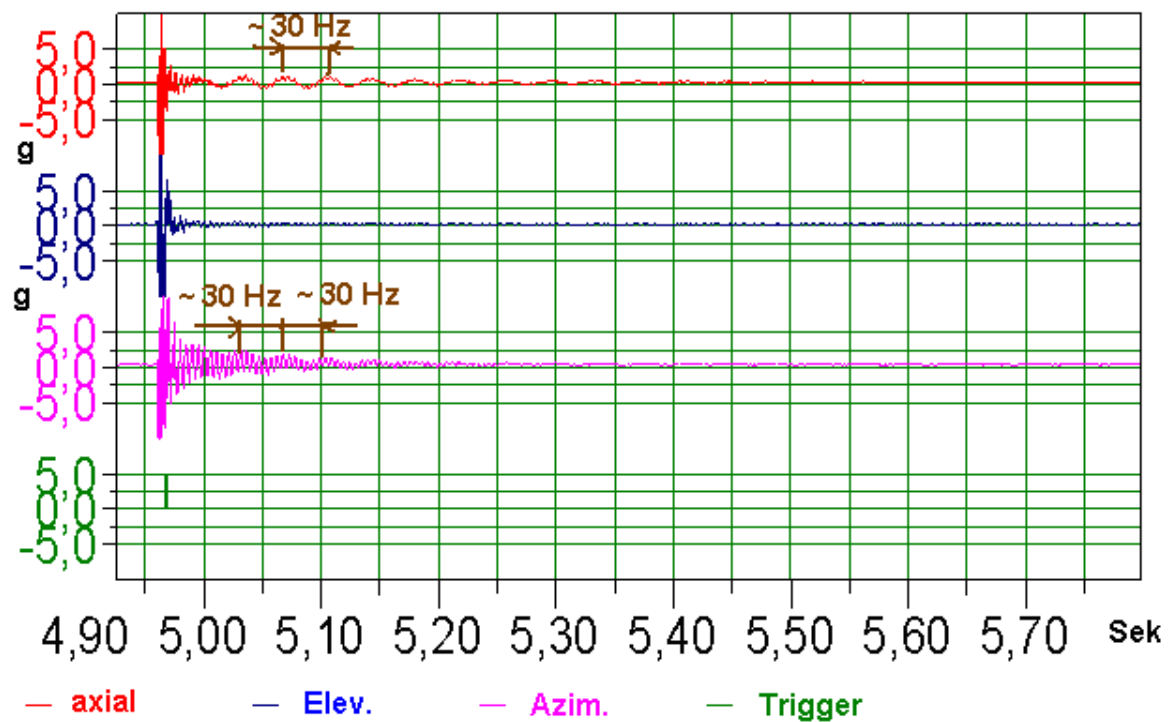


Abb. 4.1: Schwingungsdiagramm für Gewehr ANSCHÜTZ Schuss Nr. 2, 19.07.2010 zur Analyse der lang dauernden Schwingungen. Darstellung analog zu Abbildung 3.1

Anmerkung: Der Übersichtlichkeit wegen wird in den Zeitverlaufsabbildungen 4.1 und 4.2 die Frequenz eingetragen.

Eine Auswertung der originalen Messdaten mit einem FFT – Programm (Fast Fourier Transformation) ist mit der verfügbaren Version von „dasylab“, der Software zur Darstellung, Import und Export der Beschleunigungsdiagramme in dieser Arbeit, nicht möglich.

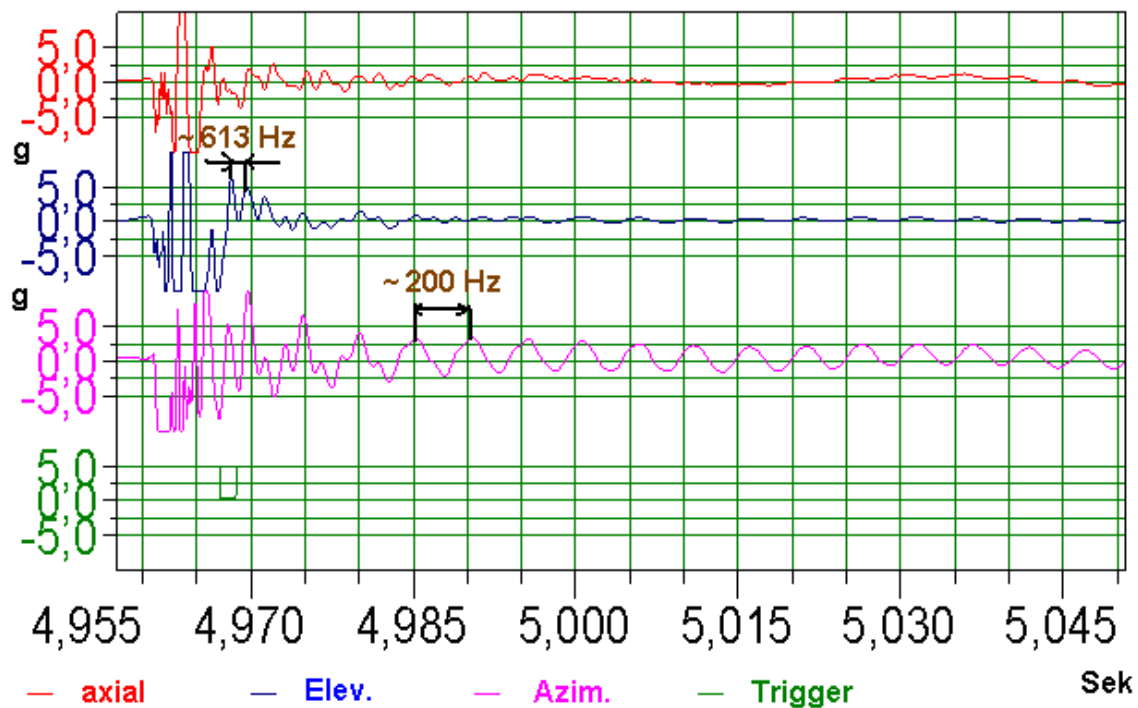


Abb. 4.2: Schwingungsdiagramm für Gewehr ANSCHÜTZ Schuss Nr. 2, 19.07.2010 zur Analyse kurz nach dem Schuss

Die Analyse der Diagramme liefert drei markante Frequenzen:

- ~ 30 Hz Bis zu 400-500 ms (Azimut) erkennbar in Abbildung 4.1
- ~ 200 Hz Die in den ersten 150-200 ms erkennbar sind sowie
- ~ 613 Hz In den ersten 15-20 ms

Den experimentellen Schwingungsmessungen werden nun die gerechneten Ergebnisse mit ROSSI gegenübergestellt. Die Abbildungen 4.3 und 4.4 zeigen den Zeitverlauf der elevatorischen Position der Mündung. Abbildung 4.3 zeigt den Zeitverlauf bis 20 ms um die Verhältnisse beim Mündungsdurchgang des Geschoßes deutlich zu machen. Aus Abbildung 4.4 ist der Zeitverlauf bis 400 ms und damit das Abklingen der gedämpften Schwingung ersichtlich.

