

T. Hauer¹ · N. Huschitt¹ · M. Kulla² · B. Kneubuehl³ · C. Willy⁴

¹ Klinik für Allgemein-, Viszeral- und Thoraxchirurgie, Chirurgisches Zentrum, Bundeswehrkrankenhaus Ulm

² Klinik für Anästhesie, Intensiv- und Rettungsmedizin, Bundeswehrkrankenhaus Ulm

³ Zentrum Forensische Physik/Ballistik, Institut für Rechtsmedizin der Universität Bern

⁴ Chirurgisches Zentrum, Bundeswehrkrankenhaus Ulm

Schuss- und Splitterverletzungen im Gesichts- und Halsbereich

Aktuelle Aspekte zur Wundballistik

“... the nature of war injuries is different in every war ...”

Col. David C. Polly, Jr, Chief Department of Orthopaedic Surgery and Rehabilitation, Walter Reed Army Medical Center [13]

Die sich verschärfende militärische Lage in Nordafghanistan führt dazu, dass zunehmend auch der deutsche Militär-Kopf-Hals-Chirurg unmittelbar mit kriegstypischen Verletzungsmustern konfrontiert wird. Im Irak starben bisher 4747 Soldaten und in Afghanistan 2249 Soldaten (Stand: 21.12.2010; [12, 14]). Hiervon wurden durch Feindeinwirkung („hostile-related“) 75–80% und ohne Feindeinwirkung („non-hostile-related“) 20–25% getötet; Mitte 2007 war das Verhältnis noch 55% zu 45%; [11, 12, 14]. Während sich im Irak seit 2008 jährlich die Anzahl getöteter Soldaten halbiert, zeigt sich in Afghanistan ein stetiger Anstieg. So starben im Jahr 2010 in Afghanistan 692 Soldaten (im Irak waren es im gleichen Zeitraum 60 Soldaten). Haupttodesursache ist heute in beiden Ländern die Verletzung infolge der Explosion improvisierter Sprengsätze („improvised explosive device“, IED), die etwa 50% aller Todesfälle ausmachen. In der Ge-

samtsicht wurden im Irak und Afghanistan bislang über 41.500 Soldaten verletzt (Stand: 21.12.2010; [12, 14]).

Statistisch nehmen Schuss- und Splitterverletzungen im Gesichts- und Halsbereich zu. Aufgrund eines verbesserten ballistischen Körperschutzes der Soldaten im Einsatz (Splitterschutzwesten, beschusshemmende Westen, Gefechts-helm) werden schwere Explosionsverletzungen häufiger überlebt. Letale Verletzungen des Körperstammes gehen zugunsten von penetrierenden Verletzungen der Extremitäten, des Gesichts- und Halsbereichs zurück, da diese Körperregionen nur unzureichend geschützt werden können. So sind z. B. Gesicht und Hals bei Bordschützen und Kommandanten gepanzerter Fahrzeuge besonders exponiert (■ Abb. 1). Außerdem nimmt in den modernen kriegerischen Auseinandersetzungen der Anteil der Splitterverletzungen im Vergleich zu den Geschossverletzungen deutlich zu.

Statistisch nehmen Schuss- und Splitterverletzungen im Gesichts- und Halsbereich zu

Die Behandlung dieser Verletzungen stellt für den im Militärdienst stehen-

den Kopf-Hals-Chirurgen aufgrund der eingeschränkten infrastrukturellen Möglichkeiten eine Herausforderung dar. Vor allem bei gleichzeitigem Anfall mehrerer Patienten besteht die Anforderung, mit einfachen Mitteln schnell und zuverlässig sichere Informationen über das Verletzungsausmaß zu gewinnen und die wesentlichen therapeutischen Schritte einzuleiten [9]. Für die Akutbehandlung ist das Wissen über die anatomische Verteilung und Entstehungsursachen der Verletzungen von Bedeutung. Hierzu gehören auch Grundkenntnisse der Wundballistik, bei der neben der Wirkung moderner Schusswaffen auch die von energiereichen Splintern berücksichtigt werden muss. Dieses Wissen ist zusätzlich für die Entwicklung und Anwendung protektiver Maßnahmen (Verhalten, Kleidung, Schutzhelm, Splitterschutzweste usw.) von großem Interesse. Schließlich können aus diesem Wissen auch Informationen über die zu erwartenden fachlichen Anforderungen an das ärztliche Team bzw. an die einzelnen Sanitätsoffiziere gewonnen werden, aus denen dann objektiv das notwendige Weiterbildungskonzept und die hierfür erforderliche personelle und materielle Infrastruktur abgeleitet werden kann [34].

Bei der enormen Anzahl von zivilen Hilfsorganisationen, die mit ärztlichem

HNO 2011 · 59:752–764 DOI 10.1007/s00106-011-2365-1
© Springer-Verlag 2011

T. Hauer · N. Huschitt · M. Kulla · B. Kneubuehl · C. Willy

Schuss- und Splitterverletzungen im Gesichts- und Halsbereich. Aktuelle Aspekte zur Wundballistik

Zusammenfassung

Für den im militärischen Umfeld tätigen Kopf-Hals-Chirurgen sind Grundkenntnisse über das Verhalten von Geschossen und Splintern im menschlichen Körper von Bedeutung, um hieraus notwendige Konsequenzen für Diagnostik und Therapie von Schuss- und Splitterverletzungen des Kopf-Hals-Bereichs ziehen zu können. Ein Geschoss unterliegt vielen Einflussfaktoren, die sein Verhalten nach Eintritt in den menschlichen Körper beeinflussen. Entscheidend ist, wie viel Energie an den Körper abgegeben wird. Langwaffengeschosse besitzen im Vergleich zu Kurzwaffengeschossen meist eine höhere Mündungsenergie, weshalb Effekte außerhalb des eigentlichen Geschosswegs eine größere Rolle spielen. Während die meisten Vollmantelgeschosse ihre Energie erst nach 12–20 cm abgeben, ist dies bei Teilmantelgeschossen bereits unmittelbar nach dem Einschuss der Fall. Dadurch ergibt sich bei Extremitätenverletzungen ein erheblicher Unterschied, nicht

jedoch bei langen Schusskanälen im Körper (diagonale Schüsse). Splitterverletzungen entstehen mit einer ähnlich hohen kinetischen Energie wie jene der Kurz- oder Langwaffengeschosse. Allerdings bauen Splitter meist die gesamte Energie im Körper ab, was zu entsprechend großen Verletzungen führen kann. Die HNO-ärztlich relevanten Verletzungen moderner bewaffneter Konflikte betreffen in 60% der Fälle Weichteile, dabei das Gesicht 3-mal häufiger als den Hals. In 30% der Fälle liegt gleichzeitig eine intrakranielle oder Halswirbelsäulenverletzung vor. Aufgrund eines hohen Kontaminationsgrads der Wunden beträgt die Infektionsrate etwa 15%, teilweise mit kompliziertem und/oder multiresistentem Keimspektrum.


Schlüsselwörter

Schussverletzungen · Penetrierende Verletzungen · Halsverletzungen · Wundballistik · Kriegschirurgie

und nichtärztlichem Personal in Krisengebieten Hilfe leisten (z. B. International Committee of the Red Cross, Médecins Sans Frontières), scheinen Kenntnisse über Verletzungsmuster- und -ursachen in Krisengebieten auch für den Kopf-Hals-Chirurgen aus dem zivilen Bereich zunehmend von Interesse zu sein. Letztendlich muss heutzutage auch berücksichtigt werden, dass mögliche Gewaltakte im Inland, wie es unsere Nachbarländer in Madrid (11.03.2004) und London (07.07.2005) erleben mussten, den traumachirurgisch tätigen HNO-Arzt auch im Inland mit kriegstypischen Verletzungen konfrontieren können [16].

Vor diesem Hintergrund sollen nachfolgend Hals-Nasen-Ohren-ärztlich relevante Verletzungsmuster, -arten und -ursachen moderner bewaffneter Konflikte und Kriege dargestellt und die für die Behandlung wesentlichen Grundkenntnisse der modernen Wundballistik vermittelt werden. Für die Analyse wurden Medline-Recherchen (1949–2010) mit den Schlüsselwörtern „combat“, „trauma“, „military“, „surgery“ und im Worldwide Web zahlreiche Google-Suchläufe durchgeführt. Insgesamt ergibt sich eine Literaturliteraturdatenbank von 10.208 Literaturstellen, von denen sich letztlich mit Verletzungen im Kopf-Hals-Bereich 131 Artikel im Detail beschäftigen. Ebenfalls wurde die aktuelle Literatur zum Thema Wundballistik (Medline-Recherche 1965–2010 mit den Schlüsselwörtern „wound“, „ballistic(s)“, „missile“, „bullet“) berücksichtigt.

Verwundungsursachen

Von Bedeutung sind Verletzungen durch energiereiche Splitter von Granaten, Gewehrgeschosse sowie Verletzungen infolge von Flugunfällen und terroristischen Angriffen. Einzelne Analysen zeigen, dass die Hauptursache von Verletzungen im Irakkrieg die relativ weit verbreitete 155-mm-Artilleriegranate ist (mit „Anti-Material-“ und „Anti-Personnel-Sprengladung“) – teilweise verdeckt unter dem Asphalt und meist ferngezündet durch ein Mobiltelefon. Nicht selten sind Sprenggranaten dieser Art oder eigenfabrizierte Minen (IED,  **Abb. 2**) auf Fahrzeugen unterschiedlichster Größe (vom Taxi bis zum Cargo-Truck) aufgebracht und

Bullet and shrapnel injuries in the face and neck regions. Current aspects of wound ballistics

Abstract

A basic understanding of the ballistic behaviour of projectiles or fragments after entering the human body is essential for the head and neck surgeon in the military environment in order to anticipate the diagnostic and therapeutic consequences of this type of injury. Although a large number of factors influence the missile in flight and after penetration of the body, the most important factor is the amount of energy transmitted to the tissue. Long guns (rifles or shotguns) have a much higher muzzle energy compared to handguns, explaining why the remote effects beyond the bullet track play a major role. While most full metal jacket bullets release their energy after 12–20 cm (depending on the calibre), soft point bullets release their energy immediately after entry into the human body. This results in a major difference in extremity wounds, but not so much in injuries with

long bullet paths (e.g. diagonal shots). Shrapnel wounds are usually produced with similarly high kinetic energy to those caused by hand- and long guns. However, fragments tend to dissipate the entire amount of energy within the body, which increases the degree of tissue disruption. Of all relevant injuries in the head and neck region, soft tissue injuries make up the largest proportion (60%), while injuries to the face are seen three times more often than injuries to the neck. Concomitant intracranial or spinal injury is seen in 30% of cases. Due to high levels of wound contamination, the infection rate is approximately 15%, often associated with a complicated and/or multiresistant spectrum of germs.

