

Inhaltsübersicht

1 Einführung.....	1
2 Physikalische Grundlagen.....	5
2.1 Bezugs- und Maßsysteme, Notation.....	5
2.2 Mechanik.....	6
2.3 Fluiddynamik.....	27
2.4 Das physikalische Umfeld der Ballistik	52
3 Innenballistik.....	55
3.1 Einführung, Historisches	55
3.2 Explosivstoffe.....	56
3.3 Elemente der Innenballistik.....	69
3.4 Innenballistische Berechnungen	85
3.5 Bestimmung der erforderlichen Pulverkenndaten	106
3.6 Innenballistik der Rakete	110
3.7 Spezielle Antriebssysteme.....	118
3.8 Die Beschleunigung von Splittern.....	127
4 Abgangsbalistik.....	133
4.1 Einleitung.....	133
4.2 Phänomene an der Mündung.....	134
4.3 Der Geschossabgang.....	143
5 Außenballistik.....	153
5.1 Historisches	153
5.2 Die Atmosphäre.....	156
5.3 Am Geschoss wirkende Kräfte und Momente.....	163
5.4 Flugbahnrechnungen mit dem Massenpunktsmodell	176
5.5 Flugbahnmodelle mit mehr als drei Freiheitsgraden	229
5.6 Stabilität und Folgsamkeit.....	244
5.7 Zur Bestimmung der Beiwerte	260

5.8	Ballistisch optimale Geschosse	281
5.9	Zur Außenballistik der ungelenkten Rakete	300
6	Grundzüge der Endballistik.....	305
6.1	Einführung	305
6.2	Durchdringungsmodelle	309
6.3	Verhaltensmerkmale verschiedener Materialien	320
6.4	Schutzanordnungen	334
6.5	Probleme des ballistischen Schutzes	338
7	Abprallende Geschosse	357
7.1	Einleitung.....	357
7.2	Stoßtheorie	358
7.3	Phänomenologie des Prellschusses.....	368
7.4	Das Geschoss als Massenpunkt	372
7.5	Das Geschoss als starrer Körper	382
7.6	Die Flugbahn eines Prellschusses	392
7.7	Weitere Prellschusstheorien	394
8	Spezielle Anwendungen der Ballistik	397
8.1	Einleitung	397
8.2	Forensische Anwendungen (<i>Mitautor Dr. Fabiano RIVA</i>)	398
8.3	Sicherheitsfragen auf Schießplätzen und in Schießanlagen	417
8.4	Außenballistik der Schrotgarbe	426
9	Einblick in die ballistische Messtechnik.....	433
9.1	Einleitung.....	433
9.2	Geschwindigkeitsmessungen.....	435
9.3	Innenballistische Druckmessungen	454
9.4	Außenballistische Messungen	466
9.5	Bildgebende Verfahren.....	472

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen.....	XXV
Umrechnung von Einheiten	XXXIII
1 Einführung.....	1
2 Physikalische Grundlagen	5
2.1 Bezugs- und Maßsysteme, Notation	5
2.2 Mechanik	6
2.2.1 Kinematik, lineare Bewegungen	6
2.2.2 Masse, Impuls, Kraft	9
2.2.3 Arbeit und Energie	10
2.2.4 Drehbewegungen.....	12
2.2.5 Erhaltungssätze	14
2.2.6 Bewegungsgleichungen.....	15
2.2.6.1 Allgemeines	15
2.2.6.2 Das Prinzip von D'ALEMBERT.....	15
2.2.6.3 Flugbahnen im Vakuum.....	15
2.2.6.4 Wegabhängigkeit	17
2.2.6.5 Die Bewegung im Zentralfeld.....	17
2.2.7 Beschleunigungen im rotierenden Bezugssystem	21
2.2.7.1 Die Zentrifugalbeschleunigung.....	21
2.2.7.2 Die Coriolisbeschleunigung.....	22
2.2.8 Bewegungen starrer Körper	23
2.2.8.1 Bewegungszerlegung	23
2.2.8.2 Der Trägheitstensor.....	23
2.2.8.3 Der freie symmetrische Kreisel.....	25
2.2.8.4 Der schwere symmetrische Kreisel.....	25
2.3 Fluiddynamik.....	27
2.3.1 Allgemeines.....	27
2.3.2 Thermodynamische Grundbegriffe	27
2.3.2.1 Die Temperatur	27
2.3.2.2 Temperatur und Wärme	28
2.3.2.3 Aggregatzustände	28
2.3.2.4 Die Zustandsgleichung der Gase.....	29