Anmerkung:

Ausgehend von der vorliegenden Konfiguration des Modells ROSSI wird der zeitliche Verlauf der Mündungsposition frequenzmäßig analysiert und mit den aus den experimentell gemessenen Zeitverläufen der Beschleunigung ermittelten Frequenzen verglichen. Die Schnittstelle Theorie – Experiment sind daher die Frequenzen.

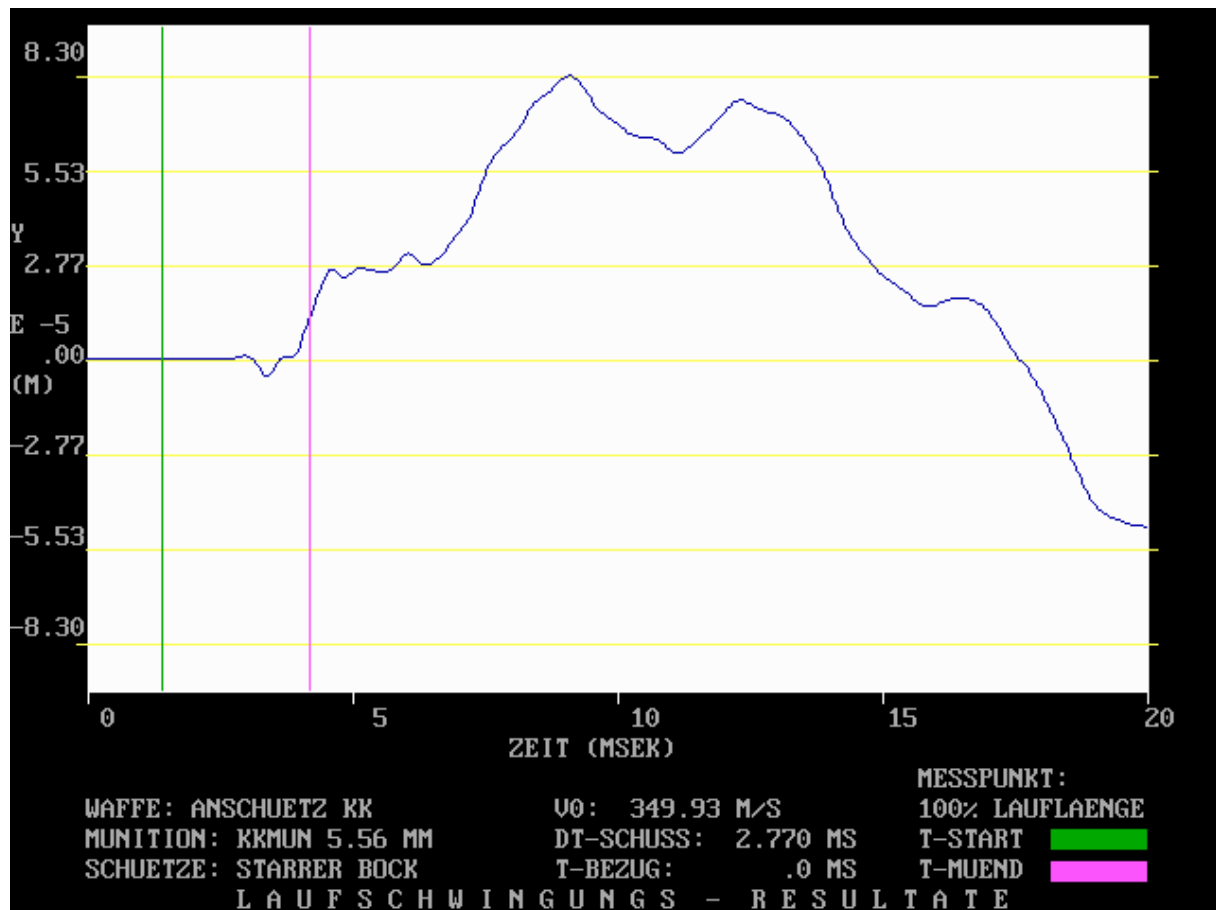


Abb. 4.3: Mit ROSSI gerechneter Zeitverlauf der Mündungsposition für das Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ in der vertikalen Ebene bis 20 ms nach Schussbeginn. Der Schussbeginn ist der Zeitpunkt des Aufschlages des Schlagbolzens auf die Patrone. Die vertikale grüne Linie markiert den Bewegungsbeginn des Geschoßes im Lauf. Die Zeit von 0 bis zur grünen Linie entspricht in ROSSI der Zeit, in der das Pulver in der Patrone bereits zu brennen beginnt, der Gasdruck aber noch nicht ausreicht, den Auszieh Widerstand des Geschoßes aus der Patronenhülse zu überwinden. Die magentafarbene Linie markiert den Zeitpunkt des Geschoßdurchganges durch die Mündung.

Man erkennt, dass sich die Mündung erst nach einer gewissen endlichen Zeitdauer, nachdem sich das Geschoß in Bewegung gesetzt hat, selbst zu bewegen beginnt. Diese Zeitdauer setzt sich u. a. aus folgenden Komponenten zusammen. Der wesentlichste Anteil in der Simulation mit ROSSI ist der, dass das Geschoß erst eine gewisse translatorische Geschwindigkeit haben muss, um durch den an diese Bewegung gekoppelten Drall genügend Zentrifugalkraft zu entwickeln, damit

überhaupt eine translatorische Störung entsteht. Bedenkt man dazu, dass die Elongationsdaten die mit ROSSI gerechnet werden in ein ASCII-File mit einer Auflösung von $0.01\text{ }\mu\text{m}$ geschrieben werden und vom Grafikprogramm nur mit einer Auflösung von $0.55\text{ }\mu\text{m/Pixel}$ dargestellt werden können, ist verständlich, dass alle anfänglichen bereits berechenbaren Elongationen $< 0.55\text{ }\mu\text{m}$ grafisch nicht angezeigt werden. Ein deutlich kleinerer Anteil am „Zeitverzug“ der Mündungselongationsbewegung kommt daher, dass sich der Schall im Lauf nur mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet. Die Zeitdauer der Geschößbewegung im Lauf ist etwa in Abbildung 4.3 mit $DT = 2.77\text{ ms}$ angegeben.

