

Aussenballistik:

Flugbahn und Ziellinie

Vorwort

Das vorliegende Dokument enthält die Zusammenstellung einer Artikelserie, welche im Schweizer Waffenmagazin von Ausgabe 3/2006 bis 1/2007 erschien. Ergänzend zur vorliegenden Schrift sei die Anwendung von „Ballistik für den Feldgebrauch“ empfohlen. Das Layout ist für umseitigen Farbdruck vorbereitet.

Marcel Tschannen

Inhaltsverzeichnis

Zielen und Zielmittel	7
Flugbahn und Ziellinie	10
Der Visierbereich	14
Die günstigste Einschuss-Entfernung GEE	18
Die optimale Schusswaffe	22
Einschiessen und Richten	26
Visierkorrekturen	30
Rund ums Zielfernrohr	33
Zielfehler	37
Der geneigte Schuss	41
Anhang: Umrechnungstabellen	45

Zielen und Zielmittel

Mit einem Gewehr zu zielen, lernen die meisten als Kinder mit einem Luftgewehr und denken nie mehr weiter über Zielen und Treffen nach. Erst wenn Probleme auftauchen, stellt sich die Frage nach dem Zusammenhang von Flugbahn und Visier oder noch grundlegender: Was ist überhaupt „Zielen“?

1. Zielen

Normalerweise schießt man, um ein Ziel zu treffen; ein Treffer erfolgt genau dann, wenn die Flugbahn des Geschosses durch den Zielpunkt führt. Zielen besteht deshalb abstrakt gesprochen darin, eine Flugbahn zu erzeugen, welche dieser Bedingung genügt.

Die Flugbahn ist bestimmt durch Rand- und Startbedingungen. Randbedingungen sind die Atmosphäre, Geschossmasse und –form, Startbedingungen sind die Mündungsgeschwindigkeit v_0 (Geschwindigkeit zur Zeit $t = 0$) und der Schusswinkel sw (Bahnwinkel zur Zeit $t = 0$). Welche dieser Grössen kann nun der Schütze im Rahmen des Zielvorgangs beeinflussen, um die erforderliche Flugbahn zu erzeugen?

Von den Randbedingungen kann bzw. muss der Schütze Geschossmasse und –form vorgängig durch die Wahl geeigneter Munition beeinflussen, was allerdings nur auf sehr abstrakter Ebene als zum Zielvorgang gehörig betrachtet werden kann; die Atmosphäre schliesslich kann er gar nicht beeinflussen. In der Artillerie – der Heimat der Ballistik – kann der Schütze beide Startbedingungen beeinflussen: Die Mündungsgeschwindigkeit durch Wahl der geeigneten Ladung und den Schusswinkel, indem er nach Art der Landvermesser an der Rohrneigung den gewünschten Winkel zur Erdoberfläche einstellt; wer nicht in der Artillerie war, kennt diese Art des „Zielens“ vielleicht vom Sturmgewehr 57, an welchem der Schusswinkel zum Verfeuern der Gewehrgranate mittels eines hängenden Taschenmessers und einer geeigneten Skala auf dem Zweibein eingestellt wurde. In Bild 1 sieht man, wie an einem Stgw 57 ein sehr steiler Flugwinkel von ca. 70° eingestellt ist, wodurch gemäss Skala auf dem Zweibein die Gewehrgranate nach 350 m ihr Ziel treffen wird.



Bild 1

Der Schütze einer Hand- oder Faustfeuerwaffe hingegen kann weder spontan die Ladung seiner Patrone verändern noch kann er umständlich einen Schusswinkel in Bezug zur Erdoberfläche einstellen; dies ist technisch kaum möglich (instabile Waffenstellung, kaum messbar kleiner Schusswinkel) und entspricht auch nicht der schnellen Einsatzweise dieser Waffen. Man rüstet solche Waffen deshalb mit einem Zielmittel aus, welches ein direktes Ausrichten nach dem Ziel erlaubt.

So ein Zielmittel ist ein Gerät, welches eine gerade Ziellinie definieren kann. Wenn nun diese

gerade Ziellinie durch ein Ziel in Mündungshöhe geht, so ergibt sich zwischen Ziellinie (grau in Bild 2) und Mündungslinie (x-Achse in Bild 2) ein Zielwinkel z_w , welcher abhängig ist von der Zieldistanz SD und der Visierhöhe VH , d. h. der Höhe der Ziellinie über der Mündung; als Formel $z_w [\text{mrad}] = VH [\text{mm}] / SD [\text{m}]$. Wenn man nun das Zielmittel so einstellt, dass der Visierwinkel vw zwischen Ziellinie und Laufseelenachse gleich der Summe von Zielwinkel und verlangtem Schusswinkel ist ($vw = z_w + sw$), so ergibt sich durch Ausrichten der Waffe auf ein Ziel in Mündungshöhe der gewünschte Schusswinkel und somit eine Flugbahn, die das Ziel in der Distanz SD schneidet. Dieses Einstellen des Visierwinkels geschieht in der

Regel experimentell durch Einschossen auf die Distanz SD, welche in diesem Zusammenhang Einschuss-Entfernung EE genannt wird.

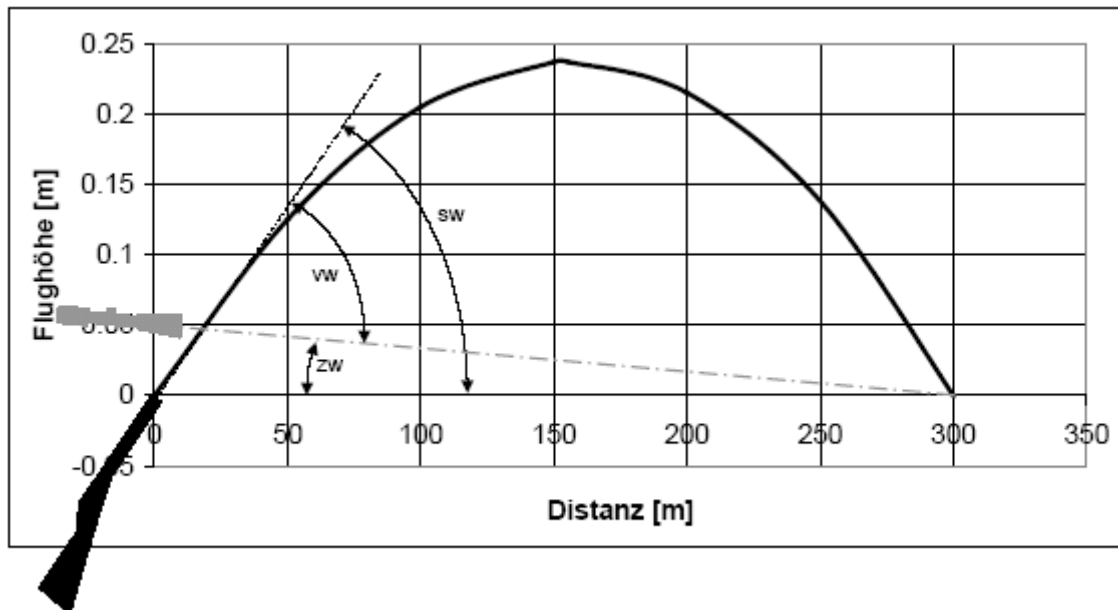


Bild 2

2. Mathematisierung des Zielvorgangs

Die Flugbahn einer Kugel im Vakuum wird durch folgende Formel beschrieben:

$$y(x) = x \cdot \tan sw - g \cdot x^2 / (2 \cdot v_0^2 \cdot \cos^2 (sw))$$

sw: Schusswinkel als Bogenmass

v_0 : Mündungsgeschwindigkeit in m/s

g: Erdbeschleunigung 9.81 m/s²

x: Aktueller Ort des Geschosses in Meter nach der Mündung (Mündung x = 0)

Für sehr flache Schusswinkel kann man die Formel vereinfachen zu:

$$y(x) = x \cdot sw - g \cdot x^2 / (2 \cdot v_0^2)$$

Nach diesem Modell bedeutet Zielen das Einstellen eines Schusswinkels und – falls technisch möglich – einer Mündungsgeschwindigkeit ; dies ist physikalisch korrekt, entspricht aber nicht der Praxis des Zielens mit Flachbahn-Waffen. Wie oben ausgeführt wird beim Zielen mit Flachbahnwaffen einmal durch Einschossen ein Visierwinkel eingestellt, der dann auch beim Schiessen auf andere Distanzen als die Einschuss-Entfernung immer beibehalten wird (sofern kein verstellbares, sondern nur ein justierbares, ansonsten aber festes Zielmittel benutzt wird). Ein mathematisches Modell dieses Zielvorgangs soll folgende Bedingungen erfüllen:

1. Die Flugbahn werde in einem rechtwinkligen Koordinatensystem beschrieben, dessen Ursprung in der Mündung liegt.
2. Die Ziellinie werde durch eine Gerade beschrieben, welche durch den Punkt (0, VH) und durch den Zielpunkt (x, 0) führe; d. h. es wird immer Fleck gezielt und der Zielpunkt befindet sich immer auf Mündungshöhe.

Im Gegensatz zur rein ballistischen Flugbahn-Funktion $y(x)$ wollen wir das neue Modell „Schusslage-Funktion“ $y_z(x)$ nennen, weil die y-Koordinate jeweils die Lage des Treffpunktes in Bezug zum Zielpunkt bedeutet ($y = 0$: Treffer, $y < 0$: Tiefschuss, $y > 0$: Hochschuss).

Aus der Annahme, dass durch Einschossen auf die Distanz EE mit einem Schusswinkel sw_{EE} und einer Visierhöhe VH ein Visierwinkel vw eingestellt werde, der dann immer gleich bleibe, erhält man folgende Schusslage-Funktion:

$$y_z(x) = x \cdot (VH / EE + g \cdot EE / (2 \cdot v_0^2)) - x^2 \cdot g / (2 \cdot v_0^2) - VH$$

Man beachte, dass für $VH = 0$ die Schusslage-Formel identisch wird mit der Flugbahn-Formel, wenn man in diese den Schusswinkel zur Einschuss-Entfernung

$$sw_{EE} = g \cdot EE / 2 \cdot v_0^2$$

einsetzt. Das Modell $y_z(x)$ erweist sich als überaus mächtig zur Analyse aller Phänomene rund ums Zielen und Treffen mit Flachbahnwaffen und liefert sogar praktisch brauchbare Resultate, solange man den Gültigkeitsbereich des Vakuum-Modells nicht verlässt.

3. Zielmittel

Ein Zielmittel muss eine Gerade definieren; die Geometrie bietet dazu zwei Möglichkeiten: Entweder durch zwei Punkte oder durch einen Punkt und eine Richtung (Vektor). Erstere Möglichkeit wird waffentechnisch durch mechanische Visiere realisiert, welche aus Kimme und Korn bestehen (bekannt von Pistole und Jagdgewehr), wobei die Kimme auch die Form einer Lochkimme – Diopter oder „Ghost-Sight“ – annehmen kann, wie man es vom Sturmgewehr 90 oder von Sportgewehren kennt.



Bild 3



Bild 4

Die zweite Möglichkeit – Punkt und Richtung – wird am offensichtlichsten durch ein Laser-Zielgerät verwirklicht: Von einem definierten Punkt aus (in Bild 3 ca. 60 mm unter der Mündung) geht eine sichtbare Ziellinie in Form eines roten Laser-Strahls; ist der Visierwinkel richtig eingestellt, so werden sich Flugbahn und Ziellinie im Ziel schneiden und somit ein Treffer erfolgen. Weniger offensichtlich, aber ebenfalls durch Definition von Punkt und Richtung, arbeiten Zielfernrohr (Bild 4) und Reflexvisier (Bild 5). Im Zielfernrohr erzeugt ein Linsensystem ein „virtuelles“ (nur durch die Ausgangslinse sichtbares) Zielbild in unendlich ferner Distanz, wodurch eine Richtung definiert wird; im Reflexvisier werden die Lichtstrahlen, die sternförmig von einer kleinen Leuchtdiode ausgehen, durch eine spezielle Linse allesamt parallel ins Auge des Schützen reflektiert und definieren so die Richtung der Ziellinie. Ebenfalls nach dem Prinzip „Punkt und Richtung“ funktionieren holographische Visiere, welche zwar innerhalb des Sehfeldes einen ganzen Komplex von Zielmarken erzeugen, der Schütze aber immer nur genau diese sieht, welche in der Ziellinie liegt.



Bild 5

Flugbahn und Ziellinie

Dass die Ziellinie gerade, die Flugbahn jedoch krumm ist, führt zu einigen bemerkenswerten Effekten, derer sich die meisten Schützen nicht bewusst sind. Geschickt genutzt helfen sie, die Waffe optimal einzusetzen.

1. Der Normalfall

Betrachten wir zuerst den Normalfall eines über dem Lauf angebrachten Zielmittels. Bild 1 zeigt die Situation eines Gewehres mit Zielfernrohr; die Ziellinie liege 50 mm über der Mündung (also Visierhöhe $VH = 50$ mm) und die Waffe werde auf $EE = 300$ m eingeschossen. Der Gewehrschütze betrachtet die 300 m als seine Einschiess-Entfernung EE , in welcher er sein Ziel treffen will. Bild 1 zeigt jedoch, dass er auch ein Ziel treffen könnte, das bloss etwa 20 m weit entfernt ist, weil sich dort – im aufsteigenden Ast – Flugbahn und Ziellinie ebenfalls schneiden! Diesen ersten Schnittpunkt nennt der Gewehrschütze Kurzdistanz KD und jeder Einschiess-Entfernung EE entspricht immer eine solche Kurzdistanz; für das Sturmgewehr 90 liegt die Kurzdistanz zur EE 300 m etwa bei 30 m, was in der Armee zum Kurzdistanzschiessen genutzt wird. Ein Jäger, der die Kurzdistanz seiner Waffe kennt, kann sie nutzen für einen Kontrollschuss im Revier, ohne gleich im Jagdschiesstand auf 150 m schiessen zu gehen.

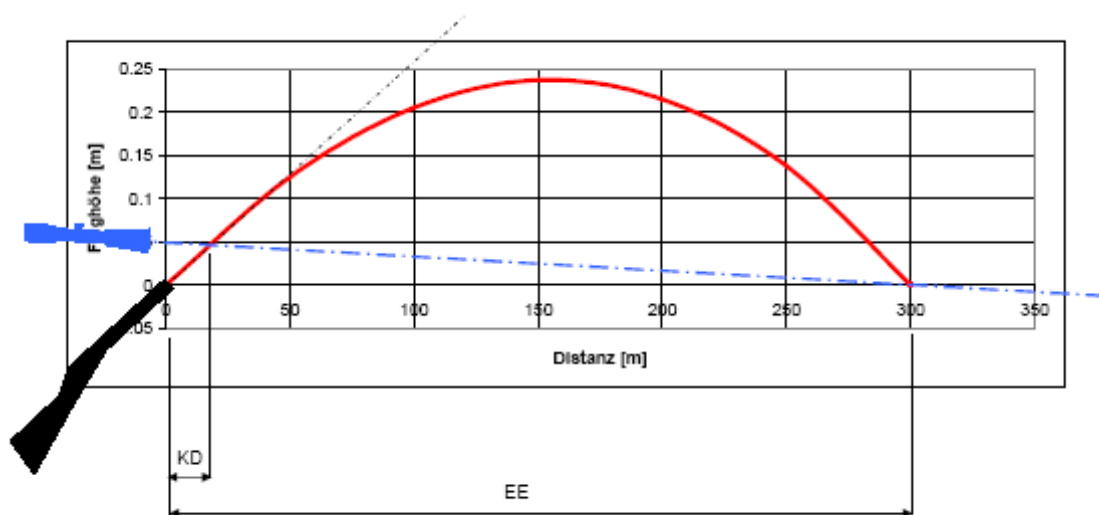


Bild 1

Die Schützen von Revolvern, Pistolen und Maschinenpistolen leben in einer verkehrten Welt: Sie schießen nämlich ihre Waffen auf den ersten Schnittpunkt ein, also im Bereich des aufsteigenden Astes der Flugbahn; was dem Gewehrschützen die Kurzdistanz, ist diesen die Schussdistanz, und den zweiten, entfernten Schnittpunkt nutzen sie meist gar nicht.

Tabelle 1 zeigt eine Feinanalyse der resultierenden Treffpunkte (bzw. nötigen Haltepunkte), falls ein Ziel sich in einer Zieldistanz ZD befinde, welche in Beziehung zu den Schnittpunkten KD und EE gesetzt wird. Für Sportschützen, die immer nur auf eine bekannte Distanz schießen und ihre Waffe entsprechend justieren können ($ZD = EE$) ist dies unwichtig, pirschende Jäger und taktische Schützen hingegen müssen diese Haltepunkt-Korrekturen instinktiv blitzschnell ausführen können.

Die Schusslagen, wie in Tabelle 1 qualitativ dargestellt, werden im Rahmen des Vakuum-Modelles vollständig beschrieben durch die Schusslage-Funktion

$$y_z(x) = x \cdot (VH / EE + sw_{EE}) - g \cdot x^2 / (2 \cdot v_0^2) - VH$$

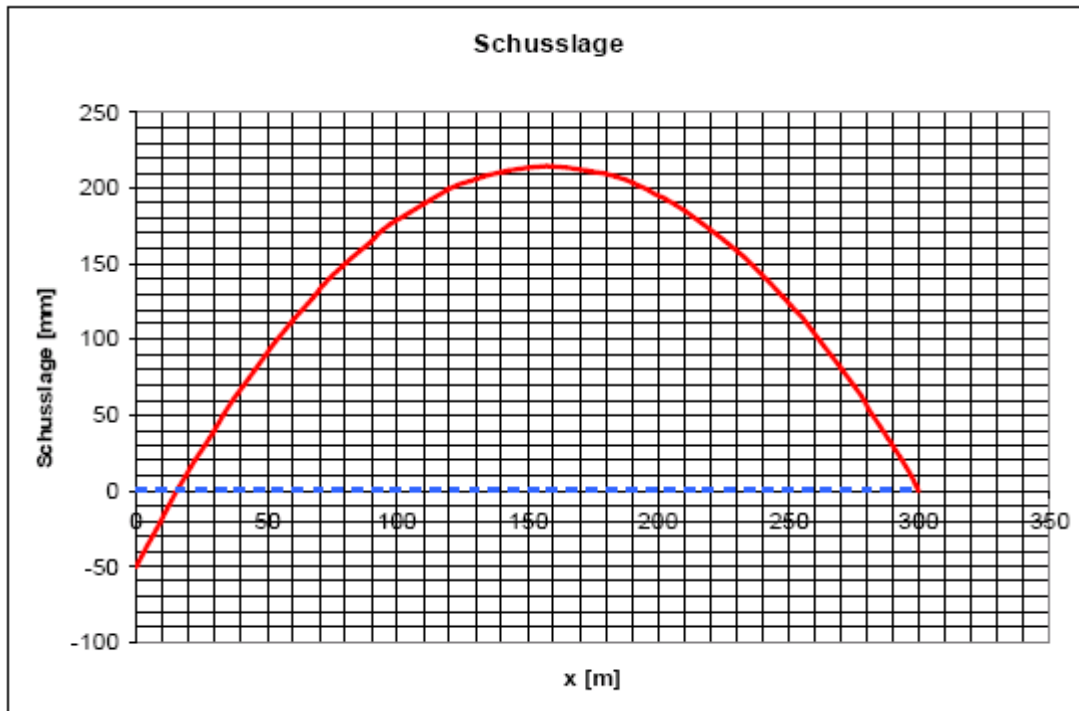


Bild 2

Bild 2 zeigt die Schusslage-Funktion zur selben Flugbahn wie in Bild 1; man beachte, dass die x-Achse nun nicht mehr der Mündungslinie entspricht, sondern der Ziellinie. Tiefschüsse erscheinen darin als negative Schusslagen, Hochschüsse als positive und Treffer als Nullstellen. Die zwei Nullstellen der Funktion entsprechen den Schnittpunkten von Flugbahn und Ziellinie; die mündungsferne liegt bei $x = EE$ und die mündungsnahe bei $x = KD$ mit

$$KD[m] = VH[mm] / sw_{EE} [mrad]$$

Den Schusswinkel sw_{EE} zu einer gegebenen Einschuss-Entfernung EE kann man aus dem Vakuum-Modell wie folgt berechnen (gut für $EE[m] < 0.2 \text{ s} \cdot v_0[m/s]$):

$$sw_{EE}[mrad] = 4905 \cdot EE[m] / v_0[m/s]^2$$

Daraus folgt als direkte Formel zur Berechnung von KD als Funktion von EE :

$$KD[m] = 0.0002 \cdot VH[mm] \cdot v_0[m/s]^2 / EE[m]$$

In Tabelle 2 finden sich einige typische Konfigurationen zusammengestellt, alle mit obiger Formel berechnet.

