

Aus dem Institut für Rechtsmedizin
der Universität zu Köln
Direktor: Universitätsprofessor Dr. med. M. A. Rothschild

Hautsimulantien für wundballistische Untersuchungen – eine experimentelle Studie

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Universität zu Köln

vorgelegt von
Victoria Katharina Sophie Fischer
aus Magdeburg

promoviert am 26. Juli 2024

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität zu Köln
Druckjahr 2024

Dekan: Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink
1. Gutachter: Universitätsprofessor Dr. med. M. A. Rothschild
2. Gutachterin: Privatdozentin Dr. med. I. S. Tantcheva-Poor

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.¹

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich keine Unterstützungsleistungen erhalten.

Weitere Personen waren an der Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Die in dieser Arbeit angegebenen Materialien sind von mir nach einer selbstständig durchgeführten Literaturrecherche ausgewählt und deren Verwendung anschließend mit Herrn Univ.-Prof. Dr. med. M. A. Rothschild und Herrn PD Dr. med. Kamphausen, MHBA (jeweils Institut für Rechtsmedizin, Uniklinik Köln) abgestimmt worden. Alle aufgeführten Herstellungsprozesse sind von mir selbst ausgeführt worden. Die Adaption bzw. Entwicklung von Methoden zur Herstellung einiger Hautsimulantien ist von mir selbst ohne Unterstützung anderer vorgenommen worden.

Die in dieser Arbeit angegebenen Experimente sind nach entsprechender Anleitung für den Umgang mit Schusswaffen durch Herrn PD Dr. med. Thomas Kamphausen, MHBA von mir selbst durchgeführt worden. Herr PD Dr. med. T. Kamphausen, MHBA verfügt über die Waffenbesitzkarte und hat seine Faustfeuerwaffe für die Experimente zur Verfügung gestellt.


Die im Rahmen der durchgeführten Schussversuche erzielten Ergebnisse sind von mir selbst dokumentiert und ausgewertet sowie unmittelbar im Anschluss an die Versuche Herrn Univ.-Prof. Dr. med. M. A. Rothschild und Herrn PD Dr. med. T. Kamphausen, MHBA vorgestellt worden.

Die Publikation mit dem Titel „Skin simulants for wound ballistic investigation – an experimental study“, welche Bestandteil dieser kumulativen Dissertation ist, wurde von mir als alleinige Erstautorin eigenständig verfasst, das Manuskript am 22.03.2024 vom International Journal of Legal Medicine zur Veröffentlichung angenommen und am 03.04.2024 online veröffentlicht. Die Co-Autoren der Publikation erklärten ihr Einverständnis zur Verwendung der Publikation im Rahmen des Promotionsverfahrens.

Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten (Amtliche Mitteilung der Universität zu Köln AM 132/2020) der Universität zu Köln gelesen habe und verpflichte mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Köln, den 10.04.2024

Unterschrift: 

¹Bei kumulativen Promotionen stellt nur die eigenständig verfasste Einleitung und Diskussion die Dissertationsschrift im Sinne der Erklärung gemäß dieser Erklärung dar.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Personen bedanken, die mich im Rahmen meiner Promotion unterstützt haben, insbesondere bei Herrn Univ.-Prof. Dr. M. A. Rothschild für die Bereitstellung des Forschungsthemas. Überdies danke ich sowohl Herrn Univ.-Prof. Dr. med. M. A. Rothschild als auch Herrn PD Dr. med. T. Kamphausen, MHBA für die außerordentliche Betreuung bei der Umsetzung der gesamten Arbeit. Besonderer Dank gilt zudem Frau Dr. rer. nat. J. Mercer-Chalmers-Bender, Herrn Dr. sc. forens. B. P. Kneubuehl, Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. C. Courts und Herrn Dr. rer. nat. M. Jübner für ihre Unterstützung. Spezielle Erwähnung soll an dieser Stelle Rechtsmediziner und Freund K. Brandstädter finden, der mich nachhaltig auf meinem Weg zur und in der Rechtsmedizin geprägt und mir stets wertvolle Denkanstöße sowie Ratschläge gegeben hat. Die Dankbarkeit, die ich indes gegenüber Wesen in meinem privaten Umfeld verspüre, habe ich bereits persönlich zum Ausdruck gebracht – jene mögen sich an dieser Stelle angesprochen fühlen.

