

ARWT

AMT FÜR RÜSTUNG UND WEHRTECHNIK



SCHRIFTENREIHE

EXPERIMENTELLE UND THEORETISCHE
UNTERSUCHUNGEN ZUR SCHUSSSTREUUNG
AN KLEINKALIBERSPORTGEWEHREN

DAS WEHRTECHNISCHE
KOMPETENZZENTRUM

BMLVS

EXPERIMENTELLE UND THEORETISCHE
UNTERSUCHUNGEN ZUR SCHUSSSTREUUNG
AN KLEINKALIBERSPORTGEWEHREN

Autoren: Johannes und Peter Sequard-Base

März 2015

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 a test set-up used to investigate experimentally hit results and 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. The impact of the firing pin already generates barrel oscillations. Hence, it is not only the dynamic movement of the projectile itself that produces oscillations; the projectile, rather, moves into a barrel that is also already oscillating. Using ROSSI, data that are helpful to minimize spread e.g. optimal freely-oscillating barrel length (mount of barrel), can be derived as a consequence.

ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem Versuchsgewehr EVOLUTION liegt ein Kleinkalibersportgewehr vor, das mit einer neuen Art der Systembettung einerseits die Möglichkeit der Minimierung des Einflusses der unvermeidlichen Laufschrägungen auf das Schussbild bietet und andererseits die Resultate von Munitionstests in besserer Weise in die Wettkampfsituation übertragbar macht. Die Arbeit beschreibt einen Aufbau zur experimentellen Untersuchung von Schussbildern und einiger weiterer das Schussbild wesentlich beeinflussender Parameter. Experimentell werden Laufschrägungen und Schussbilder ermittelt, analysiert und mit dem bei ARWT entwickelten Computersimulationsmodell ROSSI theoretisch interpretiert. Der Aufschlag des Schlagbolzens löst bereits Laufschrägungen aus, sodass die Bewegung des Geschosses nicht nur selbst Schwingungen erzeugt sondern bereits in einen schwingenden Lauf hinein erfolgt. Mit ROSSI werden Angaben zur Minimierung der Schussstreuung wie z.B. die optimale freischwingende Lauflänge (Bettung), abgeleitet.

INHALTSVERZEICHNIS

<i>Punkt</i>	<i>Titel</i>	<i>Seite</i>
1.	Einleitung	5
1.1	Allgemeines	5
1.2	Das Prinzip	5
1.3	Aufgabenstellung	8
2.	Das Versuchsgewehr EVOLUTION	9
2.1	Die Munition	9
2.2	Das KK-Gewehr allgemein	9
2.3	Das Versuchsgewehr EVOLUTION im Speziellen	10
3.	Das Modell ROSSI	13
3.1	Grundgleichung zur Stab/Laufschwingung	13
3.2	Ballistik	19
3.2.1	Innenballistik	19
3.2.2	Außenballistik	21
3.3	Modellfamilie ROSSI	22
4.	Experimenteller Aufbau und Durchführung	25
4.1	Allgemeine Versuchsbeschreibung	25
4.1.1	Der Schießkanal	25
4.1.2	Elementare Messvorrichtung Trefferanzeige	27
4.1.3	Elementare Messvorrichtung Geschwindigkeitsmessung	30
4.1.4	Schiessböcke	31
4.1.5	Randbedingungen für das Schießen	36
4.1.6	Die Messserie	37
4.1.7	Laufschwingungsmessungen	38
4.2	Resultate zu den Laufschwingungen	39
4.2.1	Die Laufschwingungen beim „Versuchsgewehr EVOLUTION“	41
4.2.2	Die Laufschwingungen beim „Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER“	46
4.2.3	Die Laufschwingungen beim Gewehr „ANSCHÜTZ“	51
4.3	Resultate zu den Trefferbildern	57
4.3.1	Prüfung der Verteilung der Trefferkoordinaten	57
4.3.2	Die Trefferbilder	59
4.4	Einfluss der Lauftemperatur auf die v_0 (Schätzung)	71
4.4.1	Energiebilanz eines Kleinkaliberschusses	71
4.4.2	Mittlere Geschoßreibung und Laufterperaturerhöhung	76
5.	Theoretische Berechnungen mit ROSSI	88
5.1	Modellierung der Munition	88
5.1.1	Verwendete Munitionsdaten	88
5.1.2	Das „Konzept der radialen Exzentrizität“	88
5.2	Modellierung der Gewehre	90
5.2.1	Modellierung des Versuchsgewehres EVOLUTION	90

5.2.2	Modellierung des Vergleichsgewehres ANSCHÜTZ	93
5.3	Allgemeine Modelleinstellungen	94
5.3.1	Geometrische Auflösung	95
5.3.2	Schusszahlen	96
5.4	Dynamisches Grundverhalten	99
5.4.1	Versuchsgewehr EVOLUTION	100
5.4.2	Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ	107
5.5	Schussberechnungen	114
5.5.1	Der Einzelschuss	114
5.5.2	Trefferbildsimulation	126
5.6	Theoretisch berechnete Resultate	127
5.6.1	v_0 -Scan	128
5.6.2	v_0 -Scan fein	131
5.6.3	v_0 -Scan mit Störung	131
5.6.4	Bettungstest	133
5.6.5	Einfluss der Laufverlängerung	135
6.	Zusammenfassung und Empfehlungen	138
6.1	Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Resultate	138
6.1.1	Laufschwingungsuntersuchungen	138
6.1.2	Schussbildanalyse	139
6.2	Empfehlungen zum „Versuchsgewehr EVOLUTION“	141
6.3	Anmerkungen für den Großkaliberbereich	142
7.	Literaturverzeichnis	143
	Danksagung	144
	Die Autoren	145

1. Einleitung

1.1 Allgemeines

In Wahrnehmung seiner Aufgabe zur Beobachtung der neuesten Entwicklungen im Bereich Waffen und Munition hat das Amt für Rüstung und Wehrtechnik (ARWT), Abteilung Waffen- und Flugkörpertechnik (WFT), einen neuen, innovativen Ansatz zur Bettung eines Gewehrsystems im Schaft näher untersucht. Der Kerngedanke besteht hier darin, durch eine variabel positionierbare Bettung den Einfluss der unvermeidlichen Schwingungen eines Gewehrlaufes beim Schuss zu minimieren. Damit einhergehend kommt es zu einer mitunter deutlichen Verbesserung der Schussgenauigkeit.

Die besten Schießleistungen werden im rein militärischen Bereich von den Scharfschützen erbracht, während am gemeinsamen militärisch-zivilen Feld die Sportschützen die höchste Schießpraxis und Schieß Erfahrung, gekoppelt mit den besten Leistungen, aufweisen können. Die Idee zu diesem innovativen Bettungsansatz ist daher von Vzlt Alfred TAUBER entwickelt worden, dem Bundestrainer Großkaliber des österreichischen Schützenbundes und Kommandant des Bundesheerschützenkaders „Gewehr“ vom Heeresleistungssportzentrum. Um das Prinzip detailliert und kostengünstig untersuchen zu können, liegt die technische Realisierung derzeit auf der Basis eines Kleinkaliber Sportgewehres vor. Die Bezeichnung dieses neuen Sportgewehres lautet EVOLUTION und wird im vorliegenden Bericht als „Versuchsgewehr EVOLUTION“ benannt.

Einer der Autoren dieses Berichtes, Johannes SEQUARD-BASE, ist einerseits selbst erfolgreicher Sportschütze und hat andererseits Physik an der Universität Wien studiert. Damit war es nahe liegend, Teile der vorliegenden Untersuchung von ihm im Rahmen seiner Bachelor- bzw. Masterarbeit durchführen zu lassen. Das ARWT hat dazu die Infrastruktur (Messmittel, Schießkanal, etc.) im Zuge eines sogenannten „Verwaltungspraktikums“ zur Verfügung gestellt, sowie personell das Projekt seitens des Bereiches „Waffen- und Munitionstechnik“ betreut.

Im gegenständlichen Bericht werden große Teile aus der Bachelorarbeit [1] und der Masterarbeit [2] von Johannes SEQUARD-BASE wiedergegeben. Daher werden im Folgenden die beiden Arbeiten *nicht* mehr explizit zitiert.

1.2 Das Prinzip

Betrachtet man ein Gewehr, so werden unter dem Begriff „System“ alle für die unmittelbare Schussentwicklung erforderlichen Teile wie Lauf, Patronenlager, Verschluss und Schlagbolzen, verstanden. Details dazu später in Kapitel 2 bei der Beschreibung des Versuchsgewehres EVOLUTION. Das System muss nun mit dem Schaft verbunden werden. Diese Verbindung wird hier als Bettung bezeichnet und erfolgt im klassischen Gewehrbau für Einzellader meist mit 2 oder 3

„Systemschrauben“ zwischen dem Schaft und dem hinteren Teil des Systems, so dass der Lauf in der Regel frei schwingen kann.

Wenn man mit einem Scharfschützengewehr oder einem Sportgewehr (Jagdgewehre sind im Allgemeinen viel zu ungenau) Spitzenresultate erreichen will, ist abgesehen von einem hervorragendem Schützen, neben der Bauart und der Bauausführung des Gewehres, eine Abstimmung der Munition auf den konkreten, individuell vorliegenden Lauf, erforderlich. Eine teure Munition muss bei einem vielleicht ebenfalls sehr teuren und aufwendigen Gewehr nicht zwangsläufig gute Trefferresultate liefern. Im Kleinkaliber (KK) ist es durchaus möglich, mit „billiger“ Munition hervorragende Trefferleistungen zu erzielen, während mit einer „teuren“ Munition das Gewehr einfach nicht „schießt“. Bedingt durch Fertigungstoleranzen bei der Laufherstellung und dem Grad der Laufabnutzung ergeben sich mit verschiedenen Munitionen und den dort vorliegenden Toleranzen sehr unterschiedliche Resultate. Selbst von einer Munitionssorte (z.B. einem Produkt einer Herstellerfirma) gibt es mitunter große Unterschiede zwischen den verschiedenen Fertigungslosen der Munition. Im KK-Bereich kommen reine Bleigeschoße zur Anwendung. Neben den geometrischen Toleranzen im Geschoßdurchmesser (Kaliber) und Toleranzen in der Geschoßlänge und Form sind kleinste, ja minimale Unterschiede in der Reinheit und Homogenität des Bleis schon sehr entscheidend. Es sei aber an dieser Stelle festgehalten, dass sich diese Unterschiede oft nur in einzelnen Ringen niederschlagen, die aber in einem Wettkampf zwischen Sieg und Niederlage entscheiden. Für einen Gelegenheitsschützen oder Hobbyschützen, auch wenn er „recht gut“ schießt, sind diese Feinheiten sicher nicht erkennbar. Hier geht es um sportliche Höchstleistungen im nationalen und internationalen Spitzenfeld.

Konsequenterweise ist die Auswahl der richtigen Munition von enormer Bedeutung. Diese Auswahl erfolgt dabei in der Praxis so, dass der Schütze mit seinem Gewehr zu einer Munitionsherstellerfirma fährt von der er weiß, dass ein oder wenige bestimmte Produkte im Zuge einer Vorauswahl als vielversprechend erscheinen. Um nun den Schützenfehler ausschließen zu können, wird dann beim Munitionstest das System aus dem Gewehrschaft heraus genommen und meist am hinteren Laufteil in einen Schraubstock/Schießbock gespannt. In einem Schießkanal, um von Wettereinflüssen unabhängig zu sein, werden dann Schussserien von mindestens 10 Schuss mit den verschiedenen Produkten bzw. Fertigungslosen geschossen. Aus dem Vergleich der Trefferbilder wird in der Folge die beste Munition ausgewählt. Dabei ist entscheidend, wie klein der kleinste Kreis ist, der alle Treffer umschließt, der so genannte Trefferkreis. Nun besagt eine alte „Schützenweisheit“, dass ein Gewehr aus der Schulter geschossen andere, oftmals bessere Ergebnisse liefert als aus dem Schraubstock. Diese wiederholt erfahrbare empirische Beobachtung steht im Gegensatz zur allgemeinen Vermutung, dass die Schießergebnisse ohne Schützenfehler aus dem Schraubstock geschossen doch stets besser sein müssten als aus der Schulter, mit,

wenn auch nur kleinen Schützenfehlern. Letztlich bedeutet diese Beobachtung, dass die „Schraubstockergebnisse“ keine verlässlichen Aussagen über die Resultate für das Schießen aus der Schulter liefern. An diesem Punkt setzt der neue Bettungsansatz beim Versuchsgewehr EVOLUTION an. Die Bettung soll eben nicht wie klassisch üblich am hinteren Systemteil (Patronenlager, etc.) erfolgen, sondern analog dem Schraubstock im Bereich des hinteren Laufs.

Die Bettung beim Versuchsgewehr EVOLUTION stellt daher eine Art Nachbildung des Schraubstocks dar, um letztlich mit höherer Zuverlässigkeit die beim Munitionstestschießen erreichten kleinen Streuwerte der ausgewählten bestgeeignetsten Munition auch in einen Wettkampf zu übertragen. Der Lauf wird zwischen zwei halbzylinderförmigen Schalen festgeklemmt. Zusätzlich ist es auch möglich, zwischen den aus Aluminium gefertigten Halbschalen und dem Lauf verschiedene Bettungsmaterialien wie Teflon, Plastik oder Gummi einzufügen. Auch damit kann das Schwingverhalten beeinflusst werden. Die Position wo der Lauf dann festgeklemmt wird, ist in einem gewissen Bereich variabel. Damit soll beim Versuchsgewehr EVOLUTION eine optimale Bettungsposition einstellbar sein.

Mit der Fixierung des Systems an dessen Lauf ist auch eine generelle montagemäßige Translation des Systems nach hinten, bezogen auf den Schaft, verbunden. Schließlich soll die Bettung im Umfeld des Gewehrschwerpunktes ansetzen. Mit der Translation des Systems nach hinten wäre auch eine Verkürzung der Visierlinie zwischen Diopter und Ringkorn (siehe Kapitel 2, Beschreibung des Versuchsgewehres EVOLUTION) verbunden. Eine möglichst lange Visierlinie ist aber für den Schützen sehr nützlich. Aus diesem und anderen Gründen gibt es überkalibrige Laufverlängerungen. Das heißt, es wird der Lauf mit einem in der Länge variabel hergestellten Anbauteil verlängert, wobei der Innendurchmesser größer als das Systemkaliber ist (daher überkalibrig). Diese Laufverlängerungen wirken dreifach: Erstens als Visierlinienverlängerung um zu einer Reduktion der Schützenfehler beizutragen. Zweitens wirkt die Masse der Laufverlängerung dämpfend bezüglich der Laufschwingungen und deren optimierte Masse beziehungsweise Länge hat Relevanz im vorliegenden Bericht. Der dritte Effekt betrifft die Geschoßabgangsbalistik. Im Abgang des Geschoßes von der Mündung und unmittelbar danach ist das Projektil empfindlich gegen externe Windeinflüsse. Die Laufverlängerung dient als Abschirmung von Windeinwirkungen, bis das Geschoß seine maximal mögliche Kreiselstabilität im Flug erreicht hat. Dieser Effekt wird aber im vorliegenden Bericht nicht untersucht.

Zusätzlich zur Innovation mit der Bettung gibt es beim Versuchsgewehr EVOLUTION noch weitere Modifikationen, die für die Handhabung durch den Schützen, speziell im Liegendanschlag, hilfreich sind. Diese Modifikationen werden aber ebenfalls im vorliegenden Bericht nicht weiter

angesprochen, da sie für die Optimierung der Schussleistung über die „Steuerung“ der Laufschwingungen nicht relevant sind.

1.3 Aufgabenstellung

Die Grundaufgabe lautet: Gibt es eine optimale Bettungsposition, ein bevorzugtes Bettungsmaterial (zwischen den klemmenden Halbschalen und dem Lauf) und eine technisch günstige Laufverlängerung. Ein weiterer wesentlicher Aspekt: In welchem v_0 Geschwindigkeitsbereich soll die Munition bezogen auf die Konstruktion „Versuchsgewehr EVOLUTION“ liegen?

Die Vorgehensweise muss sich sowohl auf experimentelle Untersuchungen wie auch auf theoretische Simulationsrechnungen abstützen. 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 verschiedenen Schießböcken aus. Bei den hier getesteten Schießböcken wird das Gewehr als Ganzes montiert und nicht nur das System alleine eingespannt. Das soll eine größere Nähe zur Realität beim Schießen aus der Schulter mit sich bringen. Dabei sollen die verschiedenen Schießbockmodelle auch auf ihre Eignung zum Munitionsvergleichsschießen untersucht werden.
- Messung der v_2 von jedem Schuss und Diskussion der Geschwindigkeitsverteilung. Die Geschosßgeschwindigkeit an der Mündung wäre die v_0 . Diese Geschwindigkeit kann aus messtechnischen Gründen nicht erfasst werden, sodass die Geschwindigkeiten ca. 2 m nach der Mündung gemessen werden (daher v_2).
- Messung und Aufzeichnung der Laufschwingungen mit einem Trägheitssensor an der Laufmündung.
- Durchführung der Messungen:
Im 300m-Schießkanal des ARWT/WFT in Felixdorf auf eine Schussdistanz von 50 m (das entspricht der üblichen KK-Wettkampfdistanz). Die personelle und materielle Beistellung für die direkten Laufschwingungsmessungen erfolgen durch ARWT/OPMT. Bis auf wenige Ausnahmen wird als Standard die Munition R100 der Firma RWS verwendet, wobei mittels Temperaturruhe darauf geachtet werden soll, stets Munition gleicher Temperatur zu verschießen.

Der theoretische Teil stützt sich primär auf das bei ARWT/WFT Referat Systemanalyse entwickelte Computersimulationsmodell ROSSI (siehe Abschnitt 3). Da experimentell nicht alle Variationsmöglichkeiten durchgespielt werden können, wird die Modellierung zuerst an Hand wichtiger Spezialfälle geprüft bzw. adaptiert, um dann via Simulation Tendenzen zur Optimierung des Versuchsgewehres EVOLUTION angeben zu können.

2. Das Versuchsgewehr EVOLUTION

2.1 Die Munition

Die olympischen 50-Meter Schießsport-Disziplinen „Gewehr 60 Schuss liegend“ und der „Dreistellungskampf Gewehr 3 x 40 Schuss“ werden mit Einzellader Repetierbüchsen des Kalibers .22lfb (lfb steht für „lang für Büchsen“ oder in der englischen Bezeichnung .22lr „long rifle“) abgehalten. Die dabei verwendete Patrone ist randbefeuert und beschleunigt ein ca. 2,2 g bis 2,6 g schweres, meist gefettetes Bleigeschoß auf eine Mündungsgeschwindigkeit zwischen 320 m/s und 360 m/s (je nach Fabrikat der Munition und Lauflänge der Waffe) was eine durchschnittliche Mündungsenergie im Bereich um ca. 120 Joule ergibt. Die Projektilmündungsgeschwindigkeit liegt also knapp unter oder über der Schallgrenze in Luft. Diese Munition ist umgangssprachlich als Kleinkaliber (auch kurz KK genannt) bekannt und findet auch im Biathlonsport Verwendung. Es handelt sich um eine Randfeuerpatrone, bei der die Zündung nicht wie bei herkömmlichen Zentralfeuerpatronen über ein im Hülsenboden eingelassenes Zündhütchen erfolgt, sondern über eine in den gefalteten Messingrand am hinteren Hülsenende eingegossenen Zündsatz.



Abb. 2.1: Typische Kleinkaliberpatrone

Dabei fällt die Wirkungslinie des Schlagbolzens nicht exakt mit der Laufseelenachse zusammen, was grundsätzlich zu einem störenden Drehmoment nur durch die Bewegung des Schlagbolzens allein führen kann.

2.2 Das KK-Gewehr allgemein

Das Gewicht der Waffe darf maximal 7,5 kg betragen, wobei man stets bemüht ist, ein möglichst hohes Waffengewicht zu erreichen, um dadurch die körpereigenen Bewegungen merklich zu dämpfen.

Unter dem Begriff „System“ versteht man bei einem Gewehr die zum eigentlichen Schießen notwendigen Teile. Das sind:

- Der Lauf
- Das Patronenlager, jener Raum in dem die Patrone liegt wenn geschossen wird
- Der Verschluss mit dem in ihm mittels Federkraft beweglichen Schlagbolzen

- Die Führung des Verschlusses

Der Schaft ist nicht Teil des Systems und besteht meist aus Holz, Kunststoff oder Aluminium. Er dient zur Aufnahme des Systems, d.h. das System wird im Schaft befestigt, beziehungsweise ist in ihm „gebettet“.

Die Visierung besteht aus einem feststehenden Ringkorn, also aus einem einfachen Kreis mit ca. 3,5 mm Durchmesser, der sich im Korntunnel befindet, der mit Hilfe einer Prismenschiene über der Laufmündung befestigt wird. Auf der Hülsenbrücke befindet sich etwa dort wo die Patrone in das System eingelegt wird ein so genanntes Diopter. Das ist im Wesentlichen ein auf hundertstel Millimeter genau verstellbares ca. 1 mm großes Loch. Der Schütze muss nun beim Zielvorgang den schwarzen Scheibenspiegel (als Scheibenspiegel bezeichnet man den schwarzen Teil der Zielscheibe) im Korn und das Korn (mitsamt Korntunnel) wiederum im Diopter zentrieren. Im Idealfall sieht er also drei konzentrische Kreise in deren Mitte sich die schwarze Kreisscheibe des Scheibenspiegels befindet. Beim Zielvorgang bleiben beide Augen geöffnet um keine ovalen Bilder zu erhalten. Das nichtzielende Auge wird mit einer Blende abgedeckt. Es sei noch betont, dass im ganzen Visiersystem keinerlei den Lichtstrahlengang beeinflussende optische Hilfen eingebaut sein dürfen. Die einzigen zugelassenen Hilfsmittel sind Farb- und Polarisationsfilter.

Der Abzug besteht aus einem sehr fein einstellbaren Druckpunkt-Abzug. Bei langsamer Druckerhöhung auf das „Züngel“ wird es zunächst einen kleinen Weg (Vorzugweg) ohne größere Kraftanstrengung nachgeben. Dann ist ein merklicher Widerstand (der Druckpunkt) spürbar, dessen Größe sich je nach Belieben des Schützen in den meisten Fällen zwischen 20 und 300 Gramm bewegt. Ist das Zielbild perfekt, so verstärkt der Schütze den Druck auf das „Züngel“ bis der Abzug den unter Federkraft stehenden Schlagbolzen freigibt. Er schnellt dann nach vorne und stößt mit einem Stift an den Rand der Patrone, wodurch der Anzündsatz der im Patronenrand eingegossen ist, zündet. Damit erst wird das eigentliche Schiesspulver gezündet und der Schuss bricht.

Es ist dabei äußerst wichtig, nicht bewusst abzuziehen, da das Gewehr in diesem Fall einer Beschleunigung ausgesetzt wäre, welche einen gravierenden Einfluss auf die Trefferlage des Projektils hätte. Ein guter Schütze weiß daher nie, wann der Schuss tatsächlich brechen wird.

2.3 Das Versuchsgewehr EVOLUTION im Speziellen

Wirft man einen Blick auf die Entwicklung der Kleinkalibersportgewehre der letzten 30 Jahre, so beobachtet man oberflächlich gesehen deutliche Unterschiede zwischen einer Büchse aus den 70ern des 20. Jahrhunderts und einer modernen Matchwaffe. Betrachtet man aber diese neuen Sportwaffen genauer, so fällt rasch auf, dass die Verbesserungen hauptsächlich „nur“ in einem ergonomisch besser abstimmbaren Schaft liegen, der enorm viele Verstellmöglichkeiten für den Schützen bietet. An

den Kernelementen des Systems und der Verbindung zwischen System und Schaft hat sich hingegen bei den meisten im Handel befindlichen Waffen fast nichts verändert. Genau hierin liegt einer der entscheidenden Unterschiede zwischen herkömmlichen KK-Sportgewehren und dem Versuchsgewehr EVOLUTION. Bei „normalen“ Waffen wird das System meist durch zwei sogenannte Systemschrauben im Bereich unterhalb des beweglichen Verschlusses mit dem Schaft verbunden. Beim Versuchsgewehr EVOLUTION hingegen wird das System durch ein bis zwei unterschiedlich lange Bettungsschalen (entweder 6 cm oder 10 cm oder beide gemeinsam), die mit verschiedenen Materialien wie Aluminium, Teflon, Gummi usw., ausgekleidet werden können, am Schaft fixiert. Die unteren Halbschalen werden an den Schaft angeschraubt. Die oberen Halbschalen liegen auf dem Lauf und werden durch M3 Schrauben mit einem Anzugsmoment von je 2 Nm mit den unteren Bettungsschalen verschraubt. Der Lauf ist nun zwischen den oberen und unteren Schalen eingeklemmt.

Die Bettungen sind weiters entlang eines Bereiches von ca. 28 cm am Schaft variabel montierbar. Somit ergibt sich eine Vielzahl von möglichen Bettungsvarianten. Der augenscheinlichste Vorteil einer solchen Systembettung gegenüber einem fix verschraubten System liegt darin, die beim Schuss unwillkürlich auftretenden longitudinalen, aber vor allem transversalen Laufschrägungen positiv zu beeinflussen. Eine Optimierung der Bettung (Position und Material) ist wesentlichster Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Diese Laufschrägungen vor allem im Mündungsbereich sind waffentechnisch für die Schussgenauigkeit im höchsten Maße entscheidend, worauf im theoretischen Teil näher eingegangen wird.

Das System des Versuchsgewehres EVOLUTION beruht auf einem herkömmlichen Super Match M1913 System der Firma ANSCHÜTZ im Kaliber .22lfb mit 69 cm Lauflänge.

Eine weitere für die Handhabung durch den Sportschützen markante Verbesserung des Versuchsgewehres EVOLUTION gegenüber herkömmlichen Sportwaffen liegt in der Position des Systems im Schaft. Das gesamte System ist gegenüber herkömmlichen Waffen um ca. 20 cm nach hinten platziert. Mithilfe eines Adapters am Kammerstengel ist es so möglich, das Gewehr sehr bequem im Liegendanschlag zu laden, ohne die Position wechseln zu müssen. Zur Klarstellung sei vermerkt, dass damit die Verschiebung der Position des Systems bezogen auf den Schaft gemeint ist. Das hat nichts mit der oben besprochenen Bettung des Systems, also der Position am System selbst an dem es selbst festgehalten wird, zu tun.

Ein weiteres kleines Detail besteht darin, dass die Visierlinie leicht nach links versetzt ist, was zu einer entspannteren Kopfhaltung des Schützen führt.



Abb. 2.2: Das Versuchsgewehr EVOLUTION. Gut erkennbar das relativ große Überrohr aus Aluminium montiert an der Laufmündung (Lauf in schwarzer Farbe)



Abb. 2.3: Das Versuchsgewehr EVOLUTION.

3. Das Modell ROSSI

Der vorliegende Abschnitt stellt das bei ARWT/WFT Referat Systemanalyse entwickelte Computersimulationsmodell ROSSI vor. ROSSI steht für RohrSchwingsSimulation und ist ein einfaches, in FORTRAN geschriebenes Modell zur Beschreibung von transversalen Schwingungen eines Stabes. Somit ist es auch zur Abbildung von Laufschrwingungen geeignet, 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. Zum Verständnis der Untersuchungen am System EVOLUTION ist der Inhalt dieses Kapitels nicht zwingend erforderlich und kann vom Leser mit weniger mathematisch-physikalischem Interesse übergangen werden.

3.1 Grundgleichung zur Stab- / Laufschrwingung

Aus der Literatur [3] 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 (Ns/m^2)
c_2	Externe Dämpfungskonstante (Ns/m^2)
\bar{F}	Querkraft (N/m); entspricht einem Störterm der die Krafteinwirkungen von „außen“, z.B. die Schwerkraft oder die Geschoßexzentrizitäten abbildet.

Für umfassendere Überlegungen ist auch Harris' „Shock and Vibration Handbook“ [4] geeignet. Der zentrale Term zur Beschreibung der Biegung

ist $E I \frac{\partial^4 y}{\partial x^4}$. Sein Zustandekommen ergibt sich aus $M = \frac{\sigma}{R} I \quad 2$

wobei M das Biegemoment und σ die Zug/Druck-Spannung im Abstand des Stabradius R von der Stabachse sind. $2R$ entspricht dem Stabdurchmesser (an der Position x entlang der Stablängsachse). Aus Gleichung 2 folgt

$$\sigma = \frac{M R}{I} \quad 3$$

In Abbildung 3.1 ist die Krümmung eines gebogenen Stabteiles dargestellt.

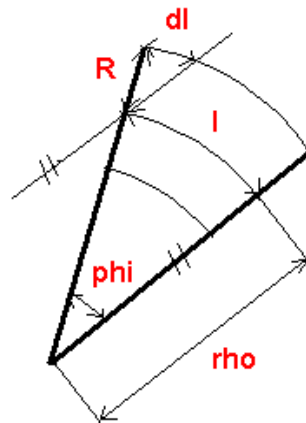


Abb. 3.1: Skizze zur Erläuterung des Biegeterms in der Grundgleichung 1.
Es gilt $dl = \Delta l$ und " ρ " = ρ_K .

Die äußere Faser wird um Δl gegenüber l gedehnt. Aus den gleichen Winkeln folgt

$$\frac{\Delta l}{R} = \frac{l}{\rho_K}$$

mit ρ_K dem Krümmungsradius. Damit erhält man die relative Dehnung ε zu

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{R}{\rho_K} = \varepsilon$$

Mit

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

für den Hook'schen Bereich ergibt sich

$$\frac{R}{\rho_K} = \frac{\sigma}{E} \quad 4$$

wobei σ wieder für die äußere Faser gilt. Gleichung 3 in Gleichung 4 eingesetzt liefert:

$$M = EI \frac{1}{\rho_K} \quad 5$$

Die Krümmung einer Kurve wird über die 2. Ableitung der Kurvenform bezüglich der Längsachse ermittelt, wie aus elementaren Kurvendiskussionen bekannt ist. Der Kehrwert des Betrags der Krümmung ist der Krümmungsradius ρ_K , das heißt

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \left| \frac{1}{\rho_K} \right|$$

Damit wird Gleichung 5 zu

$$M = EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad 6$$

Nun gilt zu berücksichtigen, dass Gleichung 1 eine Gleichung von Querkraften darstellt. Es sei F eine auf den Stab/Lauf transversal wirkende Kraft. Die Querkraft ist nun als Kraft pro Längeneinheit definiert, das heißt

$$\overline{F} = \frac{\partial F}{\partial x} \quad 7$$

Da das Moment M elementar zu

$$M = xF \quad 8$$

feststeht und das Biegemoment pro Längeneinheit mit

$$\frac{\partial M}{\partial x} = F \quad 9$$

vorliegt, ergibt die Kombination von Gleichung 9 mit Gleichung 7

$$\bar{F} = \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}$$

10

Setzt man nun Gleichung 6 in Gleichung 10 ein, ergibt sich mit

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4}$$

der erste und bedeutendste Term für die Biegeschwingungen in Gleichung 1.

Der zweite Term in der Grundgleichung lautet

$$c_1 I \frac{\partial^5 y}{\partial x^4 \partial t}$$

und beschreibt die interne Dämpfung. Hat im ersten Term E die Rolle einer Federkonstanten, so übernimmt im 2. Term c_1 den Dämpfungskoeffizient. Dämpfungen bzw. Reibungskräfte sind geschwindigkeitsabhängig und daher folgt auch hier die zusätzliche Zeitableitung. Um die elementare Form von Gleichung 1 zu komplettieren, bildet der rechte – letzte – Term der linken Gleichungsseite, nämlich

$$\rho S \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

den Trägheitsterm, wie er in jeder Bewegungsgleichung vorkommen muss. Um nun den Einfluss von Einspannungen des Stabes zu berücksichtigen, kann mit

$$k y$$

eine „Federkraft“ und mit

$$c_2 \frac{\partial y}{\partial t}$$

eine dieser „Feder“ zugeordnete Schwingungsdämpfung beschrieben werden. Da die Einspannung bzw. Bettung des Laufes mit diesem stets verbunden ist und daher die Kombination Lauf plus Bettung als ein mathematisches System angesehen wird, wäre bei $\bar{F} = \bar{F}(x, t) = 0$ auf der rechten Seite von Gleichung 1 diese in ihrer homogenen Form komplett. Alle Bettungen wie sie im vorliegenden Bericht mit ROSSI behandelt werden, werden mit c_2 und vor allem mit k auf ihrer jeweiligen Länge

entlang der Laufachse, berechnet. Das heißt, für jene Bereiche des Laufes die sich in einer Bettung befinden sind $k \neq 0$ und $c_2 \neq 0$. Diese Beschreibung der Bettung bedeutet aber auch, dass sich die Bettungsmaterialien (z.B. Teflon, etc.) im Hook'schen Bereich, also im Proportionalbereich bezüglich Spannung und Dehnung befinden müssen. Ob diese Annahmen/Einschränkungen auch in der Realität so vorliegen, konnte nicht geprüft werden. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass für sehr kleine Auslenkungen (μm - Bereich) wie sie hier vorliegen, diese Annahmen zutreffen.

Einwirkungen von außen, z.B. transversale Geschoßkräfte (Fliehkräfte) auf den Lauf, verursacht durch eine exzentrische Lage des Geschoßmittelpunktes bezüglich der Laufachse und als Folge des Geschoßdralles, werden mit $\bar{F} = \bar{F}(x, t)$ auf der rechten Gleichungsseite beschrieben. Hat das Geschoß den Lauf verlassen, ist $\bar{F} = \bar{F}(x, t) = 0$ und Gleichung 1 beschreibt eine gedämpfte Eigenschwingung.

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 Gleichung 1 berechnet.

Für die Randbedingungen gelten folgende Festlegungen. Der Stab/Lauf hat stets 2 freie Enden. Es kann zwar mit ROSSI eine Fixeinspannung an einem Ende mit stets $y(0) = 0$ und $\frac{dy(0)}{dt} = 0$ gerechnet werden, jedoch

werden bei allen Berechnungen in diesem Bericht beide Enden als frei betrachtet. 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. Nähere Daten zu den Diskretisierungsschrittweiten der unabhängig Veränderlichen x und t , siehe später in den Kapiteln 5.3.1 und 5.5.1. Der Stab/Lauf wird also in Richtung der Längsachse in kleine Abschnitte Δx geteilt. Da räumlich nur in der x -Achse in Segmente Δx unterteilt wird, kann bei ROSSI eigentlich nicht von einem Finite Elemente Modell gesprochen werden sondern bestenfalls von einem eindimensionalen FE-Modell.

Digitalisierungseffekt:

Eine weitere wichtige mit der Diskretisierung verbundene Maßnahme ist, dass analog zum Term $c_2 \frac{\partial y(x)}{\partial t}$ ein Term $c_3 \frac{\partial y(x)}{\partial t}$ in Gleichung 1 eingebaut wird. Der Wert des Dämpfungsfaktors c_3 ist für alle Laufsegmente konstant und bleibt letztlich für alle Berechnungen stets unverändert. Die Berechnung der Auslenkung y in Zeitschritten Δt , bringt nämlich folgenden Effekt unvermeidbar mit sich. Beim Fortschreiten um eine Schrittweite ∂y weg von der Achse, das heißt in die der Veränderung des Laufes Widerstand bietende Kraft „hinein“ kann beziehungsweise wird der „Endpunkt,“ also der Umkehrpunkt dieser Bewegung, nicht exakt „getroffen“ werden. So lange die kinetische Energie des Laufsegments noch höher ist als die potentielle Energie, die im „federnden“ Stab/Lauf bei dieser aktuellen Auslenkung steckt, wird ein nächster Schritt in Auslenkungsrichtung berechnet. Dann passiert es aber, dass dieser Gleichgewichtspunkt (maximale Amplitude) zwischen kinetischer und potentieller Energie überschritten wird. Der nächste Zeitschritt leitet selbstverständlich die „Rückschwingung“ ein, geht aber von einer potentiellen „Federenergie“ des Stabes/Laufes aus, die eigentlich höher ist als tatsächlich vorhanden. Dieser Effekt führt mit der Zeit dazu, dass die Rechnung „explodiert“, da bei jedem Umkehrpunkt der Schwingbewegung ein kleiner Energiebetrag „zugeführt“ wird. Abhilfe schafft eine zusätzliche Dämpfung, hier die Dämpfung c_3 , die sonst keinen physikalischen Hintergrund hat und somit in Gleichung 3.1 nicht in Erscheinung tritt, sondern den erwähnten Digitalisierungseffekt ausgleicht. Da der Zeitschritt immer konstant bleibt, reicht eine stets konstante Dämpfung auf allen Laufsegmenten aus.

Anmerkung:

Prinzipiell wäre es auch möglich, diese modelltechnisch bedingte Dämpfung auch mit c_1 abzudecken, da dieser interne Dämpfungsfaktor auch auf alle Segmente wirkt und für alle Segmente gleich ist. Es wird aber davon Abstand genommen, um physikalisch reale Dämpfungen wie c_1 nicht mit „Hilfsmitteln“ der Modellierung zu vermischen.

Einleitung von externen Querkräften:

Folgende auf jedes Segment Δx nach Gleichung 1 einwirkende Querkräfte $\bar{F} = \bar{F}(x, t)$ können mit ROSSI abgebildet werden:

- Die radiale Geschoßexzentrizität bewirkt am sich um seine Längsachse im Lauf rotierenden Geschoß eine Zentrifugalkraft. Diese Kraft wird in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Geschoßes im Lauf für jeden Zeitschritt berechnet und entsprechend des aktuellen Rollwinkels auf die vertikale und horizontale Ebene verteilt. Diese Zentrifugalkraft wird als Querkraft $\bar{F} = \bar{F}(x, t)$ nach Gleichung 1 nur immer in dem Segment wirksam, in dem sich das Geschoß gerade befindet.

- Es ist in ROSSI auch möglich die Stab/Lauf-Biegung unter dem Einfluss der Schwerkraft zu berechnen. In diesem Fall erfährt jedes Segment entsprechend seiner Masse eine Querkraft. Für die vorliegenden Berechnungen wird diese Option aber nicht verwendet, da modelltechnisch die Anfangsbedingungen für alle Segmente stets $y = 0$ und $\frac{dy}{dt} = 0$ sind. Das heißt, mit Rechenbeginn sinken die Segmente unter dem Eindruck der Schwerkraft ab und es ist dann stets eine nicht unbeträchtliche Rechenzeit zu veranschlagen, bis der Stab/Lauf den Einschwingprozess beendet hat und die Biegung durch Schwerkraft erreicht wird.
- Die Bettung des modellierten Systems ist selbst „gelagert“. Diese „Lagerung“ wird mit 3 harmonischen Oszillatoren dargestellt. Damit soll der Schütze abgebildet werden. In der Laufachse wird ein translatorischer Oszillator für die „Rückstoßschwingung“ verwendet. In der vertikalen Ebene und der horizontalen Ebene arbeitet je eine Drehschwingung. Jeder Oszillator wird mit einer Federkonstanten und einem Dämpfungsfaktor bestimmt. Das heißt, der Schütze ist mit 6 Parametern zu charakterisieren. Die „Störterme“ dieser Oszillatoren (lineare inhomogene Differentialgleichung 2. Ordnung) werden aus der Rückstoßkraft (Innenballistik) beim translatorischen Oszillator und aus den durch die Rückstoßkraft folgenden Drehmomenten ermittelt. Die Abstände und Drehpunkte werden eingabeseitig festgelegt. Das Verhalten des Schützen wird, während sich das Geschoß im Lauf befindet, durch erzwungene Schwingungen modelliert. Die aus den Drehschwingungen resultierenden Trägheitskräfte auf den Lauf werden ebenso pro Segment als $\bar{F} = \bar{F}(x, t)$ in die Gleichung 1 eingeleitet.

3.2 Ballistik

3.2.1 Innenballistik

Die in ROSSI verwendete Innenballistik ist einfach aufgebaut. Ihre Grundlagen werden dem Rheinmetall Taschenbuch [5] entnommen. Ausgangspunkt ist die Energiebilanz (Resalgleichung)

$$m_{c0} \cdot Q = c_v \cdot m_{c0} \cdot T + \frac{m^*}{2} v_G^2 \quad 11$$

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.

Aus der Gasgleichung

$$p V = m_{c0} Z R T$$

mit

p	Gasdruck
R	Gaskonstante; es wird $R_{Luft} = 287 J / kg K$ verwendet, folgt

$$m_{c0} Z T = \frac{p V}{R} \quad 12$$

Weiters gilt

$$\frac{c_v}{R} = \frac{1}{\kappa - 1} \quad 13$$

mit $\kappa = 1.3$ nach Rheinmetall Taschenbuch [5] für Pulvergase. Für das Volumen des Gasraumes V gilt nach [5] mit

$$V = V_p - \frac{m_{c0}}{\rho_c} + A_K x \quad 14$$

V_p	Patronenvolumen, Volumen zwischen Geschoßboden und Zündsatz bzw. Zündhütchen (m^3)
ρ_c	Pulverdichte (kg / m^3)
A_K	Laufinnenquerschnitt (m^2)
x	Aktuelle Position des Geschoßes im Lauf (m)

Der Pulverabbrand wird nach dem linearen Ansatz nach Krupp-Schmitz [5] in vereinfachter Weise behandelt. Es gilt

$$\frac{dZ}{dt} = \varphi(Z) B \frac{p}{p_0} \quad 15$$

p_0 Atmosphärendruck

$\varphi(Z) = \sqrt{1 + aZ}$ die Formfunktion mit

$a > 0$ progressiver Abbrand; $a < 0$ degressiver Abbrand

B Abbrandkoeffizient zu

$$B = \frac{\rho_c A_0 \beta}{m_{c0}}$$

wobei

A_0 die anfänglich vorhandene Abbrandoberfläche des Pulvers und

β ein schwach druckabhängiger empirischer Koeffizient

sind.

Für den Fall $p < p_0$ wird in Gleichung 15 $p = p_0$ gesetzt, da sonst der Abbrand nicht in Gang kommen würde. Diese Näherung ist bei Maximalgasdrücken von einigen 100 bar nicht relevant und betrifft letztlich nur das Druck-Zeit-Verhalten bis $p = p_0$. Mit Gleichung 15 wird Z berechnet.

Aus den Gleichungen 11, 12, 13 und 14 ergibt sich dann der aktuelle Gasdruck p zu

$$p = \frac{(\kappa - 1) \left(m_{c0} Z Q - \frac{m^*}{2} v_G^2 \right)}{V_p - \frac{m_{c0}}{\rho} + A_K x} \quad 16$$

Über das Produkt aus dem Gasdruck und dem Laufinnenquerschnitt (= Geschoßquerschnitt) erhält man die Kraft auf den Geschoßboden. Das Geschoß setzt sich erst in Bewegung wenn

$$p A_K \geq K_{aus}$$

ist, das heißt wenn der Auszieh Widerstand K_{aus} überschritten wird. Die Berechnung der Geschoßbewegung (die Translation und der Drall) erfolgt dann durch ein- bzw. zweimalige Integration der Bewegungsgleichungen. Die Angabe eines Einpresswiderstandes sowie einer Reibung im Lauf komplettieren die einfache Innenballistik in ROSSI.

3.2.2 Außenballistik

Das Unterprogramm zur Berechnung der Außenballistik ist eine für den Geschoßflug 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 Lösung der Bewegungsgleichungen für die Rotations- und Translationsbewegungen erfolgt analytisch unter Verwendung eines sehr kleinen Zeitschrittes ($\Delta t = 1 \mu s$). Digitalisierungseffekte wie in Kapitel 3.1 beschrieben treten hier nicht auf, da keine aufwendigen Potentiale wirksam werden. Die Schwerkraft wird als einfacher konstanter Beschleunigungsvektor ($|g| = 9.81 m/s^2$) als einzige Auswirkung eines äußeren Potentials verwendet.

Die aerodynamischen Parameter des Geschoßes werden mit dem in den USA gekauften Modell namens 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 leider nicht möglich. Ebenso sind abgangsbalistische Effekte mit ROSSI nicht modellierbar.

3.3 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/Laubschrägungen werden die Bewegungen der Laufsegmente auch grafisch dargestellt. Damit lassen sich nicht nur die reinen Stab/Laubschrägungen bezogen auf die Laufachse grafisch erkennen, sondern auch die Bewegungen des Stabes/Laufes durch die „Schützenbewegungen“. Eingegeben werden die:

- Geometriedaten des Stabes/Laufes
- Die 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.

Anmerkungen zu den Geometrieingabedaten:

Es können maximal 4 Abschnitte mit zylindrischen Innendurchmessern modelliert werden. Der Außendurchmesser des Stabes/Laufes kann in 5 Abschnitten beschrieben werden, die auch – näherungsweise – konisch geformt sein können. Konisch bedeutet, dass der Außendurchmesser von Segment zu Segment variabel ist, aber auf der Länge eines einzelnen Segmentes konstant bleibt („treppenförmig“).

ROG

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

- Auslenkung und Geschwindigkeit der Auslenkung an einer vor dem Start von ROSSI festgelegten Stab/Lauf-Längsposition als Funktion der Zeit
- Den Winkel den die beiden letzten Laufsegmente bei der Mündung gegenüber der Horizontalen einnehmen als Funktion der Zeit
- Druck und Temperatur als Funktion der Zeit wie auch in Abhängigkeit von der Geschosßposition im Lauf, solange das Geschosß den Lauf nicht verlassen hat
- Geschosßgeschwindigkeit und Abbrandverhältnis Z
- Vertikaler Verlauf der außenballistischen Geschosßflugbahn als Funktion der horizontalen Geschosßposition im Flug

ROST

ROST ist das zweite Schlüsselprogramm der Modellfamilie ROSSI. Es dient zur Simulation von Trefferbildern. Daher die Bezeichnung ROST für ROSSI Statistik. Kernstück ist das Programm ROSSI als Unterprogramm SRROSSI für das die Eingaben analog zum Programm ROSSI erforderlich sind.

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

Gleichverteilt:

- Startrollwinkel der radialen Geschosßexzentrizität
- 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
- 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

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 die wichtigsten Schnittstellen zwischen der Praxis und der Theorie. Dementsprechend ist ROST eines der „stärksten“ Programme der Modellfamilie ROSSI.

DFT

DFT steht für „Diskrete Fourier Transformation“ und ist ein Modul mit dessen Hilfe aus den Ausgabedaten von ROSSI das Frequenzspektrum eines Stabes/Laufes ermittelt werden kann. Diese Werte lassen sich dann mit experimentellen Schwingungsdaten vergleichen. So kann die Qualität der geometrischen Modellierung eines Stabes/Laufes, die ein wichtiges Eingabefeld für ROSSI darstellt, genauer beurteilt werden.

4. Experimenteller Aufbau und Durchführung

4.1 Allgemeine Versuchsbeschreibung

Alle Messungen am Versuchsgewehr EVOLUTION werden im 300 m Schießkanal des Amtes für Rüstung und Wehrtechnik, Abteilung Waffen- und Flugkörpertechnik im Referat „Leichte Waffen“ in Felixdorf durchgeführt. Die Arbeiten erfolgen im Jahr 2010 in den Kalenderwochen 27 bis 30.