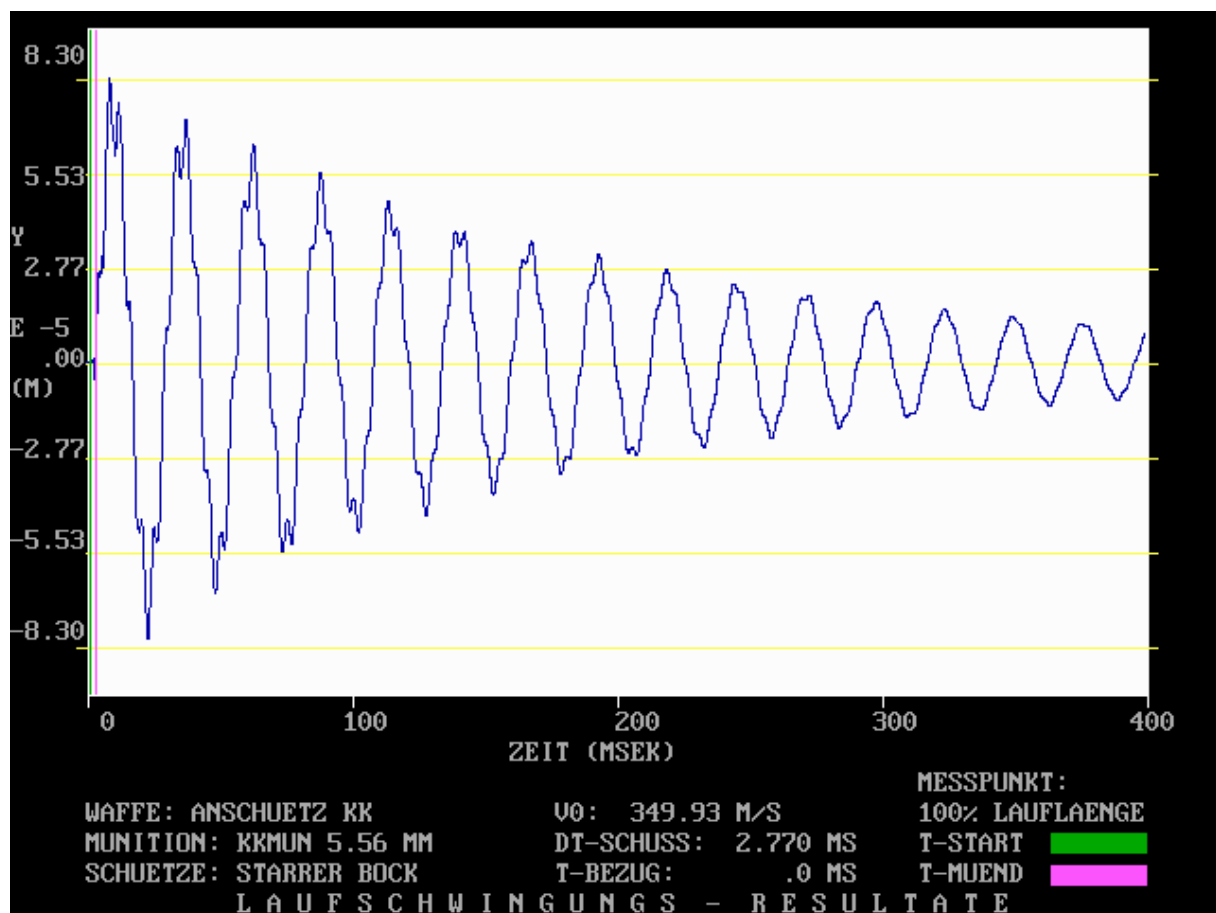


Abb. 4.4: Mit ROSSI gerechneter Zeitverlauf der Mündungsposition des Laues bis 400 ms für das Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ in der vertikalen Ebene.

Der Zeitverlauf der Mündungsposition wie ihn Abbildung 4.4 zeigt, wird mit dem Programm DFT einer Fourieranalyse unterzogen. Das Frequenzspektrum ist in Abbildung 4.5 ersichtlich.

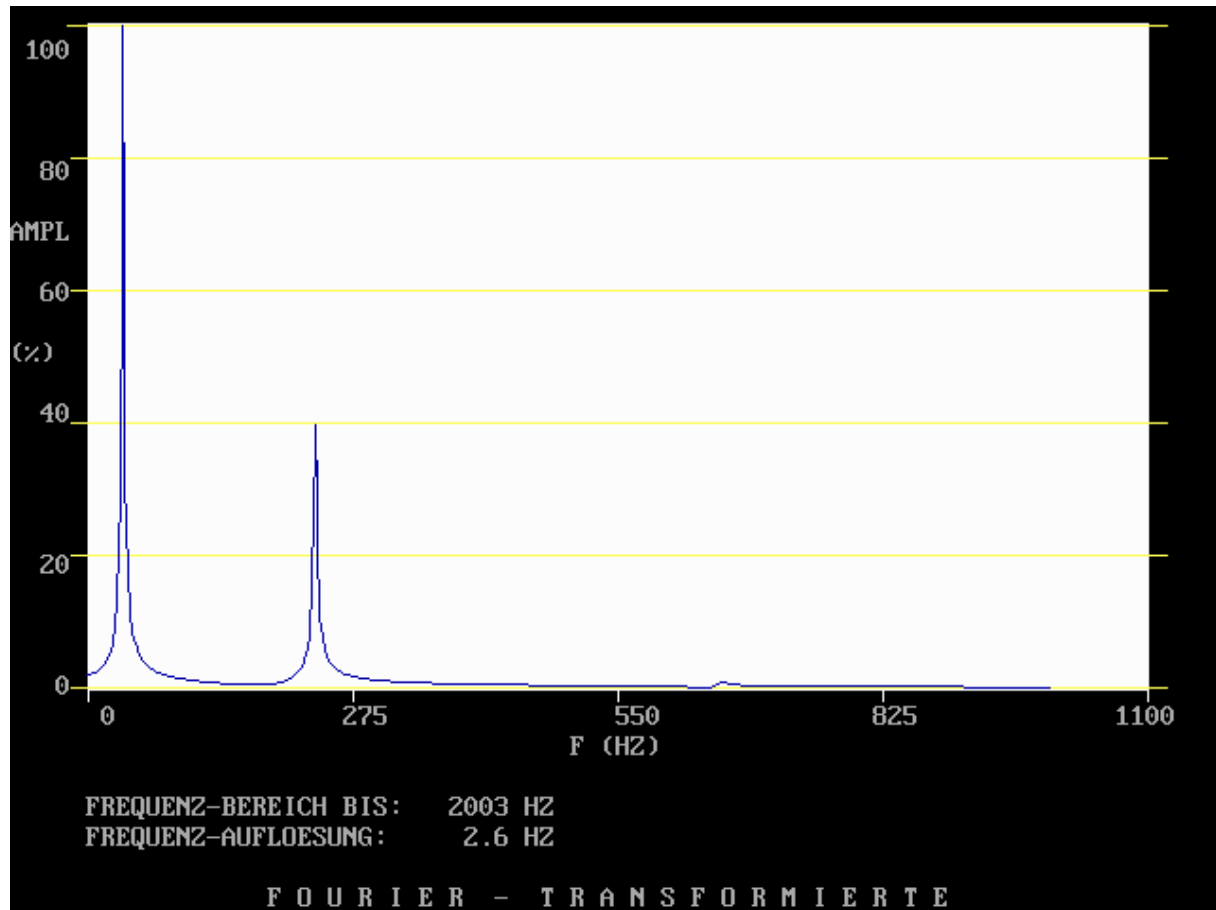


Abb. 4.5: Mit ROSSI berechnetes Frequenzspektrum bis 2002 Hz für Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ bei einer Frequenzauflösung von 2.5 Hz und bis 1000 Hz hier dargestellt.

Die Detaildaten der Frequenzanalyse in Relation zu den über die Abbildungen 4.1 und 4.2 gewonnenen Messwerten sind aus Tabelle 4.1 ersichtlich.