	$v_0[m/s]$	$VH[mm]$	$KD[m]$	$EE[m]$
Pistole 9x19	360	14	10	35
Pistole .45ACP	280	16	10	25
Revolver .44 Rem Mag	410	23	10	80
Maschinenpistole 9x19	430	50	25	75
Sturmgewehr .223 Rem	900	50	27	300

Tabelle 2

2. Besondere Ziellinien



Bild 3

Manchmal ist das Zielmittel nicht über dem Lauf angebracht sondern seitlich. Namentlich bei militärischen Unterstützungswaffen (Zielfernrohr-Gewehr, Maschinengewehr und leichtes Maschinengewehr wie das Bren in Bild 3) findet man dies häufig oder beim Sportschiessen, um das Hitzeblimmern über dem Lauf zu umgehen oder um dem Schützen mehr Komfort zu bieten (z. B. einem linksäugigen Rechtsschützen).

Bild 4 zeigt die Situation einer Ziellinie der Visierhöhe VH und einem seitlichen Visiersversatz VS . Da sich die Flugbahn praktisch in der Ebene $x-y$ bewegt, resultiert also nur ein einziger Schnittpunkt von Ziellinie und Flugbahn – es gibt keine Kurzdistanz. Gegenüber einer „normalen“ Ziellinie eines Zielmittels über dem Lauf schliesst die versetzte Ziellinie mit der Flugbahn-Ebene einen seitlichen Visierwinkel $vws = VS/EE$ ein, der sich mit der Einschies-Entfernung (Fleckschuss-Distanz) EE verändert. Im Gegensatz zur landläufigen Meinung ergibt sich also nicht einfach eine konstante seitliche Schussablage der Grösse VS von 0 bis unendlich Meter, da ja zumindest auf die Einschiesdistanz EE ein

Fleckschuss vorliegt. Folglich muss mit jeder Aenderung der Schussdistanz nicht nur die Elevation, sondern auch der seitliche Zustellwinkel am Visier geändert werden, um einen Fleckschuss-Treffer zu erzielen.

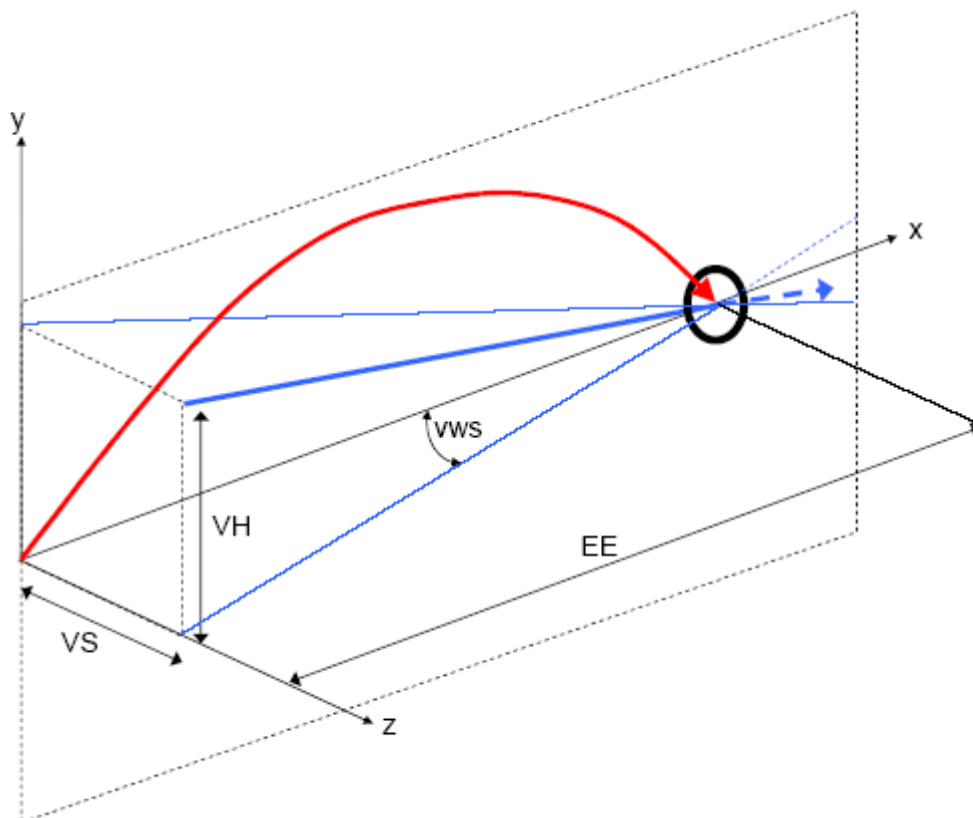


Bild 4

Ebenfalls eine besondere Situation ergibt sich, wenn ein Laserzielgerät unterhalb des Laufes montiert wird; diese Anordnung eines Zielmittels ist überhaupt nur mit einem Zielpunktprojektor in der Art eines Lasers machbar und daher eine moderne Problematik. Die Ziellinie liegt zwar in der Flugbahn-Ebene x-y, aber das Zielgerät „schaut“ gewissermassen von unten in die Flugbahn und es ergibt sich nur ein einziger Schnittpunkt von Ziellinie und Flugbahn (s. Bild 5, Laser 60 mm unter Mündung montiert). Wie jedes andere Zielmittel muss auch ein Laser auf ändernde Schussdistanzen abgestimmt werden.

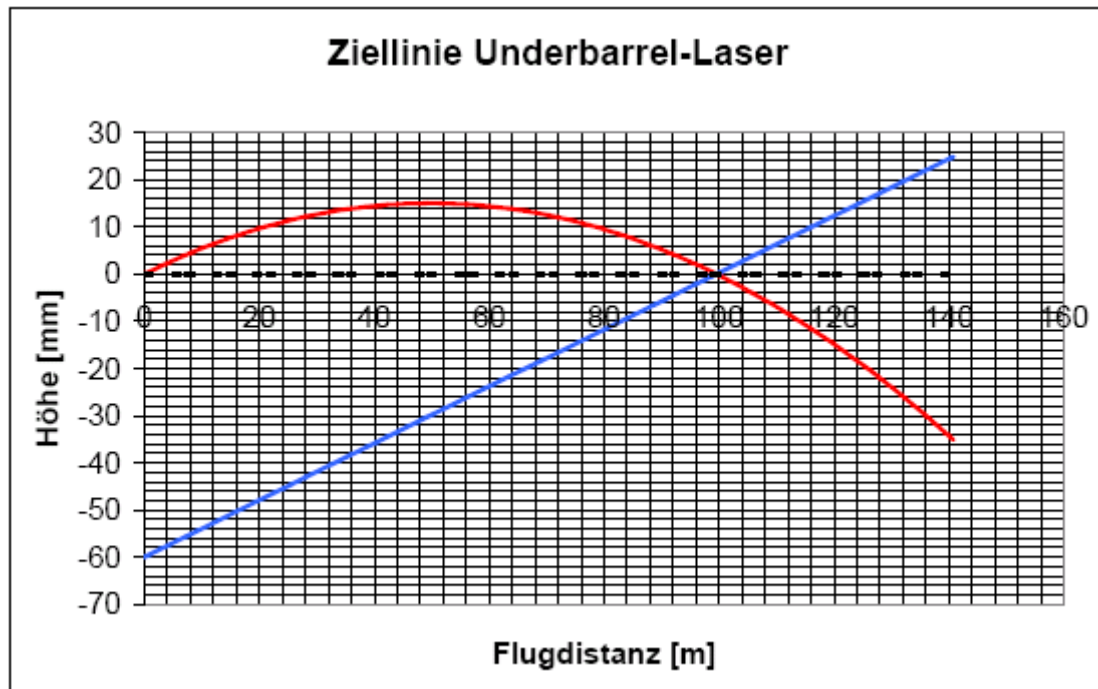


Bild 5

3. Zusammenfassung

Ziellinie und Flugbahn können keinen, einen oder zwei Schnittpunkte aufweisen, und nur dort erfolgen Fleckschuss-Treffer. Zwei Schnittpunkte – ein naher und ein ferner – sind der Regelfall, wenn ein Zielmittel über dem Lauf angebracht ist; falls die Ziellinie gerade eine Tangente an die Flugbahn ist, fallen allerdings beide Punkte zusammen (wichtiger Effekt in anderem Zusammenhang). Maximal ein Schnittpunkt ist möglich, falls das Zielmittel seitlich zum Lauf versetzt oder unter diesem angebracht wird. Kein Schnittpunkt ist jederzeit möglich, wenn ein Visier schlecht ausgerichtet ist. Sportschützen tun dies zum Teil bewusst: Wer nämlich die Scheibenecke oben links anvisiert, um die Mitte der Scheibe zu treffen, erzeugt überhaupt keinen Schnittpunkt von Ziellinie und Flugbahn.

Der Visierbereich

Flugbahn und Ziellinie schneiden sich in maximal zwei Punkten und nur dort kann ein punktgroßes Ziel getroffen werden. Da wirkliche Ziele jedoch immer eine gewisse Höhe haben und nicht nur Punkte sind, ergeben sich sogenannte Visierbereiche.

1. Der Normalfall

Eine Waffe sei mit einem Zielmittel ausgestattet, das sich senkrecht über dem Lauf befinde, typischerweise einem Zielfernrohr oder Kimme und Korn; die Ziellinie verlaufe in der Höhe VH über der Mündung, wo sich der Ursprung des Koordinatensystems befindet. Die Waffe werde nun eingeschossen auf eine Distanz EE , wodurch ein Visierwinkel $\nu_w = \alpha_{wEE} + \beta_{wEE}$ zwischen Laufseelenachse und Ziellinie eingestellt wird. Das Einschieszen erfolge durch Fleck zielen, wodurch also die Kugel ein Ziel, das sich in EE befindet, in der Mitte trifft. Wenn sich nun das Ziel der Höhe ZH in einer Distanz $ZD < EE$ oder $ZD > EE$ befindet, wird es dann bei gleicher Visiereinstellung und Fleck zielen noch getroffen?

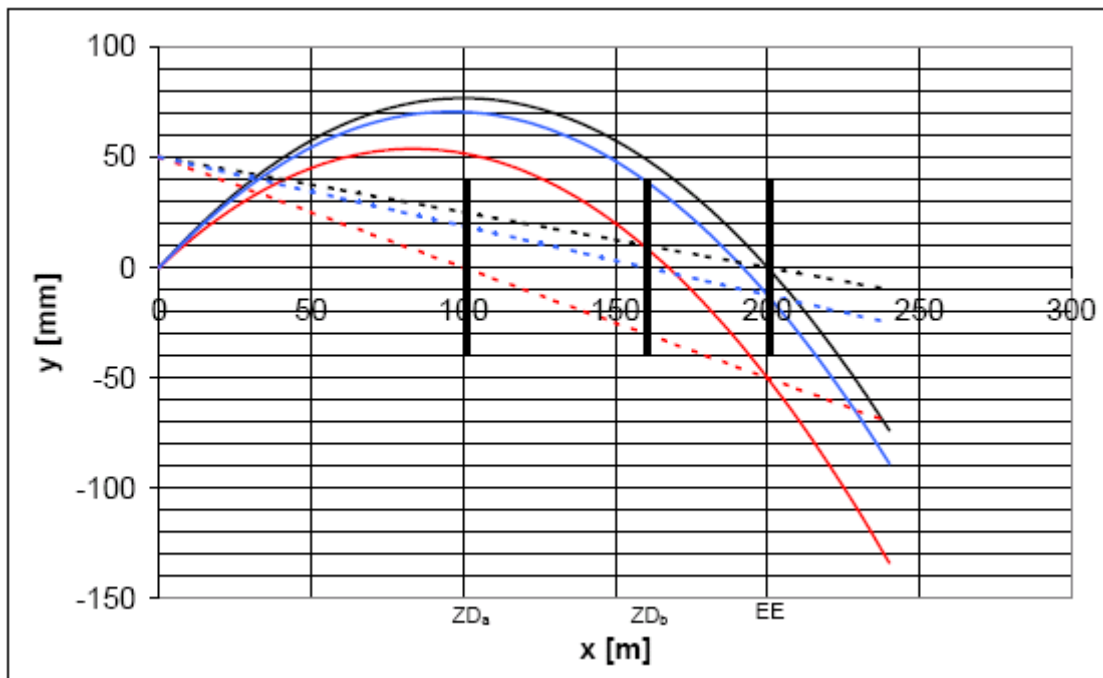


Bild 1

Bild 1 zeigt Flugbahn und Ziellinie (beide schwarz) einer Waffe, die auf eine $EE = 200$ m eingeschossen wird; die Visierhöhe sei $VH = 50$ mm. Wenn nun das Ziel der Zielhöhe $ZH = 80$ mm sich in $ZD_a = 100$ m befindet und der Schütze wiederum Fleck zielt – ohne dabei etwas an der Visiereinstellung zu ändern – so wird die Kugel ca. 10 mm über dem Ziel vorbeischießen (Flugbahn und Ziellinie rot eingezeichnet). Wenn sich jedoch das Ziel in $ZD_b = 160$ m befindet und der Schütze wiederum mitten in das Ziel hält, so wird die Kugel gerade noch dessen oberen Rand streifen (Ziellinie und Flugbahn blau in Bild 1). Wir nennen ZD_b den unteren Rand des Visierbereiches zur Einschiesst-Distanz EE , weil ein Ziel der Höhe ZH dort gerade noch getroffen wird.

Wenn nun dasselbe Ziel weiter steht als EE – also $ZD > EE$ – und der Schütze immer noch Fleck zielt, so werden zunehmend tiefere Schüsse resultieren. Irgendwann erreicht das Ziel dann eine Distanz ZD , in welcher die Kugel es gerade noch am unteren Rand streift: Diese Zieldistanz nennen wir den oberen Rand des Visierbereiches zur Einschiesst-Distanz EE . Der Visierbereich zur Einschiesst-Distanz EE ist dann die Differenz zwischen oberem und unterem Rand.

Flugbahn und Ziellinie schneiden sich im Normalfall nicht nur einmal in EE, sondern auch noch in der Kurzdistanz KD; wenn es nun um EE herum einen Visierbereich gibt, so muss es auch einen um KD herum geben. Tatsächlich kann man sich ein Ziel der Höhe ZH, das sich in verschiedenen Distanzen befindet, als Zielband $\pm ZH/2$ um die Mündungslinie vorstellen, in welches die Kugel ein- und austaucht. Bild 2 zeigt, wie auf eine Distanz $ZD_1 = 6$ m ein Ziel der Höhe $ZH = 80$ mm erstmals getroffen wird, auf $ZD_2 = 80$ m noch gerade der obere Zielrand gestreift wird, nach $ZD_3 = 185$ m dann wieder ein hoher Treffer erfolgt und bei $ZD_4 = 260$ m gerade noch der untere Zielrand gestreift wird; rot eingezeichnet sind Ziellinien und Flugbahnen, die das Ziel am unteren Rand treffen, blau solche, welche den oberen Rand streifen. Der gesamte Visierbereich zur Einschiessdistanz EE, welche in Bild 2 $EE = 230$ m beträgt, ist dann die Summe der Teilbereiche, also $VB_{EE} = ZD_2 - ZD_1 + ZD_4 - ZD_3$.

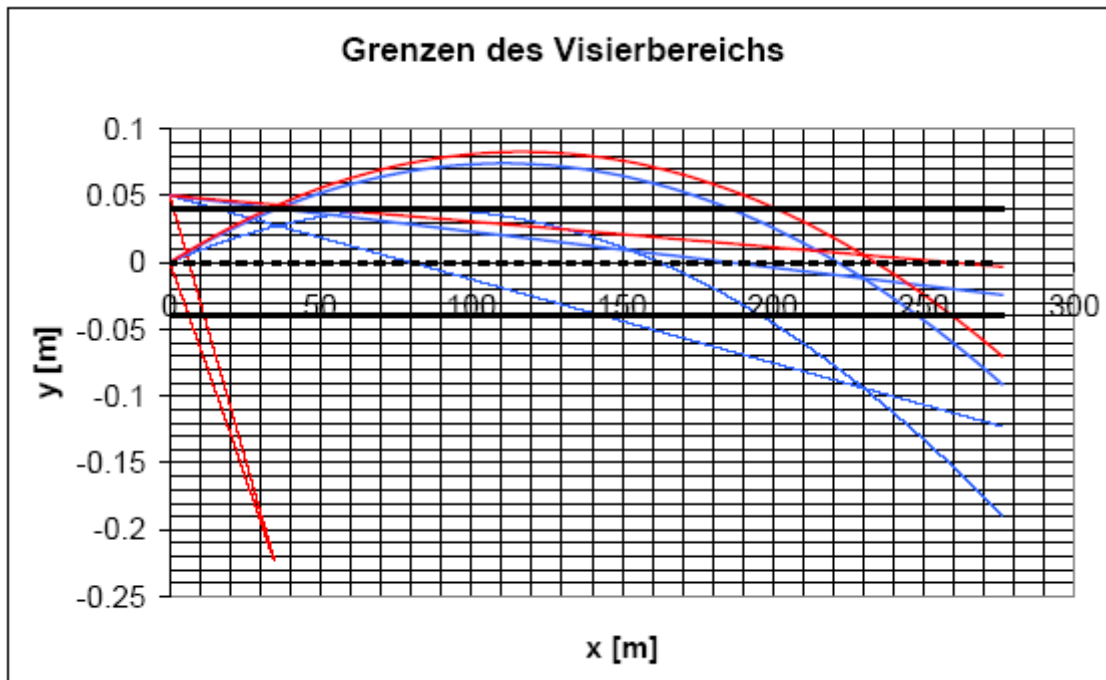


Bild 2

Man beachte, dass normalerweise zwischen Z_2 und Z_3 kein Treffer erfolgt, ausser die Zielhöhe sei so hoch (oder die Flugbahn so flach), dass die Kugel gar nicht mehr aus dem Zielband austritt (durchgehender Visierbereich). Ausserdem erfolgen in extremer Mündungsnähe meistens Tiefschüsse, bzw. ein Ziel wird gar verfehlt. Der mündungsnähe Visierbereich beginnt nur genau dann bereits an der Mündung ($ZD = 0$), falls der Betrag der Visierhöhe kleiner oder gleich ist als die halbe Zielhöhe ($|VH| \leq ZH/2$).

Aus dem Vakuum-Modell für die Flugbahn lässt sich mittels der Schusslage-Funktion $y_v(x)$ ein Satz Gleichungen herleiten, mit welchen sich die vier Zieldistanzen, die den Visierbereich bestimmen, berechnen lassen. Man setzt dazu die Schusslagen gleich dem unteren bzw. oberen Rand des Zieles, also $y_z(x) = \pm ZH/2$, und findet für x folgende zulässigen Zieldistanzen:

$$\begin{aligned} ZD_1 &= VH / (2 \cdot sw_{EE}) + EE / 2 - \sqrt{((VH / (2 \cdot sw_{EE}) - EE / 2)^2 + EE \cdot ZH / (2 \cdot sw_{EE}))} \\ ZD_2 &= VH / (2 \cdot sw_{EE}) + EE / 2 - \sqrt{((VH / (2 \cdot sw_{EE}) - EE / 2)^2 - EE \cdot ZH / (2 \cdot sw_{EE}))} \\ ZD_3 &= VH / (2 \cdot sw_{EE}) + EE / 2 + \sqrt{((VH / (2 \cdot sw_{EE}) - EE / 2)^2 - EE \cdot ZH / (2 \cdot sw_{EE}))} \\ ZD_4 &= VH / (2 \cdot sw_{EE}) + EE / 2 + \sqrt{((VH / (2 \cdot sw_{EE}) - EE / 2)^2 + EE \cdot ZH / (2 \cdot sw_{EE}))} \end{aligned}$$

Für den Schusswinkel sw_{EE} ist der Vakuum-Schusswinkel einzusetzen. Mit diesen Formeln muss man allerdings vorsichtig umgehen, denn sie lassen auch physikalisch sinnlose negative (und komplexe) Zieldistanzen zu – solche Treffer hinter der Mündung gibt es zum Glück des Schützen nicht!

