Z. Rechtsmed. 83, 163—168 (1979)

Zeitschrift für
Rechtsmedizin

Bemerkungen zur Arbeit von D. Tausch et al.

Experiments on the Penetration Power of Various Bullets into Skin and Muscle Tissue

K. Sellier

Institut für Gerichtliche Medizin der Universität, Stiftsplatz 12, D-5300 Bonn, Bundesrepublik Deutschland

Remarks on the Paper by D. Tausch et al.

Experiments on the Penetration Power of Various Bullets into Skin and Muscle Tissue

In dieser Arbeit haben die Autoren in verdienstvoller Weise zahlreiche Messungen von Eindringtiefen unter Variation der Parameter Geschwindigkeit, Masse und Form der Geschosse vorgenommen. Den Schlüssen aus diesen Messungen kann jedoch nicht gefolgt werden.

Die kritische Geschwindigkeit v_{cr} wird einmal als Funktion der Geschoßmasse dargestellt, weiterhin auch als Funktion der Querschnittsbelastung S. Da letztere Funktion eine größere (quadratische) Streuung besitzt als die mit der Masse (die Angabe des Korrelationskoeffizienten wäre zweckmäßig gewesen), kommen die Autoren zu dem Schluß, daß die Masse entscheidend für das Eindringvermögen sei, und nicht etwa die Geschwindigkeit, die Form oder die Querschnittsbelastung des Geschosses. Dem ist nicht zu folgen. Die Autoren verwechseln zwei wesentlich verschiedene Beschreibungen eines naturwissenschaftlichen Sachverhaltes. Es gibt einmal die rein deskriptive mathematische Zusammenfassung der Meßwerte in Form einer Kurve, die den Meßpunkten am besten angepaßt ist und dann natürlich auch nur für *den* Bereich gilt, in dem Meßwerte vorhanden sind (letztes werden die Autoren stillschweigend vorausgesetzt haben). Eine solche Kurve sagt über die physikalischen Gegebenheiten überhaupt nichts aus. Die mathematische Kurve ist gewissermaßen nur die unterste Stufe der Erkenntnis. Erst wenn die Meßpunkte aufgrund einer physikalisch begründeten Theorie vorausgesagt werden können, ist eine befriedigende Lösung vorhanden. Zweierlei ist gegen die von den Autoren angegebene Funktion

$$(1)\quad \begin{aligned} c_{cr} &= f(m) \\ &= 162{,}1 \cdot e^{-0{,}38\sqrt{m}} \end{aligned}$$

zu sagen. Erstens ergibt sie für $m \to 0$ ein v_{cr} von 162,1 m/s, was in der Natur der rein mathematischen Beschreibung der Meßwerte liegt (unzulässige Extrapolation), physikalisch aber keinen Sinn ergibt. Zweitens ist aus physikalischen Gründen nicht die Abhängigkeit der v_{cr} von *m allein* einzusehen. Das Eindringen des Geschosses ist zunächst ein elastischer Vorgang, der zur Spaltung der Haut führt, möglicherweise mit einem Stanzvorgang. Es muß dafür eine Kombination von *m und v* (allgemein $m^{\lambda} \cdot v^{\mu}$) ins Spiel kommen, sei es nun $m v$ (Impuls) oder $\frac{m}{2} v^2$ (Energie), keinesfalls m allein.

In einer Arbeit [3] wurde ausgeführt, daß die spezifische, auf die Fläche F bezogene Auftreff-Energie $E/F = E'$ [J/cm^2] ein vernünftiges Maß zur Beschreibung des Durchschlagvermögens eines Geschosses darstellt. Mit Hilfe des Wertes der kritischen spezifischen Energie E'_{cr} kann v_{cr} berechnet werden, falls E'_{cr} bekannt ist. Ich darf den Zusammenhang kurz skizzierten (siehe ausführlich [3]):

Aus der bekannten Gleichung

$$(2) \quad E = \frac{m}{2} v^2$$

ergibt sich durch Division von F:

$$(3) \quad E/F = \frac{1}{2} \frac{m}{F} \cdot v^2$$

und mit $m/F = S$ (Querschnittsbelastung) sowie $E/F = E'$:

$$(4) \quad E' = \frac{1}{2} \cdot S \cdot v^2$$

oder für die kritischen Werte E'_{cr} und v_{cr}:

$$(5) \quad E'_{cr} = \frac{1}{2} S \cdot v^2_{cr}$$

Auflösung nach v_{cr} ergibt:

$$(6) \quad v_{cr} = \frac{1}{\sqrt{S}} \cdot 2 \cdot E'_{cr}$$

E'_{cr} ist als biomechanische Konstante anzusehen. Man erhält so v_{cr} als Funktion von S' ($v_{cr} = f/[S]$), wobei diese Gleichung als physikalisch begründet anzusehen ist. Für $S \to 0$ geht $v_{cr} \to \infty$, was physikalisch sinnvoll ist (ein Staubkorn dringt in Haut nicht ein); für $S \to \infty$ geht $v_{cr} \to 0$. Auch dieses Ergebnis ist verständlich: Messungen ergaben [3], daß lange Nägel mit hohem S (≈ 70 g/cm^2) eine v_{cr} um 22 m/s, also sehr wenig, besaßen. Es ist die Frage, ob Gl. (6) auch die von den Autoren gemessenen Werte gut beschreibt, wenn für E'_{cr} ein bestimmter Wert eingesetzt wird. Das ist nun in der Tat der Fall. Es ergibt sich für Gl. (6) aus den Meßpunkten:

$$(7) \quad v_{cr} = \frac{207}{\sqrt{S}}$$

mit einem Korrelationskoeffizienten $r = 0{,}97$, wobei die (aus der Theorie folgenden) Wertepaare $v_{cr} = 0, \frac{1}{\sqrt{S}} = 0$ bei der Berechnung der Kurve zweimal mitverwendet wurden. Aus der Konstanten 207 der Gl. (7) kann übrigens E'_{cr} über Gl. (6) zu rund 20 J/cm^2 bestimmt werden.

Von der Gl. (1) der Autoren habe ich ebenfalls r berechnet. Es ergab sich zu $r = 0{,}984$, also nicht wesentlich anders als das r der Kurve aus Gl. (7). Diese Kurve Gl. (7) hat gegenüber Gl. (1) den Vorzug, daß sie physikalisch begründet ist und dadurch auch Extrapolationen nach oben und unten zuläßt. Die Gl. (1) gibt zwar eine sehr gute *mathematische* Beschreibung des Sachverhaltes, sie entbehrt aber als Funktionalgleichung $v_{cr} = f(m)$ jeder physikalischen Realität.

Dies macht sich auch bei der Berechnung von E_{cr} bemerkbar, wie sie die Autoren ausführen. Sie ersetzen im Ausdruck

$$(8) \quad E_{cr} = \frac{m}{2} v_{cr}^2$$

v_{cr} durch Gl. (1) und erhalten:

$$(9) \quad E_{cr} = \frac{m}{2}(162{,}1\, e^{-0{,}38\sqrt{m}})^2,$$

was unzulässig ist (Vermengung von mathematischen Beschreibungen einer Punktmenge mit physikalischen Gesetzen). Sie erhalten nach Differenzieren von E_{cr} nach m $\left(\frac{dE_{cr}}{dm}\right)$ ein Maximum von E_{cr} bei $m = 6{,}9$ g. Würde man v_{cr} durch eine andere, den Meßpunkten ebenso gut angepaßte mathematische Kurve $v_{cr} = f(m)$ oder gar $v_{cr} = g\ (m, F)$ oder $h\ (m, S)$ ersetzen, würde das berechnete Maximum an anderer Stelle liegen oder gar wegfallen, *obwohl* doch die experimentell ermittelten Werte die gleichen geblieben sind. Das festgestellte Maximum entbehrt also einer physikalischen Realität.

Führt man dagegen zur Berechnung von E_{cr} die physikalisch begründete Gl. (7) ein, so erhält man:

$$(10) \quad E_{cr} = E'_{cr} \cdot F.$$

(E_{cr} in [J] als geschoßeigene Größe ist streng von E'_{cr} [J/cm^2] als unabhängige, konstante Größe zu unterscheiden.)

In Worten: Die Konstante E'_{cr} (in J/cm^2) muß mit dem Querschnitt F des betrachteten Geschosses multipliziert werden, um E_{cr} (in J) dieses Geschosses zu erhalten. Es folgt aus Gl. (10), daß mit steigendem Querschnitt E_{cr} zunimmt. (Es sei nochmals betont, daß die der Gl. (10) zugrunde liegende Gl. (7) den experimentellen Meßpunkten gut angepaßt ist und mathematisch ebenso „richtig" ist wie die von den Autoren angegebene.) Man kann nun aus Gl. (10) *das F* bestimmen, das gerade zu $E_{cr} = 7{,}5$ J führt. Es ergibt sich $F = \frac{7{,}5}{E'_{cr}}$. Der Wert von E'_{cr} schwankt in der Literatur zwischen 15 und 20 J/cm^2. Mit diesen Grenzwerten erhält man $F = 0{,}5$ bzw. $0{,}38$ cm^2 oder — bei Pb-Kugeln — Kaliber k von $k = 0{,}80$ bzw. 0,70 cm; d.h. alle Pb-Kugeln mit einem Kaliber < 7 mm (um den letzten Wert zu nehmen) dringen bei $E = 7{,}5$ J in die Haut ein. Zur Beschreibung der Ungefährlichkeit eines Geschosses (hier: Eindringen in Weichteile) ist die Angabe einer Maximal-Energie (7,5 J) notwendig, aber nicht hinreichend. Es muß, wie ausgeführt, zusätzlich eine Grenze des Geschoß-Gewichtes oder -Durchmessers angegeben werden. Dem hat die Verwaltungsvorschrift zum BWaffG unter Nr. 22.2 — wenn auch nicht gerade klar — Rechnung getragen.