Keywords

Gunshot wounds · Penetrating wounds · Neck injuries · Wound ballistics · War surgery



Abb. 1 ◀ Schwere Verletzungen des Gesichts- und Halsbereichs, hier durch Einwirkung einer RPG-7 („rocket propelled grenade“), sind trotz ballistischer Schutzweste und Gefechtshelm an der Tagesordnung. Afghanistan, Provinz Baghlan, Khilagay Base, April 2010. (Foto: Dr. Toperczer, mit freundl. Genehmigung)

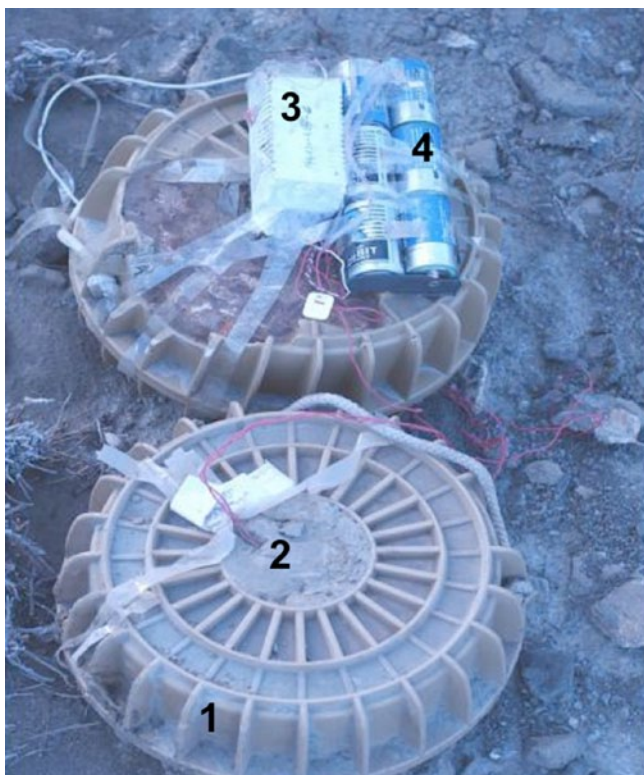


Abb. 2 ◀ Beispiel für ein „improvised explosive device“ (IED). Üblicherweise aus 4 Komponenten bestehend: 1 Wirkladung, in diesem Fall zwei Panzerabwehrminen, 2 Übertragungsladung, 3 Zündsystem („Spider-Device“ MOD 1) und 4 Batterie-Pack (6 × 1,5 V), in diesem Fall ferngesteuert zündbar („remote controlled IED“, RC-IED). (Mit freundl. Genehmigung der Abteilung J3 EOD CIED)

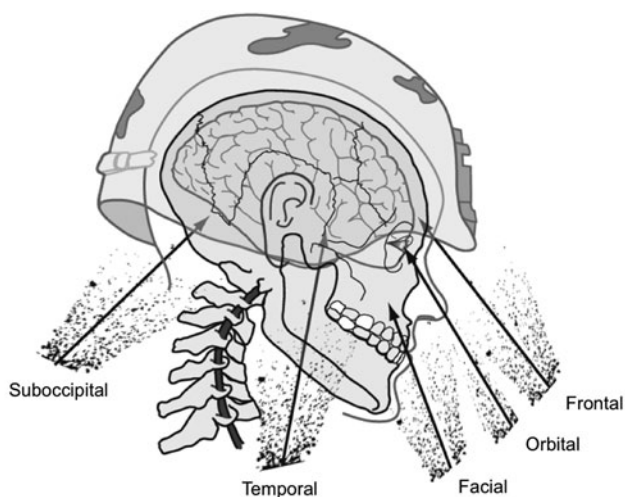


Abb. 3 ◀ Vektoren möglicher Geschosse und Splitter auf den behelmten Kopf. (Mod. nach [39], S. 89, mit freundl. Genehmigung des Borden Institute, Washington/DC 2007)

mit Propangas oder anderen „Brandbeschleunigern“ kombiniert, um die Brennwirkung zu erhöhen. Verwendet werden zudem konventionelle Panzerabwehr-Granatwerfer („rocket propelled grenade launcher“, „Panzerfaust“).

Die „asymmetrische Kriegsführung“ im Irakkrieg führte dazu, dass bereits im Jahr 2005 über 50% aller Kriegsopter durch die Einwirkung von IEDs und anderen „kleinen“ Bomben auftraten, während es ein Jahr zuvor noch 26% waren [17]. Eine identische Entwicklung bestand auch in Afghanistan. Derartige Waffen mit Splitterwirkung führen besonders zu Kopf-Hals-Verletzungen. So werden bei vorwiegendem Einsatz von am Straßenrand verborgenen IEDs explosionsartig Splitter und Dreck von unten in das Gesicht, den Hals und den Nacken getrieben, wodurch der protektive Effekt des Kevlar-Helms vermindert wird (▣ **Abb. 3**). Die Anzahl der Gesichts-, Schädel- und Halsverletzungen nahm daher stetig zu [34].

Heute ist die Rate von Verletzungen durch „fragmentation weapons“ die höchste aller neuzeitlichen kriegerischen Konflikte [23]. So sind 61–79% der Verletzungen im Kopf-Hals-Bereich durch die Einwirkung von Splitter im Rahmen eines Explosionsereignisses bedingt [3, 18, 23, 27, 34]. Bei penetrierenden Verletzungen allgemein (ohne Berücksichtigung einer bestimmten Körperregion) steigt dieser Anteil auf über 80% [19]. Dabei sind 9–27% der Verletzungen durch Gewehrscüsse bedingt („gun shot wounds“, GSW; [3, 9, 27]). Dieser Anteil ist extrem abhängig von Veränderungen der militärischen Situation, die das Verhältnis der Verletzungsursachen sofort verändern kann. Die Zunahme der Intensität von Feuergefechten im Orts- und Häuserkampf „demaskiert“ beispielsweise die weniger geschützten Körperareale unmittelbar. So führte die Veränderung der militärischen Lage im Irak im April 2004 nicht nur zu einer Verdoppelung der Zahl von Verwundeten, sondern auch zu einer drastischen Zunahme der Kopfschüsse. Der Neurochirurg Poffenbarger vom 31st Combat Support Hospital Bagdhad formulierte: „We’ve done more (craniotomies) in eight weeks than the previous neurosurgery team did in eight months“ [35].

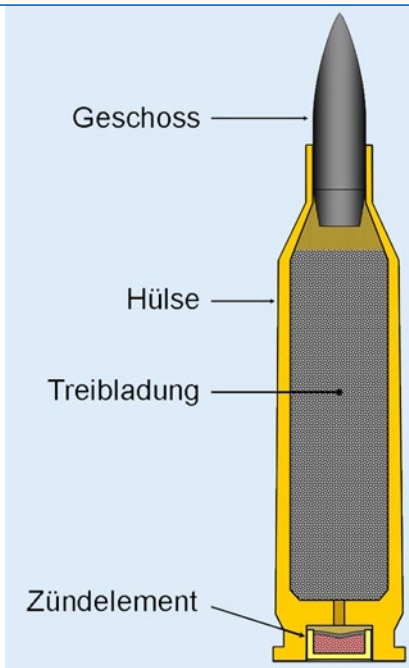


Abb. 4 ▲ Bauteile einer Patrone. (Aus [38], mit freundl. Genehmigung)

Wundballistik für den Kliniker

Nachfolgend sollen die klinisch relevanten Aspekte der modernen Wundballistik erörtert werden, um ein tiefer gehendes Verständnis für die Besonderheiten dieser penetrierenden Verletzungen zu erzeugen. Hierfür werden die physikalischen Vorgänge, die auf das Gewebe durch die unterschiedlichen Geschosse und Splitter

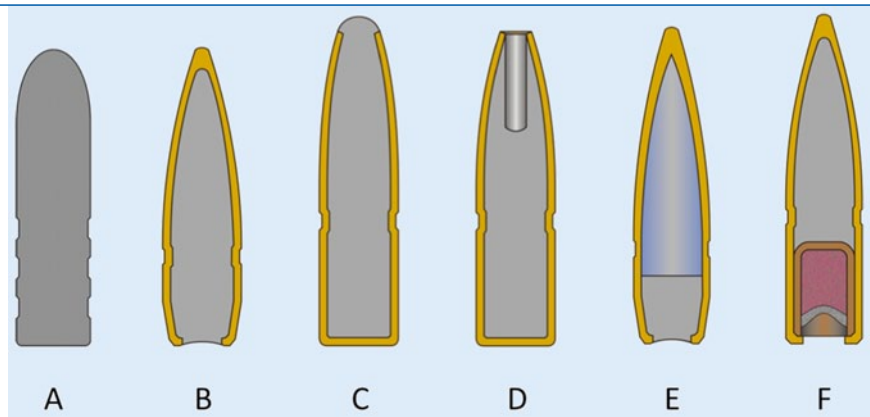


Abb. 5 ▲ Geschosskonzepte (Gewehr). A Vollbleigeschoss, B Vollmantelgeschoss, C Teilmantelgeschoss, D Teilmantelgeschoss mit Lochspitze (Hohlspitzengeschoss), E Stahlkerngeschoss, F Leuchtschurgeschoss. (Aus [38], mit freundl. Genehmigung)

einwirken, charakterisiert. Das Verhalten von Projektilen und Splintern im menschlichen Gewebe soll dargestellt werden, um für zu erwartende Auswirkungen auf das Zielorgan zu sensibilisieren. Hierzu scheint es unverzichtbar, auch auf die typischen Schusswaffen in Krisengebieten sowie die Quellen von hochenergetischen Splintern im Rahmen von Granatschussverletzungen und Bombenattentaten einzugehen [24]. Da auch Schussverletzungen im eigenen Land vorkommen, werden die in Deutschland gebräuchlichen Waffen ebenfalls aufgeführt (► **Infobox 1 „Waffenkunde“**). Abschließend werden die typischen Verletzungsmuster der Schuss- und Splitterverletzungen im Gesicht- und Halsbereich dargestellt.

