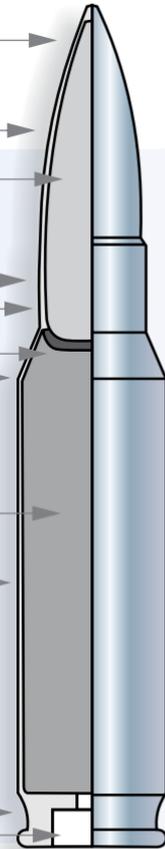


Grundlagen der Waffen- und Munitions- technik

- Geschoss
- Geschossmantel (Tombak)
- Geschosskern (Weichblei)
- Würgerille (mit Sieglack verklebt)
- Hülsenmund
- Geschossboden
- Hülsenschulter
- Treibladung
- Treibladungshülse
(Messing, Stahl)
- Auszieherrille, ggf. Auszieherrand
- Anzündhütchen
(mit Sieglack verklebt)



Waffentechnik: Grundlagen für Aus- und Weiterbildung

In kurzen Kapiteln bietet dieses Buch einen Einblick in Historie, Gegenwart und derzeitige Entwicklung der Waffentechnik. Enthalten sind sowohl die Grundzüge der Ballistik als auch Beschreibungen der gängigen Waffen- und Munitionsgattungen.

Grundlagen der Waffen- und Munitionstechnik unterstützt in der militärfachlichen Ausbildung in der Bundeswehr und in Polizeieinheiten. Das Nachschlagewerk bietet aber auch dem interessierten Kenner einmalige Einblicke.

Aus dem Inhalt:

- Ballistik
- Explosionsstoffe
- Rohrwaffen
- Lafetten und Anbauteile
- Begriffsbestimmungen bei Waffen
- Rohrwaffengebundene Munition
- Nicht-Rohrwaffengebundene Munition
- Flugkörper
- Luftwaffen- und Marineeigentümliche Munition

Oberstleutnant Dipl. Ing. Thomas Enke ist Berater für den Inspekteur des Heeres im Aufgabenbereich der munitionstechnischen und schießtechnischen Sicherheit. Seit 1982 ist er ausnahmslos in der Munitionstechnik auf wechselnden Dienstposten tätig und hat im Rahmen der Kampfmittelbeseitigung als Führer einer multinationalen Einsatzleitstelle an 7 Einsätzen in verschiedenen Einsatzländern, unter anderem Kosovo und Afghanistan, teilgenommen.

Thomas Enke

Grundlagen der Waffen- und Munitions- technik



Dieses E-Book enthält den Inhalt der gleichnamigen Druckausgabe, sodass folgender Zitiervorschlag verwendet werden kann:

Thomas Enke, Grundlagen der Waffen- und Munitionstechnik
Walhalla Fachverlag, Regensburg 2020

Hinweis: Unsere Werke sind stets bemüht, Sie nach bestem Wissen zu informieren. Alle Angaben in diesem Werk sind sorgfältig zusammengetragen und geprüft. Durch Neuerungen in der Gesetzgebung, Rechtsprechung sowie durch den Zeitablauf ergeben sich zwangsläufig Änderungen. Bitte haben Sie deshalb Verständnis dafür, dass wir für die Vollständigkeit und Richtigkeit des Inhalts keine Haftung übernehmen.

Bearbeitungsstand: April 2020

WALHALLA Digital:

Mit den WALHALLA E-Books bleiben Sie stets auf aktuellem Stand! Auf www.WALHALLA.de finden Sie unser komplettes E-Book- und App-Angebot. Klicken Sie doch mal rein!

Wir weisen darauf hin, dass Sie die gekauften E-Books nur für Ihren persönlichen Gebrauch nutzen dürfen. Eine entgeltliche oder unentgeltliche Weitergabe oder Leihe an Dritte ist nicht erlaubt. Auch das Einspeisen des E-Books in ein Netzwerk (z. B. Behörden-, Bibliotheksserver, Unternehmens-Intranet) ist nur erlaubt, wenn eine gesonderte Lizenzvereinbarung vorliegt.

Sollten Sie an einer Campus- oder Mehrplatzlizenz interessiert sein, wenden Sie sich bitte an den WALHALLA-E-Book-Service unter 0941 5684-0 oder walhalla@walhalla.de. Weitere Informationen finden Sie unter www.walhalla.de/b2b.

© Walhalla u. Praetoria Verlag GmbH & Co. KG, Regensburg
Dieses E-Book ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt.
Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Bestellnummer: 6215600

Schnellübersicht

Vorbemerkungen	17	
Kapitel 1: Ballistik	19	1
Kapitel 2: Explosivstoffe	83	2
Kapitel 3: Rohr Waffen	125	3
Kapitel 4: Lafetten und Anbauteile	181	4
Kapitel 5: Begriffsbestimmung bei Waffen	227	5
Kapitel 6: Rohrwaffengebundene Munition	253	6
Kapitel 7: Nicht-rohrwaffengebundene Munition	305	7
Kapitel 8: Flugkörper	331	8
Kapitel 9: Luftwaffen- und Marineeigentümliche Munition	349	9
Kapitel 10: (An-)Zündertechnik	369	10
Anhang	385	11
Stichwortverzeichnis	393	

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkungen

Kapitel 1: Ballistik	19
1.1 Innenballistik	20
1.1.1 Der Anzündvorgang	20
1.1.2 Der Gasdruckverlauf und die Beschleunigung des Geschosses	21
1.1.3 Rückstoß und rücklaufende Massen	26
1.1.4 Energiebilanz des Schusses	27
1.1.5 Rohrschwingungen	29
1.1.6 Verschleiß	30
1.2 Abgangballistik	31
1.3 Die Außenballistik der Geschosse	33
1.3.1 Geschossflugbahn im luftleeren Raum	34
1.3.1.1 Die Parabelgleichung	34
1.3.1.2 Schießen bei einer geneigten Ebene	36
1.3.1.3 Bestrichener und gedeckter Raum	37
1.3.2 Reale Geschossflugbahn	38
1.3.2.1 Beschreibung der Atmosphäre	38
1.3.2.2 Einflussfaktoren im luftgefüllten Raum, Schwerkraft und Luftwiderstand	40
1.3.2.3 Die Geschossstabilisierung und Folgsamkeit	43
1.3.3 Die reale Geschossflugbahn als Formel	47
1.4 Raketenballistik	49
1.4.1 Ballistische Abgrenzung	49
1.4.2 Abgangballistik der Rakete	50
1.4.3 Aktive Flugphase – Flug bis zum Brennschluss	51
1.4.4 Antriebsfreier Flug	52
1.5 Bombenabwurf	53

1.6	Zielballistik	54
1.6.1	Treffwahrscheinlichkeit	54
1.6.1.1	Einflüsse auf das Treffbild	54
1.6.1.2	Ermitteln des Haltepunktes	55
1.6.1.3	Einschießen von Handfeuerwaffen	57
1.6.1.4	Die Streuung	58
1.6.1.5	Mathematische Behandlung	58
1.6.2	Das Eindringen der Geschosse in das Ziel	60
1.6.2.1	Hartziele	61
1.6.2.2	Wundballistik	70
1.6.2.3	Schuss in Flüssigkeiten	80
Kapitel 2:	Explosivstoffe	83
2.1	Die Gefahrgutverordnung	85
2.2	Umsetzung von Explosivstoffen	88
2.2.1	Mechanismus der Explosion	88
2.2.2	Stabilität von Explosivstoffen	92
2.2.3	Exkurs: Detonation unter Wasser	93
2.2.4	Begriffsbestimmung Anzündung vs. Zündung	95
2.3	Sprengstoffe	96
2.3.1	Initialsprengstoffe	96
2.3.2	Militärische (Feststoff-)Sprengstoffe	98
2.3.3	Militärisch genutzte flüssige und gasförmige Sprengstoffe (Fuel Air Explosives – FAE)	101
2.3.4	Zivile Sprengstoffe (Gewerbliche Sprengstoffe)	103
2.3.4.1	Wetter- und Gesteinssprengstoffe	104
2.3.5	Selbstbaulaborate	107
2.4	Treibstoffe	107
2.4.1	Initialtreibstoffe (Anzündmittel)	108

2.4.2	Arbeitstreibstoffe	109
2.4.2.1	Feste Treibstoffe – Treibladungspulver	109
2.4.2.2	Flüssige und gasförmige Treibstoffe	113
2.4.3	Treibladungszusätze	114
2.4.4	Neuartige Spreng- und Treibstoffe	115
2.5	Pyrotechnische Sätze	117
2.5.1	Effekt-Sätze	118
2.5.2	Rauch- und Nebelsätze	120
2.5.3	Thermalbatterien	121
2.5.4	Sonstige pyrotechnische Stoffe	122
2.6	Brandstoffe	123
Kapitel 3: Rohrwaffen		125
3.1	Theoretischer Aufbau einer Rohrwappe	128
3.1.1	Das Waffenrohr	129
3.1.1.1	Glattrohre, gezogene Rohre und Polygonrohre	130
3.1.1.2	Vollrohre, Mehrlagenrohre und autofrettierte Rohre	133
3.1.1.3	Sonderformen der Waffenrohre	138
3.1.1.4	Der Ladungsraum	139
3.1.1.5	Der Übergangskegel	140
3.1.2	Bodenstück und Verschluss-Systeme	140
3.1.2.1	Stoffschlüssige Verschlüsse	141
3.1.2.2	Formschlüssige Verschlüsse	143
3.1.2.3	Kraftschlüssige Verschlüsse	147
3.1.3	Die Abfeuerung	149
3.1.3.1	Die Lunte und andere historische Anzündmöglichkeiten	150
3.1.3.2	Anzündung per Rad- oder Steinschloss	150
3.1.3.3	Mechanische Abfeuerung mit einem Schlagbolzen	151
3.1.3.4	Elektrische Abfeuerung	152
3.1.3.5	Sonstige Abfeuerungen	153