2. Besondere Ziellinien

Wenn das Zielmittel um den seitlichen Versatz VS neben der Lafebene liegt, ergibt sich ein seitlicher Visierbereich. Da eine Flugbahn ziemlich genau in der x-y-Ebene verläuft, ist sie von oben gesehen eine Gerade (Bild 3) und die Berechnung der Zieldistanzen, auf welche ein Ziel der Breite ZB durch Fleck zielen gerade noch am linken oder rechten Rand getroffen wird, ist reine Geometrie. Aus Bild 3 folgen folgende Formeln für die Zieldistanzen, die den seitlichen Visierbereich eingrenzen:

$$ZD_u = EE \cdot (1 - 0.5 \cdot ZB / VS) \quad (\text{mündungsnaher Zieldistanz})$$

$$ZD_o = EE \cdot (1 + 0.5 \cdot ZB / VS) \quad (\text{mündungsferner Zieldistanz})$$

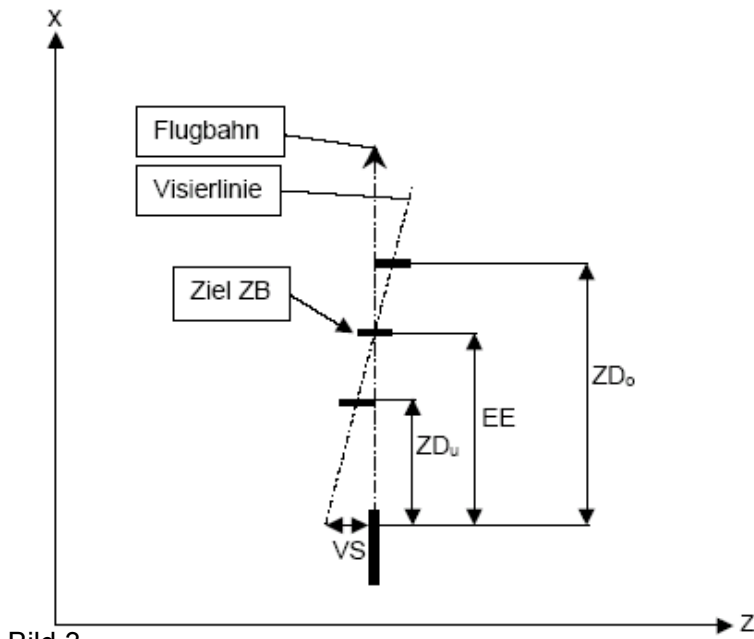


Bild 3

Die Visierbereiche in der waagerechten x-z-Ebene und in der senkrechten x-y-Ebene sind unabhängig voneinander. Der effektive Visierbereich einer Konfiguration Waffe-Zielmittel ist dann das Minimum der beiden, d. h. man muss jeweils prüfen, ob ZD_1 kleiner oder grösser ZD_u , bzw. ZD_4 kleiner oder grösser ZD_o . Jedenfalls wird durch ein seitliches Visier der Visierbereich verkleinert, da ja nur noch ein Schnittpunkt von Ziellinie und Flugbahn für Treffer genutzt werden kann. Letztere Aussage gilt auch, wenn ein Zielmittel sich unter dem Lauf befindet („underbarrel laser“), wenn also die Visierhöhe VH negativ wird.

Bild 4 zeigt die typische Konfiguration einer Maschinenpistole mit einem Laser $VH = -60$ mm unter dem Lauf, eingeschossen auf $EE = 50$ m:

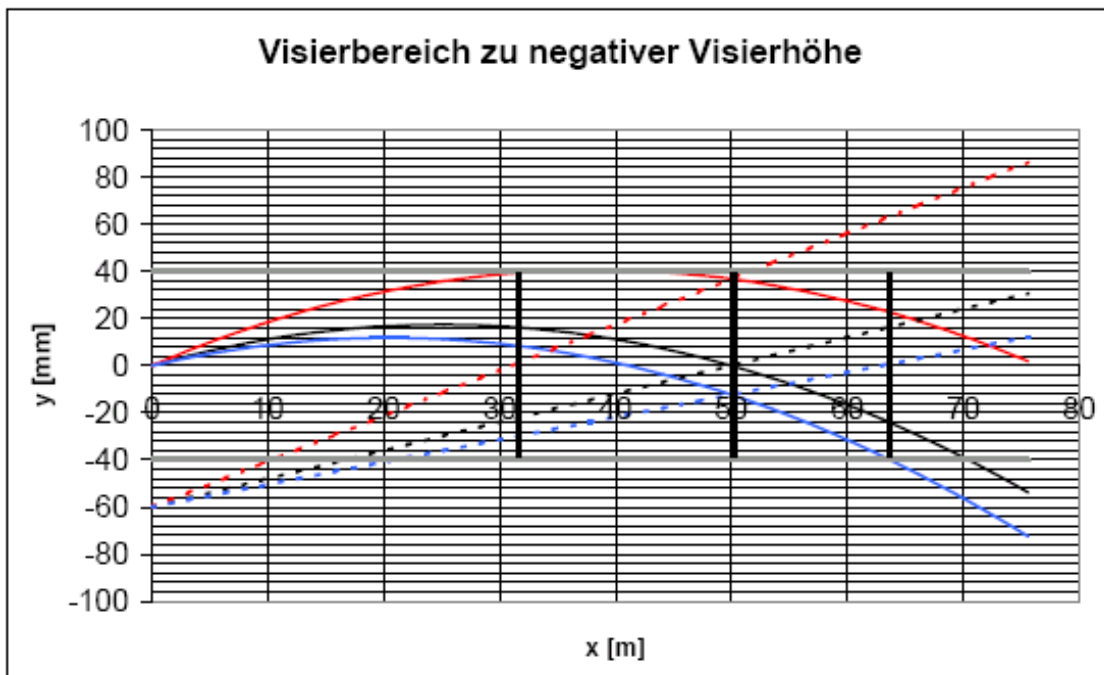


Bild 4

Ein Ziel von $ZH = 80$ mm Höhe wird so auf ca. 30 m gerade noch am oberen Rand getroffen, auf ca. 65 m gerade noch am unteren Rand; der Visierbereich zur Einschiessdistanz $EE = 50$ m beträgt daher $VB_{50} = 35$ m, oder als Intervall geschrieben: $VB_{50} = [30 \text{ m}, 65 \text{ m}]$.

3. Bemerkungen

Oben wird die Problematik um den Visierbereich anhand des Vakuum-Modells betrachtet, woraus halbwegs brauchbare Gleichungen resultieren – nur halbwegs deshalb, weil mit logischen Bedingungen physikalisch sinnlose Lösungen ausgeschlossen werden müssen und weil die Formeln so kompliziert sind, dass eine Analyse ohne Computer scheitert. Die Hauptschwierigkeit liegt in den erwähnten negativen und komplexen Lösungen der Gleichungen, die zwar mathematisch korrekt aber physikalisch sinnlos sind. Diese sinnlosen Lösungen lassen sich zwar problemlos ausscheiden, verunmöglichen aber die Entwicklung einer „universellen“ Formel zur Berechnung des Visierbereichs.

Ziele befinden sich nur beim Sportschiessen in der Einschiessdistanz; im jagdlichen oder taktischen Einsatz sind sie entweder näher oder ferner. Je grösser nun der Visierbereich ist, umso weniger genau muss der Schütze die Zieldistanz einschätzen – allerdings will er dazu nicht die bis zu vier Grenzen seines Visierbereichs auswendig lernen. Deshalb ist der Visierbereich ein wichtiges Gütekriterium für den Waffenkonstrukteur, der gefordert ist, seine Waffe so zu bauen, dass der Anwender sich über den Visierbereich keine Gedanken mehr zu machen braucht. Tatsächlich ist die Berechnung der Visierbereiche nur ein erster Schritt hin zur Erreichung des maximalen Visierbereichs: Der Traumwaffe, die auf alle Distanzen trifft. Dieser Traum ist mit Feuerwaffen nicht realisierbar, kann aber bei geschickter Auslegung für eine bestimmte Anwendung genügend gut verwirklicht werden.

Die günstigste Einschuss-Entfernung GEE

Die Definition der GEE ist einfach: Es ist die Einschussdistanz, die den grössten Visierbereich ergibt. Die GEE effektiv zu berechnen jedoch ist ein ziemliches Kunststück, das unter Verwendung des Vakuum-Modells allerdings halbwegs beherrschbar wird.

1. Ein einfacher Sonderfall

Wenn die Visierhöhe $VH = 0$ ist, so fallen Mündungs- und Ziellinie zusammen und die Kugel folgt immer derselben Flugbahn wie beim Einschossen, auch wenn der Schütze auf ein Ziel in einer anderen Distanz zielt. Bild 1 zeigt als gestricheltes Band um die Mündungs- bzw. Ziellinie die Menge aller Ziele einer Zielhöhe $ZH = 80$ mm sowie die Flugbahnen zu drei Einschuss-Entfernungen: Blau für 130 m, schwarz für 145 m und rot für 170 m.

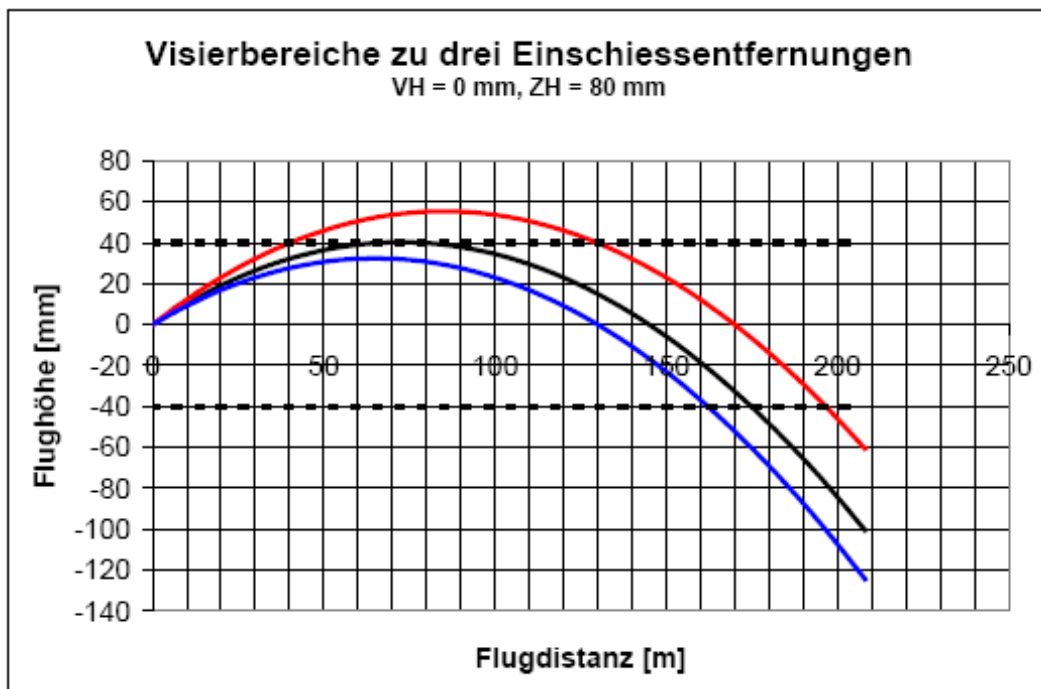


Bild 1

Bis zu einer Entfernung von gut 160 m würde die blaue Flugbahn das Ziel immer treffen; zu der Einschuss-Entfernung 130 m ergibt sich also ein durchgehender Visierbereich. Dasselbe trifft auch für die schwarze Flugbahn zu, wobei sich der durchgehende Visierbereich vergrössert auf etwa 0 m bis 175 m. Der Visierbereich der roten Flugbahn hingegen zerfällt in zwei Bereiche: Einen mündungsnahen von 0 m bis 40 m und einen mündungsfernen von 130 m bis etwa 195 m; in der Umgebung des Scheitelpunktes wird das Ziel überschossen. Der gesamte Visierbereich der roten Flugbahn beträgt bloss 105 m und ist somit der kleinste der drei Flugbahnen. Der Visierbereich der schwarzen Flugbahn ist der grösste, weshalb man deren Einschussdistanz 145 m in diesem Beispiel als GEE bezeichnen würde.

Aus dem Beispiel kann man lernen, dass die GEE immer einen durchgehenden Visierbereich erzeugt (der allerdings nicht zwingend an der Mündung beginnen muss) und dass die zugehörige Flugbahn das Zielband am oberen Rand tangiert, also die zulässige Zielhöhe voll ausnutzt. Ausgehend von diesem Sonderfall lässt sich unter Anwendung des Vakuum-Modells eine Taschenrechner-Formel zur Schätzung der GEE angeben wie folgt:

$$EE_{GEE}[m] = 0.64 \cdot v_0 \cdot \sqrt{(ZH[m] + VH[m])}$$

Wie zu jeder Fleckschussdistanz kann man auch zur GEE einen mündungsnahen Schnittpunkt von Flugbahn und Visierlinie angeben gemäss:

$$KD_{GEE}[m] = 0.0002 \cdot VH[mm] \cdot v_0[m/s]^2 / SD_{GEE} [m]$$

Zielhöhe ZH = 8 cm				GEE			
#	Waffe	$v_0[m/s]$	VH[mm]	KD[m]	EE[m]	KD[m]	EE[m]
1	Pistole 9x19	360	14	5	71	5	67
2	Pistole .45ACP	280	16	5	56	5	52
3	Revolver .44 Rem Mag	410	23	9	84	11	72
4	Maschinenpistole 9x19	430	50	19	99	24	77
5	Sturmgewehr .223 Rem	905	50	39	209	45	181
						Faustformel	Software k-ballistics

Tabelle 1

Theoretisch taugen EE_{GEE} und KD_{GEE} beide gleich gut zum Einschossen, praktisch sollte man aber diejenige Entfernung wählen, welche dem Einsatz der Waffe besser entspricht. Tabelle 1 zeigt vergleichend für ausgewählte Waffen EE_{GEE} und KD_{GEE} gemäss obigen Faustformeln und gemäss der wesentlich genaueren Ballistik-Software von Kneubuehl für eine jagdtypische Zielhöhe von $ZH = 80 \text{ mm}$; für grössere Zielhöhen eignet sich die Formel schlecht, da die resultierenden grösseren Schussdistanzen nicht mehr im Gültigkeitsbereich des Vakuum-Modells liegen.

2. Besondere Ziellinien

Da es selbst im Vakuum keine geschlossene Lösung zur Berechnung des Visierbereiches gibt, lässt sich auch keine solche für die Berechnung der GEE angeben; obige Taschenrechner-Formel z. B. scheitert völlig, wenn man negative Visierhöhen eingibt (für Underbarrel-Laser). Weil die GEE ausserdem auch im Vakuum immer noch von drei Parametern abhängt – v_0 , Zielhöhe und Visierhöhe, im luffterfüllten Raum zusätzlich noch von Flugeigenschaften und Atmosphäre – scheitert auch eine tabellarische oder graphische Darstellung.

Wie oben führt der Weg über die Vereinfachung, z. B. über die Annahme einer festen Zielhöhe. Da traditionell vorallem Jäger an der GEE interessiert sind, einigte man sich auf eine jagdtypische Zielhöhe von 80 mm und konnte so immerhin Tabellen erstellen. Wenn man noch weiter vereinfacht und gleich eine feste Visierhöhe von – ebenfalls jagdtypischen – 50 mm annimmt, kann man die GEE gleich auf die Patronenverpackung aufdrucken (weil die v_0 der Patrone einigermassen bekannt ist).

Leider gehen bei solchen jagdspezifischen Vereinfachungen die taktischen Anwender leer aus: Für ihre Nahkampf-Waffen ist eine Zielhöhe von 200 mm zulässig (Oberschenkel- oder Schultertreffer) und die Visierhöhen variieren von knapp 20 mm (Pistole) bis zu 80 mm (Sturmgewehr oder Maschinenpistole mit Zieloptik), bzw. können sogar negativ werden (typisch –60 mm bei Underbarrel-Laser). Da auch solche Waffen durch richtiges Einschossen an Kampfkraft gewinnen, besteht hier einiger Nachholbedarf.

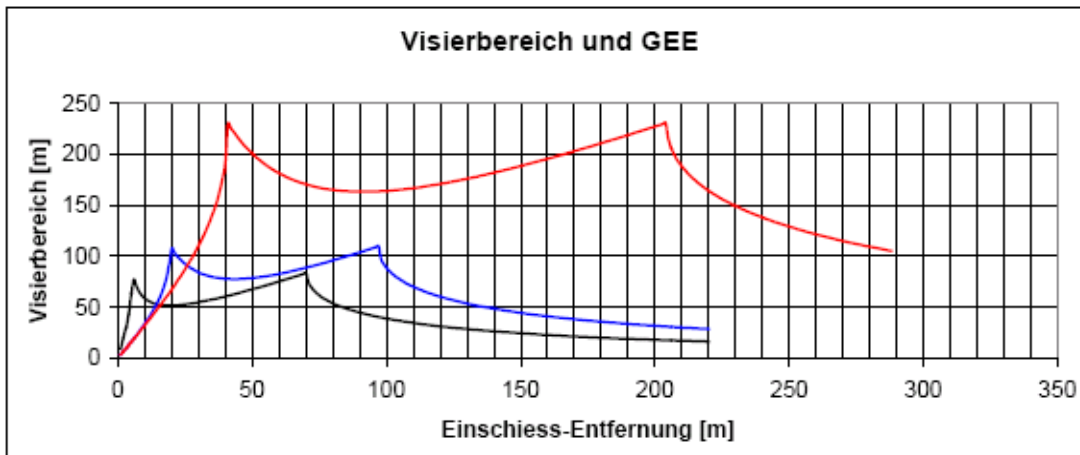


Bild 2

Um sich einer allgemeinen Lösung anzunähern, schreiben wir ein Excel-Programm basierend auf dem Vakuum-Modell, welches die gesamten Visierbereiche zu verschiedenen Einschussdistanzen graphisch darstellt wie Bild 2; dieses Programm berechnet zu verschiedenen Einschuss-Entfernungen die Visierbereiche unter Ausscheidung physikalisch sinnloser Lösungen. Mit dem Programm berechnen wir die Visierbereiche einer Pistole (#1 aus Tabelle 1, schwarz), einer Maschinenpistole (#4 aus Tabelle 1, blau) und eines Sturmgewehrs (#5 aus Tabelle 1, rot) zu einer Zielhöhe von $ZH = 80$ mm. Alle Visierbereiche zeigen typische Kurven mit je einem mündungsnahen und einem mündungsfernen Maximum, welche beide als GEE bezeichnet werden können. Wenn man die k-ballistics-Werte aus Tabelle 1 als wahre Werte annimmt und diese mit den GEE des vorliegenden Modelles vergleicht, so erkennt man eine sehr gute Übereinstimmung; aber auch die Werte aus der einfachen Taschenrechner-Formel sind durchaus brauchbar.

Für die taktischen Waffen Pistole, Maschinenpistole und Sturmgewehr mit konventioneller Visierung über dem Lauf können obige vereinfachte Formeln genutzt werden (allerdings nur für $ZH \leq 8$ cm; siehe oben). Für Pistolen etwa folgt daraus die Empfehlung, diese auf eine kurze Distanz von nur gerade 5 m einzuschossen! Für Waffen mit Unterbarrel-Laser hingegen wollen wir unser allgemeines Modell nutzen. Wir setzen dazu einheitlich eine Zielhöhe von 200 mm, eine Visierhöhe von -60 mm und betrachten folgende typische Fälle:

1. Schallgedämpfte Pistole mit Subsonic-Munition, $v_0 = 280$ m/s (schwarz in Bild 3);
2. Maschinenpistole mit $v_0 = 450$ m/s (blau in Bild 3);
3. Kurzes Sturmgewehr mit $v_0 = 850$ m/s (rot in Bild 3).