Gerechnet mit ROSSI		Messung
Frequenz (Hz)	Relative Amplitude (%)	Frequenz (Hz)
38	100	~ 30
238	40	~ 200
660	1	~ 613

Tabelle 4.1: Die Eigenfrequenzen des Vergleichsgewehres ANSCHÜTZ, gerechnet mit ROSSI, im Vergleich mit den Werten die sich aus der Auswertung der experimentell ermittelten Diagramme in den Abbildungen 4.1 und 4.2 ergeben.

Es werden die, für die Berechnungen mit ROSSI gemachten Annahmen zur Modellierung der Waffen, hier am Beispiel des Vergleichsgewehres ANSCHÜTZ demonstriert, unter den gegebenen Umständen (einfache Simulation) als hinreichend gut betrachtet. Diese Beurteilung stützt sich auf den Vergleich der gerechneten Frequenzen mit den Werten, die aus den Messungen gewonnen werden.

Zusatzprüfung:

Im Zuge einer einfachen analytischen Berechnung soll die Frequenz der Grundschiwingung über den Ansatz eines homogenen Stabes der auf einer Seite eingespannt ist und auf der anderen Seite frei schwingt, hinsichtlich der Größenordnung geprüft werden. Nach [18] gilt für die transversale Grundschiwingung des eingespannten Rundstabes:

$$\nu = \frac{d}{l^2} \cdot \frac{m^2}{8\pi} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

mit

d ... Stabdurchmesser; $d = 2,25\text{ cm}$

l ... Stablänge; $l = 62,5\text{ cm}$

m ... Faktor ~ 2 für einen Rundstab nach [18]

E ... Elastizitätsmodul; $E = 206\text{ GN} / \text{m}^2$

ρ ... Dichte; $\rho = 7800 \text{ kg} / \text{m}^3$

Die Berechnung liefert:

$$\nu = 47 \text{ Hz}$$

Dieses Resultat zeigt, dass sowohl die Messung als auch die Berechnung der Grundschiwingung mit ROSSI im richtigen Bereich liegen. Die analytische Prüfung lässt die genaue Geometrie (leichte Laufverdickung bei der Mündung, die Laufbohrung, etc.) sowie die in der Realität nicht absolut vollkommen starre Bettung des Systems außer Acht. Die Effekte der Laufverdickung am schwingenden Stabende sowie die nicht absolut starre Bettung reduzieren tendenziell die Frequenz der Grundschiwingung, sodass auch nach dieser Prüfung die Modellierung mit ROSSI für die weiteren Untersuchungen als geeignet anzusehen ist.

4.2 v_0 -Scan

Unter einem v_0 -Scan wird die Berechnung der <Ablage> über eine 50 Schussreihe mit dem Modell ROST verstanden. Dabei wird die Pulvermenge der Patrone von Schussreihe zu Schussreihe etwas gesteigert um in v_0 -Intervallen von 2 m/s einen v_0 -Bereich (hier von 326 m/s bis 352 m/s) zu scannen.

Zur Berechnung des vorliegenden v_0 -Scans wird in ROSSI die sonst mögliche Streuung der v_0 ausgeschaltet. Die einzigen Streuungen sind hier nur die der radialen Exzentrizität und die des Anfangsrollwinkels. Unter der radialen Exzentrizität wird eine radiale Abweichung des Geschößschwerpunktes von der Mittelposition verstanden. Diese radiale Exzentrizität ist einerseits aus z.B. fertigungstechnischen Gründen in der Realität gegeben und andererseits modellbedingt absolut notwendig um eine Schwingung des Laufes anzuregen. Die Ausschaltung der v_0 -Streuung soll die extreme Geschwindigkeitsabhängigkeit des experimentell gefundenen <Ablage>-Minimums (siehe Tabelle 3.5) zu untersuchen helfen. Abbildung 4.6 zeigt diesen speziellen v_0 -Scan für das Intervall zwischen 326 m/s und 352 m/s.

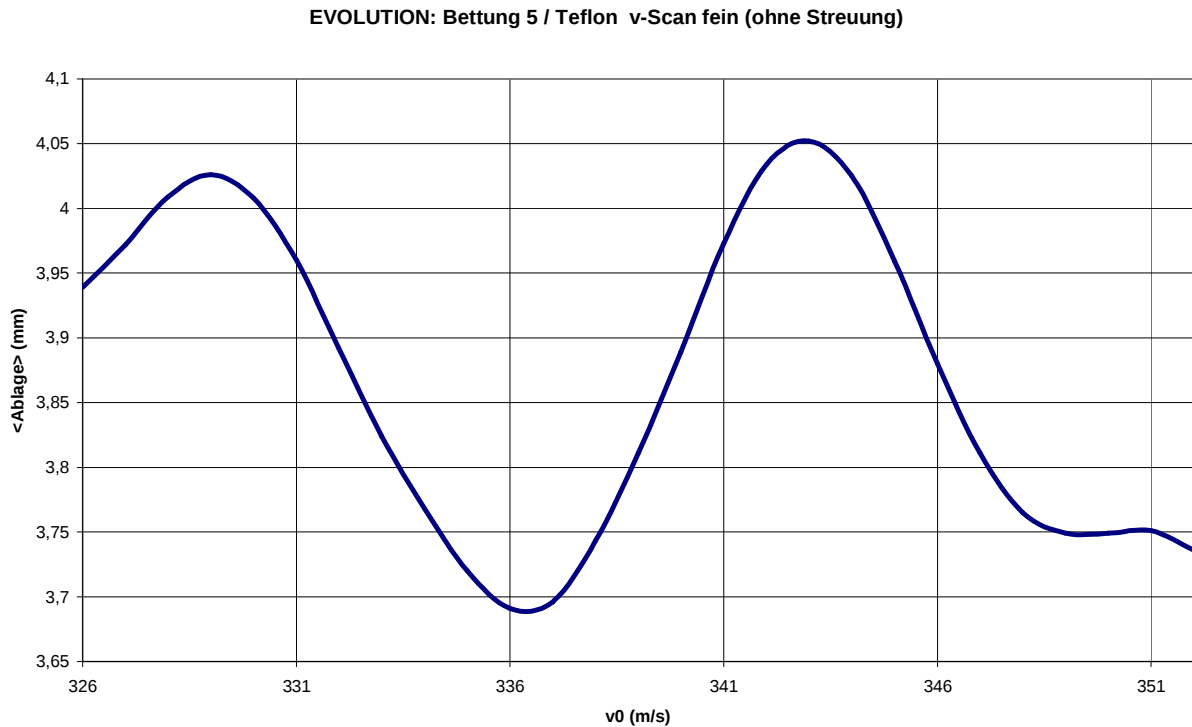


Abb. 4.6: v_0 -Scan für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung 5/Teflon. Keine v_0 -Streuung. Die $\langle \text{Ablage} \rangle$ -Werte ergeben sich nur aus der Streuung der radialen Exzentrizität und des Anfangsrollwinkels. Beachtung des Ordinatenmaßstabes!