3.1.4	Anbauteile am Waffenrohr	154
3.1.4.1	Der Kompensator	154
3.1.4.2	Der Mündungsfeuerdämpfer	155
3.1.4.3	Die Mündungsbremse	156
3.1.4.4	Der Rückstoßverstärker	159
3.1.4.5	Das Gasableitrohr	161
3.1.4.6	Die Ausziehkralle	162
3.1.4.7	Das Manöverpatronengerät	163
3.1.4.8	Der Schalldämpfer	165
3.1.4.9	Der Rauchabsauger	167
3.1.4.10	Die Wärmeschutzhülle	169
3.2	Besondere Waffensysteme – rückstoßarme Waffen	169
3.2.1	Die Düsenkanone	170
3.2.2	Leichtgeschütze nach dem Kromuskit-Prinzip	171
3.2.3	Waffen mit Gegenmassen (Davis-Kanone)	172
3.3	Besondere Waffensysteme – Die Schienenkanone	174
3.4	Lebensdauer von Waffenrohren	175
3.5	Die unterschiedlichen Kaliberangaben	178
Kapitel 4:	Lafetten und Anbauteile	181
4.1	Die verschiedenen Lafetten	183
4.1.1	Unterlafetten	183
4.1.1.1	Stationäre Unterlafetten	183
4.1.1.2	Selbstfahrlafetten	185
4.1.2	Oberlafetten	186
4.2	Die Waffenlagerung	187
4.2.1	Verbindung von Ober- und Unterlafette	187
4.2.2	Die Rohrlagerung	189
4.2.3	Die Rohrwiege	191

4.2.4	Die Rohrbremse	193
4.2.5	Der Rohrvorholer	196
4.2.6	Der Ausgleicher	197
4.2.7	Ladeeinrichtungen	199
4.2.8	Fremdantriebe	204
4.2.9	Kühlung von Waffensystemen	206
4.3	Zielen und Richten	207
4.3.1	Mechanische Visiere	207
4.3.1.1	Die Visiergeometrie	207
4.3.1.2	Visierformen	208
4.3.2	Optische Visiere	210
4.3.2.1	Das Zielfernrohr	210
4.3.2.2	Das Reflex-Visier	214
4.3.3	Zielhilfsmittel	216
4.3.3.1	Aktive Systeme und halbaktive Systeme	216
4.3.3.2	Passive Systeme	217
4.3.4	Entfernungsmesser	219
4.3.4.1	Optische Entfernungsmesser	220
4.3.4.2	Radar-Entfernungsmesser	222
4.3.4.3	Akustische Entfernungsmesser	222
4.3.5	Richtmittel	222
4.3.6	Richtantriebe	223
4.3.7	Stabilisieren und Nachführen von Waffenanlagen	224
Kapitel 5: Begriffsbestimmung bei Waffen		227
5.1	Infanteriewaffen und Waffen bis zu einem Kaliber von unter 20 mm	228
5.1.1	Faustfeuerwaffen	228
5.1.2	Handfeuerwaffen	231
5.1.3	Maschinengewehre	235
5.1.4	Schrotflinten	237

5.2.	Maschinenkanonen	239
5.2.1	Maschinenkanonen mit Eigenantrieb	240
5.2.2	Maschinenkanonen mit Fremdantrieb	241
5.3	Großkalibrige Kanonen und Haubitzen	244
5.4	Mörser	246
5.5	Rückstoßarme Waffen	247
5.6	Druckluft- und Federdruckwaffen	248
5.6.1	Druckluftbetriebene Waffen	248
5.6.2	Federdruckwaffen	250
5.7	Sonstige Waffen	251
5.7.1	Schallwaffen	251
Kapitel 6:	Rohrwaffengebundene Munition	253
6.1	Munition für Infanteriewaffen und Waffen bis zu einem Kaliber von 20 mm	255
6.1.1	Gefechtsmunition für Infanteriewaffen	255
6.1.1.1	Internationale Abkommen	255
6.1.1.2	Technischer Aufbau	256
6.1.2	Übungsmunition für Infanteriewaffen	260
6.1.3	Manövermunition für Infanteriewaffen	261
6.1.4	Exerziermunition für Infanteriewaffen	261
6.1.5	Prüfmunition für Infanteriewaffen	262
6.1.6	Schrotmunition für Flinten	262
6.2	Munition für Maschinenkanonen	263
6.2.1	Spreng- und Splittermunition für Maschinenkanonen	263
6.2.2	Panzerbrechende Munition für Maschinenkanonen	266
6.2.3	Übungsmunition für Maschinenkanonen	268
6.2.4	Manövermunition für Maschinenkanonen	268
6.3	Munition für Panzerkanonen	269
6.3.1	Sprengmunition für Panzerkanonen	271
6.3.2	Hohlladungsmunition für Panzerkanonen	272

6.3.3	Quetschkopfmunition für Panzerkanonen	277
6.3.4	Panzerbrechende Munition für Panzerkanonen	278
6.3.4.1	Panzerbrechendes Geschoss mit erhöhtem zusätzlichen Effekt – Penetrator with Enhanced Lateral Effect (PELE)	279
6.3.5	Übungsmunition für Panzerkanonen	279
6.3.6	Manövermunition für Panzerkanonen	280
6.4.	Munition für Rohrartilleriegeschütze	280
6.4.1	Spreng- und Spreng/Splittermunition für Rohrartillerie ...	283
6.4.2	Panzerabwehrmunition für Rohrartillerie	284
6.4.3	Cargo-(Ausstoß-)Munition für Rohrartillerie	285
6.4.3.1	Leuchtmunition für Rohrartillerie	285
6.4.3.2	Nebelmunition für Rohrartillerie	287
6.4.3.3	Bombletmunition für Rohrartillerie	288
6.4.3.4	Suchzündermunition für Rohrartillerie	288
6.4.3.5	Elektronische Kampfführung durch Rohrwaffenmunition	289
6.4.3.6	Brand- und Kampfstoffmunition für Rohrartillerie	290
6.4.3.7	Nukleare Munition für Rohrartillerie	290
6.4.4	Übungsmunition für Rohrartillerie	290
6.4.5	Exerziermunition für Rohrartillerie	291
6.4.6	Treibladungssysteme für Rohrartillerie	291
6.4.7	Treibladungsanzünder für Rohrartillerie	294
6.5	Munition für Mörser	294
6.6	Munition für rückstoßarme Waffen	295
6.7	Munition für Granatwaffen (Granatpistolen und Granatmaschinenwaffen)	296
6.8	Aufsteckmunition (Gewehrgranaten und sonstige überkalibrige Munition) für Rohrwaffen	298
6.8.1	Adapter für Handgranaten	300

6.9	Munition für Signalpistolen	301
6.10	Nicht eindeutig zuordbare Munition	303
6.10.1	Die Handflammpatrone	303
Kapitel 7: Nicht-rohrwaffengebundene Munition		305
7.1	Handgranaten	306
7.1.1	Sprenghandgranaten	307
7.1.2	Splitterhandgranaten	307
7.1.3	Handgranaten mit Inhaltsstoffen	308
7.1.4	Handgranaten mit Schall- und Lichteffekten (Flash-Handgranaten)	310
7.1.5	Panzerabwehrhandgranaten	310
7.1.6	Übungshandgranaten	311
7.2	Landminen	312
7.2.1	Schützenabwehrminen (Anti-Personen-Minen)	313
7.2.2	Panzerabwehrminen (Anti-Fahrzeug-Minen)	317
7.2.3	Anti-Hubschrauber-Minen	320
7.2.4	Alarmkörper	320
7.2.5	Übungsminen	321
7.3	Zünd- und Sprengmittel	321
7.3.1	Zündmittel	321
7.3.2	Sprengmittel	325
7.3.2.1	Sprengkörper	325
7.3.2.2	Sprengschnur	326
7.3.2.3	Zündverstärker	326
7.3.3	Anzündmittel	327
7.3.3.1	Anzündschnuranzünder	327
7.3.3.2	Anzündschnüre	327
7.3.4	Sprengkapselzünder	328
7.3.5	Shock Tube	328

Kapitel 8: Flugkörper	331
8.1 Prinzipieller Aufbau der Flugkörper	333
8.1.1 Die Triebwerke	333
8.1.1.1 Die Feststofftriebwerke	333
8.1.1.2 Die Flüssigkeitstriebwerke	335
8.1.1.3 Sonstige Triebwerksarten	338
8.2 Gefechtsköpfe	339
8.3 Starteinrichtungen	343
8.3.1 Startrohre und Startschienen	343
8.3.2 Start ohne Hilfsmittel	344
8.4 Lenkeinrichtungen	344
8.4.1 Kommandolenkungen	345
8.4.2 Halbautonome Lenksysteme	346
8.4.3 Autonome Lenksysteme	346
8.5 Lenkverfahren	347
Kapitel 9: Luftwaffen- und Marineeigentümliche Munition	349
9.1 Täuschkörper	350
9.1.1 Düppel (Chaffs)	350
9.1.2 Infrarot-Täuschkörper (Flares)	352
9.1.3 Bold (U-Boot)	352
9.1.4 Nebelmittel	353
9.2 Abwurfmunition (Bomben)	353
9.2.1 Spreng- und Splitterbomben	356
9.2.2 Bomben mit Inhaltsstoffen	357
9.2.2.1 Leuchtbomben	358
9.2.2.2 Markierer	358
9.2.2.3 Blitzlichtbomben	358
9.2.2.4 Nebelbomben	359

9.2.2.5	Brandbomben	359
9.2.2.6	Streubomben	360
9.2.3.7	Übungsbomben	362
9.3	Marineeigentümliche Munition	363
9.3.1	Seeminen	363
9.3.2	Torpedos	365
Kapitel 10: (An-)Zündertechnik		369
10.1	Sicherheiten bei einem Zünder	374
10.1.1	Forderungen an die Sicherheit eines Zünders	374
10.1.2	Lösungen für die Zündersicherheit	376
10.2	Elemente der Zündertechnik	378
Anhang		385
Anhang A1: Die wichtigsten Abkürzungen		386
Anhang A2: Symbole auf der Munition und/oder deren Verpackung		389
Anhang A3: Die Farbkennzeichnung der Munition in der NATO		390
Anhang A4: Testvorgaben für insensitive Munition		392
Stichwortverzeichnis		393

Vorbemerkungen

Dieses Buch ist ein Nachschlagewerk ohne großen wissenschaftlichen Anspruch. Es erklärt kurz und knapp die Zusammenhänge in der Waffen- sowie Munitionstechnik, ohne dabei auf die mathematische und physikalische Herleitung einzugehen. Denn dies würde bei dem Umfang der Themen bei Weitem den Rahmen des Buches sprengen und vielen Interessierten die Lust am Lesen nehmen.