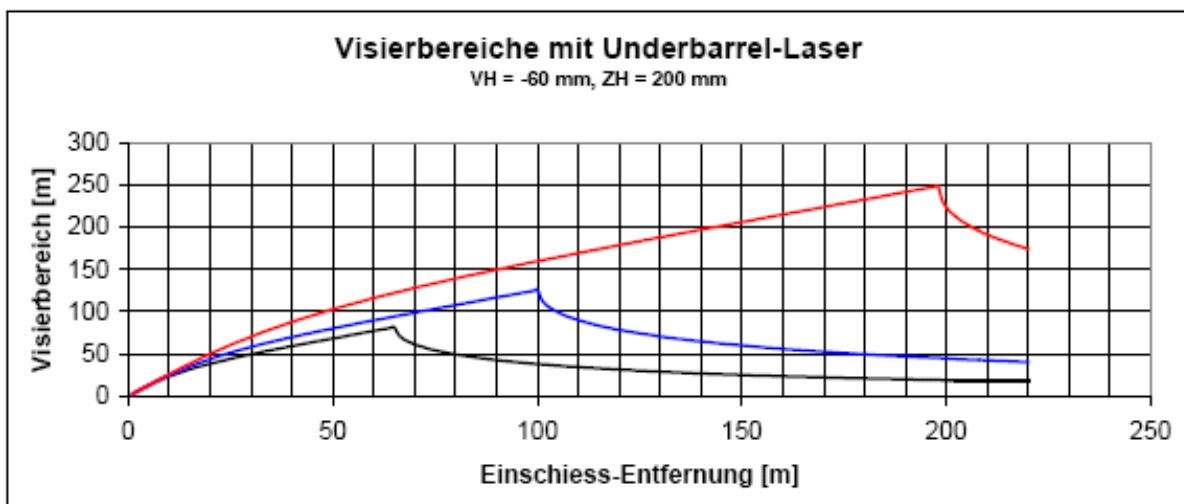


Bild 3

In Bild 3 finden sich zu diesen Waffen jeweils die Visierbereiche dargestellt, die sich aus verschiedenen Einschuss-Entfernungen ergeben. Im Gegensatz zur klassischen positiven Visierhöhe gibt es beim Unterbarrel-Laser nur einen Schnittpunkt von Ziellinie und Flugbahn und deshalb auch nur ein Maximum des Visierbereiches – es gibt keine der GEE zugeordnete Kurzdistanz. Die GEE von Unterbarrel-Lasern befinden sich relativ weit weg und die Realisierung kann einige technische Schwierigkeiten bereiten oder gar taktisch sinnlos sein; als Regel möge man sich jedoch merken, dass eine Waffe mit Unterbarrel-Laser auf eine möglichst grosse Distanz eingeschossen werden sollte, am besten auf die maximale Einsatzdistanz. Für eine Pistole mit Laser bedeutet dies, dass Kimme und Korn auf 5 m eingeschossen werden sollten, der Laser aber eher auf 50 m!

3. Zusammenfassung

Die günstigste Einschuss-Entfernung GEE ist diejenige Einschussentfernung, welche den grössten Visierbereich ergibt; innerhalb dieses Visierbereiches kann der Schütze sein Ziel

gegebener Grösse immer treffen, ohne die Visiereinstellung der Schussdistanz anzupassen und ohne den Haltepunkt zu ändern.

Die relativ komplexen Ueberlegungen rund um das Phänomen der GEE lassen sich anhand des Vakuum-Modells gut nachvollziehen und qualitativ analysieren. Unter stark vereinfachenden Annahmen (Visierhöhe geringfügig grösser als oder gleich Null) lässt sich dazu sogar eine Taschenrechner-Formel angeben, die ganz gut stimmt und nur für Underbarrel-Laser versagt.

Das Konzept der GEE ist traditionell eng mit dem Jagdschiessen verbunden und die jagdliche Zielhöhe von 80 mm fliesst zum Teil gar in deren Definition ein – zu Unrecht, denn auch taktische Waffenanwender haben berechtigtes Interesse daran, ihre Waffen optimal einzuschiessen.

Die optimale Schusswaffe

Mit Kenntnis von Visierbereich und GEE kann man eine gegebene Waffe optimal einschossen. Umgekehrt kann man aber natürlich auch eine Waffe so wählen, dass ihre GEE optimal dem geplanten Einsatzzweck entspricht: Die optimale Schusswaffe.

1. Möglichkeiten der Optimierung

Im Rahmen des Vakuum-Modelles bestimmen drei Parameter Visierbereich und GEE: Die Zielhöhe, die Visierhöhe und die Mündungsgeschwindigkeit. Wenn man den Gültigkeitsbereich des Vakuum-Modells verlässt, muss man zusätzlich noch die Flugeigenschaften des Geschosses miteinbeziehen, ausgedrückt durch den ballistischen Koeffizienten BC oder Luftwiderstandsbeiwerte.

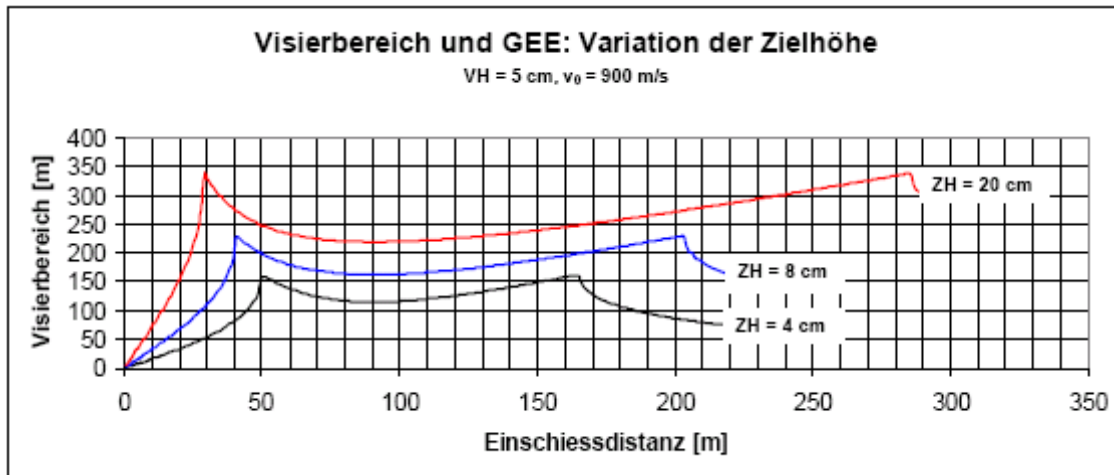


Bild 1

Je grösser die zulässige Zielhöhe, umso grösser der Visierbereich und umso weiter weg die GEE (Bild 1). Man kann diesen Parameter jedoch nicht frei wählen, sondern muss ihn auf Grund von Einsatzvorgaben festlegen: Für Polizeischarfschützen ist die zulässige Zielhöhe mit 40 mm sehr klein, für Jäger liegt sie bei 80 mm. Für Nahkampfwaffen, von denen bloss Stopwirkung verlangt wird, ist die Zielhöhe 200 mm (Faustfeuerwaffe und Maschinenpistole, Einsatz zur Selbstverteidigung oder im Polizeidienst). Wird von einer Waffe minimal die Verletzung eines Gegners gefordert (typisch militärisch), so erhöht sich die Zielhöhe gar auf 500 mm. Bezüglich Visierbereich ist dieser Parameter folglich eher eine einsatz-gegebene Randbedingung, innerhalb welcher zu optimieren ist; entsprechend wichtig ist deshalb eine realistische Festsetzung der zulässigen Zielhöhe!

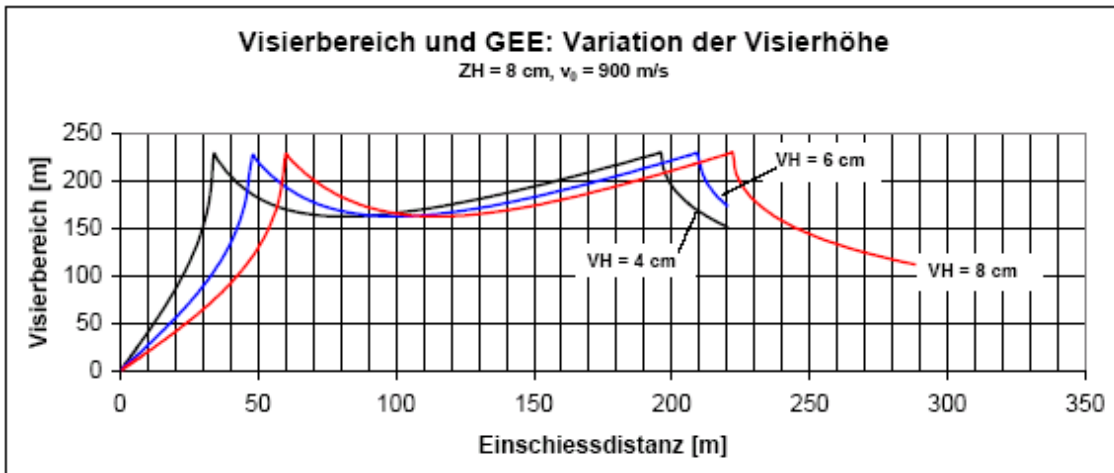


Bild 2

Bezüglich optimaler Visierhöhe hört man allgemein die Ansicht: Je tiefer umso besser (bzw. allgemeiner: Je näher an der Laufseele, umso besser). Bild 2 zeigt, dass bei gegebener Zielgrösse und Mündungsgeschwindigkeit der maximale Visierbereich mit zunehmender Visierhöhe etwa gleich bleibt, die GEE sich aber von der Mündung entfernt. Für kurze Einsatzdistanzen ist also eine tiefe Visierhöhe tatsächlich von Vorteil, für weite Distanzen ist jedoch eine hohe Visierlinie kein Problem (tatsächlich ist für Weitschussbüchsen eine hohe Visierlinie ballistisch eher von Vorteil, die Nachteile sind eher taktischer Natur).

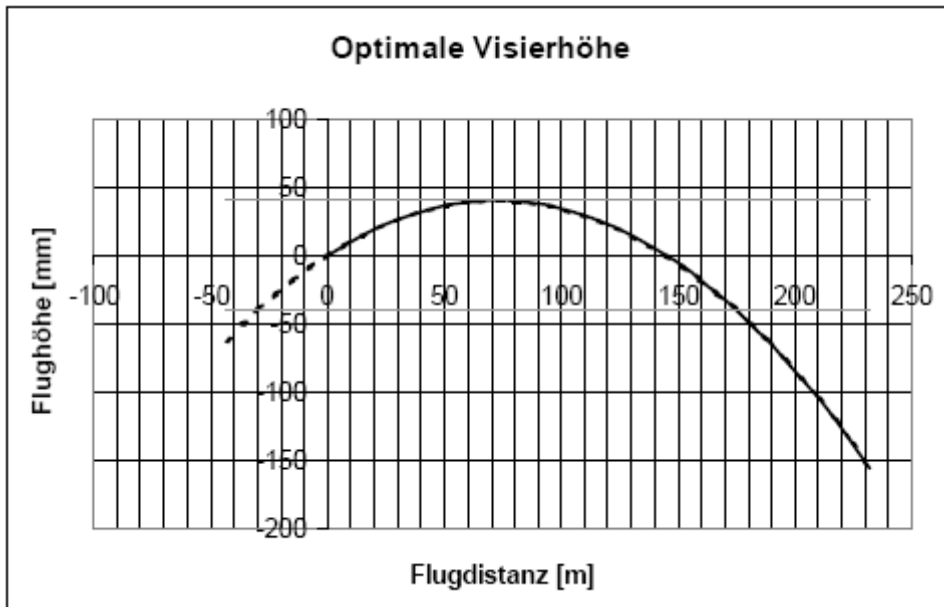


Bild 3

Die der Laufseele nahesten Visierhöhe wäre $VH = 0$. Mathematisch korrekt aber physikalisch sinnlos ergibt dies einen Eintritt in das Zielband bei einer negativen Schussdistanz – physikalisch real bedeutet dies, dass der entsprechende Weg als Visierbereich verloren geht (in Bild 3 gestrichelt eingezeichnet, etwa 30 m). Man gelangt so leicht zur Erkenntnis, dass tatsächlich die optimale Visierhöhe $VH_{opt} \geq ZH/2$ ist; die Formel „je tiefer umso besser“ ist also falsch. Die durchaus vorhandenen Vorteile einer tiefen Visierhöhe sind deshalb nicht ballistischer, sondern eher ergonomischer Natur: Die Waffe wird führiger und der Zielvorgang natürlicher.

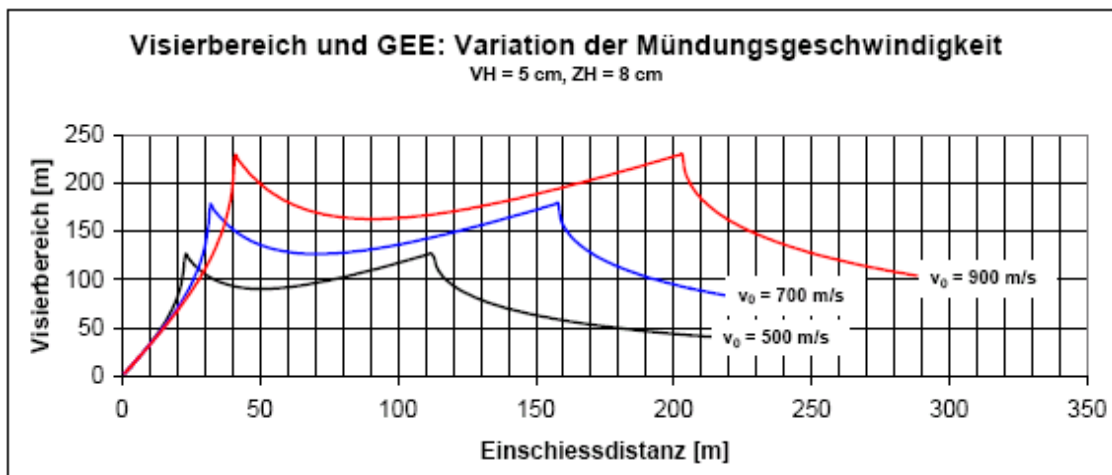


Bild 4

Je grösser die Mündungsgeschwindigkeit, umso grösser der Visierbereich (Bild 4); gleichzeitig entfernt er sich etwas von der Mündung, was aber kaum von Nachteil ist. Aussenballistisch betrachtet, gibt es keine obere Grenze für die Mündungsgeschwindigkeit, also: Je schneller, umso besser. Die Grenzen sind technischer Natur: Hohe Mündungsgeschwindigkeiten verlangen lange Läufe, was je nach Einsatz der Waffe einen Nachteil bedeutet, und sie bedingen auch hohe Drücke und einen bedeutenden Rückstoss.

Daher lassen sich hohe Mündungsgeschwindigkeiten meist nur mit kleinen, leichten Geschossen realisieren, die aber im Flug ihre Geschwindigkeit genauso schnell verlieren, wie sie sie im Lauf gewinnen. Reichweite und Wirkung im Ziel lassen häufig zu wünschen übrig, gar nicht zu sprechen von der hohen Belastung der Läufe, deren Lebensdauer sich durch hochrasante Kaliber stark verkürzt.

Der Einfluss der Geschossform lässt sich im Vakuum-Modell nicht erfassen, ist aber nicht weiter rätselhaft: Ein aussenballistisch optimiertes Geschoss verliert weniger schnell an Geschwindigkeit, die Flugbahn wird flacher und die Schusswinkel kleiner. Daher wird sich der Ort der GEE von der Mündung entfernen und der Visierbereich grösser.

2. Konsequenzen für die Praxis

Der optimale Visierbereich ist in der Praxis nicht das alleinige Kriterium bei der Auslegung einer Waffe. Ein geradezu wundersames Gleichgewicht von Visierbereich, Patronenleistung, Einsatzzweck und Waffenkonstruktion herrscht bei Jagdgewehren: Der Visierbereich eines typischen Jagdgewehrs beginnt etwa 10 m nach der Mündung und reicht bis über 200 m. Genau in diesem Bereich kann der Jäger auch sein Ziel erwarten, Waffe und Visier bieten die nötige Treffererwartung und die Patrone die geforderte Energie – es passt alles zusammen und man darf sagen, das Jagdgewehr sei die harmonischste aller Feuerwaffen.

Denken wir aber mal an einen Revolver Kal. .357 Magnum oder auch nur an eine Pistole in 9x19 mm: Die Patronen würden Einsatzdistanzen bis zu 100 m meistern, aber eigentlich will das gar niemand. Faustfeuerwaffen müssen bequem zu führen sein und das Visier soll eine rasche Zielerfassung unterstützen; daher ist das Korn in der Regel so grob, dass es über 50 m ein Mannziel schon völlig verdeckt und einen präzisen Schuss auf so weite Distanzen verunmöglicht. Aus Gründen der Waffenkonzeption können also die meisten Faustfeuerwaffen ihre potenzielle Kampfdistanz nicht ausschöpfen - die theoretische Empfehlung einer kurzen Einschiesstfernung von bloss 5 m oder 10 m gilt aber trotzdem, ja erweist sich angesichts der typischerweise kurzen Einsatzdistanz gar als sehr praxisnah.

Für die Anwender von kurzen Sturmgewehren und Maschinenpistolen sind obige theoretische Ueberlegungen interessant. Allgemein besteht die Tendenz, solche Waffen mit Reflexvisieren (z. B. von Aimpoint) auszurüsten, wobei zum Teil Bedenken wegen der erhöhten Visierlinie angemeldet werden – tatsächlich aber sind für taktische Waffen Visierhöhen von 50 mm bis 70 mm mit Rücksicht auf den Visierbereich geradezu ideal. An dieser Stelle darf man auch sagen, dass die vielgeschmähten Bullpup-Sturmgewehre bezüglich Visierbereich für den militärischen Einsatz die optimale Visierhöhe aufweisen, was immer man auch sonst über diese Konstruktionen denken mag.

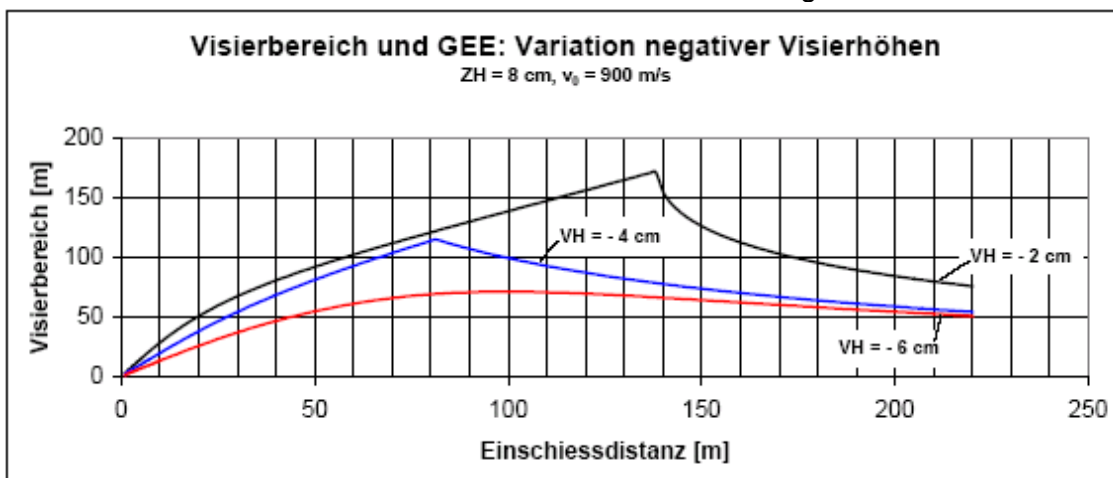


Bild 5

Die Einsatzdistanz von Lasern wird wesentlich beschränkt durch die Erkennbarkeit des Zielpunktes, welche in der Regel deutlich unterhalb der GEE liegt. Deshalb ist es richtig, den „besten Platz“ senkrecht über dem Lauf einem optischen oder mechanischen Visier zu überlassen und den Laser als Zweitvisier an einer ballistisch suboptimalen Stelle zu

montieren, allenfalls sogar unter dem Lauf. Bild 5 im Vergleich mit Bild 2 zeigt, dass so zwar viel kleinere Visierbereiche und nähere GEE resultieren als bei positiven Visierhöhen, sie aber immer noch in durchaus einsatztypischen Entfernungen liegen. Als Lernpunkt folgt aus der Theorie, dass man einen Underbarrel-Laser immer möglichst weit einschliessen sollte und nicht einfach auf dieselbe Distanz wie das Hauptvisier.

Allgemeiner Hinweis: Ab einer Visierhöhe von $VH = 0$ verschwindet die mündungsnaher Spitze der Visierbereichsfunktion, weil es keine Kurzdistanz mehr gibt (bzw. die Kurzdistanz liegt bei $VH = 0$ genau in der Mündung). Für Visierhöhen von $VH < -ZH/2$ degeneriert die verbleibende eine Spitze gar zum flachen Buckel und von einer GEE kann kaum noch die Rede sein.