Die Abbildung 4.6 zeigt deutlich das ausgeprägte relative Minimum bei $v_0 = 336$ bis 337 m/s. Die Detailresultate dieser Berechnungen zu den v_0 -Werten um $v_0 = 336$ m/s werden im Kapitel 5.2 den experimentellen Resultaten gegenüber gestellt. Eine Munition in diesem v_0 -Bereich (z.B. R50 von RWS) sollte etwas bessere Resultate liefern, also weniger streuen, als etwa eine Munition wie R100 von RWS im Bereich $v_0 \sim 346$ m/s.

4.3 Bettungstest

Bisher ist die Frage nach einer optimal erscheinenden Position für die das System festklemmenden Halbschalen – der Bettung – entlang der Systemachse (x -Achse) noch nicht befriedigend untersucht worden. Der diesbezügliche experimentelle Weg mit dem Versuchsgewehr EVOLUTION hat sich wegen der Störung der Laufschrwingungen des realen Schusses durch die „Nachhallschwingungen“ des

Schlagbolzenaufschlages als mit den verfügbaren Mitteln nicht gangbar erwiesen. Nun wird mit ROSSI die Bettungsfrage theoretisch untersucht. Dabei muss festgehalten werden, dass mit ROSSI der Schlagbolzenaufschlag und die damit ausgelösten Schwingungen nicht modelliert werden, sodass nur die Schwingungen des Schusses selbst gerechnet werden. Der entscheidende Parameter ist die „freischwingende Lauflänge“. Mit dem Programm ROST werden nun beim Versuchsgewehr EVOLUTION die <Ablage>-Werte für eine $v_0 = 346 \pm 2.2$ m/s bei variabler freischwingender Lauflänge berechnet. Es wird also die volle v_0 -Streuung in ROSSI verwendet. Eine $v_0 \sim 346$ m/s entspricht der mittleren v_0 der „Standardmunition“ R100 bei diesen Versuchen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.7 für das Versuchsgewehr EVOLUTION dargestellt.

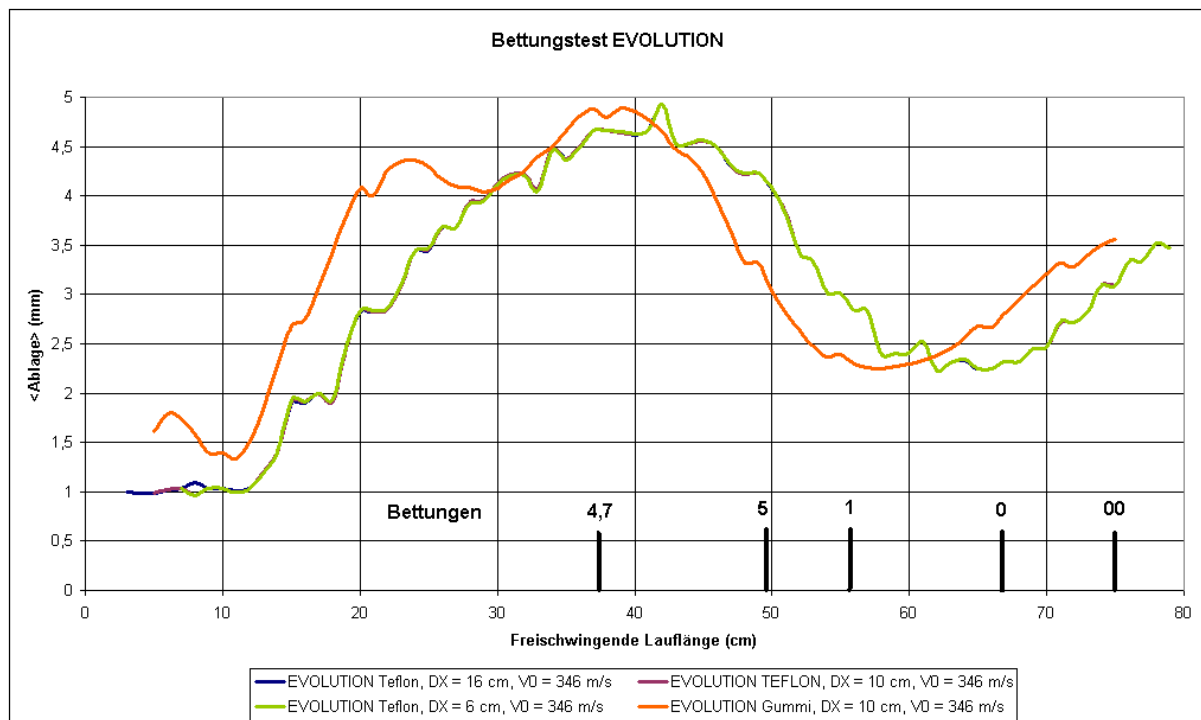


Abb. 4.7: Mit ROSSI gerechneter Bettungstest für das Versuchsgewehr EVOLUTION mit $v_0 \sim 346$ m/s; Bettungsmaterial Teflon und einmal Gummi; Länge der jeweiligen Bettungen: 6 cm, 10 cm und 16 cm. Die jeweiligen freischwingenden Lauflängen der Bettungen 00, 0, 1, 4, 5, und 7 (siehe Tabelle 3.1) sind an der Abszissenachse markiert.

In Abbildung 4.7 wird mit der Schrittweite 1cm die Bettung vom Mündungsbereich bis zum Laufende nach hinten verschoben. Das heißt, die freischwingende Lauflänge ist demnach der Abstand zwischen der Vorderkante der Bettung und der innenballistisch relevanten Mündung.

- Es ist erkennbar, dass die Länge der Bettung (6 cm, 10 cm und 16 cm) beim Bettungsmaterial Teflon, praktisch keine Unterschiede macht. Die drei Kurven sind mit ihren unterschiedlichen Farben nur im Bereich von weniger als 10cm freischwingender Lauflänge als verschieden zu erkennen.
- Die Härte bzw. Elastizität des Bettungsmaterials hat einen „phasenschiebenden“ Einfluss wie an Hand der Kurven für Teflon einerseits und der Kurve für Gummi andererseits ersichtlich ist.
- Die optimale freischwingende Lauflänge bei Teflon wäre um ca. 65 cm, die bei einem Bettungsmaterial von Gummi bei ca. 58 cm.
- Die gerechneten Federkonstanten für die Bettungen mit Teflon (mittelhart bis hart) und Gummi (weich) stellen die Grenzen des realistisch möglichen Spektrums dar. Daraus folgt, dass die „modellierte Realität“ durch eine der beiden Kurven in Abbildung 4.7 selbst (grüne „Sammelkurve“ oder orange Kurve) bzw. die Zone zwischen den beiden Kurven wiedergegeben wird. Damit wäre nach den Berechnungen mit der Modellfamilie ROSSI ein Optimum bei einer freischwingenden Lauflänge von ca. 58 - 62 cm gegeben. In diesem Bereich liegt nicht nur ein relatives Minimum der <Ablage>-Werte an sich vor, sondern die Unterschiede zwischen harter und weicher Bettung sind ebenfalls relativ gering. Das heißt, nicht modellierbare Eigenschaften in der Bettungshärte (Material) wirken sich bei Bettungen um die 60 cm freischwingende Lauflänge nicht dramatisch aus. Die Bettung 1 könnte bei eher weichem Bettungsmaterial einem Optimum rein rechnerisch sehr nahe kommen.
- Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Resultate von Abbildung 4.7 für eine $v_0 \sim 346$ m/s gelten und bei Vorliegen einer anderen v_0 sich die optimale freischwingende Lauflänge verändern kann. Eine andere v_0 bedeutet ein geändertes Zeitverhalten der Schwingungsanregung des Laufes.
- Die niederen <Ablage>-Werte bei freischwingenden Lauflängen von 10 cm oder weniger ergeben sich aus der durch die v_0 -Streuung bedingten vertikalen Trefferstreuungen im Ziel.