2.3.2.5	Wärme, Arbeit, innere Energie	29
2.3.3	Materieeigenschaften	31
2.3.3.1	Dichte, Kompressibilität	31
2.3.3.2	Zähigkeit	31
2.3.3.3	Schallgeschwindigkeit	32
2.3.3.4	Ausbreitung von Schallwellen, Mach'scher Kegel	33
2.3.4	Reibungsfreie Strömungen	35
2.3.4.1	Definition, Erhaltungssätze	35
2.3.4.2	Die Bernoulligleichung	36
2.3.4.3	Strömungswiderstand	37
2.3.4.4	Wirbelströmungen	38
2.3.4.5	Der Magnuseffekt	39
2.3.4.6	Das Tragflügelprinzip	40
2.3.5	Strömungen mit Reibung	41
2.3.5.1	Kräfte, Bewegungsgleichungen	41
2.3.5.2	Berücksichtigung der Zähigkeit, Reynoldszahl	43
2.3.6	Strömungsvorgänge und Freistrahlen	44
2.3.6.1	Allgemeines	44
2.3.6.2	Ausströmen aus Mündungen	44
2.3.6.3	Geschwindigkeits- und Energieverlauf im Freistrahle	45
2.3.6.4	Verdichtungsstöße	47
2.3.6.5	Lavaldüsen	49
2.4	Das physikalische Umfeld der Ballistik	52
2.4.1	Größenordnungen	52
2.4.2	Kaliber und Querschnittsbelastung	53
3	Innenballistik	55
3.1	Einführung, Historisches	55
3.2	Explosivstoffe	56
3.2.1	Allgemeines	56
3.2.1.1	Definition und Bezeichnungen	56
3.2.1.2	Die Abbrandgeschwindigkeit	56
3.2.2	Schwarzpulver	58
3.2.2.1	Geschichtliches	58
3.2.2.2	Zutaten	59
3.2.2.3	Herstellung	59
3.2.2.4	Rezeptur und Reaktionsprodukte	60
3.2.3	Nitrocellulose basierte Treibmittel	61
3.2.3.1	Nitrocellulose	61
3.2.3.2	Einbasige Treibmittel	63
3.2.3.3	Zwei- und dreibasige Treibmittel	63
3.2.4	Treibmittel ohne Nitrocellulose-Basis	65

3.2.4.1	Kunststoffgebundene Treibmittel	65
3.2.4.2	Composite-Treibmittel	65
3.2.5	Physikalische Daten der Treibmittel	66
3.2.6	Anzünd- und Zündmittel	66
3.3	Elemente der Innenballistik	69
3.3.1	Möglichkeiten der Projektilbeschleunigung	69
3.3.1.1	Allgemeines	69
3.3.1.2	Federenergie	69
3.3.1.3	Komprimierte Gase	71
3.3.1.4	Explosivstoffe	72
3.3.2	Treibmittelabbrand	72
3.3.2.1	Die Abbrandgeschwindigkeit	72
3.3.2.2	Die Formfunktion	74
3.3.2.3	Chemische Beeinflussung der Abbrandgeschwindigkeit	76
3.3.2.4	Das Abbrandgesetz	77
3.3.3	Die Energiegleichung	78
3.3.4	Die Geschossbewegung im Rohr	79
3.3.5	Der Druckverlauf, Druckkurven	80
3.3.6	Der Wirkungsgrad und die maximale Geschwindigkeit	84
3.4	Innenballistische Berechnungen	85
3.4.1	Das thermodynamische Gleichungssystem	85
3.4.2	Das Spannungsverhältnis	86
3.4.3	Der Drall und die Leistenkräfte	87
3.4.4	Das Druckgefälle im Rohr	89
3.4.5	Das gasdynamische Modell	91
3.4.5.1	Historische Entwicklung	91
3.4.5.2	Der aktuelle Stand	96
3.4.6	Die Methode von HEYDENREICH	98
3.4.7	Das offene Rohr	102
3.4.7.1	Allgemeines	102
3.4.7.2	Das erweiterte Gleichungssystem	102
3.4.7.3	Der Gasdruckverlauf im offenen Rohr	104
3.5	Bestimmung der erforderlichen Pulverkenndaten	106
3.5.1	Allgemeines	106
3.5.2	Die manometrische Bombe	106
3.5.3	Die Crawfordbombe	109
3.5.4	Thermodynamische Berechnung	110
3.6	Innenballistik der Rakete	110
3.6.1	Allgemeines	110
3.6.2	Treibladungsabbrand und Brennkammerdruck	111