Für Rick.
Unvergessen.

Inhaltsverzeichnis

1. ZUSAMMENFASSUNG	7
2. EINLEITUNG	8
Fragestellungen und Ziel der Arbeit	12
3. PUBLIKATION	13
4. DISKUSSION	26
4.1. Ballistische Gelatine	27
4.2. Dentalsilikone	28
4.3. Alginate	30
4.4. Latex	30
4.5. Hautsimulantien für medizinische Trainingszwecke	30
4.6. Gamsleder	31
4.7. Studienbeschränkungen	31
4.8. Konklusion	33
5. LITERATURVERZEICHNIS	34
6. ANHANG	37
6.1. Abbildungen aus der Publikation Fischer et al. (2024)	37
6.2. Abbildungen aus dem <i>electronic supplementary material</i> (ESM) zur Publikation Fischer et al. (2024)	44
7. VORABVERÖFFENTLICHUNGEN VON ERGEBNISSEN	69

1. Zusammenfassung

Die Begutachtung von Schussverletzungen sowohl im Rahmen von gerichtlichen Obduktionen als auch Untersuchungen lebender Personen stellt einen wichtigen Bestandteil der rechtsmedizinischen Praxis dar. Aus der Morphologie von Einschussverletzungen lassen sich insbesondere unter rekonstruktiven Aspekten wertvolle Hinweise u. a. zur Schussdistanz und Richtung, aus der ein Geschoss abgefeuert worden ist, ableiten. Für Schussrekonstruktionen existieren gut etablierte und hinsichtlich der physikalischen und biomechanischen Eigenschaften eingehend untersuchte Simulantien für Weichgewebe und Knochen. In der aktuellen Literatur liegt der Schwerpunkt der Studien zu Hautsimulantien für wundballistische Untersuchungen auf biomechanischen Parametern. In der vorliegenden umfangreichen experimentellen Studie wurden zahlreiche synthetische und natürliche Materialien im Hinblick auf die makromorphologische Vergleichbarkeit der erzielten Einschussdefekte zu Schussverletzungen menschlicher Haut aus realen Fällen untersucht.

Potentielle Hautsimulantien in über dreißig verschiedenen Variationen, darunter ballistische Gelatine in verschiedenen Konzentrationsstufen, Dentalsilikone in mehreren Härtegraden, Alginate, Latex, Gamsleder, medizinische Hautnahttrainer und verschiedene Materialverbundmodelle wurden mit Vollmantelrundkopfgeschossen im Kaliber 9 x 19 mm Luger senkrecht und zusätzlich in einem Winkel von 45° aus einer Entfernung von 10 m und 0,3 m beschossen. Die mit einem Dentalsilikon des Härtegrades Shore 70 (aufgebracht auf einen 20 %igen Gelatineblock) erzielten Ergebnisse erfüllen nicht nur die allgemeinen Anforderungen an ein synthetisches Simulanz, sondern sind hinsichtlich makromorphologisch abgrenzbarer Kriterien auch in hohem Maße vergleichbar mit Einschussverletzungen in der Haut vergleichbarer realer Fälle.

Die hervorzuhebende Bedeutsamkeit der vorliegenden Forschungsarbeit liegt darin, über eine experimentelle Pilotstudie zur makromorphologischen Vergleichbarkeit von Einschussdefekten in Hautsimulantien und realen Schussverletzungen einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung eines Hautsimulanz für wundballistische Untersuchungen und somit für forensische Schussrekonstruktionen im Allgemeinen zu leisten.

2. Einleitung

Die Wundballistik stellt einen speziellen biomechanischen Zweig der terminalen Ballistik dar, der das Verhalten von Geschossen in biologischen Geweben bewertet. In der rechtsmedizinischen Praxis zählt die Beurteilung von Schussverletzungen sowohl von lebenden Probanden als auch von Leichen zu den typischen Aufgaben im Arbeitsalltag. Die Morphologie von Schussverletzungen bildet u. a. spezifische Eigenschaften von Projektilen ab, insbesondere deren Verhalten und Verletzungswirkung in biologischen Geweben (in der Rechtsmedizin vornehmlich menschlichem Gewebe), was sowohl unter klinischen als auch forensischen Gesichtspunkten von großer Bedeutung sein kann. Wesentliche Objekte kriminalistischer respektive rechtsmedizinischer Untersuchungen stellen hier u. a. die Wundmorphologie von Einschussverletzungen und der Schusskanalverlauf dar. Experimentelle Schussrekonstruktionen bzw. -versuche können sowohl im Hinblick auf einzelne gezielte Fragestellungen (bspw. die Fragen nach der Schussrichtung und der Schussentfernung sowie dem Winkel, in dem ein Geschoss auf den Körper aufgetroffen ist) als auch auf generelle Aspekte der (Wund-)Ballistik neue Erkenntnisse liefern. Für derartige wundballistische Rekonstruktionen und Testreihen werden zuverlässige Simulantien – etwa für Weichgewebe einschließlich der Haut – benötigt.

