

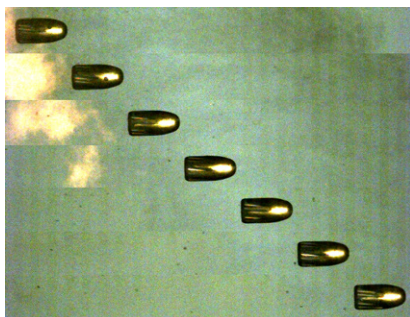


## Messung der Geschossgeschwindigkeit mittels Hochgeschwindigkeitskamera

**In der Ballistik ist die Bestimmung der Geschossgeschwindigkeit  $v$  essenziell, um aus der bekannten Geschossmasse  $m$  die Geschossenergie  $E = 1/2 mv^2$  errechnen zu können. Üblicherweise werden zur Geschwindigkeitsmessung Lichtschranken verwendet. Je nach Versuchsaufbau kann dieses Verfahren jedoch nicht immer eingesetzt werden. Deshalb wurde überprüft, ob sich die Geschossgeschwindigkeit auch mit einer Hochgeschwindigkeitskamera ausreichend genau ermitteln lässt.**

### Einleitung

In der forensischen Praxis gibt es eine Vielzahl dynamischer Prozesse, deren Geschwindigkeit das menschliche Auge überfordert. Auch mit konventionellen Videoaufzeichnungen (30–60 Bilder/s,

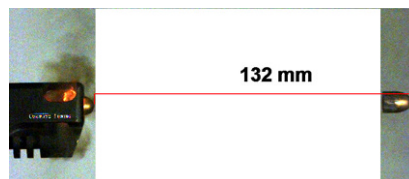


**Abb. 1** ▲ Fortschritt des 10,2 g schweren Geschosses Kaliber 9 mm Luger in 0,48 ms, Geschwindigkeit im Bild 255 m/s, Bildbreite 149 mm. Zwischen den Aufnahmen liegen 80  $\mu$ s. Anfangs ist noch Mündungsfeuer im Bild. Man beachte das Feld-Zug-Profil und dessen Bewegung durch die Geschossrotation um die Längsachse (Drall)

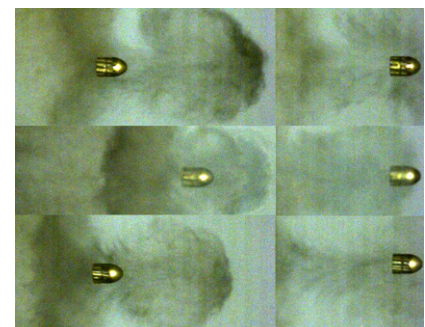
„frames per second“, fps) stößt man schnell an Grenzen. Mit sog. Hochgeschwindigkeitskameras, die Bildraten von mehreren tausend fps aufzeichnen können, steht eine Technik zur Verfügung, die sogar hochdynamische Prozesse abbilden kann. Derartige Kameras werden bspw. in der Materialforschung, Unfallanalytik (Crashversuche) oder der Sportmedizin eingesetzt. In der Ballistik haben sie einen festen Platz, da sie eine zerstörungsfreie Analyse von Schussereignissen ermöglichen, ohne das Experiment zu beeinflussen [5–7, 10–12]. Insbesondere die Beobachtung der Geschoss-Zielmedium-Interaktion im transparenten wundballistischen Simulanz Gelatine hat so wertvolle Erkenntnisse geliefert [4]. Für die Ausbreitung von Schmauchpartikeln und zur Abschätzung von deren Geschwindigkeit wurden ebenfalls Hochgeschwindigkeitskameras eingesetzt [2, 13].