Zur Abhängigkeit von C_B

Die Autoren geben eine Gleichung an, in der C_B in Abhängigkeit von der Geschoßmasse dargestellt ist: $C_B = f(m)$. Werte von C_B für Wasser, Gelatine und verschiedene Gewebearten wurden schon vor langer Zeit veröffentlicht [1] und wurden als konstant angesehen, was aus hydrodynamischen Gründen nicht so recht einzusehen war. Ich selbst beobachtete Abweichungen dieses Wertes bei Messungen der Eindringtiefe von 4-mm-Kugeln in Gelatine [3]. Mit dem C_B-Wert aus [3] war die theoretisch zu erwartende Kurve den erhaltenen Meßwerten nicht anzupassen. Die Autoren haben nun für verschiedene Geschosse die Variation von C_B erfaßt und die Ergebnisse in Form von $C_B = f(m)$ dargestellt. Auch diese Darstellung kann nur als *mathematische* Beschreibung des Sachverhaltes angesehen werden, nicht aber als physikalische Realität. In der Hydrodynamik — die Bewegung des Geschosses in Flüssigkeit oder weichem Gewebe ist ein hydrodynamischer Vorgang — wird gezeigt, daß der C_B-Wert nur von der sog. Reynold-Zahl R abhängig ist (siehe dazu z. B. [2]). Es gilt:

$$(11)\quad R = \frac{v \cdot l}{\mu}$$

Dabei sind v die Geschwindigkeit, l eine charakteristische Länge (beim Geschoß z. B. das Kaliber) und μ die kinematische Zähigkeit. Bewegungen verschiedener Geschosse sind dann als ähnlich zu betrachten, wenn die R-Zahlen übereinstimmen. Für einen weiten Bereich der R-Zahlen (gerade derjenigen, der bei Geschoßbewegungen interessant ist) beträgt $C_B \approx 0{,}47$ ($R = 10^4$—10^5), um dann (ab $R = 4 \cdot 10^5$) schnell abzufallen. Da C_B eine Funktion von R und R wiederum nach Gl. (10) eine Funktion von v und l ist, hängt C_B im wesentlichen nur von der Geschoßgeschwindigkeit und der geometrischen Geschoßform bzw. von der oben angegebenen charakteristischen Länge l ab. Es leuchtet ein, daß die Geschoßmasse m über das entsprechende Geschoßvolumen V mit der Länge l verknüpft sein muß. Es muß daher so sein, daß C_B nur scheinbar von m abhängt, wie die Autoren mit $C_B = f(m)$ dartun, daß diese Abhängigkeit in Wirklichkeit aber eine solche von geometrischen Faktoren ist. Eine Arbeit darüber ist in Vorbereitung.

Zu den Diskussionsbemerkungen von Dammermann und der Erwiderung der Autoren ist folgendes zu sagen: Unter Punkt 3 führt Dammermann unter Hinweis auf seine Abb. 1 aus, daß für die Geschosse Nr. 1 bis 7 mit einer kritischen Energie E_{cr} von etwa 12 J zu rechnen ist. Der Autor bemerkt, für die 4-mm-Kugel würde dies nicht gelten und führt mögliche Gründe an. Tausch et al. weisen nach, daß die Hypothese der konstanten kritischen Energie (um 12 J herum) nicht gelten könne. Die Abweichungen davon seien viel zu groß (Darstellung auf Abb. 1 der Entgegnung), insbesondere für die 4-mm-Kugel, von der ziemlich viele Meßwerte vorliegen würden, so z. B. $84{,}8 < v < 113{,}5$ m/s für Nicht-Eindringen und $120{,}6 < v < 149{,}8$ m/s für Eindringen. v_{cr} würde nach diesen Messungen zwischen etwa 114 und 120 m/s liegen.

