

## **Schädelschüsse bei Trägern militärischer Schutzhelme – Allgemeines sowie Experimente und Beobachtungen zur Biomechanik und Wundmorphologie**

**J. Misliwetz und I. Wieser**

Institut für Gerichtliche Medizin, Sensengasse 2, A-1090 Wien, Austria

### **Bullet head wounds in members of the military wearing protective helmets – general observations and experiments on the biomechanics involved and the wound morphology**

**Summary.** With respect to wound ballistics, the situation is different if the person wearing a military helmet suffers head injuries from a bullet. The mechanisms of injury were investigated in four experimental series and supplemented by a case history. The study showed surprising results: in the majority of cases, the helmet does not protect the wearer, but instead intensifies the damage caused by the bullet. The reasons for this phenomena are changes in the stability of the projectile and deformation of or damage to the bullet. All of these mechanisms result in the bullet striking the tissue with higher energy. In this investigation, Kevlar helmets were also tested, which are not penetrated by  $9 \times 19$  mm parabellum bullets. Even so, however, severe injuries of the skull and brain can occur because the projectile causes intensified impressions on the skull under the helmet and, in addition, an acceleration of the head.

**Key words:** Head wounds caused by bullets, helmets – Wound ballistics

**Zusammenfassung.** Wundballistisch gesehen, liegt eine völlig anders geartete Situation vor, wenn ein Träger eines Schutzhelmes einen Schädelschuß erleidet, als wenn der ungeschützte Schädel durch einen Schuß verletzt wird. Diese geänderte Verletzungsmechanik wurde anhand von 4 Versuchsreihen aufgeklärt. Eine kasuistische Mitteilung ergänzt die experimentellen Untersuchungen. Das überraschende Ergebnis war, daß der Helm, wenn er durchschossen wird, seinen Träger nicht schützt, sondern eine Verstärkung der Verletzungswirkung des Geschosses nach sich ziehen kann. Ursachen dieses Phänomenes sind Veränderungen im Stabilitätsverhalten des Geschosses und/oder Deformierungen bzw. Zerstörungen der Projektile, welche alle zu

einer Steigerung der pro Wegstrecke vom Geschoß an das Gewebe abgegebenen Energie führen. Weiters wurden in dieser Untersuchung Kunststoffhelme aus Kevlar getestet, welche bei Beschuß mit den verwendeten  $9 \times 19$  mm Parabellum Geschossen keinen Durchschuß erleiden. Aber auch hier ist die Möglichkeit schwerer Schädelhirnverletzungen des Schutzhelmtägers gegeben, da erhebliche lokale Schädelimpressionen unter dem Helm auftreten können und zusätzlich eine Gesamtbeschleunigung des Schädels durch den Geschoßaufschlag angeregt wird.

**Schlüsselwörter:** Schädelschüsse, Schutzhelmtäger – Wundballistik, Schädelchüsse

## Einleitung

Ballistischer Körperschutz dient dazu, Verletzungen zu verhindern. Treten aber Verletzungen auf, so werden Biomechanik sowie Quantität und Morphologie dieser Verletzungen durch den Körperschutz beeinflusst. Unsere Ausführungen erheben keinen Anspruch auf eine umfassende Darstellung der gesamten Thematik, es sollen aber einige interessante Versuche und Beobachtungen mitgeteilt werden. Zusätzlich werden dem Leser einige kurze allgemeine Informationen geboten, die den Zugang zu dem Problemkreis erleichtern sollen.

## Historische Entwicklung

Schutzhelme wurden im gesamten Altertum und im Mittelalter gebraucht. In der Neuzeit wurden vom 17. Jahrhundert an in Europa kaum mehr Helme verwendet. Erstmals 1842 wurde militärisch in größerem Umfang wieder ein Helm eingeführt, dem nicht nur reine Zierfunktion zukam [10]. Es handelte sich bei diesem um den Lederhelm der preußischen Armee, die „Pickelhaube“. In den folgenden Jahren wurde dieser Helmtyp auch bei anderen Heeren verwendet (z. B. in Rußland 1846 eingeführt). Durch den 1. Weltkrieg kam es zu einem massiven Auftreten von Schädelhirnverletzungen, wodurch die Frage des Kopfschutzes akut wurde. 1915 führten die meisten Armeen daher Schutzhelme – Stahlhelme – ein [5]. Als erste deutsche Truppe wurde im Dezember 1915 das Sturmbataillon Rohr mit Stahlhelmen ausgerüstet. Insgesamt wurden im 1. Weltkrieg von deutscher Seite  $7\frac{1}{2}$  Millionen Stahlhelme ausgegeben. Im 2. Weltkrieg waren die kriegsführenden Nationen bereits bei Beginn der Auseinandersetzungen mit Stahlhelmen ausgerüstet. Neuerlich konnten die medizinischen Erfahrungen des 1. Weltkrieges, daß Schädelhirnverletzungen bei Stahlhelmtägern weniger schwer sind, bestätigt werden (z. B. von deutscher Seite [1], ebenso von amerikanischen Autoren wie [1]). Ähnliche Erfahrungen machte man auch im Korea- und Vietnamkrieg [3]. Nach dem 2. Weltkrieg erfuhr die Helmforschung auch Impulse durch die Einführung neuer Werkstoffe, nämlich Materialien wie thermoplastischen und duroplastischen Kunststoffen, dem Metall Titan und der Erfindung von ballistischem Nylongewebe, ein Umstand der einen entscheidenden Fortschritt darstellte. Diese ballistischen Nylonfasern boten eine ca. 2,5fach höhere Schutzwirkung als Stahl. Ein entscheidender Durchbruch gelang 1965 Stephanie Krolek, die für die Firma Du Pont die Aramidfaser Kevlar entwickelte; diese ermöglichte eine 5fach höhere ballistische Schutzwirkung als Stahl. Kevlar weist bei geringem Gewicht eine extrem hohe Zugfestigkeit auf (Kevlar 29: Zugfestigkeit 2760 MPa (N/mm<sup>2</sup>) und Bruchdehnung von 3,9%; Kevlar 49: Zugfestigkeit 2760 MPa und Bruchdehnung von nur 1,9%).

Die ursprüngliche Anwendung dieser Fasern war der Ersatz von Stahl in LKW-Radialreifen. Derzeit sind 3 Fasertypen, nämlich Kevlar Aramid für die Gummiindustrie sowie Kevlar

29 (Kabelmaterial, beschußsichere Bekleidung) und Kevlar 49 (Verstärkung von Bootsrümpfen, Luftfahrtindustrie) auf dem Markt [7, 13 und 16].