Zur Beurteilung von Beschussergebnissen ist die Kenntnis der Geschoss-

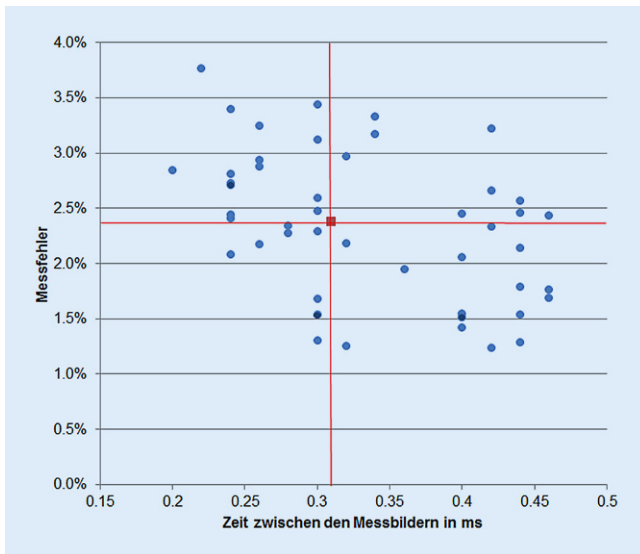
energie ( $E = 1/2 mv^2$ ) unabdingbar. Üblicherweise werden Schussversuche deshalb so gestaltet, dass die Geschossgeschwindigkeit kurz vor dem Ziel mittels Lichtschranken gemessen wird. Schwieriger wird es, wenn das Zielobjekt nicht geeignet ist, die gesamte Geschossenergie aufzunehmen und es zum Durchschuss kommt. Für die korrekte Beurteilung der Zerstörung ist die Kenntnis der im Beschussmedium abgegebenen Energie notwendig. Dies setzt die Ermittlung der kinetischen Restenergie des Geschosses voraus. Eine Möglichkeit wäre die Platzierung einer zweiten Lichtschranke hinter dem Beschussobjekt. In der Praxis hat sich dieses Verfahren als schwierig erwiesen, da die Flugbahn des Geschosses nach Austritt aus dem Zielmedium oftmals stark und unberechenbar von der ursprünglichen Schussrichtung abweicht [8]. Dies bedeutete nicht nur regelmäßige Ausfälle des benötigten



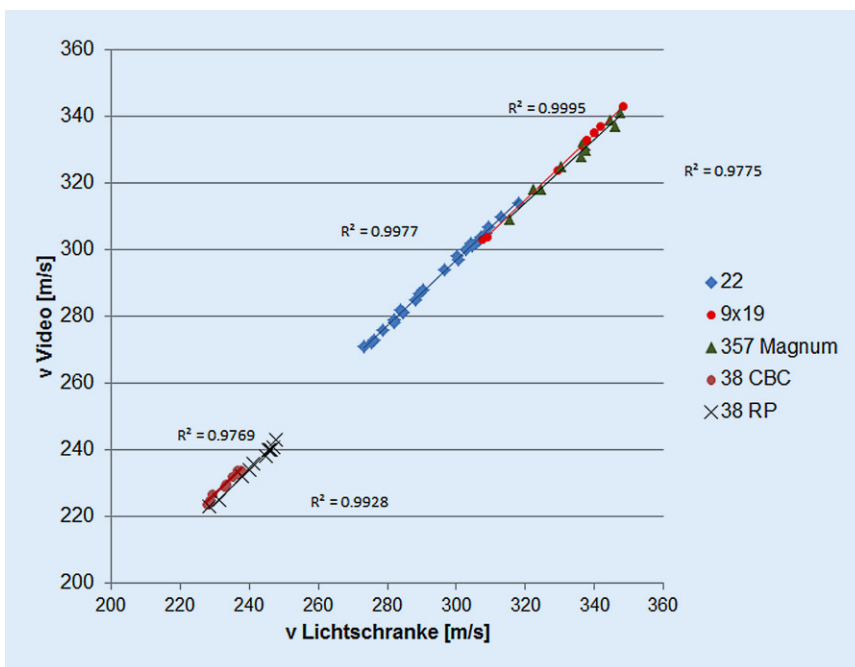
**Abb. 2** ▲ Glock mit Mündungskompensator, 6,1-g-Geschoss im Kaliber 9 mm Luger. Geschwindigkeit im Bild 367 m/s. Durch „Bildberechnung“ in Photoshop zusammengeführte Einzelbilder nach „Ausschnitt“ der Bereiche vor resp. hinter dem Geschoss. Nach Skalierung Vermessung in AxioVision