Die Diskrepanzen lösen sich sofort auf, wenn nicht die Hypothese einer konstanten kritischen Energie angenommen wird, sondern die Konstanz einer *spezifischen (flächenbezogenen) Energie* E'_{cr} in J/cm^2, wie bereits früher [3] angegeben und oben ausgeführt wurde. Mit einem Wert von $E'_{cr} = 20$ J/cm^2 erhält man nach Gl. (7) für die 4-mm-Kugel (mit $S = 3{,}26\,g/cm^2$) einen Wert $v_{cr} = 115$ m/s, sowie eine kritische Energie E_{cr} nach Gl. (10) mit $F = 0{,}144\,cm^2$: $E_{cr} = E'_{cr} \cdot F = 2{,}9$ J; ein errechneter Wert, der mit dem experimentell ermittelten übereinstimmt, während nach der Hypothese der konstanten kritischen Energie dieser Wert von 2,9 J wesentlich zu tief liegt. Man braucht also nicht über die Ursachen der (scheinbaren!) Diskrepanzen nachzudenken. Es gibt sie nicht bei Annahme einer konstanten spezifischen kritischen Energie.

Tausch et al. geben weiterhin in einem Diagramm (Abb. 2) den Verlauf von E_{cr} als Funktion von v_{cr} an. Die Funktion $E_{cr} = f(v_{cr})$ wurde gewonnen, indem in die normale Energie-Gleichung $E = \frac{m}{2} v^2$ das m durch die Umkehrfunktion von $v_{cr} = 162{,}1 \cdot e^{-0{,}38\sqrt{m}}$ ersetzt wurde und mit „cr" indiziert wurde. Der Kurvenverlauf sagt gar nichts aus und ist rein zufällig, weil für v_{cr} eine mathematische Interpolationsgleichung eingesetzt wurde (nämlich Gl. (1), s.o.), die z. B. für $m \to 0$ gerade 162,1 m/s ergibt. Andere, aber nicht schlechtere Interpolationsformeln würden andere Werte als 162,1 m/s ergeben. Das Minimum E_{cr} gerade bei 162,1 m/s ist also rein zufällig. Der Kurvenverlauf ergibt physikalisch keinen Sinn. Warum sollte bei $v_{cr} = 162{,}1$ m/s ($m = 0$) gerade $E_{cr} = 0$ sein? Im übrigen stimmt es nicht, daß es von der angegebenen Kurve (im mathematischen Sinne) $E_{cr} = f(v_{cr})$ keine Umkehrfunktion $v_{cr} = g(E_{cr})$ geben würde. Es gibt sie, nur ist sie mehrdeutig. Man denke z. B. an die Funktion $y = \sin x$, von der auch eine Umkehr-Funktion, nämlich $x = \arcsin y$, existiert, die allerdings unendlich vieldeutig ist.

Dammermann geht im letzten Teil seiner Entgegnung auf gewisse Unstetigkeiten im Verlauf der Kurve $s = F(v)$ ein, die die Eindringtiefe s als Funktion der Auftreff-Geschwindigkeit beschreibt. Er bemerkt, daß z. B. beim Geschoß Nr. 2 bei Geschwindigkeiten um 74 m/s Eindringtiefen von 0 bis 4 cm ohne Zwischenwerte beobachtet wurden und erklärt diese Unstetigkeit (m. E. mit Recht) durch die elastische Wechselwirkung von Geschoß und Haut (dieser Effekt ist übrigens auch bei Holz zu betrachten).

Nach Meinung des Autors sollten daher zwei Geschwindigkeiten eingeführt werden, $v_{cr\,u}$ und $v_{cr\,o}$, deren Unterschied bei der Beurteilung konkreter Fälle von Kriminologie und Rechtsmedizin beachtet werden müßten. Die letzte Bemerkung zeigt, daß der Autor die Realitäten des Gutachters vor Gericht nicht kennt. Es mag wissenschaftlich befriedigend sein, einen physikalischen Sachverhalt theoretisch bis in die Tiefe zu verstehen, vor Gericht zählen andere Dinge. Auch muß gerechterweise im Hinblick auf die Streuung der Ergebnisse gesagt werden, daß Messungen am biologischen Material niemals die gleiche Präzision wie solche in der Physik erreichen können, das liegt in der Natur der Sache. Tausch u. Mitarb. ist zu danken, daß sie von nicht wenigen Geschossen Daten ermittelt haben, die vorher nicht oder nur ungenügend bekannt waren oder von denen man annahm, es seien universelle Konstanten.

Literatur

1. Beyer, J. C.: Wound ballistics. Washington, D.C.: Office Surg. Gener. Dept. of the Army 1962
2. Hoerner, S. F.: Fluid-dynamic drag. New Jersey, USA: Selbst-Verlag, Midland Park 1965
3. Sellier, K.: Schußwaffen und Schußwirkungen II, Forensische Ballistik, Wundballistik. Lübeck: Max Schmidt-Römhild 1977

Eingegangen am 3. Mai 1979