Eine ähnliche Faser wie Kevlar ist unter der Bezeichnung Twaron erhältlich. 1970 begann man in den USA nach einer befriedigenderen Lösung für den Stahlhelm M1 zu suchen. Dieser Helm war seit 1941 in Gebrauch, wies eine Einheitsgröße auf und wurde auf die Kopfform durch die Bebanderung adjustiert. Nach umfänglichen anthropometrischen Studien wurden 3 Helmgrößen entwickelt: Klein, Mittel und Groß, die jeweils 20%, 50%, und 30% der Bevölkerung passen sollen. Als optimale Größe für den Prellraum (Luftraum zwischen Helminnenfläche und Kopfoberfläche) im Helminneren wurde 1,3 cm (0,5 inch) festgestellt. Unter Berücksichtigung dieser Forschungen wurde ein neuer Helmtyp aus Kevlar (RHS-kevlar helmet) entwickelt und in der amerikanischen Armee eingeführt. In seiner Form ähnelt er weitgehend dem im 2. Weltkrieg verwendeten deutschen Stahlhelm, weshalb er mit dem Spitznamen „Fritz“ bezeichnet wird. Dieser Helm besteht aus 19 Kevlarschichten und soll einem Aufschlag von 54,25 kJ (Kilojoule; amerikanischer Normsplitter) ohne Bruch oder Aufspaltung der Laminatschichten widerstehen können [11]. Bisher erfolgte eine praktische Erprobung im Ernstfall nur bei dem Einsatz in Grenada [15]. Derzeit ist auch die Armee von Israel mit einem Kunststoffhelm ausgerüstet, die englische Armee benützt einen Helm aus harzgetränktem Nylon [12, 14]. Die Frage, ob Stahlhelme durch Kunststoffhelme ersetzt werden sollen, bewegt derzeit die militärischen Führungskreise vieler Armeen.

## **Ansprüche an einen modernen Schutzhelm für militärische Zwecke**

*Folgende Ansprüche werden an einen Helm gestellt:*

- a) Der ballistische Schutz steht im Zentrum des Interesses, wobei es sich vor allem um Schutz vor Splittern handelt.
- b) Ansprüche bezüglich der Konstruktion sind: Paßform, genügendes Abstehen von der Kopfoberfläche mit Prellraum, günstige Gestaltung des Helmrandes und Flächennützung, günstige Lage des Schwerpunktes und Verhinderung von Seh- und Hörbehinderungen sowie eines Hitzestaues, Wartungsfreundlichkeit, Haltbarkeit und Lagerungsbeständigkeit, schwere Entflammbarkeit und die Möglichkeit, die Oberfläche leicht von Kampfstoffen zu dekontaminieren.
- c) Helmgewicht: Aus taktischen Erwägungen (notwendige Beweglichkeit der Infanteriekampftruppen) darf ein gewisses Helmgewicht in der Regel nicht überschritten werden. Das Gewicht ist insofern wesentlich, da die gesamte Problematik des Körperschutzes auf folgende einfache Formel gebracht werden kann: Höheres Gewicht = Höherer Schutz = Geringerer Tragekomfort = Geringere Mobilität des Trägers  
Geringeres Gewicht = Geringerer Schutz = Höherer Tragekomfort = Höhere Mobilität des Trägers
- d) Vertretbare Kosten

## **Beschußtest von Schutzhelmen (1. Versuchsreihe)**

Um die Schutzwirkung einer Konstruktion zu prüfen, muß man sie – ganz allgemein gesehen – geeigneten Testverfahren unterziehen. Bei Helmprüfungen hat sich analog zur Beurteilung anderer beschußhemmender Konstruktionen eingebürgert, Beschüsse aus definierten Entfernungen mit definierten Geschos-

sen, die eine definierte Geschwindigkeit aufweisen, bei Raumtemperatur ( $20^\circ \pm 3^\circ\text{C}$ ) durchzuführen. Zusätzliche Tests nach Feuchtigkeits- (12 Std. in Wasser von  $15^\circ\text{--}20^\circ\text{C}$ ) und nach Kälteexposition (12 Std. auf  $-30^\circ\text{C}$  gekühlt) können ausgeschlossen werden. Mittels Übereinkunft werden Beschußklassen definiert (z.B. Önorm S 1310 (9)), wobei die Konstruktion dem Beschuß standhalten muß (kein Durchschuß; bei Steckschuß soll das Geschoß an der dem Körper zugewandten Seite nicht zu sehen sein; keine Absplitterung an der Innenseite), damit es die Norm erfüllt. Neben dieser Prüfung mittels Schußwaffen werden Testverfahren mit Splittern durchgeführt. International allgemein gebräuchlich ist vor allem der Beschuß mit einem Normsplitter definierter Form im Kaliber 5,56 mm und einer Masse von 1,1 g. Dieser Splitter wird aus einem Splittersimulator verschossen, und es wird die  $V_{50}$  bestimmt. Die  $V_{50}$  ist als jene Geschwindigkeit definiert, bei der eine 50%ige Wahrscheinlichkeit einer Penetration gegeben ist.

### *Eigene Methodik*

In unserer Testreihe wurden nicht diese Testverfahren angewendet, die wir hier nur informativ mitgeteilt haben und die vor allem einer Qualitätskontrolle dienen.

Unsere Versuchsreihe wurde durchgeführt, um den Geschwindigkeits- sowie Energieverlust von Geschossen beim Helmdurchschuß zu bestimmen. Es wurden vergleichende Beschüsse des österreichischen Stahlhelmes (mit und ohne Innenhelm) sowie 6 unterschiedlicher Typen von Kunststoffhelmen (A–F) vorgenommen. Die Helme wurden in einem Versuchsrahmen frei hängend und mit einem Gewicht von 4 kg beschwert angebracht, so daß ein Auftreffwinkel von  $90^\circ$  ( $0^\circ$  NATO) erzielt werden konnte, wodurch ein einfacher Durchschuß des Helmes ermöglicht wurde. Mittels Lichtschranken wurde die  $V_5$  der Geschosse und mittels Folien (Meßbasis 30 cm hinter dem Helm) die Austrittsgeschwindigkeit gemessen. Berechnet wurde der Geschwindigkeitsverlust  $V_x$  des Geschosses beim Helmdurchschuß sowie der zordenbare Verlust an Geschößenergie  $E_x$ . Geschossen wurde im Schießkanal mit MAN-Läufen. Verwendet wurden die Patronen  $9 \times 19$  mm (Patronen 9 mm Para für Selbstladepistolen,  $V_5$  395 m/s,  $E_5$  624 J) auf eine Schußentfernung von 10 m, die Patronen  $7,62 \times 39$  mm (für Kalaschnikov,  $V_5$  720 m/s,  $E_5$  2074 J) auf eine Schußentfernung von 100 m sowie die Patronen  $5,56 \times 45$  mm (Patronen für das österreichische Sturmgewehr StG 77,  $V_5$  1005 m/s,  $E_5$  1818 J). Diese Selektion wurde gewählt, um einen repräsentativen Querschnitt bezüglich Militärwaffen zu haben.