3. Schlussfolgerungen

Eine allgemeine Theorie der GEE unter Einbezug nichtjagdlicher Zielgrössen und negativer Visierhöhen bringt nützliche Hinweise für das Einschliessen und die Auswahl einer Feuerwaffe, ist aber nicht das alleinige Kriterium; viel wichtiger sind meist einsatzbedingte Vorgaben. Man denke nur an ein militärisches Scharfschützengewehr: Obwohl technisch dem Jagdgewehr eng verwandt, spielt die GEE überhaupt keine Rolle. Typische GEE liegen unter 200 m, der Einsatzbereich des militärischen Scharfschützengewehrs jedoch beginnt erst dort und reicht über 800 m. Wenn Einsatzbereich und Visierbereich der GEE übereinstimmen, kann der Schütze immer Fleck zielen – stimmen die beiden nicht überein, muss immer mühselig gemäss ballistischen Kenntnissen das Visier oder der Haltepunkt korrigiert werden. Nebst der geforderten hohen Schiesskunst ist dies mit ein Grund, weshalb an militärische Scharfschützen so hohe Forderungen gestellt werden: Wer ohne die Vorteile der GEE auskommen muss, darf viel Kopfarbeit leisten.

Einschiessen und Richten

Nur eine auf die günstigste Einschuss-Entfernung GEE eingeschossene Waffe bietet dem Anwender ihr volles Potenzial und man braucht gute Gründe, um darauf zu verzichten. Aber was tun, wenn die GEE bei 167 m liegt, aber nur ein Schiessstand von 100 m zur Verfügung steht? Und wie kann der Büchsenmacher in seiner Werkstatt das Zielmittel so montieren, dass die Schüsse von Anfang an die Scheibe treffen?

1. Einschiessen auf eine Hilfsdistanz

Bild 1 verdeutlicht die Aufgabenstellung: Eine Waffe mit Visierhöhe $VH = 50$ mm soll auf $EE = 300$ m eingeschossen werden, aber es steht nur ein Schiessstand der Distanz $x_H = 100$ m zur Verfügung; wir nennen x_H eine Hilfsdistanz, weil sie nicht der eigentlichen Einschuss-Entfernung entspricht. Am Ort $x_H = 100$ m liegt die Flugbahn $y_H \approx 0.18$ m über der Visierlinie; wenn ich also die Waffe auf 100 m mit einem Hochschuss von 18 cm einschiesse, wird auf 300 m ein Fleckschuss erfolgen.

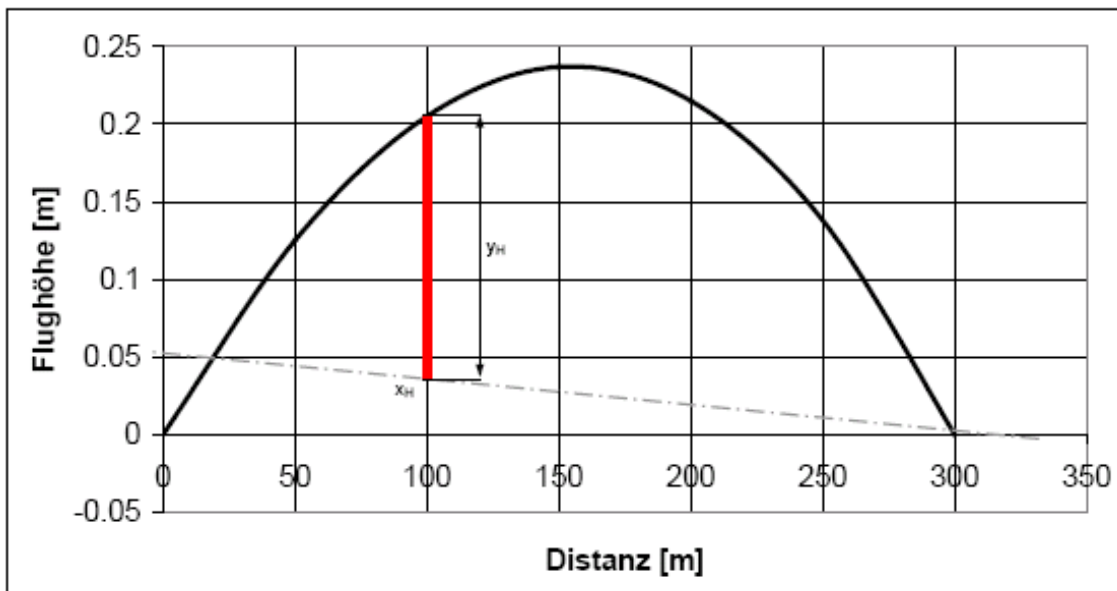


Bild 1

Die Differenz zwischen Flugbahn und Visierlinie wird durch die Schusslage-Funktion $y_Z(x)$ beschrieben, in welcher positive Werte einen Hochschuss bedeuten. Wenn die Flugbahn selbst durch ein geeignetes Modell $y(x)$ beschrieben wird, so lautet die Schusslage-Funktion zur Hilfsdistanz x_H für die Einschuss-Entfernung EE einer Waffe mit der Visierhöhe VH wie folgt:

$$y_Z(x_H) = y_H = y(x_H) + x_H \cdot VH / EE - VH$$

Hochschuss auf 100 m in cm für Fleckschuss auf GEE

v_0 [m/s]	VH[mm]	
	40	50
700	4.1	4.3
750	4.2	4.3
800	4.2	4.2
850	4.1	4.1
900	4.0	3.9
950	3.9	3.8

Für die Flugbahn-Funktion $y(x)$ kann man das Vakuum-Modell einsetzen, man kann aber auch eine Flugbahntabelle nutzen, welche die „wahren“ Flughöhen zur Fleckschuss-Distanz EE unter Berücksichtigung der Atmosphäre und der Flugeigenschaften des Geschosses angibt. Wie auch immer: Die obige Formel ist geometrischer Natur und keine Näherung – die Resultate sind so genau wie die Werte von $y(x_H)$, die man eingibt.

Normalerweise wird man für die Einschuss-Entfernung EE die GEE einsetzen wollen. In

jagdlischem Zusammenhang ($ZH = 80 \text{ mm}$) ergibt sich nun wundersam, dass die Flugbahnen zur GEE von allen Jagdgewehren bei $x_H = 100 \text{ m}$ ziemlich genau einen Hochschuss von 4 cm ergeben (s. Tabelle oben). Ein Jäger kann also sein Gewehr ohne grosse Analysen einfach auf 100 m mit einem Hochschuss von 4 cm einschossen und erhält so eine optimal eingeschossene Waffe; im taktischen Bereich (Maschinenpistole und Sturmgewehr als verbreitetste Handfeuerwaffen) gibt es leider keine so wundersame Distanz, weil die Visierhöhen und Mündungsgeschwindigkeiten zu stark variieren.

Als Hilfsdistanz zum Einschossen kann man auch die Kurzdistanz nutzen, den ersten Schnittpunkt von Flugbahn und Visierlinie; auf diese Distanz kann man Fleck einschossen, braucht also keinen Hochschuss zu erzwingen. Kurzdistanzen liegen meistens bei knapp 30 m und lassen sich leicht auf einem improvisierten Schiessplatz erzeugen, aber sie haben auch ihre Nachteile: Erstens sind diese Distanzen so kurz, dass sich Zielfernrohre kaum scharf stellen lassen und einen erheblichen Parallaxefehler aufweisen – genaues Zielen wird schwierig (dieser Nachteil gilt nicht für mechanische Zielmittel). Zweitens sind die Kurzdistanzen ziemlich dicht gepackt (s. Bild 2) und müssen auf den Meter genau eingehalten werden; Einschossen auf 25 m erzeugt eine deutlich verschiedene Visiereinstellung als das Einschossen auf 30 m .

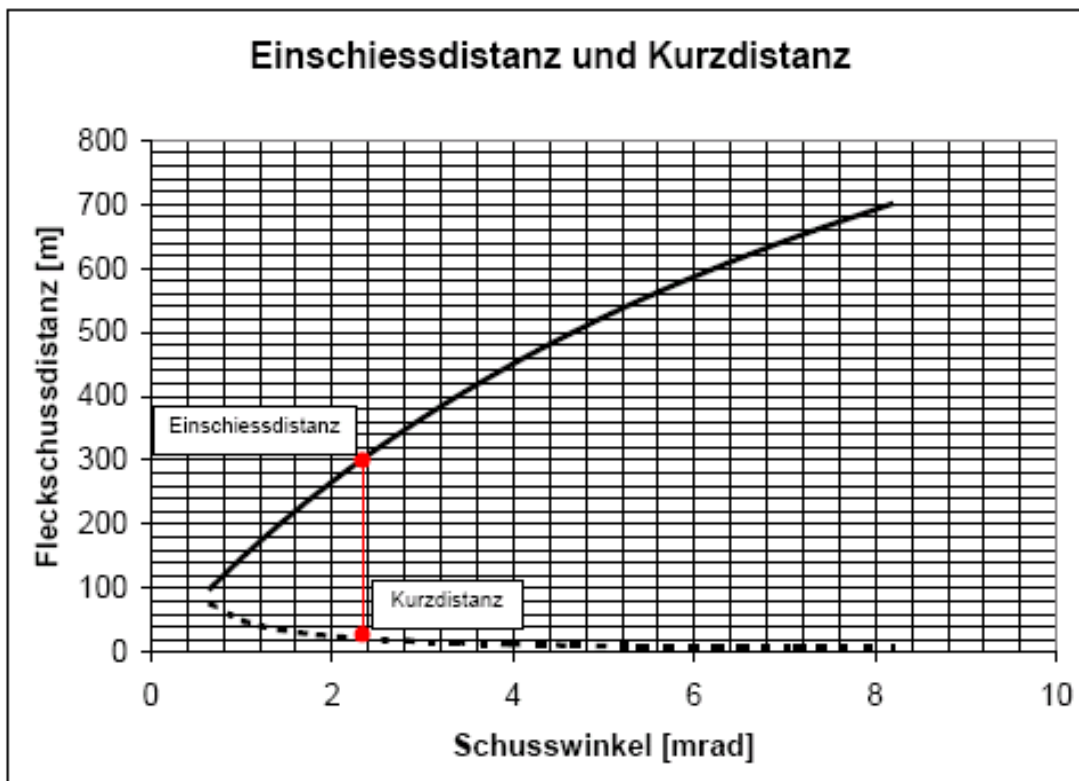


Bild 2

2. Ausrichten

Jedes Zielmittel muss einmal montiert werden: Mechanische Visiere in der Fabrik des Herstellers, Zielfernrohre und andere Zielmittel, die als Zubehör erworben werden, in der Werkstatt des Büchsenmachers. Wird das Zielmittel einfach irgendwie montiert, darf der Schütze sich nicht wundern, wenn er nicht mal auf 50 m die Scheibe trifft – Aerger und Munitionsverschleiss sind vorprogrammiert, können aber durch sauberes Ausrichten des Zielmittels vermieden werden.

Ausrichten bedeutet, dass man ohne zu schiessen die Laufseelenachse und die Ziellinie in eine definierte Beziehung setzt. Dazu wählt der Büchsenmacher eine Richtdistanz x_R , welche er von seinem Arbeitsplatz aus erblicken kann (sei es in der Werkstatt selbst oder durch ein Fenster hinaus). In dieser Distanz setzt er zwei Richtmarken, welche auf einer senkrechten Linie liegen und den Abstand y_R haben (y_R kann auch 0 sein, das Peilziel also aus nur einer

Richtmarke bestehen; siehe unten). Wenn er nun den Lauf auf den einen Punkt ausrichtet (normalerweise den unteren) und das Zielmittel auf den anderen einstellt, so erzeugt er damit bei richtiger Auslegung der Einrichtung einen Visierwinkel, der der gewünschten Einschuss-Entfernung entspricht.

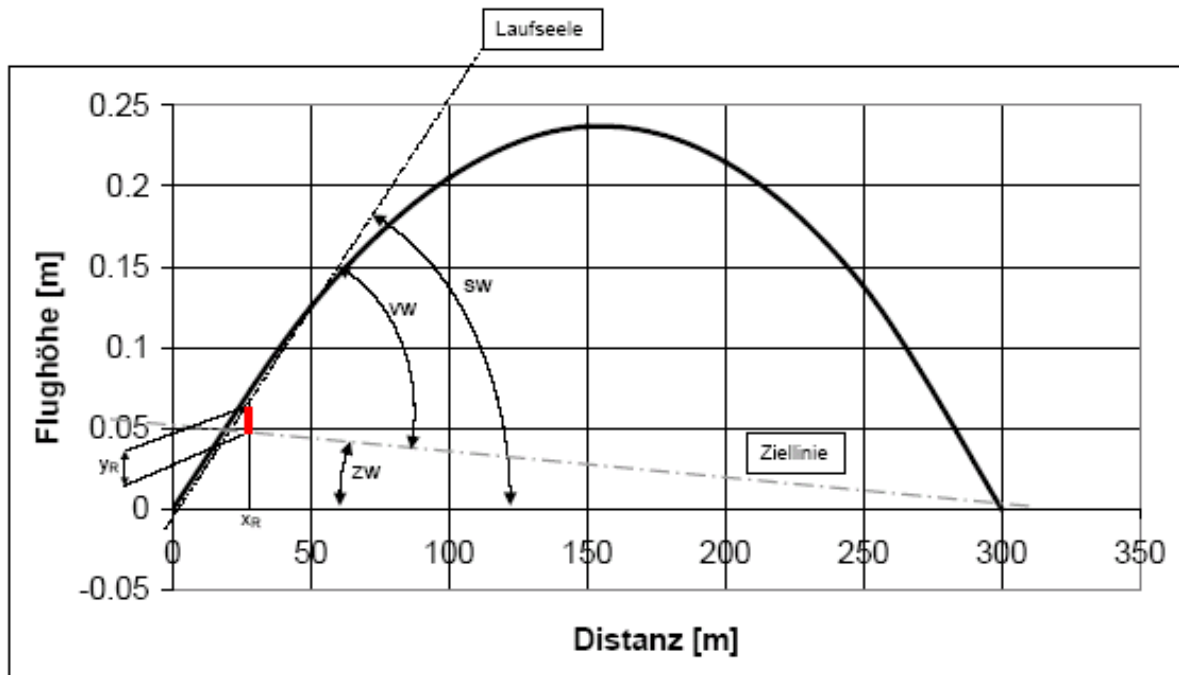


Bild 3

Bild 3 verdeutlicht das Konzept des Ausrichtens und führt unmittelbar zur Berechnung von y_R (x_R): Wenn die Einschuss-Entfernung EE vorgegeben ist (im Bild 300 m) und der zugehörige Schusswinkel sw bekannt, so gilt

$$y_R = VH - x_R \cdot (VH / EE + sw)$$

y_R : Senkrechter Abstand der Richtmarken in Millimetern

VH : Visierhöhe in Millimetern

EE : Einschuss-Entfernung in Metern

sw : Schusswinkel zur Einschuss-Entfernung in Millirad (einer Schusstafel zu entnehmen oder mit der Vakuum-Formel $sw_{EE}[\text{mrad}] = 4905 \cdot EE / v_0^2$ abzuschätzen).

Die Formel ist so konstruiert, dass bei $y_R > 0$ die Richtmarke des Zielmittels über der Richtmarke der Laufseele liegt.

Normalerweise muss man die Richtdistanz x_R gemäss den Platzverhältnissen wählen. Wenn man aber die freie Wahl hat, so ist es sinnvoll, diejenige Distanz auszuwählen, in welcher $y_R = 0$ wird und man Zielmittel und Lauf auf denselben Punkt ausrichten kann. Obige Gleichung entsprechend aufgelöst erhält man für diese besonders angenehme Richtdistanz

$$x_R = VH / (VH / EE + sw)$$

Zur Umsetzung dieses Konzeptes sind einige technische Probleme zu lösen (dass man die Waffe in einen Schraubstock spannen muss, sei hier nur beiläufig erwähnt): Um den Lauf auf einen Punkt ausrichten zu können, muss der Büchsenmacher vom Patronenlager her durch diesen hindurch blicken können, was aber bei einigen Waffensystemen nicht möglich ist. Man kann sich dann mit einem Laufspiegel helfen oder einem Laser-Kollimator (Bild 4), welcher die Laufseele als roten Punkt auf die Richtscheibe projiziert. Des Weiteren wird der Büchsenmacher beim Ausrichten optischer Zielmittel mit dem Problem konfrontiert, dass diese auf Distanzen unter 20 m erhebliche Parallaxefehler zeigen und er die Richtmarke gar

nicht genau anpeilen kann. Hierzu ein Trick: Mit Hilfe eines Spiegels (mindestens 20 cm x 20 cm gross) lässt sich die Richtdistanz um den Abstand Spiegel-Richtscheibe verlängern!

Kollimatoren, welche in die Mündung gesteckt werden, sind sehr empfindlich gegenüber kleinsten Asymetrien derselben – es braucht einige Erfahrung, um damit umzugehen, und am sichersten ist immer noch der direkte Blick durch den Lauf auf die Richtmarke. Aber das eigentliche Hauptproblem des Richtens ist das Folgende: Woher weiss ich den Schusswinkel α ?

Obige Formeln sind rein geometrisch und stimmen exakt, die Genauigkeit der Resultate hängt rein von der Genauigkeit des Wertes α ab. Bei Flachbahnwaffen ist dieser jedoch so klein, dass er nicht direkt gemessen werden kann; man muss ihn aus dem Vakuum-Modell berechnen oder mit Hilfe eines ausgeklügelten Computer-Programmes.

Das Ausrichten kann niemals das Einschiessen mit scharfer Munition ersetzen, aber ein sauber ausgerichtetes Zielmittel garantiert, dass schon der erste Schuss in der Nähe des Zielpunktes sein wird.



3. Schlussbemerkungen

Einschiessen auf Hilfsdistanzen und Ausrichten sind sehr wichtige Hilfsmittel zur Inbetriebnahme einer Feuerwaffe: Letzteres erspart endlose Einschiess-Zeit auf dem Schiessplatz und ersteres hilft, die theoretische GEE in die Praxis umzusetzen und so das volle Potenzial der Waffe auszuschöpfen. Damit die Methoden funktionieren, müssen allerdings gute Flugbahntabellen und Schusstafeln zur Verfügung stehen.

Visierkorrekturen

Wenn die Waffe am Ziel vorbeischiess, so muss man das Visier korrigieren. Normalerweise ist das eine einmalige Sache, nicht aber für Leute, die gerne auf stark verschiedene Distanzen schiessen: Diese brauchen ein System, um ihr Visier jeweils auf die Distanz einstellen zu können.

1. Das Einschiessen



Feste Visiere bestehen typischerweise aus Kimme und Korn. Diese Visiere sind selten wirklich fest, sondern eher mit festem Sitz in Schwalbenschwanz-Nuten eingepasst, wodurch sie mit Werkzeug seitlich verschiebbar sind. Für die Höhenkorrektur stehen manchmal verschieden hohe Korne und Kimmen zur Verfügung und falls nicht, hilft nur noch der Griff zur Feile.

Manche Visiere verfügen über einen Mechanismus, dank welchem sie mit einem Schraubendreher oder einer Münze justierbar werden; ob man dies schon gleich ein „verstellbares“ Visier nennen will, bleibe dahingestellt, bleiben doch die Verstellmöglichkeiten weit hinter denen eines von Hand drehbaren Verstellturmes zurück, wie man es von Zielfernrohren kennt (Bild 1).

Zuerst muss man durch Schiessen auf die Einschiess-Entfernung EE feststellen, wie weit die Treffpunktlage vom Zielpunkt (engl.: POA, point of aim) entfernt ist. Dazu schießt man mit Vorteil drei Schuss und bestimmt geometrisch den mittleren Treffpunkt (engl.: MPI, mean point of impact) als Schwerpunkt des Dreiecks, wie in Bild

2 dargestellt (als Schnittpunkt der Seitenhalbierenden). Danach misst man die waagerechte und seitliche Abweichung des mittleren Treffpunktes zum Zielpunkt und weiss, wieviel man korrigieren muss.