3.6.2.1	Der Abbrand der Treibladung	111
3.6.2.2	Der Druck in der Brennkammer	112
3.6.2.3	Treibladungsgeometrien	114
3.6.3	Der Schub	115
3.6.3.1	Die Raketengleichung	115
3.6.3.2	Berechnung des Schubes, Düsenauslegung	116
3.6.3.3	Schubbestimmung	118
3.7	Spezielle Antriebssysteme	118
3.7.1	Allgemeines	118
3.7.2	Die Daviskanone	119
3.7.3	Die Düsenkanone	120
3.7.4	Das Hochdruck-Niederdruck-System	122
3.7.5	Die Leichtgaskanone	122
3.7.6	Das Prinzip der Unterkalibergeschosse	123
3.7.6.1	Grundlegendes	123
3.7.6.2	Das konische Rohr	124
3.7.6.3	Treibspiegel- und Treibkäfiggeschosse	125
3.8	Die Beschleunigung von Splittern	127
3.8.1	Allgemeines	127
3.8.2	Sprengstoffbeschleunigte Splitter	127
3.8.2.1	Die Gurney-Formel	127
3.8.2.2	Lokale Anwendung der Gurney-Formel	130
3.8.3	Impulsbeschleunigte Splitter	131
3.8.3.1	Entstehung, mögliche Geschwindigkeit	131
3.8.3.2	Fallbeispiel	132
4	Abgangsbalistik	133
4.1	Einleitung	133
4.2	Phänomene an der Mündung	134
4.2.1	Gasströmungen	134
4.2.1.1	Gasströmung bei Abgang eines Geschosses	134
4.2.1.2	Die Ausströmgeschwindigkeit	136
4.2.1.3	Gasströmung bei offenem Rohr	139
4.2.2	Feuererscheinungen	141
4.3	Der Geschossabgang	143
4.3.1	Rohrschwingungen und der Abgangsfehlerwinkel	143
4.3.1.1	Entstehung und Auswirkungen	143
4.3.1.2	Bestimmung des Abgangsfehlerwinkels	144
4.3.2	Der Rückstoß	146
4.3.2.1	Ursachen des Rückstoßes	146
4.3.2.2	Bestimmung des Rückstoßimpulses	146