**Abb. 3** ▲ 7,65 Browning. Obere Reihe scharf abgebildet, 1,4 % Messfehler. Mittlere Reihe unscharf, 3,8 % Messfehler. Untere Reihe gut abgebildet, 2,4 % Messfehler (Durchschnitt in dieser Serie). Man beachte die Ausbreitung der Schmauchschwaden



**Abb. 4** ▲ Serie mit 7,65 Browning ( $n = 48$ ), die bei breit gestreuten Längen der jeweiligen Messstrecken keine Abhängigkeit des Messfehlers erkennen lässt. Vier-Quadranten-Darstellung des Messfehlers in Abhängigkeit von der gewählten Messstrecke (Zeit zwischen den Messbildern). Die Spannweite der x-Werte (Zeit) entspricht einer Messstrecke von 65–144 mm. Das rote Achsenkreuz markiert den Median. Sich überlagernde Bildpunkte sind dunkler dargestellt



**Abb. 5** ▲ Darstellung eines Teils der Ergebnisse mit einer Bildbreite von 23 cm. 9×19 = 9 mm Luger Geco, 357 Magnum = .357 Magnum Geco, 38 CBC = .38 Special Magtech, 38 RP = .38 Special Remington, 22 = .22 Long Rifle RWS und Eley

Messwertes, weil das Geschoss ein oder beide Tore der Lichtschranke verfehlte, sondern oftmals auch Beschädigungen der Lichtschranke. Versuchte man dieses Risiko zu verringern, indem man die zweite Lichtschranke unmittelbar hinter das Beschussobjekt stellte, wurden vie-

le Messungen durch aus dem Zielmedium austretendes Material („forward spatter“) vereitelt. Eine Alternative wäre die Verwendung eines Dopplerradar [1, 3, 8], der quasi hinter dem Geschoss her misst und das Gerät somit außerhalb der Gefahrenzone stünde. Eine andere Mög-

lichkeit wäre, die ohnehin zur Beobachtung des Schussexperimentes installierte Hochgeschwindigkeitskamera zur Messung der Geschossgeschwindigkeit vor und insbesondere hinter dem Zielmedium zu verwenden. Dieser einfache Gedanke hat allerdings einen Schönheitsfehler. Bildet man nicht nur das Zielobjekt, sondern auch eine Strecke davor und dahinter ab, nimmt die Abbildungsgröße des Zielobjektes entsprechend ab, sodass sich gesuchte Details nicht mehr differenzieren lassen könnten. Mit einem breiteren Bildausschnitt wachsen die Probleme, eine genügende Ausleuchtung zu realisieren. Schließlich war es fraglich, ob eine Kameraeinstellung gefunden werden kann, die zumindest Projektile aus Faustfeuerwaffen so abbildet, dass Messungen der Geschossbewegung möglich wären. Ziel der vorliegenden Studie war es also, die Praktikabilität und Zuverlässigkeit der Geschwindigkeitsmessung eines Projektils mittels Hochgeschwindigkeitskamera zu untersuchen.

## Material und Methode

Verwendet wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera SA-X2 (Photron Europe Ltd., West Wycombe, England) mit einem Objektiv Nikkor 105 mm/f2.8 (Nikon, Tokio, Japan), sodass unterschiedlich große Strecken (15–23 cm) vor der Laufmündung mit 50.000 fps bei 0,29  $\mu$ s Belichtungszeit abgebildet wurden (Abb. 1). Bei allen Aufnahmen wurde die sog. Bitshiftoption eingesetzt, d. h. der Dynamikumfang von 12 Bit (volle Sensorleistung) wurde auf 8 Bit reduziert, um auch bei extrem kurzer Belichtungszeit ein helles Bild zu erzielen. Die Bildgröße bei 50.000 fps betrug 768 × 328 Pixel.