In diesem Zusammenhang wurden bisher Materialien von menschlichen Leichen¹⁻⁹ und lebenden Tieren¹⁰⁻¹³ verwendet. Es wurde u. a. der Einsatz menschlicher Leichen bei erhaltener anatomischer Integrität⁸, menschlicher Thoraces⁷ und der unteren Extremitäten sowohl einbalsamierter als auch nicht einbalsamierter menschlicher Leichen^{1,4}, menschlicher Schädel^{2,6} bzw. Köpfe frischtoter menschlicher Leichen⁹, von vom restlichen Weichgewebe abgelöster menschlicher Haut³ und anästhesierter Schweine für Schussversuche beschrieben¹⁰⁻¹³. Überdies kamen ganze Tierkadaver bzw. Tierteile, u. a. von Schwein (bspw. Schweinethorax¹⁴, ganzes Schwein¹⁵), Rind¹⁶, Pferd¹⁷ und auch Damhirsch¹⁸ zur Anwendung. Im Hinblick auf ethische und rekonstruktive Aspekte ist die Verwendung von Körpern bzw. Körperteilen tierischen oder menschlichen Ursprungs jedoch ausgesprochen kritisch zu bewerten, weshalb Simulantien aus synthetischen oder natürlichen Materialien in Zukunft priorisiert verwendet werden sollten.

In der Wundballistik sind ballistische Gelatine in 10 %iger bzw. 20 %iger Konzentration und ballistische Glycerinseife als Simulantien für Weichgewebe (insbesondere Muskulatur) etabliert^{12,19-26}. Mit diesen Materialien wurden in den letzten Jahrzehnten umfangreiche Erfahrungen bezüglich Herstellung und Verwendung gesammelt; beide haben sich jeweils als geeignetes Weichgewebssimulanz bewährt. Zur Untersuchung des Verhaltens von Knochengewebe in der wundballistischen Forschung sowie für Fallrekonstruktionen kommen

Knochenmodelle u. a. aus Polyurethan (z. B. Synbone®) zur Anwendung, welche die Herstellung von Verbundmodellen (bspw. mit Gelatine) ermöglichen^{24,27,28}. Für bestimmte Fragestellungen werden jedoch auch modifizierte Simulantien zur adäquaten Darstellung spezieller Gewebe, wie Hirn- und Lungengewebe oder aber auch Haut, benötigt. Falland-Cheung et al. (2016) wählten beispielsweise Agar und Alginat als potentielle Hirngewebssimulantien und verglichen in Testreihen beide Materialien mit Hirngewebe vom Hirsch. In den Testreihen stellte sich Agar unter den getesteten Materialien als „vielversprechendstes“ Hirngewebssimulanz heraus, wohingegen das Verhalten des getesteten Alginates nicht dem vom eingesetzten Hirngewebe entsprechend beschrieben worden ist²⁹. Lazarjan et al. (2014) untersuchten Gelatine-Wasser-Gemische in 3 %-, 5 %- und 10 %iger Konzentration als Hirngewebssimulanz im Vergleich zu Hirngewebe vom Rind. Ferner testeten sie ein neues Hirngewebssimulanz aus Glycerol, Wasser, Maismehl, Talkum und Kohlenstoffasern³⁰. Bolliger et al. (2017) führten eine Pilotstudie zu Gelatine als Lungengewebssimulanz durch. Sie stellten ein semisynthetisches Modell her, indem sie aufgeblähte Schweinelungen in 10 %ige Gelatine einließen und ein vollsynthetisches Modell, bei dem sie 20 %ige Gelatine mit einem Mixer schaumig schlugen und unmittelbar kühlten, die fest gewordene Schaumschicht der Gelatine abtrugen und die einzelnen Gelatineschaumblöcke mittels 10 %iger Gelatinelösung zusammenklebten³¹. Den aufgeführten Publikationen ist zu entnehmen, dass die Entwicklung derartiger spezieller Simulantien trotz teils vielversprechender Ergebnisse noch nicht abgeschlossen ist.