Die Ergebnisse der Beschüsse sind Tabelle 1 zu entnehmen. Bemerkenswert waren zunächst die erheblichen Unterschiede der Geschwindigkeitsverluste bei verschiedenen Geschossen. Ins Auge fällt hierbei auch, daß die Helme (D und E), die einem 9 mm Para-Geschoß standgehalten hatten (die also für dieses Geschoß eine Grenzgeschwindigkeit von über 400 m/s hatten), nur unerhebliche Geschwindigkeitsverluste bei den schnelleren Geschossen bewirken konnten. Überraschend war auch, daß sich der Stahlhelm bezüglich Energieabgabe der Geschosse beim Durchschuß den Kunststoffhelmen überlegen zeigte. Der Innenhelm bringt beim Stahlhelm nach unseren Ergebnissen eine wesentliche Verbesserung der ballistischen Haltbarkeit. Die Geschosse der Patrone  $9 \times 19$  wurden beim Durchschuß deformiert und in ihrer Wirkfläche vergrößert. Es erfolgte jedoch im Regelfall ein stabiler Austritt des Geschosses. Die Geschosse der Patronen  $5,56 \times 45$  und  $7,62 \times 39$  wurden hingegen in der Regel nach Durchschuß zu einem instabilen Geschoßaustritt angeregt. Es traten auch Geschoßerstörungen in Abhängigkeit zur Trefferlokalisierung und Auftreffwinkel

**Tabelle 1.** Geschwindigkeitsverlust ( $V_x$  in m/s) sowie Energieverlust ( $E_x$  in J) verschiedener Geschosse beim einfachen Durchschuß von Schutzhelmen

	9 × 19 mm		5,56 × 45 mm		7,62 × 39 mm	
	$V_x$	$E_x$	$V_x$	$E_x$	$V_x$	$E_x$
Stahlhelm	75	213	74,1	163	95,1	437
Stahlhelm mit Innenhelm	110,6	318	101,4	279	101,6	473,5
Kunststoffhelm A	76,1	216	43,6	125,6	31,9	158
Kunststoffhelm B	91,4	199	60,8	175,5	30,6	152
Kunststoffhelm C	104	284	57,3	162,6	32	159
Kunststoffhelm D	KD	KD	57,6	162,8	48,5	253
Kunststoffhelm E	KD	KD	143,9	385,3	77,1	370
Kunststoffhelm F	98,1	269	60,7	171	34,4	170

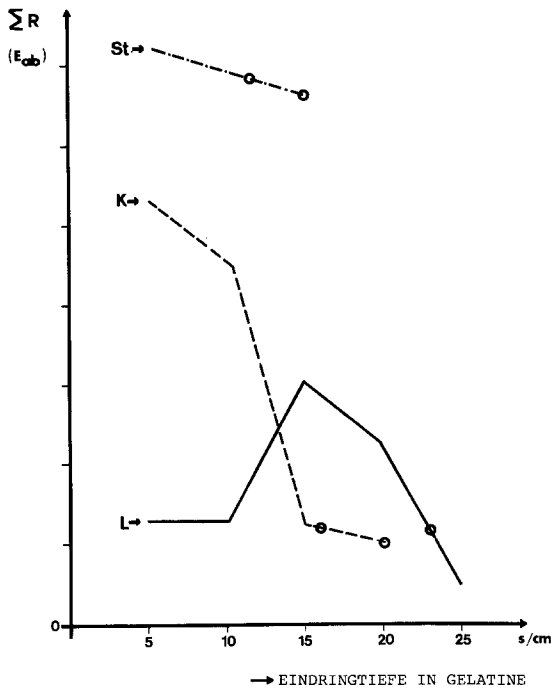
KD = kein Durchschuß

auf den Helm auf. Bei einem Auftreffwinkel von ca. 90° konnte aber üblicherweise keine Geschößzerstörung oder Geschößzersplitterung festgestellt werden.

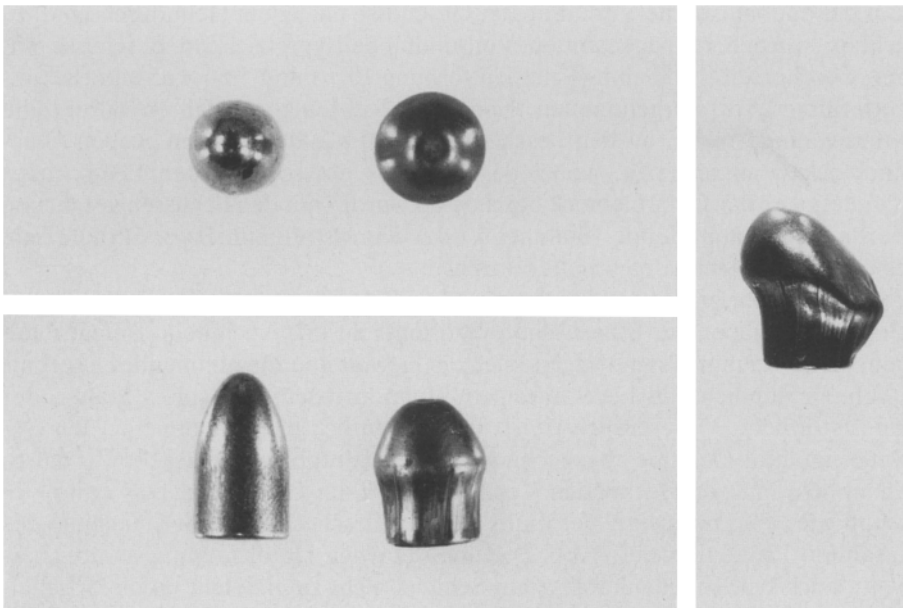
### Helmdurchschuß im Verbundmodell (2. Versuchsreihe)

Um das endballistische Verhalten der Geschosse nach dem Helmdurchschuß zu prüfen, wurden im sogenannten Verbundmodell vergleichend Beschüsse mit den Geschossen 9 × 19 mm (Schußentfernung 10 m) und 5,56 × 45 mm (Schußentfernung 25 m) vorgenommen. Nach dem Reiß-Längenverfahren wurden die Schußveränderungen an den beschossenen 300 × 300 × 140 mm großen Gelatineblöcken ausgewertet, wobei das Ergebnis des sogenannten Leerschusses (bei dem nur der Gelatineblock beschossen wurde) mit den Schüssen verglichen wurde, bei denen Helme (Stahlhelm oder Kunststoffhelm B) als Primärziele dem Gelatineblock vorgeschaltet waren.