4.1.1 Der Schießkanal

Ein Schießkanal ist erforderlich um die Messungen unabhängig von äußeren Wettereinflüssen ausführen zu können. Der Kanal ist hier ein oberirdisch gebautes etwas mehr als 300 m langes, fensterloses Gebäude. Der Innenquerschnitt ist rechteckig mit in Schussrichtung leicht zunehmender Querschnittsfläche. Damit wird dem steigenden Platzbedarf einer ballistischen Flugbahn mit zunehmender Schussweite Rechnung getragen. Der Boden besteht aus einer dünnen Asphaltsschicht. Das Ende des Kanals bildet ein Kugelfang aus einem bis zur Decke aufgeschütteten Kunststoffgranulat. Am Anfang des Kanals befindet sich der so genannte Expansionsraum von dem aus auch geschossen werden kann, beziehungsweise wo diverse Messgeräte aufgebaut werden können. Der Kanal selbst besitzt eine Belüftung und Beleuchtung sowie für den regulären Testbetrieb mit Großkaliberwaffen alle 100 m in den Kanal einschiebbare akustische Trefferanzeigesysteme. Unmittelbar an den 300 m Kanal ist parallel und bis auf die Länge baugleich, ein 500 m Schießkanal gebaut. Beide Kanäle benützen den gleichen Expansionsraum.



Abb. 4.1: Blick vom eingespannten Versuchsgewehr EVOLUTION (Vordergrund) durch den Messrahmen für die Geschwindigkeitsmessanlage (hier schwarze Rahmenkonstruktion mit dem vorderen und hintern Lichtschranken) in den 300m Schießkanal.



Abb. 4.2: Der Expansionsraum mit einem weiteren Geschwindigkeitsmessrahmen. Links der Beginn des 300 m Kanals und rechts, beleuchtet, der Anfang des 500 m Schiesskanals.

4.1.2 Elementare Messvorrichtung Trefferanzeige

Da das Versuchsgewehr EVOLUTION KK-Munition verschießt die teilweise im Unterschallbereich fliegt, scheiden akustische Systeme zur Trefferanzeige aus. Diese Messsysteme nützen nämlich die Kopfwelle eines im Überschall fliegenden Geschosses zur Ortung der Position im Vorbeiflug mittels vierer Mikrofone. Bei Unterschallmunition kann aber der Abschusssknall beim Gewehr das fliegende Geschosß überholen und dann zu Fehlanzeigen führen. Daher wird ein elektronisches Trefferanzeigesystem auf Laserbasis verwendet.

Ein solches Gerät wird freundlicherweise von der Firma MEYTON auf Leihbasis für diese Versuche zur Verfügung gestellt. Dieses Gerät ist eine Standardausführung wie sie die Firma MEYTON vielfach bei Sportschützenvereinen auf den Schießbahnen zur Trefferanzeige und Auswertung installiert. Im „Normalbetrieb“ in einem Schützenverein werden die grafische Trefferdarstellung sowie die daraus berechnete Ringzahl ausgewiesen. Als Beurteilungsmaß für die Trefferverteilung wird der „Kleinste Trefferkreis“ (siehe später in Kap. 4.1.6) bereitgestellt. Dieses Anzeigeformat ist aber für die in diesen Versuchen erforderliche Interpretation der Trefferergebnisse nicht geeignet. Die Anlage bietet jedoch auch die Möglichkeit, die Trefferkoordinaten (X- Y-Werte) direkt zu dokumentieren. Diese Option wird nun im Speziellen benützt. Ein Mitarbeiter der Firma MEYTON hat an einem Tag die Anlage im Schiesskanal aufgebaut, sowie eine Einweisung in die Bedienung und die hier spezielle Datenaufbereitung, Ausgabeformen und Prüfverfahren der Anlage gegeben.

Der Messrahmen dieses Gerätes wird bei der 100 m Marke des 300 m Kanals aufgestellt. Da die Schussdistanz 50 m betragen soll müssen das Gewehr sowie alle anderen zur Datenerfassung erforderlichen Einrichtungen „mitten im Kanal“ bei 50 m aufgebaut werden.

Die Abb. 4.3 und 4.4 zeigen den so genannten Messrahmen im Ziel beziehungsweise den Aufbau der Auswerteeinrichtungen neben dem Schießbock.

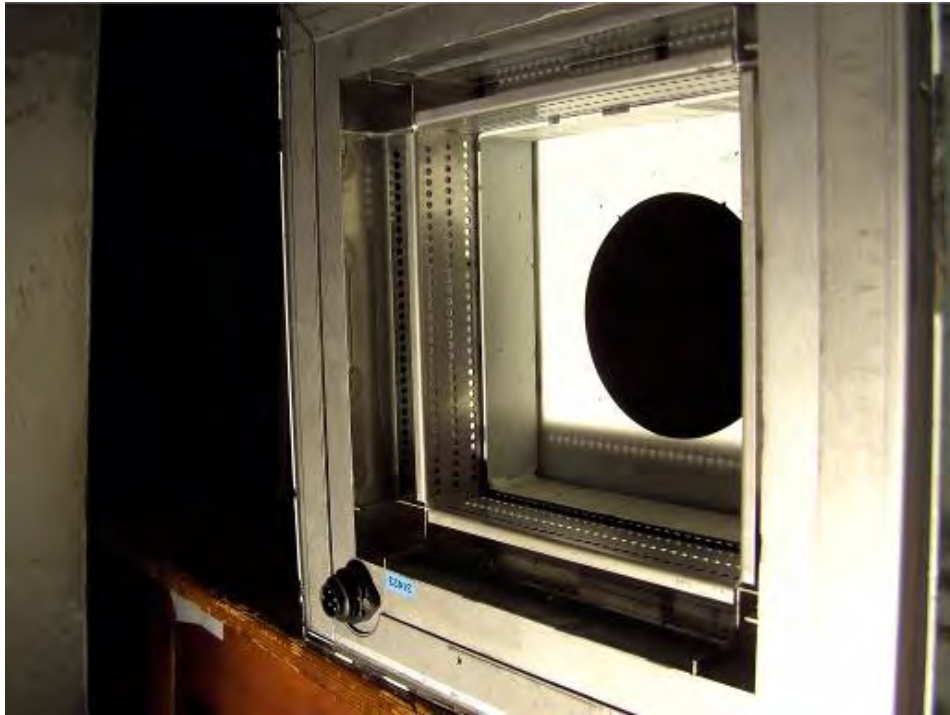


Abb. 4.3: Rückseite des Messrahmens der MEYTON Anlage durch den die Geschosse durchfliegen müssen. Erkennbar ist der dreireihige Aufbau der Lochblenden hinter denen in ca. 1 cm Abstand die Sende- und Empfängerdioden, jeweils gegenüberliegend, eingebaut sind. Die seitliche Versetzung der Lochblendenreihen ist ebenso erkennbar. Die weiße Folie mit dem kreisrunden Loch bildet die Vorderseite des Messrahmens. Das Loch entspricht der Scheibe auf die visiert wird.



Abb. 4.4: Die Auswerteeinrichtungen. Die MEYTON Anlage, bestehend aus einem Signalprozessor (hier nicht sichtbar) mit angeschlossenem PC (Mitte), dem Bildschirm für den Schützen (rechter Bildschirm) sowie dem speziellen Bedienpult für den Schützen (kleines Kästchen bei der Sessellehne links neben dem Gehörschutzbügel). Links im Vordergrund ist die Elektronik (mit herunter geklapptem Tastaturfeld) der Geschwindigkeitsmessanlage der Firma AVL zu sehen.

Prinzip der Koordinatenvermessung

Die Innenabmessungen des Messrahmens betragen 18 x 18 cm. Pro Koordinate sind in 3 Reihen je 32 Sende- Empfängerdiodenpaare angeordnet. Wie aus Abb. 4.3 ersichtlich sind die drei Reihen zueinander etwas versetzt. Die Laserdioden emittieren eine Art von „Laservorhang“. Ein Projektil das diesen Vorhang durchfliegt erzeugt einen Schatten, der von den Empfängerdioden detektiert wird, die den Sendern gegenüberliegen. Die Auflösung pro Koordinate ergäbe sich somit zu

$$\frac{180\text{mm}}{3 \times 32} = 1.875\text{mm}$$

Um nun die Auflösung zu steigern wird das analoge Signal an den Empfängerdioden bei der Analog-Digital-Umsetzung in 165 Einheiten unterteilt. Dadurch können Teilabschattungen eines Detektors quantifiziert werden was zu einer Verbesserung der

endgültigen Auflösung von 0,011 mm

führt. Wird nun in Betracht gezogen, dass das Geschöß bei der Passage des Laservorhangs von den Lasern beleuchtet wird, muss mit diffusen bis spekularen Reflexionen von Laserlicht am Geschöß gerechnet werden. Angenommen die horizontale Koordinate wird vermessen. Das geschieht mit dem vertikalen Laservorhang. Gleichzeitig wirkt aber auch der horizontale Laservorhang. Die beiden Vorhänge sind nicht zueinander in Schussrichtung versetzt. Das bedeutet, dass das horizontal auf das Geschöß treffende Laserlicht, wenn auch nur in geringem Umfang, zu den Detektoren des vertikalen Vorhangs reflektiert wird. Damit wird der Messung der horizontalen Koordinate ein kleineres Kaliber des Projektils vorgetäuscht. Die geometrische Abschattung auf der Seite des horizontalen Laserlicheinfalls wird etwas reduziert. Da der Koordinatenwert (in diesem Beispiel die horizontale Koordinate) der Mittelpunkt der Abschattung ist, rückt der gemessene Koordinatenwert um die Hälfte der scheinbaren Abschattungsreduktion auf die Gegenseite des einfallenden horizontalen Störlaserlichts. Dieser Effekt wirkt sich umso stärker aus, je näher das Projektil bei den Empfängerdiode-reihen vorbei fliegt. Das ist mit ein Grund für den relativ weiten Abstand zwischen den Lochblenden und den Dioden die ja gegenüber den Lochblenden um ca. 1 cm nach außen, also in den Messrahmen hinein, versetzt sind. Für den Extremfall einer Projektilpassage knapp an der Messrahmeninnenseite auf der Seite der Detektoren ergibt sich eine

Messgenauigkeit von mindestens 0,1 mm

Je größer der Abstand des vorbei fliegenden Projektils von den Empfängerdiode-n ist, desto weniger Streulicht kann aus geometrischen Gründen auf die Empfängerdiode-n fallen.

Eine Messgenauigkeit für die Bestimmung der Trefferposition von mindestens 0,1 mm wird für die hier durchgeführten Versuche als ausreichend angesehen.

4.1.3 Elementare Messvorrichtung Geschwindigkeitsmessung

Als weiteres wichtiges Messsystem steht eine Geschwindigkeitsmess-vorrichtung auf der Basis eines Lichtschrankenverfahrens zur Verfügung. Das Gerät B212, ein Produkt der Firma AVL, ist Teil der messtechnischen Ausstattung der Abt WFT des ARWT. In Abb. 4.1 ist der Messrahmen ersichtlich. An den vorderen und hinteren vertikalen Streben sind die Laserschienen für die beiden Lichtschranken zu erkennen. Die Messstrecke, die der Rahmen vorgibt, beträgt 2 Meter. Bei der hier für diese Versuche gewählten Aufstellung des Rahmens wird die mittlere Geschößgeschwindigkeit im Bereich zwischen 1 m und 3 m vor der Mündung gemessen. Dieser Wert kann näherungsweise als V_2 betrachtet werden. Es wäre nicht sinnvoll den ersten Lichtschranken noch näher an die Mündung zu bringen, da durch voreilende Gase und Pulverrückstände eventuell Fehlmessungen ausgelöst werden könnten. Die Auswerte- und

Anzeigeelektronik ist in Abb. 4.4 ersichtlich. Die Geschwindigkeit kann nach vorliegender Geräteangabe auf 0,1 m/s genau gemessen werden.

4.1.4 Schießböcke

Um möglichst reproduzierbare Resultate zu erzielen, wird das Versuchsgewehr in einen Schießbock eingespannt. Im Zuge der durchgeführten Experimente werden mehrere verschieden gebaute Schießböcke getestet. Als Standardschießbock hat sich ein Bock aus dem Bestand des Heeresleistungssportzentrums (HLSZ) „etabliert“. Dieser Bock wird vom HLSZ für die Dauer der Versuche freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Die Verbindung zwischen dem Gewehr und dem Bock stellt eine T-Schiene im Bock dar, die in die entsprechende Ausfräsung am Vorderschaft des Versuchsgewehres geschoben wird. Um diese Anordnung zu fixieren wird die Schiene im Bock nach hinten (und damit auch nach unten) geschraubt, wodurch das Gewehr an den Bock gepresst wird. Diese Verbindung ist äußerst sicher in Bezug auf ein Verrutschen der Waffe beim Schuss. Um die Waffe auf das Ziel ausrichten zu können, ist der Kopf des Bockes in der horizontalen und vertikalen Ebene mit zwei Gewindestangen justierbar.



Abb. 4.5: Das Versuchsgewehr EVOLUTION eingespannt in den „Standardbock“ des HLSZ. Erkennbar ist auch die Holzplatte auf der der Bock steht.

Ein gewisses Problem, das sich beim Schießen aus gewöhnlichen Böcken ergibt ist, dass diese normalerweise nahezu absolut starr sind und beim Schuss nicht wie die menschliche Schulter etwas nachgeben. Das kann natürlich das Schwingungsverhalten des Gewehrlaufes und damit das

Trefferbild verändern, weshalb der Schießbock des HLSZ über eine eingebaute Hydraulik verfügt, die es dem Gewehr ermöglicht, je nach Rückstoßimpuls sich nach hinten zu bewegen. Da diese Vorrichtung allerdings für das Schießen mit Großkalibergewehren ausgelegt ist, kann beim Kaliber .22lr mit keiner merklichen Bewegung der Waffe gerechnet werden, sodass der Bock hier jetzt als nahezu absolut starr anzusetzen wäre. Andererseits ist von vorneherein der Rückstoß bei einem KK-Gewehr so schwach, dass auch die „federnde“ Schulter nicht den großen Einfluss auf das Lauschwungsverhalten, speziell während der entscheidenden Phase der Schussentwicklung, haben dürfte.



Abb. 4.6: Die hydraulischen Rückstoßdämpfer des HLSZ-Bocks. In der Abbildung ist auch erkennbar, dass vom Versuchsgewehr EVOLUTION einige Bauteile, wie z.B. der Abzug, die Schaftkappe und die Backe, abmontiert sind, um einen rascheren Bettungsumbau zu ermöglichen.

Der HLSZ-Bock wird an einer ca. 5 cm dicken, ca. 1 m² großen Holzplatte angeschraubt, die auf dem Asphaltboden des Schießkanals liegt. Da der Schießbock normalerweise beim HLSZ mit einem einbetonierten Stahlsockel verschraubt wird, ergeben sich mit der oben erwähnten Aufstellung durchaus mögliche Fehlerquellen. So könnte der Bock auf der Holzplatte beim Schuss leicht mitschwingen, beziehungsweise die Platte am Asphaltboden „wackeln“. Die Holzplatte ist zwar einerseits billig, schnell und leicht herzustellen und gleicht kleine Unebenheiten des Asphalttes aus. Das Problem liegt jedoch in ihrer Elastizität. Um deren Einfluss zu bestimmen wird vor Beginn der Messungen folgender Test durchgeführt:

Dankenswerter Weise hat Herr Joachim BECK, ein engagierter, technisch kompetenter und selbst erfolgreicher Sportschütze, sich bereit erklärt sein „Rika“ Trainingsgerät für die Zeit der Versuche zur Verfügung zu stellen. Dabei handelt es sich um einen Laser schwacher Sendeleistung (augensicher), der an der Laufunterseite der Waffe befestigt wird. In einem Abstand von 10 bis 50 m wird eine Detektorplatte aufgestellt, die die Bewegungen des Lasers aufzeichnet und mit Hilfe des dazugehörigen Computerauswerteprogramms sichtbar macht. Der eigentliche Zweck solcher Geräte ist es, Schützenfehler im Anschlag beim Training schnell und objektiv aufzuzeigen.

Dieses Lasersystem wird nun dazu verwendet den Einfluss des Betretens der Platte auf die Treffpunktlage zu bestimmen. Es hat sich gezeigt, dass beim Stehen am hinteren Ende der Holzplatte der Treffpunkt auf der 50 Meter entfernten elektronischen Scheibe um 1 cm nach oben verschoben wird. Aufgrund dieser Feststellung ist bei allen Serien darauf geachtet worden, die Holzplatte während des Schießens nie zu betreten.

Um sicherzustellen, dass der für die Versuche hauptsächlich verwendete Bock des HLSZ wirklich geeignet ist, werden zum Vergleich auch Versuche mit drei anderen Schießböcken unternommen. Deren Aufbau wird nun kurz erörtert.

Zwei dieser Böcke stehen im Privateigentum der Familie BECK. Vater und Sohn BECK haben jeweils einen Bock konstruiert, weshalb die Bezeichnungen „Beckbock Junior“ und „Beckbock Senior“ gewählt werden.

Der „Beckbock Senior“ besteht aus einer starren Stahlplatte und einer Stahlplatte die mittels Gewindestangen und Muttern vertikal verstellbar ist. Auf der oberen Stahlplatte befindet sich die Aufnahmevorrichtung für das Gewehr. Dabei handelt es sich um zwei kurze T-Schienen, die mit einer weiteren Stahlplatte verbunden sind, die mit der unteren Konstruktion über zwei massive Gummiblöcke gekoppelt ist. Die Aufgabe dieser Gummiblöcke ist es nun, das elastische Verhalten eines menschlichen Schützen zu simulieren und dabei auf das Schwingungsverhalten der Waffe entsprechend Einfluss zu nehmen.



Abb. 4.7: Der „Beckbock Senior“ montiert auf einem Schießtisch im Expansionsraum. Die Dämpfungselemente (Gummiblöcke) sind in der Abbildung nicht sichtbar.



Abb. 4.8: Ein Gummiblock – Dämpfungselement des „Beckbock Senior“

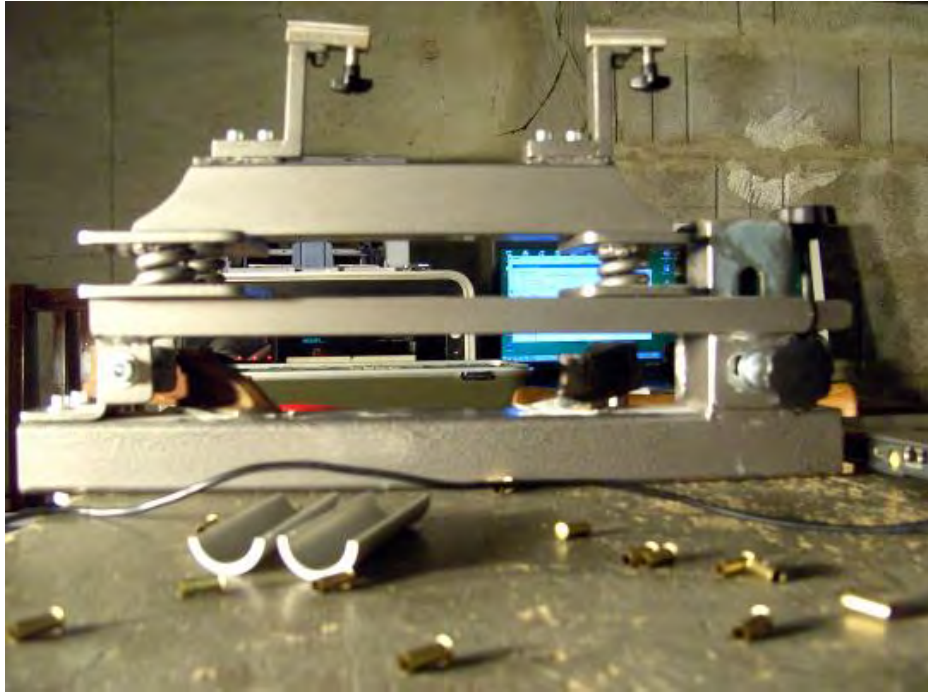


Abb. 4.9: „Beckbock Junior“, deutlich mit den Stahlfederdämpfungen erkennbar

Der entscheidende Unterschied zwischen „Beckbock Junior“ und „Beckbock Senior“ liegt (abgesehen von der Masse) nur in diesem Dämpfungselement. Der Junior Bock verfügt anstatt der Gummiblöcke über massive kurze Stahlfedern die orthogonal auf die Laufseelenachse also in vertikaler Richtung stehen.

Das dritte andere Bocksystem gehört der Versuchs- und Erprobungsstätte Felixdorf. Dabei handelt es sich um einen mehrere hundert Kilogramm schweren Stahlbock, dessen Kopf zwei in horizontaler und vertikaler Ebene justierbare, massive Prismenschienen besitzt. In die vordere Schiene wird nun eine Klemmvorrichtung für den Vorderschaft (im Wesentlichen ein kleiner Schraubstock mit Gummibacken, der den Gewehrschaft von links und rechts einspannt) geschoben und fixiert. In die hintere Schiene werden eine Führung für den Hinterschaft und ein Gummipuffer zur Aufnahme des Rückstoßes befestigt. Der gesamte Bock befindet sich auf einer Holzpalette. Nur mit dieser Holzpalette und einem Hubstapler ist ein Standortwechsel dieses Bocks möglich. Aufgrund der enormen Masse des Bocks ist nicht von einer nennenswerten Beeinflussung der Palette auf das Schussverhalten auszugehen.



Abb. 4.10: Der Großkaliberschießbock von ARWT/WFT Felixdorf

4.1.5 Randbedingungen für das Schießen

Bei den Messungen selbst wird nun wie folgt vorgegangen: Alle Anbauteile am Versuchsgewehr EVOLUTION wie Schaftkappe, Pistolengriff oder Abzugsgehäuse werden für die Dauer der Versuche abgebaut, um unnötige Verzögerungen beim Bettungsombau des Gewehrs zu vermeiden. Um die Bettung zu wechseln, müssen nur (maximal) 20 Schrauben mit denen die Bettungsschalen im Schaft bzw. miteinander verschraubt sind, gelöst, das System herausgenommen, die neue Bettung eingestellt, das System wieder hineingelegt und wieder verschraubt werden. Im Durchschnitt beläuft sich der Arbeitsaufwand dafür auf ca. 20 Minuten, wobei meist durch „geschickte“ Wechsel (gleiche Position aber unterschiedliches Material) erheblich Zeit eingespart werden kann. Anschließend wird das Gewehr wieder in den Schießbock eingespannt wobei auf eine exakt gleiche Positionierung in Bezug auf den Messschranken der Geschwindigkeitsmessanlage geachtet wird.

Da sich bei einem Wechsel des Bettungsmaterials oder der Bettungsposition die Lage des mittleren Trefferpunktes verändert, muss nach jedem Bettungswechsel die Waffe neu auf das Ziel ausgerichtet werden. Anschließend werden 10 Probeschüsse abgegeben, mit denen einerseits die Trefferlage im Ziel kontrolliert und andererseits dem System die Möglichkeit gegeben wird sich an die neue Bettung „zu gewöhnen“. Es ist z.B. möglich, dass eine Gummibettung bei den ersten Schüssen etwas nachgibt und so die Trefferlage minimal verändert wird. Um die Konstanz der Versuchsanordnung bezüglich der Bettung zu garantieren, ist es sinnvoll, in regelmäßigen Abständen das Anzugsmoment der Schrauben zu prüfen.

Der Lauf wird im Abstand von ca. 200 Schuss gereinigt, wobei zuerst einmal ein öliger und danach zweimal ein trockener Putzdocht durch den Lauf gezogen wird. Bevor die nächste Wertungsserie begonnen werden kann, müssen noch Probeschüsse abgefeuert werden um ein gleichmäßiges Verteilen des Geschoßfettes im Lauf zu ermöglichen. Auffällig ist, dass jeweils der erste Schuss nach dem Reinigen des Laufes eine um ca. 15 m/s höhere v_2 aufweist als alle folgenden Schüsse. Das hat zur Folge, dass der erste Schuss ca. 2 cm über dem mittleren Treffpunkt der weiteren Schüsse liegt. Eine Erklärung dafür ist, dass sich noch Ölrückstände in den Feldern des Laufprofils befinden, die den Reibungskoeffizienten merklich herabsetzen. Auf Grund der Reibung des Geschoßes im Lauf und der heißen Pulvergase verdampfen diese Ölrückstände beim ersten Schuss und der Zweite weist eine den weiteren Schüssen typische Geschwindigkeit auf.

Die v_0 eines Projektils ist auch von der Temperatur der Munition abhängig. Um daher diesen Einfluss auf die Trefferbilder auszuschließen wird die zu verschießende Munition in einer Truhe mit regelbarer Temperatur auf 20 ± 1 °C gehalten und erst unmittelbar vor dem Beginn einer Messserie aus der Truhe entnommen.

4.1.6 Die Messserie

Nach Beendigung der Probeschüsse werden pro Messserie 50 Wertungsschüsse im Intervall von 30 Sekunden abgegeben, was vom Zeitintervall her gesehen einem typischen „Liegend“ – Schießrhythmus entspricht. Die Festlegung auf 50 Schuss pro Messserie ergibt sich aus folgenden Überlegungen: Die KK-Wettbewerbe beinhalten sowohl 40 Schuss – Programme wie 3 x 40 Stellungsschießen (liegend, stehend, kniend) als auch das 60 Schuss Liegend Programm. Als Kompromiss bieten sich daher 50 Schuss an. Ferner ist mit 50 Schuss auch eine aussagefähige Statistik möglich.

Bei jedem Wertungsschuss werden sowohl Trefferkoordinaten als auch die Geschwindigkeit aufgezeichnet. Letzteres bietet die Möglichkeit, etwaige Munitionsfehler (bei zu schnellen oder zu langsamen Projektilen) zu erkennen.

Die x - und y - Koordinaten werden zuerst vom Trefferanzeigesystem gespeichert. Nach jeder Messserie müssen die tabellierten Koordinaten ausgedruckt und in eine Excel-Datei eingegeben werden, um sie einer Auswertung und graphischen Darstellung zuzuführen. Ein direktes Überspielen der Daten von der Trefferanzeige in eine Excel-Datei wird versucht, ist aber fehlgeschlagen.

Um eine quantitative Aussage über die Streuung der Einzelschüsse eines Schussbildes zu erhalten, wird der mittlere Abstand der Einzelschüsse

vom mittleren Treffpunkt aller 50 Schuss der Serie errechnet. So wird eine Maßzahl erhalten, in der die Information des Trefferbildes hinsichtlich der Streuung der Einzelschüsse, verdichtet vorliegt. Es bietet sich damit die Möglichkeit Schussbilder objektiv zu vergleichen. Dabei werden „Ausreißer“ nicht so stark gewichtet wie z.B. bei der Angabe des kleinsten Durchmessers des Trefferkreises, wie es bei der Meytonanlage automatisch geschieht. Der Durchmesser des „Kleinsten Trefferkreises“ beschreibt den kleinstmöglichen Kreis in dem alle Einzeltreffer eingeschlossen werden. Dabei ist einsichtig, dass damit ein einzelner Ausreißer ein sonst passables Trefferbild überdurchschnittlich verschlechtert. Daher wird der mittlere Abstand vom mittleren Treffpunkt als Beurteilungsmaß definiert. Dieser „mittlere Abstand vom mittleren Treffpunkt einer Schusserie“ wird im vorliegenden Bericht auch als <Ablage> bezeichnet und stellt letzten Endes die wichtigste Schnittstelle zwischen den experimentell erhaltenen Schussbildern / Trefferbildern und den mit der Modellfamilie ROSSI berechneten Trefferbildern dar.

4.1.7 Laufschiwungsmessungen

An zwei Tagen während der Versuchsdurchführung werden durch Herrn OR Mag Dr BITTNER und Herrn KRÖLL von ARWT/OPMT die Laufschiwungen gemessen. Dazu wird ein in drei Achsen messender Beschleunigungssensor der Firma KISTLER im Abstand von 63,5 cm vom Patronenboden in Laufrichtung gemessen auf dem Lauf befestigt. Der Beschleunigungssensor misst bis 500 g (Sinuslast) beziehungsweise bis 1000 g (Schocklast). Die gewählte Position entspricht einer Lage in Mündungsnähe. Der Sensor ist imstande Beschleunigungen in allen drei Raumrichtungen zu erfassen. Die Sensorsignale werden mit der Messdatenaufzeichnungssoftware „Dasylab“ der Firma NATIONAL INSTRUMENTS aufgezeichnet und gespeichert. Mit dieser Software ist es ferner möglich, die Daten zu analysieren und auf ein „Word“-file zu exportieren. Mit dieser Ausrüstung kann man sowohl die longitudinale Schwiwung wie auch die transversalen Schwiwungen aufzuzeichnen. Neben den Laufschiwungen beim Schießen aus dem Bock werden auch die Schwiwungen beim Schießen aus der Schulter (im Liegendanschlag) als auch der Einfluss der Schlagbolzendynamik auf das gesamte Schwiwungsverhalten untersucht. Letzteres wird dadurch realisiert, dass eine bereits abgeschossene Patronenhülse in das Gewehr eingelegt und nach dem Spannen des Schlosses der Abzug betätigt wird. Die Auswertung der Laufschiwungsdiagramme erfolgt sowohl bei ARWT/OPMT, als auch bei den Autoren. Die von ARWT/OPMT an die Autoren zur Auswertung überlassene Version von „Dasylab“ ist aus lizenzrechtlichen Gründen nur eine Schulversion mit eingeschränkten Möglichkeiten. Daher werden die Daten teilweise parallel ausgewertet. Die OPMT Resultate liegen als interner ARWT-Prüfbericht vor [6].

4.2 Resultate zu den Laufschrwingungen

Die hier vorliegenden exemplarisch ausgewählten Ergebnisse an Laufschrwingungsmessungen beinhalten jetzt nicht die Teilresultate, die in Kapitel 5.4 bezüglich der Abstimmungen zum dynamischen Grundverhalten verwendet werden. 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 Vzlt TAUBER. Dieses EVOLUTION (mit der stets gleich bleibenden Bettung 5/Teflon) wird „Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER“ genannt. Ferner werden auch Messungen am Gewehr ANSCHÜTZ in der klassischen Bettung zu Vergleichszwecken angestellt. Die Versuche werden entsprechend den Ausführungen in Kapitel 4.1.7 durchgeführt. Weiters werden 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 (Liegendanschlag durch Schütze Johannes SEQUARD-BASE) 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

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 $x = c^{\lambda t}$ 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 $\approx 0.1 \text{ J}$.

4.2.1 Die Laufschwingungen beim „Versuchsgewehr EVOLUTION“

Die Abbildungen 4.11 bis 4.13 liefern die gemessenen Laufschwingungen im scharfen Schuss. Dabei wird die Munition R100 verwendet.

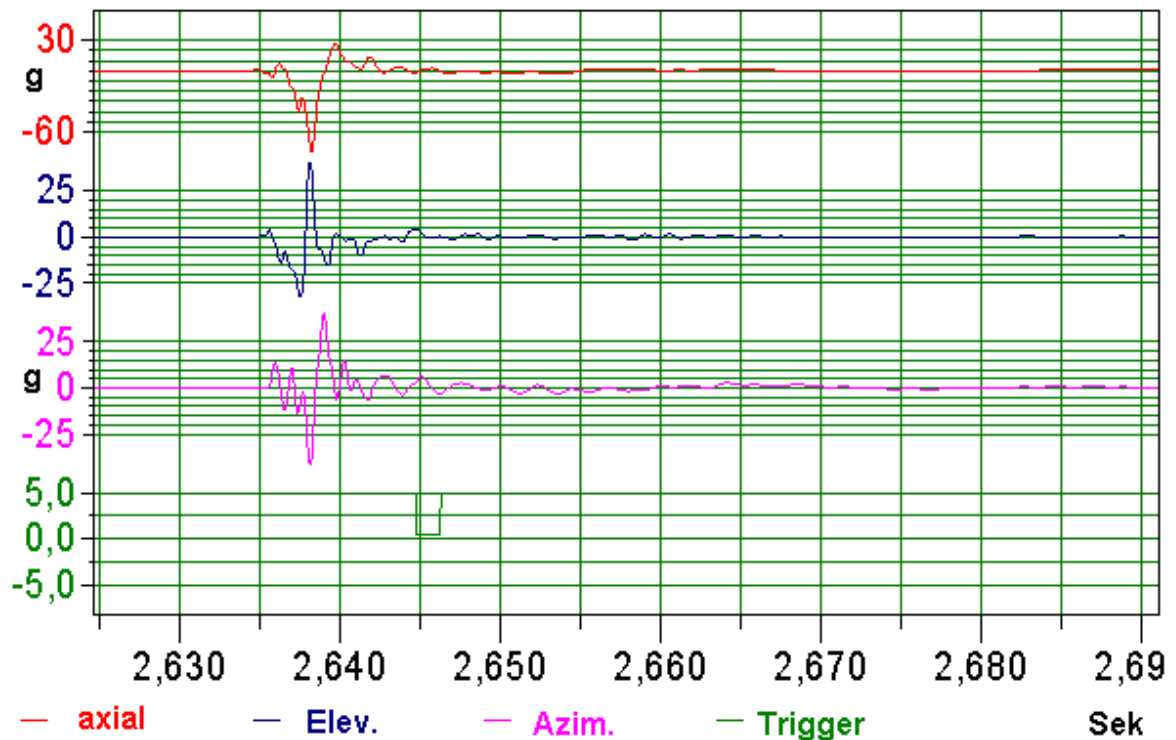


Abb. 4.11: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION;
Bettung5/Teflon, Schuss Nr. 39, $v_2 = 348.2 \text{ m/s}$; 21.07.2010

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):	Azimet (translatorisches Schwingen)
4. Diagramm (Grün):	Markierung, die bei Geschosßdurchgang beim ersten Lichtschranken der Geschwindigkeitsmess-anlage abgegeben wird. Über den Abstand zur Mündung (hier mit 2,12 m gemessen) und der Geschosßgeschwindigkeit kann der Zeitpunkt des Mündungsdurchganges ermittelt werden.

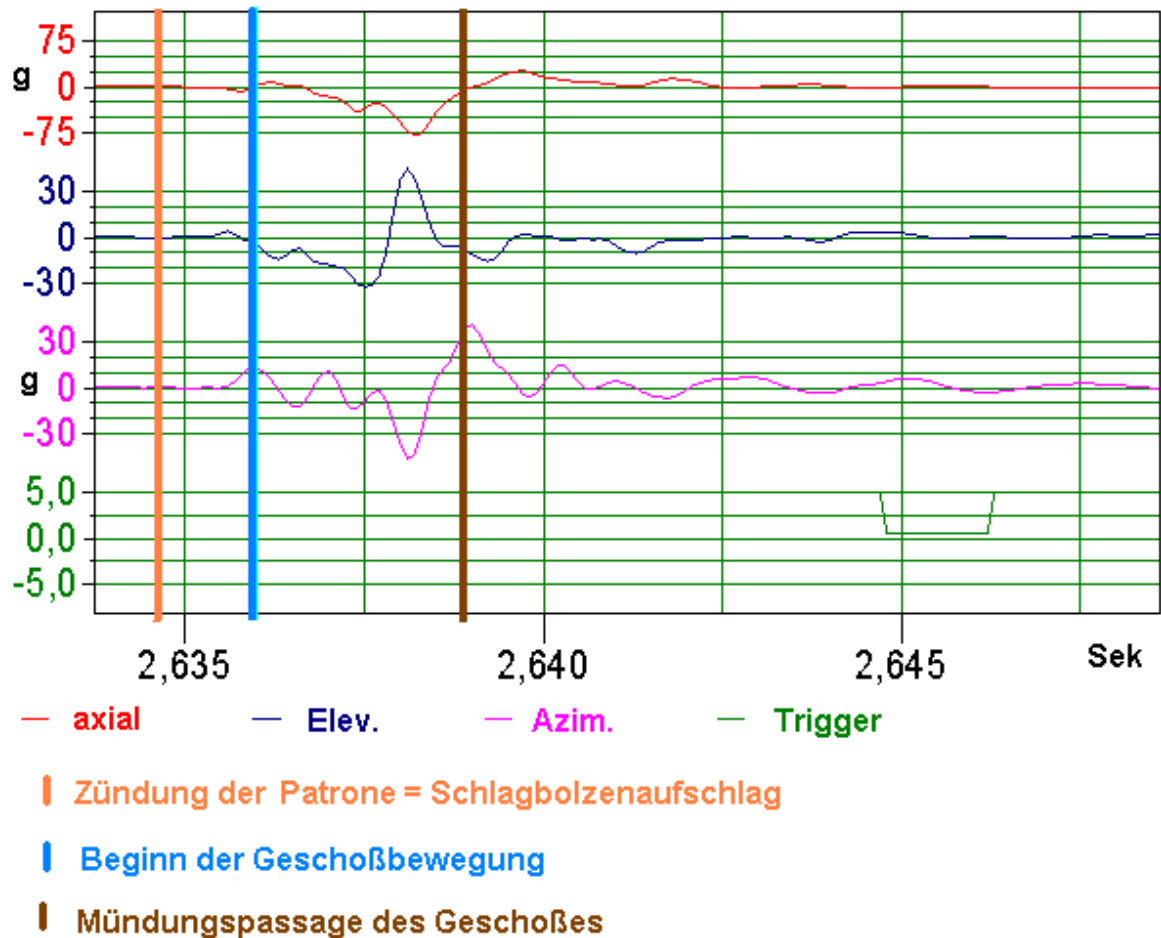


Abb. 4.12: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon, Schuss Nr. 39, $v_2 = 348.2 \text{ m/s}$; Abstand Mündung zur ersten Lichtschranke $\sim 2.12 \text{ m}$; 21.07.2010

Abbildung 4.12 zeigt den gleichen Schuss wie Abbildung 4.11, jedoch mit geänderter Skalierung.

Ferner sind in Abbildung 4.12 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 Zeitbereich 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 4.12 eingetragen sind. Dabei wird von der Zeit der Mündungspassage zeitlich nach „hinten“ eingetragen.

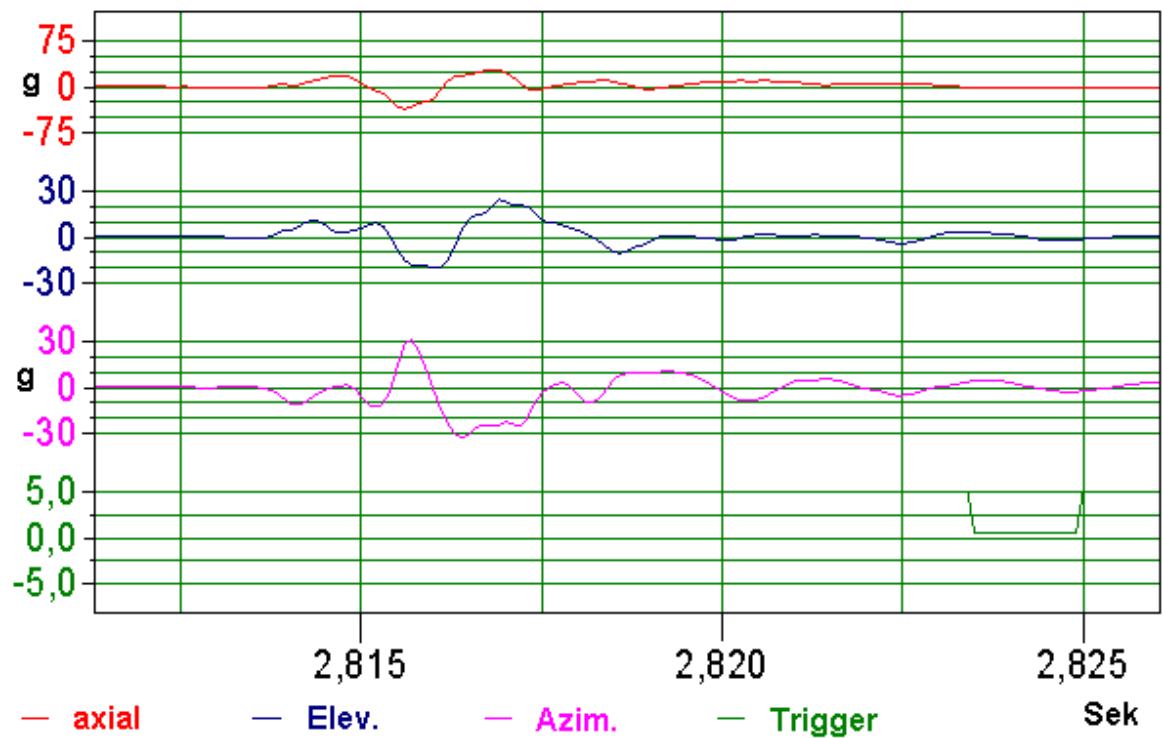


Abb. 4.13: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon, Schuss Nr. 46, $v_2 = 346.4 \text{ m/s}$; 21.07.2010

Die Abbildungen 4.14 und 4.15 zeigen die nur durch die Bewegung des Schlagbolzens ausgelösten Laufschwingungen.

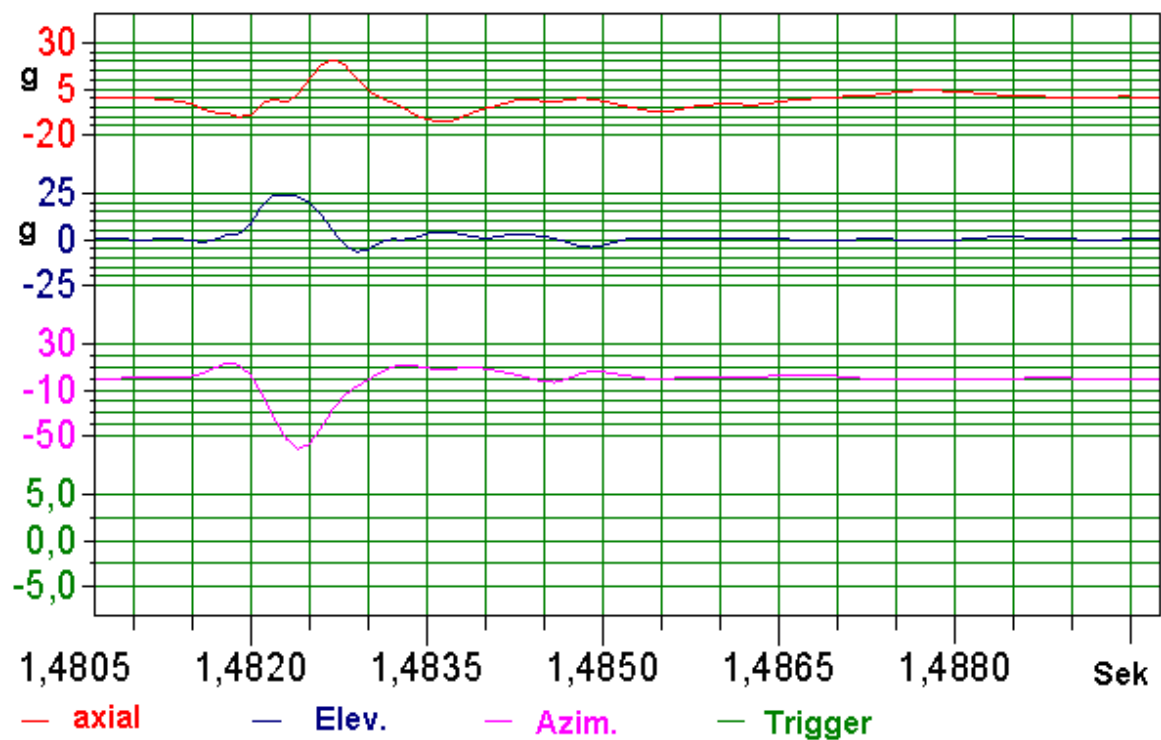


Abb. 4.14: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon, nur Schlagbolzenbewegung (1); 21.07.2010

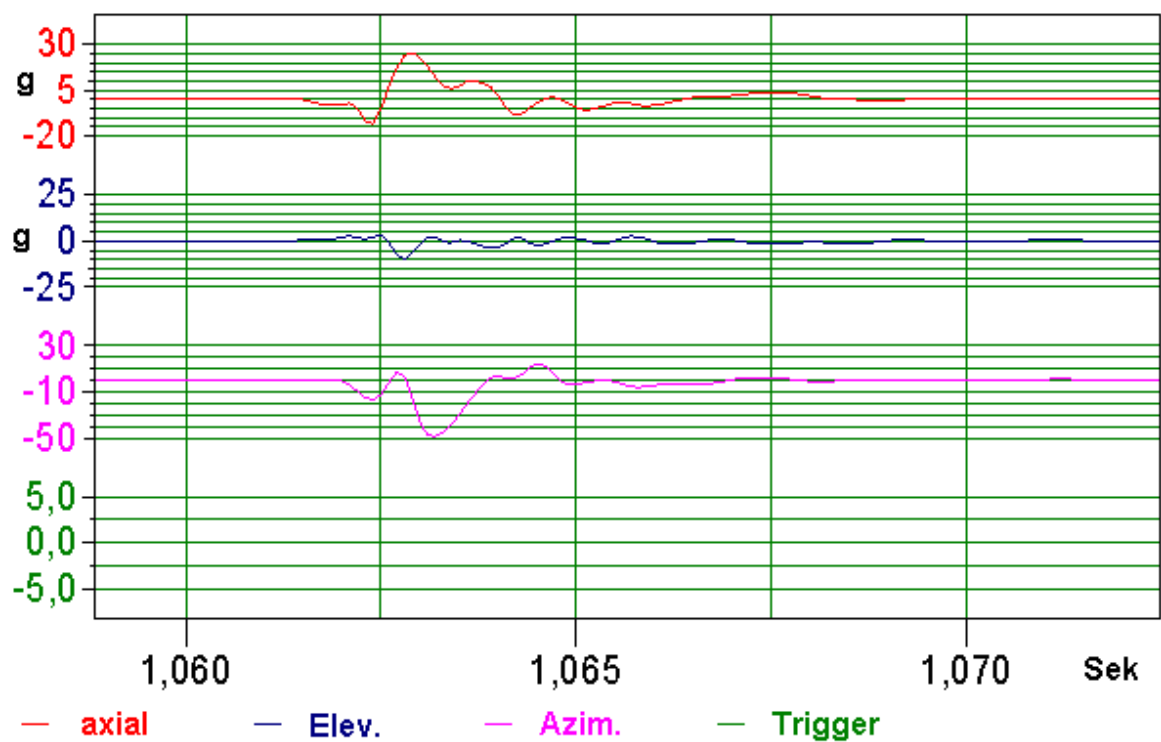


Abb. 4.15: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon, nur Schlagbolzenbewegung (2); 21.07.2010

Diskussion der Laufschrwingungsmessungen zum Versuchsgewehr EVOLUTION:

- Unabhängig von der Initiierung der Laufschrwingungen (scharfer Schuss oder nur durch den Schlagbolzen) zeigen die Schwingungen kein systematisches Verhalten. Form und Elongationen sind offenbar zufällig. Das heißt, Laufschrwingungen 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 4.1: Eckdaten zu den Schwingungsdiagrammen des Versuchsgewehres EVOLUTION

Die angegebenen Maximalamplituden 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 4.12 ersichtlich ist, können keine relevanten Laufschrwingungen vor der Zündung der Patrone erkannt werden. Das heißt, die Bewegung des Schlagbolzens wird messtechnisch, zumindest an der Laufmündung, unter den hier verwendeten Skalierungen der Ordinatenachse praktisch nicht nachgewiesen.
- Auch die Laufschrwingungen die durch die Schlagbolzenbewegung ausgelöst werden sind für jeden „Schuss“ unterschiedlich. Es gibt keine systematisch wiederkehrenden Schwingungsformen und Amplituden.
- Da dennoch beträchtliche Amplituden der Laufschrwingungen bei alleiniger Wirksamkeit des Schlagbolzens gemessen werden, ist der Schluss nahe liegend, dass
 - * die Bewegung des Schlagbolzens an sich keine zumindest messtechnisch relevanten Schwingungen auslöst,
 - * die Schwingungen die durch den Schlagbolzen ausgelöst werden, durch dessen Einschlag/Aufschlag auf die Patronenhülse erzeugt werden,
 - * die während der Schussentwicklungsphase erkennbaren Laufschrwingungen 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.