Der Gewebeschaden entsteht durch Abbremsen des Projektils und der dadurch bedingten Energieabgabe an die Umgebung. Die Wirkung des Geschosses ist hierbei abhängig von der Geschwindigkeit, der Größe, der Masse, der Form und dem Auftreffwinkel des Geschosses. Nach der Mündungsgeschwindigkeit des Projektils unterscheidet man Geschosse niedriger Geschwindigkeit („low velocity“, unter 600 m/s) von Hochgeschwindigkeitsgeschossen („high velocity“, deutlich über 600 m/s). Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass neben der reinen Mündungsgeschwindigkeit auch andere Einflussfaktoren wie Masse, Aufbau und Eigenschaften des Geschosses die Energieabgabe an das Gewebe und damit

Tab. 1 Kinetische Energie ausgewählter Kurz- und Langwaffen (exemplarisch)					
Waffenart	Beispiele	Kaliber (mm)	Masse des Projektils (g)	Mündungsgeschwindigkeit (m/s)	Mündungsenergie (J)
Kurzwaffen	Pistole PB (Heckler & Koch) Pistole P99 (Walther)	9×19 Luger	8,0	350	490
	Maschinenpistole MP7 (Heckler & Koch)	4,6×30	2,0–2,6	725	520
	Maschinenpistole MP75 (Heckler & Koch)	9×19 Luger	7,5–8,0	420	650
	Revolver Modell 27 (Smith & Wesson)	9×33 (.357 Magnum)	10,3	425	723
	Revolver Modell 29 (Smith & Wesson)	11×33 (.44 Magnum)	15,5	450	1574
	Langwaffen	Gewehr AK-74 (Ischmasch-Werke. u. a.)	5,45×39	3,45	910
Gewehr G36 (Heckler & Koch) Gewehr M16 (Colt)		5,56×45	4,0	920	1693
Gewehr AK-74 (Ischmasch-Werke. u. a.)		7,62×39	8,0	710	2016
Gewehr G3 (Heckler & Koch)		7,62×51	9,5	830	3272

Infobox 1 Waffenkunde

Kurzwaffen: Faustfeuerwaffen (Pistolen und Revolver) und Maschinenpistolen. Die Polizeibehörden der Bundesländer führen Pistolen der Hersteller Heckler & Koch (P7, P10, P30, P2000), Walther (P5, P99) oder Sig Sauer (P225, P 228). Eine relativ neu eingeführte Dienstwaffe der Polizei ist die Walther P99 Q und DAO. Historisch betrachtet waren die Pistolen Walther PP und PPK (Modellbezeichnung „PP“ steht für „Polizeipistole“, „PPK“ für „Polizeipistole Kriminal“) des Kalibers 7,65 mm Browning für den Polizei- und Behördendienst die am weitesten verbreiteten Waffen. Nach 1972 wurden beide aus dem Polizeidienst ausgesondert, um den Anforderungen der Polizei nach Waffen zur Verwendung der stärkeren Patrone im Kaliber 9 mm nachzukommen. Da in der Folgezeit viele Exemplare günstig an Erwerbsberechtigte verkauft wurden, zählen die Walther PP und PPK auch heute noch zu den häufigsten Tatwaffen in Deutschland. Bundespolizei und Zoll führen die P30 von Heckler & Koch, während GSG9 und Spezialeinsatzkräfte (SEK) der Polizei teilweise Sig-Sauer-Modell 226, Glock 17 und diverse Revolver von Smith & Wesson verwenden. Bei der Bundeswehr wurde im Jahr 2000 die Pistole P8 der Fa. Heckler & Koch als Nachfolger der Walther P1 die Standard-Ordonnanzpistole. Das Funktionsprinzip entspricht dem eines Rückstoßladers mit starr verriegeltem Verschluss. Maschinenpistolen sind vollautomatische Waffen, die in Serienfeuer Pistolenmunition verschießen (Schusskapazität: 30–50 Schuss). Bei Bundeswehr und Bundespolizei sind als Maschinenpistolen die MP5 (Kaliber 9×19 mm; neben der „Uzi“ von Israel Military Industries eine der weltweit am meisten verbreiteten Maschinenpistolen) und die MP7 (Kaliber 4,6×30 mm) in Gebrauch.

Langwaffen: Werden nach Kriterien des deutschen Waffenrechts definiert: „Dies sind Schusswaffen, deren Lauf und Verschluss in geschlossener Stellung insgesamt länger als 30 cm sind und deren kürzeste bestimmungsgemäß verwendbare Gesamtlänge 60 cm überschreitet; Kurzwaffen sind alle anderen Schusswaffen.“ (WaffG Anlage 1 zu §1 Abs. 4, Begriffsbestimmungen). Langwaffen sind meist Schulterwaffen mit langem Lauf (Gewehre), die mit 2 Händen zu bedienen sind (Büchsen mit gezogenem Lauf, Flinten mit glattem Lauf). Sie eignen sich wegen ihrer höheren Präzision zum Gebrauch auf größere Distanzen. Zu den Langwaffen gehören Jagdgewehre, Sportwaffen, Armeegewehre und Maschinengewehre. Bei den heutigen Armeegewehren handelt es sich fast ausschließlich um automatische Waffen, die sich meist das Prinzip des Gasdruckladers zunutze machen (nach Abgabe des Schusses wird durch eine Bohrung in der Laufwandung Gas entnommen und mit der Energie dieses unter hohem Druck stehenden Gases der Verschluss entriegelt und geöffnet, wobei die leere Patronenhülse ausgeworfen wird. Beim folgenden Schließen des Verschlusses durch die Verschlussfeder wird eine neue Patrone ins Patronenlager geführt). Maschinengewehre sind ebenfalls automatische Waffen, die jedoch für eine große Schusskapazität ausgelegt sind. Das Sturmgewehr G36 der Fa. Heckler & Koch (Kaliber 5,56×45 mm NATO) ist seit 1997 die Standardinfanteriewaffe der Bundeswehr. Es löste das Gewehr G3 (Kaliber 7,62×51 mm) ab. In den US-Streitkräften ist das Sturmgewehr M16 der Fa. Colt (ebenfalls Kaliber 5,56×45 mm NATO) im Einsatz. In den Ostblock-Staaten wurde und wird bis heute das sowjetische Sturmgewehr AK-47 („Awtomat Kalaschnikowa, obrasza 47“) verwendet, besser bekannt unter dem Namen „Kalaschnikow“. Die Waffe gilt als extrem zuverlässig und ist die am meisten produzierte Waffe weltweit. Schätzungen gehen von 80–100 Mio. produzierten Exemplaren aus. Etwa 60 Staaten rüsten ihre Armee mit dem AK-47 (in verschiedenen Modifikationen und Weiterentwicklungen) aus. Aufgrund der robusten Eigenschaften und der relativ hohen Verfügbarkeit erfreute sich die „Kalaschnikow“ auch bei irregulären Armeen, Partisanen und „Freiheitskämpfern“ großer Beliebtheit.

Analog zu den Waffenentwicklungen im Westen wurde 1974 auch in den Ostblockstaaten ein Armeegewehr mit kleinerem Kaliber eingeführt, das AK-74 (Kaliber 5,45×39 mm), welches jedoch nie eine annähernd hohe Verbreitung fand. Mittlerweile gibt es zahlreiche Weiterentwicklungen der AK-Familie (AK-100+-Serie).

Reaktive Panzerbüchsen („Panzerfaust“): tragbare Granatwaffen zur Panzerabwehr, (Panzerabwehrhandwaffen). Sie verschießen Hohlladungsgeschosse, die mit Rückstoß anstatt mit konventionellen Treibladungen arbeiten. Die Granaten erzielen selbst bei geringen Geschwindigkeitsebenen eine hohe Durchschlagskraft. *RPG* (russ.: „Rutschnoi Protivotankowij Granatomjot“) ist eine sowjetisch-russische Serie von reaktiven Panzerbüchsen. Die Abkürzung steht im Englischen als Backronym für „rocket propelled grenade“ (raketenangetriebene Granate). Die Waffe wird von der Schulter aus abgefeuert und kann sowohl gegen Fahrzeuge als auch gegen Personen eingesetzt werden. *RPG* sind aber auch auf kurze Distanz auf stehende oder langsame Ziele als Luftabwehrwaffe einsetzbar, wie der Abschuss zweier UH-60 Black Hawks während der Schlacht von Mogadischu zeigte. Der klassische Gefechtskopf der *RPG-7*-Granate enthält eine Hohlladung. Trifft der Gefechtskopf auf einen harten Gegenstand auf, so entfaltet sich die nach vorn gerichtete Sprengwirkung und durchdringt bis zu 300 mm Panzerstahl. Der geringe Preis und die Verfügbarkeit der Waffe in großen Mengen machen sie neben dem AK-47 zur bevorzugten Low-Tech-Waffe der asymmetrischen Kriegführung.

die Geschosswirkung beeinflussen, werden häufig auch die Begriffe „Low-Energy-“ vs. „High-Energy-Waffe“ verwendet.

Die mittlere Mündungsenergie (E_0) der meisten Kurzwaffen liegt bei etwa 500 J (schwere Kurzwaffen und Maschinenpistolen können bis zu 1000 J erreichen). Das Projektil des früheren NATO-Kalibers 7,62 mm der Armeegewehre besitzt eine Masse von 9,5 g, beim Verlassen des Laufs wird eine Mündungsgeschwindigkeit von 780–830 m/s erreicht. Daraus resultiert eine Mündungsenergie von 2900–3300 J. Das aktuelle NATO-Standardkaliber 5,56 mm erreicht trotz eines wesentlich kleineren Projektils mit einer Masse von 4 g eine Mündungsenergie von 1600–1800 J, da das Geschoss mit einer Mündungsgeschwindigkeit von bis zu 940 m/s (je nach Waffe) den Lauf verlässt (■ **Tab. 1**).