4.3.2.3	Rücklaufgeschwindigkeit und Rückstoßenergie	148
4.3.2.4	Das Drehmoment beim Schuss	149
4.3.2.5	Möglichkeiten der Beeinflussung	150
4.3.3	Die Ablösung von Geschossführungsteilen	151
5	Außenballistik.....	153
5.1	Historisches	153
5.2	Die Atmosphäre	156
5.2.1	Physikalische Eigenschaften	156
5.2.2	Normalatmosphären	158
5.2.2.1	Allgemeines	158
5.2.2.2	Die ICAO-Atmosphäre	159
5.2.2.3	Weitere Atmosphärenstandards	160
5.2.3	Wirkliche Verhältnisse.....	160
5.2.3.1	Druck und Temperatur	160
5.2.3.2	Wind.....	162
5.3	Am Geschoss wirkende Kräfte und Momente.....	163
5.3.1	Erdbedingte Beschleunigungen.....	163
5.3.1.1	Die Zentrifugalbeschleunigung.....	163
5.3.1.2	Die Gravitationsbeschleunigung.....	164
5.3.1.3	Die Coriolisbeschleunigung.....	165
5.3.2	Das Geschoss als Massenpunkt.....	169
5.3.2.1	Der Luftwiderstand	169
5.3.2.2	Das Gewicht.....	170
5.3.3	Das Geschoss als starrer Körper	171
5.3.3.1	Bewegungen des Geschosses	171
5.3.3.2	Kräfte und Momente infolge nicht-axialer Anströmung	172
5.3.3.3	Kräfte und Momente infolge Drehung um eine Querachse.....	174
5.3.3.4	Kräfte und Momente infolge Drehung um die Längsachse.....	174
5.3.3.5	Die Ursache der seitlichen Abweichung.....	175
5.3.4	Zusammenfassende Liste der Kräfte und Momente.....	175
5.4	Flugbahnrechnungen mit dem Massenpunktsmodell	176
5.4.1	Bewegungsgleichungen.....	176
5.4.1.1	Die physikalische Herleitung.....	176
5.4.1.2	Die bahngeometrische Herleitung.....	177
5.4.1.3	Die Hauptgleichung der Außenballistik.....	178
5.4.2	Historisches zur Berechnung von Flugbahnen.....	179
5.4.2.1	Die Darstellung des Luftwiderstandes	179
5.4.2.2	Die Methode von SIACCI.....	180

5.4.2.3	Widerstandsgesetze und Standardgeschosse.....	181
5.4.2.4	Die Ingalls-Tabellen und der „Ballistic Coefficient“ (BC).....	184
5.4.2.5	Die seitliche Abweichung (Derivation)	187
5.4.3	Gleichungssysteme für die Programmierung	187
5.4.3.1	Die numerische Berechnung	187
5.4.3.2	Gleichungssysteme mit 3- und 2-Freiheitsgraden.....	188
5.4.3.3	Das Anfangswertproblem	190
5.4.3.4	Einige Hinweise zur Durchführung	192
5.4.4	Der Einfluss von Wind.....	193
5.4.4.1	Die Bewegungsgleichungen bei Windeinwirkung.....	193
5.4.4.2	Transformation in ein windfestes Bezugssystem.....	194
5.4.4.3	Die Didion'sche Längswindformel.....	197
5.4.4.4	Die Didion'sche Querwindformel.....	197
5.4.4.5	Experimentelle Bestimmung der Querwindempfindlichkeit	199
5.4.5	Eigenschaften der Flugbahn.....	200
5.4.5.1	Allgemeines	200
5.4.5.2	Eigenschaften der Bahngeschwindigkeit	201
5.4.5.3	Geometrische Eigenschaften der Flugbahn.....	205
5.4.5.4	Besondere Punkte der Flugbahn	207
5.4.6	Näherungen	208
5.4.6.1	Näherungen für flache Flugbahnen.....	208
5.4.6.2	Näherungen für die Gipfelhöhe.....	211
5.4.6.3	Näherungen für den Auftreffpunkt	212
5.4.6.4	Der Schuss auf geneigter Ebene.....	212
5.4.6.5	Der Schuss steil aufwärts in die Luft	213
5.4.7	Das Randwertproblem.....	215
5.4.7.1	Problemstellung	215
5.4.7.2	Schusstafeln, Flugbahnkarten und der Benoist-Plan.....	216
5.4.7.3	Mechanische Lösungen.....	218
5.4.7.4	Rechnerische Lösungen	219
5.4.7.5	Ergänzende Bemerkungen zum Randwertproblem.....	224
5.4.8	Außenballistik der Splitter	224
5.4.8.1	Die Querschnittsbelastung	224
5.4.8.2	Der Luftwiderstandsbeiwert.....	225
5.4.8.3	Flugbahnrechnungen.....	226
5.4.8.4	Maximale Reichweiten	227
5.5	Flugbahnmodelle mit mehr als drei Freiheitsgraden	229
5.5.1	Berechnung der vollständigen Geschossbewegung	229
5.5.1.1	Bezugssysteme.....	229
5.5.1.2	Kräfte und Momente	231