4.2.2 Die Laufschrwingungen beim „Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER“

Die Abbildungen 4.16 und 4.17 liefern die gemessenen Laufschrwingungen im scharfen Schuss mit einer R50 Munition bezüglich v_2 .

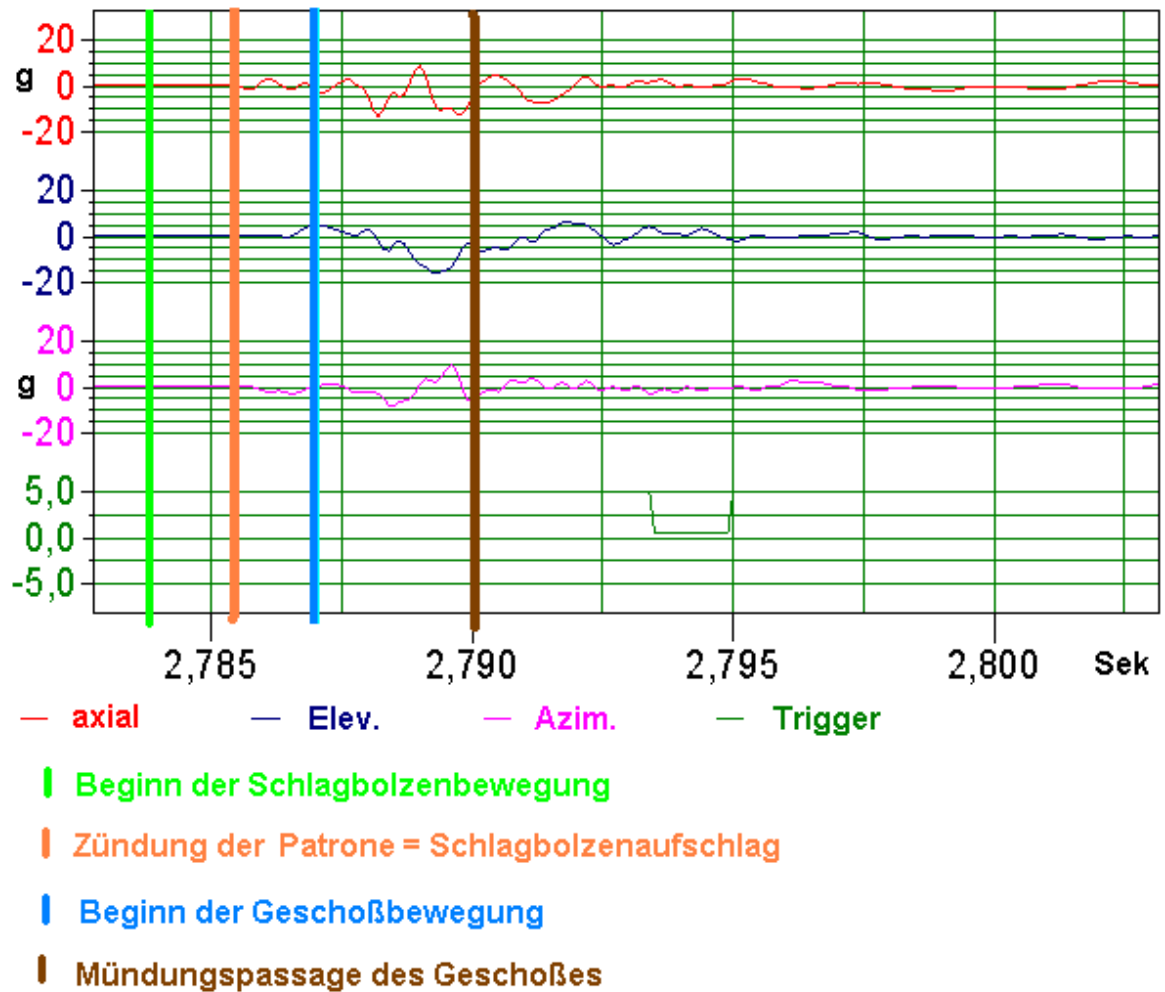


Abb. 4.16: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon, Schuss Nr. 12, $v_2 = 330.4 \text{ m/s}$, Abstand Mündung zur ersten Lichtschranke $\sim 1.12 \text{ m}$; 21.07.2010

Analog zu Abbildung 4.12 sind auch in Abbildung 4.16 die Zeitbereiche für Zündung, Bewegungsbeginn des Geschößes und Mündungspassage des Geschößes eingetragen. Zusätzlich ist auch der Zeitbereich des Bewegungsbeginnes des Schlagbolzens ($\sim 1.7 \text{ ms}$ vor dessen Einschlag in die Patronenhülse) eingezeichnet.

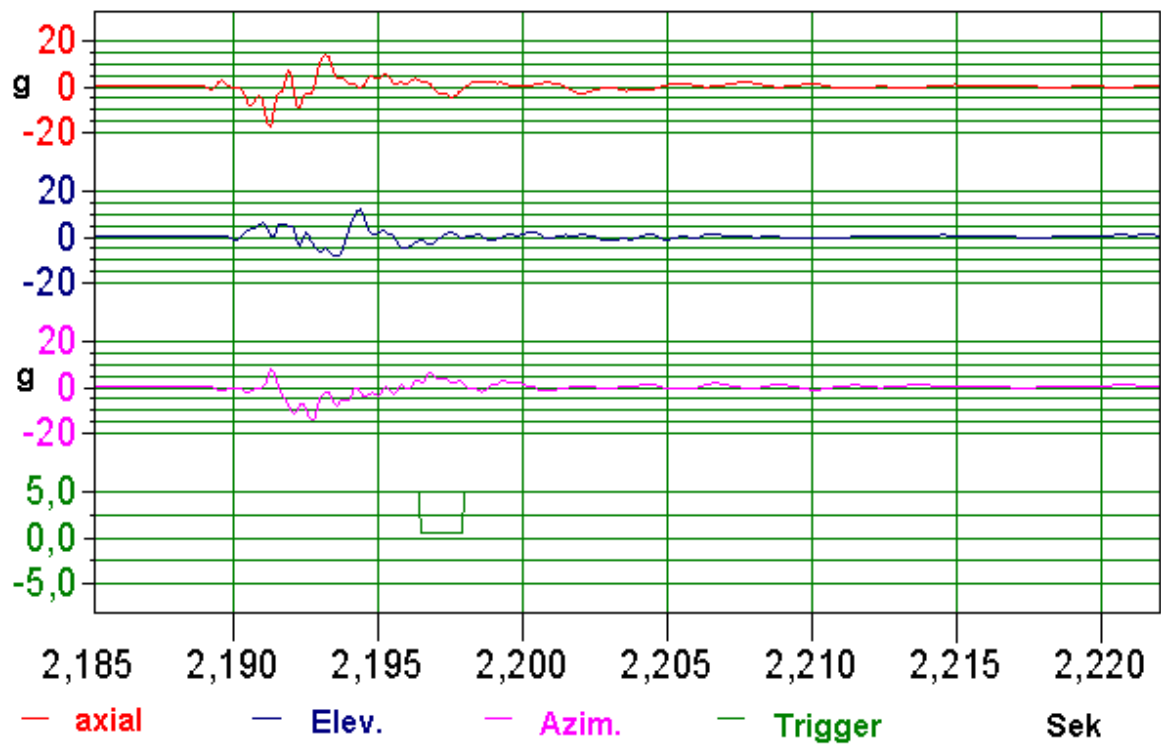


Abb. 4.17: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon, Schuss Nr. 40, $v_2 = 333.7 \text{ m/s}$; 21.07.2010

Die folgenden beiden Abbildungen 4.18 und 4.19 zeigen das Schwingungsverhalten ausgelöst nur durch die Schlagbolzenbewegung.

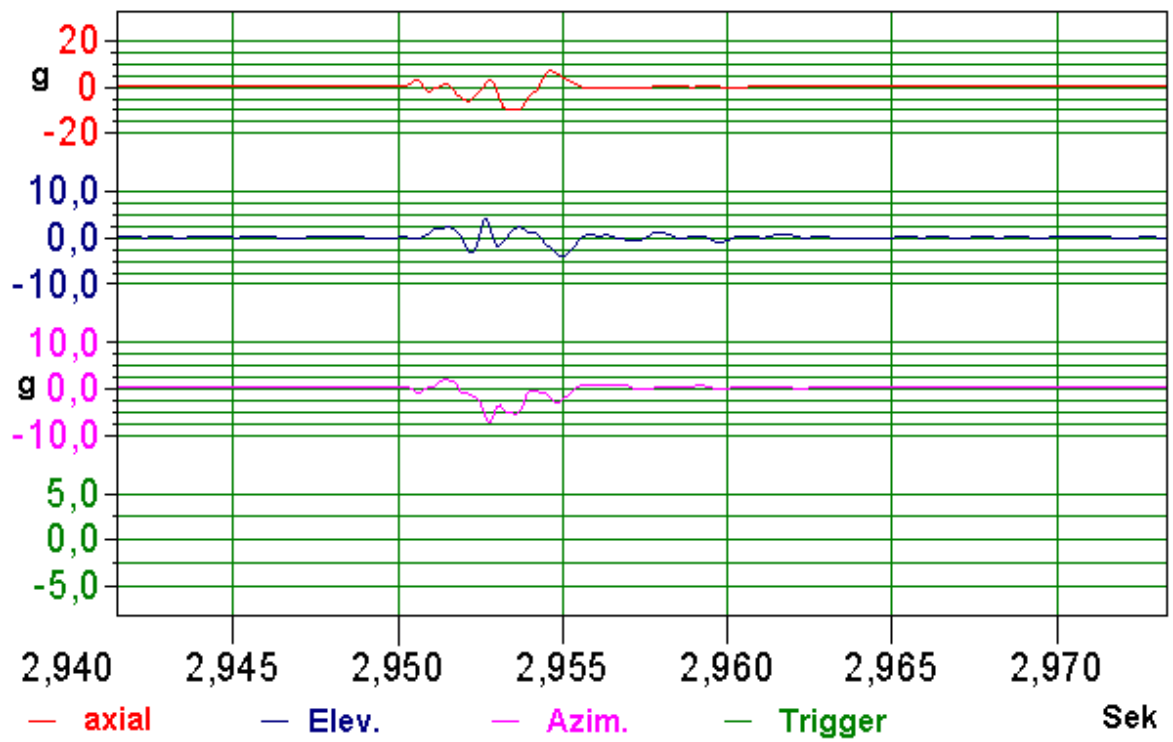


Abb. 4.18: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr
EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon, nur
Schlagbolzenbewegung (1); 21.07.2010

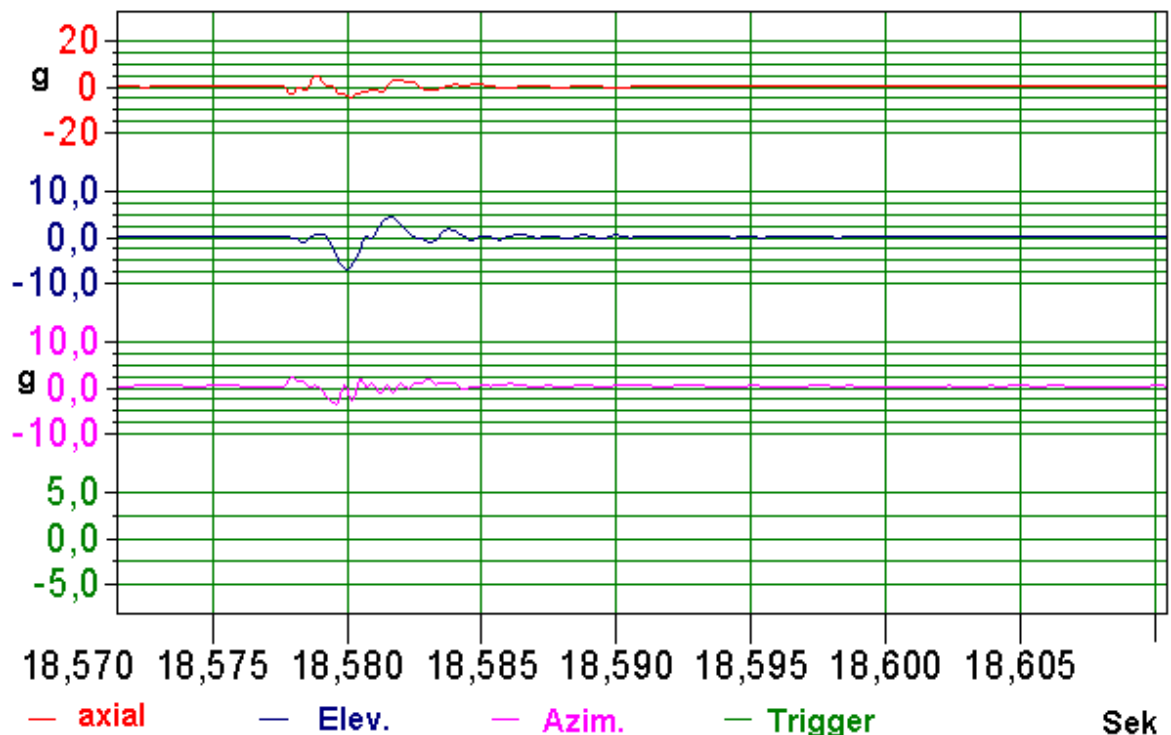


Abb. 4.19: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon, nur Schlagbolzenbewegung (2); 21.07.2010

Diskussion der Laufschriftmessungen zum Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER:

- Auch bei diesem Gewehr sind sowohl die Laufschriftungen 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 4.2: Eckdaten zu den Schwingungsdiagrammen des Versuchsgewehres EVOLUTION/TAUBER

Anmerkung:

Die scheinbar längere Schwingungsdauer des Gewehres EVOLUTION/TAUBER gegenüber den Werten in Tabelle 4.1 für Versuchsgewehr EVOLUTION erklärt sich aus dem niedriger angesetzten Schwellwert der relevanten Elongation von 5g hier gegen 10g in Tabelle 4.1.

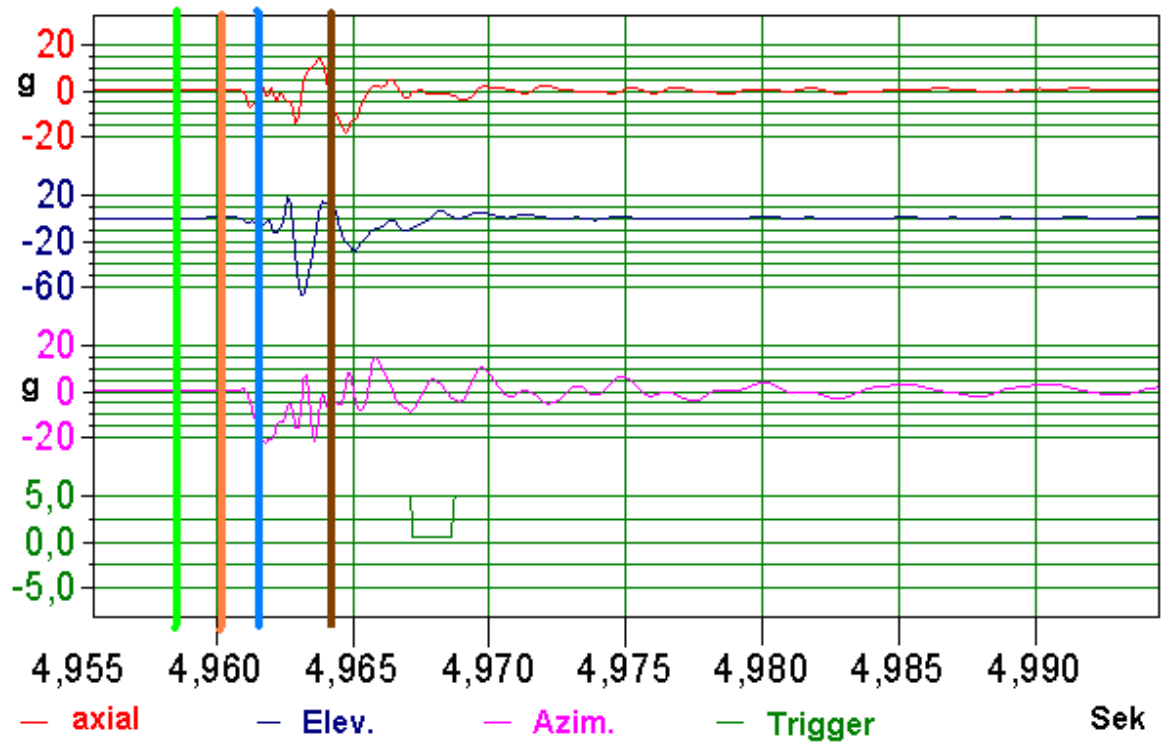
- Die maximalen Amplituden liegen beim Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER um einen Faktor von ca. 3.3 im scharfen Schuss

und 6.6 bei der alleinigen Schlagbolzen-bewegung niederer als beim standardmäßigen Versuchsgewehr EVOLUTION.

- Die Auswertung von Abbildung 4.16 und die Abschätzung der Schlagbolzenbewegungsdauer von ~ 1.7 ms zeigt, dass der scharfe Schuss einen Teil der Laufschrwingungen auslöst, aber ein erheblicher nicht vernachlässigbarer Anteil durch den Schlagbolzen ausgelöst 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 noch 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, kann empirisch gefolgert werden, dass je weniger Schwingungen der Schlagbolzenaufschlag auslöst, desto weniger starke Schwingungen sind im scharfen Schuss zu erwarten.

4.2.3 Die Laufschrwingungen beim Gewehr „ANSCHÜTZ“

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



█ Beginn der Schlagbolzenbewegung

█ Zündung der Patrone = Schlagbolzenaufschlag

█ Beginn der Geschößbewegung

█ Mündungspassage des Geschößes

Abb. 4.20: 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 4.12 und 4.16 sind auch in Abbildung 4.20 die Zeitbereiche für den Beginn der Schlagbolzenbewegung, dem Aufschlag des Schlagbolzens = Zündung der Patrone, dem Bewegungsbeginn des Geschößes und der Mündungspassage eingetragen.

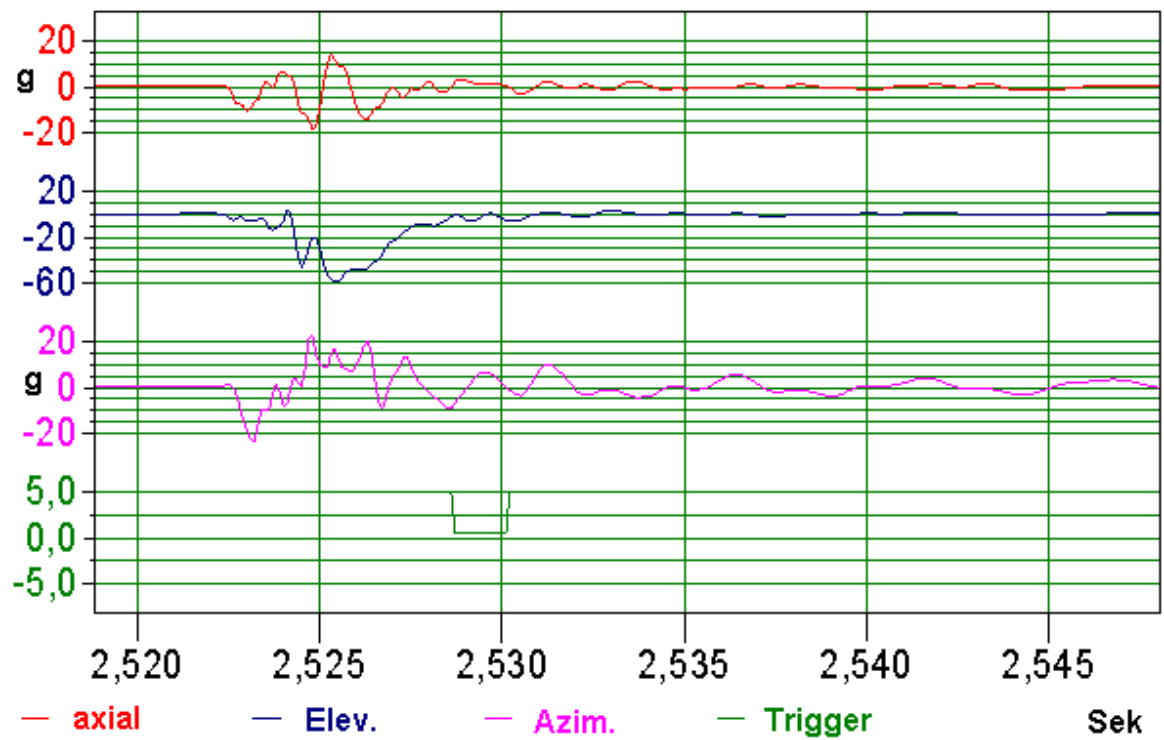


Abb. 4.21: Schwingungsdiagramme für Gewehr ANSCHÜTZ, Schuss Nr. 4, $v_2 = 346.8 \text{ m/s}$; 19.07.2010

Die Abbildungen 4.22 und 4.23 zeigen die nur durch die Schlagbolzenbewegung ausgelösten Laufschwingungen.

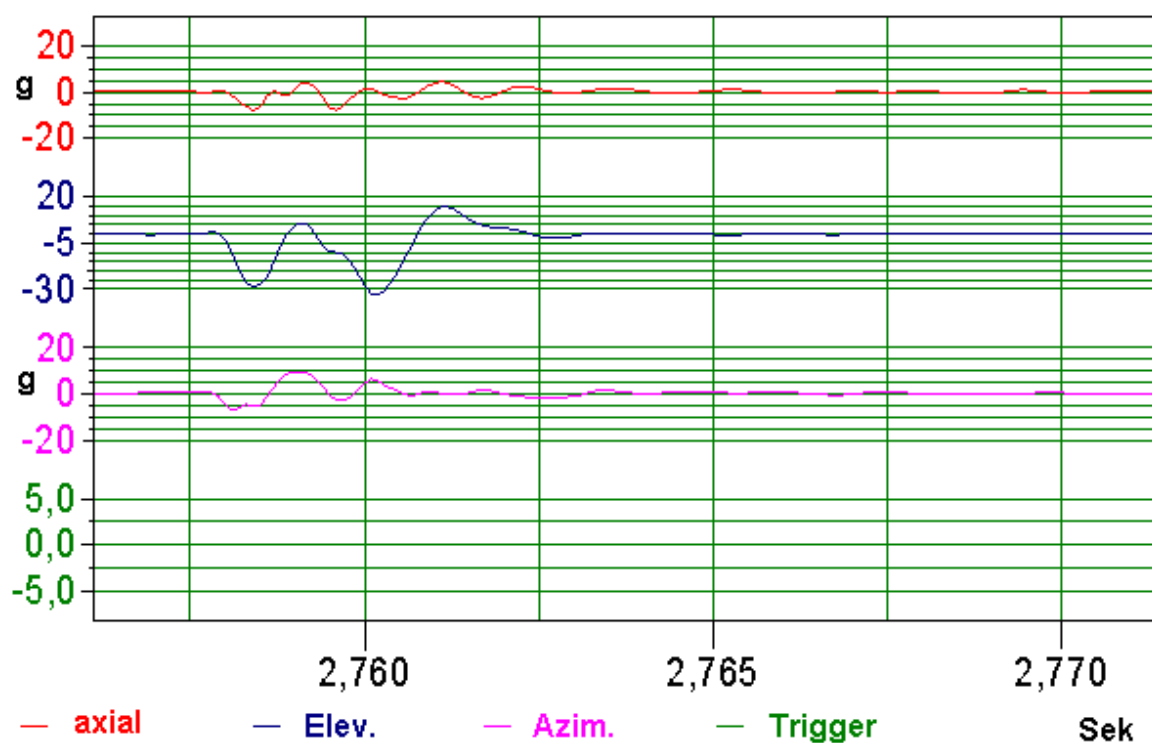


Abb. 4.22: Schwingungsdiagramme für Gewehr ANSCHÜTZ, nur Schlagbolzenbewegung (1); 21.07.2010

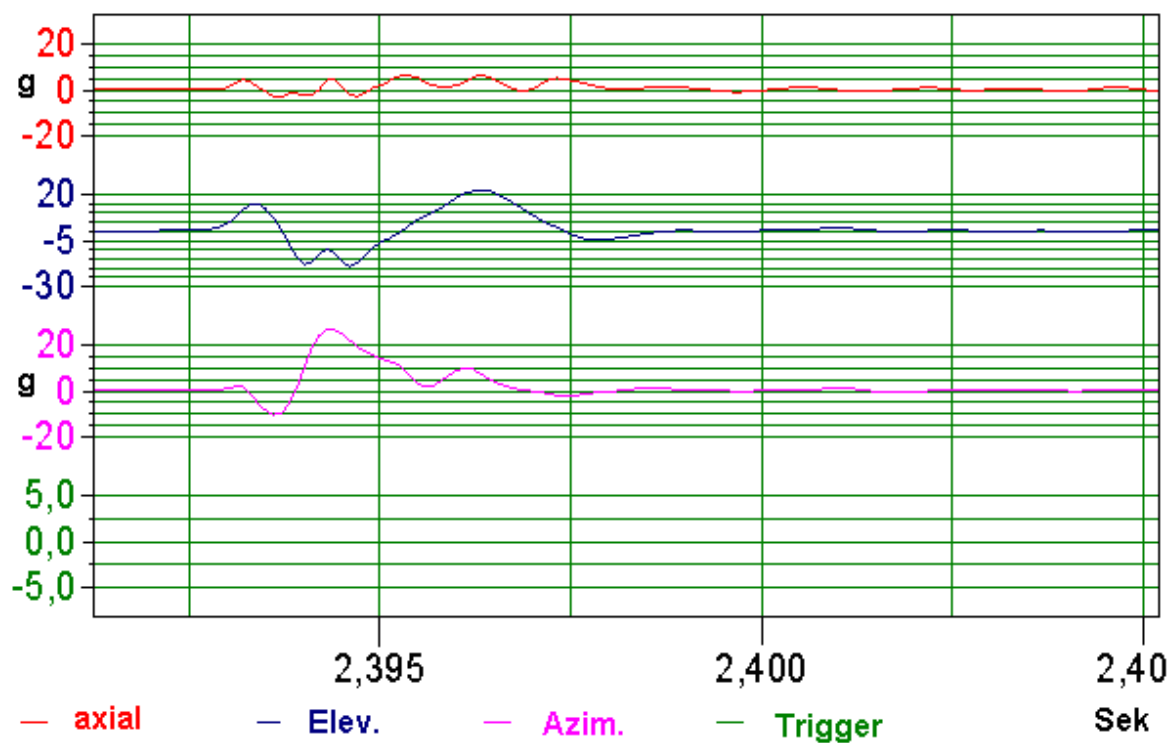


Abb. 4.23: Schwingungsdiagramme für Gewehr ANSCHÜTZ, nur Schlagbolzenbewegung (2); 21.07.2010

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

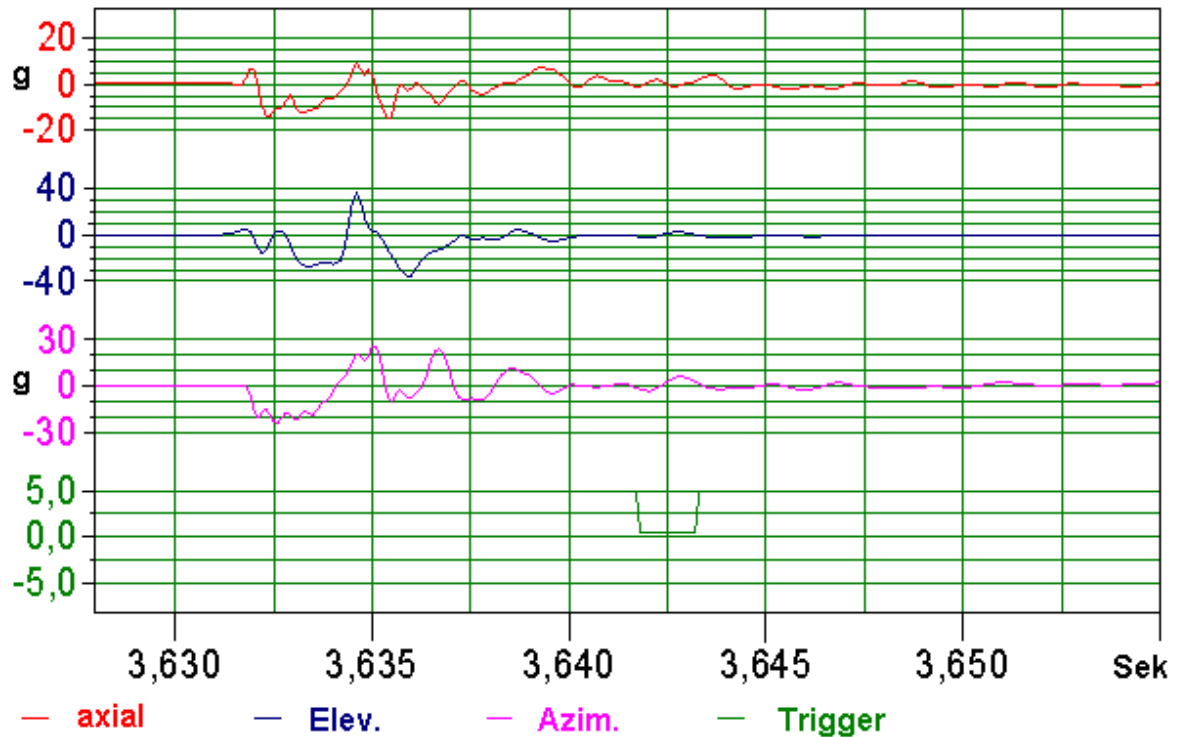


Abb. 4.24: Schwingungsdiagramme für Gewehr ANSCHÜTZ, Schuss Nr. 1, $v_2 = 350.3 \text{ m/s}$; 19.07.2010 in Liegendstellung.

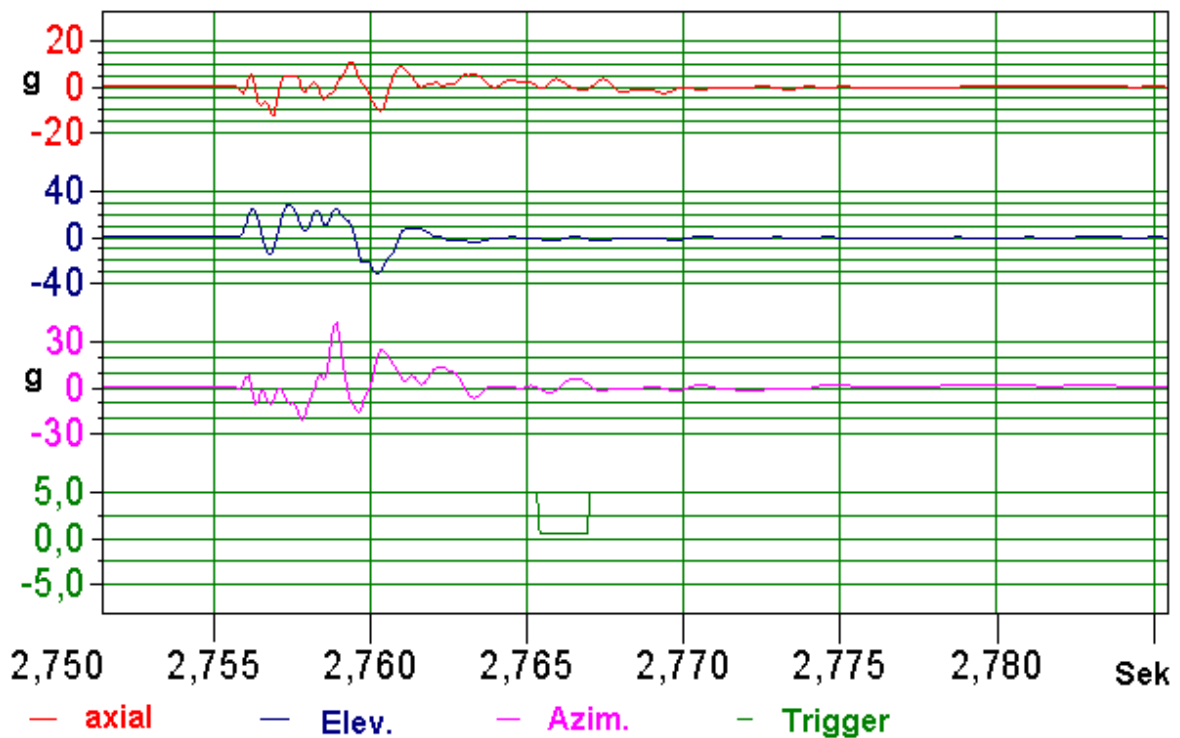


Abb. 4.25: Schwingungsdiagramme für Gewehr ANSCHÜTZ, Schuss Nr. 4, $v_2 = 351.0 \text{ m/s}$; 19.07.2010 in Liegendstellung.

Diskussion der Laufschriftungsmessungen zum Gewehr ANSCHÜTZ:

- Analog zu den beiden EVOLUTION-Gewehren sind die Laufschriftungsbewegungen zufällig.
- Die maximalen Amplituden und gesamten Schwingungsdauern zeigt Tabelle 4.3.

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

Tabelle 4.3: Eckdaten zu den Schwingungsdiagrammen 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 wäre ableitbar, dass die Ergebnisse mit dem HLSZ-Bock für Wettkampfbedingungen (Stellung liegend) übertragbar erscheinen (sogar mit einer gewissen „Reserve“).

- Wie schon für die EVOLUTION-Gewehre ist nach Abbildung 4.20 die Bewegung des Schlagbolzens alleine (vor der Zündung der Patrone) in Form von Lauschwingungen nicht nachweisbar. Es kann aber ebenso davon ausgegangen werden, dass während der innenballistischen Schussentwicklung das Lauschwingungsbild sich aus den Schwingungen des Schlagbolzenaufschlages und der Geschoßbewegung zusammensetzt.
- In den bisherigen Überlegungen/Interpretationen wird von einem gleichförmigen Pulverabbrand ausgegangen, sodass keine „asymmetrischen“ Gasdrücke in Rechnung zu stellen wären. Die Annahme muss aber nicht absolut zutreffend sein, da die Patrone nicht vollständig mit Pulver gefüllt ist. Kurzzeitige „Asymmetrien“ im Innendruck speziell hinsichtlich der Druckangriffsflächen, sind denkbar.
- Eine mögliche Ursache für die Ausbildung der Schwingungen mit dem Schlagbolzen-aufschlag wären einerseits der asymmetrische Einschlag am oberen Patronenrand (die KK-Patrone 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 $K_B \sim 194 \text{ N}$, die sehr kurzzeitig ($\sim 0.24 \text{ ms}$) wirkt, bzw. ein Drehmoment bildet.

4.3 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. Grundsätzlich wären Änderungen der Bettungsverhältnisse am Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER technisch möglich, da es sich aber um das tatsächliche Wettkampfgewehr von Vzlt TAUBER handelt, sollen keine Bettungsveränderungen vorgenommen werden.

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

4.3.1 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 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. Der Regressionskoeffizient ist der 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. Es wird dabei angenommen, dass der „Pseudozufallszahlengenerator“ in ROST ausreichend statistisch verteilte Werte zur Schussberechnung liefert. Siehe auch Kapitel 5.3.2 über die Schusszahlen. Abbildung 4.26 zeigt exemplarisch ein derartiges Diagramm für die x-Koordinaten bei der Anfangs-SEED-Zahl 200000.

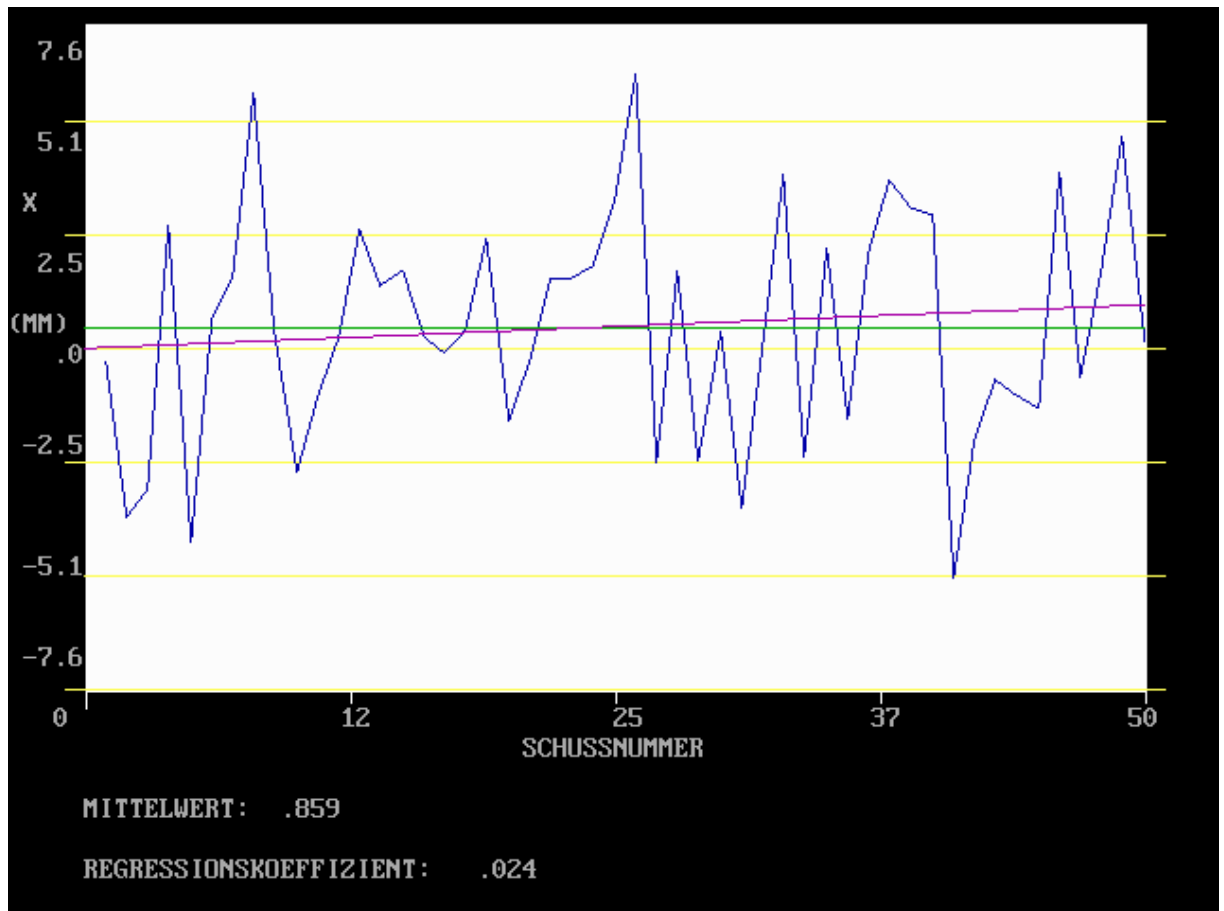


Abb. 4.26: Mit dem Programm ROST gerechnete Verteilung der x-Koordinaten einer 50 Schussreihe. Die magentafarbene Linie ist die Trendlinie deren Anstieg der gesuchte Regressionskoeffizient ist. Die grüne waagrechte Linie markiert nur den Mittelwert über 50 Schuss der x-Koordinatenwerte.

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 daraus die Längendimension für den Regressionskoeffizienten. Die Koordinatenwerte der Meytonanlage werden in Millimeter angegeben, weshalb korrekterweise der Regressionskoeffizient in Millimeter zu sehen ist. Für jedes fertige Schussbild werden die Regressionskoeffizienten $K_{R,x}$ und $K_{R,y}$ für die Koordinatenwerte ermittelt und angegeben.

4.3.2 Die Trefferbilder

Für die Beurteilung aller hier vorgestellten Schussbilder ist zu beachten, dass es nicht darauf ankommt, wo der mittlere Treffpunkt (gelbe

Markierung in den 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 4.27 bis Abbildung 4.30) 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 $\langle v_2 \rangle$, der mittlere Abstand vom mittleren Treffpunkt $\langle Ablage \rangle$ und der Zeitpunkt des Schießbeginnes der Schussserie.

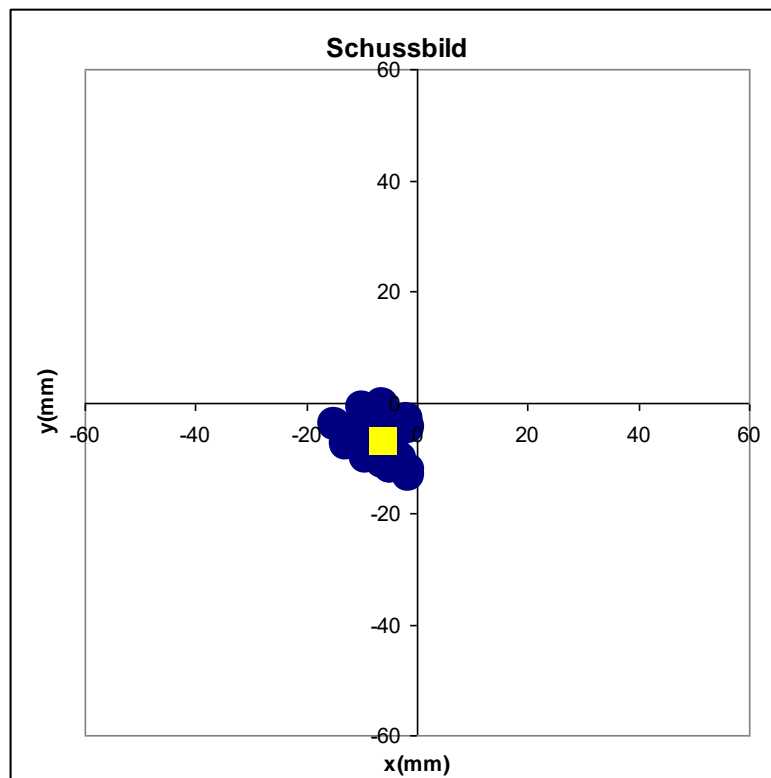


Abb. 4.27: Schussbild für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon, 14.07.2010/15:20

K_{Rx} (mm)	K_{Ry} (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.

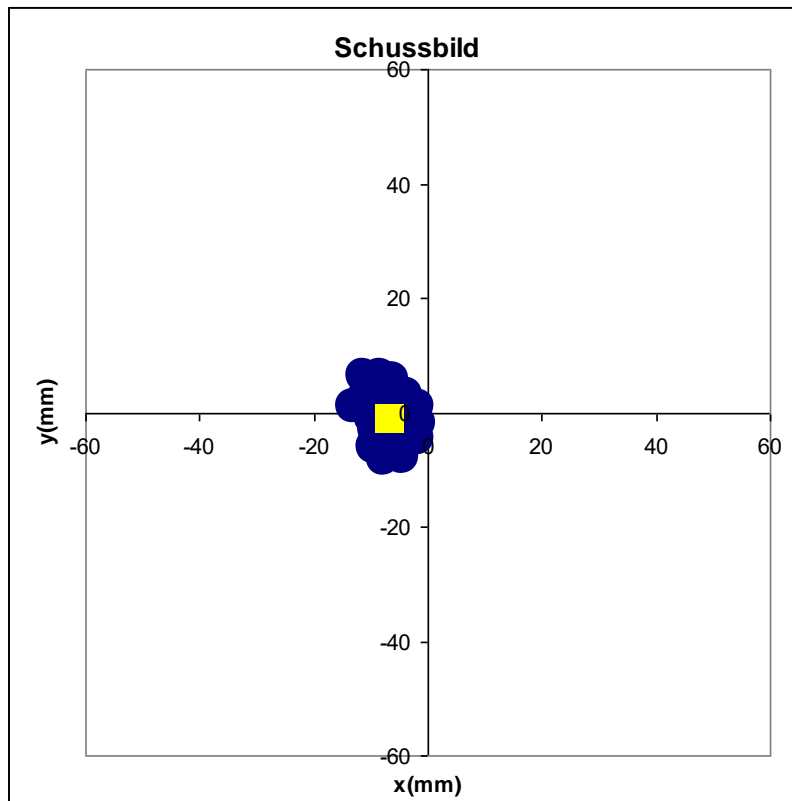


Abb. 4.28: Schussbild für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon, 15.07.2010/08:29

K_{Rx} (mm)	K_{Ry} (mm)	$\langle v_2 \rangle$ (m/s)	$\langle Ablage \rangle$ (mm)
-0.020	0.018	349.0 ± 1.5	3.87

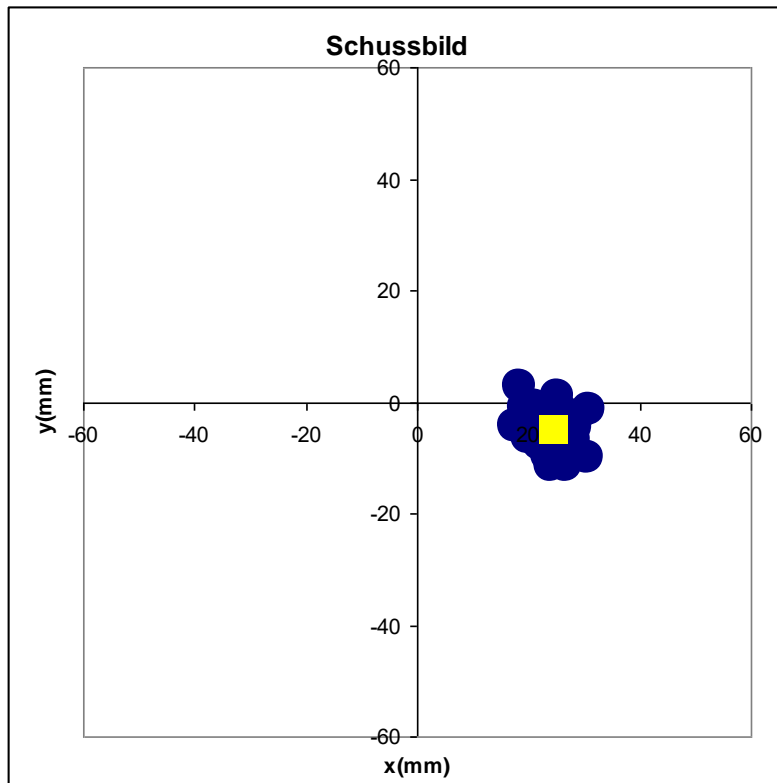


Abb. 4.29: Schussbild für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon, 19.07.2010/15:40

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

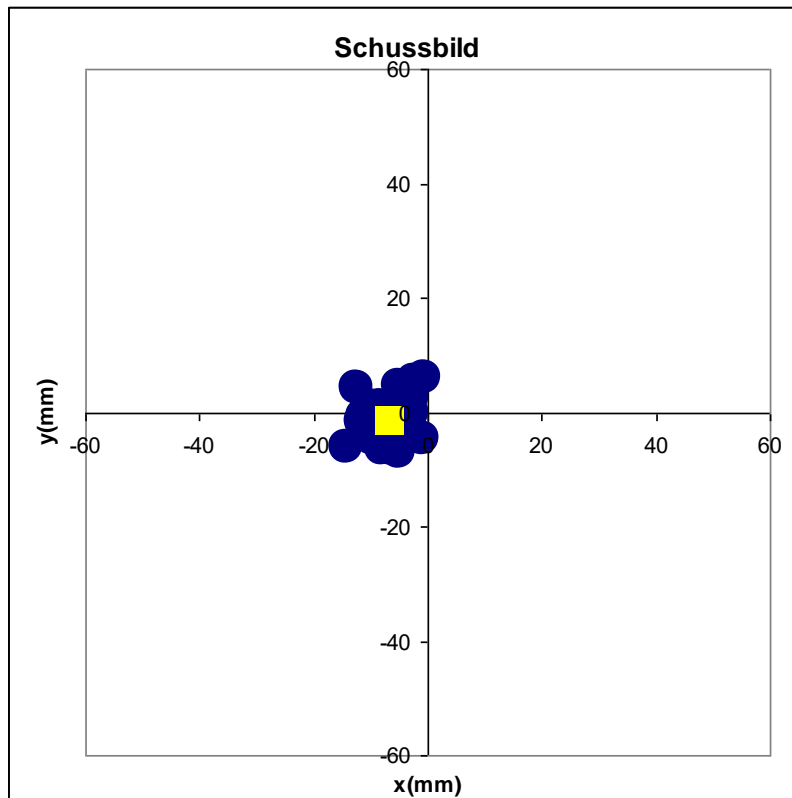


Abb. 4.30: Schussbild für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon, 21.07.2010/08:28

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 4.31, zeigt ein vergleichsweise schlechtes Trefferbild, geschossen mit der „billigen“ Munition Remington „Standard Velocity Round Nose“.