➤ Das Verwundungspotenzial eines Geschosses ist nicht proportional zu dessen Geschwindigkeit

Da Energie nicht vernichtet, sondern nur auf einen anderen Körper abgegeben werden kann (Gesetz der Energieerhaltung), wird die kinetische Energie beim Auftreffen auf einen anderen Körper an diesen abgegeben. Die kinetische Energie ($E_{\text{kin}} = 1/2 m \times v^2$; m =Masse, v =Geschwindigkeit) steigt mit dem Quadrat der Geschwindigkeit, die abhängig ist von der Mündungsgeschwindigkeit der Feuerwaffe und der zurückgelegten Flugstrecke des Projektils (allerdings ist es technisch absolut unmöglich, einem Geschoss die doppelte Geschwindigkeit zu geben, ohne gleichzeitig die Geschossmasse drastisch zu reduzieren). Da viele High-Velocity-Geschosse aber nicht ihre gesamte kinetische Energie an das Gewebe abgeben (insbesondere Vollmantelgeschosse), ist das Verwundungspotenzial eines Geschosses keineswegs proportional zu dessen Geschwindigkeit [15]. Form und Materialbeschaffenheit der Geschosse haben einen größeren Einfluss auf das Ausmaß der Gewebeerstörung als die Geschwindigkeit [7, 25, 26].

Folgende Faktoren beeinflussen die Wirksamkeit eines Geschosses [20]:

- Eintrittsgeschwindigkeit (Beschleunigung, Schussdistanz),
- Kaliber und Masse des Projektils,
- Projektilbeschaffenheit,
- Stabilitätsverlust nach Eintritt in das Treffergewebe,
- Art des Treffergewebes,
- Kontaminationsgrad.

Diese physikalischen Betrachtungen sollten jedoch nicht zu der Annahme verleiten, der menschliche Körper gleiche einem Gelatineblock, wie er bei Beschussversuchen verwendet wird. Die Energieabgabecharakteristik eines Geschosses im Gelatineblock ähnelt zwar der im menschlichen Körper. So kann man aufgrund der Gelatineschüsse recht genau voraussagen, in welcher Tiefe welches Ausmaß an Zerstörung und wo beispielsweise Splitter zu erwarten sind. Der entscheidende Unterschied besteht jedoch darin, dass unterschiedliche Gewebe auf den Energieeintrag unterschiedlich reagieren. Die *Wirkung eines Schusses* (und damit die Verletzungsschwere) hängt also neben der physikalischen Wirksamkeit des Geschosses ganz wesentlich von der Treffpunktlage und dem Verlauf des Schusskanals im Körperinnern ab und lässt sich stets erst nach der Schussabgabe bestimmen. Letztlich spielt hierbei auch der psychische und physische Zustand des Getroffenen eine Rolle.

Die Effekte beim Eindringen eines Geschosses in den menschlichen Körper können mit einem Sprung ins Wasser verglichen werden: Es kommt zu einer direkten Verdrängung des Wassers durch den Springer und zu einer wellenförmigen Ausbreitung in seiner Umgebung, abhängig von der Art des Aufpralls. Ähnlich wie beim Sprung ins Wasser werden die wundballistischen Vorgänge nach Eindringen des Projektils in das Gewebe in hohem Maß davon beeinflusst, in welchem Bewegungszustand (stabil/in-stabil) und in welcher Lage sich das Geschoss zum Zeitpunkt des Auftreffens befindet (Aufreffwinkel: Winkel zwischen der Flugrichtung des Geschosseschwerpunkts und der Zielfläche; Anstellwinkel: Winkel zwischen der Flugrichtung und der Geschossachse). Im unmittelbaren Verlauf des Geschosswegs wird Gewebe durch das Projektil bzw. durch die massi-

Infobox 2 Munitionskunde

Patrone: besteht aus den folgenden Bauteilen (Abb. 4): Zündelement, Treibmittel, Hülse und Geschoss (d. h. Projektil). Für die Wundballistik sind insbesondere die Beschaffenheit und der Aufbau des Geschosses von Bedeutung, da dieses in den Körper eindringt und dabei mit dem Gewebe interagiert. Die Hülse besteht meist aus Messing (seltener aus Stahl oder Aluminium) und beinhaltet das notwendige Treibmittel (Nitropulver auf der Basis von Nitrozellulose). Im Hülsenboden sitzt das Zündelement, auf das wenige Millisekunden nach Schussauslösung der Schlagbolzen trifft. Dabei detoniert der Zündsatz und bringt die Treibladung durch Stoßwelle und Feuerstrahl zum Brennen. Projektilaufbau und -spitze werden den gewünschten zielballistischen Anforderungen angepasst.

Kaliber: In der Regel ist damit der Innendurchmesser des Waffenlaufs gemeint (z. B. 9 mm), oft mit zusätzlicher Angabe der Länge der Hülse (z. B. 9 × 19 mm, 5,56 × 45 mm, 7,62 × 51 mm). In angloamerikanischen Ländern wird das Kaliber i. d. R. in Inches angegeben, meist unter Nennung des Herstellers, z. B. .223 Remington (entspricht 5,56 mm) oder .308 Winchester (entspricht 7,62 mm). In den meisten Armeen wurde nach 1945 das Kaliber 7,62 mm Weichkern als einheitlicher Standard für Sturmgewehre eingeführt, in Deutschland in dem Gewehr G3 und dem Maschinengewehr MG3, in den Ostblockstaaten im Sturmgewehr AK-47. Die Munition des AK-47 ist mit einer Hülsenlänge von 39 mm allerdings etwas kürzer und auch schwächer als die NATO-Standardmunition. Nach Einführung eines Gewehrs mit kleinerem Kaliber in die US-Streitkräfte in den 1960er-Jahren setzte sich das neue Kaliber auch bei den anderen Armeen des transatlantischen Verteidigungsbündnisses durch. Das Kaliber 5,56 × 45 mm NATO ist heute Standardkaliber und wird in den meisten Sturmgewehren (Colt M16A4, Heckler & Koch G36, Steyr AUG, FAMAS, AK-101) verwendet.

Geschosskonzepte: *Vollgeschosse* bestehen aus einem homogenen Material (z. B. Blei) und finden sich überwiegend im sportlichen Bereich (Luftdruckwaffen, Kleinkalibermunition, Abb. 5a). Bei *Mantelgeschossen* ist der Kern (meist Blei) mit einer Hülle (Mantel meist aus Kupfer-, Messing- oder Stahl) aus einem anderen (härteren) Metall überzogen. Der Mantel schützt den Lauf von Büchsen vor dem Abrieb des weicheren Bleis, verhindert zugleich eine Verformung oder ein Zersplittern des Bleikerns beim Auftreffen. Der Kern wiederum bildet die gewichtgebende Masse. Bei den *Vollmantelgeschossen* (Armeemunition) schließt der Mantel die Spitze komplett ein und ist am Boden meist offen (Abb. 5b). Bei *Teilmantelgeschossen* ist der Kern nicht vollständig von Mantelmaterial umhüllt, sondern liegt im Bereich der Geschossspitze frei (Abb. 5c), was nach dem Eindringen i. d. R. durch den im Bleikern erzeugten Druck zu einer Deformierung des Projektils führt. Dadurch wird die Geschossenergie auf das Ziel übertragen und der Wundkanal vergrößert. Die meisten Jagdgeschosse sind Teilmantelgeschosse. Eine Sonderform ist das sog. *Hohlspitzgeschoss* (Abb. 5d), in dessen Aushöhlung durch das eindringende Gewebe der zur Deformation erforderliche Druck erzeugt wird. Teilmantelgeschosse sind nach Art. 23 der Haager Landkriegsordnung („Verbot von Waffen und Geschossen, die unnötiges Leid verursachen“) im militärischen Bereich verboten [32]. *Hartkerngeschosse* („armour piercing composite rigid“, APCR) besitzen aufgrund ihres besonders harten und hitzebeständigen Kerns (Stahl oder Wolframcarbid) eine extrem hohe Durchschlagskraft und werden daher zur panzerbrechenden Munition gerechnet (Abb. 5e). Sie können Fahrzeugpanzerungen und ballistische Schutzwesten durchbrechen. Bei *Leuchtpurgeschossen* wird beim Abfeuern des Geschosses ein pyrotechnischer Satz im hinteren Projektilteil entzündet, der dem Schützen die optische Verfolgung der Flugbahn des Geschosses erlaubt (Abb. 5f). Dies kann entweder der Orientierung der Trefferlage dienen oder, als eine der letzten Patronen im Magazin eingesetzt, dem Schützen anzeigen, dass die Munition zu Ende geht.

ve Wegbeschleunigung von der Geschossfront irreversibel zerstört. Der Wundkanal des zerstörten Gewebes ist deshalb, zumindest bei energiereichen Geschossen, deutlich größer als der geometrische Schusskanal des Geschosses. Dieses Areal bezeichnet man als *permanenten Wundkanal* (Abb. 6).

Das Ausmaß der Schädigung hängt von der an das Zielmedium abgegebenen Energie ab. Das Projektil verliert beim Aufprall den stabilisierenden Effekt der Rotation um die Längsachse. Dadurch können sich Geschosse mit geringer Deformationsneigung im Zielmedium quer-

stellen. Durch den größeren Querschnitt wird dabei sehr rasch Bewegungsenergie an das Zielmedium abgegeben. Das verringert die Durchschlagswirkung und vergrößert den Wundkanal. Durch die rasanten Verzögerung (Abbremsung) des Geschosses wird dieses einer enormen Biege- und Druckspannung ausgesetzt, wodurch das Projektil zusammengequetscht wird und sogar zerbrechen kann. Befindet sich das Geschoss weiter in Querlage, bewirkt die (asymmetrische) Querbeschleunigung eine Richtungsänderung des Geschosses und eine Abweichung von der gradlinigen Bahn.