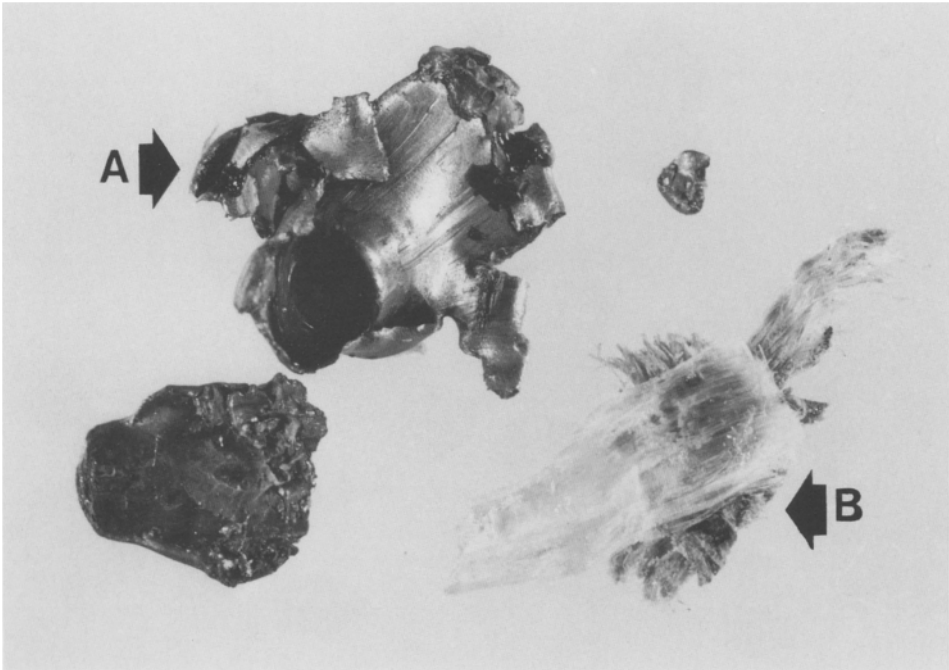
Das Verfahren und das Ergebnis bezüglich der Beschüsse mit den 9 × 19 mm Geschossen haben wir früher schon veröffentlicht [8]. Auch beim Beschuß mit dem 5,56 × 45 mm Geschöß zeigte sich ein hiermit übereinstimmendes Ergebnis (Abb. 1), nämlich daß bei vorherigem Helmdurchschuß – sei es Stahl- oder Kunststoffhelm – wesentlich früher und wesentlich mehr Energie an den Gewebesimulator Gelatine abgegeben wird. Verknüpft bzw. verursacht war dieses Phänomen mit entsprechenden Veränderungen der Geschosse. Das 9 mm Geschöß wies eine pilzartige Deformierung der Geschößspitze mit Stauchung des gesamten Projektils auf (Abb. 2). Eine derartige Deformierung ist üblicherweise auch bei Knochenkontakt am Schädel nicht zu erzielen, da die Schädelkalotte beim 9 mm Parageschöß auch bei den höchsten Auftreffgeschwindigkeiten nur eine geringfügige Abplattung der Geschößspitze erzeugt [20]. Anders lagen die Verhältnisse bei den 5,56 mm Geschossen. Hier war das Geschöß auch beim Leerschuß, bei dem ein Durchschuß des Gelatineblockes aufgetreten war, verändert worden. In 220 mm Tiefe konnten einige kleine vom Geschöß



**Abb. 1.** Vergleichende Beschüsse von Gelatineblöcken mit (St = Stahlhelm, K = Kunststoffhelm) und ohne vorgeschaltetem Helm (L = Leerschuß). Summe der Riß-Längen in Beziehung zur Eindringtiefe des Geschosses im Gelatineblock (Kal. 5,56 mm;  $V_5$  1002–1043 m/s; Schußentfernung 25 m;  $\circ$  = Projektileile)



**Fig. 2.** Deformierungen von 9mm Parageschossen infolge Helmdurchschusses. *Linke Bildhälfte:* Vergleich des normalen Geschosses (*links*) mit einem in Längsrichtung gestauchten, pilzartig deformierten Geschöß nach Helmdurchschlag (*rechts*). *Oben:* Ansicht von oben. *Unten:* Seitliche Ansicht. *Rechte Bildhälfte:* Einseitig betonte Deformierung des Geschosses nach schrägem Durchdringen des Helmes



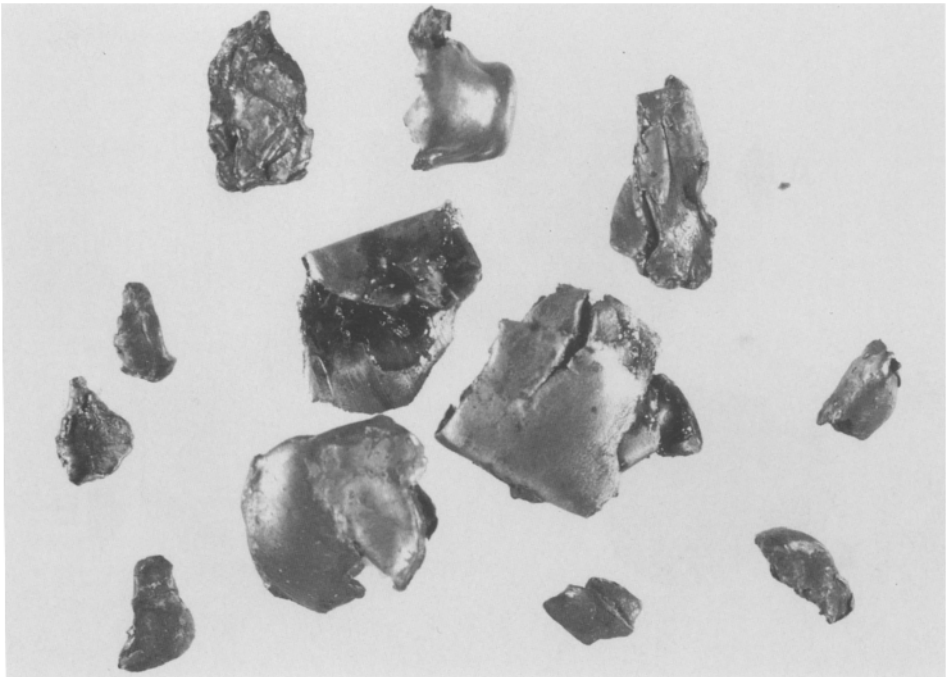
**Abb. 3.** Geschoßreste nach Durchschuß des Kunststoffhelmes, aus Gelatineblock geborgen. A = großer deformierter Projektilrest mit Geschoßboden. B = Kevlarstück, aus dem Helm stammend