5.5.1.3	Die Bewegungsgleichungen.....	234
5.5.1.4	Ergänzungen und Hinweise	235
5.5.1.5	Die Gleichung des komplexen Anstellwinkels	238
5.5.2	Modifizierte Massenpunktsmodelle	240
5.5.2.1	Vorbemerkung	240
5.5.2.2	Die Abnahme der Winkelgeschwindigkeit	240
5.5.2.3	Der BRL-Ansatz	242
5.5.2.4	Der Ansatz von FLECK und MOLITZ	243
5.6	Stabilität und Folgsamkeit	244
5.6.1	Was bedeutet Stabilität?	244
5.6.2	Stabilisierungsprinzipien bei Geschossen	245
5.6.2.1	Geschosse mit Drallstabilisierung	245
5.6.2.2	Stabilisierung drallloser Geschosse	245
5.6.2.3	Schulterstabilisierung	246
5.6.3	Gyroskopische Stabilität	246
5.6.4	Die Molitz'sche Stabilitätsbedingung	249
5.6.4.1	Vorbemerkung	249
5.6.4.2	Mathematische Definition der Stabilität	249
5.6.4.3	Stabilitätskriterien	250
5.6.4.4	Ballistische Stabilität.....	251
5.6.4.5	Das Molitz'sche Stabilitätsdreieck.....	253
5.6.4.6	Stabilitätsprobleme, instabile Geschosse	254
5.6.5	Folgsamkeit	257
5.6.5.1	Definition der Folgsamkeit	257
5.6.5.2	Wann sind Folgsamkeitsprobleme zu erwarten?	258
5.7	Zur Bestimmung der Beiwerte	260
5.7.1	Vorbemerkung	260
5.7.2	Experimentelle Bestimmung	260
5.7.2.1	Luftwiderstandsbeiwert.....	260
5.7.2.2	Weitere Beiwerte.....	264
5.7.3	Rechnerische Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes	265
5.7.3.1	Die Anteile des Luftwiderstandsbeiwertes	265
5.7.3.2	Wellenwiderstand, Singularitätenverfahren.....	266
5.7.3.3	Wellenwiderstand, Newton'sche Theorie	271
5.7.3.4	Widerstandsbeiwert der Spitzenabplattung.....	272
5.7.3.5	Der Reibungsbeiwert.....	272
5.7.3.6	Der Bodensog.....	275
5.7.3.7	Beispiele.....	277
5.7.3.8	Unterschallanströmung	278
5.7.4	Rechnerische Bestimmung weiterer Beiwerte	279
5.7.4.1	Auftrieb- und Momentenbeiwert	279
5.7.4.2	Übrige Beiwerte	280

5.8	Ballistisch optimale Geschosse	281
5.8.1	Aerodynamisch optimale Geschossformen.....	281
5.8.1.1	Die Geschosstheorie nach W. HAACK	281
5.8.1.2	Anwendung der Newton'schen Theorie	283
5.8.1.3	Gültigkeitsbereich der Optimierungen.....	285
5.8.1.4	Optimierung des Geschosshecks.....	285
5.8.2	Praktische Auslegung einer optimalen Geschossform.....	287
5.8.2.1	Geschossspitze	287
5.8.2.2	Bemerkungen zu Zylinder und Heck	288
5.8.2.3	Stabilität und Folgsamkeit	289
5.8.3	Realisationen optimierter Geschosse	289
5.8.3.1	Experimentelle Bestätigung, allgemeine Bemerkungen	289
5.8.3.2	Untersuchungen mit Modellgeschossen.....	290
5.8.3.3	Artilleriegeschosse	291
5.8.3.4	Kleinkalibergeschosse.....	293
5.8.4	Optimierung der Stabilität.....	293
5.8.4.1	Optimale Geschosse und gyroskopische Stabilität	293
5.8.4.2	Geschosse maximaler Stabilität	295
5.8.4.3	Wie lang darf ein drallstabilisiertes Geschoss sein?	296
5.8.5	Reduktion des Basiswiderstandes	298
5.8.5.1	Das „Base bleed“-Prinzip.....	298
5.8.5.2	Leuchtpurgeschosse.....	299
5.9	Zur Außenballistik der un gelenkten Rakete	300
5.9.1	Vorbemerkung.....	300
5.9.2	Die Flugbahn.....	300
5.9.2.1	Allgemeines	300
5.9.2.2	Die Antriebsphase	300
5.9.2.3	Die Freiflugphase	302
5.9.2.4	Allgemeine Flugbahneigenschaften	302
5.9.3	Querwindverhalten von Raketen.....	303
6	Grundzüge der Endballistik.....	305
6.1	Einführung.....	305
6.1.1	Vorbemerkungen.....	305
6.1.2	Elementare Gesetzmäßigkeiten.....	305
6.1.3	Materialarten	306
6.1.4	Bezeichnungen und Definitionen.....	307
6.1.5	Das Backman-Goldsmith-Diagramm.....	308
6.2	Durchdringungsmodelle	309
6.2.1	Das Stanzmodell.....	309
6.2.2	Das Verdrängungsmodell.....	310