5. Zusammenfassung und Diskussion der Resultate

5.1 Laufschrwingungsuntersuchungen

Ein experimentell wichtiges Resultat ist die stochastische Natur der Laufschrwingungen, das heißt das Schwingungsmuster wechselt von Schuss zu Schuss. Diese stochastische Natur kann auf die unvermeidlichen Störungen bei der Munition zwischen den einzelnen Patronen, auch innerhalb eines Fertigungsloses, zurückgeführt werden. Es gibt keine Möglichkeit auf waffentechnischer Seite diese Zufälligkeit der Schwingungsformen gänzlich zu vermeiden. Die theoretischen Berechnungen mit ROSSI zeigen, dass der Hauptgrund einer großen Munitionsstreuung in der radialen Exzentrizität des Geschoschwerpunktes liegt. Darunter versteht man eine Abweichung des Geschoschwerpunktes von dessen Figurachse. Als Ursache können unter anderem Inhomogenitäten im Blei, ein nicht koaxial in die Patronenhülse gesetztes Geschoß oder ein ungleichmäßiges Verlassen des Patronenmundes durch das Geschoß sein. Wenn das Geschoß nicht koaxial in die Patronenhülse eingesetzt ist, genügen schon sehr kleine Winkel zwischen der Geschoßachse und der Patronenachse, um durch die Weichheit des Bleis unterstützt, beim Einpressen des Geschoßes in die Züge und Felder des Laufes den Schwerpunkt etwas exzentrisch bezüglich der Laufachse zu erhalten. Der nachfolgende Drall mit den damit verbundenen Zentrifugalkräften löst dann die Schwingungen (erzwungene Schwingungen) aus. Da diese Exzentrizität am Anfang zufällig um die Laufachse verteilt ist, kann geschlossen werden, dass die Verteilung der Schwingungen in Azimut und Elevation ebenfalls zufällig erfolgen muss. Selbst wenn sich das Geschoß koaxial in der Patrone befindet, ist es unwahrscheinlich, dass beim Ablösevorgang von der Patronenhülse, dem Ausziehprozess, alle Randbereiche des Geschobodens gleichzeitig den Patronenmund verlassen. So strömt Gas sehr kurzzeitig asymmetrisch aus der Patronenhülse aus. Dadurch kann dem Geschoß eine – leichte – Nick- oder Gierbewegung aufgedrückt werden, die dann analog zu einer radialen Exzentrizität des Schwerpunktes führen kann.

Eine weitere wesentliche Erkenntnis aus den direkten Laufschrwingungsmessungen ist die Bedeutung des Aufschlages des Schlagbolzens am Patronenrand, der dann die Zündung der Patrone auslöst. Messtechnisch kann festgestellt werden, dass die Bewegung des vorschnellenden Schlagbolzens keine relevanten Schwingungen bewirkt, wohl aber dann der Aufschlag. Eine Ursache kann in der zum Schwerpunkt

des Gewehrs asymmetrischen Bewegung des Schlagbolzens liegen, die dadurch ein Drehmoment erzeugt, das seinerseits die Schwingungen bewirkt. Möglicherweise erfolgt der Aufschlag am oberen Patronenrand unter sehr, sehr kleinen von Verschluss zu Verschluss verschiedenen Winkeln zur Laufachse, was die Abhängigkeit der Stärke der durch den Schlagbolzen ausgelösten Schwingungen von den verschiedenen getesteten Gewehren (Verschlüsse, Schlagbolzen) erklären könnte. Eine detaillierte Analyse aller möglichen Ursachen des angesprochenen Schlagbolzenverhaltens wird aber in der vorliegenden Arbeit nicht angestellt.

Die Analyse mit ROSSI zeigt, dass die Bewegung des Geschoßes im Lauf ca. 1ms nach dem Aufschlag (= Zünden des Pulvers in der Patronenhülse) beginnt. In der Patrone muss erst genügend Druck aufgebaut werden, um den Auszieh Widerstand des Geschoßes zu überwinden. Das heißt, das Geschoß bewegt sich in einen bereits schwingenden Lauf hinein. Die für die Schussgenauigkeit relevanten Schwingungen des Laufes im Mündungsbereich setzen sich daher aus der abklingenden Schwingung die durch den Schlagbolzen ausgelöst wird und der erzwungenen Schwingung durch die Bewegung (Drallbewegung) des Geschoßes, zusammen.

Die gemessenen Amplituden der alleine vom Schlagbolzen verursachten Schwingungen, können in der Größenordnung der gesamten, einschließlich der durch den Schuss bewirkten Schwingungen, liegen. Dadurch können sonstige schwingungstechnische Optimierungen an der Waffe durch den Schlagbolzen stark vermindert oder unwirksam werden.

5.2 Schussbildanalyse

Der experimentelle Versuch bei verschiedenen Bettungen und Bettungsmaterialien des Versuchsgewehres EVOLUTION durch den Vergleich von Trefferbildern eine Optimallösung zu finden, ist fehlgeschlagen. Die Unterschiede in den Bettungen werden durch die Störungen der schlagbolzeninduzierten Schwingungen egalisiert. Beim Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER werden deutlich geringere Schwingungen durch den Schlagbolzen gemessen. Daher wird das Hauptaugenmerk jetzt auf das Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER gelegt, welches aber nur in einer Bettung, nämlich Nr. 5/Teflon, vorliegt. Dabei wird nun die Sensitivität der <Ablage> bezüglich der v_0 beleuchtet. In Tabelle 5.1 werden die gemessenen

Resultate der Schussbilder, das heißt, die $\langle Ablage \rangle$ -Werte mit den mit ROSSI gerechneten Werten, verglichen. Dabei muss vorweg gesagt werden, dass mit ROSSI keine Absolutaussagen zu den $\langle Ablage \rangle$ -Werten gemacht werden können, sondern nur Relativaussagen. Damit ist gemeint, dass die Lage des $\langle Ablage \rangle$ -Minimums in Bezug auf die entsprechende v_0 richtig angegeben wird jedoch die $\langle Ablage \rangle$ -Werte selbst nicht mit den gemessenen $\langle Ablagen \rangle$ übereinstimmen müssen. Mit dem Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER werden drei Munitionen (Wettkampfgewehr und Wettkampfmunitionen) geschossen. Die drei Munitionen unterscheiden sich in den mittleren v_2 -Werten nur um jeweils 2 m/s. Um einen direkten Vergleich mit den ROSSI-Resultaten zu erhalten, wird der Geschwindigkeitsabfall auf 2 m Distanz (Mündung bis Mitte Messrahmen) mit 2.7 m/s mit ROSSI berechnet. Dadurch können die gerechneten Geschwindigkeiten direkt mit den gemessenen Geschwindigkeiten verglichen werden. Die Berechnungen mit ROSSI erfolgen hier, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, ohne v_0 -Streuung (nur Streuung der radialen Exzentrizität und des Anfangsrollwinkels).