Die Beleuchtung wurde mit einem LED-Scheinwerfer BoostNova (336 LED auf 29 cm × 19 cm, 145.000 lm, 5800K) der Firma Artrolux GmbH (Memmingen, Deutschland) realisiert. Die erste Aufnahme nach definitiver Kamera- und Lichteinrichtung bildete jeweils einen Maßstab ab. Die Geschossgeschwindigkeit wurde 1 m hinter der Laufmündung mit einer Lichtschranke BMC21 (Kurzzeitmesstechnik Werner Mehl, Diebach, Deutschland) ermittelt, deren Auflösung

0,05 m/s bei bis zu 1000 m/s Geschwindigkeit beträgt.

Es kamen gebrauchstübliche Faustfeuerwaffen im Kaliber .22 Long Rifle, 7,65 Browning, 9 mm Makarov, 9 mm Luger, .38 Special, .357 Magnum und .45 Auto mit unterschiedlichen Patronen zum Einsatz, die mit aufgestützter Hand abgefeuert wurden. Angestrebt wurde eine möglichst große Spannweite von Geschwindigkeiten.

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wurden im Rohformat so gespeichert, dass eine Sequenz aus TIFF-Bildern vorlag. Aus diesen wurden die 2 Bilder ausgesucht, welche die Geschosspitze klar erkennen ließen und den größtmöglichen zeitlichen Abstand zueinander hatten. In dem Bildbearbeitungsprogramm Photoshop CS2 (Adobe) wurden sodann die Bildabschnitte gelöscht (Werkzeug „Ausschneiden, rechteckig variabel“), die vor resp. hinter dem Geschoss lagen (▣ **Abb. 2**). Die in beiden Bildern noch sichtbaren Rahmen (Masken) wurden nicht gelöscht. Nun war es möglich, durch die Funktion „Bildberechnungen“ beide Bilder im Modus „normal 100 %“ zu fusionieren, ohne die Qualität der Geschossabbildung zu verändern. Vorversuche hatten gezeigt, dass alle anderen Methoden der Bildüberlagerung mit einem erheblichen Verlust an Bildqualität einhergingen. In der Bildanalysesoftware AxioVision 4.9 SE64 (Zeiss) wurde anhand des zuvor abgebildeten Maßstabes eine Kalibrierung ermittelt, die eine Skalierung der Zielaufnahmen ermöglichte. Gemessen wurde die Entfernung zwischen beiden abgebildeten Geschosspitzen (▣ **Abb. 2**), die dividiert wurde durch die entsprechende Zeitdifferenz zwischen den zugrunde gelegten Bildern.

## Ergebnisse

Insgesamt konnten 209 Schussversuche vollständig dokumentiert werden. Rund 90 GB Filmmaterial wurden auf etwa 6500 Einzelbilder reduziert. Aus den etwa 25–50 Bildern je Schuss wurden die 2 Bilder mit klar abgrenzbarer Geschosspitze bei größtmöglicher Distanz für die Messung ausgewählt. Dabei zeigte sich, dass je nach verwendeter Munition

Rechtsmedizin 2017 · 27:273–277 DOI 10.1007/s00194-017-0180-z  
© Springer Medizin Verlag GmbH 2017