Über Hautsimulantien für den Einsatz im Rahmen forensischer Untersuchungen existieren zum jetzigen Zeitpunkt mehrere Studien im Hinblick auf die Verletzungen infolge stumpfer und scharfer Gewalteinwirkungen³²⁻⁴⁰. Zwar liegen auch mehrere Studien zu natürlichen und synthetischen Hautsimulantien für die Verwendung in der Wundballistik vor, der Fokus dieser Arbeiten liegt jedoch vornehmlich auf den biomechanischen Eigenschaften der zu verwendenden Hautsimulantien, wie z. B. der Zugfestigkeit, dem Härtegrad und der Perforationsgeschwindigkeit⁴¹⁻⁴⁵ sowie auf der Vergleichbarkeit der biomechanischen Parameter potenzieller Hautsimulantien mit denen menschlicher oder tierischer Haut^{3,10-12,46-49}. Sights (1969) verwendete für Schussrekonstruktionen menschliche Schädel, die mit 3 %iger Gelatine (wohl als Hirngewebssimulanz) gefüllt und mit orthopädischem Filz überzogen worden, um das Bindegewebe und die Kopfhaut zu simulieren². Große-Perdekamp et al. (2005) beschreiben in ihrer Arbeit über Wiedereintritts-Schussverletzungen (reentry shots) zwar in Kürze die Wundmorphologie der Schussdefekte in der verwendeten frischen Schweinehaut, jedoch liegt der Fokus dieser Studie auf den Ausschuss- und Wiedereintritts-Defekten, nicht auf der Morphologie des primären Einschusses⁵⁰. Plattner et al. (2003) verwendeten auf ballistische Seife und Gelatineblöcke aufgebracht, natürlich

gegerbtes Kalbsleder, um Residuen einer Schussabgabe auf der Haut abhängig vom Einschusswinkel zu untersuchen⁵¹. Riva et al. (2019) überzogen zur Rekonstruktion eines realen Falles eine Polyurethan-Platte als Knochensimulanz mit ballistischer Seife als Hautsimulanz und kamen zu dem Schluss, dass sich ballistische Seife ob ihres plastischen Verhaltens nicht als Hautsimulanz eignet und demnach keine Vergleichbarkeit der Einschussverletzungen mit denen realer Schussverletzungen vorliegt⁵². Es lässt sich erkennen, dass zwar zahlreiche verschiedene Materialien als Hautsimulanz für wundballistische Untersuchungen Einsatz gefunden haben, jedoch ist die Aussage von Breeze et al. (2013), dass nach wie vor kein adäquates Hautsimulanz für wundballistische Untersuchungen existiere⁴³, nach dem aktuellen Stand der Literatur zu bestätigen.

Die Energieübertragung vom Geschoss auf das Gewebe wird durch das Auftreffen der Geschosspitze auf das primäre Ziel, häufig Haut oder Textilien, eingeleitet und führt in der Regel zu physikalischen Prozessen, die mit Gewebeschäden einhergehen, welche sich schließlich als abgrenzbare Verletzungen der Haut darstellen. Neben der Bewertung des Schusskanalverlaufes durch den Körper und der im Verlauf desselben verursachten Verletzungen ist die Morphologie der Einschussverletzung von besonderem Interesse. Ob ihres teils weitreichenden Aussagecharakters ist die Morphologie einer vermeintlichen Einschussverletzung akribisch zu inspizieren und beurteilen; es lassen sich – wie bereits erwähnt – beispielsweise Informationen über den Auftreffwinkel des Projektils und den Abstand zwischen der Waffenmündung und dem Körper erhalten. Sonach ist es insbesondere für die rechtsmedizinische Praxis von hoher Relevanz, ein Simulanz für Haut als Oberfläche des primären Kontaktes zwischen Projektil und Körper zu finden, um eine möglichst präzise Rekonstruktion des stattgehabten Geschehensablaufes zu ermöglichen.