abgesplitterte Mantelteile aufgefunden werden. Es war somit der hohen Geschossgeschwindigkeit bereits ein genügend hoher „Staudruck“ der weichen Gelatinesubstanz zuzuordnen, um Geschosßbeschädigungen nach sich zu ziehen. Nach Vorschaltung des Helmes traten keine Durchschüsse, sondern Steckschüsse im Gelatineblock auf (in 140 mm Tiefe beim Stahlhelm und in 200 mm Tiefe beim Kunststoffhelm). Die Geschosse wiesen eine komplette Zerstörung und Zerlegung in zahlreiche Teile auf (Abb. 3 und 4). Erwähnenswert ist, daß beim Durchschuß des Kunststoffhelmes ein Kevlarstück 166 mm tief in den Gelatineblock vertragen worden war.

### **Schädelbeschleunigung und Schädelimpression bei Beschuß im Modellversuch (3. Versuchsreihe)**

Die aus der einschlägigen Literatur hinreichend bekannten medizinisch/physikalischen Kenngrößen zur Beurteilung von Kopfverletzungen, welche durch impulsartige, kleinflächige Stoßvorgänge hervorgerufen werden, sind Kopfbeschleunigung  $\vec{a}$  oder einwirkende Kraft  $\vec{F}$  als Maximalwert und über der Zeit sowie die mechanische Impulsänderung:

$$I \dots \vec{F} \int_{t_0}^{t_1} dt = m \int_{t_0}^{t_1} \vec{a} dt.$$



**Abb. 4.** Zahlreiche Geschoßreste nach Durchschuß des Stahlhelmes, aus Gelatineblock geborgen

Uns interessierten diese Kenngrößen besonders für den Fall, bei dem der Schutzhelm dem Beschuß standhält. Es wurden daher für den Versuch jene Helme ausgewählt, die in der ersten Versuchsreihe dem Beschuß mit der  $9 \times 19$  mm Patrone standgehalten hatten (Kunststoffhelm D und E). Weiters wurde ein bisher nicht untersuchter Typ eines Kunststoffhelmes (Helm G) verwendet, der dynamisch hochdämpfend aufgebaut ist und ein größeres Helmgewicht aufweist. Zum Versuch wurde ein Systemaufbau gewählt, bei dem alternativ die Kopfbeschleunigung oder die einwirkende Kraft ermittelt werden konnte. Als Schädel- bzw. Kopfmodell wurde unter Berücksichtigung anthropometrischer Größen ein Modellkopf angefertigt, der einen Holzkern aufwies, der mit Plastilin (genormtes Beschußplastilin) verkleidet wurde. Die Plastilinoberfläche wurde deshalb gewählt, da bei den Helmen, die einem Beschuß standhielten, eine Verformung (elastisch und plastisch) auftrat, und es durch die Verformung der Plastilinoberfläche möglich war, auf Schädelimpressionen unter dem Helm zu schließen. Nach einigen Vorversuchen kam als Träger des Modellkopfes ein beidseitig fest eingespannter, durch die Kopfmasse niederfrequent schwingfähiger Stahlstab zur Anwendung. Die piezoelektrischen Meßsensoren für Beschleunigung und Kraft waren an einer, dem jeweiligen Einschubort gegenüberliegenden Stellen, am unteren Holzrand des Modellkopfes prellfrei montiert (Versuchsaufbau siehe Abb. 5). Da es sich bei den Vorgängen um transiente mechanische Schockereignisse mit einer Bandbreite von etwa



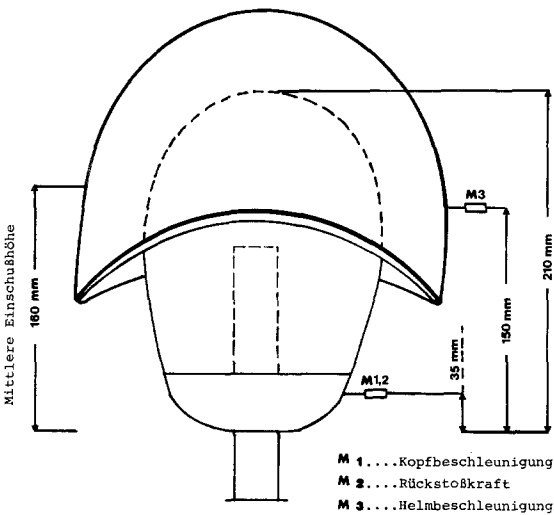


Abb. 5. Versuchsaufbau zur Messung der Kopfbeschleunigung bei Beschuß im Modellversuch

Tabelle 2. Kopfbeschleunigung (Schädelmodell) bei Beschuß mit Geschossen vom Typ 9 × 19 mm Para

		Helmmodell			
		Kunststoffhelm D und E		Kunststoffhelm G	
		Spitzenwert	Verlauf	Spitzenwert	Verlauf
Kopfbeschleunigung	(g)	160 –180	10	50	25–30
Einwirkungszeit	(ms)	0,3– 0,5	7	0,3	20
Kraft	(N)		700		700
Einwirkungszeit	(ms)		9		9

20 kHz und mehr handelte und da das vorhandene piezoelektrische Meßmittel diese Bandbreite als obere Nenngröße im Frequenzgang anführte, mußten trotz speziell angewandter Filterverfahren einige Resonanzverzerrungen in Kauf genommen werden. Es war daher sinnvoll – wie es auch allgemein üblich ist – einen kritischen Mittelwert aus mehreren ausgewählten Einzelmessungen heranzuziehen. Die auftretenden Beschleunigungen beinhalteten einen kurzen, hohen Auftreffschockimpuls und anschließend einen flachen, niedrigen Verlauf über den gesamten Stoßvorgang. Es wurden daher Auftreffschockimpuls und gefilterter Beschleunigungsverlauf über den gesamten Stoßvorgang getrennt aufgezeichnet. Einige Versuche wurden auch mit einer zusätzlichen Beschleunigungsmessung am Helm durchgeführt.