C. Schyma · J. Brünig · C. Jackowski · R. Müller

## Messung der Geschossgeschwindigkeit mittels Hochgeschwindigkeitskamera

### Zusammenfassung

Um die Geschossenergie zu errechnen, ist die Messung der Geschossgeschwindigkeit erforderlich. Untersucht wurde, ob eine Hochgeschwindigkeitskamera hierfür grundsätzlich geeignet ist. Mit einer SA-X2 (Photron) wurden Aufnahmen mit 50.000 Bildern/s und 0,29  $\mu$ s Belichtungszeit vor bzw. an der Waffenmündung in einer Breite von ca. 15–23 cm gemacht. 209 Schüsse mit Munition in den Kalibern von .22 Long Rifle bis .45 Auto (228–388 m/s) wurden videografisch dokumentiert und die bildanalytischen Messwerte mit den Messergebnissen einer Lichtschranke BMC21 (Mehl) verglichen. Die Abweichungen betragen maximal  $\pm$  2,5 %. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  für die

lineare Abhängigkeit betrug im Median 0,987. Die Reproduzierbarkeit der bildanalytischen Messwerte lag bei  $\pm$  1 m/s. Als wichtigster Faktor für die Zuverlässigkeit der Messungen wurde die Fokussierung der Flugbahn des Geschosses identifiziert. Unter Voraussetzung einer scharfen Abbildung des Geschosses war die Länge der Messstrecke von untergeordneter Bedeutung für die Messgenauigkeit.

### Schlüsselwörter

Hochgeschwindigkeitsvideo · Geschossgeschwindigkeit · Bildanalyse · Ballistik · Schusswaffe

## Measurement of bullet velocity using a high-speed camera

### Abstract

For calculating a projectile's energy, measurement of its velocity is necessary. The study was performed to evaluate if the use of a high-speed camera is principally feasible for this purpose. Filming was done using a SA-X2 (Photron) positioned about 15 to 23 cm in front of or at the muzzle with 50,000 frames per second and a 0.29  $\mu$ s exposure time. Video was used to document 209 shots using ammunition from 22 long rifle to 45 auto (228 to 388 m/s). The velocity calculated by image analysis was compared with the measurements obtained by a light barrier speed measurement device BMC21 (Mehl). The deviation was at most  $\pm$  2.5%.

The coefficient of determination  $R^2$  for linear correlation was in the median 0.987. The reproducibility of the results obtained by image analysis was about  $\pm$  1 m/s. Focusing the bullet's trajectory could be identified as the most important factor for the reliability of measurements. When the bullet was sharply imaged, the length of the measured distance played a secondary role for measurement accuracy.

### Keywords

High-speed video · Bullet velocity · Image analysis · Ballistics · Firearm

und Waffe die Schmauchentwicklung (▣ **Abb. 3**) das Projektil teilweise verdeckte, sodass die effektive Messstrecke in solchen Fällen weniger als die Hälfte des von der Kamera erfassten Bildausschnittes betrug. Die diesbezügliche Analyse der Daten ergab jedoch, dass die erzielbare Genauigkeit hinsichtlich der Geschwindigkeitsmessung hiervon nicht beeinträchtigt wurde. Exemplarisch sei die Messreihe von 48 Schüssen im Kaliber 7,65 Browning gezeigt. Wie die Punktelwolke vermuten lässt, gab auch die sog. Quadrantenkorrelation [9] keinen Hinweis auf einen Merkmalszu-

sammenhang (▣ **Abb. 4**). Am Beispiel von 8 Schüssen mit dem 6,1-g-Geschoss im Kaliber 9 mm Luger (breite Geschwindigkeitsstreuung von 50 m/s) wurde zusätzlich an Bildern im letzten Teil der sichtbaren Flugbahn gemessen, die einheitlich lediglich 0,200 ms (10 Bilder weit) auseinander lagen. Dadurch reduzierte sich sogar die Abweichung beider Messmethoden von 0,9 % auf 0,5 %. Die mittlere Messstrecke lag bei gut 3,5 cm.