Hier sollen in kurzen Kapiteln Historie, Gegenwart und derzeitige Entwicklungen aufgezeigt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zum einen Forschung und Entwicklung im Bereich der Waffen- und Munitionstechnik ein rasantes Tempo vorgelegt haben, zum anderen aber auch Kurzzeitereignisse beschrieben werden, die trotz der umfangreichen Forschungen bis heute nur durch Näherungen mathematisch in den Griff zu bekommen sind. Auch braucht eine gute Waffenentwicklung von der ersten Idee bis zur ausgereiften Waffe mehrere Jahrzehnte. Ein Umstand, den viele Armeen in den vergangenen Jahren schmerzlich zu spüren bekamen, weil Waffen und Munition nicht in den gewünschten Rahmen funktionierten.

Einige Definitionen werden Anlass zu Diskussionen geben, da die Begriffe sich in den vergangenen Jahren teilweise mehrfach geändert haben. Als Beispiel kann hier der Mörser, auch Granatwerfer oder Minenwerfer genannt werden. Der Mörser ist keine Steilfeuerwaffe, muss nicht unbedingt ein Vorderlader sein und kann auch auf einer Kanonenlafette eingesetzt werden. Ein zweites Beispiel findet man bei den heutigen Panzerhaubitzen in Abgrenzungen zu den Kanonen. Eine frühere Unterscheidung nach der Rohrlänge, Flach- oder Steilfeuer sowie in der ballistischen Form der Geschosse existiert nicht mehr. Hier müssen also neue Definitionen gefunden werden.

Die Probleme mit der Terminologie wurden bei dem Beispiel „Mörser“ bereits kurz angesprochen. Im gesamten Buch wird die Terminologie genutzt, wie sie innerhalb der Bundeswehr durch die Publikation in Vorschriften, Regelungen und Munitionsmerkbältern vorgegeben ist. Dies trifft daher nicht immer den umgangssprachlichen Gebrauch, führt aber auch zu eindeutigen Begriffen.

Mit betrachtet werden muss die Waffen- und Munitionsentwicklung der vergangenen Jahrzehnte. Neben der Schienenkanone wurden Laserwaffen entwickelt, es finden sich heute dank der Elektronik

Vorbemerkungen

miniaturisierte Zeitzünder, die beim Abschuss mit dem Laser-Entfernungsmesser der Waffe kommunizieren und lassen sich Suchzünder herstellen, die Abbilder der zu bekämpfenden, Ziele im Infrarot-, Radar- und sichtbaren Bereich gespeichert haben. Dies wiederum erfordert neuartige Abwehrmöglichkeiten gegen diese Munition, die ebenfalls beschrieben werden müssen. Das alles verlangt an und für sich nach einer zweiten erweiterten Auflage – daher bitte ich um Geduld.

Zuletzt muss auch die asymmetrische Waffen- und Munitionsentwicklung angesprochen werden. Auch hier gibt es durch die globale Vernetzung der Informationswege nicht nur Nachbauten bekannter Waffen- und Munitionssysteme, sondern auch ggf. dem regionalen Umfeld und der Rohstofflage entsprechend eigenständige Entwicklungen, die zumindest eine Erwähnung wert sind. Ein Aufschlagzünder oder ein Sturmgewehr „Made in Germany“ kann heute durchaus auch eine Kopie aus dem Mittleren Osten oder aus Afrika sein.

Weitgehend wurde auf Bilder verzichtet. Dies ist zum einen dem Copyright geschuldet, zum anderen lassen sich anhand von einfachen Skizzen der Aufbau und die Funktionsweise von Waffen und Munition leichter beschreiben.

Aber ein solches Buch schreibt sich nicht allein. Meine Dank vor allem den Kameraden aus der Feuerwerkerei, die mit Rat und Tat sowie unermüdlicher Fehlersuche mitgeholfen haben, dieses Buch zu erstellen. „Bei strenger Pflicht – getreu und schlicht!“

Ein weiterer kräftiger Dank an meine Frau, die die Hauptlast der Suche nach Rechtschreib- und Verständnisfehlern getragen hat.

Strausberg, im Jahr 2020
Thomas Enke

Kapitel 1: Ballistik

1.1	Innenballistik	20
1.1.1	Der Anzündvorgang	20
1.1.2	Der Gasdruckverlauf und die Beschleunigung des Geschosses	21
1.1.3	Rückstoß und rücklaufende Massen	26
1.1.4	Energiebilanz des Schusses	27
1.1.5	Rohrschwingungen	29
1.1.6	Verschleiß	30
1.2	Abgangsballistik	31
1.3	Die Außenballistik der Geschosse	33
1.3.1	Geschossflugbahn im luftleeren Raum	34
1.3.2	Reale Geschossflugbahn	38
1.3.3	Die reale Geschossflugbahn als Formel	47
1.4	Raketenballistik	49
1.4.1	Ballistische Abgrenzung	49
1.4.2	Abgangsballistik der Rakete	50
1.4.3	Aktive Flugphase – Flug bis zum Brennschluss	51
1.4.4	Antriebsfreier Flug	52
1.5	Bombenabwurf	53
1.6	Zielballistik	54
1.6.1	Treffwahrscheinlichkeit	54
1.6.2	Das Eindringen der Geschosse in das Ziel	60

Kapitel 1: Ballistik

1

Die Lehre vom Schuss lässt sich für Rohrmaschinen in insgesamt vier Abschnitte unterteilen. Mit Anzünden der Treibladung, dem Brechen des Schusses beginnt der Ablauf im Maschinenrohr. Mit Verlassen des Rohres folgt die kurze Phase der Abgangsbalistik, gefolgt von der Außenballistik, dem reinen Flug in Richtung Ziel. Spätestens mit Auftreffen auf das Ziel wird der Vorgang durch die Zielballistik abgeschlossen. Die einzelnen Abschnitte können – je nach Waffe und Munition – fließend sein.

Bei der Raketenballistik entfällt die Innenballistik weitgehend. Auch hier gibt es fließende Übergänge, so z. B. bei Flugkörpern, die aus Maschinenrohren verschossen werden können.¹

1.1 Innenballistik

1.1.1 Der Anzündvorgang

Die Vorgänge beim Schuss beginnen mit dem Anzünden der Treibladung. Bei frühen Entwicklungen des Mittelalters wurden Lunte oder die Funken eines Steinschlusses genutzt. Diese Verfahren waren zum einen unzuverlässig (Feuchtigkeit) und zum anderen zeitlich nicht festzulegen. Hinzu kamen bei den Pistolen und Gewehren eine Blendung durch die Stichflamme der entzündeten Treibladung sowie eine Rauchentwicklung, die dem Schützen kurzfristig die Sicht nahm. Je nach Länge der Lunte konnten die Anzündvorgänge mehrere Sekunden kürzer oder länger dauern, ein nicht haltbarer Vorgang, wenn das zu treffende Ziel in Bewegung war. Heute wird der Anzündvorgang mechanisch per Schlag oder elektrisch ausgelöst. Der Anzündvorgang sollte bei voll brauchbarer² Munition von Handwaffen innerhalb einer Millisekunde, bei größeren Kalibern im Bereich von zwanzig bis dreißig Millisekunden beginnen. Hier wird eben diese Zeitspanne benötigt, damit die chemische Reaktion anlaufen und entsprechend Wärmeenergie erzeugt werden kann. Diese Zeitspanne wird Anzündzeitverzug genannt. Nicht berücksichtigt wird hierbei der Zeitverzug, der ggf. durch die Waffenanlage bedingt ist, weil der Richtvorgang noch nicht abgeschlossen ist oder noch Daten an das Geschoss übermittelt werden müssen.

¹ Mehr dazu im Kapitel 1.4.2

² Voll brauchbar heißt, dass diese Munition ohne Einschränkungen verwendet werden kann. In der Bundeswehr wird diese Munition mit dem Zustandskode „A“ gekennzeichnet.

Die Stichflamme aus dem Treibladungsanzünder hat die Treibladung zuverlässig und vollständig zu entfachen. Geschieht dies nicht, können eine Spätzündung sowie ein Versager die Folge sein. Eine Spätzündung kann auch noch Minuten nach Beginn des Anzündvorganges auftreten und ist vor allem abhängig von der Temperatur innerhalb der Waffe und von der Feuchte des Treibladungspulvers. Daher sind bei Nichtauslösung eines Schusses vor einem Entladen der Waffe unbedingt Wartezeiten einzuhalten, die je nach Waffe bis zu 30 Minuten dauern können. Bei einem zu frühen Entladen können bei Patronenmunition die unverkammerten Hülsen aufreißen und sich Splitter bilden, bei Artilleriegeschützen mit Beultreibladungen kann es nach dem Öffnen des Verschlusses zu Stichflammen kommen, die in den Kampfraum zurückschlagen.

1.1.2 Der Gasdruckverlauf und die Beschleunigung des Geschosses

Der Gasdruckverlauf ist von verschiedenen Faktoren abhängig:

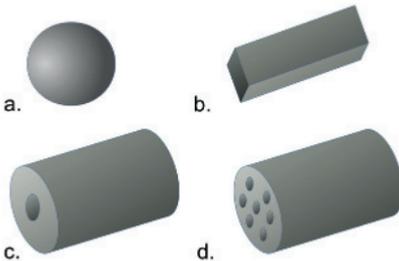
- Form und Zusammensetzung des Treibladungspulvers,
- Temperatur im Ladungsraum,
- Temperatur des Treibladungspulvers,
- Patronenmunition oder getrennt zu ladende Munition,
- Waffenrohr mit Zügen und Feldern oder Glattrohr,
- Reibung im Waffenrohr und
- Rohrlänge.

Bei einer Verbrennung im Ladungsraum oder der Patronenhülse verbrennt das Treibladungspulver immer nur an der Oberfläche, dies kann für eine geometrische Gestaltung des Pulvers genutzt und so dem Pulver Verbrennungseigenschaften zugeschrieben werden. Treibladungspulver kann daher als degressives, neutrales oder progressives Treibladungspulver hergestellt und genutzt werden.