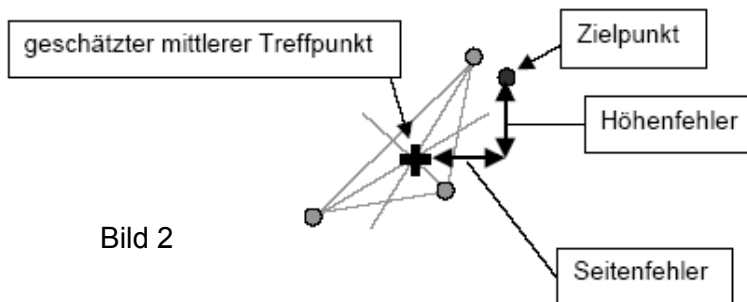


Bild 2

Um die nötige Korrektur auszuführen, schwenkt man bei optischen Zielgeräten deren Achse, was durch geeignete Mechanismen einfach zu bewerkstelligen ist; etwas mehr Kopfzerbrechen bereitet die Korrektur an Kimme und Korn.

Für kurze und mittlere Distanzen kann man das Problem geometrisch angehen wie in Bild 3 dargestellt. Die Skizze gilt sowohl für Höhen- als auch für Seitenfehler, welche mit F eingezeichnet sind. VL bedeutet die Visierlänge (Abstand von Kimme zu Korn) und K die Korrektur, welche vorzunehmen ist. Je nach Waffenkonstruktion ist die Korrektur an der Kimme oder am Korn vorzunehmen – manchmal auch an beiden zugleich, wenn besonders grosse Fehler korrigiert werden müssen.

Aus den Skizzen folgen die Formeln für die

Korrektur am Korn: $K[\text{mm}] = VL[\text{m}] \cdot F[\text{mm}] / (EE[\text{m}] + VL[\text{m}])$

Korrektur an der Kimme: $K[\text{mm}] = VL[\text{m}] \cdot F[\text{mm}] / EE[\text{m}]$

Der zahlenmässige Unterschied der beiden Formeln ist gering (weil $VL \ll EE$) und wird deshalb häufig vernachlässigt. Bleibt noch die Frage, in welche Richtung Kimme und Korn geändert werden müssen? Diese knifflige Frage beantwortet Tabelle 1.

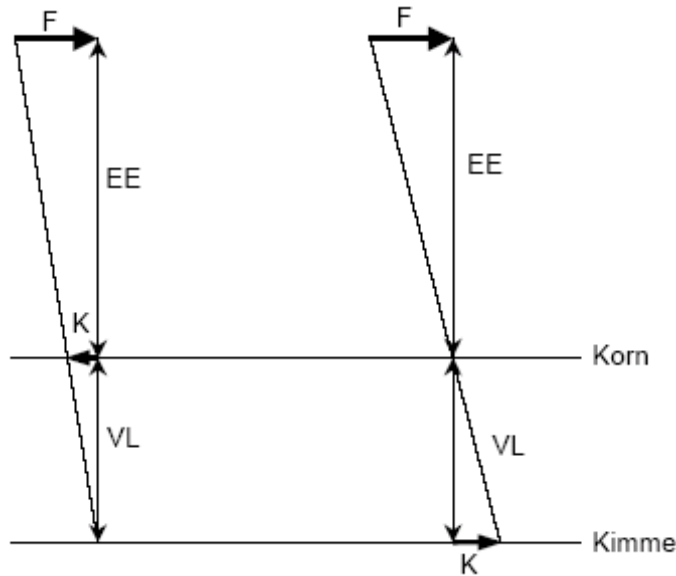


Bild 3

Korrektur an	Schuss hoch nach unten	Schuss tief nach oben	Schuss rechts nach links	Schuss links nach rechts
Kimme	tiefer	höher	nach links	nach rechts
Korn	höher	tiefer	nach rechts	nach links

Tabelle 1

2. Die Flugbahn-Korrektur

Die meisten Schützen können von der günstigsten Einschiess-Entfernung GEE profitieren: Sie schießen ihre Waffe einmal auf diese Distanz ein und können ihr Ziel dann innerhalb des zugehörigen Visierbereiches immer treffen, ohne Haltepunkt oder Visiereinstellung zu ändern. Was aber, wenn der Visierbereich der GEE überhaupt nicht zu den geplanten Einsatzdistanzen passt? Dies gilt namentlich für Scharfschützen, welche sehr kleine Ziele auf sehr weite oder stark verschiedene Distanzen treffen wollen. Diesen Schützen bleibt nichts anderes übrig, als jeweils vor dem Schuss die genaue Distanz zu ermitteln und ihr Visier dann darauf einzustellen; die Ermittlung dieser distanzabhängigen Einstellungen erfordert einige Arbeit.

Der Scharfschütze muss eine Grunddistanz festlegen, sein „Zero“, typischerweise 100 m. Er schießt seine Waffe wie oben auf diese Zero-Distanz ein und justiert dann sein Zielfernrohr so, dass die Null-Marke dieser Einschiess-Entfernung entspricht. Dann muss er seine Waffe weiter einschiessen auf alle Distanzen, die für ihn von Bedeutung sind, also etwa 200 m, 300 m, 400 m und so fort. Zu jeder Distanz muss er sich notieren, mit welcher Positions-Marke des Verstellturmes er einen Fleckschuss-Treffer erzielt. So erhält er eine Visierkorrektur-Tabelle, deren Werte er auch gleich auf den Verstellturm gravieren kann, wie unten in Bild 1 gezeigt (Fleckschuss 200 m 2 Klicks über Zero, Fleckschuss 300 m 5 Klicks über Zero und so weiter).

Diese ganze Einschiesserei erfordert sehr viel Zeit, Munition und natürlich die Möglichkeit, überhaupt auf die interessierenden Distanzen schießen zu können. Man kann sich diese Arbeit wesentlich erleichtern, wenn man eine ballistische Schusstafel zu Rate zieht und – basierend auf der Visierhöhe VH der eigenen Waffe – eine Visierkorrektur-tabelle errechnet, nach dem Programm wie in Tabelle 2 dargestellt. Je nach Qualität der Schusstafel ist so eine berechnete Visierkorrektur-Tabelle genau genug, um auf jede neue Distanz immerhin schon die Scheibe zu treffen, ersetzt aber niemals das experimentelle Einschiessen auf jede einzelne Distanz.

Das Programm nach Tabelle 2 kann man noch verfeinern, indem man die Visierkorrektur gegen Zero in mrad gleich in Klicks umrechnet. Viele Zielfernrohre korrigieren in 0.1

mrad/Klick, d. h. die Werte aus Spalte E müssen mal 10 gerechnet werden, um Klicks zu erhalten. Manche Rohre korrigieren aber auch nur ¼ MOA pro Klick, also 0.0725 mrad – die Werte aus Spalte E wären also um den Faktor 13.8 zu multiplizieren.

Programm zur Erstellung einer Visierkorrektur-Tabelle				
Distanz [m]	Schusswinkel aus Tafel [mrad]	Zielwinkel [mrad]	Visierwinkel [mrad]	Visierkorrektur gegen Zero [mrad]
A	B	C	D	E
100 = Zero	$SW_{100} = SW_{Zero}$	$ZW_{Zero} = VH[mm] / 100$	$VW_{Zero} = SW_{Zero} + ZW_{Zero}$	0
200	SW_{200}	$ZW_{200} = VH[mm] / 200$	$VW_{200} = SW_{200} + ZW_{200}$	$= VW_{200} - VW_{Zero}$
300	SW_{300}	$ZW_{300} = VH[mm] / 300$	$VW_{300} = SW_{300} + ZW_{300}$	$= VW_{300} - VW_{Zero}$
...
x	SW_x	$ZW_x = VH[mm] / x$	$VW_x = SW_x + ZW_x$	$= VW_x - VW_{Zero}$

Tabelle 2

Im ersten Abschnitt dieses Artikels wurden Visierkorrekturen rein geometrisch berechnet, ohne Einbezug ballistischer Daten. Für die Korrektur von Seitenfehlern stimmt dies sehr gut, nicht jedoch für Höhenfehler: Hier schlägt uns die Physik ein Schnippchen. Die zweite Spalte

SD [m]	y [m]	y _z [m]
100	0.00	0.94
200	-0.18	1.76
300	-0.58	2.35
400	-1.23	2.69
500	-2.20	2.72
600	-3.54	2.37
700	-5.34	1.56
800	-7.69	0.21

Tabelle 3

von Tabelle 3 zeigt die Flugbahntabelle einer Waffe, die auf 100 m eingeschossen wurde. Wenn der Schütze nun die Visierkorrektur auf 800 m nach obiger Logik berechnen wollte, würde er einfach die Flughöhendifferenz von stattlichen 7.69 m in eine Aenderung des Visierwinkels von $7.69 \text{ m} / 800 \text{ m} = 9.61 \text{ mrad}$ umrechnen. Dies getan würde allerdings auf die 800 m ein Hochschuss von gut 20 cm resultieren, wie man aus der Schusslage-Funktion in Spalte 3 der Tabelle ersieht, wohingegen die angegebene Schusswinkel-Methode das richtige Resultat liefert. Dieser systematische Fehler von 20

cm auf 800 m ist nicht sehr gross, beträgt aber 2 – 4 Klicks und wäre somit korrigierbar. Für kurze bis mittlere Distanzen ist also obige Methode vertretbar (Anwendungsbereich wie derjenige des Vakuum-Modelles), Long-Range-Schützen sollten aber die genauere Methode nutzen, welche nicht auf Flugbahn-Tabellen, sondern auf Schusstafeln beruht.

3. Schlussbemerkungen

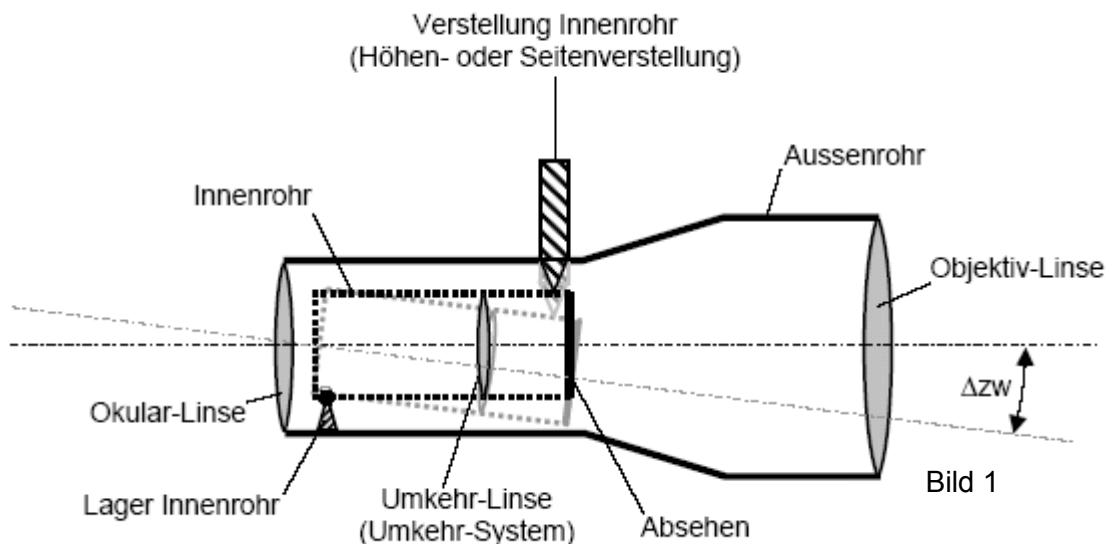
Das Einschiessen auf eine gegebene Distanz (vorteilhaft auf die GEE) bietet keine grossen Schwierigkeiten. Mühsam wird es, wenn man seine Waffe für Schüsse auf stark verschiedene Distanzen vorbereiten will, die nicht innerhalb des Visierbereichs der Einschiess-Entfernung liegen. Dazu muss man die Waffe mehrmals einschiessen – nämlich auf jede Distanz einzeln – und sorgfältig Buch führen. Wenn eine gute Schusstafel zur aktuell verwendeten Patrone vorliegt, kann man sich die Arbeit des Einschiessens durch ein bisschen Rechenarbeit stark vereinfachen.

Rund ums Zielfernrohr

Der Markt bietet zahllose Varianten von Zielfernrohren und man kann stundenlang darüber debattieren, welche sich für welchen Zweck eignen und welche ihren – zum Teil stolzen – Preis wert sind oder nicht. Von allen Aspekten rund ums Zielfernrohr sei im Folgenden jedoch nur der Zusammenhang von Flugbahn, Verstellbereich und Montage behandelt.

1. Der Aufbau eines Zielfernrohrs

Dem Ziel zugewandt befindet sich eine grosse Sammellinse, welche man Eintritts- oder Objektivlinse nennt (Bild 1). Diese Linse projiziert ein nur wenige Millimeter grosses Bild des gesamten Gesichtsfeldes ins Innere des Zielfernrohrs, wobei dieses Bildchen allerdings auf dem Kopf steht. Im weiteren Strahlengang folgt deshalb ein Umkehrsystem, das im einfachsten Fall aus einer einzigen Linse besteht, welches das Bildchen auf die Füsse stellt. Der Schütze sieht dieses Bildchen durch die Austritts- oder Okularlinse, welche als Lupe wirkt und eine erhebliche Vergrösserung bewirkt; tatsächlich sieht der Schütze durch das Zielfernrohr das Ziel grösser als von blossem Auge.



Obiges gilt für alle (terrestrischen) Fernrohre, aber das Zielfernrohr enthält als Besonderheit ein Absehen als Zielmarke. So ein Absehen besteht aus einem Fadenkreuz (wörtlich zu nehmen), aus einem feinen Blech oder einem auf ein Glasplättchen gravierten Muster. Dieses Absehen wird entweder in die Bildebene der Objektivlinse (wie in Bild 1) montiert oder in die Gegenstandsebene der Okularlinse, wodurch in beiden Fällen Zielbild und Zielmarke zu einem einzigen Bild verschmelzen.

Damit die Zielmarke auf dem Zielbild auch wirklich dort sitzt, wo das Gewehr hinschiesst, muss sie verstellbar sein. Dazu montiert man Absehen und Umkehrsystem gemeinsam in einem schwenkbaren Innenrohr, das von aussen nicht sichtbar ist. Ausserlich sichtbar ist das Gehäuse, welches die Eintritts- und die Austrittslinse hält sowie einen Verstellmechanismus trägt, über welchen sich das Innenrohr schwenken lässt (immer Bezug auf Bild 1). Das Innenrohr ist sowohl waagrecht als auch senkrecht schwenkbar, wodurch sich Seiten- und Höhenkorrekturen durchführen lassen.

Das Innenrohr lässt sich natürlich nicht um beliebig grosse Winkel schwenken, sein Verstellbereich kennt verschiedene Beschränkungen. Die offensichtlichste Schranke ist erreicht, wenn das Innenrohr am Aussenrohr (Gehäuse) ansteht. Diese extreme Lage wird allerdings konstruktiv unterdrückt, denn wenn z. B. das Innenrohr ganz oben anstehen täte, könnte man nicht mehr seitlich schwenken und man sähe den Rand des Gehäuses. Der waagerechte und senkrechte Verstellbereich werden deshalb auf einen rechteckigen

Verstellbereich reduziert, so dass man in jeder Position der Höhenverstellung noch die gesamte Seitenverstellung nutzen kann (und umgekehrt) und ein rundes Zielbild sieht. Dieser rechteckige Verstellbereich wird noch weiter reduziert durch das Bedienelement des Verstellmechanismus, durch die Stellkappe. Diese muss dem Schützen durch Gravuren zeigen, wie sein Zielfernrohr gerade eingestellt ist, und deshalb beschränkt sich dieser nutzbare Verstellbereich häufig auf einen vollen Umgang der Stellkappe und ist deutlich kleiner als der rechteckige Verstellbereich.

2. Ansprüche

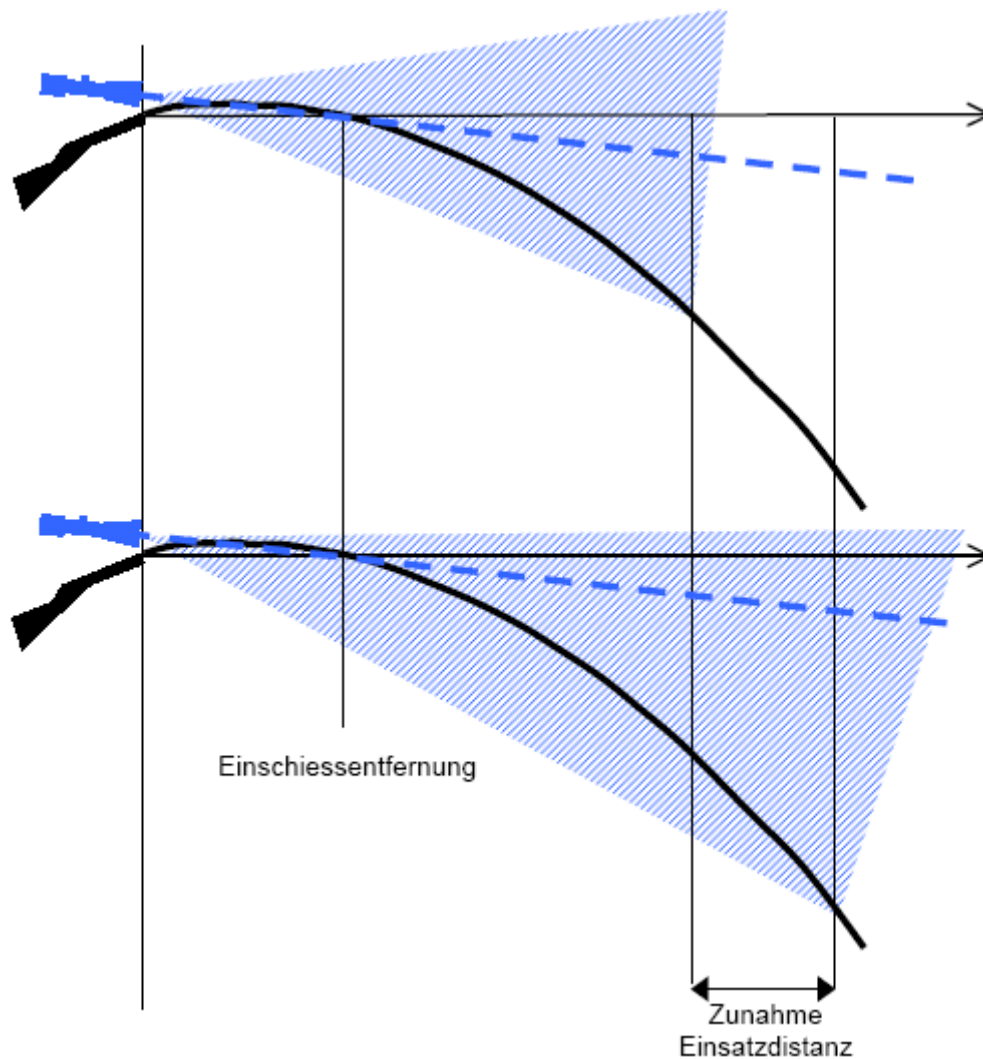


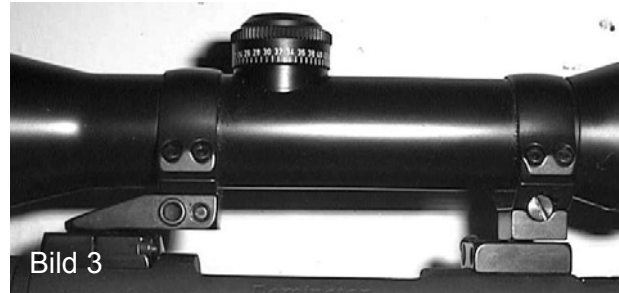
Bild 2

Der Jäger schießt sein Gewehr einmal mit seiner Patrone auf die GEE ein, der Sportschütze auf seine Wettkampfdistanz; den Verstellmechanismus brauchen die beiden nur zur Korrektur der Tageslage. Der Scharfschütze hingegen schießt sein Gewehr auf eine Bezugsdistanz ein (sein Zero, typischerweise 100 m) und will dann den Verstellmechanismus nutzen, um das Gefälle der Flugbahn auf weitere Distanzen zu kompensieren. Jäger und Sportschütze wünschen sich deshalb, dass das Innenrohr ihres Zielfernrohrs sich nach dem Einschiessen irgendwo in der Mitte des Verstellbereiches befinde (Bild 2 oben), der Scharfschütze hingegen möchte es möglichst genau plaziert am unteren Rand des Verstellbereiches finden, um den ganzen Bereich nach oben für weite Schüsse nutzen zu können (Bild 2 unten). Diese Ueberlegungen betreffen nur die Höhenverstellung und Bild 2 zeigt, wie diese verschiedenen Konzepte im Zusammenspiel mit der Flugbahn deutlich verschiedene Einsatzdistanzen ergeben: Im Beispiel vergrößert sich

der Einsatzbereich für dasselbe Gewehr mit derselben Patrone und demselben Zielfernrohr um ca. 30% dank optimaler Montage.