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse dieser Versuchsreihe aufgelistet. Abbildung 6 demonstriert eine Kurve mit typischem Beschleunigungsverhalten des Modellkopfes nach Helmbeschuß. Von Interesse sind Beschleunigungswerte wie sie bei Durchschuß mit einem Hochgeschwindigkeitsgeschosß auftreten. Wir ha-

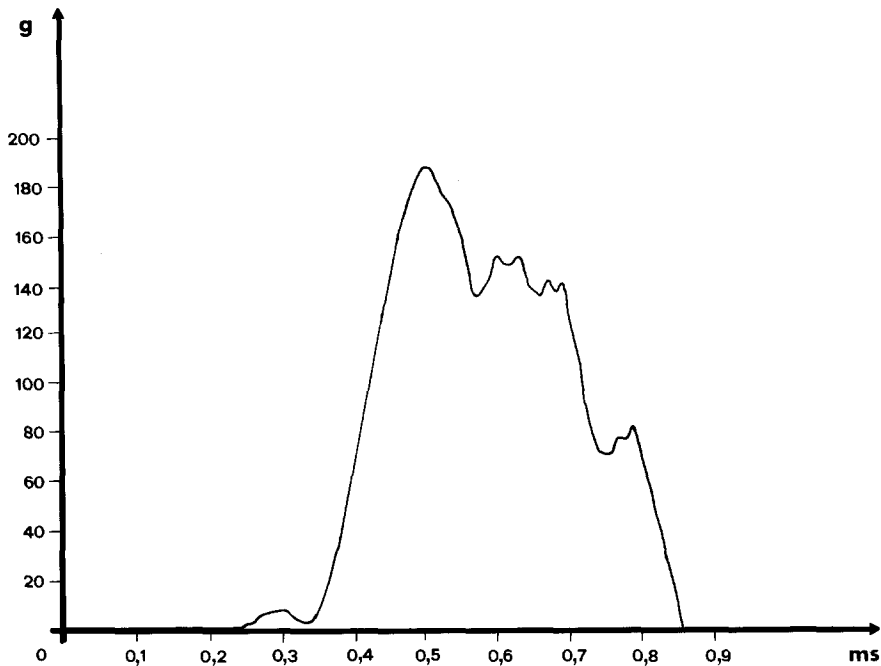


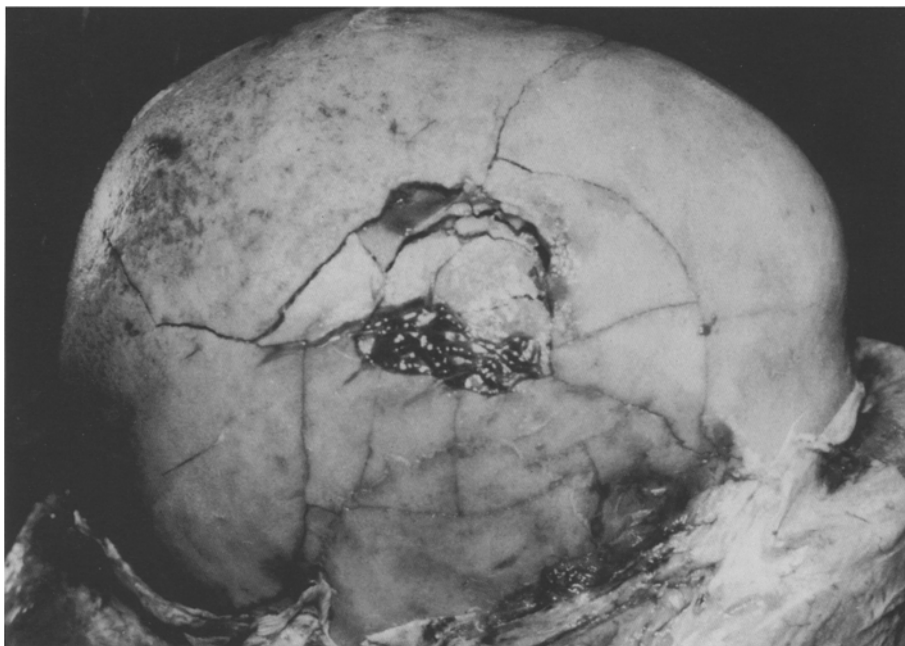
Abb. 6. Typischer Beschleunigungsverlauf nach Beschuß des Kunststoffhelmes D

ben einen solchen Versuch zum Vergleich durchgeführt und geben hier die Ergebnisse wieder: Es ergab sich beim Geschoß von Kal. 5,56 mm bei 0,3 ms ein peak von etwa 2000 g und eine mittlere Gesamtbeschleunigung mit Spitzenwerten von 500 g bei etwa 2 ms Einwirkdauer.

#### **Leichenversuche bezüglich Verletzungen von Schutzhelmträgern, bei denen der Helm dem Beschuß standhält (4. Versuchsreihe)**

An insgesamt 6 Leichen von Personen, die ihren Körper testamentarisch wissenschaftlichen Untersuchungen gewidmet hatten, wurden Beschußversuche vorgenommen. Hierzu wurden Kunststoffhelme (verwendet wurden Helme der Typen D, E und G) am Kopf der Leiche befestigt und anschließend wurde der helmbewehrte Kopf in einem Kugelfang fixiert. Mittels Richtlauf wurden nun Schüsse aus 150 cm Entfernung mit der Munition 9 × 19 mm auf die Helme abgegeben. Anschließend wurden die Leichen auf das Vorliegen von Schädelverletzungen durch äußere Besichtigung und folgende Sektion untersucht.

Die Helme hielten den Beschüssen stand. Bei den 6 Fällen traten insgesamt 3mal, also in 50% der Fälle, Weichteilverletzungen, nämlich Rißquetschwunden der Schädelchwarte auf. In 2 Fällen konnten Schädelfrakturen beobachtet werden. In einem Fall handelte es sich um eine lineare Fissur der Schädelkalotte mit Einstrahlung in die Schädelbasis, wobei eine begleitende subarachnoidale Blutung am Gehirn beobachtet werden konnte. Im anderen Fall, bei einer 70jährigen Frau mit einem allerdings sehr dünnen, nur 3 mm starken Schädelknochen, war ein kompletter grobscholliger Trümmerbruch mit Bruchzentrum unterhalb der Helmbeschußstelle aufgetreten (Abb. 7). Diese schwerste Schädigung lag beim Kunststoffhelm D vor, bei dem auch die ausgedehntesten Impressionen im Plastilin beobachtet werden konnten. Das Ergebnis der nur kleinen Versuchsreihe läßt die Vermutung zu, daß eine gute Zuordenbarkeit



**Abb. 7.** Schädelbruch unterhalb der Beschußstelle beim Kunststoffhelm D (Leichenversuch)

der Schwere der Schädelverletzungen zu Tiefe und Volumina der Impressionshöhlen im Plastilin besteht. Falls diese tatsächlich vorhanden sein sollte, wäre der Beschuß von Modellköpfen aus Plastilin zur praktischen Helmerprobung zu empfehlen.