Der Fokus der vorliegenden Forschungsarbeit liegt auf den makroskopisch, d. h. mit dem bloßen Auge, erfassbaren Parametern, über die ein Schussdefekt in der Haut als Einschussverletzung definiert wird und die für Schussrekonstruktionen insbesondere im forensischen Kontext von Relevanz sein können. Jussila et al. postulierten 2005 in ihrer wissenschaftlichen Arbeit, dass die Eigenschaften eines (Haut-)Simulanz nicht exakt denen eines vergleichbaren lebenden Gewebes entsprechen müssen⁴¹, weshalb biomechanische und physikalische Eigenschaften der in dieser Studie getesteten Materialien zunächst nicht berücksichtigt worden sind. Das als Hautsimulanz einzusetzende Material sollte jedoch allgemeine Anforderungen, die gemeinhin an ein Simulanz gestellt werden, erfüllen: u. a. sollte es eine hohe Verfügbarkeit und lange Haltbarkeit aufweisen, einfach in der Herstellung und unkompliziert in der Lagerung sein. Überdies sollten die Ergebnisse stets reproduzierbar und

verschiedene Möglichkeiten der Modifizierbarkeit (bspw. zur Herstellung eines Haut-Weichgewebs-Knochen-Modelles) gegeben sein.

Zu den mitunter am häufigsten verwendeten Pistolenmunitionstypen gehören Vollmantelgeschosse des Kalibers 9 x 19 mm Luger. In den einzelnen Beschussreihen dieser Arbeit wurden demnach Vollmantelrundkopfgeschosse verwendet, die – ausgenommen bei Schüssen aus nächster Nähe – eine typische Wundmorphologie erzeugen, wenn sie senkrecht (oder schräg) auf die Haut treffen^{24,53-55} (Abb. 1): In der Mitte befindet sich der zentrale Substanzdefekt (central substance defect); ein lochartiger Gewebedefekt mit nicht adaptierbaren Wundrändern. Um den zentralen Substanzdefekt findet sich eine epidermisfreie Zone: der Kontusionsring (contusion ring; früher „Schürfsaum“); nach Kneubuehl et al. (2022) erfolgte die Benennung angelehnt an den Mechanismus, durch den er entsteht²⁴. Der Kontusionsring wird durch einen lokalen, vorübergehend erhöhten Druck innerhalb des Gewebes in Abhängigkeit von der hohen kinetischen Energie durch radiale Beschleunigung des Gewebes weg vom Geschoss verursacht. Hierbei werden oberflächliche Gewebepartikel der Epidermis abgeschert. Dies kann aufgrund der zirkulären Überdehnung auch zu radiären Einrissen am Rand des Kontusionsrings führen. Bei einem schräg einschlagenden Geschoss ist der Kontusionsring halbmondförmig ausgebildet, mit einer exzentrischen Verbreiterung in Richtung des Schützen. Bei Auftreffen von Geschossen auf unbekleidete Haut können auf der Geschossoberfläche haftende Rückstände wie Waffenöl und Metallabrieb aus dem Lauf einen dunklen Ring um den zentralen Einschussdefekt hinterlassen, den sogenannten Abstreifring (bullet wipe). Nach Kneubuehl et al. (2022) kann der Kontusionsring von einem (Über-) Dehnungssaum (margin of distension) umgeben sein, insbesondere bei Haut über knöchernen Strukturen (bspw. Sternum)²⁴.