Experiment			ROSSI		
Munition	v_2 (m/s)	$\langle Ablage \rangle$ (mm)	v_0 (m/s)	v_2 (m/s)	$\langle Ablage \rangle$ (mm)
476DC435	331.8 ± 1.2	3.86	334	331.3	3.77
418ID176	333.8 ± 1.9	3.20	336	333.3	3.69
597FB965	335.8 ± 1.7	3.46	338	335.3	3.74

Tabelle 5.1: Vergleich der gemessenen und mit dem Modell ROSSI (Programm ROST) gerechneten Schussbildresultate für das Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon. Gemessene wie gerechnete Schussserien mit jeweils 50 Schuss.

Die mittleren gemessenen und die gerechneten v_2 -Geschwindigkeiten sind hier praktisch gleich. Das spektakulärste Resultat ist die hier vorliegende Übereinstimmung in der Relativbeziehung der gemessenen und gerechneten $\langle Ablage \rangle$ -Werte. Die geschossene Munition 418ID176 mit $v_2 = 333.8$ m/s liefert den Minimalwert bei den experimentellen $\langle Ablage \rangle$ -Werten. Im Gleichklang dazu zeigt der $\langle Ablage \rangle$ -Wert mit ROSSI gerechnet für eine $v_2 = 333.3$ m/s ebenfalls ein

lokales Minimum. Weiter noch ist aus Tabelle 4.1 abzulesen, dass die $\langle Ablage \rangle$ -Werte für $v_2 = 331.8 \text{ m/s}$ (experimentell) und $v_2 = 331.3 \text{ m/s}$ (ROSSI) höher liegen als die $\langle Ablage \rangle$ -Werte für die $v_2 = 335.8 \text{ m/s}$ (experimentell) und $v_2 = 335.3 \text{ m/s}$ (ROSSI). Nicht nur das $\langle Ablage \rangle$ -Minimum als Funktion von v_2 wird von der Theorie richtig wiedergegeben, sondern auch die $\langle Ablage \rangle$ -Trends geschwindigkeitsmäßig vor und nach dem Minimum werden in der Theorie richtig ermittelt. Zur Signifikanz der experimentellen $\langle Ablage \rangle$ -Resultate kann dahingehend argumentiert werden, dass nach Kapitel 3.3.2 die experimentelle Streuung σ der $\langle Ablage \rangle$ -Werte bei vergleichbaren Schussserien rein messtechnisch gesehen bei $\sigma = \pm 0.12 \text{ mm}$ liegt. Unter Zugrundelegung der messtechnisch erfassten $\sigma = \pm 0.12 \text{ mm}$ können die Differenzen der gemessenen $\langle Ablage \rangle$ -Werte in Tabelle 4.1 als signifikant, da größer als σ (sogar mehr als 2σ) auseinander liegend, bezeichnet werden. Das experimentelle Minimum der $\langle Ablage \rangle$ für $v_2 = 333.8 \text{ m/s}$ ist daher kein zufälliges Resultat (Rauschen), sondern systematisch.

5.3 Schlussbemerkungen

Können die durch den Schlagbolzen erzeugten Schwingungen reduziert werden, wären weiterführende Untersuchungen zur Optimierung der schussinduzierten Auswirkung von Laufschwingungen zielführend.

Als Qualitätsmerkmal der Munition sollte neben der Geschwindigkeitsstreuung auch der Trend der Geschosßgeschwindigkeiten im Verlauf einer Serie erachtet werden. Der geringe Abstand der v_2 -Werte von nur 2 m/s zwischen den 3 Munitionslosen der verwendeten R50 Munition führt sowohl experimentell wie auch theoretisch zu signifikanten Unterschieden in der Schussbildstreuung. So ist es denkbar, dass eine Munition zu Beginn einer Schussserie eine geringe Streuung zeigt aber mit zunehmenden Schusszahlen im Laufe eines Wettkampfes aus dem Minimum „auswandert“, das heißt eine höhere Streuung entwickelt. Das Zusammenspiel Waffe-Munition reagiert empfindlich auf kleine Veränderungen wie die geringen v_2 -Unterschiede beim Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER zeigen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] SEQUARD – BASE J. „Diskussion der Messmethodik zur Beurteilung des Einflusses von Laufschrwingungen bei Kleinkalibersportgewehren“
Bachelorarbeit an der Universität Wien, 2011
- [2] K. N. SCHWINKENDORF, S. P. ROBLYER „Three River Technologies – Simulation of the Vibrational Response of a Rifle Barrel During Firing“
www.vni.com/successes/threerivers.html, Stand. 22.05.2005
- [3] C. M. HARRIS, A. G. PIERSON “Harris’ Shock and Vibration Handbook” Fifth Edition, McGraw-Hill Handbooks
- [4] Waffentechnisches Taschenbuch, Gesamtleitung, Dr. Germershausen, Firma Rheinmetall, 6. Auflage 1983
- [5] <http://www.meyton.info/uploads/media/MeytonBroschuere.pdf>
Stand 10.07.2011
- [6] R. BITTNER, interner Prüfbericht „Gewehrlaufschwingungsmessungen“, Beilage zu GZ: S95810/1-ARWT/OPMT/2010
- [7] G. KOLBE, „The Making of a rifled barrel“, www.border-barrels.com/articles/bmart.htm, Stand 24.03.2011
- [8] Google Eingabe: Gleitreibungskoeffizient, Stahl, Blei, Dubbel (nicht unter Anführungszeichen), Stand 24.03.2011
- [9] <http://de.wikipedia.org/wiki/Reibungskoeffizient>, Stand 25.03.2011
- [10] Truppendienst Taschenbuch, „Waffentechnik1, Band 2“, Verlag AV + Astoria Druckzentrum GmbH, Wien 2007
- [11] Stainless Steel – Grade 416,
www.azom.com/Details.asp?ArticleID=971, Stand 24.03.2011

- [12] <http://de.wikipedia.org/wiki/Wärmeleitfähigkeit>, Stand 24.03.2011
- [13] http://de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung_Spezifische_Wärmekapazitäten, Stand 24.03.2011
- [14] <http://de.wikipedia.org/wiki/Blei>, Stand 24.03.2011
- [15] http://www.schweizer-fn.de/stoff/wuebergang_gase/v2_wuebergang_gase.htm, Stand 24.03.2011
- [16] <http://www.goodfellow.com/G/Blei.html>, Stand 24.03.2011
- [17] <http://de.wikipedia.org/wiki/Poissonzahl>, Stand 24.03.2011
- [18] Gerthsen et. al. "Physik", 13. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1977

Danksagung

Den Abschluss eines schönen und interessanten Projektes zu erreichen bedeutet auch, sich bei all denen die am Gelingen der Arbeit beteiligt waren, zu bedanken.