- Degressives Pulver wird in Blättchen- oder Kugelform gepresst. Hier nimmt die Oberfläche des Pulvers mit zunehmendem Abbrand ab. Damit verringert sich über die Zeit die Produktion an Treibgasen. Pistolen und Mörser haben relativ kurze Waffenrohre, hier ist ein schneller Aufbau des Gasdruckes gewünscht. Auch sollen möglichst wenig unverbrannte Treibladungsreste vor der Mündung abbrennen, um den Schützen nicht zu blenden.³

³ Doch Vorsicht bei dem ähnlich aussehenden Treibladungspulver für Manöverpatronen. Dieses Pulver ist für einen sehr schnellen, fast aggressiven Abbrand mit hohem Aufkommen an Treibladungsgasen konstruiert, da hier das Geschoss für einen Druckaufbau fehlt und trotzdem die Waffenfunktionen erhalten bleiben sollen.

- Neutrales Pulver hat die Form einer langen Makkaroni. Von außen nimmt die brennende Oberfläche ab, von innen dagegen zu. Somit bleibt die Abbrandfläche gleich. Dies führt zu einer gleichmäßigen Beschleunigung, wie sie z. B. bei Hohlladungspatronen und auch Gewehren erwünscht ist.
- Progressives Pulver, zumeist ein Zylinder mit 7 bis 32 axialen Bohrungen, führt über die Brennzeit zu einer zunehmenden Gasproduktion, da die Oberfläche zunimmt. Dies ist bei sehr langen Waffenrohren gewünscht, da hier das aufzufüllende Volumen hinter dem Geschoss sehr groß wird, und bei sehr hohen Mündungsgeschwindigkeiten z. B. für die flügelstabilisierte KE⁴-Munition.



- a. Kugelförmiges, degressives Pulver
- b. Degressives Blättchenpulver
- c. Neutrales Einloch-Röhrenpulver
- d. Progressives 7-Loch-Röhrenpulver

Bild 1.1: Kornarten beim Treibladungspulver

Vor dem Schuss wird das Treibladungspulver entweder in der Patronenhülse oder bei getrennt zu ladender Munition in den Ladungsraum eingebracht. Das Volumen ist in beiden Fällen so definiert, dass es die maximal zulässige Treibladung aufnehmen kann, aber auch bei geringeren Pulvermengen eine sichere Anzündung gewährleistet ist. Dies ist vor allem bei Artilleriemunition mit stark wechselnden Ladungsmengen wichtig. Kleine Ladungsräume führen bei konstanter Pulvermenge schnell zu höheren Drücken und Verbrennungsgeschwindigkeiten als größere Ladungsräume. Daher ist es vor allem bei getrennt zu ladender Munition wichtig, ein Geschoss immer möglichst gleichmäßig anzusetzen, da es ansonsten zu unterschiedlichen Verbrennungsgeschwindigkeiten und damit zu Unter-

⁴ Die Abkürzungen werden im Anhang erläutert.

schieden in der Mündungsgeschwindigkeit kommt. Dies hat dann Auswirkungen auf die Treffgenauigkeit.

Gerade bei getrennt zu ladender Munition wird das Metall des Ladungsraumes durch die aggressiven Pulvergase und die hohen Temperaturen stark belastet. Dies führt im Laufe der Nutzung zu netzartigen Ausbrüchen des Materials und somit zu einer Vergrößerung des Ladungsraumes. Damit ergibt sich für stark beanspruchte Waffen eine Leistungsminderung, die neben einer Materialschwächung berücksichtigt werden muss. Auch im Übergangsbereich zwischen Ladungsraum und Waffenrohr kommt es im Laufe der Nutzung zu Auswaschungen und bei sehr starker Beanspruchung zu Ausbrüchen, die ggf. das Waffenrohr schädigen oder auch zu Rohrzerlegern führen können.

Die Verbrennungsgeschwindigkeit des Treibladungspulvers ist besonders vom Druck im Ladungsraum abhängig. Während Treibladungspulver – mit Ausnahme von Schwarzpulver – unverkammert recht harmlos abbrennt, steigt in einem abgeschlossenen Ladungsraum der Druck schnell stark an. Wachsender Druck im Ladungsraum führt dann zu einer erhöhten Gasproduktion und dies zu einer weiteren Druckerhöhung.⁵ Die Verbrennungsgeschwindigkeit steigt dabei linear zur Druckerhöhung an.⁶ Als Faustformel gilt, dass ein Gramm Schwarzpulver 0,33 l Gas erzeugt, wohingegen modernes Treibladungspulver eine Ausbeute von 0,75 l Gas hat. Je höher der Druck, umso höher steigt die Verbrennungsgeschwindigkeit an. Eine natürliche Grenze setzt hier die Schallgeschwindigkeit in den heißen und stark komprimierten Treibladungsgasen. Bei ca. 2.500 m/s ist die maximale Verbrennungsgeschwindigkeit erreicht, somit lassen sich Geschosse mit herkömmlichen Treibladungspulvern nur theoretisch bis auf diese Geschwindigkeit beschleunigen. In der Praxis dürfte die Grenze bei 2.000 m/s erreicht sein, da durch Wärmeverluste, Einbußen im Rohr sowie Undichtigkeiten zwischen Geschoss und Waffenrohr Verluste auftreten.

Bei Patronenmunition muss das Geschoss vor der ersten Bewegung im Waffenrohr den Auszieh Widerstand aus der Patronenhülse überwinden. Bei kleineren Kalibern werden die Patronenhülsen zumeist werkseitig an die Geschosse angewürgt, um das Treibladungspulver

⁵ Siehe J. P. Großkreutz, Grundlagen der Ballistik – Waffentechnik – Munitionstechnik, Technische Schule für Landsysteme, Aachen 2017.

⁶ Eine einfache Abschätzung ergibt das Verbrennungsgesetz von Krupp und Schmitz aus dem Jahr 1913: $dy/dt = f(y) \cdot p$ mit den Variablen y für die Verbrennungsgeschwindigkeit, t für die Zeit und p für den Druck. Diese Abschätzung gilt für Drücke bis etwa 4000 hPa.

vor Feuchtigkeit und dem Herausrieseln zu schützen. Bei größeren Kalibern werden die Geschosse nur vor dem Verschuss auf die Hülse aufgesteckt. Hier dient die Hülse mehr zur Abdichtung und Kühlung des Ladungsraumes. Das Überwinden des Auszieh Widerstandes lässt sich in dem Diagramm des Gasdruckverlaufes als erste Spitze wiederfinden. Danach erfolgt eine Freiflugphase, wobei das Geschoss den Abstand zwischen Hülsenmund und dem eigentlichen Waffenrohr mit den Zügen und Feldern überwindet. Das Einpressen in die Züge und Felder führt dann zu einer weiteren Druckspitze. Anschließend steigt der Druck bis zu einem Maximum recht gleichmäßig. Ein Maximum ist dann erreicht, wenn die Gasproduktion das freiwerdende Volumen im Waffenrohr nicht mehr ausgleichen kann, da das Geschoss sich mehr und mehr – dabei schneller werdend in Richtung der Rohrmündung – bewegt.

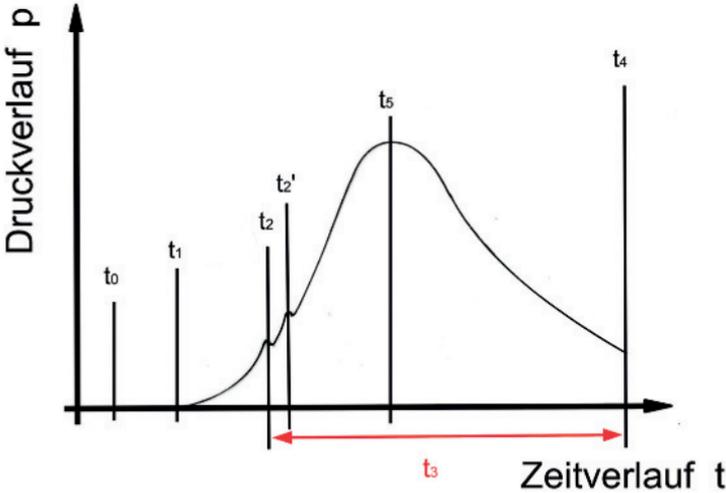


Bild 1.2: Zeit- und Druckverlauf im Waffenrohr bei Nutzung einer Patrone

Legende:

- t_0 : Einschlagen des Schlagbolzens auf dem Treibladungsanzünder
- t_1 : Reaktion im Treibladungsanzünder beginnt
- t_2 : Das Geschoss überwindet den Auszieh Widerstand aus der Patronenhülse
- t_2' : Das Geschoss wird in die Züge und Felder gepresst
- t_3 : Das Geschoss bewegt sich vom Hülsenmund bis zur Waffenmündung (die Geschosslaufzeit)
- t_4 : Das Geschoss hat die Waffenrohrmündung erreicht
- t_5 : Maximaler Gasdruck
- $t_4 - t_0$: Schusszeit

Das Waffenrohr muss in der Lage sein, mindestens den maximalen Gasdruck auszuhalten. In Deutschland unterliegen alle Waffen der sogenannten Beschusspflicht. In der Regel wird dabei eine Waffe mit einer 30%ig erhöhten Treibladung beschossen. Wenn die Waffe diese Prüfung besteht, wird sie mit einem Beschusszeichen gestempelt. Die ersten Beschusszeichen waren in der Historie die Zeichen der Büchsenmacher als Qualitätsmerkmal. Heute überwachen die Beschussämter die Qualität der Waffe. Die Zeichen der Beschussämter sind im „Gesetz über die Prüfung und Zulassung von Feuerwaffen, Böllern, Geräten, bei denen zum Antrieb Munition verwendet wird, sowie von Munition und sonstigen Waffen“ festgelegt.

Bei getrennt zu ladender Munition wird das Geschoss von Hand oder über eine Ladeautomatik direkt in die Züge und Felder eingepresst. Der Einpressdruck muss ausreichen, das Geschoss auch bei höheren Richtwinkeln zuverlässig im Waffenrohr zu halten, da ansonsten keine Hülse zum Abstützen des Geschosses vorhanden ist. Rückfaller in den Ladungsraum müssen auf jeden Fall vermieden werden, da sonst Treibladungsgase an dem Geschoss vorbeiströmen könnten. Ein Kurzschuss, ggf. ein im Rohr steckenbleibendes Geschoss wären die Folgen.