▣ **Tab. 1** gibt einen Überblick über die Resultate. Der v-Messwert der Lichtschranke ist als Referenzwert voran-

Tab. 1 Zusammenfassung der Messergebnisse

Kaliber	Hersteller Marke	Geschossmasse [g]	n	Geschwindigkeit [m/s]		R <sup>2</sup>	V/L [%]	Messbereich [mm]
				min	max			
7,65 mm Browning	Geco	4,7	48	300	330	0,948	2,3	148
9 mm Luger	Fiocchi	10,2	19	237	270	0,968	2,3	148
9 mm Makarov	Militärisch	6	10	291	323	0,995	-0,3	169
.45 ACP	Geco	14,9	7	245	263	0,994	-1,3	169
.45 ACP	H&F	14,9	9	263	268	0,812	-1,0	169
9 mm Luger	Geco	8	8	346	363	0,934	0,3	171
9 mm Luger	Sellier&Bellot	6,1	8	336	388	0,992	0,9	171
.38 special	Winchester	9,6	8	231	238	0,934	2,5	171
.38 special	Geco	10,2	8	240	262	0,989	2,1	171
.357 Magnum	Geco	10,2	8	305	363	0,958	2,5	171
.22 long rifle	Eley	2,6	13	273	290	0,987	-1,0	230
.22 long rifle	RWS	2,6	13	297	318	0,987	-1,0	230
7,65 mm Browning	Sellier&Bellot	4,7	9	291	310	0,988	-1,2	230
9 mm Luger	Geco	8	10	308	348	1,000	-1,5	230
.38 special	Remington	10,2	11	228	248	0,993	-2,4	230
.38 special	Magtech	10,2	9	228	238	0,977	-1,3	230
.357 Magnum	Geco	10,2	11	315	348	0,978	-2,0	230

Übersicht über die verwendete Munition, geordnet nach der Breite des Bildausschnittes (Messbereich)

n bezeichnet die Anzahl der dokumentierten Schüsse. Die Spannweite bezieht sich auf die mit der Lichtschranke gemessenen Geschwindigkeiten. R<sup>2</sup> ist das Bestimmtheitsmaß der linearen Korrelation. V/L bezeichnet die durchschnittliche Abweichung der aus dem Video errechneten Geschwindigkeit zum Messwert der Lichtschranke

gestellt und stellt nachfolgend die Bezugsgröße (100 %) dar. Die Auflistung differenziert sowohl nach den Munitionssorten als auch nach den Versuchstagen, da jeweils eine neue Einrichtung der Kamera erforderlich war. Der Quotient aus  $V_{\text{video}}$  zu  $V_{\text{Lichtschranke}}$  zeigt einen Zusammenhang mit dem Versuchstag, d. h. der Positionierung der Kamera und Kalibrierung des Bildes.

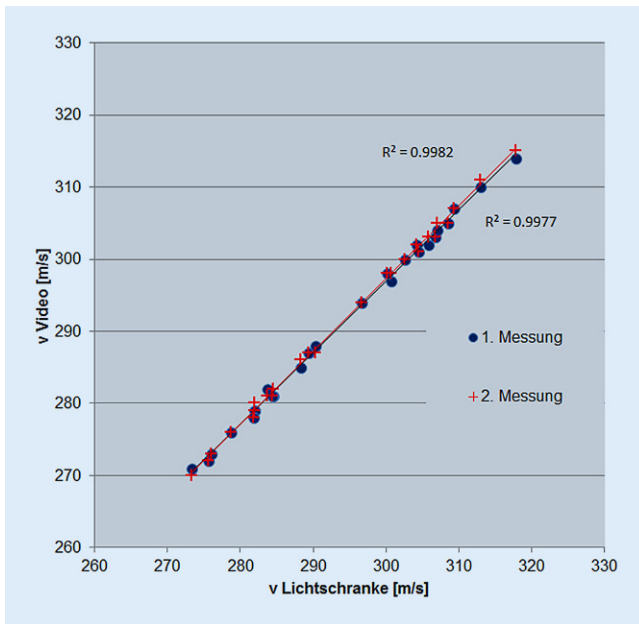
Zur Prüfung der linearen Korrelation zwischen beiden Messwerten für die Geschwindigkeit wurde das Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> [9] errechnet, das zumeist über 0,95 lag. **Abb. 5** zeigt exemplarisch die gute Korrelation auch bei sehr unterschiedlichen Munitionssorten. Für die Messreihen mit R<sup>2</sup>-Werten < 0,95 wurde der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman [9] bestimmt, der mit einem Signifikanzniveau von  $p = 0,001$  die Korrelation der Messwerte bestätigte. Lediglich in der Schussreihe mit belgischer Munition im Kaliber .45 Auto verfehlte das Signifikanzniveau für die Rangkorrelation knapp  $p = 0,05$ . Allerdings ist anzumerken, dass diese Munition mit einer Spann-