So gilt mein erster Dank Herrn Brigadier Dr. Johannes PFANNHAUSER, dass er mich und mein Thema zur Masterarbeit angenommen hat.

Ich bedanke mich ferner bei Herrn Brigadier Dipl. Ing. Erich APOLONER, der als damaliger Leiter des ARWT die Durchführung meiner Masterarbeit im Rahmen eines Verwaltungspraktikums im ARWT ermöglicht hat. Vielen Dank weiters Herrn Hofrat Dipl. Ing. Hermann DORNINGER, Abteilungsleiter der Abteilung WFT, für die Aufsicht und Abwicklung des Projektes in seiner Abteilung. Für das Zustandekommen des Verwaltungspraktikums sei auch der personalführenden Stelle des ARWT unter Herrn Regierungsrat Amtsdirektor Manfred LANGECKER gedankt.

Für die Unterstützung bei der Durchführung der experimentellen Arbeiten im Schießkanal FELIXDORF gebührt allen am Projekt Beteiligten mein großer und aufrichtiger Dank. Ohne ihre Hilfe wäre die Arbeit so nicht durchführbar gewesen.

Den Herren Oberrat Mag. Dr. Roland BITTNER und Markus KRÖLL von ARWT/OPMT danke ich für die großzügige Unterstützung bei den Laufschiwingungsmessungen mit dem Trägheitssensor.

Ohne ihn und seine innovativen Ideen gäbe es kein Versuchsgewehr EVOLUTION. Herrn Vizeleutnant Alfred TAUBER gebührt Respekt und meine Anerkennung für die Entwicklung des Versuchsgewehres EVOLUTION. Ich danke ihm für die zur Verfügungstellung zweier Gewehre und die Ermöglichung meiner Masterarbeit im Rahmen des Physikstudiums.

Sehr herzlich gedankt sei auch Herrn Joachim BECK für die vielen angeregten Fachdiskussionen und auch für seine gerätetechnische Unterstützung in FELIXDORF. Seine reichhaltige Erfahrung im Kleinkalibersport ist für mich eine sehr große Bereicherung gewesen.

Ohne der großzügigen Bereitschaft der Firma MEYTON (Vertreter Herr Anton ZIEGLER) ein elektronisches Trefferanzeigesystem für die Dauer der Experimente zur Verfügung zu stellen wäre das Projekt nicht gestartet worden. Vielen Dank für die unbürokratische Abwicklung und Einweisung!

ABSTRACT

The small-series rifle EVOLUTION represents a small-bore sports rifle which, owing to a new type of mount of barrel, makes it possible, first, to minimize the influence of inevitable barrel oscillations on the hit results, and second, to apply the results of ammunition tests to a competitive situation more accurately. This paper describes the experimental investigation of several parameters that have a substantial influence on hit results. Barrel oscillations are determined and analyzed experimentally and interpreted theoretically, using the computer simulation model ROSSI developed by ARWT (Armament and Defense Technology Agency) in the Austrian Armed Forces. With these results a comparison between the experimental data and the calculated ones is possible.

An interesting result is, that the impact of the firing pin already generates barrel oscillations. Hence, it is not only the dynamic movement of the projectile itself inside the barrel that produces oscillations; the projectile, rather, moves into a barrel that is also already oscillating.

Another important finding is the experimentally detected and theoretically proved existence of minima in the spreading of hitting results depending on the projectile's velocity.

In the theoretical part of this work the energy balance of small bore shot is used to calculate the influence of the heating of the barrel during a shooting series on the velocity of the projectile. This simple approach is able to explain the velocity drifts during all shooting series.

Furthermore the ballistic software ROSSI is used to determine the perfect position and material of the mount of barrel.

Keywords: Firing pin, barrel oscillations, small – bore sport rifle, hit results, mount of barrel, internal ballistics, balance of energy.

Zusammenfassung

Mit dem Versuchsgewehr EVOLUTION liegt ein Kleinkalibersportgewehr vor, dessen neues Konzept der Systembettung nicht nur die Möglichkeit bietet, die bei der Schussentwicklung induzierten und das Trefferbild negativ beeinflussenden Laufschwingungen zu minimieren, sondern auch eine objektivere Vergleichbarkeit zwischen Munitionstests und Wettkampfergebnissen zulassen soll.

In dieser Arbeit sollen dazu einige, die Schussstreuung der Waffe wesentlich beeinflussende Faktoren experimentell im Schießkanal und theoretisch mit dem beim Amt für Rüstung und Wehrtechnik des Österreichischen Bundesheeres entwickelten Simulationsprogramm ROSSI, untersucht werden.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen die stochastische Natur der Laufschwingungen und die große Bedeutung der Schlagbolzendynamik. Durch den Einschlag des Schlagbolzens auf der Patronenhülse werden bereits Schwingungen ausgelöst, die in der Größenordnung jener Werte des scharfen Schusses liegen. Daraus resultiert, dass beim Schuss eine Superposition aus Laufschwingungen der Geschößbewegung und der schlagbolzeninduzierten Oszillationen vorliegt.

Experimentelle und theoretische Trefferbildanalysen belegen weiters eine hohe v_0 -Sensibilität der Schussstreuung. Die Praxis zeigt ferner, dass die mittlere v_0 innerhalb einer Schussserie stets steigt, wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß. Dadurch kann man aus einem Minimum der Streuung herauslaufen. Ein Teil der theoretischen Arbeit befasst sich mit einem selbst entwickelten Modell zur Erklärung der beobachteten v_0 -Zunahmen. Dabei wird von der Energiebilanz des Kleinkaliberschusses ausgegangen um die Reibungsenergie zu ermitteln, die zur Temperaturerhöhung des Laufes führt. Damit einher geht eine geringfügige Vergrößerung des Laufquerschnittes, die zu einer verringerten Reibungskraft der nachfolgenden Geschöße führt. Die Rechnung zeigt, dass die dadurch erzielte Steigerung der v_0 im Rahmen der Messwerte liegt.

Letztlich werden mit ROSSI rechnerisch die mittleren Trefferablagen verschiedener Bettungsvarianten für eine feststehende v_0 ermittelt.

Stichworte: Laufschwingungen, Schlagbolzen, Schussbild, Bettung, Energiebilanz, Innenballistik

Lebenslauf

09.07.1990:	Geboren in Mödling als österreichischer Staatsbürger und Sohn eines Beamten und einer Krankenschwester. Seit damals wohnhaft bei den Eltern in 2531 Gaaden, Jänergasse 4
1996-2000:	Besuch der VS Gaaden
2000-2008:	Besuch des BRG Franz Keimgasse in Mödling mit Schwerpunkt Naturwissenschaft
29.05.2008:	Matura mit Auszeichnung am BRG Franz Keimgasse
01.07.2008-31.12.2008:	Präsenzdienst beim Österreichischen Bundesheer als Heeres Leistungssportler im HLSZ 2 Blattgasse, Wien
2009-2012	Bachelorstudium der Physik an der Universität Wien
26.01.2012	Abschluss des BSc mit Auszeichnung
Ab 01.03.2012	Masterstudium der Physik an der Universität Wien

Johannes Sequard - Base