Im Rohr erfolgt in der Regel eine kontinuierliche Beschleunigung des Geschosses, in der Regel nur abhängig von der Art des Treibladungspulvers. Kleinere Mengen des Gasdruckes gehen verloren, zum einen, weil die Abdichtung durch die Führungsbänder nicht vollständig ist, zum anderen bei vielen Waffen für das Öffnen (Entriegeln) und Zurückschieben des Verschlusses sowie für das Füllen des Rauchabsaugers und weiterer Hilfsantriebe. Wenn die Ladetätigkeiten durch den Gasdruck ausgeführt werden, spricht man vom sogenannten Gasdrucklader.

Der Verlauf der Gasdruckkurve ist somit von verschiedenen Faktoren abhängig:

- Volumen des Ladungsraumes im Verhältnis zum Volumen des Treibladungspulvers,
- Chemische Zusammensetzung des Treibladungspulvers,
- Geometrie des Treibladungspulvers,
- Pulvertemperatur und -feuchte,
- Anzündverhalten,
- Waffenrohrlänge,
- Kaliber und,
- Masse des Geschosses.

Eine vereinfachte Formel zur Beschreibung der Gasdruckkurve gibt es leider nicht. Dass aber alle Gasdruck- und Geschwindigkeitsverläufe Ähnlichkeiten aufweisen, war bereits vor mehr als 100 Jahren bekannt. Der Österreicher Willy Heydenreich untersuchte an verschiedenen Waffen den Rohrrücklauf und nahm an, dass das Gasdruckverhältnis des maximalen Gasdrucks p_m zu dem Gasdruck an einer beliebigen Stelle im Waffenrohr immer eine Funktion des Geschossweges sei, wenn man den Ort des maximalen Gasdrucks x_m im Waffenrohr kennen würde. Das führt zu folgender Gleichung:

$$p/p_m = f(x/x_m)$$

Unter der Berücksichtigung verschiedener Vereinfachungen über die Verteilung der Treibladungsgase im Waffenrohr, der Art des Treibladungspulvers und der Ausnutzung der im Treibladungspulver enthaltenen Energie schuf Heydenreich ein Tabellenwerk⁷, welches in den darauffolgenden Jahren mehrfach überprüft und sich als erste Abschätzung für die Geschossgeschwindigkeit und den Druckverlauf in Waffenrohr als brauchbar erwiesen hat.

1.1.3 Rückstoß und rücklaufende Massen

Während das Geschoss durch die heißen Treibladungsgase in Richtung der Mündung bewegt wird, drücken die Gasschwaden gleichzeitig auf den Verschlussboden. Der Schütze merkt dies durch einen Schlag gegen die Hand oder die Schulter. Verantwortlich hierfür ist der Impulserhaltungssatz, der besagt, dass das Produkt aus Masse m_v und Geschwindigkeit der vorlaufenden Masse v_v (= Geschossmasse und Geschossgeschwindigkeit, sowie die Hälfte der Treibladungsgase und deren Geschwindigkeit) gleich sein muss dem Produkt aus Masse m_r und Geschwindigkeit v_r der zurücklaufenden Massen (= alle Waffenteile und deren Rücklaufgeschwindigkeit und die andere Hälfte der Treibladungsgase und deren Geschwindigkeit):

$$m_v \cdot v_v = m_r \cdot v_r$$

Überschlagsmäßig lässt sich so für einen 4 kg schweren Karabiner im Kaliber 7,62 mm x 51⁸ der Rückstoß auf den Schützen recht einfach berechnen. Bei einer Geschossmasse von 9,45 g für das Geschoss der

⁷ Veröffentlicht zuerst in den Kriegstechnischen Zeitschriften im Jahr 1900, später in einem Buch im Jahr 1908 beim Mittler Verlag: Oberleutnant W. Heydenreich, Die Lehre vom Schuss für Gewehr und Geschütz.

⁸ Zur Kaliberbestimmung siehe Kapitel 3.5.

Patrone DM111 und einer angenommenen Mündungsgeschwindigkeit von 850 m/s ergibt sich so ein Rücklaufimpuls von ca. $8 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^9$ und eine Rücklaufgeschwindigkeit der Waffe von 2,3 m/s. Wenn der Schütze diesen Impuls innerhalb von 0,1 Sekunden aufhält, entspricht dies einer Kraft von etwa 80 N. Berücksichtigt man hierbei noch die Nachwirkung, dann liegt der reale Wert etwas höher.

In dem Beispiel wurde die zurücklaufende Masse als ein starrer Block angesehen. Moderne Handwaffen sind in der Regel Selbstlader, besitzen Federn und andere zurücklaufende Teile, z. B. einen Gaskolben zum Entriegeln des Verschlusses (Gewehr G36) oder einen Masseverschluss (Maschinenpistole MP2). Diese Einzelteile können sich alle mit teilweise unterschiedlicher Geschwindigkeit in der Waffe bewegen. Bei großkalibrigen Waffen kommen z. B. noch Mündungsbremsen, Rohrbremsen und Rohrvorholer hinzu. Daher muss bei einer genauen Berechnung für jedes Teil individuell die Masse und die Geschwindigkeit erfasst und anschließend eine Summe gebildet werden.

Die Rückstoßenergie lässt sich aus der Summe der Masse der zurücklaufenden Waffenteile m_r und deren Geschwindigkeit v_r errechnen:

$$E_r = 0,5 \cdot m_r \cdot v_r^2$$

1.1.4 Energiebilanz des Schusses

Eine Waffe ist im Prinzip eine Wärmekraftmaschine, ähnlich einem Verbrennungsmotor. Chemische Energie der Treibladung wird in Wärmeenergie und mechanische Energie umgewandelt. Die mechanische Energie wird benötigt, um folgende Arbeiten zu verrichten:

- Ausziehen des Geschosses und Einpressen in die Züge und Felder des Waffenrohres (nur Patronenmunition)
- Beschleunigen des Geschosses in Richtung Mündung
- Beschleunigen des Geschosses in die Rotation (nicht bei flügelstabilisierter Munition)
- Beschleunigen der Treibladungsgase in Richtung der Mündung
- Reibung der Gasmoleküle untereinander und an der Rohrmündung

⁹ Gemäß H. Dathan, Waffenlehre für die Bundeswehr, Herford 1980 wird ein Rückstoßimpuls von $13 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ als körperlich noch erträglich angesehen.

- Beschleunigen der rücklaufenden Waffenteile
- Ggf. Spannen von Federn, Füllen von Gasspeichern für weitere Ladevorgänge und Hilfsarbeiten

Weiterhin erwärmt sich das Waffenrohr sowie das Geschoss und ggf. die Patronenhülse, sofern vorhanden. Ein weiterer Teil der Energie muss für die Überwindung der Reibung aufgebracht werden. Schließlich entweichen Teile des Treibladungsgases und ggf. sogar der unverbrannten Treibladung ungenutzt über die Mündung, wenn das Geschoss die Rohrmündung verlassen hat.

Die Mündungsenergie E_g des Geschosses lässt sich recht einfach über die Geschossmasse m_g und die Mündungsgeschwindigkeit v_0 bestimmen:

$$E_g = 0,5 \cdot m_g \cdot v_0^2$$

Die Menge des Treibladungspulvers vor dem Schuss ist bekannt. Schlussfolgernd wurde bereits 1864 von Résal¹⁰ eine der Hauptgleichungen für die Geschossbewegung aufgestellt, die allerdings durch ihre Annahmen und Vereinfachungen praktisch nicht nutzbar war:

$$E \cdot c_v \cdot (T_0 - T) w f(t) = E \cdot (Q + r) + 0,5 m_g \cdot v^2$$

Auf der linken Seite der Gleichung wird die zum Zeitpunkt t verbrauchte chemische Energie mit dem mechanischen Wärmeäquivalent E , der spezifische Wärme c_v , der Temperatur der Pulvergase T zum Zeitpunkt t sowie der Explosionstemperatur der Treibladung T_0 eingesetzt. $w f(t)$ kennzeichnet den Anteil der bis zum Zeitpunkt t verbrannten Pulvermasse. Q steht für die an das Waffenrohr und andere Teile übertragene Wärmemenge, r für die Reibung sowie v für die Geschossgeschwindigkeit zum Zeitpunkt t . Die Masse des Geschosses geht mit m_g ebenfalls in die Formel ein.

Das Ergebnis ist ernüchternd, die Energie des Treibladungspulvers verteilt sich in etwa wie folgt:

- Ca. 30 %–50 % Geschossenergie in Flugrichtung,
- bis zu 45 % Energie in den Treibladungsgasen (Druck, Wärme und Bewegung),

¹⁰ Ami-Henry. Résal: Recherche pour le mouvement des projectiles dans les armes a feu, Paris 1864.

- bis zu 25 % Wärmeabgabe an Waffenteile (Rohr und Anbauteile), Geschoss und ggf. Patronenhülse,
- bis zu 2 % Rückstoßenergie der Waffe,
- weit unter 1 % Geschossenergie durch den Drall (falls vorhanden) sowie
- bis zu 3 % Reibungsenergie (je nach Waffe und Geschoss).

Alle Angaben sind nur Anhaltswerte, die aus verschiedenen Quellen gemittelt wurden, da sie auch von der Waffe (Glattrohr oder gezoogenes Rohr sowie Rohrlänge), dem Treibladungspulver (progressiv, neutral oder degressiv) und dem jeweiligen Geschoss abhängen. Sie zeigen aber auf, dass weniger als 50 % der Energie des Treibladungspulvers in Geschossenergie umgesetzt wird und dass die Erwärmung einer Waffe bei schnellen Einzelschüssen oder Feuerstößen eine sehr ernst zu nehmende Größe darstellt. Nicht berücksichtigt wurde ein möglicher Energieverbrauch bei Selbstladewaffen für die Nachladevorgänge.