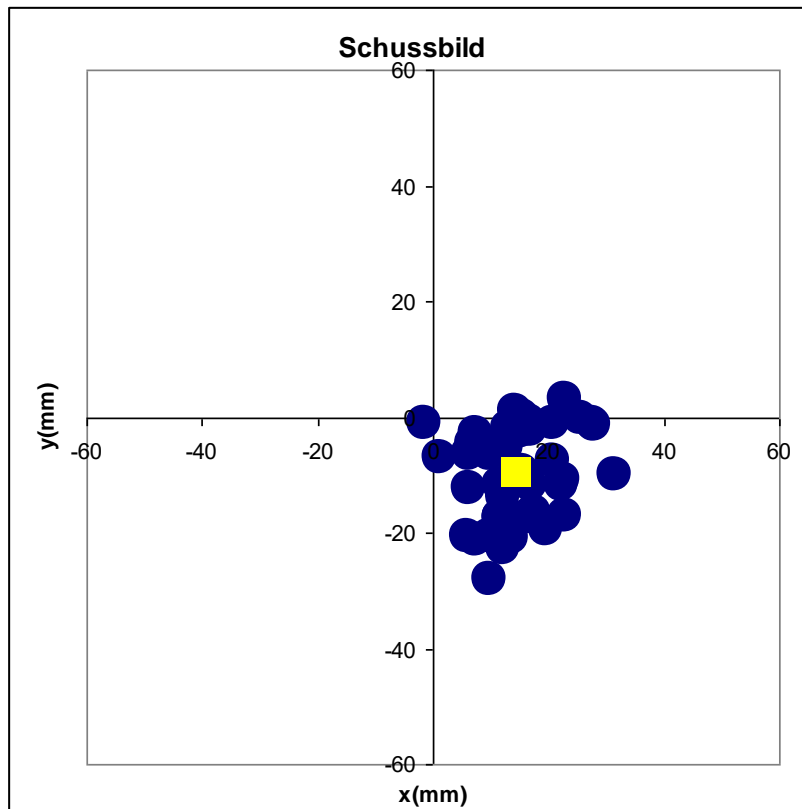


Abb. 4.31: Schussbild für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung1/Teflon, 09.07.2010/08:21

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 offener 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 4.32 mit dem Verlauf der v_2 .

EVOLUTION / Bettung 1 / Teflon: Mun.: Remington; v₂ - Entwicklung

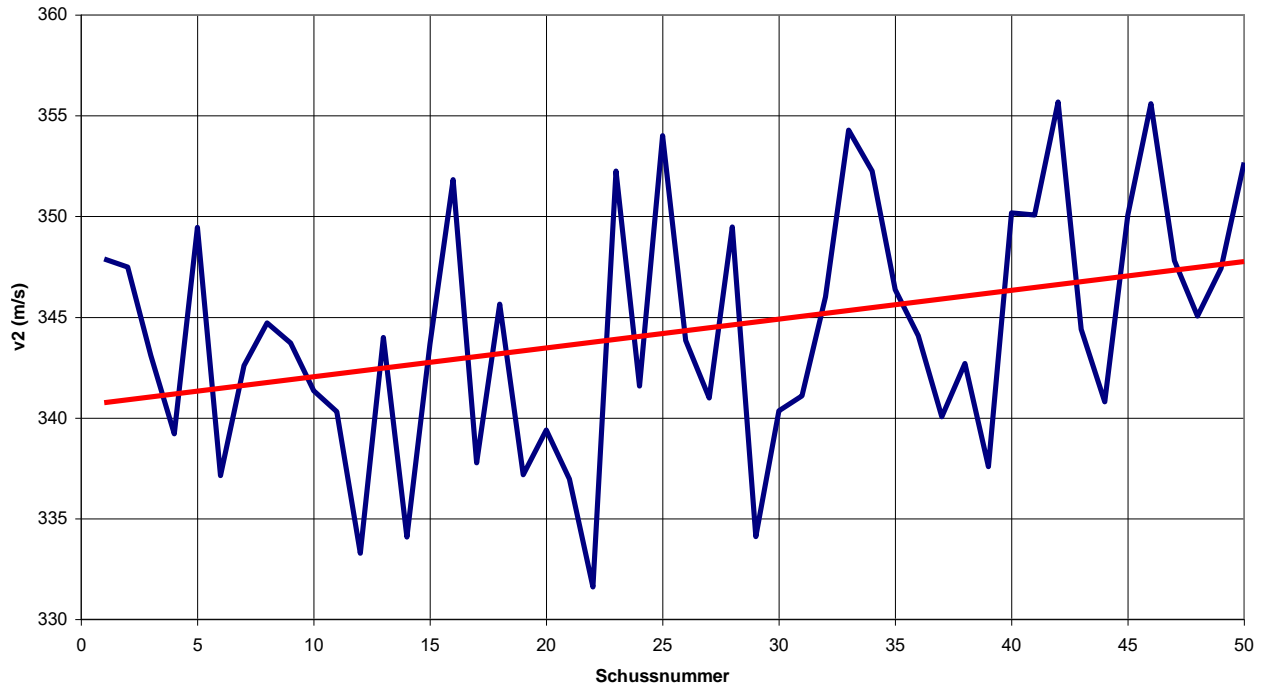


Abb. 4.32: v_2 -Verlauf von Schuß zu Schuß für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung1/Teflon für die Munition Remington Standard Velocity Round Nose

Die lineare Trendentwicklung (rote Linie in Abbildung 4.32) zeigt, dass die v_2 mit zunehmender Schusszahl höher wird. 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 Lauschwingungen heraus großen Einfluss auf den $\langle \text{Ablage} \rangle$ -Wert haben. Ein Erklärungsversuch wie es zu dieser v_2 -Tendenz kommen kann, wird in Kapitel 4.3.3 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.

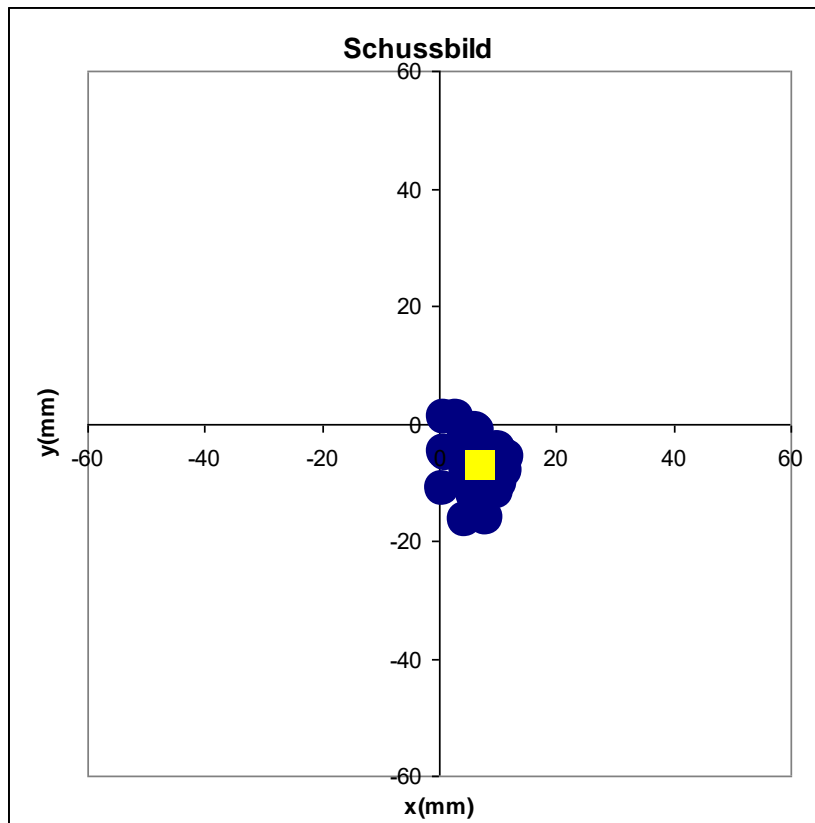


Abb. 4.33: Schussbild für Gewehr ANSCHÜTZ, geschossen aus HLSZ-Schießbock, 09.07.2010 / 09:34

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

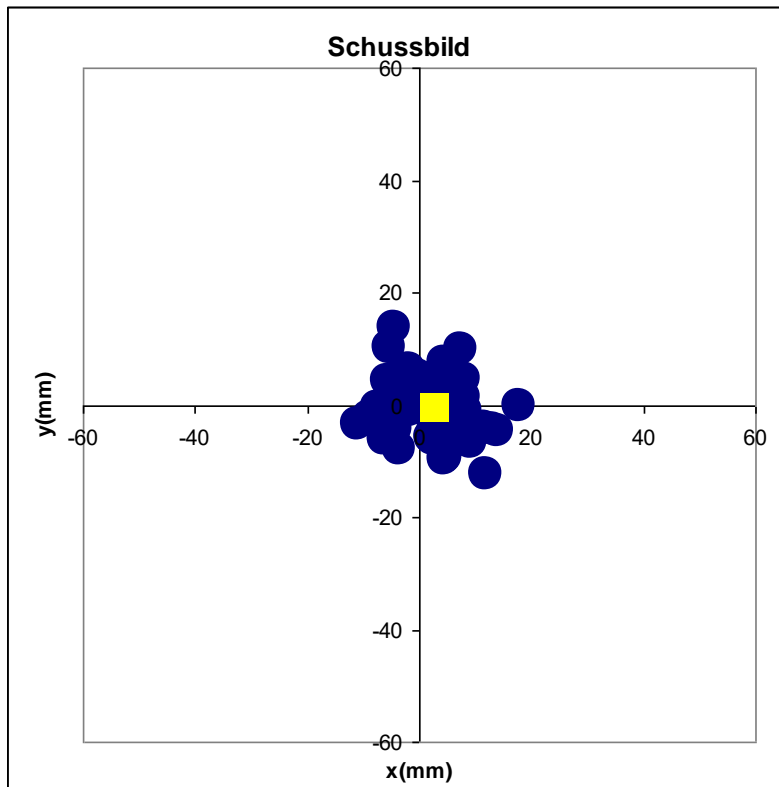


Abb. 4.34: Schussbild für Gewehr ANSCHÜTZ, Schütze: Johannes SEQUARD-BASE mit angelegter Schützenkleidung in der Wettkampfstellung liegend (Pritsche), 09.07.2010/12:29

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. Dieser Schützenfehler ist hier etwas höher als es den Schießeleistungen von Schütze Johannes SEQUARD-BASE unter normalen Wettkampfbedingungen entspricht. Die Verhältnisse im Schießkanal sind räumlich und vor allem beleuchtungsmäßig nicht mit den üblichen Gegebenheiten auf einem Schießstand vergleichbar. 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 Vzlt TAUBER zur Verfügung gestellten Wettkampfmunitionen. Dabei handelt es sich um 3 verschiedene Fertigungslose der Munition R50.

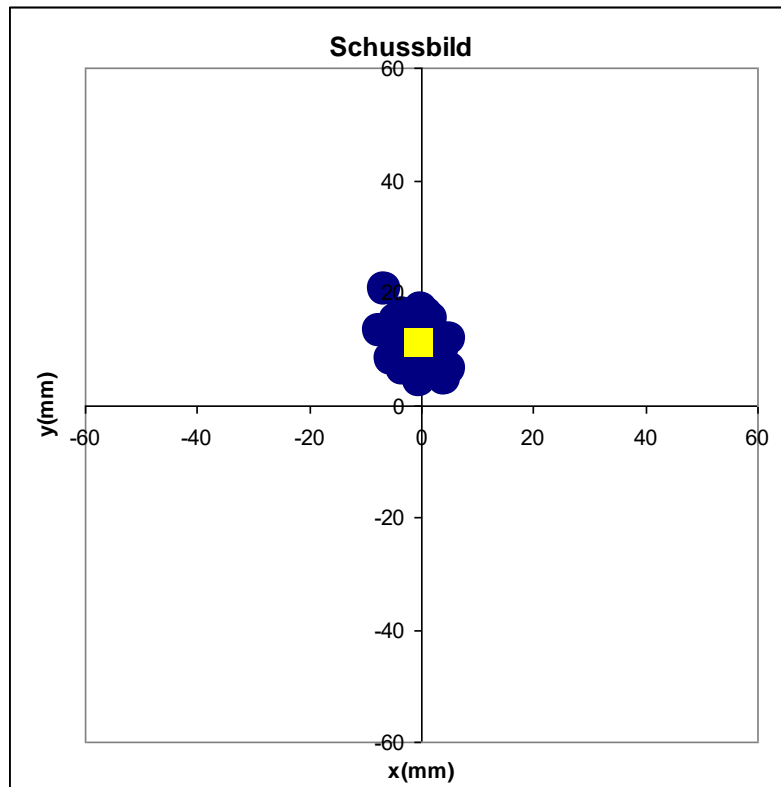


Abb. 4.35: Schussbild für Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon, Munition: R50 Los 476 DC 435 (Kurzbezeichnung Mun A), 21.07.2010/10:53

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

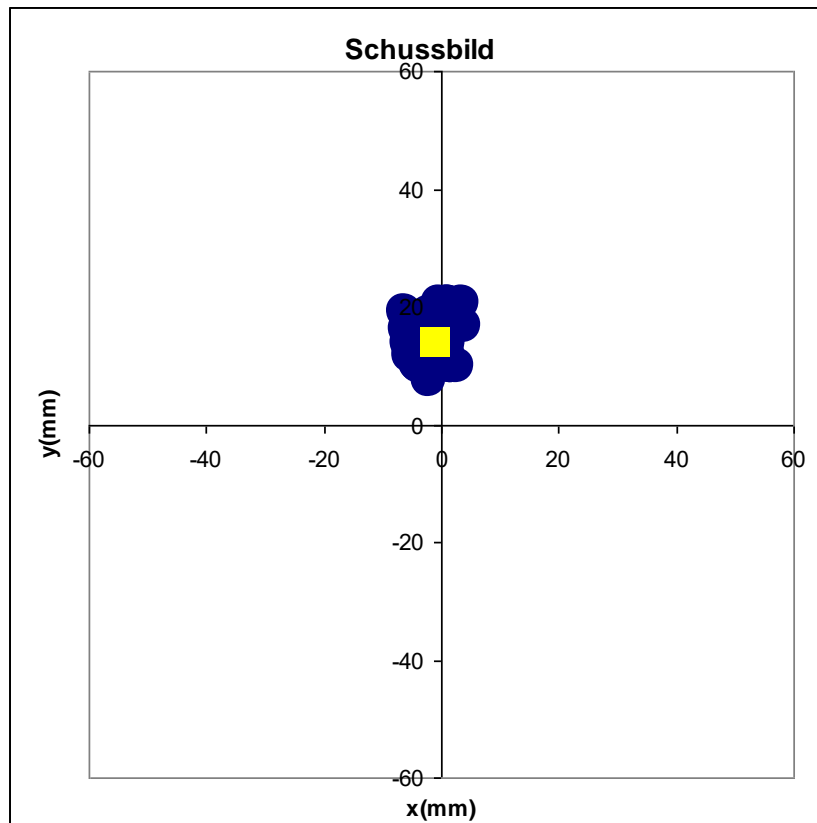


Abb. 4.36: Schussbild für Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon, Munition: R50 Los 597 FB 965 (Kurzbezeichnung Mun B), 21.07.2010/13:58

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

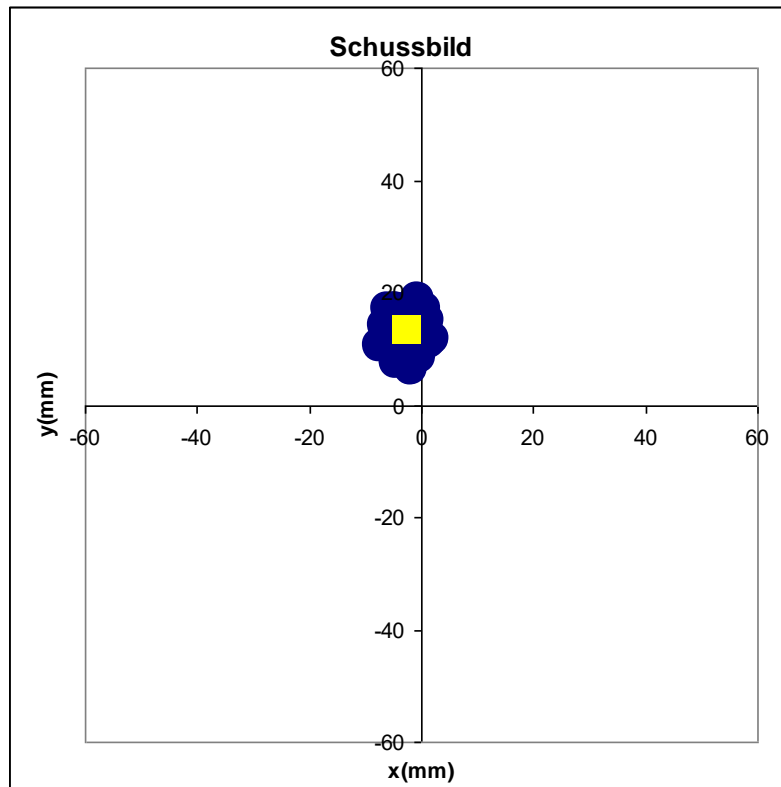


Abb. 4.37: Schussbilder für Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon, Munition: R0 Los 418 ID 176 (Kurzbezeichnung Mun C), 21.07.2010/13:06

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

In Tabelle 4.4 sind die Ergebnisse bezüglich der drei Munitionslose die mit dem Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER geschossen werden, zusammengestellt.

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

Wie aus Tabelle 4.4 ersichtlich, 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 verwendeten Bettungen (Bettung5/Teflon) für EVOLUTION und EVOLUTION/TAUBER sind gleich. Unter der Annahme einer ähnlichen

Streuung bei der Auswertung des Schussbildes wie bei der Verwendung der R100 Munition beim Versuchsgewehr EVOLUTION von $\sigma = \pm 0.12 \text{ mm}$ wäre das Minimum bei Mun C mit einer $\langle \text{Ablage} \rangle = 3.2 \text{ m}$ signifikant. In Kapitel 6 werden diese experimentellen Ergebnisse den Berechnungsergebnissen mit Modell ROSSI gegenüber gestellt.

4.4 Einfluss der Lauftemperatur auf die v_0 (Schätzung)

Der vorliegende Abschnitt versucht auf der Basis einer zum Teil sehr groben Schätzung den Einfluss einer sich langsam ändernden Lauftemperatur auf die v_0 zu untersuchen. Damit könnten systematische Trends in den v_0 -Werten der einzelnen Schüsse einer Serie vielleicht ein bisschen besser verstanden werden. Die Stabilität der mittleren v_0 über eine volle Wettkampfdistanz ist von wesentlicher Bedeutung. Abbildung 4.32 zeigt sehr deutlich den Trend einer im Mittel über die 50 Schuss einer Serie zunehmenden v_0 (bzw. hier gemessen als v_2). Wie aus den in Kapitel 5 noch zu erläuternden Rechenresultaten folgt, kann die v_0 -Drift das Schussbild bzw. den $\langle \text{Ablage} \rangle$ -Wert aus laufschwingungsphysikalischen Gründen empfindlich beeinflussen.

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

4.4.1 Energiebilanz eines Kleinkaliberschusses

Für die Abschätzung verwendete Grunddaten und Annahmen:

Gewehr: Versuchsgewehr EVOLUTION im Schießbock (starr) eingespannt.

Lauf: Länge $L = 69 \text{ cm}$

Kaliber: $D_i = 5.56 \text{ mm}$

Außendurchmesser: $D_a = 23.4 \text{ mm}$

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

Munition:

Pulvermasse $m_p = 0.0841 \text{ g}$

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

Geschoßmasse $m_G = 2.6 \text{ g}$

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

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 den Autoren nicht gelungen einen Wert für den Gleitreibungskoeffizienten „Bleigeschoß gefettet“ gegen „Laufstahl“ zu erhalten. Daher wird als grobe 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 sehr grober 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 $T = 1628^\circ\text{C}$

Die grundlegende Energiegleichung/Energiebilanz lautet:

$$E_0 = E_{kt} + E_{kr} + E_{kGas} + E_{Gas} + E_{Einpr} + E_{Pat} + E_{L+G} \quad 4.1$$

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

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

E_{kr} Rotatorische kinetische Energie im Geschöß

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

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

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

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

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

E_{Einpr} Geschößeinpressenergie in die Felder/Züge

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

$$E_{Einpr} = 18.67 J$$

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

$$E_{Pat} = 6.22 J$$

E_{L+G} Wärmeenergie im Lauf (Stahl) und im Geschöß (Blei). Sie entspricht der Reibungsenergie! Diese Energie ergibt sich aus der Grundgleichung 4.1 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 $c = 0.129 \frac{\text{J}}{\text{g K}}$ z.B. nach [13] ergibt sich aus $E_G = m_G c \Delta T$ eine Temperaturerhöhung von

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

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

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 $E_L \sim 35 \text{ J}$ bereits ermittelt worden.

- b) Durch die heißen Pulvergase. Die Energie $E_{LPulver}$ die von den Pulvergase auf den Lauf in seiner vollen Länge L übertragen werden könnte, ergibt sich zu

$$E_{LPulver} = \alpha A (T_{Pulver} - T_{Lauf}) t_w$$

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

$$E_{LPulver} \sim 12 J$$

Der gesamte Energieeintrag pro Schuss wäre demnach

$$E_{Lges} = E_L + E_{LPulver} = 47 J$$

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

$$m_L = \varphi V_L = 2.17 kg$$

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

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

ergibt sich die Temperaturerhöhung pro Schuss in sehr grober Näherung zu

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

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 $\Delta T \sim 0.035 K / Schuss$ 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 relativ realistisch. Es kommt tatsächlich zu keinen starken Erwärmungen. Man darf nicht vergessen, 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 relativ wenig Energie umgesetzt.

4.4.2 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 (Hook'schen) 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 Hook'schen 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 4.4.1 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 .

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

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 4.38 illustriert die Verhältnisse des Geschoßes im Lauf.

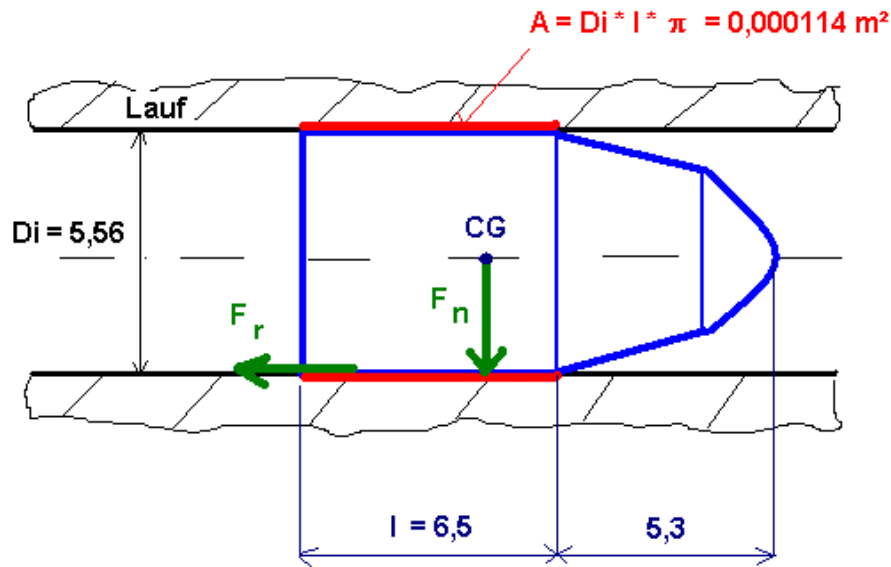


Abb. 4.38: Das Bleigeschoß im Lauf, Geometrie und Kräfte

Die Grenze des Hook'schen 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:

$$p = \frac{Q_R}{\mu L A} \quad 4.2$$

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 als vereinfachte 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

$$U = D_i \pi \quad 4.3$$

Die allgemeine thermische Längenänderung dU/dT angewendet auf den Laufinnenumfang U ist durch

$$\alpha = \frac{1}{U} \frac{dU}{dT} \quad 4.4$$

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 Differenzialgleichung 4.4 nicht analytisch gelöst werden. Es genügt eine Linearisierung $dU \Rightarrow \Delta U$ und $dT \Rightarrow \Delta T$. Aus den Gleichungen 4.3 und der linearisierten Gleichung 4.4 folgt für den Laufinnendurchmesser nach der Temperaturänderung die lineare Gleichung

$$D_i' = D_i (1 + \alpha \Delta T) \quad 4.5$$

Es gelte ferner die Abkürzung

$$k = 1 + \alpha \Delta T \quad 4.6a$$

und somit

$$D_i' = D_i k \quad 4.6b$$

Aus Abbildung 4.39 werden die weiteren Überlegungen ersichtlich.

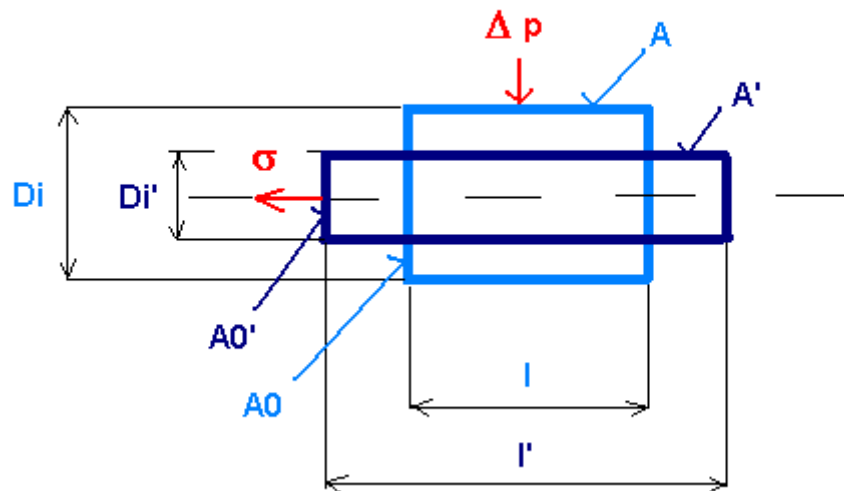


Abb. 4.39: Schematische Darstellung der Formänderung des Bleigeschoßes bei Temperaturabnahme. Hellblau: Geschoß vor der Abkühlung des Laufes, Dunkelblau: Geschoß nach der Abkühlung des Laufes; Das Geschoß sei nun einfachheitshalber als Zylinder dargestellt.

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:

$$\Delta p = p' - p \quad 4.7$$

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:

$$\sigma A_0' = \Delta p A' \quad 4.8$$

Es gilt das Hook'sche Gesetz

$$\sigma = E \varepsilon \quad 4.9$$

mit $E = 16 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2}$, dem Elastizitätsmodul für Blei [17] und der Dehnung ε zu

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l' - l}{l} \quad 4.10$$

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

$$\varepsilon_q = \frac{D_i' - D_i}{D_i} \quad 4.11$$

Einsetzen der Gleichungen 4.5 und 4.6 in Gleichung 4.11 liefert

$$\varepsilon_q = \alpha \Delta T \quad 4.12$$

Den Zusammenhang zwischen ε und ε_q liefert der Betrag der Poissonzahl m_{Po} . Nach [16] beträgt die Poissonzahl für $m_{Po} = 2.326$. Es gilt im Zusammenhang mit der Poissonzahl:

$$\varepsilon = -m_{Po} \varepsilon_q \quad 4.13$$

Mit Gleichung 4.12 folgt

$$\varepsilon = -m_{Po} \alpha \Delta T \quad 4.14$$

Für die Zylinderseitenflächen (Geschoßflanken) gilt

$$A = D_i \pi l \quad 4.15a$$

$$A' = D_i' \pi l' \quad 4.15b$$

Aus Gleichung 4.10 kann l' zu

$$l' = l (\varepsilon + 1) \quad 4.16$$

ausgedrückt werden. Einsetzen der Gleichungen 4.16 und 4.6b in Gleichung 4.15b liefert:

$$A' = A k (\varepsilon + 1) = D_i \pi l k (\varepsilon + 1) \quad 4.17$$

Für die Zylinderstirnflächen gilt:

$$A_0 = \frac{D_i^2 \pi}{4} \quad 4.18a$$

$$A_0' = \frac{D_i'^2 \pi}{4} \quad 4.18b$$

Gleichung 4.6b in 4.18b eingesetzt ergibt

$$A_0' = \frac{D_i^2 k^2 \pi}{4} \quad 4.19$$

Jetzt können die Gleichungen 4.9, 4.17 und 4.19 in Gleichung 4.8 eingesetzt werden. Damit folgt

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

Mit den Gleichungen 4.6a und 4.14 folgt damit weiter

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

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

$$\Delta p = - \frac{E D_i m_{Po} \alpha \Delta T}{4l (1 - m_{Po} \alpha \Delta T)} \quad 4.20$$

ergibt. Eine Abkühlung bedeutet $\Delta T < 0$, sodass eine Drucksteigerung $\Delta p > 0$ folgt, während eine Erwärmung mit $\Delta p < 0$ physikalisch richtig wiedergegeben wird. Unter Einschluss von Gleichung 4.20 soll jetzt im nächsten Schnitt die – linearisierte – Abhängigkeit der Reibungsenergie von der Temperaturänderung berechnet werden. Aus Gleichung 4.2 folgt:

$$Q_R = p A \mu L$$

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

Man erhält die Änderung der Reibungsenergie zu

$$\Delta Q_R = Q_R' - Q_R = (p' A' - p A) \mu L \quad 4.21$$

Mit $p' = p + \Delta p$ und Gleichung 4.17 folgt

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

und mit den Gleichungen 4.6a, 4.14 und 4.20 ergibt sich

$$\Delta Q_R = \left[\left(p - \frac{E D_i m_{p0} \alpha \Delta T}{4l(1 - m_{p0} \alpha \Delta T)} \right) (1 + \alpha \Delta T) (1 - m_{p0} \alpha \Delta T) - p \right] \mu A L \quad 4.22$$

Nach der Ausmultiplikation der []-Klammer von Gleichung 4.22 werden alle Terme $(\alpha \Delta T)^n$ mit $n = 2$ 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

$$\Delta Q_R \cong - \frac{\mu A L \alpha E D_i m_{p0}}{4l} \Delta T = - \frac{\mu E m_{p0} D_i^2 \pi L \alpha}{4} \Delta T \quad 4.23$$

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

$$v_0' = \sqrt{v_0^2 - \frac{2 \Delta Q_R}{m_G}} \quad 4.24$$

Ausgehend von den in diesem Kapitel niedergeschriebenen Daten zum Versuchsgewehr EVOLUTION kann Gleichung 4.23 vereinfacht werden zu

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

Bei einer 50 Schuss-Serie ($\Delta T_{\text{gesamt}} \sim 1.75^\circ K$) und einer $\langle v_0 \rangle = 346 m/s$ ergeben sich nach Gleichung 4.24

$$\mu = 0.30 \quad \dot{v}_0 = 349.6 \text{ m/s} \quad \Delta v = 3.6 \text{ m/s}$$

$$\mu = 0.25 \quad \dot{v}_0 = 349.0 \text{ m/s} \quad \Delta v = 3.0 \text{ m/s}$$

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

Schlussfolgerungen:

- Die theoretischen Werte liegen in der Größenordnung der experimentell beobachteten Werte
- Die Munition R100 scheint eine sehr gute, da diesbezüglich sehr stabile Munition zu sein. 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. Sie sind aber nur verwendbar für jeweils eine feststehende Munition. Das heißt, wie verhält sich eine Munition von Anfang bis zum Ende der Schussserie. Ein Vergleich verschiedener Munitionen ist nur unter Beachtung der Energiebilanzen (ΔT -Werte) möglich. Es erscheint jedoch fraglich, ob in Anbetracht der vielen Näherungen derart „feinfühlig“ Schlussfolgerungen gezogen werden sollen.
- 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. Dieser Einwand ist sicher teilweise berechtigt; 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 deutet aber schon auf ein systematisches Verhalten nach den Gleichungen 4.23 und 4.24 hin.
- Auf die Menge und Qualität der Geschoßfettung ist zu achten. Wenig oder schlechtes 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 4.40 bis 4.42 drei v -Verläufe dargestellt.

EVOLUTION: Bettung 5 - Teflon / Mun: R100 $\langle v_2 \rangle = 349,0 \pm 1,45 \text{ m/s}$ / $R = 3,57 \text{ mm}$

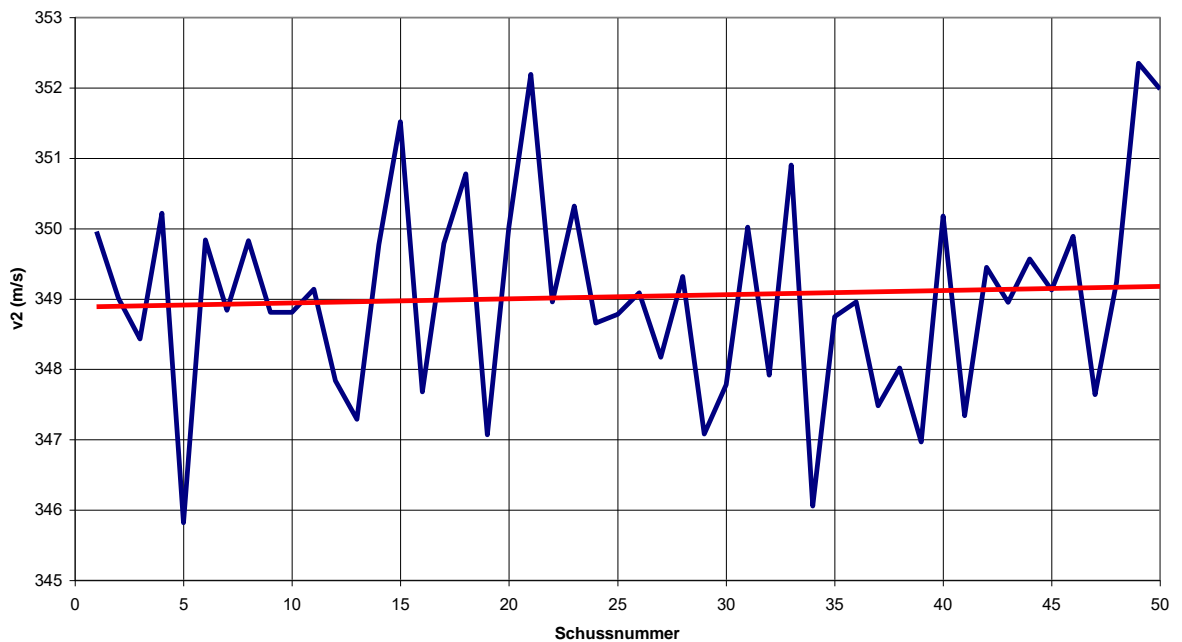


Abb. 4.40: Geschwindigkeitsverlauf bei Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung5/Teflon mit der Munition R100

EVOLUTION/Tauber: Bettung 5 - Teflon / Mun: 418ID176 $\langle v_2 \rangle = 333,8 \pm 1,86 \text{ m/s}$ / $R = 3,20 \text{ mm}$

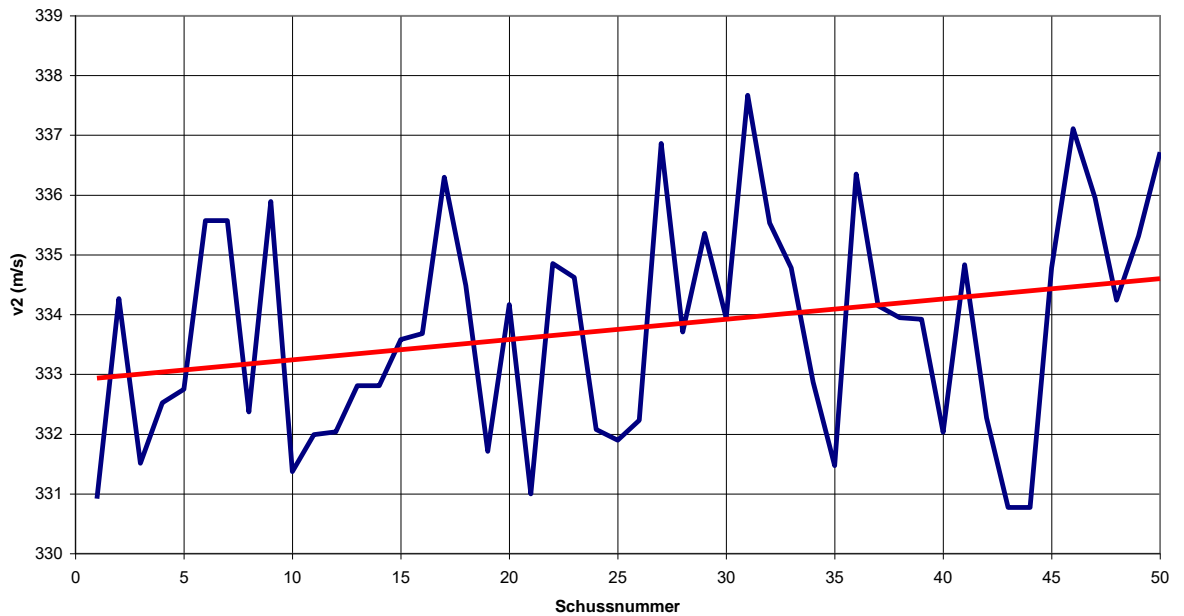


Abb. 4.41: Geschwindigkeitsverlauf bei Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung5/Teflon mit der Munition R50 Los 418ID176

Der experimentell gemessene schlechteste v -Verlauf wird beim Versuchsgewehr EVOLUTION mit der Munition Remington erhalten. Die folgende Abbildung ist eine Wiederholung von Abbildung 4.32.

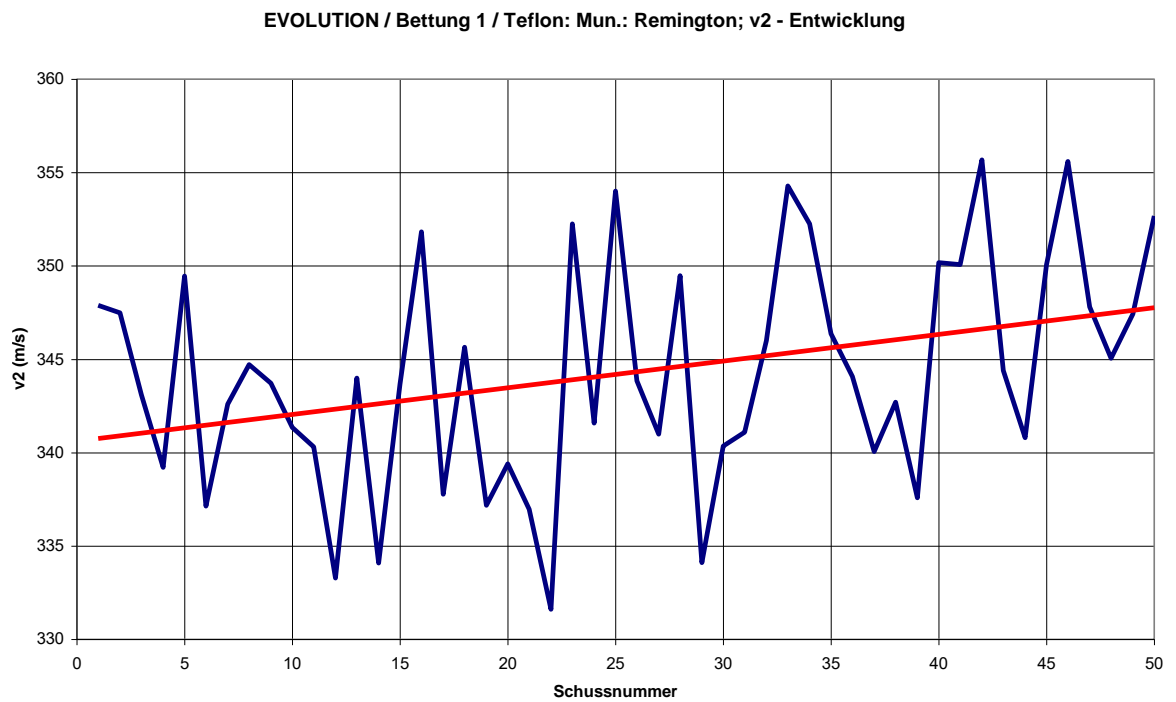


Abb. 4.42: Geschwindigkeitsverlauf bei Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung1/Teflon mit der Munition Remington

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

5. Theoretische Berechnungen mit ROSSI

Zur Unterstützung der Interpretation der experimentellen Untersuchungen sowie für allgemeine theoretische Überlegungen zur Ableitung von Optimierungsvorschlägen wird das Versuchsgewehr EVOLUTION und das Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ mit ROSSI modelliert.

5.1 Modellierung der Munition

5.1.1 Verwendete Munitionsdaten

Es wird für alle Berechnungen mit ROSSI stets der gleiche Datensatz, mit Ausnahme der Pulvermasse, wie auszugsweise in Tabelle 5.1 ersichtlich ist, verwendet. Für die in den theoretischen Untersuchungen gerechneten verschiedenen v_0 -Werte (v_0 -Scan) wird nur die Pulvermasse variiert.

Größe	Maßzahl
Kaliber	5.56mm
Geschoßmasse	2.6g
Treibladungsmasse	0.08410g für $v_0 = 346\text{m/s}$ bei EVOLUTION
Dichte Treibladung	1600kg/m ³
Spezifische Energie	3700J/g
Pulverkorndurchmesser	0.25mm
Inneres Patronenvolumen	1.3cm ³
Sebertfaktor	0.5
Ausziehwiderstand	200N
Abstand Geschoß-Patronenboden	10mm
Schwerpunkt von Geschoßspitze	6.64mm
Geschoß-Rollträgheitsmoment	9.23 10 ⁻⁶ gm ²
Geschoß-Nickträgheitsmoment	27.27 10 ⁻⁶ gm ²

Tabelle 5.1: Eckdaten für die Modellierung der KK-Munition bei den Berechnungen mit ROSSI

Da für die Berechnungen der Laufschwingungen primär die Innenballistik entscheidend ist, wird auf die Angabe der außenballistisch wirksamen Parameter (aerodynamische Beiwerte) hier verzichtet. Für einen Einzelschuss gerechnet mit dem Simulationsprogramm ROSSI (dem tatsächlichen Programm) wird exakt mit den in Tabelle 5.1 angegebenen Werten gerechnet. Um eine Trefferbildsimulation mit dem Programm ROST durchzuführen, werden die in Kapitel 3.3 Abschnitt ROST angeführten Größen statistisch variiert, sodass sich eine Streuung der v_0 von ca. $\pm 2\text{m/s}$ bis $\pm 2.2\text{m/s}$, je nach tatsächlicher v_0 , ergibt.

5.1.2 Das „Konzept der radialen Exzentrizität“

Werden entsprechend den Möglichkeiten einer einfachen Simulation die Munitionsparameter, mit Ausnahme der radialen Exzentrizität variiert, um die Streuung der v_0 zu modellieren, so führt das zu einer rein vertikalen

Trefferbildstreuung. Es gibt wohl in ROSSI die Wechselwirkung Geschöß-Lauf, jedoch bedeutet die Streuung der v_0 per se keine „Inanspruchnahme“ dieser radial zur Geschößbewegung im Lauf gerichteten Wechselwirkung. Speziell dann, wenn als Schütze der „starre Bock“ (= Schießbock) gewählt wird und das trifft für alle Berechnungen in diesem Bericht zu, gäbe es keine Auslösung transversaler Laufschwingungen durch radial wirkende Kräfte. Bei Verwendung eines dem wirklichen Schützen besser angepassten (weiche) Schützenmodells in ROSSI werden bedingt durch den Rückstoß und die damit verbundenen Drehmomente Drehbewegungen des Laufes hervorgerufen, die wieder entsprechend dem Trägheitsprinzip zu kleinen Verbiegungen des Laufes führen. Das sich durch diese „sehr flachen Kurven“ des Laufes bewegende Geschöß wirkt dann auch entsprechend mit einer transversalen Komponente auf den Lauf, wodurch transversale Laufbewegungen hervorgerufen bzw. verstärkt werden. Diese Effekte können aber beim starren Bock nicht in Rechnung gestellt werden.

Um nun dennoch den Einfluss transversaler Laufschwingungen theoretisch studieren zu können, wird dem Geschöß eine radiale Exzentrizität seiner Schwerpunktlage unterstellt. Mit dieser – leichten – radialen exzentrischen Schwerpunktlage ist mit zunehmender Geschößgeschwindigkeit im Lauf und der damit einhergehenden zunehmenden Rollbewegung (Drall) eine Zentrifugalkraft verbunden. Diese mit dem Drall rotierende Kraft wirkt nun so, dass über die Geschöß-Lauf-Wechselwirkung transversale Laufbewegungen herbeigeführt werden. Da der Anfangsrollwinkel der radialen Exzentrizität in ROST gleichverteilt um den gesamten Rollwinkelbereich von 2π (= 360°) modelliert wird, erhält man auf diese Weise in Kombination mit der v_0 -Streuung, realistisch verteilte Trefferbilder. Auf die radiale Trefferbildverteilung wirken in ROST somit einerseits, und maßgeblich, eine Streuung des aktuellen Wertes der radialen Exzentrizität pro Schuss sowie andererseits die v_0 -Streuung, da an verschiedene v_0 -Werte zwangsläufig unterschiedliche Zentrifugalkräfte gekoppelt sind.