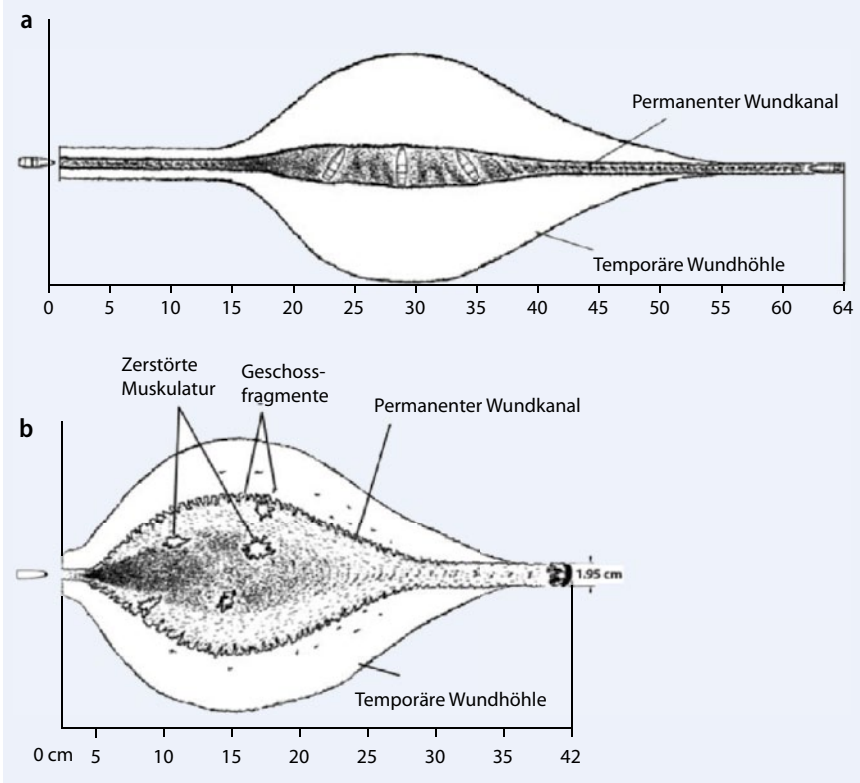


Abb. 6 **a** Schusskanal von 7,62-mm-High-Velocity-NATO-Vollmantelmunition, Beschussversuch mit ballistischer Gelatine. Das Projektil bleibt intakt, relativ kleiner permanenter Wundkanal (d. h. geringeres Verwundungspotenzial), hohe Durchschlagskraft, Projektil stellt sich bis zu einem Gierwinkel von 90° auf, hier maximale Ausdehnung der temporären Wundhöhle bei 28 cm Tiefe, anschließend Drehung des Projektils bis 180°. **b** Schusskanal von 7,62-mm-High-Velocity-Teilmantelmunition (nicht-militärisch), Beschussversuch mit ballistischer Gelatine. Deformation des Projektils, Fragmentation, massive Zunahme des permanenten Wundkanals, größeres Zerstörungspotenzial schon bei geringerer Eindringtiefe, maximale Ausdehnung der temporären Wundhöhle bei 15 cm Tiefe. [Aus [43], S. 1.8 (Abb. 1-5) und S. 1.9 (Abb. 1-6), mit freundl. Genehmigung des Borden Institute, Washington/DC 2004]

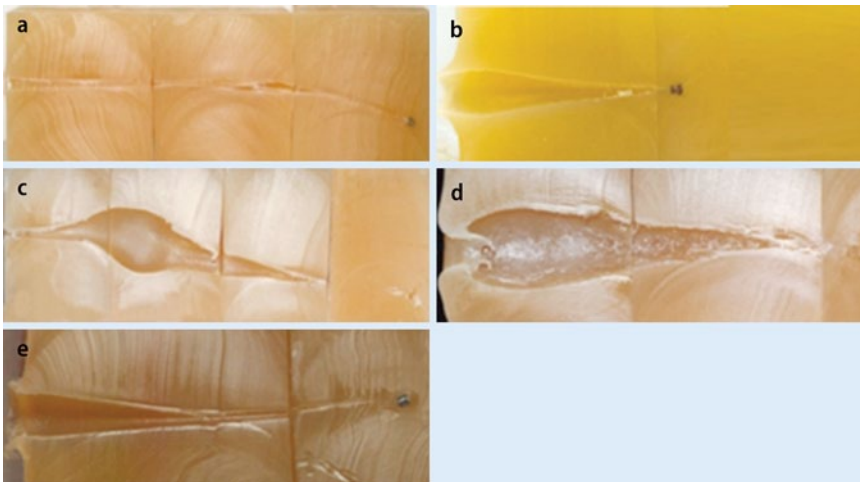


Abb. 7 **a** Überblick über die möglichen Schusskanaltypen (die Abbildungen sind annähernd maßstabsgetreu). **a:** Vollmantel-Kurzwaffengeschoss, **b:** Teilmantel-Kurzwaffengeschoss, **c:** Vollmantel-Langwaffengeschoss, **d:** Teilmantel-Langwaffengeschoss, **e:** Splitter. (Aus [38], mit freundl. Genehmigung)

Durch das „Abströmen“ des Gewebes an der Kontaktfläche des Geschosses entsteht im Schusskanal eine *temporäre Wundhöhle* (Abb. 6, 7). Das Gewebe dehnt sich zunächst aus, um danach wieder zusammenzufallen (üblicherweise erst, nachdem das Geschoss den Körper verlassen hat). Je nach Gewebeart kommt es dabei zu einer elastischen und/oder plastischen Verformung. Die temporäre Wundhöhle kann das 20- bis 30-Fache des Volumens des permanenten Wundkanals einnehmen. Vollmantel- und Teilmantelgeschosse (Infobox 2 „Munitionskunde“) gleicher Energie erzeugen gleich große temporäre Wundhöhlen und volumenmäßig ungefähr gleiche permanente Wundkanäle (gewebeabhängig; [36]). Der Unterschied besteht darin, dass das Teilmantelgeschoss aufgrund der Deformation die Energie unmittelbar nach dem Einschuss abgibt, das Vollmantelgeschoss erst nach 12–20 cm (je nach Kaliber; Abb. 7). Bei Extremitätenschüssen ergibt sich ein riesiger Unterschied, bei langen Schusskanälen im Körper (diagonale Schüsse) wird in beiden Fällen etwa gleichviel Gewebe zerstört.

Splitter werden mit hoher Geschwindigkeit (bis zu 1800 m/s) aus dem Epizentrum einer Explosion beschleunigt. Da Splitter aufgrund ihrer Flugeigenschaften pro Meter Flugweg bis über 100 m/s Geschwindigkeit verlieren können und thermische Begleitverletzungen sowie das Barotrauma mit zunehmender Entfernung vom Epizentrum abnehmen, entstehen Splitterverletzungen bei Überlebenden meist mit einer ähnlich hohen kinetischen Energie wie jene der Kurz- oder Langwaffengeschosse. Allerdings bauen Splitter meist die gesamte Energie im Körper ab, was zu entsprechend schwerwiegenden Verletzungen führen kann.

Kurzwaffengeschosse, Langwaffengeschosse und Splitter unterscheiden sich grundlegend in der Art des Schusskanals (Abb. 7). Aufgrund ihrer niedrigeren Mündungsgeschwindigkeit ($v_0 < 450$ m/s) erzeugen Geschosse aus Pistolen und Revolvern (Kurzwaffengeschosse) trotz eines zuweilen höheren Geschossgehalts eine weitaus geringere kinetische Energie (Infobox 3 „Grundbegriffe der Ballistik“). Sie werden daher umgangssprachlich auch als Niedriggeschwindigkeit

keits- oder Low-Velocity-Geschosse bezeichnet. Aufgrund der geringeren Energieabgabe tritt bei Geschossen aus Faustfeuerwaffen die Bedeutung der Höhlenbildung zurück [22]. Das Ausmaß der Gewebeschädigung wird vielmehr von der Eindringtiefe und den Eigenschaften des Ziels beeinflusst. Da Langwaffengeschosse eine größere Mündungsgeschwindigkeit aufweisen („high velocity“), spielen die beschriebenen Gewebedruckphänomene hier eine weitaus größere Rolle. Da diese Effekte abseits des eigentlichen Schusskanals auftreten, spricht man auch von „remote effects“.

Ein Geschoss, das mit hoher Geschwindigkeit durch den Körper eilt, verursacht (nach vorn gerichtete) *Stoßwellen* und durch große Energieabgabe (radiär zur Seite gerichtete) *Druckwellen*. Histologische Untersuchungen über Schädigungen von Zellen durch Stoßwellen konnten bei den in den Versuchen aufgetretenen Stoßwellenamplituden keine massive Zellzerstörung nachweisen, sodass die biologischen Auswirkungen der Stoßwelle wohl eher unbedeutend sind [1, 7, 15, 33]. Die Druckwellen, die durch die seitliche Beschleunigung des Gewebes entstehen, sind für die Ausbildung der temporären Wundhöhle verantwortlich und können zu einem erheblichen sekundären Gewebeschaden (z. B. an Gefäßen, Nerven, Knochen) führen. Die temporäre Wundhöhle ist umso größer, je höher die Energieabgabe an das Gewebe ist [1, 7, 22]. Während der Ablauf einer Stoßwelle (akustische Welle) im Bereich von Mikrosekunden liegt, dauert die Druckwelle einige Millisekunden. Die durch die Druckwelle induzierte temporäre Höhle entwickelt sich somit erst nach dem Austritt des Geschosses aus dem Körper.

► Die temporäre Wundhöhle ist umso größer, je höher die Energieabgabe an das Gewebe ist

Ob Gewebe von einem Geschoss überhaupt penetriert wird, hängt nicht allein von der Auftreffenergie, sondern vielmehr von der Energiedichte ab. Die Energiedichte (E') beschreibt die auf die Auftrefffläche des Geschosses bezogene Energie. Der Haut muss also eine bestimm-

Infobox 3 Grundbegriffe der Ballistik

Ballistik: „Lehre von den geworfenen Körpern“ (abgeleitet vom griechischen Wort βαλλειν für „werfen“). Sie ist ein Teilbereich der Physik und beschreibt alle Vorgänge, die einen sich durch den Raum bewegenden Körper betreffen. Man unterscheidet *Innenballistik* (Vorgänge im Innern einer Waffe beim Schuss), *Abgangsbullistik* (Vorgänge an der Laufmündung einer Waffe beim Schuss), *Außenballistik* (Vorgänge während des Geschossflugs in der Luft), *Ziel- oder Endballistik* (Wirkung des Projektils im Ziel). Die Wundballistik ist eine spezielle Art der Endballistik.

Außenballistik: Die Flugbahn wird fast ausschließlich durch die Geschossmasse und den Luftwiderstand bestimmt. Während die Geschossmasse in erster Linie für die Flugbahnkrümmung verantwortlich ist, sorgt der Luftwiderstand v. a. für eine Abnahme der Geschwindigkeit und der Energie. Der am Geschosskörper angreifende Luftwiderstand erzeugt ein Drehmoment, das versucht, die Geschossachse aus der Flugrichtung heraus zu drehen. Um das Geschoss mit seiner Achse in der Flugbahn zu halten und einen Überschlag des Geschosses zu verhindern, wird es durch Züge im Lauf von Handfeuerwaffen (helixförmige, in die Wand des Laufs eingearbeitete Nuten) in eine Rotation um seine Längsachse versetzt (Kreiseffekt).