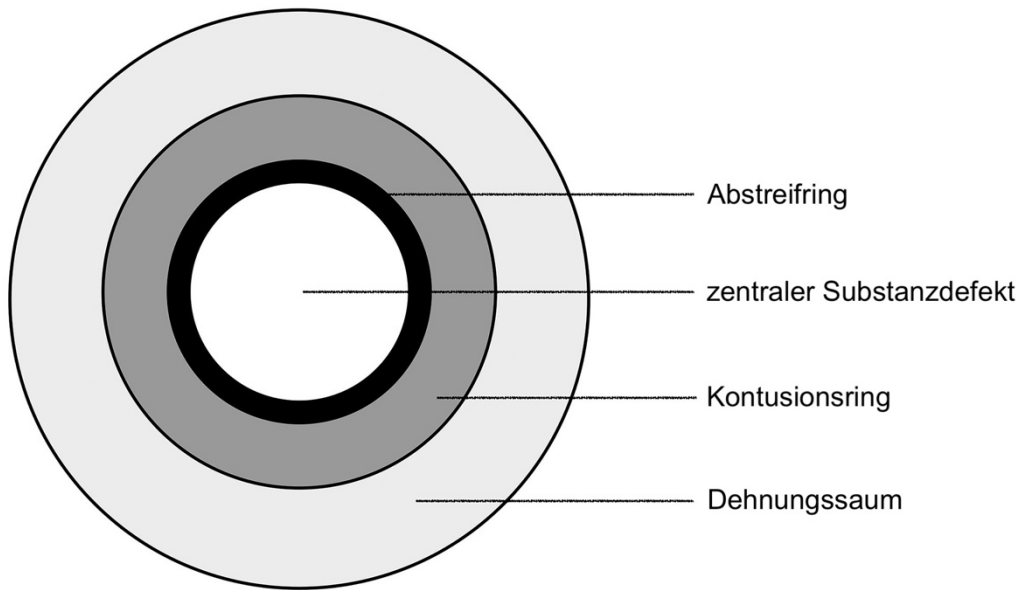


Abb. 1: Einschussmorphologie durch Vollmantelgeschosse, Schemazeichnung in Anlehnung an Fischer et al. (2024)

Fragestellungen und Ziel der Arbeit

Nach aktuellem Wissensstand existiert in der Literatur zum jetzigen Zeitpunkt keine Studie, welche auf die makroskopische Vergleichbarkeit von Einschussverletzungen in Hautsimulantien mit denen realer Einschussverletzungen in menschlicher Haut fokussiert ist. Das Ziel dieser Promotionsarbeit ist die Beantwortung der folgenden Forschungsfrage: „Existiert unter den untersuchten potenziellen Hautsimulantien für wundballistische Untersuchungen ein Material, mit dem sich Einschussdefekte erzeugen lassen, die makroskopisch mit realen Schussverletzungen vergleichbar sind, und das zudem die etablierten allgemeinen und speziellen Anforderungen an ein Simulanz erfüllt?“. Zur Beantwortung der Forschungsfrage ist eine groß angelegte, experimentelle Studie durchgeführt worden, in deren Rahmen potenzielle Hautsimulantien unter standardisierten Bedingungen aus verschiedenen Entfernungen und Winkeln mit einer Faustfeuerwaffe beschossen worden sind.

3. Publikation

Fischer VKS, Rothschild MA, Kneubuehl BP, Kamphausen T. Skin simulants for wound ballistic investigation – an experimental study. *Int J Legal Med* 2024. <https://doi.org/10.1007/s00414-024-03223-1>.



Skin simulants for wound ballistic investigation – an experimental study

Victoria K. S. Fischer¹ · Markus A. Rothschild¹ · Beat P. Kneubuehl² · Thomas Kamphausen¹

Received: 12 October 2023 / Accepted: 22 March 2024
© The Author(s) 2024

Abstract

Gunshot wound analysis is an important part of medicolegal practice, in both autopsies and examinations of living persons. Well-established and studied simulants exist that exhibit both physical and biomechanical properties of soft-tissues and bones. Current research literature on ballistic wounds focuses on the biomechanical properties of skin simulants. In our extensive experimental study, we tested numerous synthetic and natural materials, regarding their macromorphological bullet impact characteristics, and compared these data with those from real bullet injuries gathered from medicolegal practice. Over thirty varieties of potential skin simulants were shot perpendicularly, and at 45°, at a distance of 10 m and 0.3 m, using full metal jacket (FMJ) projectiles (9 × 19 mm Luger). Simulants included ballistic gelatine at various concentrations, dental silicones with several degrees of hardness, alginates, latex, chamois leather, suture trainers for medical training purposes and various material compound models. In addition to complying to the general requirements for a synthetic simulant, results obtained from dental silicones shore hardness 70 (backed with 20 % by mass gelatine), were especially highly comparable to gunshot entry wounds in skin from real cases. Based on these results, particularly focusing on the macroscopically detectable criteria, we can strongly recommend dental silicone shore hardness 70 as a skin simulant for wound ballistics examinations.