weite von nur 5 m/s bei 9 Messungen durch höchste Präzision auffiel, wodurch allfällige Messfehler die Linearität überlagert haben könnten. Messfehler könnten durchaus durch die über die gesamte Bildbreite (17 cm) ziehenden Schmauchschwaden bedingt gewesen sein.

Alle Schussbilder wurden in unabhängiger Weise zweimal mit der angegebenen Methode vermessen. Als repräsentatives Beispiel wird hier die Reihe im Kaliber .22 Long Rifle gezeigt, die eine ausreichende Spannweite 273–318 m/s aufwies (**Abb. 6**). 15 von 26 Ergebnissen veränderten sich nicht, 8 Messwerte lagen um 1 m/s höher, 3 um 1 m/s niedriger. Dies entspricht dem Umstand der Rundung aller Ergebnisse auf m/s ohne Dezimale. Das Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> veränderte sich von 0,9977 auf 0,9982 praktisch nicht. Auch die durchschnittliche prozentuale Abweichung der bildanalytischen Messwerte von jenen der Lichtschranke blieb bei 1,0 %. Somit ist eine Wiederholbarkeit von  $\pm 1$  m/s gegeben.

Die Reihe von 48 Schüssen im Kaliber 7,65 Browning zeigte bei Wiederholung der Ausmessung nach Auswahl der jeweils schärfsten Abbildung – also im hinteren Abschnitt der Flugstrecke ohne Schmauchüberlagerung – eine auffallende Zunahme der Abweichung von den Messergebnissen mit der Lichtschranke (von 2,4 % auf 2,8 %). Die Gegenprobe, nämlich die erneute Ausmessung im vorderen Anteil (Schmauchbereich), ergab hingegen eine Verbesserung des Ergebnisses (Verringerung der durchschnittlichen Abweichung von 2,4 % auf 1,8 %). Die Erklärung für diese merkwürdige Konstellation zeigte sich in der genauen Betrachtung der Bilder (**Abb. 3**). In dieser Serie wich die Achse vieler Schüsse geringfügig von der fokussierten Ebene ab, dies offensichtlich im hinteren Teil der Flugbahn, sodass hierdurch die Verzeichnung zu tendenziell überhöhten Messwerten führte.





**Abb. 6** ◀ Gute Übereinstimmung von erster und zweiter Messung am Beispiel der Serie im Kaliber .22 Long Rifle ( $n = 26$ )

## Schlussfolgerungen für die Praxis

Als Voraussetzung für eine Messung der Geschwindigkeit mittels Hochgeschwindigkeitskamera haben sich folgende Punkte herausgestellt:

- Kürzest mögliche Belichtungszeit, um Bewegungsunschärfe zu unterdrücken.
- Genaue Ausrichtung des Maßstabes in Seelenachse des Waffenlaufes.
- Exakte Fokussierung des Maßstabes.
- Einhaltung eines Schusswinkels von  $0^\circ$  (kein Abweichen aus der fokussierten Ebene).
- Genügender Abstand von der Laufmündung (ab etwa 20 cm keine optische Beeinträchtigung durch die Schmauchwolke mehr).
- Die Auswahl zweier Bilder als Messgrundlage orientiert sich primär an der Qualität (Schärfe), der zeitliche Abstand der Bilder ist nachrangig.