Endballistik: Um eine möglichst große Wirkung zu erreichen, gilt es, einen möglichst hohen Energiebetrag ins Ziel zu bringen. Dem Gesetz der kinetischen Energie folgend kann dies entweder über die *Masse des Geschosses* (m) oder die *Geschwindigkeit* (v), mit der das Geschoss beschleunigt wird, erfolgen. Die Annahme, Geschosse mit hoher Geschwindigkeit („high velocity“) würden immer auch einen größeren Gewebeschaden anrichten als Geschosse mit niedriger Geschwindigkeit („low velocity“), ist nicht korrekt. Maßgeblich für das Zerstörungspotenzial eines Geschosses sind nicht allein Masse und Geschwindigkeit, sondern vielmehr seine Fähigkeit, beim Eindringen in ein Ziel seine Energie an das Ziel abzugeben. Dieser Fehleinschätzung saßen bereits britische Waffenbauer Ende des 19. Jh. bei der Beurteilung des Verwundungspotenzials ihrer für das königliche Kolonialheer neu konstruierten High-Velocity-Waffen auf. Die im indischen Unabhängigkeitskrieg kämpfenden britischen Truppen waren von der geringen Wirkung ihrer neuen Waffen so enttäuscht, dass das indische Waffenamt beauftragt wurde, dem Vollmantelgeschoss Mark-II eine größere Wirksamkeit zu geben. Ein solches Geschoss wurde dann in der Munitionsfabrik von Dum Dum (bei Kalkutta) als Teilmantelgeschoss entwickelt. Durch das freiliegende Blei an der Spitze wurde das Geschoss beim Auftreffen stark deformiert, die Folge war eine erhebliche Gewebeerstörung. Die Auswirkungen dieser kleinen Modifikation waren so verheerend, dass die Verwendung derartiger Munition in der Haager Friedenskonferenz von 1899 untersagt wurde.

te Energie pro Flächeneinheit zugeführt werden, damit sie reißt. Diese sog. untere Grenzenergiedichte (E'_{gr}) wird von der Festigkeit bzw. Elastizität des betreffenden Gewebes (z. B. Haut) bestimmt. Auch der Effekt der temporären Kavitation hängt von der Dichte und Elastizität des getroffenen Gewebes ab. Die Muskulatur bietet aufgrund ihrer besonderen Elastizität eine hohe Dehnbarkeit, es kommt zu einer elastischen Verformung. Das Muskelgewebe schwingt hinter dem Geschoss wieder zurück. Übersteigt der abgegebene Energiebetrag allerdings einen kritischen Bereich, kommt es in der temporären Wundhöhle zu Muskelkontusionen und schließlich zum Untergang des Gewebes.

Durchschlägt ein Geschoss Muskulatur, kann es neben der direkten Muskel-schädigung auch zu einer Schädigung vitaler Strukturen (Gefäße, Nerven) kommen, die den Muskel durchziehen und deren Schädigung entscheidend das Ausmaß der Verletzungsschwere beeinflusst. An Blutgefäßen kann es auch abseits des Schusskanals zu einer mehr oder weniger

großen Zerrung kommen, die insbesondere durch Längsbeanspruchung zu Einrissen der Intima und Rissen in der Muskularis führen kann [28].

Trifft ein Projektil mit ausreichend hoher Energie ($>E'_{gr}$) direkt auf den Knochen, kommt es aufgrund der hohen Steifigkeit des Knochengewebes zu einer plastischen Verformung mit Fraktur und Fragmentation des Knochens (► **Abb. 8**). Die Zerstörung des Knochens außerhalb des eigentlichen Geschosswegs erfolgt durch den seitlichen Druck der temporären Höhle, welche den Knochen einer mechanischen Biegebelastung aussetzt, bis dieser bricht. Die Knochensplinter fliegen hinter dem Geschoss in die sich bildende temporäre Höhle hinein und werden beim Kollaps der temporären Höhle eingeschlossen. In verschiedenen experimentellen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass Knochensplinter selbst nicht wie eigenständige Sekundär-geschosse (mit eigenen Schusskanälen) beschleunigt werden [41, 42]. Auch aus physikalischen Gesichtspunkten spricht



Abb. 8 ▲ Auswirkung einer Low-Velocity-P8-Pistolenschussverletzung auf das Gewebe aus kurzer Schussdistanz (Schussentfernung etwa 4 m). **a** Eintrittswunde medial etwa 9×9 mm. **b** Austrittswunde lateral etwa 10×10 mm. **c** Pinzette im Geschosskanal, der sich **d** auch in der Röntgenaufnahme durch die Anordnung multipler kleiner Knochensplitter sowie größere Fragmente exakt abzeichnet. Palpatorisch ergab sich mit dem scharfen Löffel im Weichgewebe ein Wundkanal mit einem Durchmesser von etwa 4–5 cm. Afghanistan, Rettungszentrum Kunduz, Juli 2010



Abb. 9 ▲ Geschoss- und Splitterverletzung im Kopf-Hals-Bereich im Vergleich. **a** Gewehrusschussverletzung submental. **b** Das Gesicht zerstörende indirekte Splitterverletzung nach Granatbeschuss („rocket propelled grenade“, RPG). Afghanistan, Rettungszentrum Kunduz, April 2010

wenig für diese weit verbreitete Hypothese. Wären Knochensplitter wirklich Sekundärgeschosse mit eigenen Schusskanälen, müssten sie vom Geschoss so viel Energie übernehmen, dass das Geschoss im Knochen massiv Geschwindig-

keit verlieren würde, was allerdings nicht der Fall ist. Das Ausmaß der Höhlenbildung im Knochen hängt neben der Auftreffgeschwindigkeit (v_a) auch vom Kaliber des Geschosses ab. Liegt die abgegebene Energie deutlich niedriger, kommt

es ohne temporäre Höhlung nur zur Ausstanzung eines Knochenstücks von Kalibergröße („drill hole fracture“).

Splitter zählen seit je her zu den häufigsten Verletzungsursache in kriegerischen Auseinandersetzungen. Das Verhältnis von Splitterverletzungen zu Geschossverletzungen hat sich durch Veränderungen der Waffentechnik und auch der Kriegstaktik im Lauf der Zeit immer wieder verändert [10, 23, 34]. In den aktuellen bewaffneten Konflikten mit asymmetrischer Kriegsführung („Guerillakrieg“) gewinnen Splitterverletzungen eine immer größere Bedeutung. Angesichts zunehmender terroristischer Bedrohung der westlichen Industrienationen rückt auch im zivilen Bereich die Splitterwirkung von Explosionsverletzungen in den Mittelpunkt des Interesses. Splitter entstehen durch das (zufällige) Zerreißen des meist aus Stahl bestehenden Geschosskörpers von Sprenggranaten und Bomben. Improvisierte Sprengsätze werden oft zusätzlich durch Metallteile (Schrauben, Nägel, Patronenhülsen usw.) angereichert, um ihre Streuwirkung zu erhöhen. Bei größeren Explosionen können auch Fahrzeug- oder Gebäudeteile als Sekundärsplitter wirken.

Splitter bestehen aus den unterschiedlichsten Materialien. Sie stellen kleine Geschosse jeglicher Form und Größe dar, die mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in alle Richtungen beschleunigt werden. Das zu erwartende Verletzungsbild ist somit noch schwerer vorherzusagen als bei den Waffenprojektilen, es gleicht einem Mischbild aus den verschiedensten Fragmentgrößen und Materialien. Bei hoher Sprengstoffbelegung und entsprechend starker Fragmentierung des Geschosskörpers erhalten die ausgeworfenen Splitter oft eine würfelige Form. Bei geringerer Sprengstoffbelegung entstehen dagegen eher längliche Splitter. Da auf Splitter im Flug keinerlei stabilisierende Kräfte einwirken, treffen sie in zufälliger Lage auf den Körper auf. Erst nach der ersten Berührung stellt sich ein Stabilisierungsmechanismus ein. Da sich i. d. R. die größte Fläche in die Bewegungsrichtung stellt, ist die Querschnittsbelastung im Innern des Körpers ungefähr konstant. Typischerweise haben daher die Schusskanäle von Splintern den größten Durchmesser am Einschuss, nach dem Eindringen verjün-

gen sie sich kontinuierlich. Bei Splitterverletzungen ist demzufolge die größte Ausdehnung der Zerstörung von außen sichtbar (■ **Abb. 9**). Im Innern sind keine größeren temporären Höhlen zu erwarten.

Vergleicht man Splitter unterschiedlicher Form, so besitzen kugelförmige Splitter bei gleicher Masse und gleicher Auftreffenergie eine größere Eindringtiefe als längliche Splitter. Längliche Splitter weisen dagegen größere Einschussöffnungen auf. Geschosse, die vor dem Auftreffen aus ihrer Flugbahn abgelenkt werden (z. B. durch Abprallen), werden in starke Taumelbewegungen versetzt und erzeugen erhebliche Verletzungen, die Verletzungen durch schwere, energiereiche Splitter ähnlich sind.

Verletzungsmuster und Körperregion

Aus den Daten der Navy-Marine Corps Combat Trauma Registry und des Landstuhl Regional Medical Center (LRMC) in Ramstein abgeleitete Analysen und die Ergebnisse weiterer Autoren zeigen an, dass im Vergleich zu den Kriegen in Korea und Vietnam und dem 2. Weltkrieg sich der Anteil an Kopf-Hals-Verletzungen nahezu verdoppelte (26–39%; [4, 18, 23, 29, 34]). Bei Bombenattentatopfern kann dieser Anteil offensichtlich auf über 75% mit einer oder mehreren Verletzungen im Kopf-Hals-Bereich ansteigen [21].