### **Kasuistischer Beitrag**

Bei Durchsicht unseres Fallmaterials stießen wir auf zwei nahezu identische Fälle, die nur dadurch unterschieden waren, daß in einem Fall der Getötete einen Stahlhelm trug, im anderen Fall nicht. Es handelte sich um zwei Suizide junge Männer durch Schuß gegen die Stirne mit der gleichen Waffe, nämlich dem österreichischen Sturmgewehr StG 58 (Vorläufer des StG 77). Die Waffe weist ein Kaliber von 7,62mm auf, die Geschosse haben eine  $V_0$  von 840 m/s und eine Energie von 3386 J.

*Fall 1:* Der 24jährige J.L. hatte einen Freund angerufen und ihm telefonisch mitgeteilt, daß er sich töten werde. Der Freund versuchte, dem Mann die Tat auszureden, hörte aber durch das Telefon einen Schuß. Bei der Auffindung lag das Gehirn des Getöteten am Fußboden und Teile des Schädeldaches fehlten, es lag somit ein Krönlein-Schuß vor.

*Fall 2:* Der 19jährige H.L. äußerte wiederholt gegenüber seinen Kameraden Suizidabsichten. Kurz bevor er seinen Wachdienst antrat, wirkte er besonders nervös. Er wurde tot aufgefunden, der Stahlhelm, den er getragen hatte, wies zwei Schußbeschädigungen auf (Durchschuß). Der Einschuß der Haut in der Stirnmitte war andreaskreuzförmig ausgebildet mit einer Schenkellänge der Wunden von etwa 8cm. Auf dem Handschuh des Mannes konnten Pulverspuren, Blutspritzer und Knochensplitter aufgefunden werden.

Abbildung 8 zeigt die Schußbeschädigung des Schädels von Fall 1 und 2 in ihrem Vergleich. Während im Fall 1 beim Schuß auf den unbewehrten Kopf ein Krönlein-Schuß entstand, blieb der Schädel im Fall 2 trotz umfänglichster Zerstörung in seiner Gesamtheit noch intakt. Es läßt sich daraus ableiten, daß der Schutzhelm im konkreten Fall eine Verminderung



**Abb. 8.** Schuß in die Stirne mit StG 58. *Links:* Krönlein-Schuß bei an der Stirn angesetzter Mündung (Fall 1). *Rechts:* Gleiche Einschußlokalisation, aber vorher Durchschuß des Stahlhelmes (Fall 2)

der Verletzungswirkung nach sich gezogen hat. Diese ist durch zwei Mechanismen zu erklären: 1. Das Entstehen eines Krönlein-Schusses ist an eine gewisse Geschwindigkeit des Geschosses gebunden (ca. 800 m/s lt. 21). Durch das Durchschlagen des Helmes erlitt das Geschöß einen Geschwindigkeitsverlust, wodurch seine Geschwindigkeit unterhalb der notwendigen Geschwindigkeit abfiel. 2. Für die Zerstörungswirkung des angesetzten Schusses wesentlich sind die Pulvergase, die mit hohem Druck in den Schußkanal gelangen. Im Fall 2 konnten teilweise die Pulvergase durch den vorgeschalteten Helm abgefiltert werden.

## Diskussion

Unsere Versuche geben in ihrer Zusammenschau eine Erklärung zur Biomechanik des Schädelschusses beim Schutzhelmlträger im Vergleich zu einem Schuß, der den ungeschützten Kopf getroffen hätte. Die Versuche sind auch von Interesse, weil sie unter anderem Hochgeschwindigkeitsgeschosse betreffen, über deren Verletzungswirkung am Schädel nur wenig Material vorliegt [4]. Wir wollen die aufgrund unserer Untersuchungen erschlossenen Hypothesen darlegen, wobei wir aus Gründen des grundsätzlich anderen Ablaufes zwei Fälle unterscheiden und getrennt diskutieren müssen: Den einen Fall, bei dem der Helm durchschossen wird und das Geschöß in den Kopf eindringt, und den anderen Fall, daß der Helm dem Beschuß standhält.

Beim Durchschuß des Helmes entsteht genauso wie beim Schuß auf den ungeschützten Kopf eine Schußverletzung des Schädels. Während die Verletzung somit grundsätzlich die gleiche ist, wird der Verletzungseffekt – also die Quan-

tität der Schußbeschädigung – sehr unterschiedlich sein. Wird der Helm durchschossen, so kommen zwei miteinander konkurrierende Mechanismen in Gang: A) Die Geschwindigkeit und damit die Gesamtenergie des Geschosses wird vermindert. Das Ausmaß dieser Reduktion läßt sich anhand unserer in Versuchsreihe 1 (Punkt 4 der Publikation) gewonnenen Ergebnisse abschätzen. Mechanismus A führt zu einer Verminderung der Verletzungskapazität des Geschosses. B) Das Geschloß wird in folgender Weise beeinflusst: a) Instabilität des (zuvor drallstabilisierten) Geschosses wird durch den Helmdurchschuß angeregt und b) eine Geschloßdeformation oder c) Zersplitterung bzw. Zerstörung tritt auf. Alle unter a–c angeführten Mechanismen führen zu einer Erhöhung der pro Wegstrecke abgegebenen und damit vom Gewebe absorbierten Energie  $E_{ab}$ , wie unsere Versuchsreihe 2 (Punkt 5 der Publikation) demonstrierte. Hierdurch wird die Verletzungskapazität des Geschosses erhöht. Es wird nun darauf ankommen, welcher Mechanismus stärker ins Gewicht fällt. Bei langsamen – matten – Geschossen oder in Sonderfällen (wie in Punkt 8 der Publikation beschrieben) kann Mechanismus A überwiegen und die Verletzungen werden geringer sein, der Helm „schützt“ seinen Träger. Bei den üblichen eher rasanten Geschossen wird sich zumeist Mechanismus B stärker auswirken, der Verletzungseffekt wird intensiviert, und die paradoxe sowie unerwünschte Situation tritt auf, daß der Schutzhelm seinem Träger nicht nur keinen Schutz gewährt, sondern sogar zu seinem wesentlichen Nachteil gereicht.