Die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse basierend auf der vorgestellten Technik betrug für den hier untersuchten Geschwindigkeitsbereich von Projektilen aus Faustfeuerwaffen  $\pm 1$  m/s.

## Korrespondenzadresse

### PD Dr. C. Schyma

Institut für Rechtsmedizin, Universität Bern  
Bühlstr. 20, 3012 Bern, Schweiz  
christian.schyma@irm.unibe.ch

**Danksagung.** Die Untersuchungen wurden durch den Schweizer Nationalfond (SNF) im Rahmen des Projektes „Absoluter Nahschuss: Vom Schuss zur Spur“ (310030E-147628/1) gefördert. Wir danken Andreas Mangold (VKT, Pfullingen, Deutschland) für seine technische Unterstützung.

## Einhaltung ethischer Richtlinien

**Interessenkonflikt.** C. Schyma, J. Brünig, C. Jackowski und R. Müller geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Dieser Beitrag beinhaltet keine von den Autoren durchgeführten Studien an Menschen oder Tieren.

## Literatur

1. Carr D, Lindstrom AC, Jareborg A, Champion S, Waddell N, Miller D, Teagle M, Horsfall I, Kieser J (2015) Development of a skull/brain model for military wound ballistics studies. *Int J Legal Med* 129(3):505–510
2. Ditrich H (2012) Distribution of gunshot residues – the influence of weapon type. *Forensic Sci Int* 220(1–3):85–90
3. Kneubuehl B (2013) Geschosse. Ballistik, Wirksamkeit, Messtechnik, Treffsicherheit. *Stocker-Schmid, Dietikon*, S305–314
4. Kneubuehl B, Coupland RM, Rothschild MA, Thali M (2008) *Wundballistik: Grundlagen und Anwendungen*, 3. Aufl. Springer, Berlin Heidelberg

5. Kramer L, Nadjem H, Glardon M, Kneubuehl BP, Pollak S, Große Perdekamp M, Pircher R (2016) A patterned abrasion caused by the impact of a cartridge case may simulate an atypical muzzle imprint mark. *Int J Legal Med* 130(3):751–757. doi:10.1007/s00414-015-1281-4
6. Lazarjan MS, Geoghegan PH, Taylor MC, Jermy MC (2015) Visualization of the air ejected from the temporary cavity in brain and tissue simulants during gunshot wounding. *Forensic Sci Int* 246:104–109
7. Radford GE, Taylor MC, Kieser JA, Waddell JN, Walsh KA, Schofield JC, Das R, Chakravorty E (2016) Simulating backscatter of blood from cranial gunshot wounds using pig models. *Int J Legal Med* 130(4):985–994
8. Riva F, Kerkhoff W, Bolck A, Mattijssen EJ (2017) Possible influences on bullet trajectory deflection in ballistic gelatine. *Forensic Sci Int* 271:107–112. doi:10.1016/j.forsciint.2016.12.030
9. Sachs L (1984) *Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden*, 6. Aufl. Springer, Berlin, S298–314
10. Schyma C, Bauer K, Brünig J, Schwendener N, Müller R (2017) Visualization of the powder pocket and its influence on staining in firearm barrels in experimental contact shots. *Int J Legal Med* 131(1):167–172. doi:10.1007/s00414-016-1419-z
11. Sterzik V, Kneubuehl BP, Bohnert M, Riva F, Glardon M (2017) Bullet fragmentation preceding a contour shot: case study and experimental simulation. *Int J Legal Med* 131(1):173–177. doi:10.1007/s00414-016-1462-9
12. Taylor MC, Laber TL, Epstein BP, Zamzow DS, Baldwin DP (2011) The effect of firearm muzzle gases on the backscatter of blood. *Int J Legal Med* 125(5):617–628
13. Wasserburger L, Eichner S, Kunz S, Peschel O (2011) Verletzungspotenzial von Gas-Alarm-Waffen. Ausgeschleuderte Ladungsteilchen bei Schüssen im Nahbereich. *Rechtsmedizin* 21:527–534