Zur Realisierung des Konzeptes ist der Büchsenmacher gefordert: Für einen Jäger oder Sportschützen bringt er das Innenrohr in eine mittlere Position und verändert dann die Montage so, dass das Zielfernrohr im richtigen Winkel zur Laufseele liegt (mittels einer Richtscheibe); für einen Scharfschützen geht er gleich vor, wobei er allerdings vorgängig das Innenrohr in seine tiefste Stellung schwenkt (mit wenigen Klicks Reserve zur Korrektur der Tageslage). Hinweis: Die tiefste Lage des Innenrohrs ist der flachste Winkel zur Laufseele – also wenn das Innenrohr oben anschlägt!

Dieses feine Ausrichten des Zielfernrohres geschieht einfach mit einer Montage vom Typ EAW Schwenkmontage (Bild 3); robuster wenn auch aufwändiger sind spanabhebende Verfahren, wobei der nötige flache Winkel (meist weniger als ein halbes Grad) durch überfräsen der Montagebasis erreicht wird.



3. Probleme und Lösungen

Anhand von Bild 4 wollen wir einige Fallbeispiele diskutieren, wobei der rechteckige Verstellbereich blau dargestellt ist und der nutzbare Verstellbereich der Stellkappe grün; das Bild zeigt jeweils den Zustand nach erfolgtem Einschossen und Justieren, der schwarze Balken markiert die Position des Innenrohrs.

A: Zur Einschiesdistanz 150 m liegt das Innenrohr in der Mitte des rechteckigen und des nutzbaren Verstellbereichs – für eine Jagdwaffe der ideale Einschieszustand.

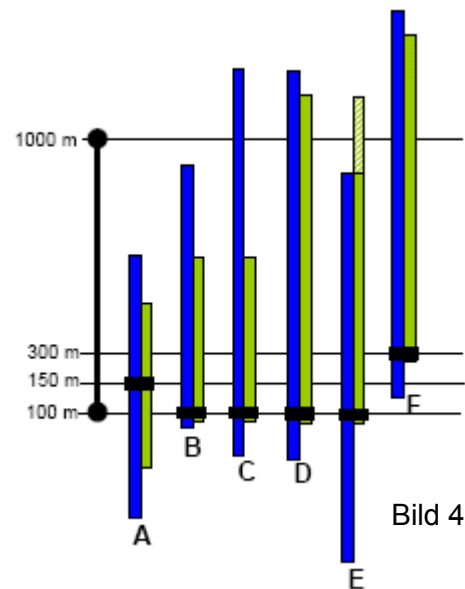
B: Die Waffe wird auf 100 m eingeschossen in Hinblick auf Long-Range-Anwendung. Das Zielfernrohr ist an sich perfekt montiert und das Innenrohr liegt schön am unteren Rand der Verstellbereiche, aber diese sind viel zu klein! Hier lässt sich nichts machen, das Zielfernrohr wurde für die Anwendung zu klein gewählt.

C: Hier sehen wir ein Zielfernrohr, das über einen grossen rechteckigen Verstellbereich verfügt und für Long-Range-Anwendungen perfekt montiert ist, aber die Stellkappe beschränkt den nutzbaren Verstellbereich zu sehr.

D: Gegenüber dem Beispiel C wird der nutzbare Verstellbereich verdoppelt und wir sehen die perfekte Lösung für einen Scharfschützen: Er kann problemlos alle Distanzen von 100 m bis 1000 m einstellen. Den technischen Fortschritt von C zu D sieht man in der Praxis etwa an den PMII-Zielfernrohren von Schmidt&Bender, deren neue „Double Turn“-Stellkappe den nutzbaren Verstellbereich bei ansonsten gleicher Konstruktion verdoppelt und den Schützen praktisch den ganzen rechteckigen Verstellbereich nutzen lässt.

E: Dieselbe Waffe mit demselben Rohr wie in Beispiel D wird ebenfalls auf 100 m eingeschossen und justiert, aber danach stellt der Schütze fest, dass er die Stellkappe nicht bis zum Maximum drehen kann: Das Zielfernrohr wurde schlecht montiert, die Montage muss mehr geneigt werden! Den nötigen zusätzlichen Neigungswinkel kann der Schütze an der Stellkappe ablesen: Wenn das Maximum z. B. bei 54 MOA liegt, die Kappe nach dem Einschossen und Justieren aber schon bei 38 MOA anschlägt, so ist eine zusätzliche Neigung (zur Mündung hin) von $54 - 38 = 16$ MOA nötig.

F: Dasselbe Rohr wie in Beispielen D und E wird auf 300 m eingeschossen und ist für fernere Einsatzbereiche optimal montiert: Der Einsatzbereich erstreckt sich von den 300 m



bis weit über 1000 m – allerdings kann der Schütze nicht mehr auf 100 m zielen und treffen. Dieses sogenannte „Kentucky-Zeroing“ setzt man sinnvoll bei taktischen Waffen Kaliber .338 LM oder .50 BMG ein: Ihre Kampfkraft reicht über 1200 m hinaus, aber weil sie so schwer und unhandlich sind, ist ihr Bediener auf Distanzen unter 300 m sowieso auf Nahverteidigung durch seine Kameraden angewiesen, seine Hauptwaffe muss er wegpacken.

4. Schlussbemerkungen

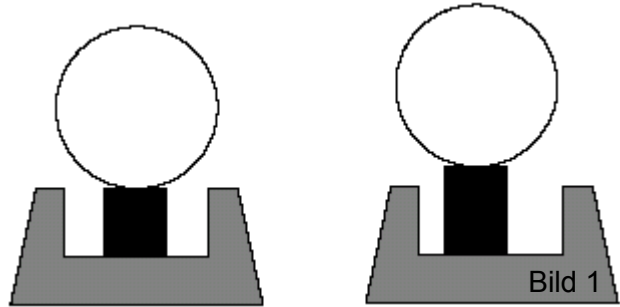
Weil Zielfernrohre meistens nachträglich auf die Waffe montiert werden, muss man dem Problem des begrenzten Verstellbereichs hier besondere Beachtung schenken. Abgesehen davon sind aber alle verstellbaren Visiere davon betroffen, seien es mechanische Visiere (verstellbare Kimme), Reflexvisiere oder Laser-Zielgeräte: Sie alle können ihren Zweck nur erfüllen, wenn sie präzise in einer wohldefinierten Lage auf die Waffe montiert werden.

Zielfehler

Die meisten Fehlschüsse resultieren aus Schützenfehlern, seien es Abgabe-Fehler oder Ziel-Fehler. Für Pistole und Gewehr werden im Folgenden die Auswirkungen der wichtigsten Zielfehler untersucht.

1. Kimme und Korn

Ein mechanisches Visier (engl.: iron sights) besteht aus einer Kimme (klassisch wie in Bild 1 oder als Lochkimme, engl.: rear sight) und einem Korn (engl.: front sight). An der Kimme ist eigentlich der Kimmenausschnitt von Interesse, definiert durch seine Breite b_R und Höhe h_R . Das Korn definieren wir analog durch seine Höhe h_F und seine Breite b_F . Von Kimme und Korn sieht der Schütze jeweils die ihm zugewandten Kanten und deren Abstand nennen wir Visierlänge L (engl.: sight radius). Den Abstand vom Auge des Schützen zur hinteren Kante der Kimme nennen wir Augenabstand A .

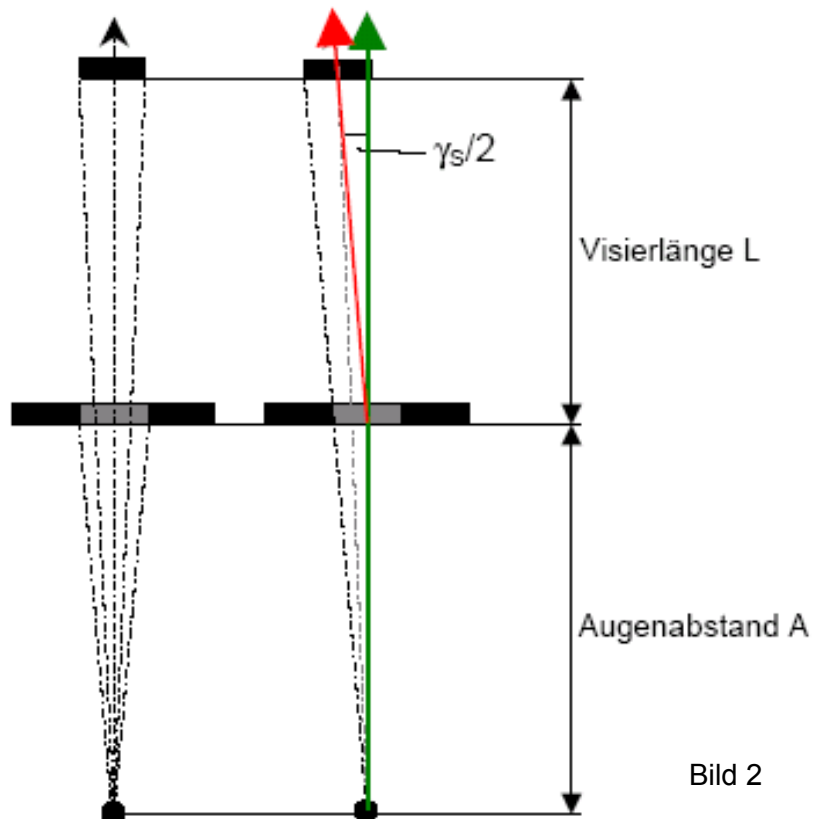


Die Extrema eines Zielfehlers wie in Bild 1 rechts gezeigt (schlechte Ausrichtung von Kimme und Korn gegeneinander) kann man geometrisch bestimmen, getrennt nach Höhe und Seite. Diese geometrische Betrachtung vernachlässigt optische Effekte wie Beugung von Licht an engen Spalten, Fokus und Auflösung des Auges sowie dessen Wahrnehmungsgewohnheiten; gerade letzteres verhindert die Berechnung eines vollkommenen Visiers, weshalb es so viele verschiedene Ausgestaltungen von Kimme und Korn gibt. (Namentlich bei Visieren zur raschen Zielerfassung wird die Physiologie des Auges zum bestimmenden Faktor, das Visier muss „ins Auge springen“.)

Die Berechnung des maximalen Seitenfehlers (Korn ganz am Rand des Kimmenausschnittes sichtbar) erfolgt nach Überlegungen wie in Bild 2 skizziert. Mit obigen Definitionen folgt daraus für die Bandbreite des seitlichen Zielfehlers als Abgangswinkel in rad

$$\gamma_S = (b_R \cdot (A+L) / A - b_F) / L$$

Bezüglich maximalem Höhenfehler gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder das „aufgesetzte Korn“ (Bild 3 oben), wobei der Fuss des Kornes an der Oberkante der Kimme erscheint, oder aber vom Korn ist nur noch gerade



die Oberkante im Kimmenausschnitt erkennbar (Bild 3 unten). Dies führt für maximalen Hochschuss und –tiefschuss zu folgenden Formeln:

$$\gamma_H^+ = h_F/L \cdot A/(A + L)$$

$$\gamma_H^- = h_R/L$$

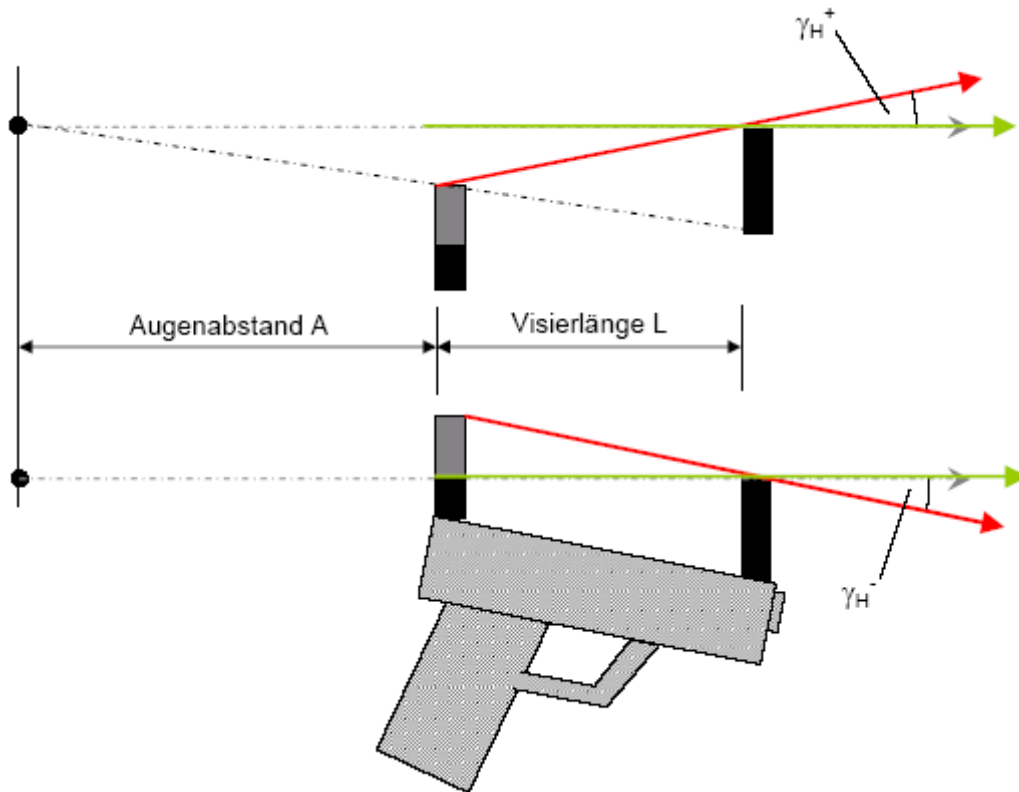


Bild 3

Die gesamte Bandbreite des Höhenfehlers durch Zielfehler ergibt sich dann zu $\gamma_H = \gamma_H^+ + \gamma_H^-$. Dieser Höhenfehler bewirkt eine Änderung des Schusswinkels gemäss $sw' = sw + \gamma_H^+$ bzw. $sw' = sw - \gamma_H^-$. Um die Höhenabweichung in einer bestimmten Schussdistanz zu bestimmen, kann man dann die zugehörige Flugbahn berechnen oder für kurze Distanzen vereinfachend reine Trigonometrie benutzen.

Wir wollen die abstrakten Aussagen der Formeln beispielhaft anhand der Polizeipistole P10 (HK USP Compact) auswerten. Die Parameter erhalten die Werte $b_F = 3.5$ mm, $h_F = 4.0$ mm, $b_R = 3.8$ mm, $h_R = 3.1$ mm und $L = 135$ mm; als typischen Augenabstand (im beidhändigen Anschlag) setzen wir $A = 600$ mm. Die Resultate gemäss Tabelle 1 (mit Trigonometrie berechnet) zeigen, dass auf 10 m alle Treffer noch in einem Band von 86 mm Breite und 472 mm Höhe liegen – im Notwehr-Fall genügt es also, das Korn nur halbwegs im Bereich des Kimmenausschnittes zu sehen und ein Rumpftreffer gelingt.

Zielfehler in mm		
Distanz	Seitenfehler	Höhenfehler
5	43	236
10	86	472
15	128	707
20	171	943
25	214	1179

Tabelle 1

Zielfehler in mrad		
Visierlänge [mm]	Seitenfehler	Höhenfehler
75	10	89
100	9	65
125	9	51
150	8	42
175	8	35
200	8	31

Tabelle 2

Mit Tabelle 2 analysieren wir was geschieht, wenn man die Visierlänge der P10 verändert (die Dimensionen von Kimme und Korn sowie der Augenabstand bleiben dabei gleich): Wir erkennen, dass mit zunehmender Visierlänge der maximale Zielfehler kleiner wird, womit die Erfahrung jedes Schützen also mathematisch bestätigt wäre.

Die Formeln sowie die Zahlenwerte der Tabellen 1 und 2 zeigen noch etwas Bemerkenswertes: Beim Schiessen mit Kimme und Korn erzeugen Zielfehler eine deutliche Höhenstreuung, jedoch nur eine geringe Seitenstreuung. Wenn also ein Schütze eine ausgeprägte Höhenstreuung zeigt, so begeht er wahrscheinlich einen Zielfehler; zeigt er hingegen eine ausgeprägte Seitenstreuung, so handelt es sich dabei wohl eher um einen Abgabe-Fehler (abreissen, bzw. „mucken“).

2. Verkanten

Beim Schiessen auf weite Distanzen – typischerweise mit einem Gewehr – wäre ein Zielfehler wie oben natürlich verheerend; weil man aber auf solche Entfernungen in der Regel sorgfältig zielt, kommt er in der Praxis nur bei Anfängern vor. Viel bedeutender ist der Fehler des Verkantens, wobei die Visierung nicht mehr senkrecht über dem Lauf steht, sondern die Waffe um die Ziellinie gedreht in Anschlag genommen wird (Bild 4).

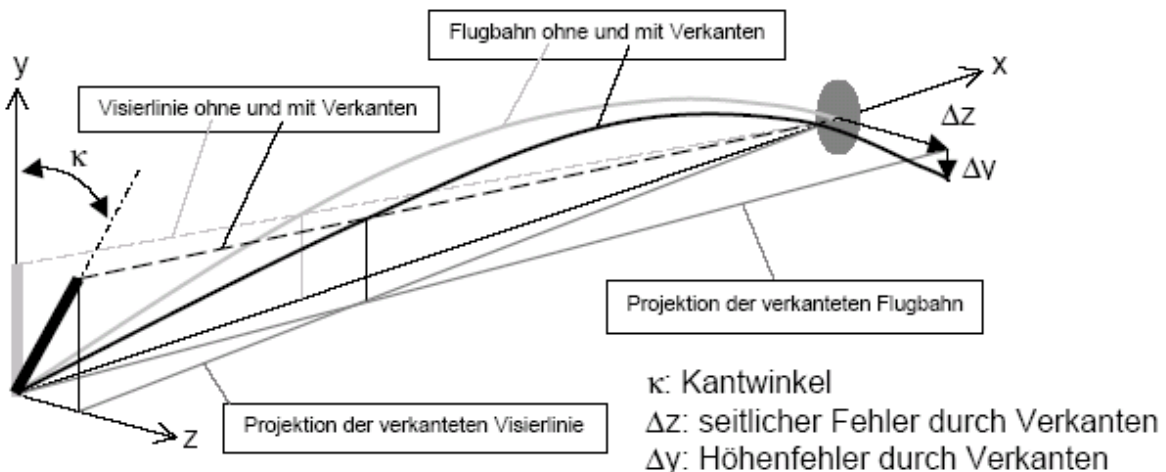


Bild 4

Dadurch wird der Schusswinkel aufgeteilt in zwei Komponenten: Vertikal in einen neuen, flacheren Schusswinkel $sw' < sw$ und horizontal in einen seitlichen Abgangswinkel σ . Mit dem Kantwinkel κ berechnen sich diese Winkel gemäss

$$sw' = sw \cdot \cos \kappa$$

$$\sigma = sw \cdot \sin \kappa$$

Die Verringerung des Schusswinkels bewirkt einen Tiefschuss vom Betrag Δy , welcher sich näherungsweise wie folgt berechnen lässt (mit Vakuum-Modell):

$$\Delta y[\text{mm}] \cong SD[\text{m}] \cdot sw[\text{mrad}] \cdot (\cos \kappa - 1)$$

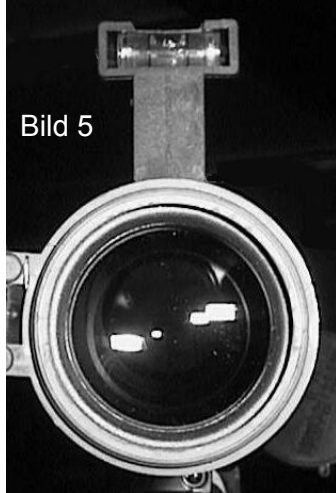
Höhen- und Seitenfehler in mm durch Verkanten um 2 grad

Distanz	GP90		GP11	
	Höhenfehler	Seitenfehler	Höhenfehler	Seitenfehler
200 m	0	10	0	14
400 m	-1	46	-1	60
600 m	-2	126	-3	151
800 m	-5	281	-5	304

Tabelle 3

Aus Tabelle 3 sieht man, dass der Höhenfehler beim Verkanten nicht das eigentliche Problem ist, sondern vielmehr der Seitenfehler, welcher bedeutende Beträge annehmen kann. Der Betrag des Seitenfehlers Δz berechnet sich durch Geometrie exakt gemäss

$$\Delta z[\text{mm}] = SD[\text{m}] \cdot sw[\text{mrad}] \cdot \sin \kappa$$



Die Formeln zeigen, dass der Fehler mit zunehmender Distanz überproportional steigt (sw ist auch eine Funktion von SD) und dass Kugeln mit stark gekrümmter Flugbahn empfindlicher auf Verkanten reagieren. Die Formeln zeigen aber auch, dass namentlich die Höhe der Ziellinie (Visierhöhe) keinen Einfluss hat!