Keywords Wound ballistics · Gunshot · Skin simulant · Reconstruction · Dental silicone · Gelatine

Introduction

Terminal ballistic research includes the field of wound ballistics, a specialized biomechanical branch evaluating wound effects in biological tissues (especially of human individuals). The morphology of gunshot wounds allows to infer specific properties of the wound-causing projectiles, which can be of great forensic importance. Characteristics of the entry wound, the direction and angle of the shot, the trajectory of the projectile through the tissue (wound channel) and the distance between the firearm and its target are, therefore, essential forensic investigation factors. Medical examination, technical analyses, and experimental

reconstructions in specific cases, looking back on single events or derived as general statements, can provide new insights.

Reliable simulants representing soft tissues, including skin, are required for wound ballistic investigations and research. The use of materials from human cadavers [1–8], living animals [9–11], or animal parts [12–14] has been described in the literature. Due to ethical considerations, the use of simulants made of synthetic or natural materials are preferable. Ballistic gelatine or ballistic glycerin soap are commonly used as such soft body tissue simulants [11, 15–22]. Despite a considerable amount of experience gained in the preparation and use of both substances as soft tissues simulants over decades, certain specific questions still require the development of modified simulants for special tissues (e. g. brain, lung) [23, 24]. Bone models, comprising polyurethane (e. g. Synbone®), have given rise to composite models wound ballistic research [19, 25, 26].

Skin simulant studies have been published that focus on aiding forensic examinations, such as sharp and blunt force

✉ Victoria K. S. Fischer
victoria.fischer@uk-koeln.de; fischer.victoria@web.de

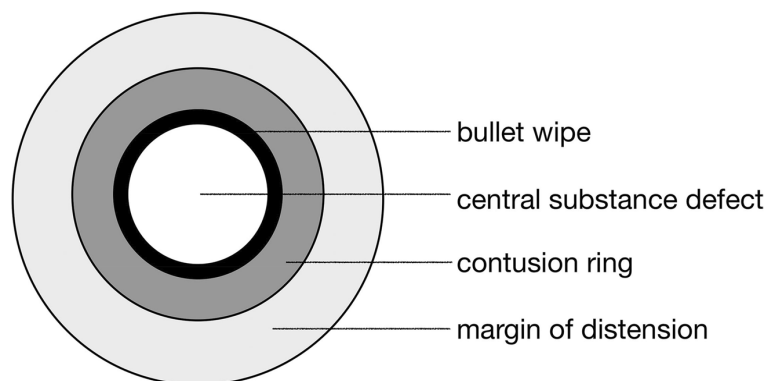
¹ Institute of Legal Medicine, Faculty of Medicine, University of Cologne, Melatenguertel 60/62, 50823 Cologne, Germany

² Bpk Consultancy GmbH, Forstweg 25, 3603 Thun, Switzerland

trauma [27–35]. However, the morphology of skin-penetrating gunshot wounds currently use human and animal cadaver skin for ballistic wound investigations [3, 36–39]. Although several relevant studies on natural and synthetic skin simulants exist, their focus is predominantly on the biomechanical properties of the simulants, such as tensile strength and shore hardness [40–45]. In 2005, Jussila argued that the properties of a tissue (skin) simulant do not have to exactly match those of comparable living tissue [40]. To the best of our knowledge, our study is the first to report exclusively on the macroscopic comparability of bullet entry wounds created in skin simulants to those in human skin. This study focuses on identifying a skin simulant which exhibits bullet entry defects comparable to human skin in terms of visually determinable parameters—of importance when reconstructing the ballistic path and defining a skin defect as an entry wound.

Full metal jacket projectiles cause specific, recurring, patterns and effects indicative of an entry wound (Fig. 1). Sellier [46] and Kneubuehl [20] showed that skin, when impacted by a projectile, is only minimally formed into a funnel shape due to inertia. After exceeding the limit of its expansibility, the skin ruptures, the projectile penetrates and, due to the projectile's high kinetic energy, the skin is “crushed”, producing a non-adaptable, hole-shaped defect. The defect is surrounded by a circular epithelial abrasion and small radial tears often persist, as the surrounding tissue is accelerated radially and away from the bullet, commencing the expansion of the temporal cavity. Due to the elasticity of the skin, a bullet wound resulting from perpendicular entry is round and often slightly narrower than the bullet's caliber. By comparison, the effect of a bullet with a sloped trajectory results in oval defects of slightly larger diameter than the bullet's caliber. When a projectile impacts uncovered skin, gunshot residues, oil and metallic abrasions adhering to the projectile can be sloughed off onto the skin, leaving a bullet wipe surrounding the central skin defect.