1.1.5 Rohrschwingungen

Beim Schuss gerät das Rohr durch die Bewegung von Geschoss sowie Treibladung und deren Gasschwaden auf allen drei Achsen in Schwingungen¹¹. Die Schwingungen sind abhängig von der Materialart, Wandstärke, Länge und Lagerung sowie ggf. Fertigungsfehler und Verschleiß des Waffenrohres. Während man Fertigungsfehler und Verschleiß noch am einfachsten ausgleichen kann, sind die anderen vier Faktoren nur empirisch mit aufwendigen Computerprogrammen zu berechnen. Ist eine optimale Länge für ein Waffenrohr gefunden, können Umweltfaktoren wie einseitige Sonneneinstrahlung, Rohrdurchhang, Rohrerwärmung durch mehrfache Schüsse, aber auch Verschmutzung der Waffe das Resultat eines guten Trefferergebnisses wiederum verschlechtern. Dies ist ein Grund, warum in den modernen Ballistikrechnern einer Waffenanlage möglichst viele dieser Einflussfaktoren aufgenommen und berücksichtigt werden müssen.

¹¹ Bei Kleinkalibersportwaffen reicht der Einschlag des Schlagbolzens auf dem Treibladungsanzünder bereits aus, um Rohrschwingungen auszulösen: Johannes Sequard, Universität Wien, 2012.

Auch die Geschosse schwingen im Rohr und beeinflussen auf diese Weise das Trefferergebnis und ggf. sogar die Funktionstüchtigkeit des Zünders. Ein Geschoss wird im Rohr an mindestens zwei radialen Flächen geführt. In der Regel ist das im hinteren Bereich des Geschosses das Führungsband und im vorderen Bereich eine Wulst oder hervorstehende Fläche. Durch Fertigungstoleranzen kann es hier zum Schwingen um die Längsachse kommen, die sich dann negativ auf die Treffwahrscheinlichkeit auswirkt. Geschosse, die nur eine dünne Hülle aufweisen, z. B. sogenannte „Cargo-Geschosse¹²“, neigen zum Schwingen in der Längsachse. Dies wird durch die Beschleunigung beim Schuss hervorgerufen und kann einen Zünder soweit schädigen, dass ein Blindgänger produziert wird.¹³

1.1.6 Verschleiß

Die hohen Druck- und Temperaturunterschiede beim Schuss sowie die Reibung des Geschosses an der Rohrwandung führen zum Rohrverschleiß. Bedingt durch den hohen Gasdruck und die hohe Temperatur lagert sich Kohlenstoff im Waffenstahl ab. Dadurch wird der Stahl weniger elastisch, er versprödet. Glattrohre haben einen geringeren Verschleiß als Polygonrohre und diese wiederum einen geringeren Verschleiß als gezogene Rohre.¹⁴ Auch die Geschossform, die Geschossart, das Material der Führungsbänder und das Treibladungspulver, sowie Grad der Sauberkeit bewirken einen teilweise unterschiedlichen Verschleiß an den Waffenrohren. Während bei kleinen Kalibern Schussbelastungen von mehr als 10.000 Schuss möglich sind – das Rohr des Maschinengewehrs MG-3 hat eine Verschleißgrenze von 20.000 Schuss –, kann bei Panzerkanonen das Rohr schon nach etwa 1.500 Vergleichsschüssen „ausgeschossen“ sein. Der Vergleichsschuss ist ein Standardmaß, auf das der reale Schuss umgerechnet werden muss. Rasant fliegende Treibspiegelgeschosse mit hoher Mündungsgeschwindigkeit belasten dabei das Waffenrohr um ein Vielfaches mehr als langsamere Quetschkopfgeschosse.

¹² Dies sind alle Geschosse, die eine Submunition transportieren, z. B. Leuchtmunition, die über dem Ziel ausgestoßen wird oder auch Suchzündermunition wie das 155 mm Geschoss SMART.

¹³ Zünder für Artilleriegeschosse sind für Beschleunigungen bis zum 20.000fachen der Erdbeschleunigung ausgelegt. Durch Schwingungen um die Längsachse wird diese schon sehr hohe Geschwindigkeitszunahme noch weit übertroffen. Dies kann zu einem Dejustieren und sogar Abbrechen der Zahnräder im Zünder führen.

¹⁴ Die unterschiedlichen Arten der Waffenrohre werden im Kapitel 3 beschrieben.

1.2 Abgangsballistik

Die Gasdruckkurve bricht ab, wenn das Geschoss die Mündung erreicht hat. Hier beginnt die Abgangsballistik. Bei Waffen ohne Mündungsbremse strömen die Treibladungsgase zum einen an dem Geschoss vorbei, ein weiterer Teil drückt aber nach wie vor auf den Geschossboden und beschleunigt das Geschoss für einige Meter noch nach. Deswegen wird die Mündungsgeschwindigkeit für die Waffen und die spezifische Munition auch nicht direkt vor der Mündung, sondern erst in einem Abstand von 5 m oder 10 m vor der Mündung gemessen.

Bei vielen Waffen lässt sich die Restenergie der Treibladungsgase an der Rohrmündung für eine Verstärkung des Rückstoßes (wie beim MG-3) oder für eine Mündungsbremse zur Verringerung des Rohrrücklaufes (PzH 2000) nutzen. Diese Anbauteile sind im jeweiligen Abschnitt bei den Waffen beschrieben.

Im oben angesprochenen Beispiel wurde die Nachbeschleunigung des Geschosses vor der Mündung noch nicht berücksichtigt. Sie muss allerdings jetzt in die Rechnung mit einbezogen werden. In unserem Fall wird angenommen, dass die Pulvergase mit einer Geschwindigkeit von ca. 900 m/s an dem Geschoss vorbeiströmen. Damit müssen die realen Werte des Rückstoßes um ca. 20 % höher angesetzt werden, wobei sich der Rückstoßimpuls auf ca. 11 kg • m/s und die Rückstoßkraft auf etwas mehr als 110 N erhöht, aber immer noch erträglich sind.

Beim realen Schuss ist ein Teil des Treibladungspulvers noch nicht verbrannt, wenn das Geschoss das Waffenrohr verlässt. Hier bilden sich Verbrennungsrückstände, die im heißen Zustand mit dem Luftsauerstoff in Mündungsnähe reagieren. Darunter zählen vor allem Kohlenmonoxid, Stickoxide und Wasserstoff sowie bei Schwarzpulver die Schwefelverbindungen, die durch die Sauerstoffunterbilanz in den Treibladungspulvern entstehen. Der Mündungsfeuertämpfer hat die Aufgabe, die aus der Mündung entweichenden Gase unter eine Entflammtemperatur abzukühlen und so die Entdeckbarkeit der Waffe zu vermindern. Bei Gewehren mit einer Feuerstoßmöglichkeit haben die Mündungsfeuertämpfer auch noch die Funktion, ein Hochschlagen der Waffe beim Feuerstoß zu verhindern. Dies geschieht durch größere Bohrungen im oberen Teil und kleinere Bohrungen im unteren Teil des Mündungsfeuertämpfers. Daher sind Mündungsfeuertämpfer immer definiert auf eine Mündung

aufzuschrauben, entweder bis zum Anschlag oder zu einer entsprechenden Markierung.

Große, trichterförmige Rohrweiterungen an der Mündung sind dagegen reine Mündungsfeuerblenden, die eine Beeinträchtigung des Schützen durch den Mündungsblitz verhindern sollen.

Die Abgangsballistik ist entscheidend für die Treffgenauigkeit. Ein erheblicher Teil aller Ursachen für die sogenannte Streuung finden sich hier. Verdrehte Mündungsfeuerdämpfer und Mündungsbremesen¹⁵, ausgebrochene Züge und Felder (Verschleiß und unsachgemäße Behandlung) sowie Fertigungsmängel beeinflussen den Geschossweg. Sand oder Erde im Mündungsbereich einer Waffe führen mindestens zu einer geringeren Mündungsgeschwindigkeit, wenn nicht zu Rohrzerlegern oder Aufreißen der Mündungsfeuerdämpfer.

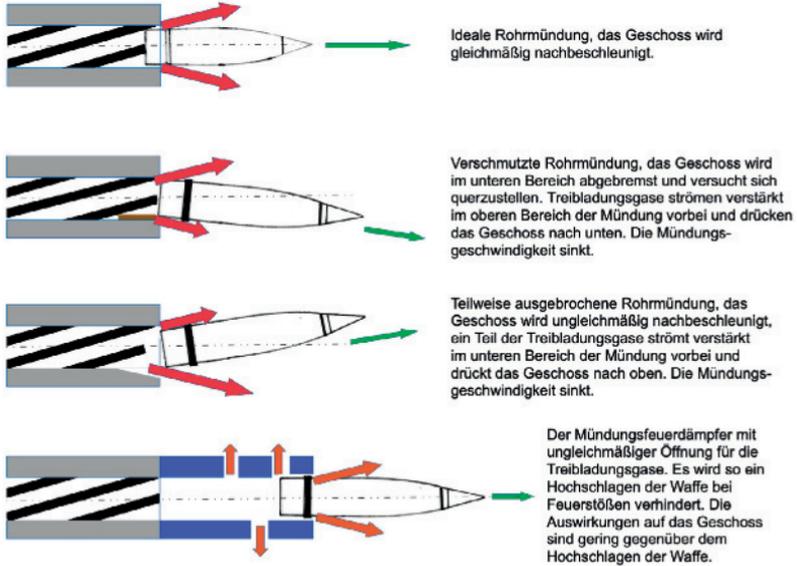


Bild 1.3: Auswirkungen der Rohrmündung auf die Flugbahn des Geschosses

Eine deutliche Auswirkung auf die Umwelt ergibt sich durch die Geräusentwicklung beim Schuss. Hier muss man zwischen dem Mündungsknall und dem ggf. auftretenden Geschossknall unter-

¹⁵ Die Waffenteile werden genauer im Kapitel über Waffen beschrieben.

scheiden. Der Mündungsknall entsteht durch die expandierenden Gase, die sich vor der Mündung entspannen. Er wird unter Umständen noch durch die Nachverbrennung der bisher nicht verbrannten Treibladungsreste und brennbaren Verbrennungsrückstände verstärkt. Durch einen Schalldämpfer lässt sich der Mündungsknall weitgehend abschwächen. Wenn das Geschoss mit Überschall (d. h. schneller als ca. 330 m/s) fliegt, entsteht ein Geschossknall, der sich nicht unterdrücken lässt und zu hören ist, solange das Geschoss im Überschallbereich fliegt. Der Überschallknall entsteht durch eine Verdichtung der Luft vor dem Geschoss, auf die eine Verdünnung der Luft folgt. Diese Störung in der Luftmasse bildet eine nach hinten offene kegelförmige Welle, die sogenannte Machsche Welle.