Ein kleiner Kantwinkel von bloss 2° ist für den Schützen kaum erkennbar, entscheidet aber auf weite Distanzen über Treffer oder Fehlschuss. Dem Verkanten kann man entgegenwirken durch einen geeigneten Schaft, der einen korrekten, „senkrechten“ Anschlag fördert (dabei sind Pistolengriffe nach Art eines Sturmgewehrs eher ungünstig), oder durch ein geeignetes Zielbild, etwa in einem Zielfernrohr ein Absehen mit ausgeprägten waagerechten Linien. Wer ganz sicher sein will, nicht zu verkanten, bringt an seiner Waffe am besten gleich eine

Wasserwaage an (Bild 5), welche ihm anzeigt, ob er verkantet oder nicht.

3. Schlussbemerkungen

Die Analyse der Auswirkungen von Zielfehlern bringt wichtige Hinweise für die Praxis: Sie lehrt, was beim Zielen wichtig und was nebensächlich ist, sie hilft den Ursachen systematischer Fehlschüsse auf den Grund zu gehen und sie gibt Hinweise zur Auswahl geeigneter Ziel- oder Hilfsmittel.

Der geneigte Schuss

Normalerweise berechnet man Flugbahnen in Bezug auf eine waagerechte Mündungslinie, d. h. das Ziel befindet sich auf Mündungshöhe. Auf der Jagd oder im taktischen Einsatz muss man aber oft steil auf- oder abwärts schießen: Welche Effekte sind dabei zu erwarten?

1. Theoretische Ueberlegungen

Wegen der einfachen und vollständigen Analysierbarkeit untersuchen wir die Problematik um den geneigten Schuss anhand des Vakuum-Modells. Die Formel für die Flughöhe über der waagerechten Mündungslinie (der x-Achse) lautet wie folgt:

$$y(x) = x \cdot \tan \alpha - g \cdot x^2 / (2 \cdot v_0^2 \cdot \cos^2(\alpha))$$

Im Folgenden sei der Schusswinkel α jeweils so gewählt, dass beim waagerechten Schuss auf eine Distanz SD ein Fleckschuss erfolge, also $y(SD) = 0$.

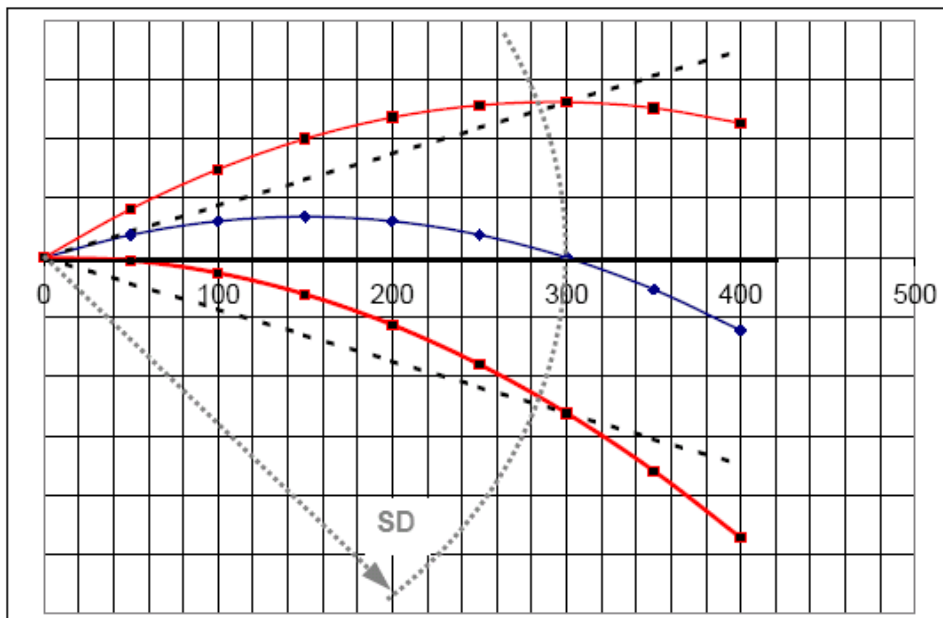


Bild 1

Zur Analyse der Situation, in welcher sich das Ziel dem Schützen unter einem Lagewinkel α präsentiert, wollen wir das Standard-Koordinatensystem beibehalten, d.h. die x-Achse sei immer noch die Waagerechte durch die Mündung. Wir führen aber neu eine Gerade der Steigung α ein, welche durch die Mündung und das Ziel führt, und bestimmen die „geneigte“ Flughöhe als Differenz von $y(x)$ zu dieser Geraden (s. Bild 1); die „geneigte“ Fleckschuss-Distanz befindet sich dann im Schnittpunkt der Flugbahn-Kurve mit der Ziel-Geraden.

Da der Schütze die Waffe nun entlang der geneigten Ziel-Geraden ausrichtet, müssen wir in der Vakuum-Formel den Term α ersetzen durch $\alpha + \alpha$. Weil der Weg ins Ziel ebenfalls entlang dieser geneigten Geraden abgetragen wird, ergibt sich die x-Koordinate zu $x = SD \cdot \cos(\alpha)$. Dies eingesetzt ergibt die Flughöhe der Kugel $y(x = \cos(\alpha) \cdot SD)$ über der x-Achse, von welcher zur Berechnung der „geneigten“ Flughöhe noch die Höhe des Ziels $SD \cdot \sin(\alpha)$ abzuziehen ist. Bild 1 zeigt blau die Flugbahn einer Kugel zur waagerechten Fleckschussdistanz $SD = 300$ m, rot die Flugbahnen für je positiven und negativen Lagewinkel desselben Betrages α sowie schwarz gestrichelt die zugehörigen Ziel-Geraden. Mit all dem erhalten wir eine ziemlich hässliche Formel, die hier nicht dargestellt sei, sich aber glücklicherweise unter der Annahme kleiner Schusswinkel α wie folgt vereinfachen lässt:

$$y' = \tan(\text{sw} + \alpha) \cdot \cos(\alpha) - \text{sw} - \sin(\alpha)$$

Die Winkel sw und α als Bogenmass rad in die Formel eingesetzt liefern y' als relative – auf die Schussdistanz bezogene – Flughöhe, ebenfalls im Bogenmass rad. Da die „geneigte“ Flughöhe nicht der Flughöhe beim standardmässigen waagerechten Schuss entspricht, muss man sie als Höhenfehler auffassen.

2. Berechnungen

SD [m]	vollständiges Vakuum-Modell		vereinfachtes Vakuum-Modell	
	Flughöhe [mm]		Flughöhe [mm]	
	positiv	negativ	positiv	negativ
50	1	1	1	1
100	5	5	5	5
150	11	11	11	11
200	19	19	20	19
250	30	30	31	30
300	44	44	45	44
350	59	59	61	59
400	77	77	80	77
450	98	98	102	97
500	120	120	126	120
550	145	145	152	145
600	173	173	182	172

Die praktischen Auswirkungen obiger abstrakter Überlegungen wollen wir anhand eines konkreten Beispiels herausfinden: Wir berechnen die absoluten Flughöhen für geneigte Schüsse zu den Lagewinkeln plus und minus 20° für eine Kugel mit 800 m/s Mündungsgeschwindigkeit. Die Resultate gemäss Tabelle 1 zeigen uns, dass sowohl beim aufwärts wie beim abwärts schießen ein Hochschuss desselben Betrages resultiert (exakt

Tabelle 1: Flughöhen bei $v_0 = 800 \text{ m/s}$ und Lagewinkel von 20°

beim vollständigen Modell, etwas verzerrt mit dem vereinfachten). Ist dies physikalisch plausibel? Ja, denn die Krümmung der Flugbahn beruht auf der Erdanziehung. Bei waagerechten Schüssen wirkt diese am stärksten krümmend, nämlich senkrecht zur Flugrichtung, bei geneigten Schüssen wird ihre Wirkung abgeschwächt. Deshalb zeigen geneigte Schüsse aufwärts wie abwärts eine gestrecktere Flugbahn, was einen Hochschuss bewirkt.

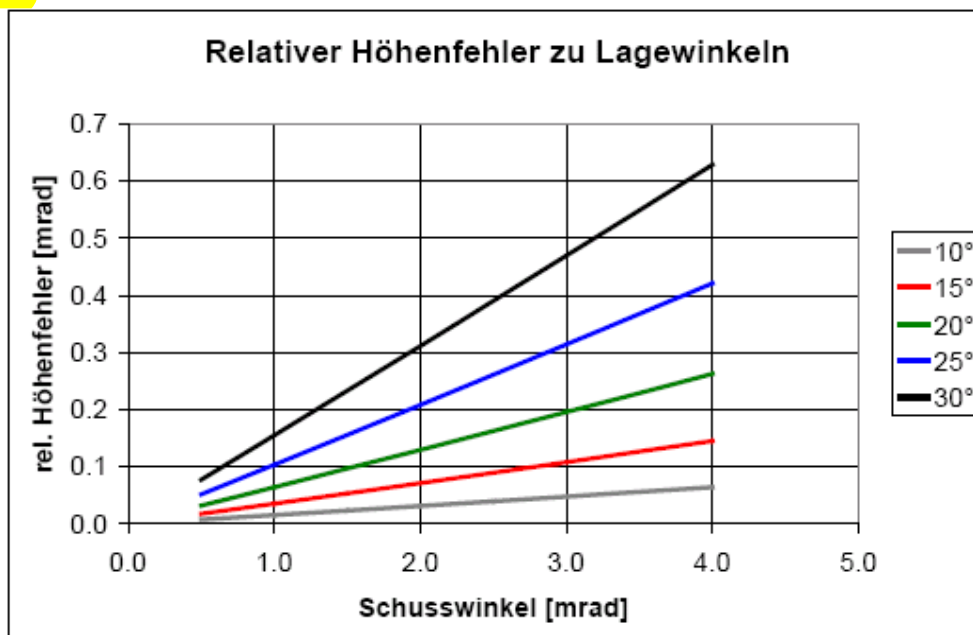


Bild 2

Die Frage des Schützen lautet jetzt natürlich, ob das für ihn überhaupt wichtig sei. In Bild 2 sehen wir den relativen Höhenfehler als Funktion von Schusswinkel und Lagewinkel dargestellt. Wenn ein Gewehrschütze an seinem Zielfernrohr 0.1 mrad/Klick verstellen kann, so ergibt ein Lagewinkel von 10° niemals einen korrigierbaren Fehler und geht ziemlich sicher auch in der Streuung unter. Ab Lagewinkeln von 15° jedoch können sich sehr wohl korrigierbare Höhenfehler ergeben, namentlich bei grossen Schusswinkeln (bei langsamen Geschossen und/oder grossen Distanzen).

3. Anderer Ansatz

Vergleichen wir in Bild 1 den Ort eines geneigten Fleckschusses (Schnittpunkt rote Kurve mit gestrichelter schwarzer Linie) mit dem eines waagerechten (Schnittpunkt blaue Kurve mit x-Achse), so scheint ersterer senkrecht über letzterem zu stehen, bzw. unter letzterem beim abwärts Schiessen. Aus dieser Beobachtung leiten wir folgende Formel ab:

$$\text{waagerechte Fleckschussdistanz} = \text{geneigte Fleckschussdistanz} \cdot \cos(\alpha)$$

Verglichen mit oben ist diese Formel phantastisch einfach, aber nutzen kann sie nur, wer mit einer distanzabhängigen Visierkorrektur arbeitet, also einem BDC (ballistic drop compensator) am Visier oder einer Visierkorrektur-Tabelle (die sich natürlich auf waagerechte Fleckschussdistanzen bezieht); solche Hilfsmittel sind im taktischen Bereich gang und gäbe. Für Schützen, die mit solchen Mitteln arbeiten, ist der Nutzen letzterer Formel gewaltig:

geneigte SD [m]	Lagewinkel						
	5°	10°	15°	20°	30°	40°	45°
100	100	98	97	94	87	77	71
150	149	148	145	141	130	115	106
200	199	197	193	188	173	153	141
250	249	246	241	235	217	192	177
300	299	295	290	282	260	230	212
350	349	345	338	329	303	268	248
400	398	394	386	376	346	307	283
450	448	443	435	423	390	345	318
500	498	492	483	470	433	383	354
550	548	542	531	517	476	421	389
600	598	591	580	564	520	460	424
650	648	640	628	611	563	498	460
700	697	689	676	658	606	536	495
750	747	739	724	705	650	575	531
800	797	788	773	752	693	613	566
850	847	837	821	799	736	651	601
900	897	886	869	846	780	690	637
950	946	936	918	893	823	728	672
1000	996	985	966	940	866	766	707
	waagerechte SD [m]						

Tabelle 2

1. Wer seinen Einsatz mit einer Landkarte oder einem Stadtplan plant, kann die Visiereinstellungen direkt aus der Karte ermitteln: Eine Karte ist eine Projektion des Geländes auf eine waagerechte Ebene und liefert somit genau die gewünschte Kosinus-Funktion! Wenn also z. B. ein Polizei-Präzisionsschütze die Fassade eines Hochhauses sichern muss, braucht er sich um die Stockwerke (und somit die effektiven Schussdistanzen) nicht zu kümmern: Er stellt sein Zielfernrohr einfach auf die Distanz, die er aus der Karte liest (oder waagerecht misst).
2. Wer über eine sehr feine distanzabhängige Visierkorrektur verfügt, kann die geneigte Schussdistanz messen und diese durch eine einfache Kosinus-Rechnung

oder mit Tabelle 2 in Bezug zu seinem Visier setzen, welches natürlich für waagerechte Schüsse geeicht ist. Dazu braucht der Schütze allerdings eine wirklich feine Visierkorrektur, welche Distanzschritte von 25 m oder noch weniger auflöst.

Für gewisse Anwender ist obige Formel also durchaus attraktiv, aber ist sie auch zuverlässig? – schliesslich wurde sie aus dem einfachen Vakuum-Modell gewonnen. Im Vakuum-Modell wird der Luftwiderstand vernachlässigt, welcher allerdings bloss verzögernd, nicht krümmend wirkt. Der krümmende Einfluss der Schwerkraft hingegen wird korrekt

modelliert und ohne Nachweis sei hier behauptet, dass sich die Formel durchaus mit brauchbarer Genauigkeit auf wirkliche Flugbahnen anwenden lässt.

4. Schlussfolgerungen

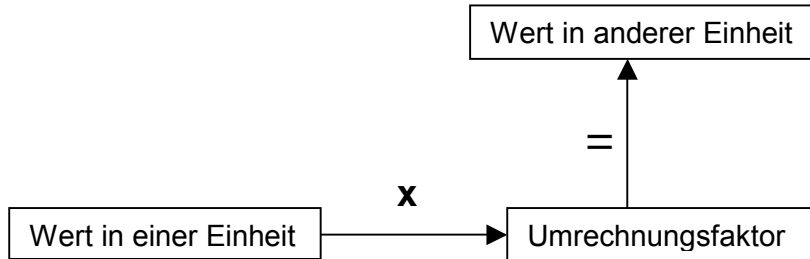
Die aussenballistische Standard-Annahme des waagerechten Schusses reicht sehr weit: Tabellen 1 und 2 genauso wie Bild 2 untermauern, dass Lagewinkel von unter 15° geringe Höhenfehler ergeben, die gar nicht korrigierbar sind und meistens sogar in der Streuung untergehen. Der Effekt des geneigten Schusses muss jedoch berücksichtigt werden, wenn man einen hochpräzisen Schuss anbringen will und

- subsonische Munition verwendet;
- sich in stark kupiertem Gelände befindet (urban oder gebirgig);
- auf sehr weite Entfernung schießt.

Jedoch Vorsicht: Diese Physik gilt zwar exakt, jedoch nur für Punktziele! Beim Schiessen auf dreidimensionale reale Ziele darf man nicht vergessen, dass der eigentliche Zielpunkt von einer (Körper-)Hülle umfasst wird. Wenn also beim geneigten Schuss immer ein Hochschuss resultiert und der Schütze folglich tief halten müsste, so muss ein Jäger beim steilen Schuss von oben allenfalls dennoch über die Schulter halten, um einen Blattschuss zu erzielen.

Anhang: Umrechnungstabellen

Die unten stehenden Tabellen erleichtern das Umrechnen der verschiedenen Einheiten. Die Umrechnung erfolgt nach folgendem Schema:



Sinnlose Faktoren, wie z.B. mm in miles, sind nicht angegeben (-).

Einheiten der Länge

	mm	cm	m	km	inch	foot	yard	mile
mm	1	0.1	0.001	-	0.03937	0.0033	0.0011	-
cm	10	1	0.01	-	0.3937	0.0328	0.0109	-
m	1000	100	1	0.001	39.3701	3.2808	1.0936	0.0006
km	-	-	1000	1	-	-	1093.6132	0.6215
inch	25.4	2.54	0.0254	-	1	0.0833	0.0278	-
foot	304.8	30.48	0.3048	0.0003048	12	1	0.3333	0.0002
yard	914.4	91.44	0.9144	0.0009	36	3	1	0.0006
mile	-	-	1609.344	1.609	-	5280	1760	1

Einheiten der Geschwindigkeit

	m/s	km/h	fps	mph
m/s	1	3.6	3.2808	2.2371
km/h	0.2778	1	0.9113	0.6215
fps	0.3048	1.0973	1	0.6818
mph	0.447	1.609	1.4667	1

fps = feet per second (Fuss pro Sekunde)
 mph = miles per hour (Meilen pro Stunde)

Einheiten der Masse

	g	kg	gr	oz	lb
g	1	0.001	15.4321	0.0357	0.0022
kg	1000	1	-	35.2113	2.2046
gr	0.0648	-	1	0.0023	1/7000
oz	28.3495	0.0284	437.5	1	1/16
lb	453.5924	0.4536	7000	16	1

gr = grain
 oz = ounce
 lb = pound

Einheiten der Fläche

	mm ²	cm ²	m ²	inch ²
mm ²	1	0.01	0.000001	0.00155
cm ²	100	1	0.0001	0.155
m ²	1000000	10000	1	1550.003
inch ²	645.16	6.4516	0.00065	1

Einheiten der Energie

	J	mkg	ft lb.wt
J	1	0.102	0.737561
mkg	9.81	1	7.25
ft lb.wt	1.35582	0.138	1

J = Joule
 mkg = meterkilogramm
 ft lb.wt = foot pound weight

Einheiten des Druckes

	N/m ²	kPa	bar	psi
N/m ²	1	0.001	0.00001	0.000145
kPa	1000	1	0.01	0.145
bar	100'000	100	1	14.5
psi	6894.76	6.89476	0.06895	1

psi = pound per square inch; auch lb.wt./in.2

Winkleinheiten

	MOA	grad	rad	MIL
MOA	1	1/60	0.00029	0.29*
grad	60	1	0.0174	17.3913*
rad	3439.2	57.3248	1	1000*
MIL	3.4483*	0.0575*	0.001*	1

Faktoren mit * gelten nur für kleine Winkel bis ca. 1grad.

Beispiel: In einem amerikanischen Katalog findet sich die Angabe der Mündungsgeschwindigkeit zu 2500 ft/sec. Was macht dies in m/s?
 Nach Tabelle „Einheiten der Geschwindigkeit“ rechnen wir
 2500 ft/sec x 0.3048 = 762 m/s.