6.2.3	Durchschießen dünner Schichten	311
6.2.4	Das Erosionsmodell (<i>Autor: Dipl.-Ing. W. ODERMATT</i>)	312
6.2.4.1	Modellbescrieb	312
6.2.4.2	Hydrodynamische Betrachtung	313
6.2.4.3	Referenzziele	315
6.2.4.4	Maßgebende Parameter, Dimensionsanalyse	316
6.2.4.5	Vollständige Näherungsformel des Grenzdurchschlages	319
6.3	Verhaltensmerkmale verschiedener Materialien	320
6.3.1	Grundsätzliche Bemerkungen	320
6.3.2	Stahl	321
6.3.3	Aluminium	323
6.3.4	Beton und Mauerwerk	324
6.3.5	Holz	326
6.3.6	Sand, Erde	329
6.3.7	Glas, Keramik	330
6.3.7.1	Glas	330
6.3.7.2	Keramik	332
6.4	Schutzanordnungen	334
6.4.1	Geneigte Platten	334
6.4.2	Geschottete Plattenanordnungen	336
6.4.3	Asymmetrische Anordnungen	337
6.5	Probleme des ballistischen Schutzes	338
6.5.1	Allgemeines	338
6.5.1.1	Personenschutz und Sachwertschutz	338
6.5.1.2	Das Bedrohungspotenzial	338
6.5.1.3	Maßzahlen des Bedrohungspotenzials	339
6.5.2	Bedrohungs- und Schutzklassen	339
6.5.2.1	Allgemeines	339
6.5.2.2	Kurzwaffen	340
6.5.2.3	Langwaffen	341
6.5.3	Die Bedrohungswahrscheinlichkeit	342
6.5.3.1	Anteile der Bedrohungswahrscheinlichkeit	342
6.5.3.2	Verfügbarkeit und Häufigkeit	342
6.5.3.3	Bedrohungswahrscheinlichkeit bei Kurzwaffen	343
6.5.3.4	Bedrohungswahrscheinlichkeit bei Langwaffen	344
6.5.4	Schutzwahrscheinlichkeit	344
6.5.4.1	Durchschusswahrscheinlichkeit eines ballistischen Schutzes	344
6.5.4.2	Schutzwahrscheinlichkeit eines ballistischen Schutzes	347
6.5.5	Prüfung von ballistischem Schutz	348
6.5.5.1	Allgemeines	348