In der Realität sind radiale Exzentrizitäten in der Geschößschwerpunktlage in unterschiedlicher Ausprägung vorhanden. Leider sind aus der Literatur keine konkreten Zahlenwerte für KK-Geschöße eruierbar. Das kann mehrere Ursachen haben. Die genaue Messung der Unwucht der relativ kleinen KK-Geschöße ist sehr aufwendig. Durch die Messung selbst kann das doch verhältnismäßig weiche Bleigeschöß leicht deformiert werden. Selbst wenn man Kenntnis einer entsprechenden Unwucht hat, wäre eine Korrektur derselben technisch-ökonomisch gesehen, unrentabel. Als Anmerkung sei erwähnt, dass bei Artilleriegranaten (z.B. Kaliber 15.5 cm) sehr wohl die Unwucht jeder Granate vermessen und korrigiert wird. Die Größenordnung einer solchen Unwucht an einem KK-Geschöß dürfte real im Bereich einiger $10 \mu m$ liegen. Für die Rechnungen mit ROST werden aber Exzentrizitäten

im Bereich einiger $100\ \mu\text{m}$ aus den erwähnten simulationstechnischen Gründen angesetzt. Reale Ursachen der Exzentrizität können etwa sein:

- Kleine Inhomogenitäten in der Bleidichte des Geschoßes
- Leichte Asymmetrien in der Geschoßform
- Leichte Abweichungen der Geschoßachse von der Achse der Patronenhülse, wenn das Geschoß in der Hülse steckt
- Ein leichtes asymmetrisches Ausziehen des Geschoßes aus der Patronenhülse, während der anfänglichen Schussentwicklung.

Die beiden letztgenannten Ursachen führen dazu, dass die Geschoßachse auch im Lauf nicht mit der Laufachse zusammenfällt. Am Laufanfang, wenn sich das Geschoß in die Züge und Felder erst einpressen muss und der Felddurchmesser noch etwas größer ist als in den folgenden Laufabschnitten, ist das Geschoß um die Nick- und Gierachse etwas beweglicher. Bedingt durch die Weichheit des Bleis können auf diese Weise anfängliche leichte Schiefstellungen des Geschoßes (durch schiefes Ausziehen aus der Patronenhülse wie auch durch eine nicht koaxiale Geschoßposition in der Patrone) zu bleibenden radialen Exzentrizitäten der Schwerpunktlage führen.

Neben den tatsächlich vorkommenden eben geschilderten Ursachen einer radialen Geschoßunwucht wird die bewusste Verstärkung dieses Effekts bei der Simulation als „Konzept der radialen Exzentrizität“ bezeichnet. Es ist auch naheliegend, dass transversale Kräfte im Lauf/am Lauf direkt mit der Geschoßbewegung gekoppelt sein müssen und es wohl auch physikalisch plausibel erscheint, diese Effekte mit der Geschwindigkeit des Geschoßes zu kombinieren.

Im Gegenzug muss damit aber auch klargestellt werden, dass Trefferbildaussagen – mit ROST gerechnet – nie als absolute Angaben zu verstehen sind, sondern immer nur zu Relativaussagen bzw. Tendenzaussagen führen können.

5.2 Modellierung der Gewehre

In ROSSI werden nur die Hauptteile des Systems modelliert. Das heißt, der Schaft, die Visiereinrichtung oder das Abzugsystem werden nicht abgebildet. Der Verschluss mit dem darin beweglichen Schlagbolzen wird gemeinsam als Vollzylinder gerechnet.

5.2.1 Modellierung des Versuchsgewehres EVOLUTION

Die Länge des Verschlusssteils (Vollzylinders) beträgt 16 cm. Daran schließt eine zylindrische Laufkonstruktion mit 69 cm Länge, einem Innendurchmesser von 5,56 mm und einem Außendurchmesser von 2,34 cm an. Diese 69 cm stellen die innenballistisch wirksame Systemlänge dar, wobei dessen Ende somit die Mündung bildet. Das Material dieser beiden Teilstücke des Systems ist Stahl mit der Dichte $7800\ \text{kg/m}^3$ und dem E-Modul (Elastizitätsmodul) von $206\ \text{GN/m}^2$.

Nach der Mündung schließt aus Aluminium (Dichte 2700 kg/m^3 und E-Modul 70 GN/m^2) eine 16 cm lange überkalibrige Laufverlängerung mit Außendurchmesser 2,54 cm an (Innendurchmesser 16,6 mm). Es gibt keine konischen Formen in der Modellierung des Versuchsgewehres EVOLUTION. Die Dralllänge beträgt 40 cm. Als Masse des Gewehres werden 6,9 kg gerechnet. Das ist die Masse des gesamten realen Gewehres und nicht nur die Masse des modellierten Systems. Die Gesamtmasse wird benötigt, um den Rückstoß und die Steuergrößen für das Schützenmodul zu berechnen.

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen werden diverse Bettungspositionen verwendet. Um diese verschiedenen Positionen zu identifizieren, werden sie nummeriert. Nicht für alle Bettungspositionen werden Berechnungen mit ROSSI angestellt, umgekehrt gibt es zwei rein theoretische Bettungen. Bei diesen beiden Bettungen kann das System aus anderen praktischen Gründen nicht geklemmt werden, aber diese Positionen werden aus theoretischem Interesse gerechnet. Die Nummern der Bettungspositionen und deren Lage entlang dem System sind aus Tabelle 5.2 ersichtlich.

Bettung	Lage (cm)				Anmerkungen
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
00	0.0	10.0			10
0	8.0	18.0			10
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 5.2: Die Bettungen für die Simulation des Versuchsgewehres EVOLUTION mit ROSSI. Bezugspunkt (Koordinatenursprung) 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 Klemnteile.

Die verwendeten Bettungsmaterialien und die zugeordneten Federkonstanten sind aus Tabelle 5.3 ersichtlich. Die Werte der Federkonstanten dürfen nur als sehr grobe Schätzungen verstanden werden, die aber dennoch die Tatsache berücksichtigen, dass der Lauf an zwei einander gegenüberliegenden Seiten gleichsam mit je einer Feder gedrückt beziehungsweise geklemmt wird.

Bettungsmaterial	Federkonstante (MN/m^2)
Stahl	$32.1 \cdot 10^5$
Teflon	$6 \cdot 10^5$
Gummi	$8 \cdot 10^2$

Tabelle 5.3: Bettungsmaterialien mit den für ROSSI zugeordneten Federkonstanten

Anmerkung:

Da Gleichung 3.1 mit Querkräften arbeitet, gilt für die Federkonstante die Dimension N/m^2 statt wie üblich N/m .

Wesentlicher als die Zuordnung zu bestimmten konkreten Bettungsmaterialien ist, ob die Bettung sehr hart, hart oder weich ausfällt, das heißt ob Lauschwingungen durch die Bettung „durchtunneln“ können wie es etwa bei „Gummi“ der Fall ist. Einen Querschnitt der Modellgeometrie von EVOLUTION zeigt Abbildung 5.1.

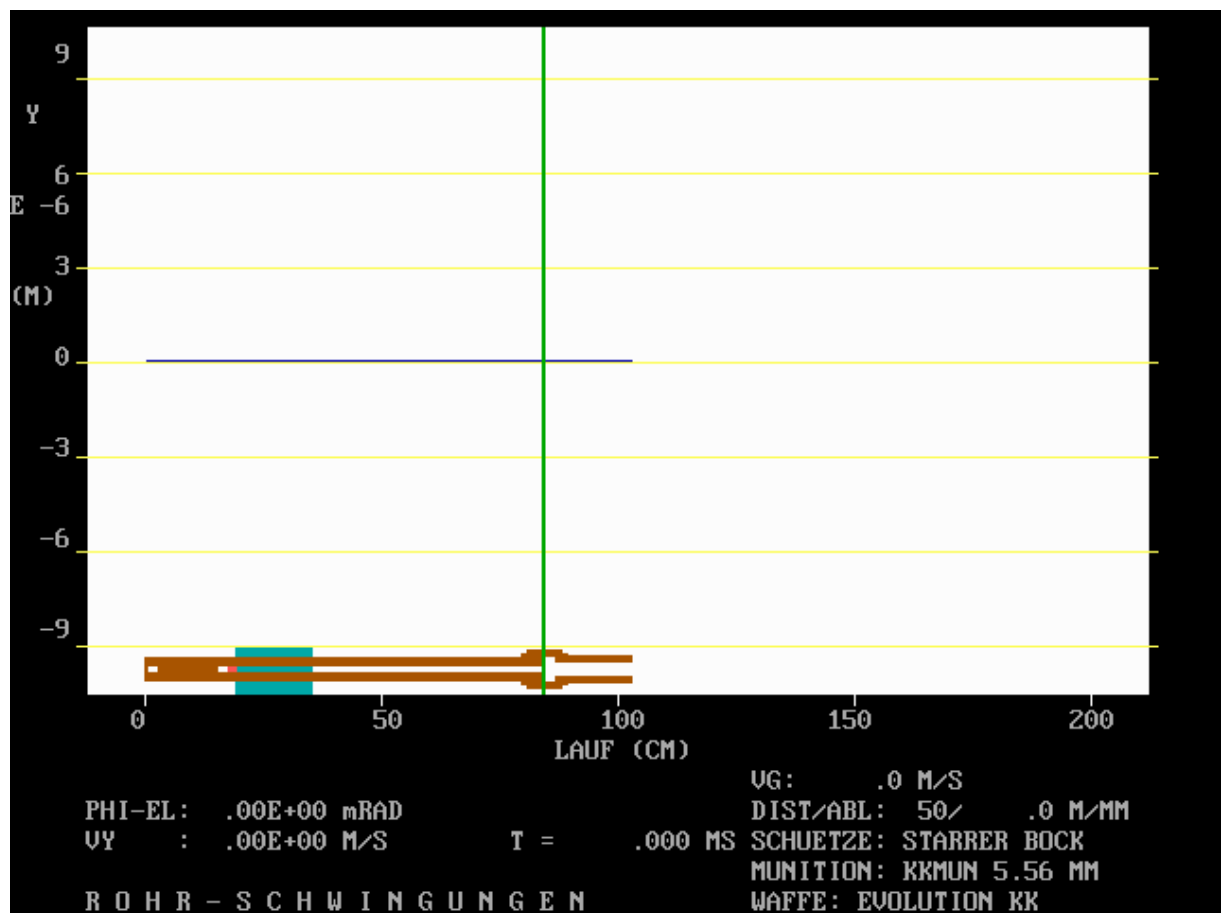


Abb. 5.1: Im unteren Diagrammteil ist ein Querschnitt der Modellgeometrie von EVOLUTION ersichtlich.
 Rot: Position des Geschosses
 Türkis: Position der Bettung (hier Bettung 5)
 Der vertikale grüne Strich markiert die innenballistisch wirksame Mündungsposition. Anmerkung: Das kleine weiße Rechteck am linken Ende des Systembildes ist ein Artefakt der Bilddarstellung und hat keine physikalische Bedeutung.

5.2.2 Modellierung des Vergleichsgewehres ANSCHÜTZ

Das System des Versuchsgewehres EVOLUTION ist aus der Fertigung der Firma ANSCHÜTZ. Daher ist eine sehr ähnliche Modellierung nicht überraschend. Die Länge des Verschlusssteiles beträgt wieder 16 cm. Der innenballistisch relevante Laufteil ist 66 cm lang. Die ersten 20.5 cm des Systems haben einen Außendurchmesser von 3 cm, der weitere Lauf einen Außendurchmesser von 2.25 cm bis zu einer Position 7.5 cm vor der Mündung. Dieser letzte Laufteil bis zur Mündung ist außen 2.4 cm im Durchmesser. Es gibt keine Laufverlängerung. Die Bettung ist fix zwischen 0.0 cm und 19.5 cm und arbeitet mit der Federkonstante 3000 MN/m^2 , um das Holz des Schaftes näherungsweise abzubilden. Der Grund für diese niedere Federkonstante zur Modellierung der Bettung im Gegensatz

zum Versuchsgewehr EVOLUTION liegt darin, dass einerseits die Fixierung mit dem Schaft nur einseitig erfolgt (daher nur „halber“ Wert) und andererseits besteht die Verbindung bloß aus 2 Schrauben. Die niedere Federkonstante drückt dieses „angelehnt Sein“ des Schaftes an das System aus und wird im Zuge der Diskussion zur Dynamik in Kapitel 5.3 angesprochen. Die Dralllänge beträgt 40 cm. Die Gesamtmasse schlägt mit 5.81 kg zu Buche. Einen Querschnitt der Modellgeometrie von ANSCHÜTZ zeigt Abbildung 5.2.

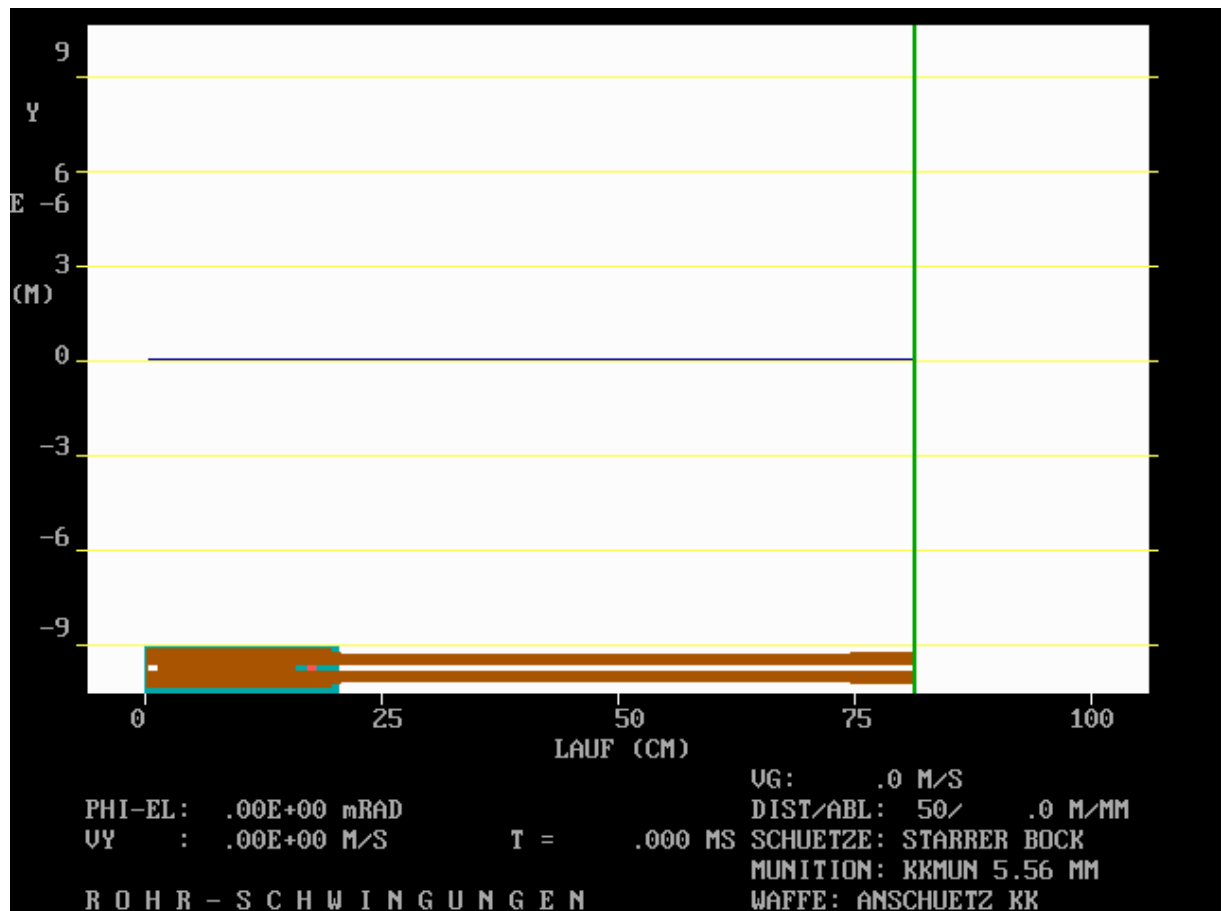


Abb. 5.2: Im unteren Diagrammteil ist ein Querschnitt der Modellgeometrie vom Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ ersichtlich. Darstellung analog zu Bild 5.1, aber mit anderem Maßstab für Lauflänge und damit auch für die Durchmesser.

5.3 Allgemeine Modelleinstellungen

Ausgehend von den nun bekannten Geometrien der simulierten Gewehre und der verwendeten Munition sind noch Fragen zur geometrischen Auflösung entlang der Laufachse, der Schusszahl pro Serie und dem dynamischen Grundverhalten zu diskutieren.

5.3.1 Geometrische Auflösung

Dabei stellt sich die Frage mit welcher Segmentlänge Δx bzw. mit wie vielen Segmenten die modellierte Systemlängsachse berechnet werden soll. Zu diesem Zweck wird mit dem Programm ROSSI je ein Schuss auf 50 m Distanz mit einer radialen Exzentrizität von $100\ \mu\text{m}$ (Startrollwinkel 0° , das heißt vertikal nach oben zeigend) für jeweils eine andere Anzahl von Laufsegmenten gerechnet. Diese Abstimmung wird für das Versuchsgewehr EVOLUTION durchgeführt. Als Bettungsmaterial wird Stahl angesetzt. Es werden die Bettungen 0 und 4 untersucht, da hier der größte Unterschied in den frei schwingenden Lauflängen besteht.

Als Maß dient die Ablage im Ziel vom Haltepunkt. Dabei ist nicht die Zielablage selbst entscheidend, sondern die relative Konstanz der Ablage mit wachsender Laufsegmentanzahl. Begonnen wird damit das gesamte zu simulierende System, kurz als Lauf bezeichnet, in 10 Segmente zu teilen. Die Anzahl der Abschnitte/Segmente wird dann von Schuss zu Schuss bis auf 150 Segmente erhöht. Die Abbildung 5.3 (für Bettung 0) und Abbildung 5.4 (für Bettung 4) zeigen die Einzelschussablagen in Abhängigkeit von der Anzahl der Laufsegmente.

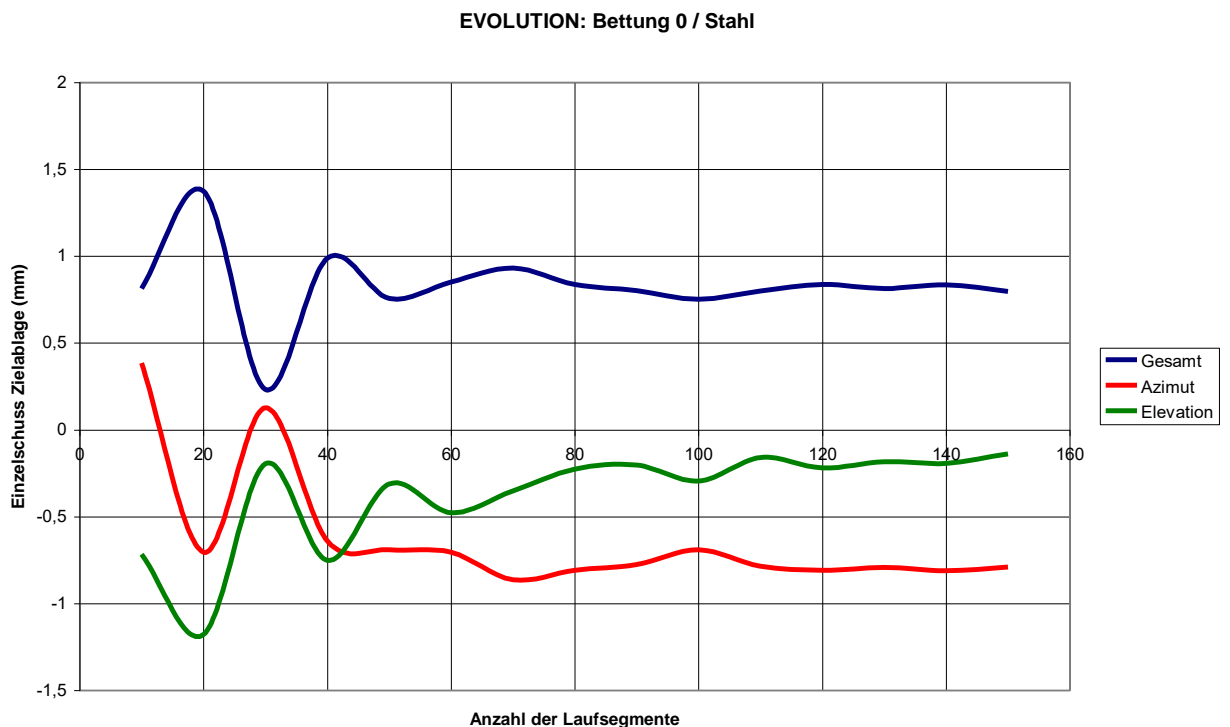


Abb. 5.3: Test der Laufsegmentanzahl für EVOLUTION Bettung 0/Stahl. Neben der Gesamtablage (blau) sind die Ablagen in Azimut (rot) und Elevation (grün) ersichtlich.

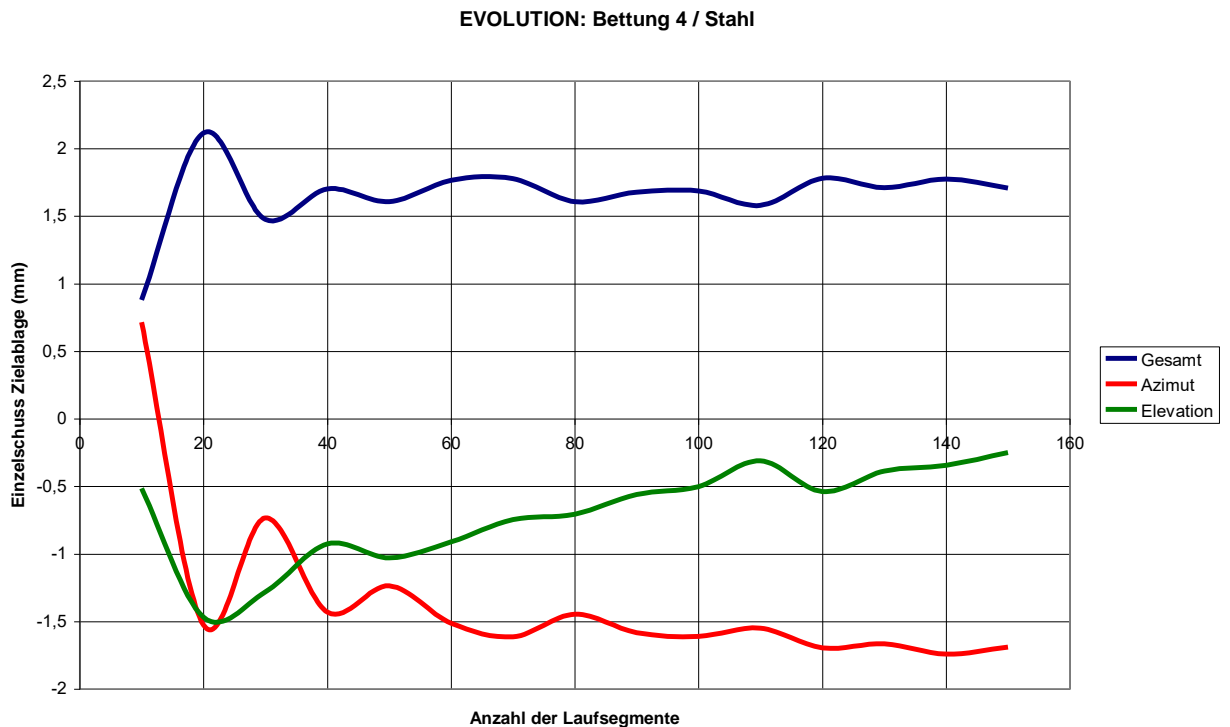


Abb. 5.4: Test der Laufsegmentanzahl für EVOLUTION Bettung 4/Stahl. Sonst analog wie bei Abbildung 5.3

Für die Festlegung der bestgeeignetsten Laufsegmentanzahl ist entscheidend, dass einerseits eine zu geringe Anzahl zu ungenauen Resultaten führt, während andererseits eine zu hohe Segmentanzahl sehr lange Rechenzeiten zur Folge hat. Nach einer visuellen Analyse der beiden Abbildungen 5.3 und 5.4 wird eine Segmentanzahl von 85 festgelegt. Eine Steigerung der Segmentanzahl bringt speziell für die Gesamtablage keine weitere relevante Verbesserung. Bei einer Gesamtlänge des simulierten Teils des Versuchsgewehres EVOLUTION von 103.5 cm beträgt die Segmentlänge daher ~ 1.22 cm. Da der simulierte Teil des Vergleichsgewehres ANSCHÜTZ nur eine Gesamtlänge von 82 cm aufweist, wird keine Neufestlegung getroffen, sondern ebenfalls mit 85 Segmenten gerechnet. Die Segmentlänge für ANSCHÜTZ beträgt daher ~ 0.96 cm.

5.3.2 Schusszahlen

Mit dem Programm ROST werden Trefferbilder über eine gewisse Anzahl von Schüssen gerechnet. Das Schießen von Trefferbildern ist auch eine der Hauptstützen der experimentellen Untersuchungen. Damit ist es nahe liegend, Trefferbilder bzw. Maßzahlen, die den Inhalt eines Trefferbildes in verdichteter Weise wiedergeben, als Schnittstellen zwischen Experiment und Theorie zu sehen.

Aufgabe des Schützen ist es, möglichst oft die Scheibenmitte zu treffen, das heißt, dass die Zielablagen der Einzelschüsse möglichst wenig weit

entfernt liegen vom mittleren Treffpunkt, der als Mittelwert über alle Schüsse der Serie errechnet wird. Die signifikante Maßzahl für das „Zusammenliegen“ der Einzelschüsse, also die „Kleinheit“ des Trefferbildes ist der mittlere Abstand (der Einzelschüsse) vom mittleren Treffpunkt. Für den Schützen im Wettkampf ist wichtig, dass der mittlere Treffpunkt in der Scheibenmitte zu liegen kommt. Für die vorliegenden Untersuchungen ist das aber nicht wichtig. Hier ist entscheidend wie „eng“ das Schussbild ist. Die mittlere Ablage vom mittleren Treffpunkt, in diesem Bericht mit „<Ablage>“ bezeichnet, ist die entscheidende Schnittstellengröße. Sie kann sowohl aus den experimentellen Trefferbildern ermittelt (siehe Kapitel 4) wie auch mit dem Programm ROST berechnet werden.

Aus praktischen und ökonomischen Gründen werden experimentelle Serien von 50 Schuss geschossen. So wäre es auch erstrebenswert mit ROST Schussserien von 50 Schuss zu berechnen. Sehr hohe Schusszahlen ergeben nämlich sehr lange Rechenzeiten.

Ein Problem bei der Simulation mit streuenden Anfangswerten liegt in der Realisierung eines geeigneten Zufallszahlengenerators. Die softwaremäßige Erzeugung von gleich- oder gaußverteilten Zahlenfolgen entspricht nicht dem tatsächlichen Zufallsprinzip. Von einer sogenannten SEED-Zahl ausgehend, die bei jeder Berechnung einer Zufallszahl auch selbst ihren Wert ändert, werden die Zufallszahlen nach einem mathematischen Algorithmus z.B. [18], so gesehen in einer pseudozufälligen Form, erstellt. Untersucht man eine z.B. gleichverteilte, hinreichend viele Elemente umfassende Zahlenfolge, so ist die Gleichverteilung nachweisbar. Lässt man die Berechnung der Zahlenfolge stets mit der gleichen SEED-Zahl beginnen, ergeben sich immer die gleichen Werte für die Zahlenfolge. Verschiedene anfängliche SEED-Zahlen ergeben verschiedene gleichverteilte Zahlenfolgen. Daher kommt die Bezeichnung „pseudozufällige“ Zufallszahlenerzeugung.

Es ist evident, dass nach nur wenigen simulierten Schüssen, also kleinen Schussserien mit ROST bezüglich der Maßzahl <Ablage> von Serie zu Serie sehr verschiedene Resultate erhalten werden. Erst mit hohen gerechneten Schusszahlen konvergiert die <Ablage> hin zu einem relativ stabilen Wert. Um dieses Konvergenzverhalten für die Berechnungen mit ROST zu prüfen, wird die Maßzahl <Ablage> für wachsende Schusszahlen pro Serie ermittelt. Diese Serien werden alle mit gleicher Anfangs-SEED-Zahl berechnet. Abbildung 5.5 zeigt das Resultat von <Ablage> bis zu einer Serie mit 1000 Schuss.

EVOLUTION: Schusszahlentest

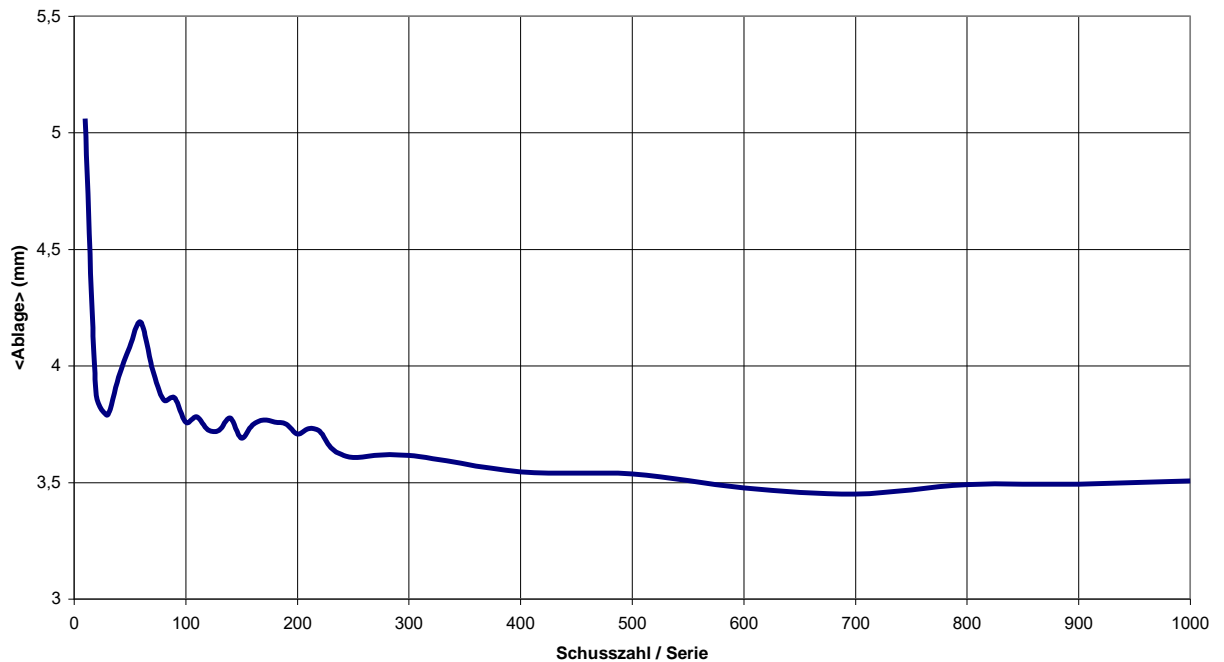


Abb. 5.5: Schusszahlentest mit Programm ROST für Versuchsgewehr EVOLUTION / Bettung 5 / Teflon. Anfangs SEED-Zahl stets 200000; Geschossmasse 2.6g; Pulvermasse 0.0841g; $v_0 \sim 346 \pm 2.2 \text{ m/s}$

Aus Abbildung 5.5 ist ersichtlich, dass bei einer Schussreihe mit 50 Schuss noch lange nicht ein stabiler <Ablage>-Wert erreicht wird. Aus praktischen Gründen, vor allem wegen der langen Rechenzeiten bei hohen Schusszahlen, wird dennoch entschieden mit ROST nur Serien mit 50 Schuss analog zu den experimentellen Schussreihen, zu rechnen. Das heißt, es ist nicht möglich absolute Aussagen aus den Trefferbildern mit ROST zu gewinnen. Die Berechnungen mit ROST konvergieren zu langsam. Ungeachtet dessen liefern die Resultate mit ROST jedoch sehr gute Relativaussagen bzw. Trends. Dazu werden alle berechneten Schussreihen stets mit der gleichen SEED-Zahl von 200000 begonnen. Damit steht bei jeder Schussreihe die gleiche Zufallszahlenfolge zur Verfügung. Das heißt, es werden 50 verschiedene Zusammensetzungen der Anfangsparameter für die Munition erzeugt, die entsprechend gleich- oder gaußverteilt sind und damit einen guten, wenn auch nicht perfekten (Konvergenz!) Querschnitt über alle Kombinationsmöglichkeiten liefern. Alle Schussreihen die mit ROST gerechnet werden, verwenden daher stets die gleichen 50 individuell voneinander verschiedenen Patronen.

Ein weiterer Aspekt der die gerechneten <Ablage>-Werte bestimmt, ist die Wahl der Streuung der radialen Exzentrizität. Eine direkte Ableitung dieses Parameters aus experimentell bestimmbar Größen ist nicht möglich. Daher wird ein Zahlenwert für die Streuung (=

Standardabweichung) der radialen Exzentrizität (hier 10% des Kalibers für das Versuchsgewehr EVOLUTION) gewählt, mit dem ähnliche <Ablage>-Resultate errechnet werden, wie man sie auch experimentell erhält. Die tatsächliche Streuung wird nicht nur von der Bewegung des Geschoßes im Lauf an sich bestimmt, sondern auch von einer Vielzahl weiterer Faktoren, die bis jetzt nicht in die Simulation Eingang gefunden haben, wie:

- das Verhältnis von Geschoßdurchmesser zur inneren Querschnittsfläche des Laufes
- der Abnützung des Laufes; wie gut oder schlecht sind die Ecken in den Zügen und die Kanten der Felder
- dem Choke; das ist eine leichte Verengung des Laufinnendurchmessers kurz vor dem Mündungsbereich. Der Choke dient unter anderem auch dazu, ein allfälliges Pendeln des Geschoßes im Lauf zu reduzieren.
- die Konsistenz des Bleies. Homogenität und Härte können zu unterschiedlichen Anpassungen des Geschoßes im Lauf führen. Bei nicht coaxialer Ausrichtung von Geschoß- zu Patronenhülsenachse kann bei weichem Blei ein minimales Pendeln auftreten.

Um diese und noch andere nicht simulierte Effekte global abzudecken, wird die Exzentrizität bzw. deren Streuung als Grobschätzung festgelegt.

5.4 Dynamisches Grundverhalten

Zum Testen der geometrischen und materialtechnischen Modellierung bezüglich des dynamischen Verhaltens werden Laufschrägungen in der Realität vermessen wie auch mit ROSSI berechnet. Die Phase der Schussentwicklung, wenn sich das Geschoß mit wachsender translatorischer Geschwindigkeit und zunehmenden Drall bewegt, bedeutet physikalisch eine dynamische Belastung für den Lauf, die mathematisch als Störterm in Gleichung 3.1 (rechter Gleichungsteil) abgebildet wird. Um aber den für die Modellierung sehr wesentlichen und bedeutend umfangreicheren linken Teil von Gleichung 3.1 hinsichtlich des dynamischen Verhaltens zu testen, soll die rein homogene Form von Gleichung 3.1 untersucht werden. Die homogene Gleichungsform von 3.1 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 Laufschrägungsdaten werden zwei typische Diagramme hinsichtlich der in den Laufschrägungen festgestellten Frequenzen ausgewertet. Mit ROSSI werden nach dem Schussabgang noch über 400 ms die Laufschrägungen 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 mit dem Trägheitssensor der mittels Adapter im Mündungsbereich montiert wird sowie der Auswertesoftware „dasylab“ durchgeführt. Auch die

Berechnungen mit ROSSI werden für die Position an der Mündung ausgeführt.

5.4.1 Versuchsgewehr EVOLUTION

Die Abbildungen 5.6 und 5.7 zeigen experimentell aufgenommene Schwingungsdiagramme.

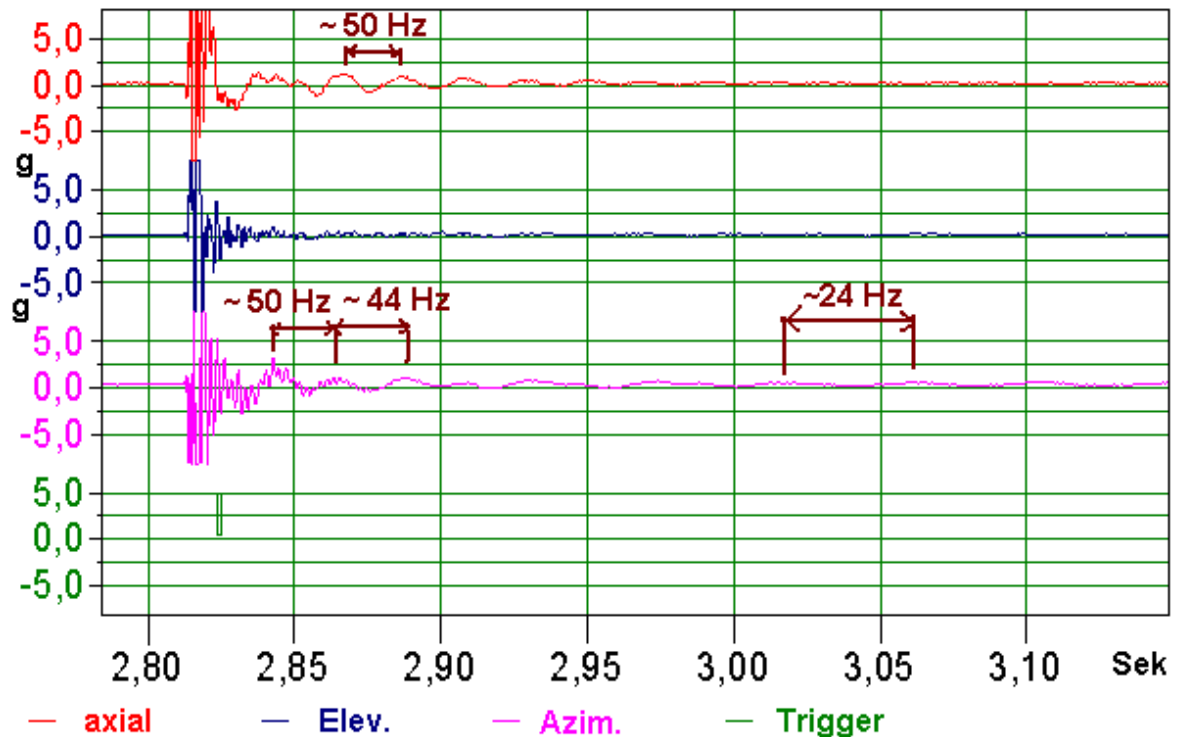


Abb. 5.6: Schwingungsdiagramme für Versuchsgewehr EVOLUTION;
Bettung 5/Teflon; Schuss Nr. 46; $v_2 = 346.43$ m/s;
21.07.2010

Es bedeuten (analog zu Kapitel 4.2.1 Abb.4.11):

- | | |
|------------------------|---|
| 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 Geschößdurchgang beim ersten Lichtschranken der Geschwindigkeitsmess-anlage abgegeben wird. Über den Abstand zur Mündung (hier 2,12 m) und der Geschöß-geschwindigkeit kann der Zeitpunkt des Mündungsdurchganges ermittelt werden. |

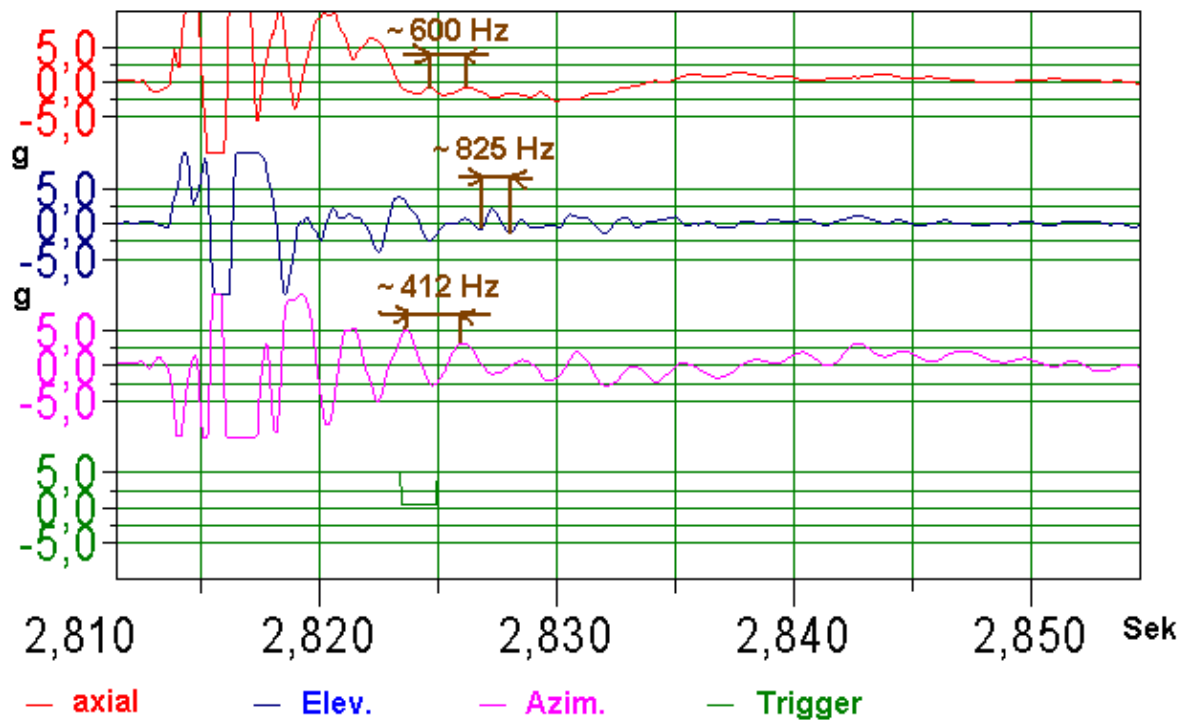


Abb. 5.7: Gleiches Diagramm wie bei Abbildung 5.6, nur mit gedehnter Zeitachse, um die höheren Frequenzen besser erfassen zu können.

In den Abbildungen 5.6 und 5.7 sind die für die markierten Zeitdifferenzen zugeordneten Frequenzen eingetragen.

Den experimentellen Schwingungsmessungen werden nun die gerechneten Ergebnisse mit ROSSI gegenübergestellt. Dabei wird das Versuchsgewehr EVOLUTION mit Bettung 5 und Teflon gerechnet. Die Abbildungen 5.8 und 5.9 zeigen den Zeitverlauf der elevatorischen Position der Mündung. Abbildung 5.8 zeigt den Zeitverlauf bis 20 ms um die Verhältnisse beim Mündungsdurchgang des Geschosses deutlich zu machen. Aus Abbildung 5.9 ist der Zeitverlauf bis 400 ms und damit für das Abklingen der gedämpften Schwingung ersichtlich.



Abb. 5.8: Mit ROSSI gerechneter Zeitverlauf der Mündungsposition für das Versuchsgewehr EVOLUTION 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 aus primär zwei 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 $0.3\text{ }\mu\text{m}/\text{Pixel}$ dargestellt werden können, ist verständlich dass alle anfänglichen, bereits berechenbaren Elongationen $< 0.3\text{ }\mu\text{m}$ grafisch nicht angezeigt werden. Ein deutlich kleinerer Anteil am „Zeitverzug“ der Mündungselongationsbewegung kommt daher, dass sich der Schall im Lauf nur mit endlicher Geschwindigkeit (ca. 5000 m/s) ausbreitet. Die Zeitdauer der Geschößbewegung im Lauf ist etwa in Abbildung 5.8 mit $DT = 2.9\text{ ms}$ angegeben.

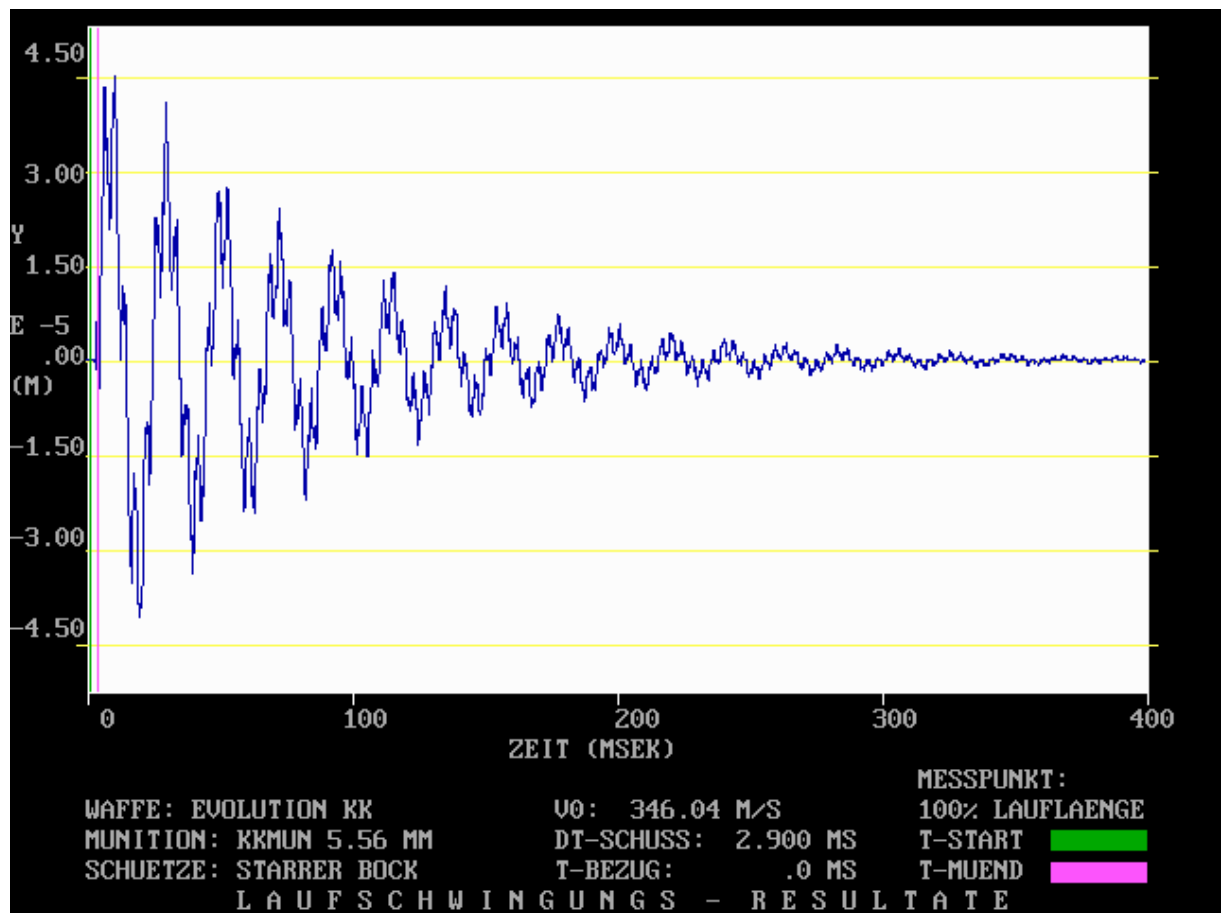


Abb. 5.9: Mit ROSSI gerechneter Zeitverlauf der Mündungsposition des Laufes für das Versuchsgewehr EVOLUTION in der vertikalen Ebene. Das Verschwinden der Schwingung nach ca. 350-400 ms ist ersichtlich.

Der Zeitverlauf der Mündungsposition wie ihn Abbildung 5.9 zeigt, wird mit dem Programm DFT einer Fourieranalyse unterzogen. Das Frequenzspektrum ist in Abbildung 5.10 ersichtlich.