Beide Geräusche lassen sich in einiger Entfernung von der Waffe deutlich unterscheiden, ein Beobachter vor der Mündung der Waffe hört zuerst den Geschossknall und danach den Mündungsknall.

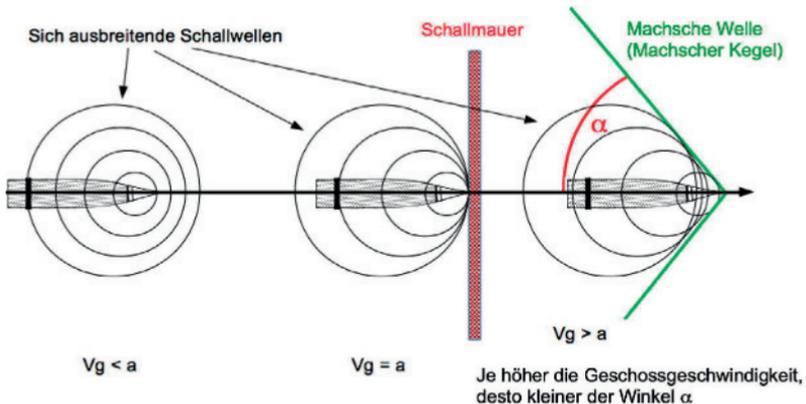


Bild 1.4: Die Schallgeschwindigkeit

1.3 Die Außenballistik der Geschosse

Die Geschossflugbahn ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Neben den Umweltbedingungen sind Geschossform und -geschwindigkeit, Abgangswinkel, Erdanziehungskraft und Erdrotation sowie Erdkrümmung entscheidende Faktoren. Zum einfachen Verstehen reicht es aber erst einmal aus, die Geschossflugbahn im luftleeren Raum und auf kurze Entfernungen zu betrachten.

1.3.1 Geschossflugbahn im luftleeren Raum

1.3.1.1 Die Parabelgleichung

Die einfache Geschossflugbahn hat als Einflussgröße nur die Erdanziehungskraft. Diese wird erst einmal mit $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ als konstant angenommen¹⁶. Real nimmt sie mit der Höhe über dem Meeresspiegel ab und ist aufgrund der geringeren Zentrifugalkraft an den Polen stärker als am Äquator. Hinzu kommen Erdabplattung und Anomalien.

Die Geschwindigkeit des Geschosses lässt sich als Vektor darstellen und in eine x-Richtung parallel zur Erdoberfläche und eine y-Richtung (senkrecht zur Erdoberfläche und damit zum Erdmittelpunkt zeigend) zerlegen. Die Erdanziehungskraft wirkt dabei auf das Geschoss nur in Richtung des Erdmittelpunktes. Neben der Geschossgeschwindigkeit ist der Abgangswinkel des Geschosses von Bedeutung:

$$v_x = v_0 \cdot \cos a$$

$$v_y = v_0 \cdot \sin a - g \cdot t$$

Danach ist es nur noch eine Frage der Zeit t , bis die Geschwindigkeit in Richtung vom Erdmittelpunkt aufgezehrt ist und das Geschoss in Richtung Erde zurückfällt.

Die Schussweite x_{\max} lässt sich durch Einsetzen der Zeit in die obigen Gleichungen errechnen, wobei zum Zeitpunkt t_{\max} das Geschoss wieder am Erdboden angekommen ist. Somit ist die Flughöhe zu diesem Zeitpunkt wieder bei null angelangt:

$$t_{\max} = 2 \cdot v_0 / g \cdot \sin a$$

$$x_{\max} = v_0^2 / g \cdot (\sin 2 a)$$

Daraus ist ersichtlich, dass man die theoretisch maximale Schussweite bei einem Abgangswinkel von 45° (= 800 Strich¹⁷) erreicht, denn hier entspricht $(\sin 2 a)$ dem Wert 1. Für Werte größer oder kleiner als 45° nimmt die Flugweite ab. Dabei lässt sich eine Symmetrie feststellen, d. h., bei einem Abgangswinkel von $45^\circ + n^\circ$ (Schießen in der oberen Winkelgruppe) erreicht man die gleiche Schussweite wie bei $45^\circ - n^\circ$ (Schießen in der unteren Winkel-

¹⁶ Die Normfallbeschleunigung ist in der DIN 1305 und in der Normatmosphäre der ICAO (International Civil Aviation Organization – Internationale Organisation der Zivilluftfahrt) festgelegt auf $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$.

¹⁷ Ein Vollkreis von 360° entspricht militärisch in der NATO 6400°, im ehem. Warschauer Pakt 6000°.

gruppe). Da hier bei einer vorgegebenen Schussweite unterschiedliche Geschossflugzeiten (die Geschossflugzeit steigt mit zunehmender Rohrerhöhung an) auftreten, kann man so mit einem Geschütz zwei Geschosse zur gleichen Zeit im Ziel einschlagen lassen, sofern die Flugzeiten weit genug differieren und das Geschütz schnell genug richten kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bedingt durch die längere Flugzeit des Geschosses in der oberen Winkelgruppe auch die später noch zu betrachtenden Faktoren (Wetter, Erddrehung, etc.) länger auf das Geschoss einwirken können. Somit ist die Treffgenauigkeit in der oberen Winkelgruppe schlechter.

Das Schießen in der oberen Winkelgruppe war das klassische Einsatzgebiet der Steilfeuerwaffen, der Mörser und Haubitzen. Die untere Winkelgruppe wurde von den Flachfeuerwaffen, den Kanonen und den meisten Handwaffen genutzt. Bei der Artillerie verschwimmt diese Unterscheidung da die heutigen Panzerhaubitzen sehr lange kanonenartige Waffenrohre haben und in beiden Winkelgruppen schießen können.

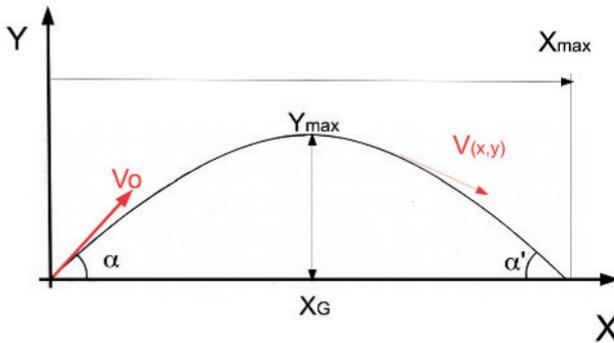


Bild 1.5: Die Geschossflugbahn

Eine vollständige Flugbahngleichung im luftleeren Raum erhält man durch die Wurfparabel:

$$y = x \cdot \tan a - \frac{g \cdot x}{2 v_0^2 \cdot \cos^2 a}$$

Im luftleeren Raum ist der Abgangswinkel a gleich dem Aufschlagwinkel a' . Nach der Hälfte der Flugstrecke (x_G) erreicht das Geschoss die Gipfelhöhe y_{\max} .

Variiert man in dieser Gleichung bei vorgegebener Mündungsgeschwindigkeit den Abgangswinkel, bekommt man als Umhüllende aller möglichen Geschossflugbahnen die sogenannte Sicherheitsparabel. Außerhalb dieser Parabel kann bei vorgegebener Mündungsgeschwindigkeit kein Ziel erreicht werden. Die Besonderheiten sind hierbei für $\alpha = 45^\circ$ die maximale Geschossflugweite und für $\alpha = 90^\circ$ die maximale Geschossflughöhe y_{\max} . Außer für diesen Abgangswinkel können alle Ziele in der oberen oder der unteren Winkelgruppe erreicht werden.

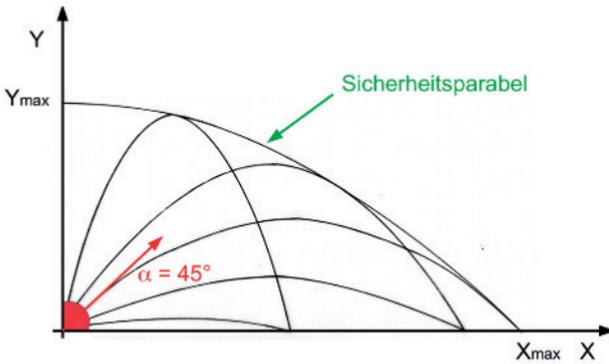


Bild 1.6: Die Sicherheitsparabel

1.3.1.2 Schießen bei einer geneigten Ebene

Liegen Waffe und Ziel nicht auf einer gleichen Höhe, ist die Ziellinie nicht mehr waagrecht. Hier spricht man vom „Verschwenken der Flugbahn“. Würde man den Abgangswinkel nicht verändern und bergauf schießen, ergibt sich so ein Kurzschuss, schießt man bergab, ergibt sich ein Weitschuss. Also müssen in beiden Fällen die Abgangswinkel verändert werden.

Eine einfache Lösung gibt es nicht. Auch die gängigen Regeln aus dem Bereich der Jagd helfen nicht weiter:

„Bergüber halt drüber, bergunter halt drunter“ oder „Bergauf, bergunter, halt immer was drunter“ und „Schießt Du runter, halte drunter, schießt Du rauf, halte drauf.“

Wobei bei diesen Regeln sicherlich auch die Position des Wildes im Gelände sowie die Anordnung der inneren Organe in Bezug auf die Schussrichtung mit einbezogen werden müssen.