6.5.5.2	Prüfung auf Nicht-Durchschuss	351
6.5.5.3	Bestimmung der Verteilungsparameter	353
6.5.6	Beurteilung des Wirkungspotenzials hinter dem Schutz	355
7	Abprallende Geschosse	357
7.1	Einleitung.....	357
7.1.1	Vorbemerkung.....	357
7.1.2	Begriffserläuterung	357
7.2	Stoßtheorie.....	358
7.2.1	Stoßarten	358
7.2.2	Der zentrische, gerade Stoß.....	359
7.2.3	Der zentrische, schiefe Stoß.....	361
7.2.4	Der exzentrische, gerade Stoß.....	363
7.2.5	Der exzentrische, schiefe Stoß	364
7.2.6	Spezialfälle.....	366
7.3	Phänomenologie des Prellschusses.....	368
7.3.1	Festlegungen und Symbole	368
7.3.2	Einflussparameter des Prellschussverhaltens	369
7.3.3	Typische Abprallkonstellationen	370
7.3.4	Der senkrechte Schuss gegen eine harte Oberfläche.....	372
7.4	Das Geschoss als Massenpunkt	372
7.4.1	Prellkörper großer Masse	372
7.4.1.1	Vorbemerkung	372
7.4.1.2	Prellschusstheorie.....	373
7.4.1.3	Verlauf der Abprallfunktionen, Approximationen.....	376
7.4.2	Prellkörper geringer Masse	377
7.4.2.1	Allgemeines	377
7.4.2.2	Der maximale Ablenkwinkel	378
7.4.2.3	Geschwindigkeit und Energie	379
7.4.2.4	Geschossablenkung an Halmen und Zweigen	379
7.4.2.5	Regentropfen.....	381
7.5	Das Geschoss als starrer Körper.....	382
7.5.1	Allgemeines.....	382
7.5.2	Lage der Stoßnormalen bei verschiedenen Geschossformen.....	383
7.5.2.1	Bezeichnungen	383
7.5.2.2	Ellipsenförmige Rundkopfgeschosse.....	383
7.5.2.3	Parabelförmige Rundkopfgeschosse	384
7.5.2.4	Spitzgeschosse	384
7.5.2.5	Zylinder-, Kegelspitz- und Flachkopfgeschosse.....	385
7.5.3	Der Drehmomentenstoß auf das Geschoss.....	385
7.5.4	Wann fliegt ein Prellschuss stabil?	388

7.5.5	Eigenbewegung und Fluglage eines Prellschusses	389
7.5.5.1	Die Eigenbewegung	389
7.5.5.2	Fluglage und Stabilität	390
7.6	Die Flugbahn eines Prellschusses	392
7.6.1	Querschnittsbelastung und Luftwiderstandsbeiwert	392
7.6.2	Maximale Reichweiten	393
7.7	Weitere Prellschusstheorien	394
7.7.1	Theorie von SELLIER	394
7.7.2	Theorie von JAUHARI	394
7.7.3	Theorie von BIRKHOFF für Wasseroberflächen	395
8	Spezielle Anwendungen der Ballistik	397
8.1	Einleitung	397
8.2	Forensische Anwendungen (<i>Mitautor Dr. Fabiano RIVA</i>)	398
8.2.1	Flugbahnrekonstruktion	398
8.2.1.1	Kurze und lange Flugbahnen	398
8.2.1.2	Daten am Ereignisort	399
8.2.1.3	Beschaffung weiterer Daten	400
8.2.1.4	Visualisierung	403
8.2.2	Flugbahnrekonstruktion instabiler Geschosse	404
8.2.2.1	Ursachen instabiler Geschosse	404
8.2.2.2	Querschnittsbelastung und Luftwiderstandsbeiwert	406
8.2.2.3	Rekonstruktion	407
8.2.3	Fallbeispiele	408
8.2.4	Ballistik in der Blutspurenanalyse	412
8.2.4.1	Fragestellung	412
8.2.4.2	Die maximale Geschwindigkeit eines Blutstropfens	414
8.2.4.3	Anwendung	415
8.2.4.4	Fallbeispiele	416
8.3	Sicherheitsfragen auf Schießplätzen und in Schießanlagen	417
8.3.1	Sicherheit und Gefährlichkeit	417
8.3.2	Maximalschussweiten	417
8.3.3	Kurzschüsse	419
8.3.4	Rückpraller	420
8.3.5	Prellschüsse	422
8.3.5.1	Prellschüsse im Terrain	422
8.3.5.2	Prellschüsse an Einrichtungen und Schutzbauten	423
8.4	Außenballistik der Schrotgarbe	426
8.4.1	Einführung	426
8.4.2	Luftwiderstandsbeiwerte	427
8.4.2.1	Mess- und Auswerteprinzip	427