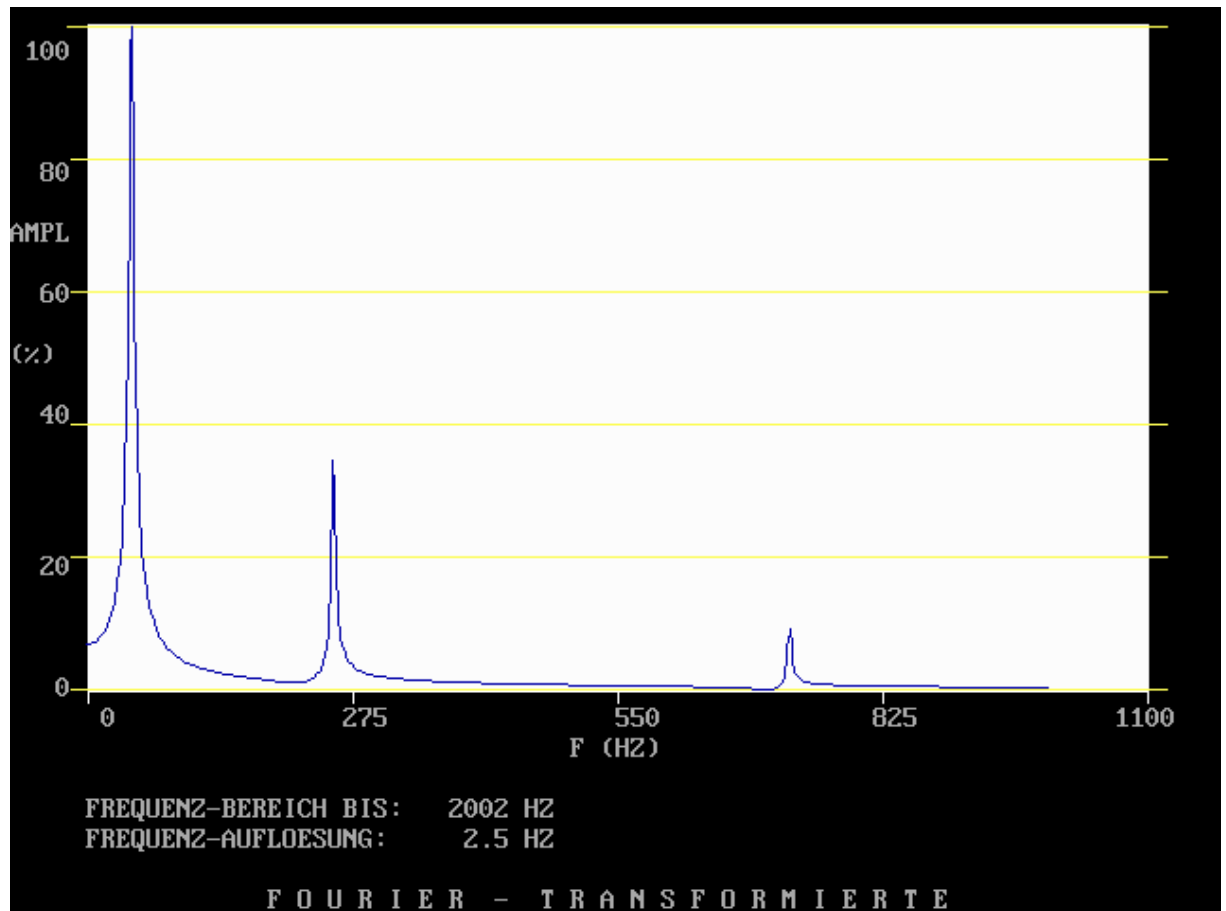


Abb. 5.10: Mit ROSSI berechnetes Frequenzspektrum bis 2002 Hz für Versuchsgewehr EVOLUTION bei einer Frequenzauflösung von 2.5 Hz und bis 1000 Hz hier dargestellt.

Aus den Detaildaten der Frequenzanalyse ergeben sich folgende relativen Amplitudenmaximalwerte:

Frequenz (Hz)	Relative Amplitude (%)
48	100
257	35
731	9

Tabelle 5.4: Eigenfrequenzen für Versuchsgewehr EVOLUTION gerechnet mit ROSSI

Obwohl es sich um periodische Schwingungen handelt, ist aus Abbildung 5.10 ein Mittelwert (Amplitude bei $F = 0$ Hz) ersichtlich. Die Ursachen dafür sind:

- Die Fouriertransformation setzt nicht bei einem Elongationswert 0 in der Zeitdarstellung ein, sondern erst ab einem softwaremäßig eingestellten Trigger.
- Die Auslenkung im Zeitverlauf ist wie aus Abbildung 5.9 ersichtlich, eine gedämpfte Schwingung.
- Es steht nur eine endliche Zeitspanne im Zeitverlauf der Elongation zur Verfügung (~ 400 ms).

Zur Beurteilung der Frequenzanalyse wird in Abbildung 5.11 der mit ROSSI direkt berechnete Elongationsverlauf in der Zeitdarstellung (rot) und der aus dem Frequenzspektrum rücktransformierte Elongationsverlauf (blau) für die Dauer von 100 ms dargestellt.

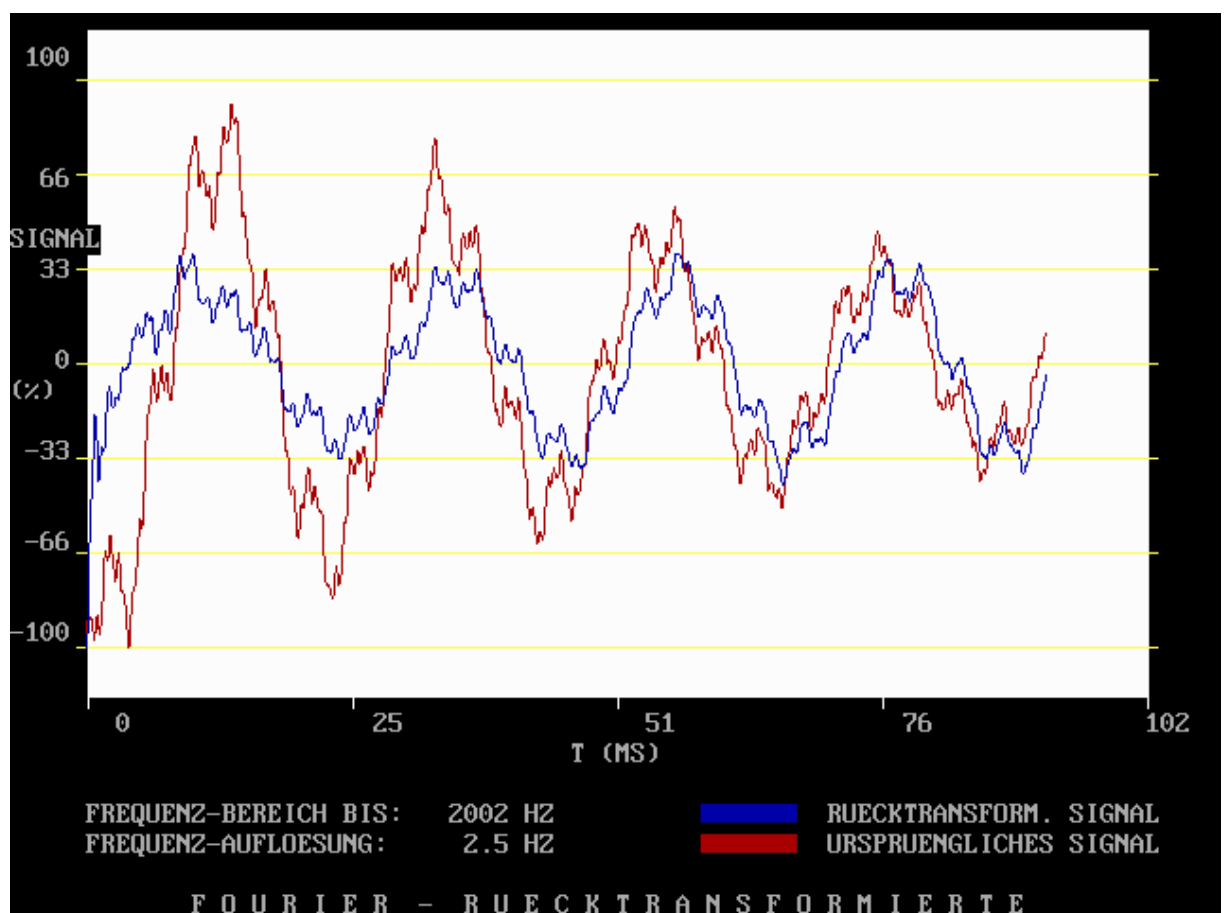


Abb. 5.11: Direkt mit ROSSI gerechnete Elongation in der Zeitdarstellung (rot) und in der Rücktransformation aus der Frequenzanalyse (blau), ebenfalls mit ROSSI (bzw. mit DFT) für das Versuchsgewehr EVOLUTION bis 100 ms gerechnet.

Aus Abbildung 5.11 ist erkennbar, dass zwar die Frequenzanteile richtig wiedergegeben werden, der abklingende/gedämpfte ursprüngliche Elongationsverlauf aber nicht aus dem verfügbaren Frequenzspektrum reproduzierbar ist.

Diskussion der gemessenen und gerechneten Dynamik für das Versuchsgewehr EVOLUTION:

- Aus den Abbildungen 5.6 und 5.7 über das experimentell bestimmte Schwingungsverhalten ergibt sich:
 - * Nach dem Schuss dominiert eine mit ca. 50 Hz schwingende Bewegung. Diese geht mit zunehmender Dauer in
 - * eine lange, über ca. 300- 350 ms dauernde, gedämpfte Schwingung von ca. 24 Hz über.
 - * Für ca. 50 ms nach dem Schuss sind azimuthal höhere Frequenzen um ca. 400 Hz mit deutlich kleinerer und auch gedämpfter Amplitude sichtbar.
 - * Im Zeitbereich bis < 50 ms nach dem Schuss sind in der Elevation Frequenzen von ca. 825 Hz erkennbar.
 - * Axial, also in Schussrichtung, zeigen sich hohe Frequenzen um ca. 600 Hz bis einige 10 ms nach dem Schuss.
- Die Diagramme in den Abbildungen 5.6 und 5.7 werden nun dahingehend interpretiert, dass der dominante Frequenzanteil um ca. 50 Hz liegt. Nach Tabelle 5.4 wäre dies die Eigengrundfrequenz (48 Hz nach ROSSI). Diese Eigenfrequenz ergibt sich mit dem eingespannten Lauf bei Bettung 5. Es kann aber nun nicht ausgeschlossen werden, dass die Grundschrwingungen durch die Bettung etwas, wenn auch nur geringfügig, durchtunneln (Anmerkung: Das hat hier nichts mit dem quantenmechanischen Tunneleffekt zu tun), sodass mit zunehmender Zeitdauer das gesamte System schwingt (~ 24 Hz nach der Messung). Mit ROSSI können die 24 Hz nicht erhalten werden. Daraus könnte man schließen, dass die Bettung zu „hart“ modelliert wird, sodass dieses „Durchtunneln“ nicht zustande kommt. Dem kann aber entgegen gehalten werden, dass auch eine „weiche“ Bettung (Gummi) gerechnet worden ist, dabei aber der beobachtete dominierende Frequenzanteil bei ~ 50 Hz verschwindet, ohne dass eine signifikante 24 Hz Schwingung sichtbar wird. Dabei ergibt sich nämlich eine dominante 32 Hz Schwingung ohne nennenswerte Oberwellen und widerspricht damit deutlich dem experimentell beobachteten Schwingverhalten. Daher wird die eingestellte Bettung für die Modellierung mit ROSSI beibehalten. Eine weitere Alternative zur Interpretation des experimentellen niederfrequenten Schwingverhaltens wäre auch eine Übertragung der Schwingung auf den Schießbock, die zweifellos vorhanden ist, sowie die Rückwirkung des Bocks auf die gemessenen Frequenzen. Diese Effekte können aber mit ROSSI nicht abgebildet werden.
- Der gerechnete Frequenzwert von ca. 257 Hz findet sich so nicht in den gemessenen Spektren. Es fällt aber auf, dass wie es in Abbildung 5.7 erkennbar ist, azimuthal eine Frequenz von ca. 400 Hz und in der Elevation eine Frequenz von ca. 800 Hz auftritt. Da mit ROSSI das Gewehrssystem nur rotationssymmetrisch um die Schussachse modelliert werden kann, sind derartige Unterschiede in Elevation und Azimut nicht

berechenbar. Aber die Frequenz 731 Hz nach Tabelle 5.4 mit ROSSI gerechnet liegt im Bereich der Elevationsschwingungen (und auch der einer axialen Schwingung von ca. 600 Hz nach Abbildung 5.7).

- Da der experimentell beobachtete dominante Frequenzanteil kurz nach dem Mündungsdurchgang des Geschosses der von 50 Hz ist, wird die Modellierung mit ROSSI mit den in Tabelle 5.3 angegebenen Federkonstanten der Bettung beibehalten. Der Grund liegt einfach darin, dass damit das dynamische Verhalten mit der 48 Hz Schwingung am besten für die wirklich entscheidende Zeit der Schussentwicklung modelliert werden sollte. Es darf nicht vergessen werden, dass einige bautechnische Details mit der einfachen Modellierung ROSSI wie z.B. die Massen von Korntunnel, Diopter, Verschlussdetails, Schlagbolzen, Abzugseinrichtung, usw. nicht abgebildet werden können. Ebenso wenig können die möglichen und sehr wahrscheinlichen Auswirkungen des schwingenden Schießbocks in einer Rückkoppelung auf die Laufschiwingung berücksichtigt werden. Diese Effekte müssen mit ROSSI als klein betrachtet werden, aber diese Annahme muss in einzelnen speziellen Fällen eben nicht absolut zutreffen.

5.4.2 Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ

Analog zum Versuchsgewehr EVOLUTION liefern die Abbildungen 5.12 und 5.13 Messresultate des Schwingverhaltens für das Gewehr ANSCHÜTZ.

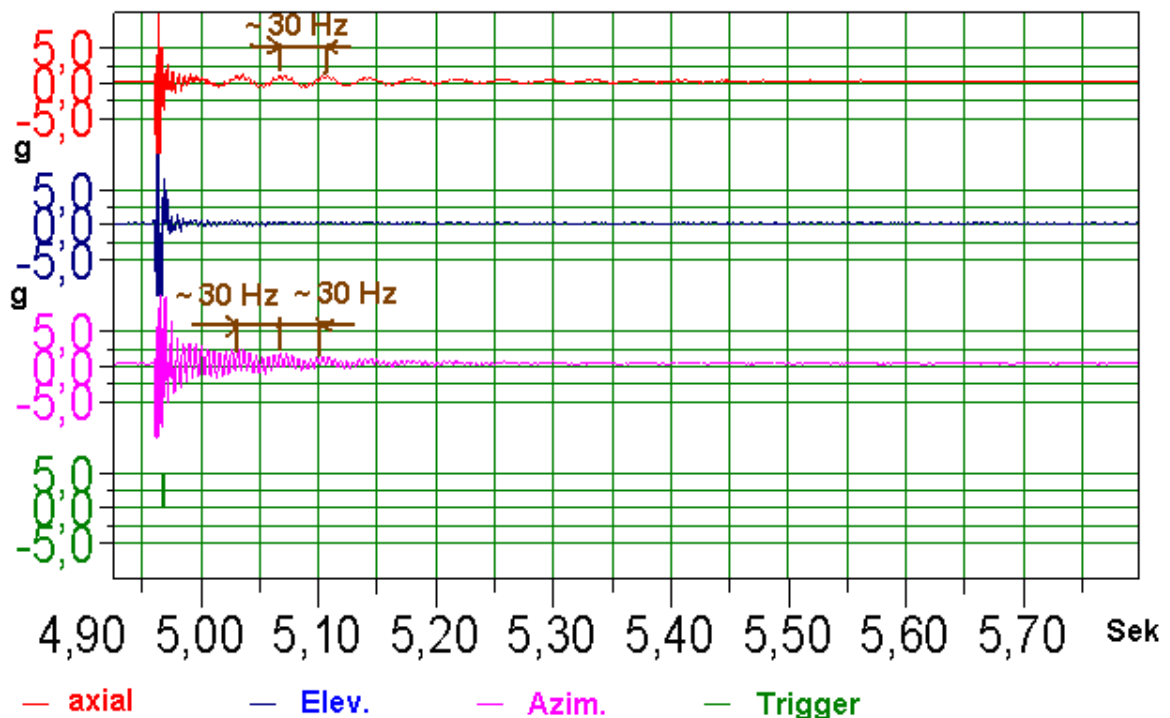


Abb. 5.12: Schwingungsdiagramm für Gewehr ANSCHÜTZ Schuss Nr. 2, 19.07.2010 zur Analyse der lang dauernden Schwingungen. Darstellung analog zu Abbildung 5.6

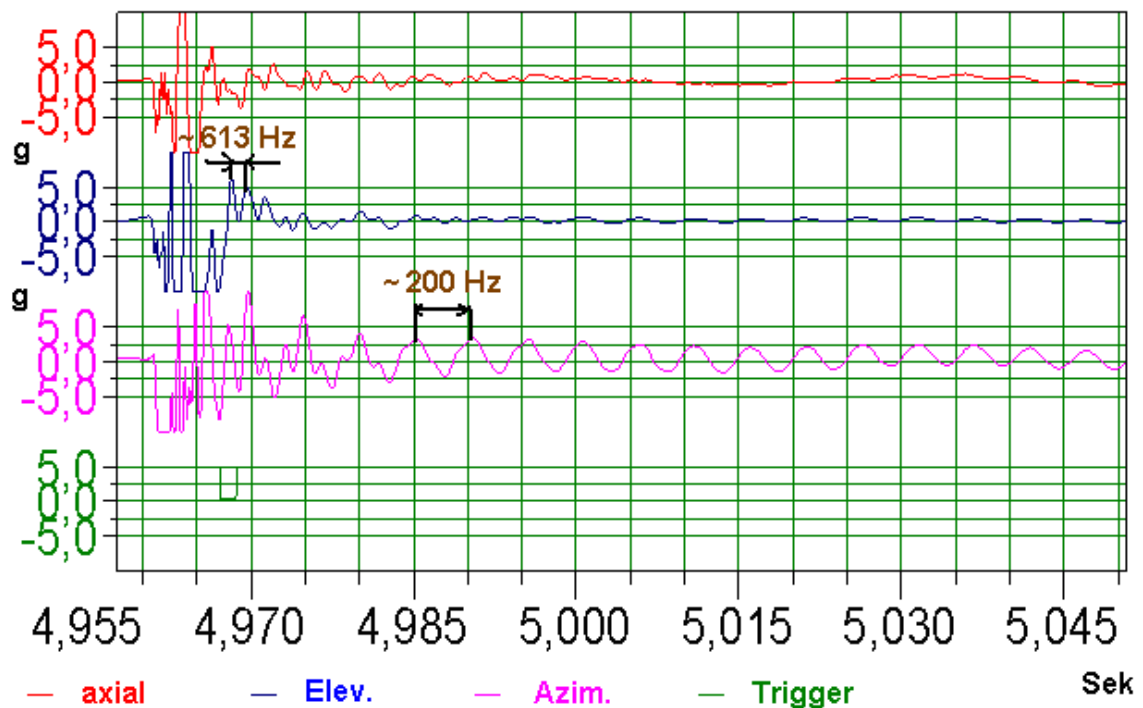


Abb. 5.13: Schwingungsdiagramm für Gewehr ANSCHÜTZ Schuss Nr. 2, 19.07.2010 zur Analyse kurz nach dem Schuss

Die Analyse der Diagramme liefert drei markante Frequenzen:

- ~ 30 Hz Bis zu 400-500 ms (Azimut) erkennbar in Abbildung 5.12
- ~ 200 Hz Die in den ersten 150-200 ms erkennbar sind sowie
- ~ 613 Hz In den ersten 15-20 ms

Auch für das Gewehr ANSCHÜTZ wird eine Frequenzanalyse mit ROSSI gerechnet. Die Abbildungen 5.14 und 5.15 zeigen den Zeitverlauf der vertikalen Auslenkung der Mündung für 20 bzw. 400 ms.

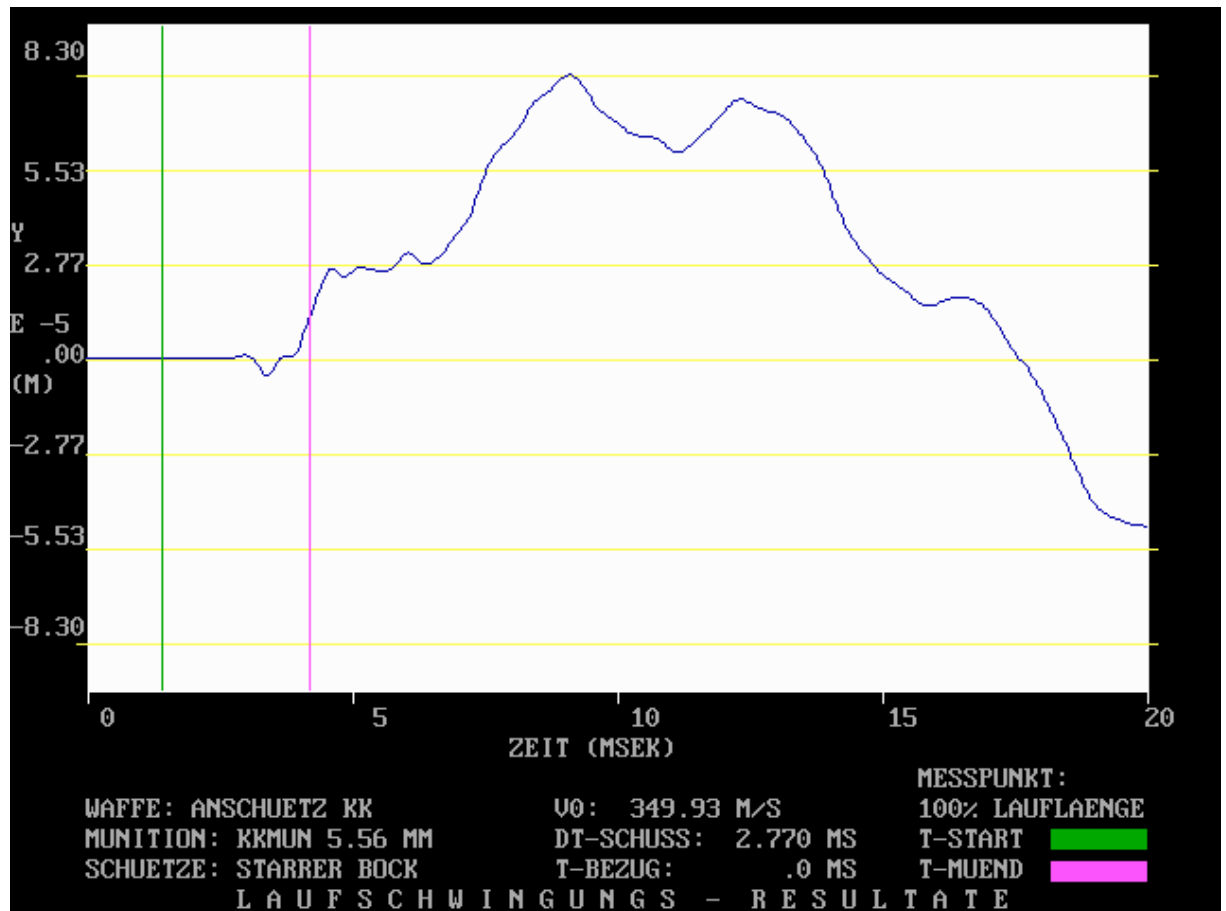


Abb. 5.14: Mit ROSSI gerechneter Zeitverlauf der Mündungsposition des Laufes für das Gewehr ANSCHÜTZ in der vertikalen Ebene bis 20 ms nach Schussbeginn.

Die Zeitdauer der Geschößbewegung im Lauf ist mit 2.77 ms errechnet worden (Abstand grüne Linie zu magenta Linie in Abbildung 5.14). Die Auflösung in der Auslenkung beträgt hier $0.55 \mu\text{m}/\text{Pixel}$, das heißt bereits vorhandene Auslenkungen $< 0.55 \mu\text{m}$ werden in der Phase zwischen grüner und magentafarbener Linie nicht angezeigt.

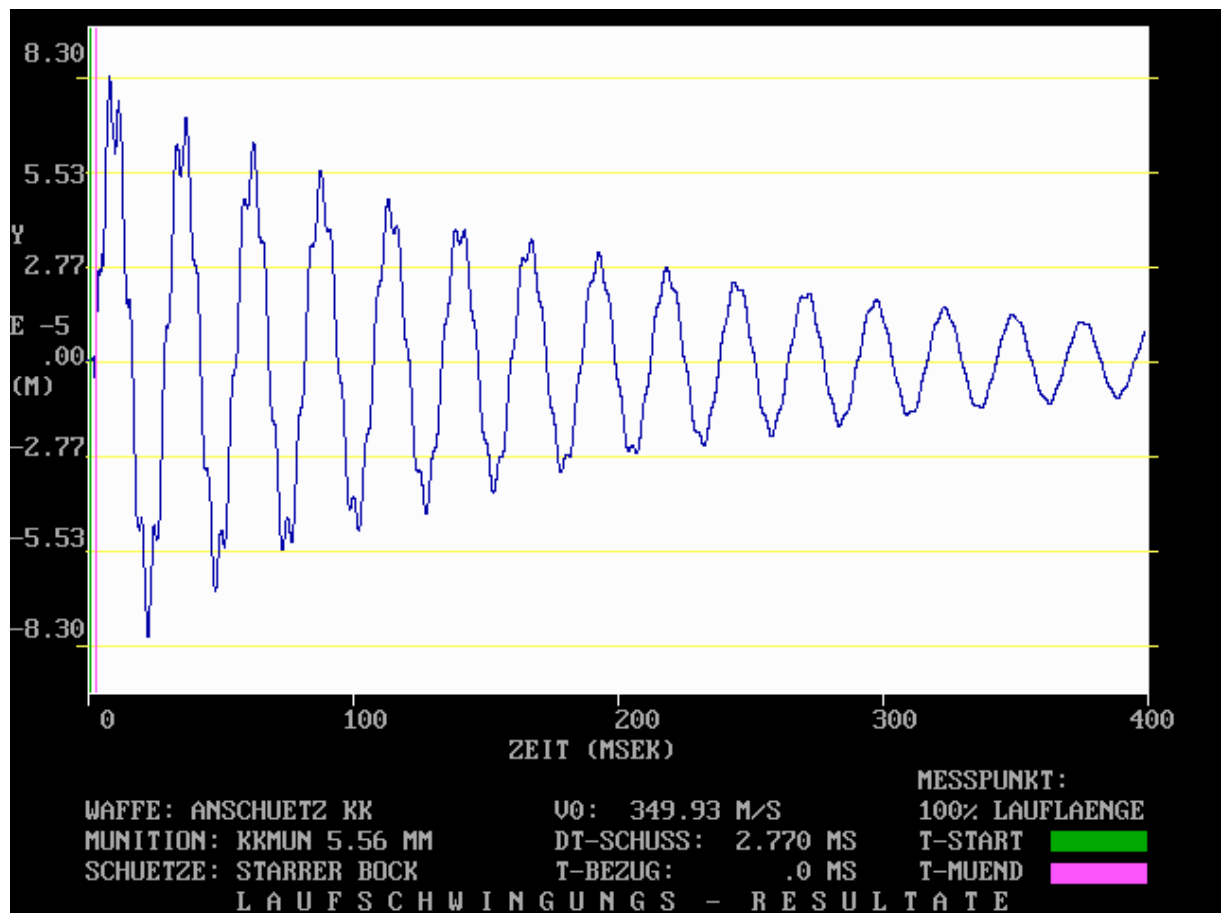


Abb. 5.15: Mit ROSSI gerechneter Zeitverlauf der Mündungsposition des Laufes für das Gewehr ANSCHÜTZ in der vertikalen Ebene bis 400 ms nach Schussbeginn

Der gedämpfte Schwingungsverlauf in Abbildung 5.15 zeigt nach 400 ms noch höhere Amplitudenwerte als die Vergleichsdarstellung für das Versuchsgewehr EVOLUTION in Abbildung 5.9. Der Grund liegt in den höheren Anfangsamplituden bei ANSCHÜTZ von ca. $83 \mu\text{m}$ gegenüber $45 \mu\text{m}$ Anfangsamplitude bei EVOLUTION. Dazu muss beachtet werden, dass einerseits das Gewehr ANSCHÜTZ generell in der vorliegenden Modellierung stärkere Auslenkungen zeigt als das Versuchsgewehr EVOLUTION und andererseits die v_0 -Werte bei den beiden Rechnungen nicht gleich sind. Dieses divergierende Verhalten trotz fast (v_0) gleicher Munition (in der Simulation) hängt von mehreren Faktoren ab. Es seien dazu genannt: Das Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ hat einen etwas dünneren Lauf als das Versuchsgewehr EVOLUTION. Ferner kann in der Simulation nicht auf die Besonderheiten der Munitions-Lauf-Wechselwirkung bzw. der Eignung der Munition eingegangen werden. Das Streuen der Munition in der Simulation über die Stärke der radialen Exzentrizität des Geschosses wird grob an die Trefferbilder mit dem Versuchsgewehr EVOLUTION angepasst. Das kann beim

Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ selbstverständlich zu Abweichungen führen.

Aus Abbildung 5.15 ist auch ferner erkennbar wie höhere Frequenzen vom Anfang weg bis ca. 250-300 ms noch stärkeren Einfluss auf die Dynamik nehmen. Die Frequenzanalyse mit ROSSI für das Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ zeigt nun Abbildung 5.16.

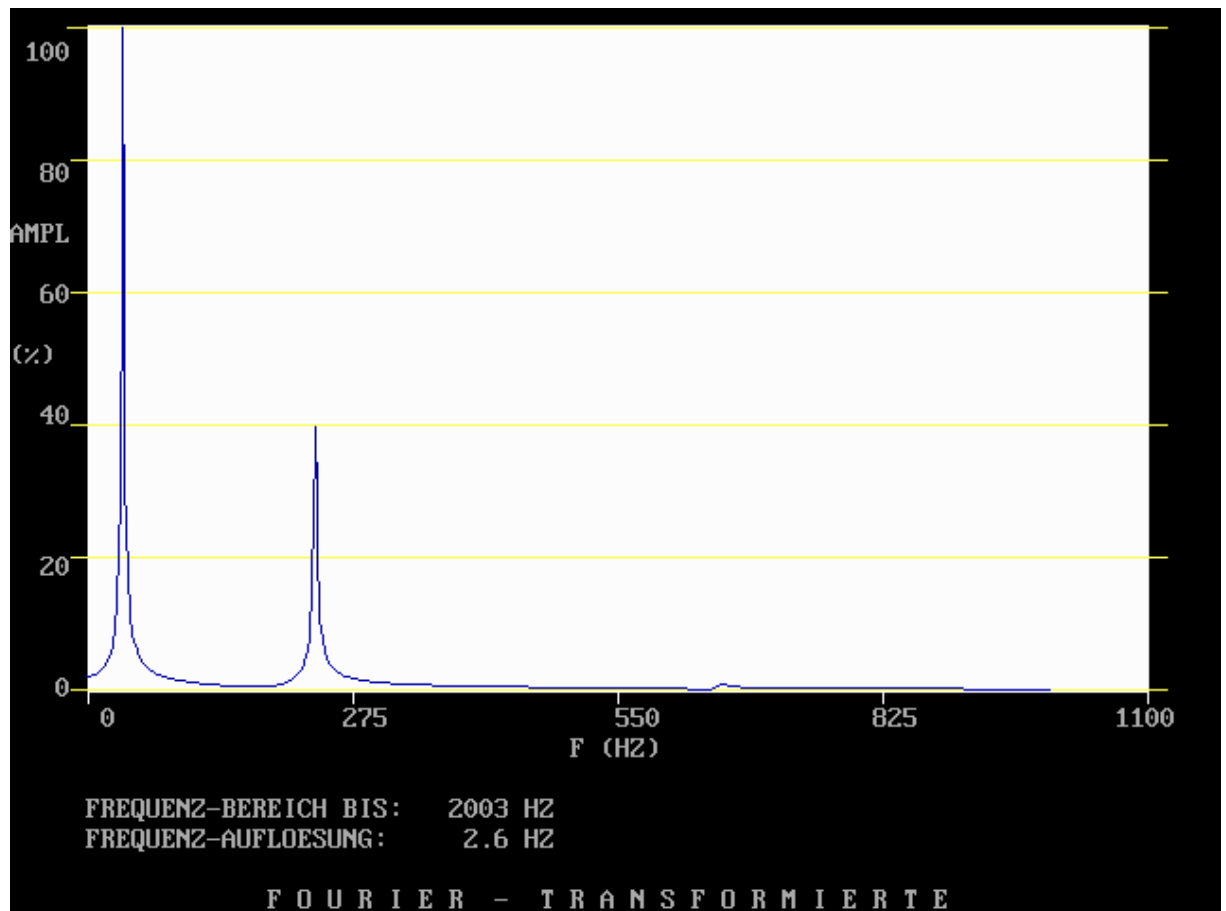


Abb. 5.16: Mit ROSSI gerechnetes Frequenzspektrum bis 2003 Hz für das Gewehr ANSCHÜTZ bei einer Frequenzauflösung von 2.6 Hz und bis 1000 Hz hier dargestellt.

Die Detaildaten der Frequenzanalyse in Relation zu den über die Abbildungen 5.14 und 5.15 gewonnenen Messwerten sind aus Tabelle 5.5 ersichtlich.

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

Tabelle 5.5: Die Eigenfrequenzen des Vergleichsgewehres ANSCHÜTZ, gerechnet mit ROSSI, im Vergleich mit den Werten die sich aus der Auswertung der Diagramme in den Abbildungen 5.12 und 5.13 ergeben.

In Abbildung 5.17 ist wieder die Beurteilung der gerechneten Frequenzanalyse über die Fourierrücktransformation im Vergleich zum ursprünglichen Zeitverlauf der Mündungselongationen ersichtlich.

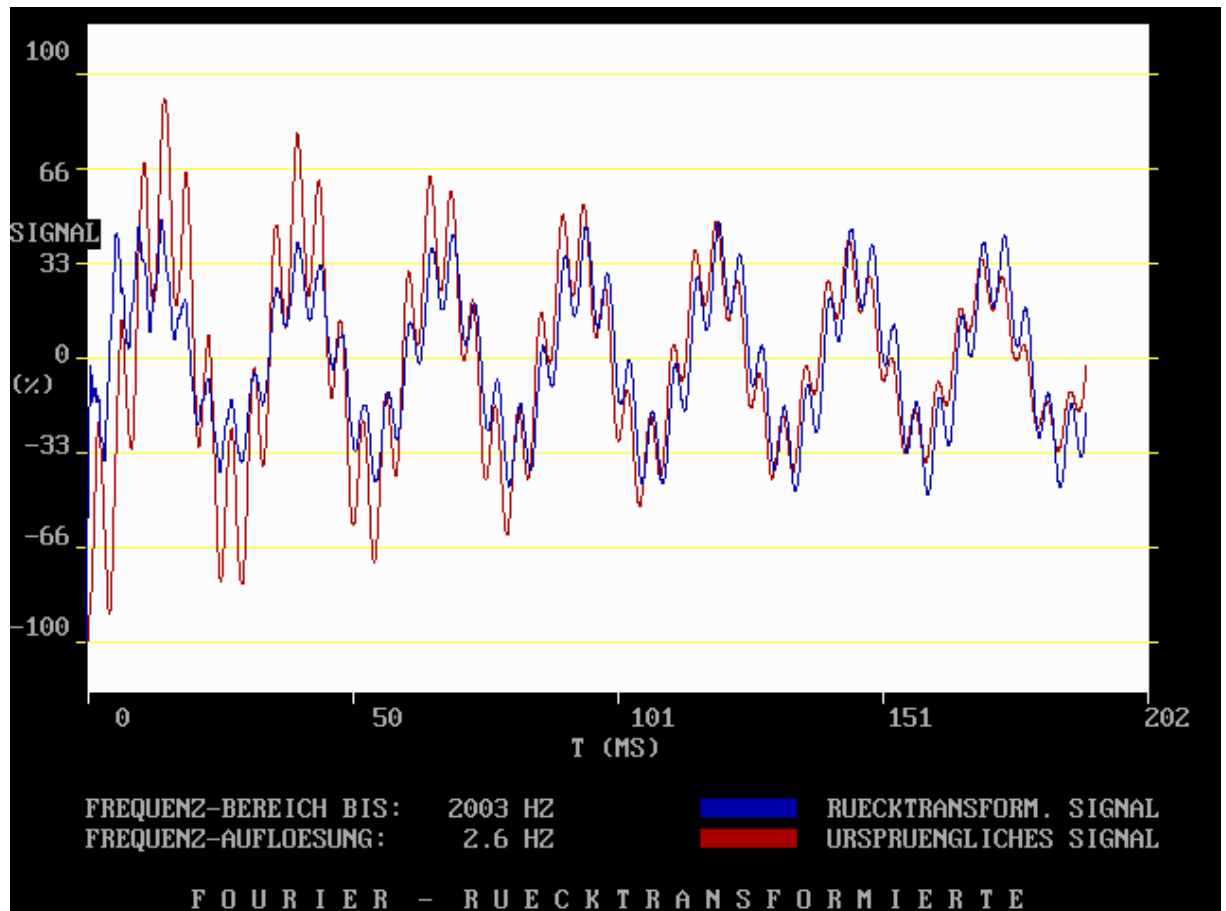


Abb. 5.17: Mit ROSSI direkt gerechnete Elongation in der Zeitdarstellung (rot) und in der Rücktransformation aus der Frequenzanalyse (blau) ebenfalls mit ROSSI (bzw. DFT) für das Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ bis 100 ms gerechnet.

Abgesehen davon, dass die Dämpfung des ursprünglichen Signalverlaufes wieder nicht über die Fouriertransformation läuft, ist eine sehr befriedigende Übereinstimmung in der Frequenzabhängigkeit der Signalform zwischen den beiden Kurven erkennbar.

Diskussion der gemessenen und gerechneten Dynamik für das Gewehr ANSCHÜTZ

- Die Bettung für das Gewehr ANSCHÜTZ unterscheidet sich grundsätzlich von der Bettung EVOLUTION. Das System wird nur durch 2 Schrauben mit dem Schaft verbunden. Das bedeutet, dass das gesamte System in seiner vollen Länge (inklusive Verschlussteil) als schwingend betrachtet werden kann. Die relativ kleine Federkonstante der Bettung ermöglicht dieses Schwingverhalten.
- Die gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen Frequenzen und den gerechneten sowie deren rechnerischen relativen Amplituden bestärken die Brauchbarkeit der Modellierung von Gewehr ANSCHÜTZ.

Summa summarum werden die für die Berechnungen mit ROSSI gemachten Annahmen zur Modellierung der Waffen unter den gegebenen Umständen (einfache Simulation) als hinreichend gut betrachtet. Diese Beurteilung stützt sich auf den Vergleich der gerechneten Schwingungsdaten mit den Werten, die aus den Messungen gewonnen werden.

5.5 Schussberechnungen

Die folgenden Abbildungen sollen einen exemplarischen Eindruck vermitteln wie, vor allem in ihren grafischen Darstellungen, die Simulationen ablaufen.

5.5.1 Der Einzelschuss

Der Einzelschuss wird mit dem Programm ROSSI berechnet. Bei allen Simulationen, egal ob Einzelschuss oder Trefferbildsimulation, beträgt die Rechenschrittweite 50 ns. Die Abbildungen 5.18 bis 5.25 zeigen die Ausbildung der transversalen Laufverformungen in der Vertikalebene als blaue Linie/Kurve in der linken Bildmitte. Die Ordinate gibt die Auslenkungen in μm an. Im unteren Bildbereich ist die geometrische Modellierung ersichtlich, wobei der rote Punkt die aktuelle Position des Geschosses im Lauf angibt. Mit T wird die Simulationszeit ab Schussauslösung das heißt, dem Einschlag des Schlagbolzens auf die Patrone, bezeichnet. V_G gibt die aktuelle Geschossgeschwindigkeit an. Links unten im Textfeld der Abbildungen kann der aktuelle elevatorische Mündungswinkel gegen die Horizontale in $mrad$ sowie die aktuelle Vertikalgeschwindigkeit der Mündung in m/s abgelesen werden. Die konkreten Daten für den nun hier dokumentierten Schuss sind:

Waffe: Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung 5 mit Teflon
Munition: Entsprechend Tabelle 5.1 mit der Pulvermasse 0.0841 g und einer radialen Exzentrizität von $600 \mu m$ bei 0° Rollwinkel, das heißt die Exzentrizität liegt zu Beginn der Berechnungen genau über der Laufachse. Das Geschos beginnt sich erst bei 1.502 ms aus der Patrone heraus zu bewegen.

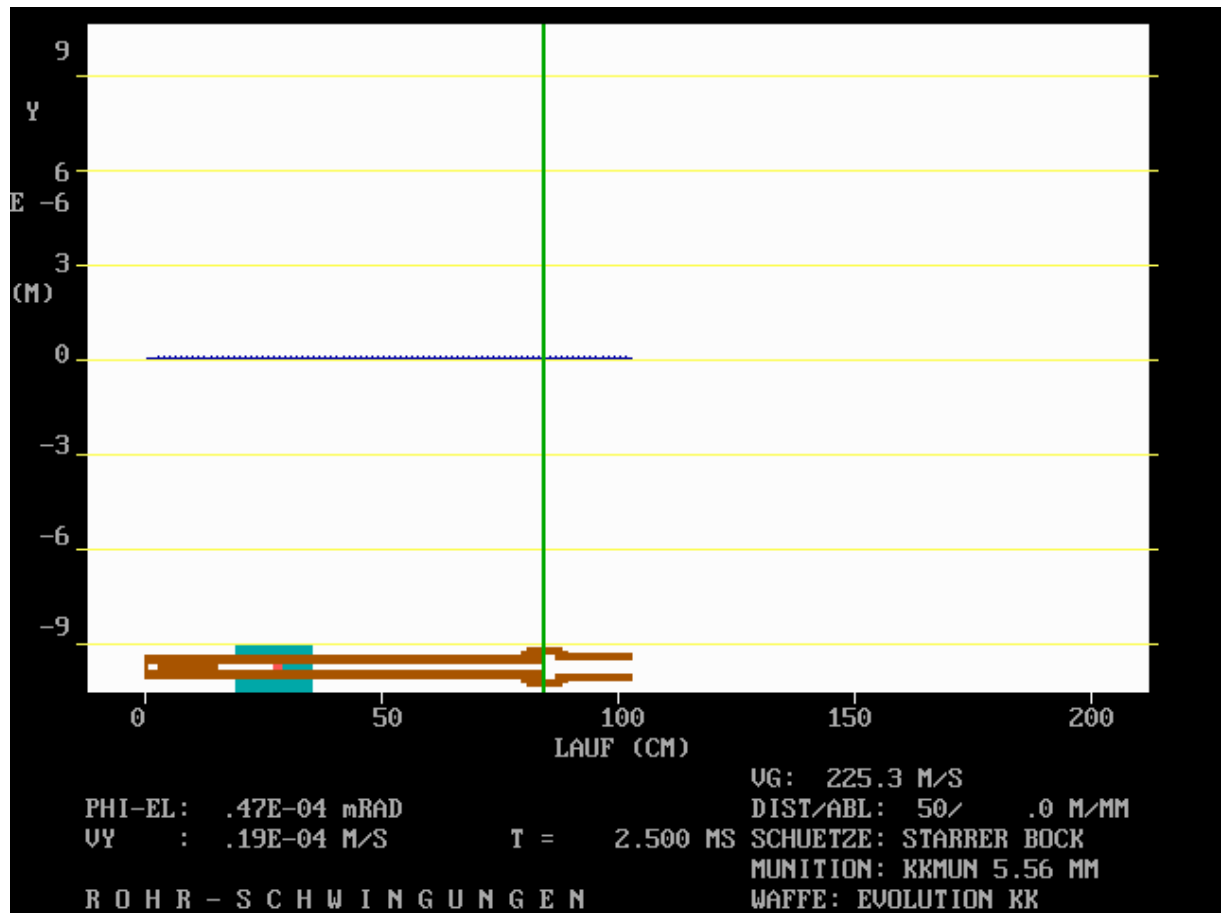


Abb. 5.18: $T = 2.5 \text{ ms}$; $V_G = 225.3 \text{ m/s}$. Noch ist keine transversale Laufbewegung erkennbar.

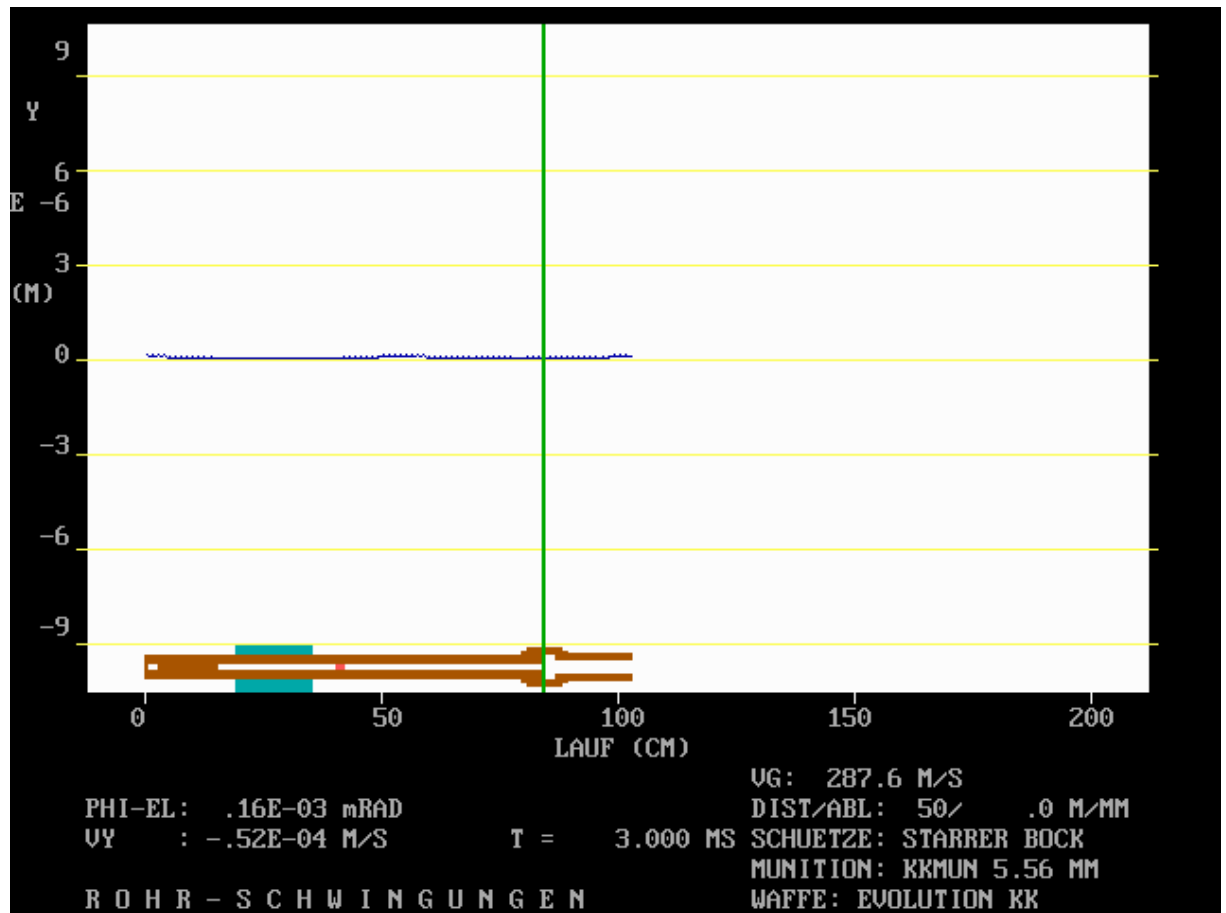


Abb. 5.19: $T = 3.0$ ms; $V_G = 287.6$ m/s. Erste sehr kleine transversale Laufbewegungen werden sichtbar.