Der Kopf-Hals-Chirurg muss damit rechnen, dass er in der Behandlung von Schuss- und Splitterverletzungen im Rahmen von kriegerischen Auseinandersetzungen und Attentaten bei etwa 16% aller Eingriffe und Untersuchungen involviert sein wird [2, 5, 37]. Gesichtsverletzungen werden etwa 3-mal häufiger als Halsverletzungen zu behandeln sein [4]. Die häufigsten Wundtypen sind Gesichtsteilverletzungen (etwa 60%) und meist offene Frakturen im Gesichtsschädelbereich ([3, 18, 34], ■ **Abb. 10, 11**). Diese Frakturen sind meist am Unterkiefer (36%) und im Mittelgesicht (19%) lokalisiert. Die Nase ist hierbei in etwa 14%, die Orbita in 11% der Fälle betroffen [18]. Die Häufigkeit von Augenverletzungen beträgt bis zu 25% aller Verletzungen, ist jedoch extrem abhängig von dem Tragen der Schutzbrillen, die die Rate auf ein Zehntel senken



Abb. 10 ▲ High-Velocity-Schussverletzung des Gesichts durch R5-Sturmgewehr (Kaliber 5,56 × 45 mm, v_0 920 m/s) der südafrikanischen Polizei aus kurzer Schussdistanz im Rahmen einer Verkehrskontrolle. **a, b** Erhebliche Zerstörung des Unterkiefers und der Weichteile, **c** 1. postoperativer Tag nach Mund-Kiefer-Gesichts-chirurgischer Versorgung, im rechten Mundwinkel der nicht rekonstruierbare Einschuss, **d** am Tag der Entlassung nach 7 Tagen. Johannesburg, Südafrika, Februar 2011

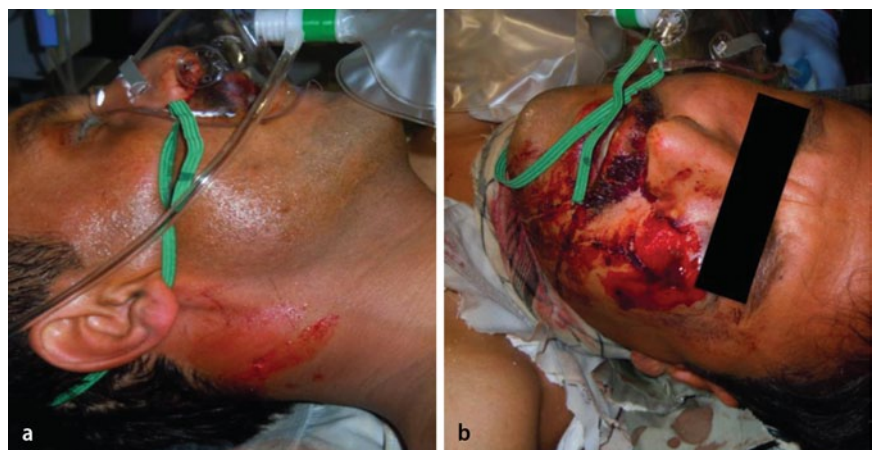


Abb. 11 ▲ Gewehrsschussverletzung durch AK-47. **a** Eintrittswunde rechter Hals, **b** Austrittswunde linke Gesichtshälfte infraorbital. Afghanistan, Pol-e Khomri, August 2010

kann [4]. Débridements und die Wundversorgung im Gesichts und Halsbereich sind die gebräuchlichsten chirurgischen Maßnahmen, nachfolgend die maxillo-mandibuläre Fixation, die offene Reposition und interne Fixation (ORIF) im Gesichtsschädel sowie Maßnahmen zur Sicherung der Atemwege [2, 30].

Im Halsbereich verteilen sich bei Vorliegen von relevanten Gefäßverletzungen die Wunden auf die Zone II in 33%, Zone III in 33% und Zone I in 11% der Fälle (■ **Abb. 12**). Etwa 20% der Verletzungen sind multizonal und im unteren Gesichtsbereich lokalisiert [9]. Betroffen sind v. a. die A. carotis, die A. verte-

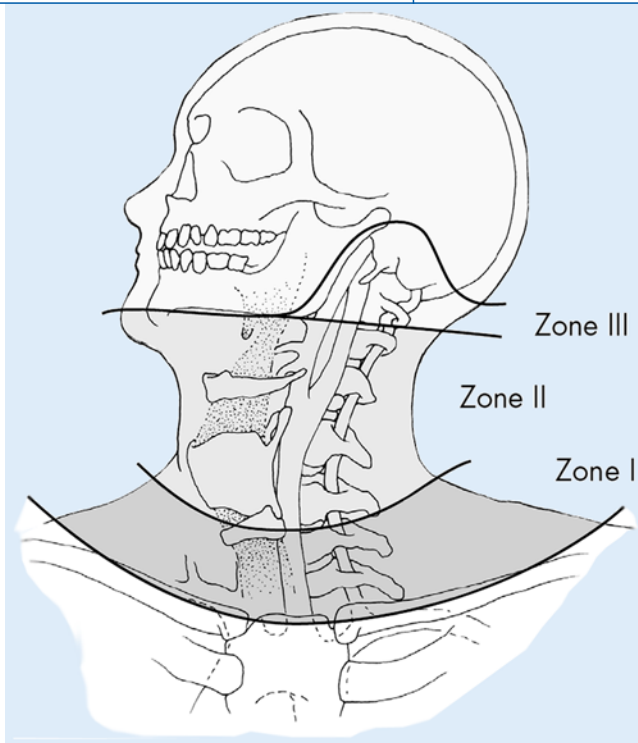


Abb. 12 ◀ Einteilung des Halsbereichs in die anatomischen Zonen I–III. [Aus [43], S. 13.12 (Abb. 13-6), mit freundl. Genehmigung des Borden Institute, Washington/DC 2004]

bralis und die V. jugularis [9]. Der Kopf-Hals-Chirurg muss gewahr sein, dass in 30% gleichzeitig eine intrakranielle Verletzung vorliegt oder die Halswirbelsäule betroffen ist [9]. Bei der Bewertung der Gesamtverletzungsschwere stellt man fest, dass die Mitbeteiligung des Kopf-Hals-Bereichs den Injury Severity Score (ISS) erheblich erhöht, wie eine Studie von Salinas et al. zeigte [30].

➤ Häufig weisen die Wunden primär einen hohen Kontaminationsgrad auf

Ein weiterer Grund für die veränderte Qualität der Verletzung durch teilweise improvisiert hergestellte Sprengladungen ist neben den weitaus schwerwiegenderen Weichteilverletzungen der häufig primär hohe Kontaminationsgrad der Wunden. Mikrobiologische Analysen zeigten, dass diese Fälle auch mit einer sehr hohen Anzahl an antibiotikaresistenten Infektionssituationen einhergehen. So zeigten sich in 2–4% der repatrierten Patienten Infektionen mit methicillinresistenten *Staphylococcus aureus* (MRSA), *Klebsiella pneumoniae* und *Acinetobacter baumannii*. Hierbei waren notfallmäßige Eingriffe zur Stabilisierung knöcherner Verletzungen besonders

häufig mit langwierigen Komplikationen verknüpft (Infektionsrate 40%, Osteomyelitis bis zu 10%). Bei infektiösen Komplikationen war der zugrunde liegende Unfallmechanismus in über 90% der Fälle ein Explosionstrauma („blast injury“). Hinzu kommen – abhängig von der Entfernung zum Ort der Detonation – thermische und druckinduzierte Begleitverletzungen (Verbrennungen, Barotrauma, thermomechanische Kombinationsverletzung).

Fazit für die Praxis

- Aufgrund eines verbesserten ballistischen Körperschutzes der Soldaten im Einsatz werden schwere Explosionsverletzungen häufiger überlebt. Gleichzeitig steigt der Anteil der Hals-, Gesichts- und Extremitätenverletzungen, da diese Körperregionen exponiert bleiben.
- Die Bedeutung der Splitterverletzungen nimmt gegenüber den Geschossverletzungen zu.
- Grundkenntnisse der Wundballistik ermöglichen die Abschätzung der Verletzungsschwere penetrierender Verletzungen.
- Es gibt grundlegende Unterschiede in der Wundballistik der Kurzwaffenge-

schosse, Langwaffengeschosse und Splitter.

- Die Wundballistik und damit der zu erwartende Gewebeschaden werden von zahlreichen Faktoren beeinflusst, die über die formelartige Berechnung der kinetischen Energie hinausgehen.
- Das Ausmaß der temporären Wundhöhle ist stark von der Beschaffenheit (Dichte und Elastizität) des Treffergewebes abhängig.
- Statt eines radikalen chirurgischen Débridements ist eine differenzierte, abgestufte und mehrzeitige Vorgehensweise gerechtfertigt [6, 31].
- Splitterverletzungen besitzen meist einen hohen Eintrag an bakteriell kontaminiertem Material und sind daher besonders häufig mit infektiösen Komplikationen assoziiert.

Korrespondenzadresse

Dr. T. Hauer

Klinik für Allgemein-, Viszeral- und Thoraxchirurgie, Chirurgisches Zentrum Bundeswehrkrankenhaus Ulm Oberer Eselsberg 40, 89081 Ulm
ThorstenHauer@Bundeswehr.org

Interessenkonflikt. Der korrespondierende Autor gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

1. Albrecht M, Scepanovic D, Ceramillac A et al (1979) Experimental soft tissue wounds caused by standard military rifles. *Acta Chir Scand Suppl* 489:185–198
2. Breeze J, Gibbons AJ, Combes JG, Monaghan AM (2010) Oral and maxillofacial surgical contribution to 21 months of operating theatre activity in Kandahar Field Hospital: 1 February 2007–31 October 2008. *Br J Oral Maxillofac Surg*
3. Breeze J, Gibbons AJ, Opie NJ, Monaghan A (2010) Maxillofacial injuries in military personnel treated at the Royal Centre for Defence Medicine June 2001 to December 2007. *Br J Oral Maxillofac Surg* 48:613–616
4. Breeze J, Horsfall I, Hepper A, Clasper J (2010) Face, neck, and eye protection: adapting body armour to counter the changing patterns of injuries on the battlefield. *Br J Oral Maxillofac Surg*
5. Breeze J, Monaghan AM, Williams MD et al (2010) Five months of surgery in the multinational field hospital in Afghanistan with an emphasis on oral and maxillofacial injuries. *J R Army Med Corps* 156:125–128
6. Dougherty PJ, Najibi S, Silverton C, Vaidya R (2009) Gunshot wounds: epidemiology, wound ballistics, and soft-tissue treatment. *Instr Course Lect* 58:131–139