Einfache Formellösungen gibt es auch nicht. Noch gut nutzbar ist die Lendersche Formel, mit der Annahme, dass die Schrägschussweite in etwa der Schussentfernung in der Ebene entspricht. Der Winkel g beschreibt hier den Höhenunterschied h zur Schussentfernung in der Ebene x , der Winkel α den Aufsatzwinkel für eine Schussentfernung in der Ebene. Damit errechnet sich der benötigte Aufsatzwinkel β wie folgt:

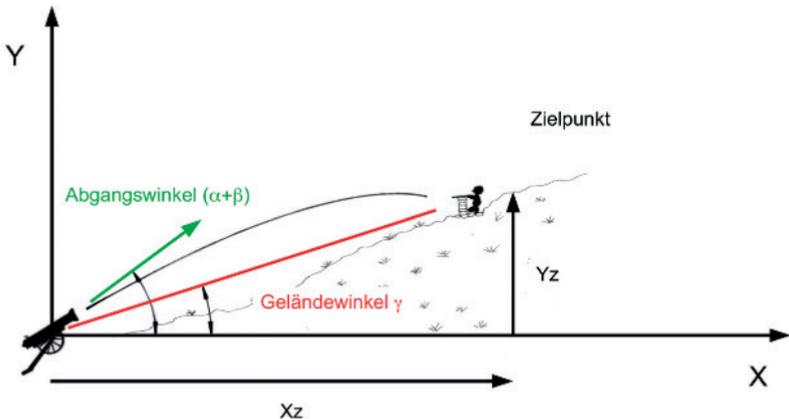


Bild 1.7: Schräger Schuss bergauf

$$\beta = 0,5 \cdot (\arcsin(\sin(2 \cdot \alpha) \cdot \cos^2 \gamma + \sin \gamma) - g)$$

mit $\tan \gamma = h/x$

In der Schießlehre der Bundeswehr wird bei Handfeuerwaffen nicht auf das Schießen in der schiefen Ebene eingegangen. Dies ist verständlich, da bei kleinen Höhenunterschieden bis ca. $\pm 25^\circ$ und flachen Geschossflugbahnen sowie hohen Geschossgeschwindigkeiten innerhalb der Gebrauchsschussweite der Fehler sehr gering sein wird.¹⁸

1.3.1.3 Bestrichener und gedeckter Raum

Hohe Geschossgeschwindigkeiten führen beim Schießen in der unteren Winkelgruppe zu einer gestreckten Geschossflugbahn. Die Gipfelhöhe ist sehr flach und wenn die Flughöhe kleiner oder gleich der

¹⁸ In der NVA-Vorschrift A 050-1-721 „5,45 mm Maschinenpistole AK74 und leichtes Maschinengewehr RPK74 – Beschreibung und Nutzung“ heißt es dazu im Kapitel 9.4: „Bei der Berücksichtigung der Bedingungen für das Schießen von Normalbedingungen ausgehen... -Geländewinkel von $\pm 15^\circ$ “.

Höhe des Zieles ist, spricht man vom bestrichenen Raum. Der bestrichene Raum entspricht dem Visierbereich der Waffe, in dem beim Anhalten auf Zielmitte auf jeden Fall getroffen wird. Dies ist wichtig für das schnelle Schießen auf „Kampftfernung“, bei dem ein Zeitfenster für eine genaue Entfernungsbestimmung nicht gegeben ist. Da die Flugbahn parabelähnlich ist, gibt es auf dem aufsteigenden und auf dem absteigenden Flugbahnast einen bestrichenen Raum, hier dargestellt auf dem absteigenden Ast. Mit einer Zielhöhe von δy ist der bestrichene Raum δx lang.

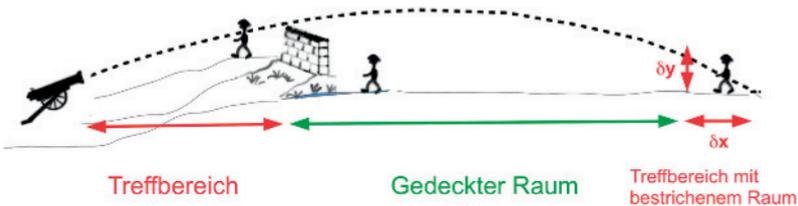


Bild 1.8: Gedeckter und bestrichener Raum

Ziele hinter einer Deckung¹⁹ sind bei Geschossen mit gestreckten Flugbahnen nur schwer zu erreichen²⁰. Dies ist der sogenannte „gedeckte Raum“. Hier ist der Einsatz langsam fliegender Geschosse, die in der oberen Winkelgruppe verschossen werden, vorteilhaft, da die Flugbahn stärker gekrümmt ist.

1.3.2 Reale Geschossflugbahn

1.3.2.1 Beschreibung der Atmosphäre

Um eine Geschossflugbahn im luftgefüllten Raum berechnen zu können, ist es wesentlich, die Atmosphäre genauer zu betrachten.

Während beim Schießen in der unteren Winkelgruppe die Umweltbedingungen Luftdruck, Temperatur, Schallgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit sowie Seitenwind weitgehend konstant sind, ändert sich dies beim Schießen in der oberen Winkelgruppe. Hier können beim Schießen mit Artillerieschützen Gipfelhöhen von mehreren Kilometern erreicht und so verschiedene Luftschichtungen durchflo-

¹⁹ Was eine Deckung wirklich bringt und wie dick sie sein muss, lässt sich überschlagsmäßig mit der Formel von Poncelet berechnen. Siehe dazu den letzten Absatz im Kapitel 1.6.2.1.

²⁰ Dies führte zur Entwicklung von Zeitzündern, die nach einer vorermittelten Flugzeit hinter der Deckung und über dem Ziel auslösen.

gen werden.²¹ Folgende Annahmen sind daher gemäß DIN ISO 2533 und ICAO (International Civil Aviation Organization – Internationale Organisation der Zivilluftfahrt) zu treffen:

- Der Luftdruck beträgt an der Erdoberfläche normiert 1013,25 hPa, er nimmt in den unteren Luftschichten etwa 1 hPa auf 8 m Höhe ab. Als weitere Faustformel kann angenommen werden, dass sich der Luftdruck alle 5.500 m halbiert. Für eine genauere Berechnung des Luftdrucks wird eine Exponentialfunktion genutzt, die allerdings von der Bedingung ausgeht, dass sich die Lufttemperatur mit zunehmender Höhe nicht ändert. Wesentlich ist, dass bei abnehmendem Luftdruck (genauer gesagt bei abnehmender spezifischer Masse) ein Geschoss eine größere Distanz fliegt, da sich der Luftwiderstand verringert.

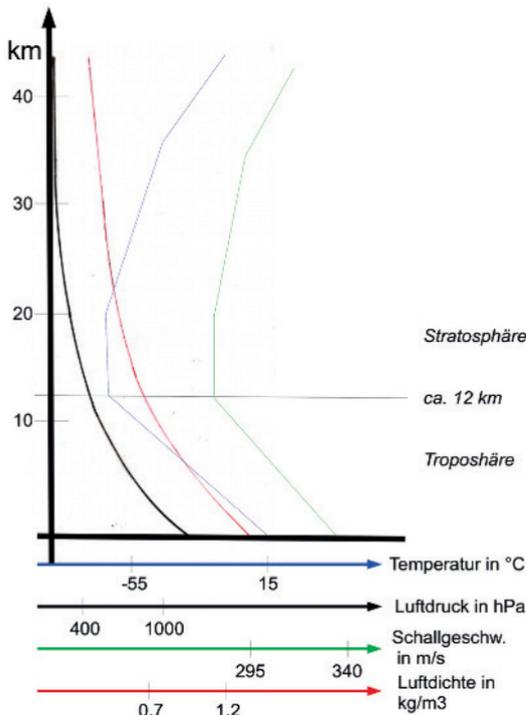


Bild 1.9: Die um die Luftdichte ergänzte Norm-Atmosphäre nach ICAO.

²¹ Im Ersten Weltkrieg erreichte man mit dem deutschen 21 cm „Parisgeschütz“ bei einer Geschossflugweite von 130 km eine Gipfelhöhe von ca. 40 km.

- Die Lufttemperatur beginnt als Normmaß bei 15,0°C und nimmt in der Troposphäre (0 km bis ca. 15 km Höhe) um etwa 6°C pro Kilometer ab – als Mittelwert. Danach, im unteren Bereich der Stratosphäre, herrscht erst einmal eine konstante Temperatur im Bereich von -40°C bis -50°C, die dann wieder bei einer Höhe von 50 km auf etwa 0°C ansteigt. Allerdings ist hier die Anzahl der Luftmoleküle pro Volumeneinheit schon so gering, dass man diese „warme Temperatur“ nicht wahrnehmen wird.
- Die Schallgeschwindigkeit a ist nur von der Lufttemperatur abhängig und sinkt mit zunehmender Höhe. Es gilt am Boden eine Schallgeschwindigkeit a_0 von 340,29 m/s, im Höhenbereich bis 11 km gilt:
$$a = a_0 \cdot \sqrt{T/T_0}.$$
- Die Luftfeuchte wird in der Standardatmosphäre nicht betrachtet und auf 0 % festgesetzt.²²

1.3.2.2 Einflussfaktoren im luftgefüllten Raum, Schwerkraft und Luftwiderstand

Die Schwerkraft war bisher die einzige Einflussgröße, die bei der Beschreibung der Geschossflugbahn im luftleeren Raum betrachtet werden musste. Allerdings wurde sie der Einfachheit halber als konstant angenommen, was eigentlich nur für sehr erdnahe Geschossflugbahnen gilt. Die Schwerkraft nimmt pro Kilometer Höhe um 3,1 mm/s² ab und muss somit bei hoch fliegenden Artilleriegeschossen (und Flugkörpern) berücksichtigt werden.

Die Erddrehung ist ein wesentlicher Faktor für weite Flugstrecken, obwohl sie erst einmal keinen Einfluss auf das Geschoss hat. Aber die Erde dreht sich eben unter dem Geschoss weiter und das führt zu Ablagen²³ in der Treffgenauigkeit durch den Coriolis-Effekt:

Bei einem Schuss senkrecht in die Höhe wird ein Geschoss während der Aufwärtsbewegung nach Westen und bei der Abwärtsbewegung nach Osten abgelenkt. Dabei entsteht ein Versatz nach Westen, der am Äquator an größten ausfällt.

²² In der ehem. Sowjetunion wurde 1927 die Artillerie-Normalatmosphäre eingeführt, in der die relative Luftfeuchte am Boden auf 50 % festgesetzt wurde.

²³ Gemeint ist hier die Entfernung vom eigentlichen Zielpunkt, den man treffen wollte.