8.4.2.2	Garbenspitze.....	428
8.4.2.3	Garbenende	429
8.4.3	Die Flugbahn der Garbe	430
8.4.3.1	Garbenmittelpunkte.....	430
8.4.3.2	Fluglage der Garbe.....	431
8.4.4	Seitliche Ausdehnung.....	431

9 Einblick in die ballistische Messtechnik.....433

9.1	Einleitung.....	433
9.1.1	Allgemeines.....	433
9.1.2	Ballistische Messgrößen.....	434
9.1.2.1	Die wichtigsten physikalischen Messwerte der Ballistik.....	434
9.1.2.2	Welche Größen können gemessen werden?.....	434
9.2	Geschwindigkeitsmessungen.....	435
9.2.1	Frühe Messgeräte	435
9.2.1.1	Das ballistische Pendel.....	435
9.2.1.2	Die Messapparatur von LE BOULENGÉ	437
9.2.1.3	Der Papierfunkenchronograf.....	441
9.2.1.4	Der Kondensatorchronograf.....	442
9.2.2	Geschwindigkeitsmessung an der Mündung.....	442
9.2.2.1	Zeitnormale und Impulszähler	442
9.2.2.2	Mündungsspulen	443
9.2.3	Lichtschranken	444
9.2.3.1	Optoelektrische Bauelemente	444
9.2.3.2	Lichtschrankenmessungen und ihre Fehlerquellen	444
9.2.3.3	Digitale Lösungen	447
9.2.4	Radar	448
9.2.4.1	Historisches, Grundprinzipien	448
9.2.4.2	Geschwindigkeitsmessung	449
9.2.4.3	Flugbahnvermessung	450
9.2.4.4	Einschränkungen bei Radarmessungen.....	452
9.2.5	Gegenlichtaufnahmen.....	452
9.3	Innenballistische Druckmessungen	454
9.3.1	Allgemeines.....	454
9.3.2	Historische Messverfahren.....	454
9.3.2.1	Die ersten Messversuche.....	454
9.3.2.2	Methode der sukzessiven Laufverkürzung	456
9.3.2.3	Methode der Rücklaufmessung.....	457
9.3.2.4	Methode der „Seitenstollen“	458
9.3.3	Messung mit Stauchkörper.....	459
9.3.3.1	Messprinzip.....	459

9.3.3.2 Fehlerquellen.....	461
9.3.3.3 Patronierte Munition	461
9.3.4 Piezoelektrische Verfahren	462
9.3.4.1 Der piezoelektrische Effekt.....	462
9.3.4.2 Messtechnik	462
9.3.4.3 Fehlerquellen.....	464
9.3.4.4 Patronierte Munition	464
9.3.4.5 Andere elektrische Druckmessverfahren	466
9.4 Außenballistische Messungen	466
9.4.1 Grundlegendes.....	466
9.4.2 Die Bestimmung der Geschossbeiwerte.....	467
9.4.3 Die Eigenbewegung des Geschosses	468
9.4.3.1 Eigenbewegung und Geschossbeiwerte	468
9.4.3.2 Bestimmung des Anstellwinkels eines Geschosses	468
9.4.3.3 Bestimmung der Trägheitsmomente	471
9.5 Bildgebende Verfahren.....	472
9.5.1 Allgemeines.....	472
9.5.2 Lichtquellen.....	473
9.5.2.1 Kontinuierliche Lichtquellen	473
9.5.2.2 Diskontinuierliche Lichtquellen.....	473
9.5.3 Gegenlichtaufnahmen	474
9.5.3.1 Schlierenaufnahmen.....	474
9.5.3.2 Schattenaufnahmen	475
9.5.4 Kinematografie.....	476
9.5.4.1 Funkenkinematografie nach CRANZ-SCHARDIN.....	476
9.5.4.2 Hochgeschwindigkeitskamera IMACON 200	478
9.5.4.3 Hochgeschwindigkeits-Videokameras.....	479

Anhang

Literaturverzeichnis	483
Abbildungsnachweis	492
Sachverzeichnis	495