7. Fackler ML, Bellamy RF, Malinowski JA (1988) A re-consideration of the wounding mechanism of very high velocity projectiles—importance of projectile shape. *J Trauma* 28:563–567
8. Fackler M (1988) The wound profile: illustration of the missile-tissue interaction. *J Trauma* 28:21–29
9. Fox CJ, Gillespie DL, Weber MA et al (2006) Delayed evaluation of combat-related penetrating neck trauma. *J Vasc Surg* 44:86–93
10. Ganzoni N (1975) The gunshot wound in war. *Aktuelle Probl Chir* 21:1–317
11. CNN (2011) Casualties. <http://www.edition.cnn.com/SPECIALS/2004/oef.casualties/>. Zugegriffen: 07.07.11
12. icasualties.org (2011) Operation Iraqi Freedom. <http://www.icasualties.org/oif/>. Zugegriffen: 28.07.2011
13. <http://www.2.aaos.org/aaos/archives/bulletin/jun03/medi.htm>
14. icasualties.org (2011) Operation Enduring Freedom. <http://www.icasualties.org/oef/Afghanistan.aspx>. Zugegriffen: 28.07.2011
15. King KF (1969) Orthopaedic aspects of war wounds in South Vietnam. *J Bone Joint Surg Br* 51:112–117
16. Kluger Y (2003) Bomb explosions in acts of terrorism—detonation, wound ballistics, triage and medical concerns. *Isr Med Assoc J* 5:235–240
17. Lee C (2005) Survey of blast trauma from evolving tactics of terrorism. <http://www.gnyhaorg/68/File.aspx>
18. Lew TA, Walker JA, Wenke JC et al (2010) Characterization of craniomaxillofacial battle injuries sustained by United States service members in the current conflicts of Iraq and Afghanistan. *J Oral Maxillofac Surg* 68:3–7
19. Mader TH, Carroll RD, Slade CS et al (2006) Ocular war injuries of the Iraqi insurgency, January–September 2004. *Ophthalmology* 113:97–104
20. Maiden N (2009) Ballistics reviews: mechanisms of bullet wound trauma. *Forensic Sci Med Pathol* 5:204–209
21. Odhiambo WA, Guthua SW, Macigo FG, Akama MK (2002) Maxillofacial injuries caused by terrorist bomb attack in Nairobi, Kenya. *Int J Oral Maxillofac Surg* 31:374–377
22. Oehmichen M, Meissner C, Konig HG, Gehl HB (2004) Gunshot injuries to the head and brain caused by low-velocity handguns and rifles. A review. *Forensic Sci Int* 146:111–120
23. Owens BD, Kragh JF Jr, Wenke JC et al (2008) Combat wounds in operation Iraqi Freedom and operation Enduring Freedom. *J Trauma* 64:295–299
24. Ozer MT, Ogunc G, Eryilmaz M et al (2007) Organ models in wound ballistics: experimental study. *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg* 13:20–27
25. Padrta JC Jr, Barone JE, Reed DM, Wheeler G (1997) Expanding handgun bullets. *J Trauma* 43:516–520
26. Rainio J, Lalu K, Ranta H, Penttila A (2003) Morphology of experimental assault rifle skin wounds. *Int J Legal Med* 117:19–26
27. Ramasamy A, Midwinter M, Mahoney P, Clasper J (2009) Learning the lessons from conflict: pre-hospital cervical spine stabilisation following ballistic neck trauma. *Injury* 40:1342–1345
28. Rich NM, Manion WC, Hughes CW (1969) Surgical and pathological evaluation of vascular injuries in Vietnam. *J Trauma* 9:279–291
29. Salinas NL, Eller RL, Davis MR, Rasmussen TE (2010) Mass casualty response of a modern deployed head and neck surgical team. *J Craniofac Surg* 21:987–990
30. Salinas NL, Faulkner JA (2010) Facial trauma in Operation Iraqi Freedom casualties: an outcomes study of patients treated from April 2006 through October 2006. *J Craniofac Surg* 21:967–970
31. Santucci RA, Chang YJ (2004) Ballistics for physicians: myths about wound ballistics and gunshot injuries. *J Urol* 171:1408–1414
32. Shappo VV, Boiarintsev VV, Ozeretskovskii LB, Kholikov IV (2008) Modern views on the wound ballistics and its humanitarian-legal aspects. *Voen Med Zh* 329:4–13
33. Suneson A, Hansson HA, Seeman T (1990) Pressure wave injuries to the nervous system caused by high-energy missile extremity impact: Part II. Distant effects on the central nervous system—a light and electron microscopic study on pigs. *J Trauma* 30:295–306

Hier steht eine Anzeige.



34. Wade AL, Dye JL, Mohrle CR, Galarnau MR (2007) Head, face, and neck injuries during Operation Iraqi Freedom II: results from the US Navy-Marine Corps Combat Trauma Registry. *J Trauma* 63:836–840
35. Vick K (2004) The lasting wounds of war – roadside bombs have devastated troops and doctors who treat them. *Washington Post Foreign Service*, <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/articles/A44839–2004Apr26.html:A01>
36. See C von, Stuehmer A, Gellrich NC et al (2009) Wound ballistics of injuries caused by handguns with different types of projectiles. *Mil Med* 174:757–761
37. Xydakis MS, Fravell MD, Nasser KE, Casler JD (2005) Analysis of battlefield head and neck injuries in Iraq and Afghanistan. *Otolaryngol Head Neck Surg* 133:497–504
38. Kneubuehl, Coupland, Rothschild, Thali (2008) *Wundballistik – Grundlagen und Anwendungen*, Springer, Berlin Heidelberg
39. Nessen SC, Lounsbury DE, Hetz SP (Hrsg) (2007) *War surgery in Afghanistan and Iraq: a series of cases, 2003–2007*. Borden Institute, Washington/DC
40. Kohli (2011) *Forensics: Homepage*. <http://www.kohliscience.com/Forensics>. Zugriffen: 07.07.2011
41. Kneubuehl BP (2008) *Wundballistik, Grundlagen und Anwendungen*, 3. Aufl. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokio
42. Rothschild MA, Kneubuehl BP (2010) Irrtümer in der Wundballistik. *Rechtsmedizin* 20: 85–90
43. AMEDD Center & School and Walter Reed Army Medical Center (2004) *Emergency war surgery, 3rd United States revision*. Borden Institute, Washington, DC

Rainer K. Weber, Werner G. Hosemann **Nachbehandlung nach HNO-Operationen**

Eiterfeld: Giebel 2011, 214 S., 131 Abb., 18 Tab., ISBN 978-3-933755-12-4, 49.90 EUR

Mit Recht betonen die Herausgeber, dass vielfach erst die adäquate Nachbehandlung hilft, ein Operationsergebnis zu sichern oder Fehlentwicklungen der Heilung frühzeitig zu korrigieren.

Die Empfehlungen zur Nachbehandlung sind sehr unterschiedlich. Ein gutes Beispiel ist die Frage wie intensiv oder auch aggressiv die Betreuung der Patienten nach endonasalen Nasennebenhöhlenoperationen sein soll. Bestimmte Varianten der Nachbehandlung ergeben sich auch aus den unterschiedlichen Operationstechniken der verschiedenen Schulen.

Die Herausgeber und die Autoren der einzelnen Kapitel bemühen sich trotzdem eine gewisse Vereinheitlichung zu erreichen. In 13 Kapiteln wird die Nachbehandlung nach kleineren, aber auch großen Operationen detailliert und für Kollegen jeglichen Ausbildungsstandes gut verständlich dargestellt. Erfreulich ist die Mitteilung vieler Details und mancher Tricks, die den Unterschied machen. Die Palette reicht von der Nachbehandlung nach Ohroperationen über Eingriffe an der Nase und den Nasennebenhöhlen, die verschiedenen Formen der Mandeloperation und Adenotomie, Laserchirurgische Eingriffe, Halschirurgische Operationen und Kehlkopfeingriffe, die Speicheldrüsenoperationen bis zur Rhinoplastik.

Ein Kapitel zur Frage Impfen und Operationen rundet das Werk von mehr als 200 Seiten ab. Die Bebilderung in den meisten Kapiteln ist vorbildlich.

Erfreulich ist die einheitliche und didaktisch ausgezeichnete Grundstruktur der Kapitel. Dies erleichtert dem Leser die Orientierung. Verschiedene Operationstechniken, die eine spezialisierte Nachbehandlung erfordern, sind Teil der Darlegungen, wichtige neue Instrumente werden erwähnt. Unterschiedliche Meinungen zur Nachbehandlung sind an Hand aktueller Literatur gegenübergestellt, wobei die Autoren ihre eigene Meinung unmissverständlich formulieren.

Lokaler und systemischer Nachbehandlung wird ein breiter Raum gewidmet. Besonders wichtig ist die ausführliche Darstellung von postoperativen Komplikationen, der notwendigen Konsequenzen falls es zu solchen gekommen ist und wie diese frühzeitig zu erkennen sind.

Praktisch wertvoll sind die Hinweise wie sich Patienten unmittelbar postoperativ verhalten sollen. Für die Dauer der Arbeitsunfähigkeit und auch für die Sportausübung werden Empfehlungen ausgesprochen.

Erfreulich ist, dass nicht nur der Laserchirurgie des Kehlkopfs sondern auch den klassischen Kehlkopfresektionen und der leider gelegentlich immer noch notwendigen Laryngektomie ausreichend Aufmerksamkeit gewidmet wird. Je seltener solche Operationen vorgenommen werden, desto wichtiger sind die den jüngeren Kollegen teilweise nicht mehr bekannten Grundsätze der Nachbehandlung. Auch die Stimmprothesenbehandlung zur Stimmrehabilitation kommt nicht zu kurz.

Am Schluss jeden Kapitels finden sich aktuelle Literaturhinweise. Ein Sachverzeichnis, welches in einer Neuauflage etwas ausführlicher sein könnte, rundet das Werk ab.

Man muss den Herausgebern und Autoren sehr für die hervorragende Zusammenstellung in einem knappen, aber instruktiven und noch dazu preisgünstigen Band danken, die es in dieser Form bisher nicht gegeben hat und das Nachschlagen in vielen verschiedenen Büchern erspart.

Das Buch ist nicht nur Kollegen in Weiterbildung, sondern jedem Hals-Nasen-Ohrenarzt wärmstens zu empfehlen, gehört in jede Kliniksbibliothek und kann auch Notärzten von Nutzen sein.

Das Werk sollte eine schnelle Verbreitung erfahren. Es wird helfen, dass sich ein dringend notwendiger Standard in der Nachbehandlung von HNO-Operationen herausbildet.

Wolfgang Draf, Fulda