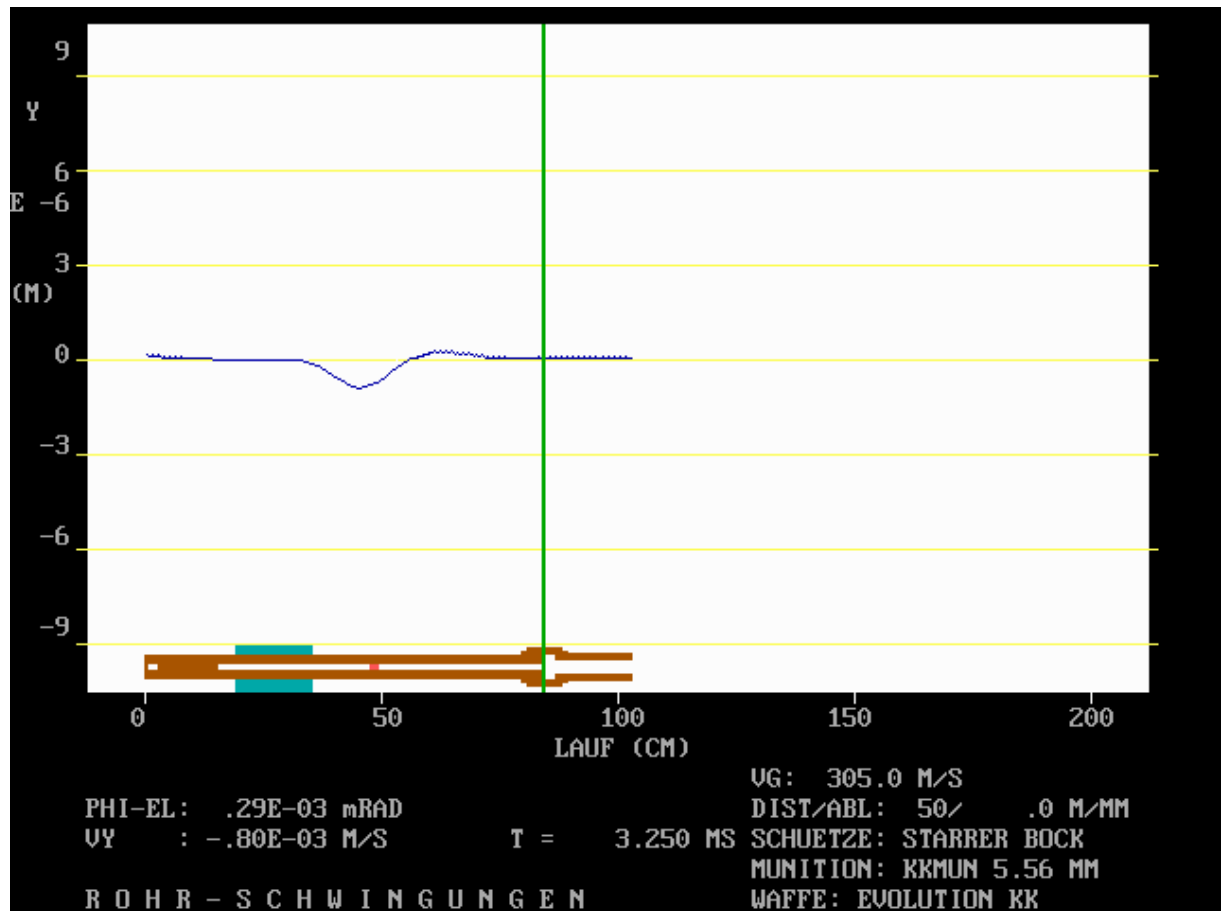


Abb. 5.20: $T = 3.25 \text{ ms}$; $V_G = 305.0 \text{ m/s}$. Die Position des Maximums der „Ausbuchtung“ des Laufes korreliert mit ca. 20 cm zurückgelegtem Geschößweg. Da die Dralllänge 40 cm beträgt und die radiale Exzentrizität zu Schussbeginn nach oben gerichtet ist, liegt das Elongationsmaximum in der vertikalen Sicht der Abbildung bei der halben Dralllänge. Dort zeigt die radiale Exzentrizität des Geschößes genau nach unten.

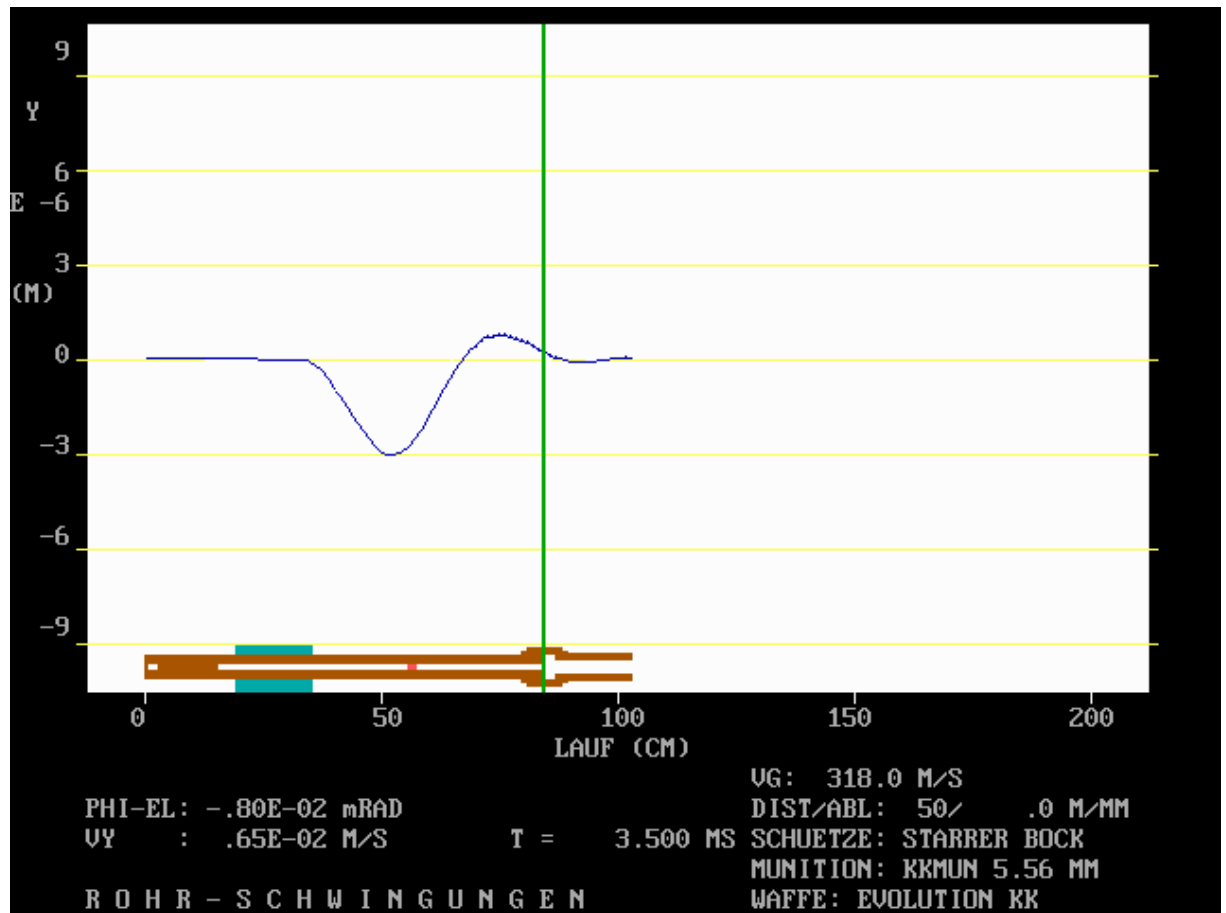


Abb. 5.21: $T = 3.50$ ms; $V_G = 318.0$ m/s. Das „Vorwandern“ der Welle (Elongationsmaximum) gegenüber der Position in Abbildung 5.20 ist über den Abszissenmaßstab erkennbar.

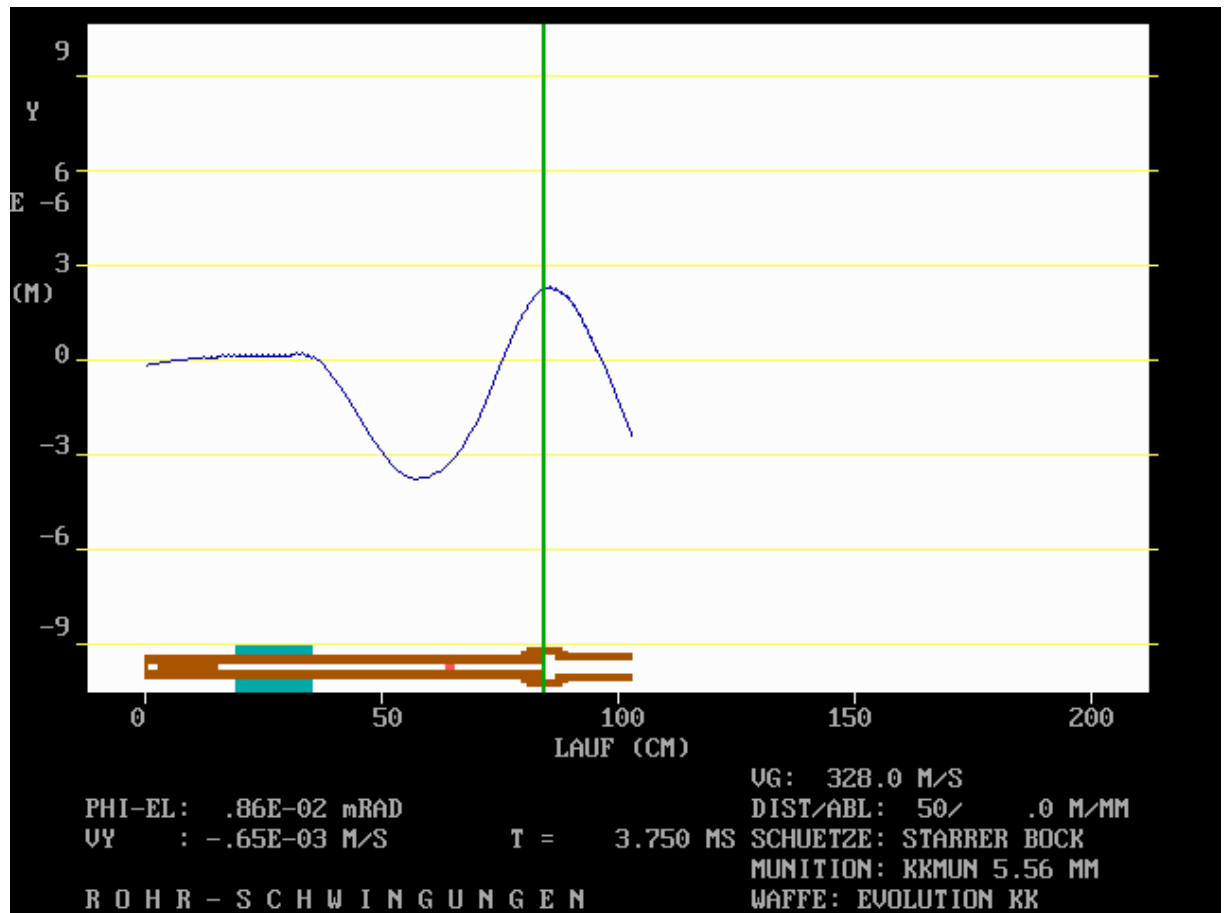


Abb. 5.22: $T = 3.75 \text{ ms}$; $V_G = 328.0 \text{ m/s}$. Die „Welle“ hat die Mündung erreicht. Man kann auch das Einsetzen von kleinen Schwingungen des „hinteren“ Systemendes (hinter der türkis gefärbten Bettung) erkennen.

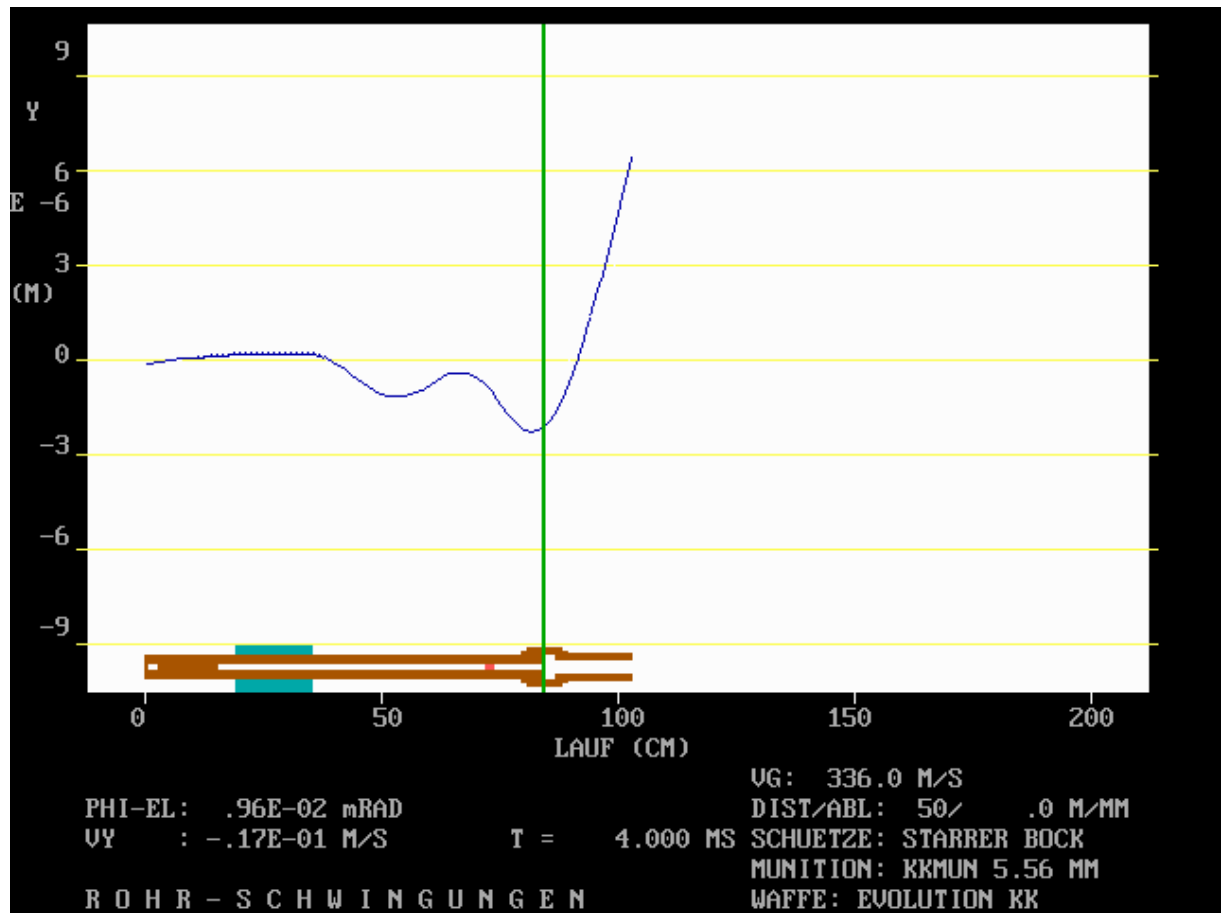


Abb. 5.23: $T = 4.0 \text{ ms}$; $V_G = 336.0 \text{ m/s}$. Die Überlagerung aus vorlaufender und zurücklaufender „Welle“ ist schon im Gange.

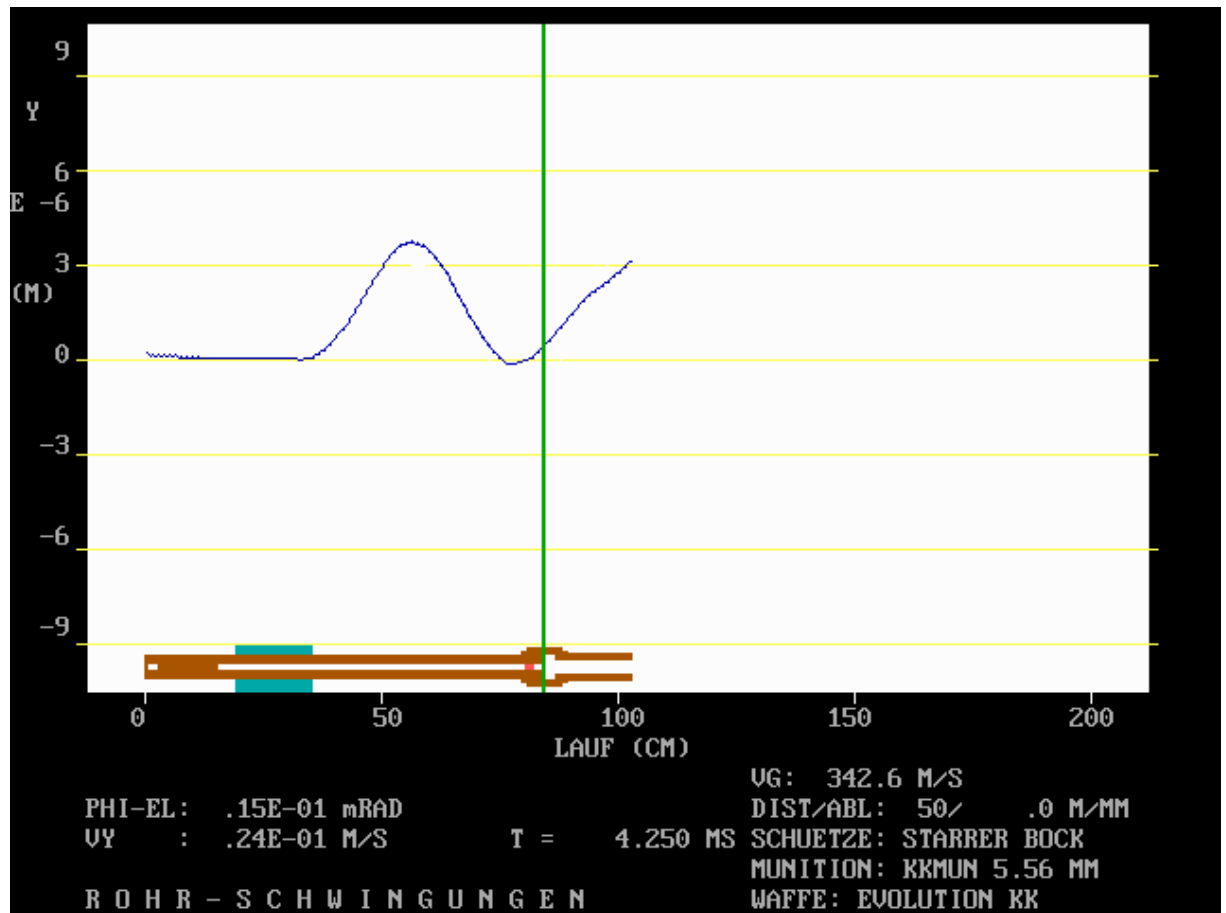


Abb. 5.24: $T = 4.25 \text{ ms}$; $V_G = 342.0 \text{ m/s}$. Die zurücklaufende „Welle“ hat den Ort ihrer ursprünglichen Entstehung etwa erreicht.

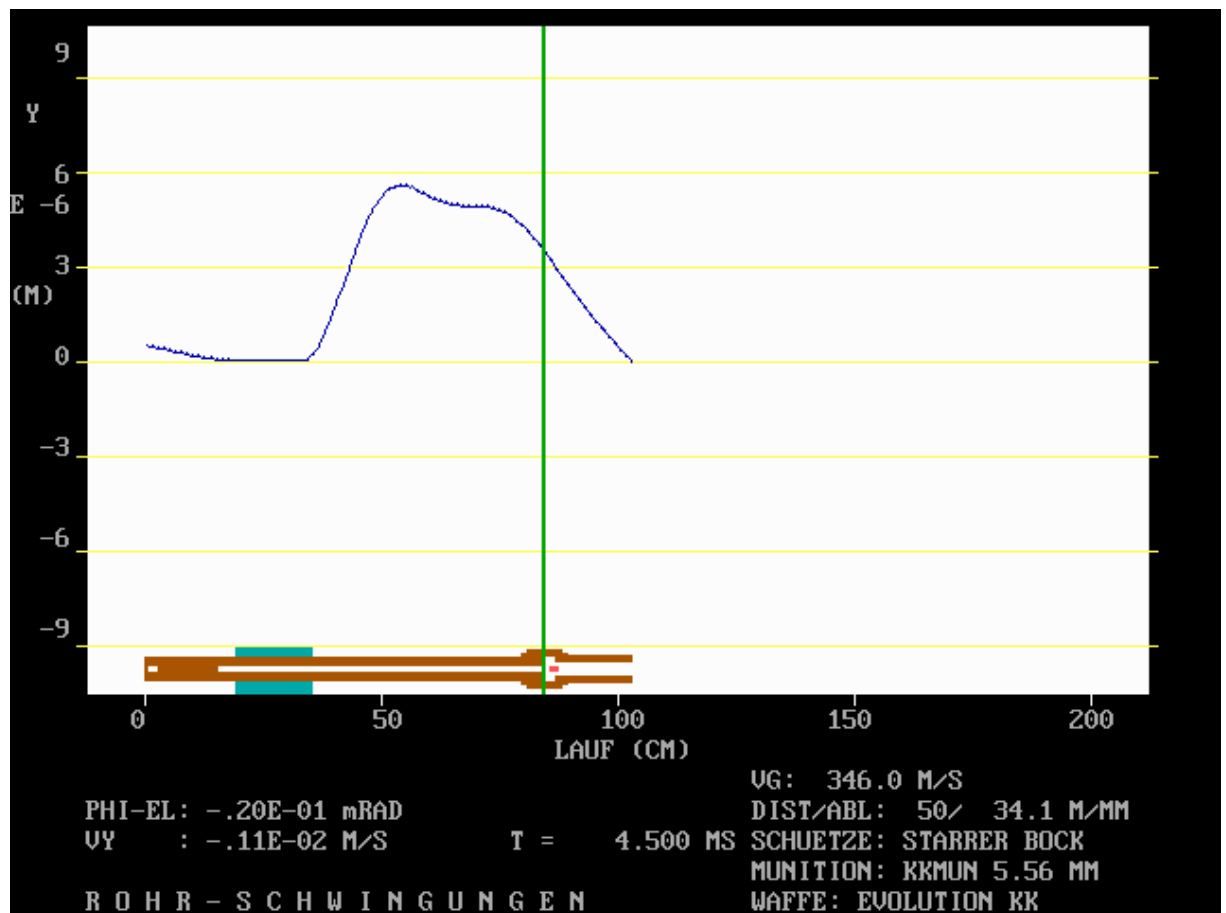


Abb. 5.25: $T = 4.50$ ms; Das Geschöß hat mit einer $v_0 = 346.04$ m/s bei $T = 4.403$ ms nach Schussauslösung die Mündung verlassen. Die Schussdistanz von 50 m wird in 159 ms zurückgelegt.

Zur Komplettierung der Schussdokumentation zeigen die folgenden Abbildungen weitere Parameter, die mit dem Programm ROG im Anschluss an die Schusssimulation erstellt werden können.

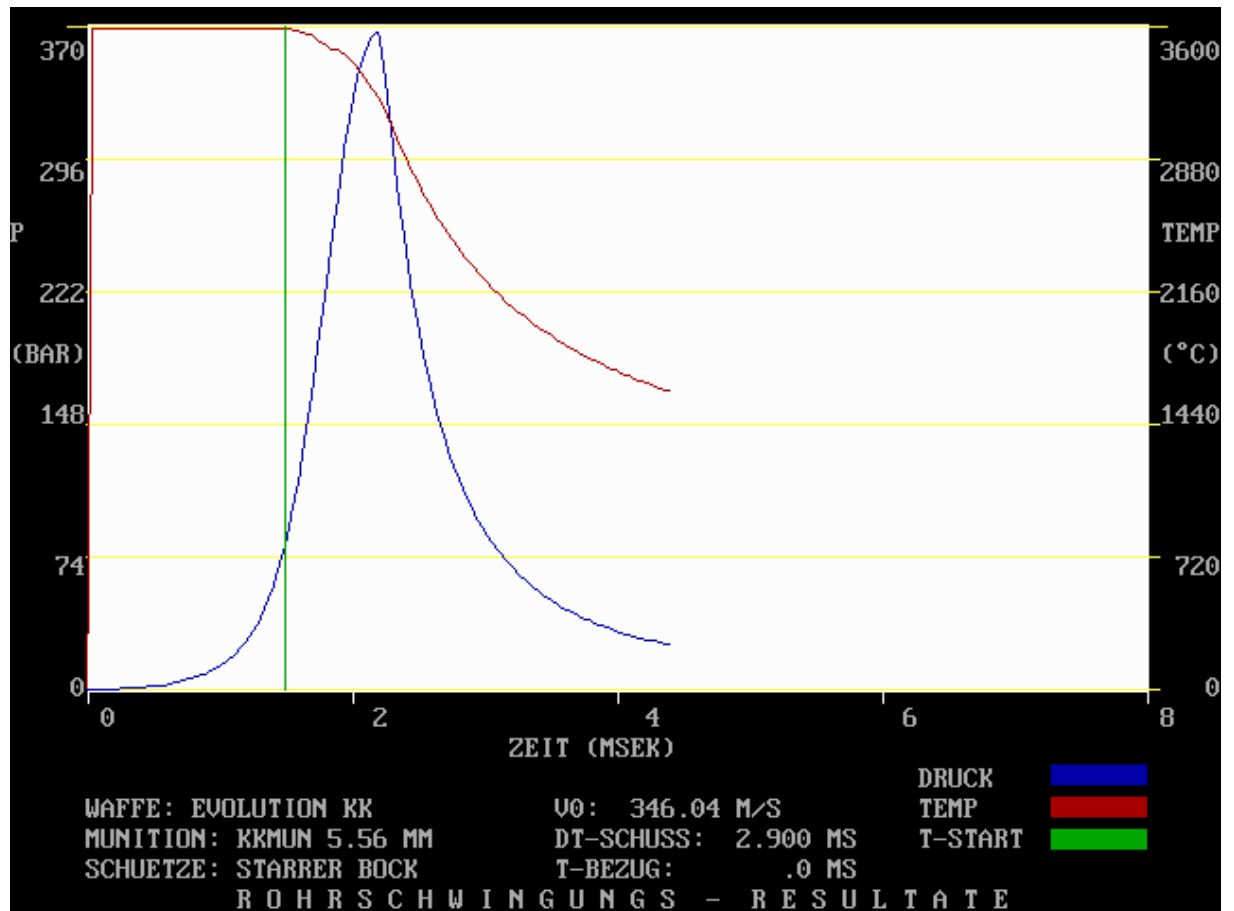


Abb. 5.26: Der Druck (blau) und die Temperatur (rot) des Gases in Abhängigkeit von der Zeit. Die vertikale grüne Linie markiert den Zeitpunkt an dem sich das Geschoß in Bewegung setzt. Der Schnittpunkt der blauen Drucklinie mit der vertikalen grünen Linie zeigt den erforderlichen Druck in der Patrone an, mit dem der Auszieh Widerstand des Geschoßes überwunden werden kann. Kurz nach der grünen Linie ist im roten Temperaturverlauf eine kleine „Delle“ erkennbar. Zu diesem Zeitpunkt ist das gesamte Pulver verbrannt.

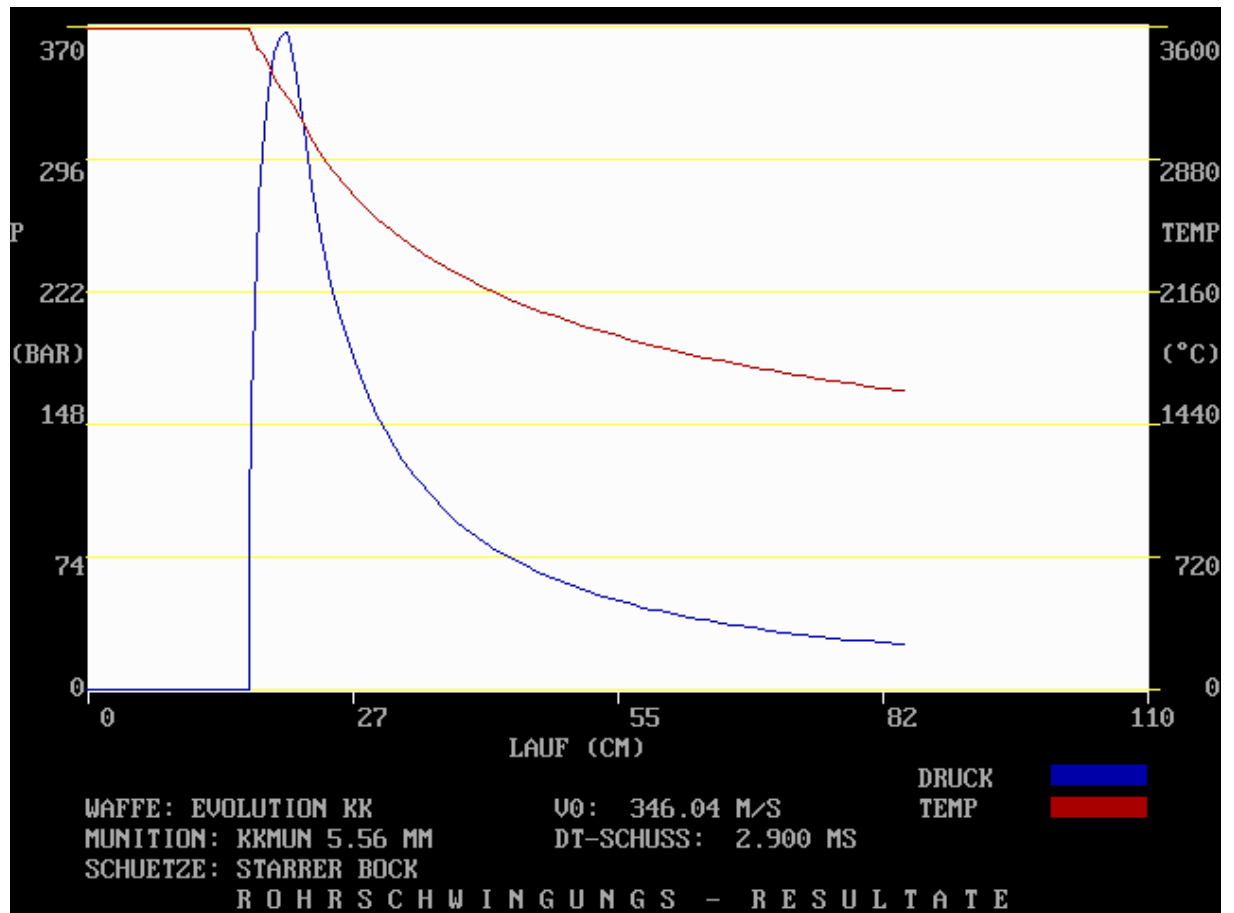


Abb. 5.27: Der Druck (blau) und die Temperatur (rot) des Gases in Abhängigkeit von der Position des Geschosses im Lauf. Die x -Achse gibt die Laufposition in cm an. Bezugspunkt für die x -Skala ist der Koordinatenursprung für die geometrische Modellierung, das heißt am hinteren Ende des Verschlusssteiles! Der Verschlusssteil wird nach Kapitel 5.2.1 mit 16 cm angesetzt. Zuzüglich zum Abstand Geschosßboden-Patronenboden ergibt sich damit die „Startposition“ der blauen Druckkurve.



Abb. 5.28: Geschößgeschwindigkeit (blau) und Z-Wert (rot) in Abhängigkeit von der Geschößposition im Lauf.

Anmerkung: Der Z-Wert ist das Verhältnis der Masse des verbrannten Pulvers zur ursprünglichen Pulvermasse. Der Pulverabbrand erfolgt hier sehr schnell.

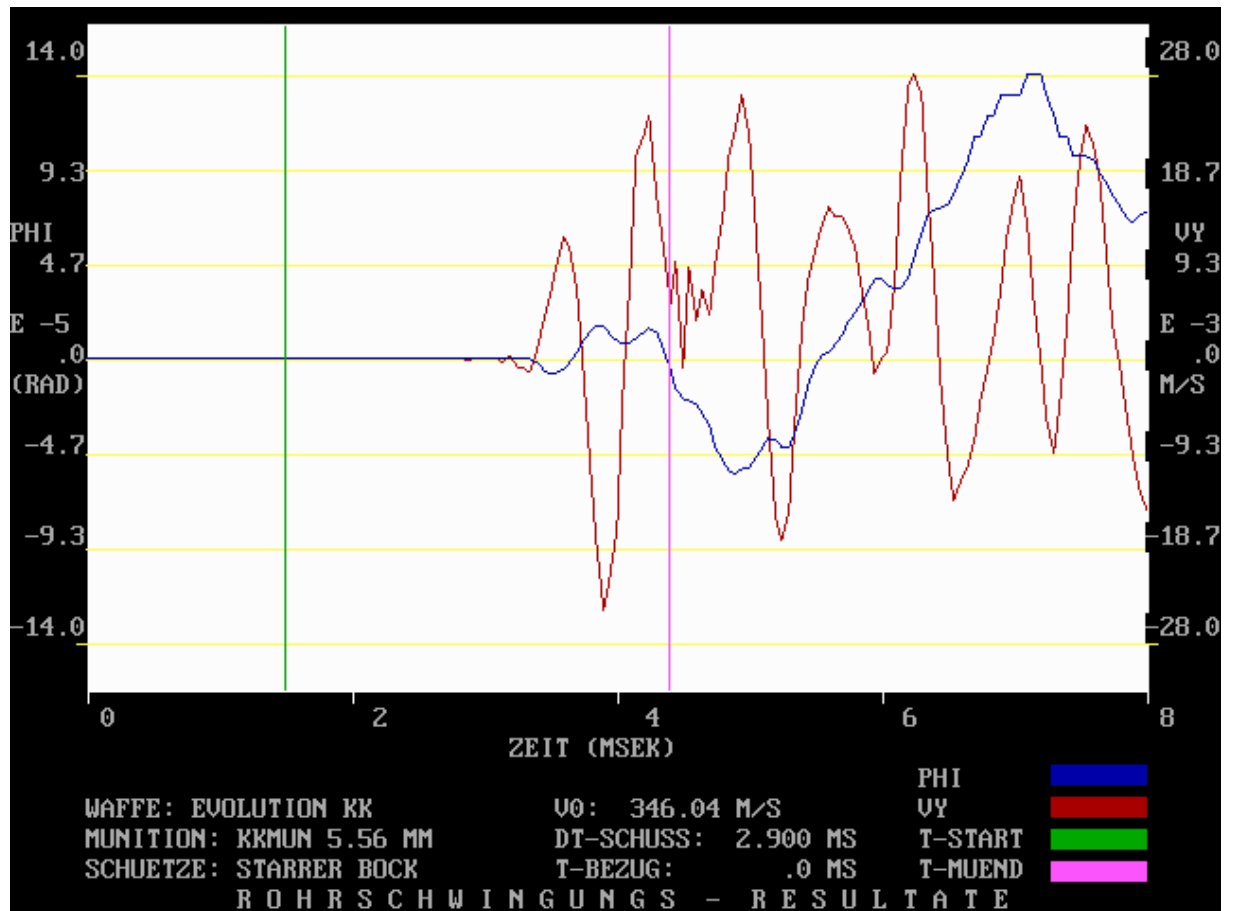


Abb. 5.29: Der Mündungswinkel „Phi“ (blau) gegen die Horizontale und die Mündungsgeschwindigkeit (rot) in Abhängigkeit von der Zeit. Die Abbildung zeigt die Verhältnisse in der Vertikalebene. Wieder markiert die grüne Vertikallinie den Zeitpunkt des Bewegungsbeginns des Geschosses und die magentafarbene Vertikallinie den Zeitpunkt, zu dem das Geschöß die Mündung passiert.

5.5.2 Trefferbildsimulation

Auf der Basis der Einzelschussberechnung werden mit dem Programm ROST entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 3.3 Trefferbilder zu je 50 Schuss berechnet. Abbildung 5.30 zeigt ein Beispiel eines gerechneten Trefferbildes.

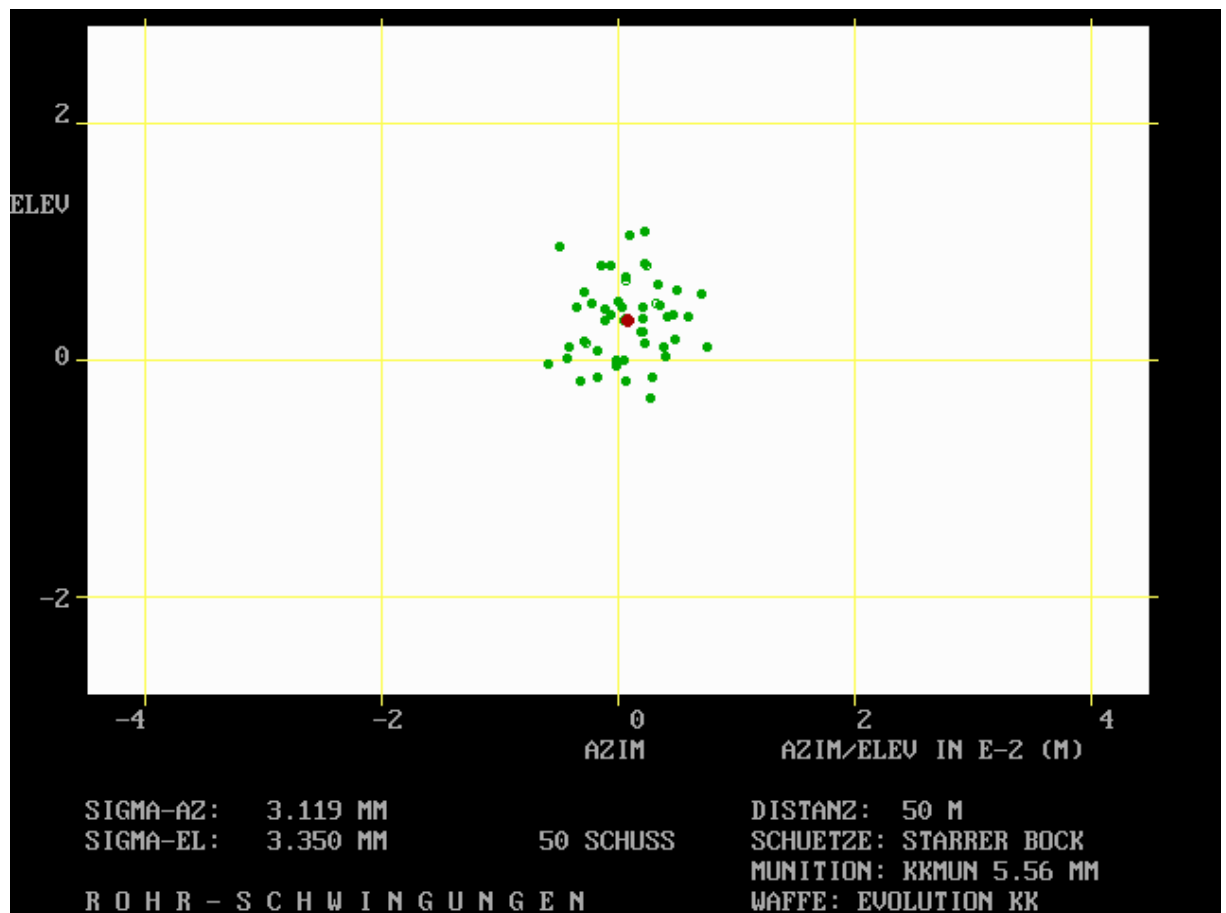


Abb. 5.30: Mit ROST gerechnetes Trefferbild. Grüne Punkte: Positionen der Einzeltreffer, roter Punkt: Position des mittleren Treffpunkts. Im linken unteren Eck (Beschriftungsteil) werden die Standardabweichungen einer angenommenen Gaußverteilung über die Trefferpositionen in Azimut und Elevation ausgewiesen.

Aus dem Ausgabefile ROSTOUT.DAT kann der mittlere Abstand der Positionen der Einzeltreffer vom mittleren Treffpunkt als <Ablage> bezeichnet (siehe Kapitel 5.3.2), entnommen werden. Die Trefferbildsimulationen mit ROST bilden die Grundlage der meisten Berechnungen mit der Modellfamilie ROSSI zu den theoretischen Optimierungsuntersuchungen für das Versuchsgewehr EVOLUTION.

5.6 Theoretisch berechnete Resultate

Für alle theoretischen Untersuchungen gilt hier, dass die Standardabweichung für die Streuung der v_0 maximal ± 2.2 m/s beträgt. Dieser Wert entspricht im Wesentlichen den gemessenen v_2 -Streuungen, bzw. ist er nur geringfügig schlechter.

Es sei nun mit Nachdruck darauf hingewiesen, dass die mit der Modellfamilie ROSSI, hier speziell dem Programm ROST erhaltenen Resultate Relativaussagen sind und keinen Hinweis auf tatsächlich

erzielbare <Ablage>-Werte in Schießversuchen zulassen. Der Grund liegt, wie bereits früher erwähnt, in der an sich freien Wahl der Streuung der radialen Exzentrizität bei der Munition. Diese freie Wahl ist erforderlich, da die tatsächliche Wechselwirkung bzw. Anpassung zwischen Munition und Lauf experimentell hier nicht erfassbar ist und daher auch nicht mit Detailanpassungsparametern in die Berechnungen gegangen werden kann. Was sehr wohl gilt, sind Tendenzen und Relativaussagen. So z.B. wie später gezeigt wird, ist das Trefferbild bei einer $v_0 \sim 336$ m/s enger und damit besser als z. B. bei $v_0 \sim 342.0$ m/s. Wie groß das Trefferbild bei 336 m/s tatsächlich in der Praxis ist, kann nicht gesagt werden, aber es kann definitiv entsprechend der Berechnungen erkannt werden, dass das Trefferbild besser ist als bei 342 m/s.

5.6.1 v_0 -Scan

Im Zuge der vorliegenden experimentellen Untersuchungen werden KK-Munitionen verschiedener v_0 verwendet. Zwar erfolgt das Gros der Tests mit der Munition R100 der Firma RWS mit einer v_2 im Bereich von ca. 345 m/s bis 350 m/s. Doch auch Munitionen mit einer v_2 im Bereich von 331 m/s bis 336 m/s werden in kleinerem Umfang hier geschossen. Damit stellt sich die Frage, wie sensibel die <Ablage> auf Variationen der v_0 reagiert. Um das zu untersuchen, werden so genannte v_0 -Scans gerechnet, wobei von $v_0 = 300$ m/s bis $v_0 = 360$ m/s im Abstand von $\Delta v_0 = 2$ m/s die <Ablage>-Werte berechnet und als Diagramm dargestellt werden.

Aus Abbildung 5.31 sind die v_0 -Scans für die exemplarisch ausgewählten Bettungen 0 und 5 mit teilweise verschiedenen Bettungsmaterialien ersichtlich.

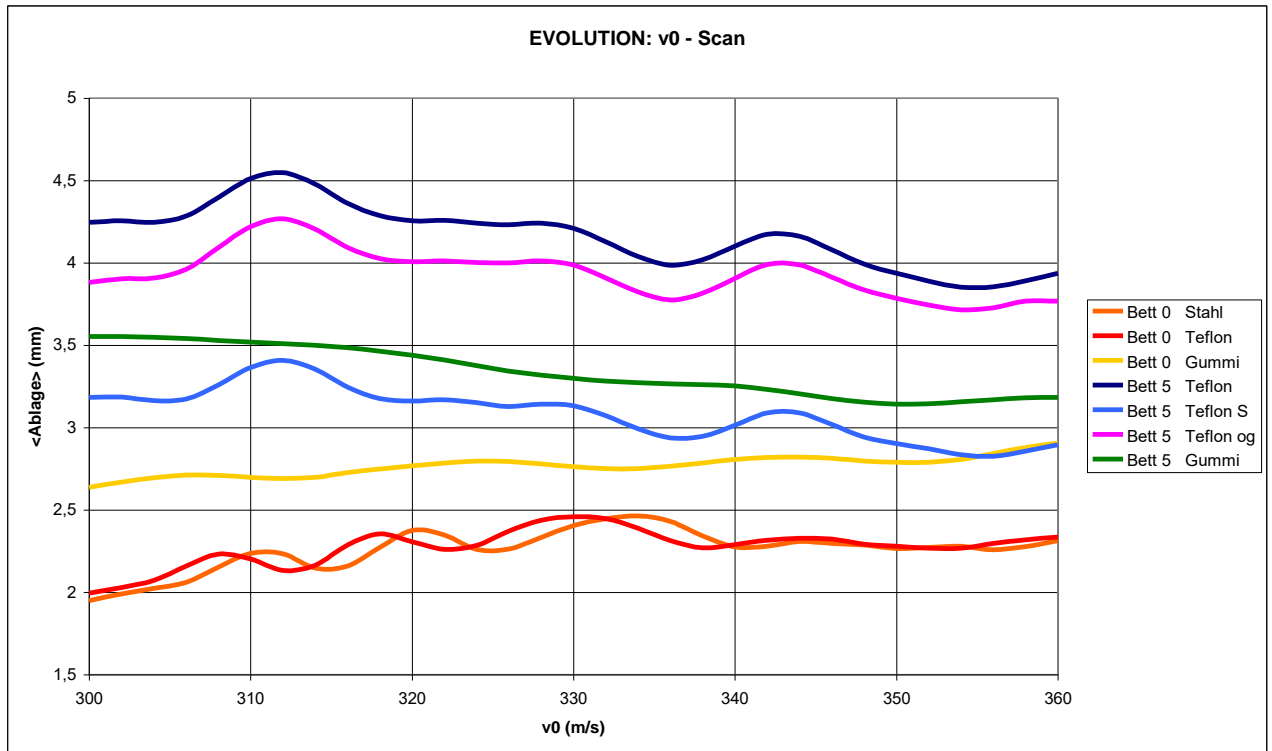


Abb. 5.31: v_0 -Scan für Versuchsgewehr EVOLUTION für die Bettungen 0 und 5 mit den Bettungsmaterialien Stahl, Teflon und Gummi.

Unter „Bett 5 Teflon S“ wird ein v_0 -Scan mit der anfänglichen SEED-Zahl 100000 verstanden. Alle übrigen Berechnungen erfolgen mit der üblichen anfänglichen SEED-Zahl 200000.

„Bett 5 Teflon og“ bedeutet, dass die Außenballistik ohne Schwerkraft gerechnet wird.

Anmerkung:

Die Bezeichnungen für die Bettungsmaterialien mit Stahl, Teflon und Gummi soll eher andeuten, dass die Bettung sehr hart (Stahl), „mittelhart“ (Teflon) und sehr weich (Gummi) ist. Eine direkte Zuordnung der Federkonstanten für die Bettungen zu den angesprochenen Materialien ist problematisch. Aus Abbildung 5.31 sind folgende Schlüsse zu ziehen:

- Die Bettung 0, also eine leider nicht technisch realisierbare Bettung relativ weit „hinten“ ist nahezu im gesamten gerechneten Geschwindigkeitsintervall besser als Bettung 5.
- Bettung 0 zeigt bei einer härteren Bettung (Stahl, Teflon) durchgängig bessere Resultate als der weiche Gummi. Dennoch ist der Gummi bei Bettung 0 besser als eine Bettung 5 mit Teflon. Andererseits ist Gummi bei Bettung 5 stets besser als Teflon. Ob eine Bettung eher weich oder doch mehr hart sein soll, ist offenbar sehr von der Bettungsposition abhängig.