Grundsätzlich anders ist die Situation, wenn am Schutzhelm kein Durchschuß auftritt, der Helm also ballistisch gesehen „hält“. Es resultiert dann natürlich keine Schußverletzung. Die Annahme, daß aber dann auch keine Schädelhirnverletzungen auftreten werden, ist – wie wir beweisen konnten – zweifellos falsch. Der unverletzte Schutzhelmlträger stellt nur den günstigsten möglichen Fall dar. Wie unsere Versuchsreihen 2 und 3 (Punkt 5 und 6 der Publikation) ergaben, kann ein erhebliches stumpfes Schädelhirntrauma vorliegen. Der Verletzungsmechanismus besteht hier in einer Kombination zweier sich in ihrer Wirkung verstärkenden Teilmechanismen: A) Es tritt eine Gesamtbeschleunigung des Schädels mit Beschleunigungsspitzen von 150 bis 180 g über 0,3 bis 0,5 ms auf. B) Es kommt zu einem stoßartigen, kleinflächigen, stumpfen Impressionstrauma am Schädel. Die oben angeführten Beschleunigungsspitzenwerte sind als nicht unerheblich zu bezeichnen. Unter Berücksichtigung der Literaturangaben über biomechanische Toleranzwerte bei Translationsbeschleunigung des Schädels [6, 17–19, 22] bei Bedachtnahme auf die zeitlichen Verhältnisse (Wayne-State-Kurven) werden diese Spitzenbeschleunigungen wahrscheinlich eine Commotio cerebri nach sich ziehen, möglicherweise auch geringgradige morphologisch faßbare Hirnschäden verursachen. In diesem Zusammenhang zeigte sich auch, daß geeignete Helmkonstruktionen (wie z. B. Helmtyp G) die Beschleunigungsspitzen durch zeitliche Dehnung des Stoßvorganges dämpfen und reduzieren können. Das eventuelle Auftreten von knöchernen Verletzungen wird durch unsere Leichenversuche belegt. Die Schädelfrakturen sowie allfällige Weichteilwunden der Schädelshwarte sind der lokalen Impression zuzuordnen. Zusammenfassend ist daher die Möglichkeit der Ausbildung von schweren und allfällig sogar tödlichen Hirnverletzungen auch dann nicht auszuschließen, wenn der Schutzhelm dem Beschuß standhält und

keine Einschußverletzung am Schädel auftritt. In der Regel wird aber in diesem Fall der Schußeffekt geringer sein als beim ungeschützten Schädel, da eine offene in eine geschlossene = gedeckte Hirnverletzung übergeführt wird oder da eine Verletzungsentstehung überhaupt vermieden werden kann.

## Literatur

1. Beyer JC, Enos WF, Holmer RH (1962) Personal protective armor. In: Coates JB, Beyer JC (ed) Wound ballistics. Office of the Surgeon General. Department of the Army. Washington DC
2. Birkmayer W, Huber K (1944) Die Beeinflussung der Hirnverletzung durch den Stahlhelm. In: Zimmer A (Hrsg) Kriegschirurgie, Franz Deuticke, Wien, Bd I, Seite 320
3. Carey M, Sacco W, Merkler J (1982) An analysis of fatal and non-fatal head wounds incurred during combat in Vietnam by U.S. forces. Acta Chir Scand [Suppl] 508:351
4. Clemenson CJ, Falconer B, Frankenberg L, Jönson A, Wenerstrand J (1973) Head injuries caused by small-calibre, high velocity bullets. An experimental study. Z Rechtsmed 73:103
5. Dirrheimer G (1983) Der militärische Stahlhelm in Österreich. Militaria Austriaca 4:5
6. Krauland W (1982) Verletzungen der intrakraniellen Schlagadern. Springer, Berlin Heidelberg New York
7. Lenaerts J (1984) Die ballistische Schutzwirkung von Kevlar-Fasern. Internationale Wehrrevue 6:815
8. Missliwetz J, Wieser I (1986) Endballistische Verbundmodelle – ihre Anwendung in der wundballistischen Forschung. Beitr Gerichtl Med 44 (im Druck)
9. ÖNORM S 1310 (1985) Beschußhemmende Konstruktionen. Beschußklassen. Österreichisches Normungsinstitut. A-1021 Wien, Postfach 130
10. Ohne Verfasser (1981) Symbole des deutschen Soldaten. Alte Kameraden 8:22
11. Ohne Verfasser (1982) Neuer Helm für US-Army. Armada International 5:104
12. Ohne Verfasser (1983) Ein neuer leichter Helm. Soldat und Technik 7:394
13. Ohne Verfasser (1983) Kevlar aramid fibre. Asian Defence Journal 1:87
14. Ohne Verfasser (1983) New british combat und parachutist helmet. Natos 16 Nations 4:94
15. Ohne Verfasser (1984) New army helmet – chopper made Grenada combat debut. Army 1:13
16. Ohne Verfasser (1984) Kevlar, Nomex III für Personenschutz im Militärbereich. Du Pont de Nemours International SA (Hrsg) Postfach Ch-1211, Genf 24
17. Patrick LM (1970) Human tolerance to impact – basic for safety design. SAE 700155
18. Sellier K, Unterharnscheidt F (1963) Mechanik und Pathomorphologie der Hirnschäden nach stumpfer Gewalteinwirkung auf den Schädel. Hefte zur Unfallheilkunde 76. Springer, Berlin Heidelberg New York
19. Sellier K (1971) Das Schädel-Hirn-Trauma. Neuere Erkenntnisse und Zusammenstellung von Toleranzwerten von knöchernem Schädel und Gehirn bei mechanischer Gewalteinwirkung. Z Rechtsmed 68:239
20. Sellier K (1977) Schußwaffen und Schußwirkungen II. Arbeitsmethoden der medizinischen und naturwissenschaftlichen Kriminalistik, Verlag Max Schmidt-Römhild, Lübeck, Bd 15:119
21. Sellier K (1983) Schußwaffen und Schußwirkungen I. Arbeitsmethoden der medizinischen und naturwissenschaftlichen Kriminalistik, Verlag Max Schmidt-Römhild, Lübeck, Bd. 8:201, 2. Auflage
22. Unterharnscheidt F (1972) Die traumatischen Hirnschäden. Mechanogenese, Pathomorphologie und Klinik. Z Rechtsmed 71:153

Eingegangen am 15. Juli 1988