- Bettung 5 mit Teflon wird einmal mit Schwerkraft (dunkelblau) und einmal ohne Schwerkraft (magenta) während der außenballistischen Flugphase gerechnet und in Abbildung 5.31 dargestellt. Die Absenz der Schwerkraft wirkt sich nur geringfügig verbessernd auf die <Ablage>-Werte aus.
- Die beiden blauen Kurven in Abbildung 5.31 für Bettung 5/Teflon sind auch als Test der Simulation mit verschiedenen SEED-Zahlen zur Zufallszahlenerzeugung (siehe Kapitel 5.3.2) anzusehen. Die dunkelblaue Kurve, in der Legende mit „Bett 5 Teflon“ bezeichnet, wird mit der anfänglichen SEED-Zahl von 200000 berechnet, wie sie auch für sonst alle anderen Berechnungen verwendet wird. Zum Vergleich wird die hellblaue Kurve, in der Legende mit „Bett 5 Teflon S“ ausgewiesen, die mit einer anfänglichen SEED-Zahl von 100000 gerechnet wird. Wegen der bei 50 Schuss noch nicht wirkenden Konvergenz in den statistischen Resultaten (siehe Kapitel 5.3.2) stimmen die Ergebnisse zahlenmäßig nicht überein. Aber: Die beiden v_0 -Scan-Kurven verlaufen zueinander parallel, wenn auch auf verschiedenen Niveaus der <Ablage>-Werte. Das hat die weit reichende Konsequenz, dass unabhängig von der anfänglichen SEED-Zahl die Relativaussagen, z.B. bei welcher v_0 gibt es relative Minima in den <Ablage>-Werten, zutreffend sind! Andererseits stellt dieses Ergebnis auch unter Beweis, dass keine absoluten Aussagen über <Ablage>-Werte bei 50 Schuss-Berechnungen möglich sind.
- Die Auswertung von Abbildung 5.31 liefert relative Minima bei $v_0 = 336$ m/s bzw. 355 m/s. Das heißt, bei Munitionstests sollten diese v_0 -Geschwindigkeiten für das Versuchsgewehr EVOLUTION unbedingt angestrebt werden.
- Hinsichtlich der Wahl des Bettungsmateriales für Bettung 5 zeigt Gummi praktisch für alle v_0 -Werte bessere, das heißt kleinere <Ablage>-Werte als Teflon. Eine weiche Bettung erweist sich hier offenbar als vorteilhaft. Es sei aber angemerkt, dass die weiche Bettung zwar leicht zu rechnen ist, aber in der Praxis möglicherweise nur schwer realisiert werden kann. Die Bettung muss die axialen Belastungen des Systems, z.B. den Rückstoß, aufnehmen. Das System und hier im Speziellen der Lauf, darf ja nicht durch die Bettung hindurchrutschen. Daher muss die Bettung eine gewisse Strenge aufweisen. Die beiden Halbschalen der Bettung müssen genügend stark zusammengedrücken. Dabei wird auch das Bettungsmaterial gequetscht. Bei härteren Materialien wird dieser Druck relativ gut, ohne gravierende Änderungen der Materialeigenschaften übertragen. Beim Gummi ist hingegen nicht sichergestellt, dass seine „Weichheit“, mit der hier gerechnet wird, nach dem Festklemmen des Systems zwischen den Halbschalen noch in diesem Umfang gegeben ist.

5.6.2 v_0 -Scan fein

Ergänzend zu den in Abbildung 5.31 gezeigten v_0 -Scan wird ausschließlich für das Versuchsgewehr EVOLUTION mit Bettung 5/Teflon ein „ v_0 -Scan fein“ gerechnet. Dabei werden außer der radialen Exzentrizität alle Streuungen der Munition ausgeschaltet, das heißt die v_0 streut nicht. Abbildung 5.32 zeigt diesen speziellen „ v_0 -Scan fein“ für das Intervall zwischen 326 m/s und 352 m/s.

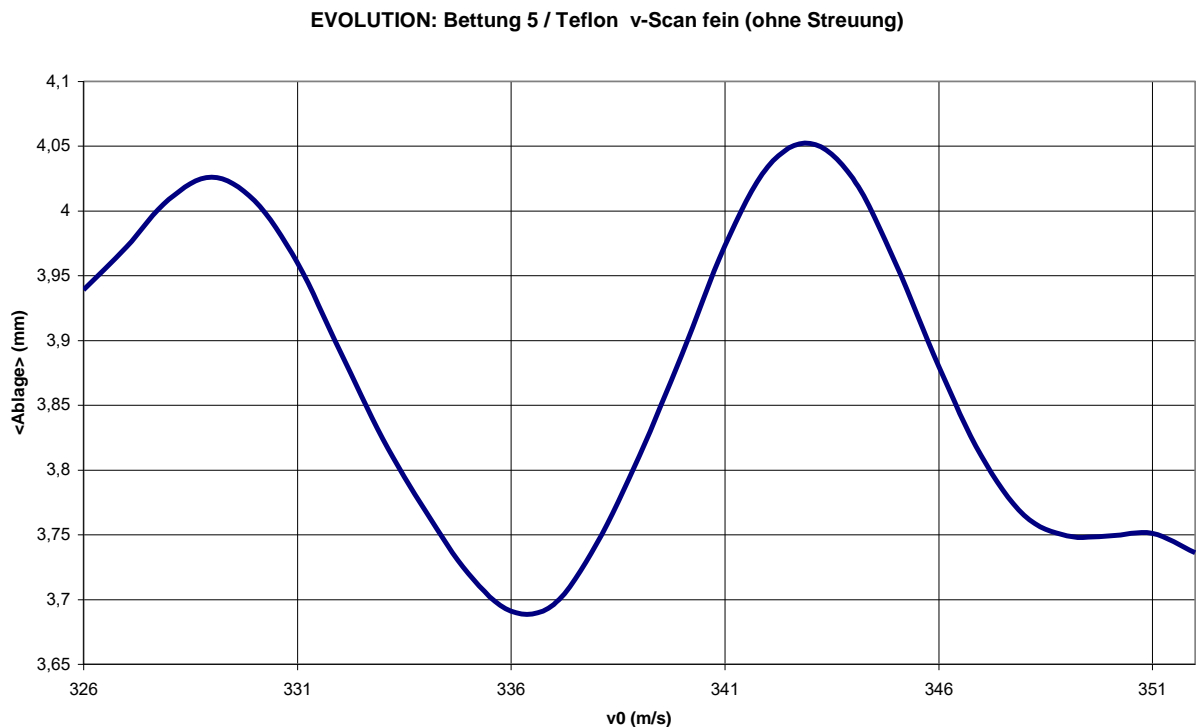


Abb. 5.32: „ v_0 -Scan“ fein für Versuchsgewehr EVOLUTION, Bettung 5/Teflon. Keine v_0 -Streuung. Die $\langle \text{Ablage} \rangle$ -Werte ergeben sich nur aus der Streuung der radialen Exzentrizität. Beachtung des Ordinatenmaßstabes!

Die Abbildung 5.32 zeigt deutlich das ausgeprägte relative Minimum bei $v_0 = 336$ bis 337 m/s. Eine Munition in diesem v_0 -Bereich (z.B. R50 von RWS) sollte etwas bessere Resultate liefern als etwa eine Munition wie R100 von RWS im Bereich $v_0 \sim 346$ m/s.

5.6.3 v_0 -Scan mit Störung

Die experimentellen Messungen der Laufschrägungen zeigen, dass nicht nur der Schuss selbst Schwingungen des Laufes auslöst, sondern bereits im Vorfeld der Aufschlag des Schlagbolzens auf die Patrone Schwingungen hervorruft. Die durch diesen Schlagbolzenaufschlag

ausgelösten Amplituden sind offenbar von Gewehr zu Gewehr verschieden und können durchaus im Bereich der Amplituden der Schüsse liegen. Mit ROSSI kann die Bewegung des Schlagbolzens nicht abgebildet werden. Das entscheidende Kriterium ist aber, dass der Schuss zu einem Zeitpunkt bricht, während der Lauf bereits schwingt. Um diese Situation näherungsweise zu modellieren wird eine Testquerkraft, die für eine definierte Zeitdauer an einem wählbaren Laufsegment „angelegt“ werden kann, benützt. Es wird eine Zeitdauer der Störeinwirkung von ca. 0.5 ms gewählt. Als Störquerkraft einschließlich ihrer amplitudenmäßigen gaußförmigen Streuung wird hier $F_{Stör} = 6000 \pm 1200 \text{ N/m}$ festgelegt. Die Richtung der senkrechten Einwirkung auf die Laufachse streut gleichverteilt um die x -Achse herum. In Abbildung 5.33 sind die v_0 -Scans ohne Störung (blau) und mit Störung für zwei verschiedene Wirkpunkte (= Laufsegmentpositionen an denen die Störkraft auf das System einwirkt), dargestellt.

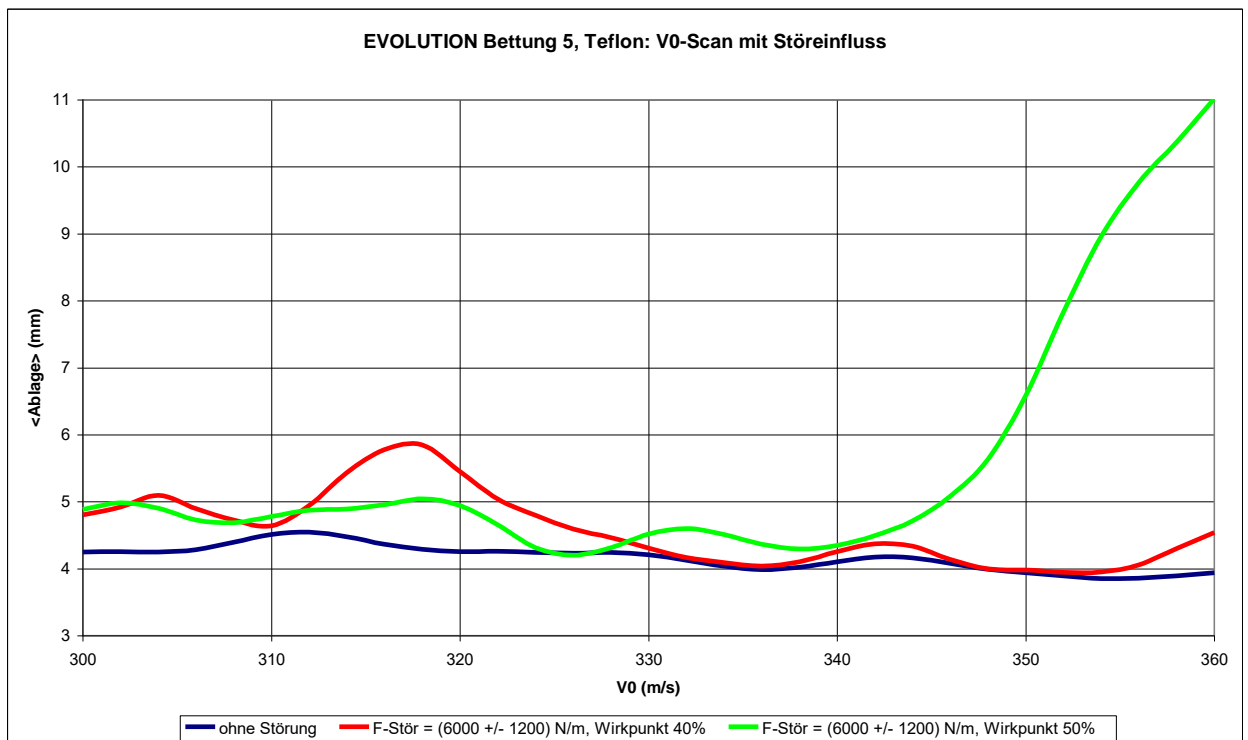


Abb. 5.33: v_0 -Scan mit Störeinfluss für Versuchsgewehr EVOLUTION Bettung 5/Teflon. Störung: Amplitude der Störquerkraft gaußverteilt mit $F_{Stör} = 6000 \pm 1200 \text{ N/m}$; Einwirkungsrichtung gleichverteilt senkrecht zur bzw. um die Laufachse. Der Wirkpunkt gibt die Lage der Einspeisung der Störquerkraft in % der simulierten Systemlänge an (0 % = hinteres Verschlussende).

Wie genau die Störung durch das Vorschnellen des Schlagbolzens auf den Lauf einwirkt, ist nicht bekannt. Dass eine Störung die $\langle \text{Ablage} \rangle$ -

Werte negativ beeinflusst, ist zu erwarten und wird durch Abbildung 5.33 bestätigt. Es zeigt sich, dass Störungen speziell bei höheren v_0 (z. B. R100 von RWS mit $v_0 = 346$ m/s) heftige Auswirkungen auf die <Ablage>-Werte haben können, aber nicht unbedingt müssen!.

5.6.4 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 untersucht worden. Als diesbezüglich entscheidender Parameter hat sich die „freischwingende Lauflänge“ herausgestellt. Mit dem Programm ROST werden nun beim Versuchsgewehr EVOLUTION die <Ablage>-Werte für eine feststehende $v_0 \sim 346$ m/s bei variabler freischwingender Lauflänge berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.34 für das Versuchsgewehr EVOLUTION dargestellt.

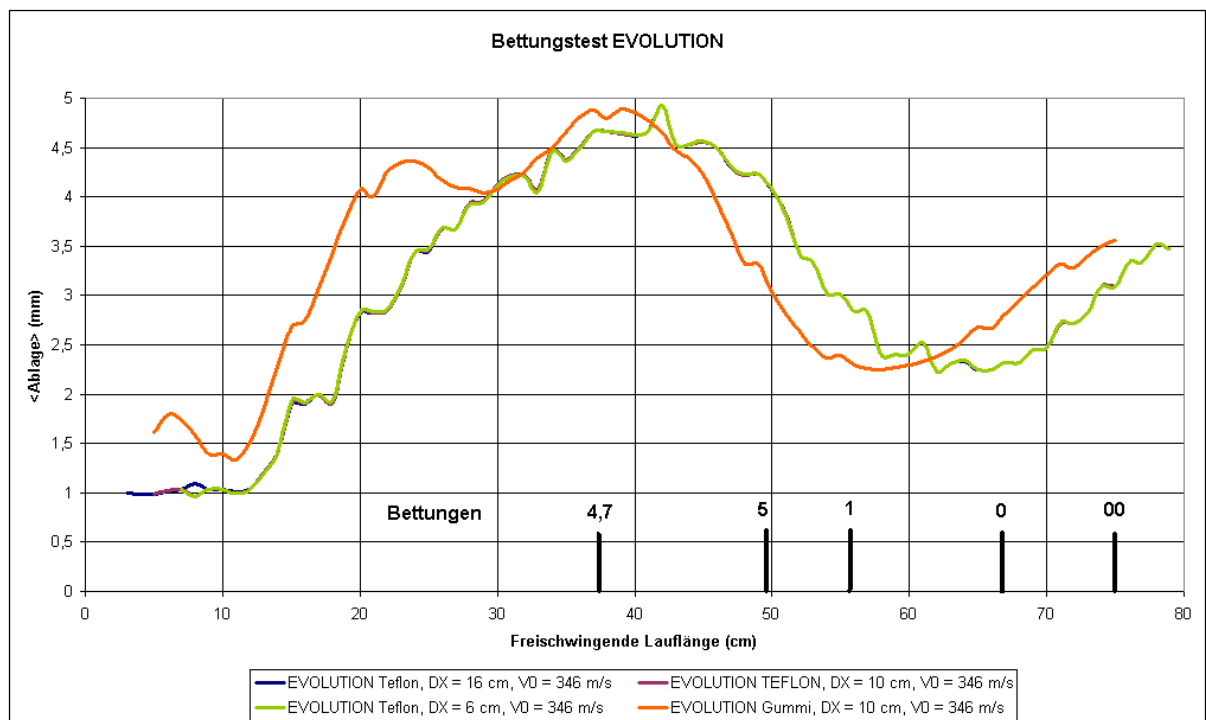


Abb. 5.34: Mit ROSSI gerechneter Bettungstest für das Versuchsgewehr EVOLUTION mit $v_0 \sim 346$ m/s; Bettungsmaterial Teflon und einmal Gummi; Länge der jeweiligen Bettungen: 6 cm, 10 cm und 16 cm. Die jeweiligen freischwingenden Lauflängen der Bettungen 00, 0, 1, 4, 5, und 7 sind an der Abszissenachse markiert.

In Abbildung 5.34 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 Mündung.

Die niederen <Ablage>-Werte bei freischwingenden Lauflängen von 10cm oder weniger ergeben sich aus der durch die v_0 -Streuung bedingten vertikalen Trefferstreuungen im Ziel.

- Es ist erkennbar, dass die Länge der Bettung (6cm, 10cm und 16cm) bei gleichem speziell härterem bis mittelharterm Bettungsmaterial wie 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 zusammenfallenden 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. In Abbildung 5.34 sind die freischwingenden Lauflängen einiger Bettungen eingetragen.
- 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 die beiden Kurven in Abbildung 5.34 selbst (grüne „Sammelkurve“ und orange Kurve) bzw. die Zonen zwischen den beiden Kurven wiedergegeben werden sollte. 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 Unsicherheiten in der Bettungshärte (Material) sollen sich bei Bettungen um die 60cm freischwingende Lauflänge nicht dramatisch auswirken. Die Bettung 1 könnte bei eher weichem Bettungsmaterial einem Optimum rein rechnerisch sehr nahe kommen.

Zum Vergleich liefert Abbildung 5.35 ebenfalls die „beiden“ Diagramme für den Bettungstest beim Versuchsgewehr EVOLUTION (grüne Kurven) und dazu den rein theoretischen Bettungstest für das Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ (gelb, rot). Für das ANSCHÜTZ-Gewehr gibt es von seiner Bauart her natürlich keine Möglichkeit die Bettung zu verändern. Die beiden Kurven für ANSCHÜTZ in Abbildung 5.35 sind daher absolut theoretischer Natur. Die gelbe Kurve mit der Bezeichnung ANSCHÜTZ „weich“ mit $v_0 = 350$ m/s gerechnet, entspricht der regulär modellierten Federkonstante für die Bettung. Die „harte“ Bettung (z. B. Teflon) setzt voraus, dass das System de facto so festklemmbar ist, wie beim Versuchsgewehr EVOLUTION, was jedoch nicht der Realität entspricht.

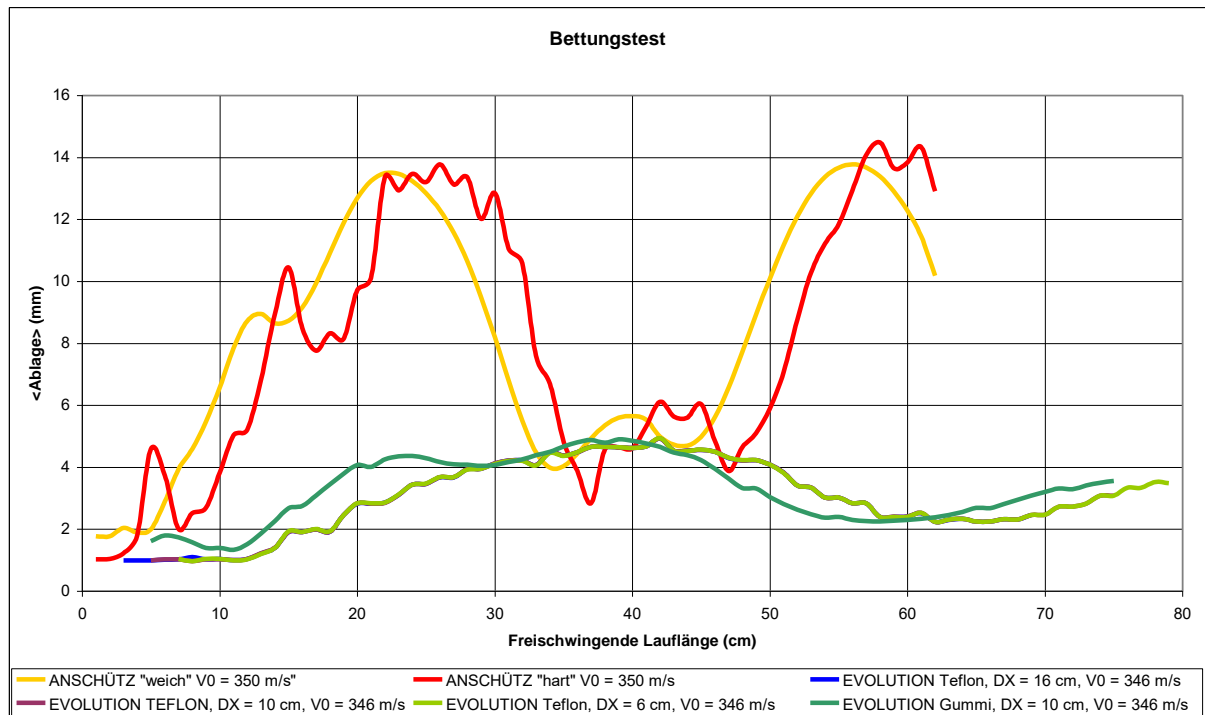


Abb. 5.35: Bettungstest wie bei Abbildung 5.34 zuzüglich theoretischer Bettungstests für das Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ.

- Die freischwingende Lauflänge beim ANSCHÜTZ-Gewehr ist baulich nicht veränderbar bei 62.5 cm und entspricht dem Ende der beiden Kurven für ANSCHÜTZ in Abbildung 5.35. Es ist zu vermuten, dass ein etwas längerer Lauf wieder zu einem <Ablage>-Wert Minimum führen würde.
- Es sei hier nochmals mit Nachdruck festgehalten, dass die größtenteils starken <Ablage>-Wert Unterschiede zwischen dem Versuchsgewehr EVOLUTION und dem Vergleichsgewehr ANSCHÜTZ in Abbildung 5.35 nur theoretisch bei exakt der gleichen rechnerischen Munition gegeben wären. Die praktische Verträglichkeit/Anpassung der Munition an die Läufe der beiden Gewehre wird in der Simulation nicht berücksichtigt (siehe Ausführungen zur radialen Exzentrizität der Geschosse).

5.6.5 Einfluss der Laufverlängerung

Am Versuchsgewehr EVOLUTION befindet sich im Anschluss an die Mündung des innenballistisch relevanten Laues (im Kaliber 5.56 mm) eine überkalibrige Laufverlängerung. Es ist zu erwarten, dass die Länge dieser Verlängerung Einfluss auf die <Ablage>-Werte haben wird. Da dieser Einfluss auch von der konkreten Bettung und der damit verbundenen freischwingenden Lauflänge sowie dem Bettungsmaterial abhängig sein wird, muss aus rechenökonomischen Gründen eine Festlegung getroffen werden. Für die hier gerechnete Sensitivitätsuntersuchung zum Einfluss der überkalibrigen

Laufverlängerung wird die Bettung 5/Teflon, festgelegt. Ferner wird angenommen, dass der überkalibrige Innendurchmesser sowie die Wandstärke der Verlängerung nicht verändert werden. Einzig die Länge bildet die gewehrbezogene Variationsgröße. Die nachfolgende Abbildung zeigt je einen v_0 -Scan für drei verschiedene fix angenommene Laufverlängerungen.

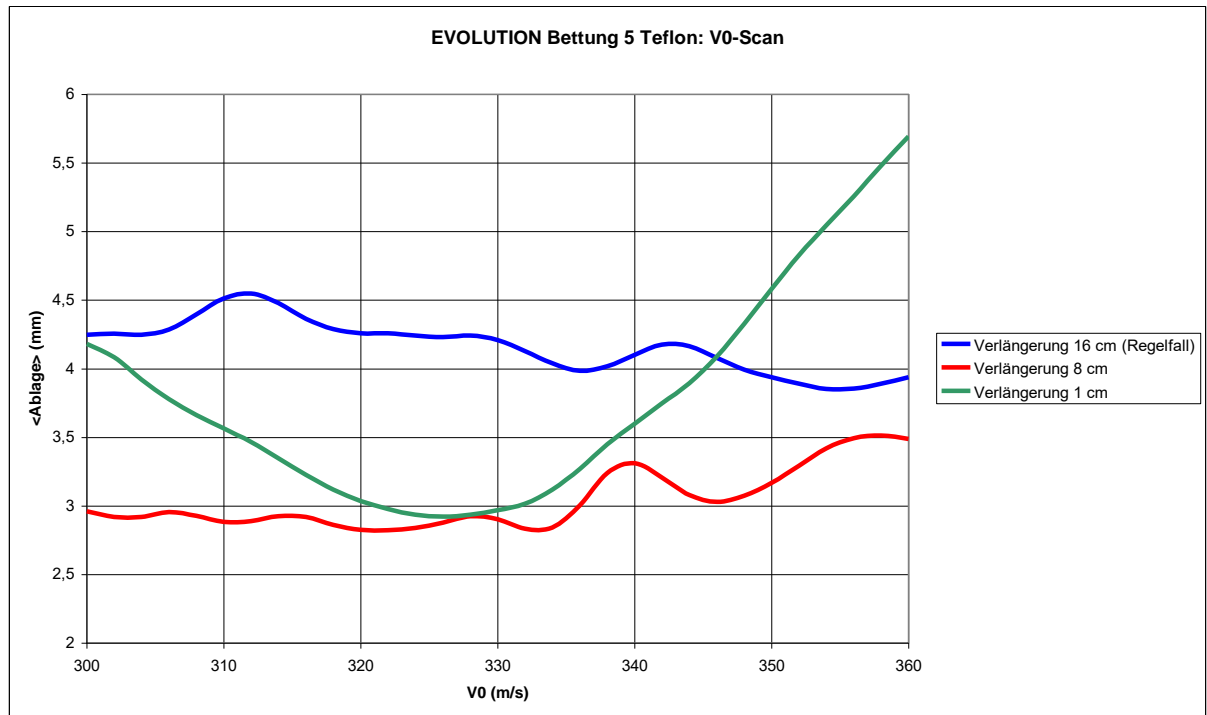


Abb. 5.36: Versuchsgewehr EVOLUTION mit Bettung 5/Teflon; v_0 -Scan für drei verschiedene überkalibrige Laufverlängerungen.

- Die in Abbildung 5.36 gewählten Laufverlängerungen sollen den Regelfall des untersuchten Versuchsgewehres EVOLUTION mit einer Verlängerung von 16 cm sowie den halben Wert und, um die geometrische Modellierung nicht zu sehr zu verändern, eine Verlängerung von 1 cm, was praktisch keiner Verlängerung entspricht, darstellen.
- Es zeigt sich, dass die 16 cm Verlängerung für den gesamten v_0 -Bereich der betrachteten KK-Munition ungünstiger ist als eine 8 cm Verlängerung. Keine Verlängerung zu verwenden würde ein sehr v_0 -abhängiges Verhalten der <Ablage>-Werte nach sich ziehen.

Eine weitere rechnerische Untersuchung soll die <Ablage> für zwei typische v_0 -Werte (nämlich 336 m/s und 346 m/s) bei kontinuierlicher Variation der Länge beinhalten.

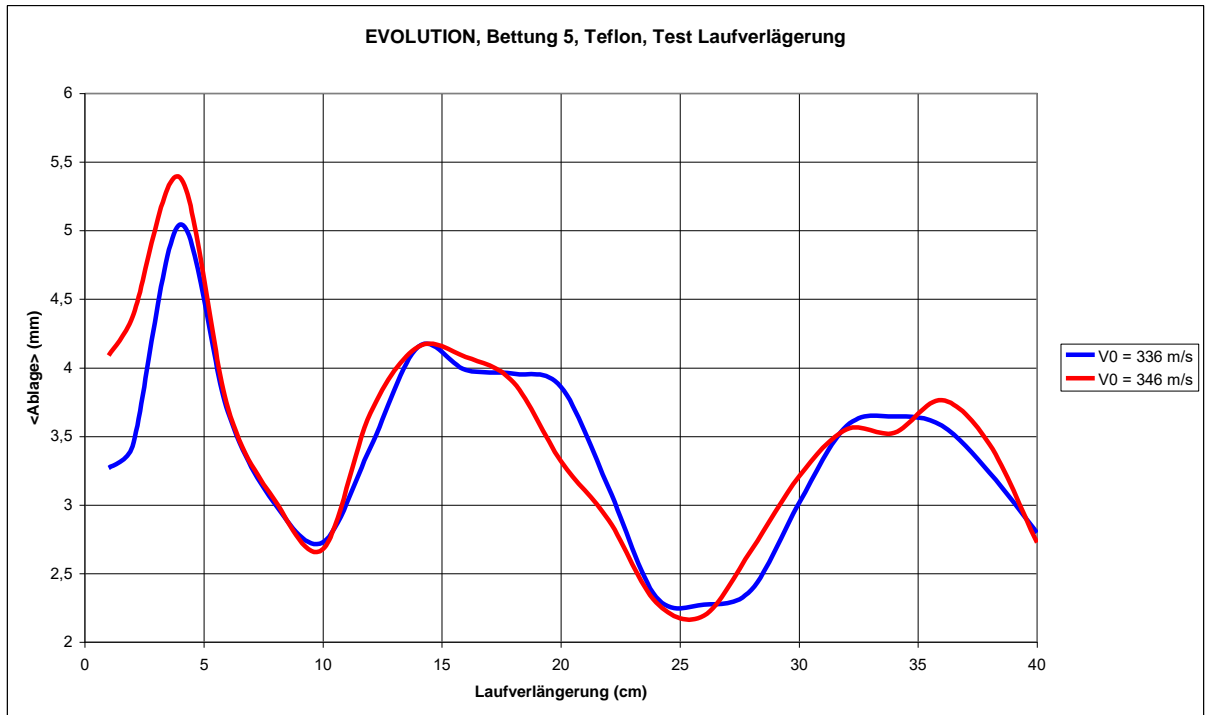


Abb. 5.37: Versuchsgewehr EVOLUTION mit Bettung 5/Teflon. Verhalten der <Ablage> bei feststehender v_0 und variabler Laufverlängerungslänge.

Abbildung 5.37 zeigt eindeutig, dass

- es deutliche Minima der <Ablage> bei ~ 10 cm und bei ~ 25 cm gibt und
- diese Minima praktisch unabhängig von der v_0 sind.

Aus laufschwingungstechnischer rechnerischer Sicht wäre eine Verlängerung von ca. 25 cm zu empfehlen. Es wird aber darauf hingewiesen, dass die Laufverlängerung auch einen abgangsbalistischen Effekt - Windschutz in der noch instabilen Anfangsflugphase des Geschosses - hat, der hier nicht untersucht wird. Mögliche negative Einflüsse von dieser Seite können nicht ausgeschlossen werden und erfordern gegebenenfalls eine Kompromisslösung.

6. Zusammenfassung und Empfehlungen

Zuerst werden einige experimentelle Resultate den Ergebnissen theoretischer Berechnungen mit ROSSI gegenübergestellt. Den Abschluss bilden dann entsprechend der grundlegenden Aufgabenstellung aus den experimentellen und theoretischen Untersuchungen ableitbare Empfehlungen für das Versuchsgewehr EVOLUTION.

6.1 Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Resultate

6.1.1 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. Eine geeignete Methode der modellmäßigen Wiedergabe dieses Verhaltens ist das Konzept der stochastisch verteilten radialen Exzentrizität der gerechneten Geschoße. Es gibt keine Möglichkeit auf waffentechnischer Seite diese Zufälligkeit der Schwingungsformen gänzlich zu vermeiden. Auch beim realen Geschoß kann der Schwerpunkt eine wechselnde radiale Exzentrizität zeigen. Als Ursache können unter anderem Inhomogenitäten im Blei, ein nicht koaxial in die Patronenhülse eingebautes 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 – qualitativ – nachempfunden 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 Geschoßbodens 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.

Um ein theoretisches Modell wie ROSSI optimal nützen zu können, müssen einige Parameter festgelegt bzw. experimentell geprüft werden. Dazu dient das Vermessen der Eigenschwingungen des Laufes. Diese Schwingungen liegen als abklingende Schwingungen vor, nachdem das Geschoß den Lauf verlassen hat. Das Prüfen des dynamischen Grundverhaltens wie z.B. die Erfassung der Eigenfrequenzen und das

Abklingverhalten der Schwingung sind Voraussetzung, um dann mit einem Rechenmodell vernünftige Aussagen treffen zu können.

Die dritte wesentliche Erkenntnis aus den direkten Laufschiwungungsmessungen 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 Schwiwungen 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 Schwiwungen 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 Schwiwungen 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 der Laufschiwungen durch den Schlagbolzen sowie die Analyse mit ROSSI zeigen ferner, 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 Ausziehwiwerstand des Geschoßes zu überwinden. Das heißt, das Geschoß bewegt sich in einen bereits schwiwgenden Lauf hinaus. Die für die Schussgenauigkeit relevanten Schwiwungen des Laufes im Mündungsbereich setzen sich daher aus der abklingenden Schwiwung die durch den Schlagbolzen ausgelöst wird und der erzwungenen Schwiwung durch die Bewegung (Drallbewegung) des Geschoßes, zusammen. Diese Erkenntnis bedeutet auch, dass theoretische Modelle die nur auf einer analytischen Lösung, etwa der Eigenfrequenz einer Schwiwungsgleichung beruhen, nur sehr eingeschränkt verwendbar sein dürften. Die gemessenen Amplituden der alleine vom Schlagbolzen verursachten Schwiwungen, können in der Größenordnung der gesamten, einschließlich der durch den Schuß bewirkten Schwiwungen sein. Dadurch können sonstige schwiwungstechnische Optimierungen an der Waffe durch den Schlagbolzen stark vermindert oder unwirksam werden.

6.1.2 Schussbildanalyse

Der experimentelle Versuch bei verschiedenen Bettungen und Bettungsmaterialien des Versuchsgewehres EVOLUTION durch den Vergleich von Schussbildern eine Optimallösung zu finden, ist fehlgeschlagen. Der Schluss ist naheliegend, dass die Unterschiede in den Bettungen durch die Störungen der schlagbolzeninduzierten Schwiwungen egalisiert werden. Beim Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER werden deutlich geringere Schwiwungen durch

den Schlagbolzen gemessen. Offenbar als Folge davon unterscheiden sich die Schussbilder mit den drei R50 Munitionslosen für das Gewehr TAUBER dann doch signifikant. Daher wird das Hauptaugenmerk jetzt auf das Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER gelegt, welches aber nur in einer Bettung, nämlich Nr. 5/Teflon, vorliegt. In Tabelle 6.1 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. 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 nach ROSSI berechnet. Dadurch können die gerechneten Geschwindigkeiten direkt mit den gemessenen Geschwindigkeiten verglichen werden.

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 ± 1.21	3.86	334	331.3	3.77
418ID176	333.8 ± 1.86	3.20	336	333.3	3.69
597FB965	335.8 ± 1.73	3.46	338	335.3	3.74

Tabelle 6.1: Vergleich der gemessenen und mit dem Modell ROSSI (Programm ROST) gerechneten Schussbildresultate für das Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER, Bettung 5/Teflon. Gemessene wie gerechnete Schussserien mit jeweils 50 Schuss. Die gerechneten v_0 - beziehungsweise v_2 -Geschwindigkeiten werden nur durch Streuung der radialen Exzentrizität in ihrer Stärke und dem Rollwinkel berechnet (nach „v-Scan fein“ in Kapitel 5.6.2, Abbildung 5.32)

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 zumindest lokales, Minimum. Weiter noch ist aus Tabelle 6.1 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 $\langle \text{Ablage} \rangle$ -Werte für die $v_2 = 335.8 \text{ m/s}$ (experimentell) und $v_2 = 335.3 \text{ m/s}$ (ROSSI). Nicht nur das $\langle \text{Ablage} \rangle$ -Minimum als Funktion von v_2 wird von der Theorie richtig wiedergegeben, sondern auch die $\langle \text{Ablage} \rangle$ -Trends geschwindigkeitsmäßig vor und nach dem Minimum werden in der Theorie richtig ermittelt. Zur Signifikanz der experimentellen $\langle \text{Ablage} \rangle$ -Resultate kann dahingehend argumentiert werden, dass nach Kapitel 4.3.2 die experimentelle Streuung σ der $\langle \text{Ablage} \rangle$ -Werte bei vergleichbaren Schussserien rein messtechnisch gesehen bei $\sigma = \pm 0.12 \text{ mm}$ liegt. Dabei ist hier für die Bestimmung von σ nicht relevant, dass die Schlagbolzenschwingungen beim Versuchsgewehr EVOLUTION einen offensichtlich stärkeren Einfluss ausgeübt haben als beim Versuchsgewehr EVOLUTION/TAUBER. Unter Zugrundelegung der messtechnisch erfassten $\sigma = \pm 0.12 \text{ mm}$ können die Differenzen der gemessenen $\langle \text{Ablage} \rangle$ -Werte in Tabelle 6.1 als signifikant, da größer als σ (sogar mehr als 2σ) auseinander liegend, bezeichnet werden. Das experimentelle Minimum der $\langle \text{Ablage} \rangle$ für $v_2 = 333.8 \text{ m/s}$ ist daher nicht zufälliges Resultat (Rauschen), sondern systematisch.

Umgekehrt kann die gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen und den theoretischen Aussagen auch dahingehend interpretiert werden, dass in der Theorie der Ansatz mit der radialen Exzentrizität des Geschoßes als zielführend zu bewerten ist. Können also die durch den Schlagbolzen erzeugten Schwingungen reduziert werden, kann man eine Optimierung der schussinduzierten Auswirkung von Laufschrägungen vornehmen. Diese Optimierung kann nun für die freischwingende Lauflänge (und damit die Bettung), bei etwa ca. 60 cm, die Wahl der überkalibrigen Laufverlängerung bei ca. 25 cm und der Wahl der v_0 der Munition, etwa 336 m/s, vorgenommen werden.

6.2 Empfehlungen zum Versuchsgewehr EVOLUTION

Die angegebenen Empfehlungen sind großteils im vorliegenden Bericht schon ausführlich dargelegt und sollen letztendlich hier als Kurzfassung der Arbeitsergebnisse zu verstehen sein.

- Beachtung des Schlagbolzenaufschlages. Ein möglichst „sanfter“ Aufschlag ist anzustreben. Prüfung durch Schwingungsmessungen ohne scharfen Schuss (leere Patronenhülse).
- Die freischwingende Lauflänge (Bettung) sollte um ca. 60 cm liegen. Als Bettungsmaterial scheint Teflon eine gute Wahl zu sein.
- Die überkalibrige Laufverlängerung sollte eine Länge von ca. 25 cm haben.
- Bei der Auswahl der Munition ist zu beachten:
 - * Abstimmen der v_0 auf ein gerechnetes $\langle \text{Ablage} \rangle$ -Minimum, z.B. 336 m/s

- * Prüfung der v_0 -Streuung. Eine große Streuung der v_0 reduziert den Vorteil eines v_0 -< Ablage >-Minimums.
- * Die Tendenz der mittleren v_0 über eine volle Schussserie sollte geprüft werden. Dadurch könnte ein „Auswandern“ der $\langle v_0 \rangle$ vom < Ablage >-Minimum im Laufe eines Wettkampfes verhindert werden.
- * Die Munitionstestung sollte daher Schussserien von 50 Schuss (mindestens) umfassen. 10er-Serien erscheinen zu gering um statistisch belastbare Daten bzw. Trends zu erhalten.
- * Die Munitionstestung sollte unbedingt in einem Schießkanal (kein Wettereinfluss), von einem geeigneten Schießbock (z.B. dem des HLSZ) und mit einer v_0 bzw. v_2 -Messanlage erfolgen. Die Aufnahme und Analyse der Geschwindigkeitsdaten erscheint essentiell.

6.3 Anmerkungen für den Großkaliberbereich

Die vorliegenden Erkenntnisse aus den Ausführungen zum Versuchsgewehr EVOLUTION lassen sich teilweise auch auf den Großkaliberbereich (z.B. Scharfschützengewehr) umlegen.

Es wird auch bei Großkalibergewehren der Schlagbolzen vor dem Brechen des Schusses den Lauf bereits in Schwingungen versetzen. Dabei ist aber einerseits zu bedenken, dass die Energie zur Anregung von Laufschwingungen durch die Geschößbewegung ein Vielfaches von dem beträgt, was im KK-Bereich verfügbar ist. D.h., die schussinduzierten Schwingungen müssen deutlich stärker ausfallen als die durch den Aufschlag des Schlagbolzens hervorgerufenen Schwingungen. Andererseits sind im Großkaliberbereich, mit Ausnahme der Großkalibersportwaffen, die Gewehrläufe wesentlich dünnwandiger womit das Schwingungsproblem auch vom Schlagbolzen her betrachtet wieder steigt. Einen wieder mildernden Einfluss der Auswirkungen von Laufschwingungen auf die Schussgenauigkeit sind die wesentlich kürzeren innenballistischen Schussentwicklungszeiten gegenüber den KK-Gewehren. Aus den eben skizzierten Ausführungen ist es nahe liegend mit dem hier am System EVOLUTION erprobten Simulationsmodell ROSSI auch Berechnungen für Großkaliberwaffen durchzuführen. Dabei kann der theoretische Ansatz mit der radialen Exzentrizität des Geschößes zur Berechnung von Schussbildern voll übernommen werden. Im Großkaliberbereich ist es wegen der ungleich höheren Rückstoßkräfte technisch sicher nicht möglich, das System am Lauf mit Klemmen wie beim Versuchsgewehr EVOLUTION mit dem Schaft zu verbinden. Das Entscheidende ist jedoch die optimale „freischwingende“ Lauflänge zu berechnen sowie mittels v-Scan die beste Geschößgeschwindigkeit zu ermitteln.

Die Versuche mit dem KK-Gewehr EVOLUTION können als bestandener Test für mögliche Optimierungsansätze bei Großkalibergewehren angesehen werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] J. SEQUARD-BASE „Diskussion der Messmethodik zur Beurteilung des Einflusses von Laufschrwingungen bei Kleinkalibersportgewehren“, Bachelorarbeit approbiert an der Universität Wien, 2011
- [2] J. SEQUARD-BASE „Experimentelle Untersuchungen der Auswirkungen von Laufschrwingungen bei Kleinkalibersportgewehren“, Masterarbeit approbiert an der Universität Wien, 2012
- [3] K. N. SCHWINKENDORF, S. P. ROBLER „Three River Technologies – Simulation of the Vibrational Response of a Rifle Barrel During Firing“
www.vni.com/successes/threerivers.html, Stand. 22.05.2005
- [4] C. M. HARRIS, A. G. PERSOL “Harris’ Shock and Vibration Handbook” Fifth Edition, McGraw-Hill Handbooks
- [5] Waffentechnisches Taschenbuch, Gesamtleitung, Dr. Germershausen, Firma Rheinmetall, 6. Auflage 1983
- [6] R. BITTNER, interner Prüfbericht „GewehrLaufschrwingungsmessungen“, 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] R. FRÜHWIRTH, M. REGLER, „Monte-Carlo-Methoden, Eine Einführung“, B.I.-Wissenschaftsverlag, 1983

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 unser erster Dank Herrn Bgdr DI Erich APOLONER, der die Durchführung der Bachelor- und Masterarbeit für Johannes SEQUARD-BASE im Rahmen eines Verwaltungspraktikums und eines Funktionsdienstes im ARWT ermöglicht hat. Für das Zustandekommen des Verwaltungspraktikums und des Funktionsdienstes sei auch der personalführenden Stelle des ARWT unter Herrn ADir LANGECKER gedankt. Vielen Dank weiters den Herren Bgdr Dr. PFANNHAUSER (Bereichsleiter) und HR DI DORNINGER (Abteilungsleiter Abteilung WFT) für die Aufsicht und Abwicklung des Projektes in ihrem Bereich bzw. Abteilung.

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

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

Ohne ihn und seine innovativen Ideen gäbe es kein Versuchsgewehr EVOLUTION. Herrn Vzlt Alfred TAUBER gebühren unser Respekt und unsere Anerkennung für die Entwicklung des Versuchsgewehres EVOLUTION. Wir danken ihm für die zur Verfügungstellung zweier Gewehre und die Ermöglichung der Bachelor- und Masterarbeit im Rahmen seines Physikstudiums für Johannes SEQUARD-BASE mit dem Versuchsgewehr EVOLUTION.

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

Ohne die großzügige Bereitschaft zur Zurverfügungstellung eines elektronischen Trefferanzeigesystems durch die Firma MEYTON (Vertreter Herr Anton ZIEGLER) für die Dauer der Experimente wäre das Projekt nicht gestartet worden. Vielen Dank für die unbürokratische Abwicklung und Einweisung!

Des Weiteren möchten wir uns auch bei Frau Ingrid KOPPI herzlich bedanken, die viel Geduld mit unseren Manuskripten bei der Anfertigung der Reinschrift aufgewendet hat sowie für die vorzügliche administrative Abwicklung des gesamten Projektes.

Ein besonders herzliches „thank you“ möchten wir Herrn Mag. HEISSENBERGER entgegenbringen, der uns mit der Übersetzung der Zusammenfassung in die englische Sprache sehr behilflich war.

Schließlich und endlich wollen wir unseren Dank dem Referat für Öffentlichkeitsarbeit des ARWT sowie der Heeresdruckerei für die gute Zusammenarbeit abstatten.

Die Autoren

Johannes SEQUARD-BASE, BSc, MSc

Jahrgang 1990, Studium der Physik an der Universität Wien von 2009 – 2012, Sportschütze (Luftgewehr, Kleinkaliber und Großkaliber) mit mehreren Spitzenplatzierungen bei Österreichischen Meisterschaften in der Juniorenklasse sowie Mannschaftsstaatsmeister 2010 im Bewerb Großkaliber 60 Schuss liegend. Ab 2012 Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei AC²T research GmbH im Bereich Verschleißmodellierung.

Mag. Dr. techn. Peter SEQUARD-BASE

Jahrgang 1958, Studium der Physik an der Universität Wien von 1978 - 1984, Promotion an der Technischen Universität Wien 1987. Seit 1988 im Amt für Rüstung und Wehrtechnik des Österreichischen Bundesheeres im Bereich Systemanalyse tätig. Arbeitsschwerpunkte: Boden- und luftgestützte Luftverteidigung, Raketenabwehr.

Bei Rückfragen zum Thema Laufschiwingungsmessungen wenden Sie sich bitte an:

arwt.wft@bmlvs.gv.at

Impressum:

Amtliche Publikation der Republik Österreich
Bundesministerium für Landesverteidigung und Sport

Medieninhaber, Herausgeber und Hersteller:

Republik Österreich
Bundesministerium für Landesverteidigung und Sport, BMLVS
Adresse: Roßauer Lände 1, 1090 Wien

Redaktion:

BMLVS,
Amt für Rüstung und Wehrtechnik
Postadresse: Roßauer Lände 1, 1090 Wien
Fax: +43 (0) 502011017134
E-Mail: arwt@bmlvs.gv.at

Redakteure:

ADir RgR GORITSCHNIG Bernhard
ADir ZENGINEER Sinan

Erscheinungsjahr: 2016



Gedruckt nach der Richtlinie „Druck-
erzeugnisse“ des Österreichischen
Umweltzeichens, UW-Nr. 943

Druck: BMLVS / Heeresdruckzentrum (16-00970)