Fig. 1 Morphologic terminology of a gunshot entry wound (perpendicular distant shot with a full metal jacket bullet)



Materials

Gelatine

Gelatine blocks

Gelatine blocks 40 x 20 x 20 cm were prepared with gelatine grade 3 (GELITA Deutschland GmbH, Germany) from the same calibrated batch, to the gelatine preparation method provided by Jussila (2004) [16] with the difference that a gelatine-water-mixture 20 % gelatine (by mass) instead of 10 % was used. This was stored at 4 °C until used within 24–48 h. Gelatine blocks were used as soft tissue simulant to which the skin simulants tested herein were attached.

Gelatine sheets

Gelatine sheets of 0.3 cm and 0.6 cm thickness were produced as skin simulants with coarse-grained gelatine grade 1 (GELITA Deutschland GmbH, Germany) from the same calibrated batch, based on the recommendations of Jussila (2004) but in increasing concentrations from 10 % to 60 % gelatine (by mass) in increments of ten [16]. The sheets were fixed to the gelatine blocks by means of a 20 % gelatine (by mass) liquid layer (serving as glue) and then shot perpendicularly and from an angle of 45°, from distances of 10 m and 0.3 m.

Dental silicone

Dental silicones of increasing degrees of hardness (shore hardness 16, 22, 32, 60, 70 and 85) were tested. Vinylpolysiloxane (addition curing silicone) duplicating material “Elite double fast” in shore hardness 16, 22 and 32 (Zhermack S.p.A., Italy) was prepared according to the manufacturer's instructions – each of the two fluid components in a mixture ratio of base : catalyst = 1 : 1 (mixing time 30 sec.) and

then poured and formed into sheets of 0.05 cm and 0.6 cm thickness (processing time 5 – 10 min). Kneadable addition curing silicones in shore hardness 60 and 70 (Briegeldental, Germany) and 85 (Zhermack S.p.A., Italy) were prepared according to the manufacturer's instructions – each of the two components in a mixture ratio of base : catalyst = 1 : 1 were kneaded for 30 sec. to a homogenous mass and then rolled out into flat sheets of 0.15 cm and 0.3 cm thickness (processing time 1:20 – 2:00 min). All dental silicone sheets thus prepared were attached to the gelatine block with molten gelatine 20 % (by mass) and then perpendicular shots were fired from 10 m and 0.3 m. The silicone shore hardness 70 was additionally shot from an angle of 45°.

Dental silicone-chamois leather-compound

A thin layer (thickness 0.15 cm) of kneadable silicone shore hardness 70 (Briegeldental, Germany) was fixed on a sheet of chamois leather skin (thickness 0.1 cm) by using a very thin layer (layer thickness < 0.05 cm) of fluid addition-curable silicone shore hardness 22 (Zhermack S.p.A., Italy). The chamois leather was placed directly on a solidifying gelatine block and shots were subsequently fired perpendicularly and obliquely at an angle of 45° from 10 m and 0.3 m.

In addition, silicone shore hardness 22 was applied directly to the chamois leather in the thinnest possible layer with a spatula (layer thickness < 0.05 cm). The excess silicone was removed from the leather. It was placed directly on the solidifying gelatine block (chamois leather on gelatine). Perpendicular and oblique shots (45°) were delivered from distances of 10 m and 0.3 m.

Dental silicone-artificial leather-compound

A thin layer (thickness 0.15 cm) of kneadable silicone shore hardness 70 (Briegeldental, Germany) was fixed on a sheet of artificial leather skin (thickness 0.1 cm) using an ultra-thin layer of fluid silicone shore hardness 22 (Zhermack S.p.A., Italy). The compound was placed directly on the solidifying gelatine block (artificial leather on gelatine), which was subsequently fired at perpendicularly and obliquely at an angle of 45° from 10 m and 0.3 m.

Chamois leather

Chamois leather in a thickness of about 0.1 cm was placed directly on the surface of the solidifying gelatine block. Perpendicular shots were delivered from 10 m and 0.3 m.

Chamois leather with Ballistol® multi-purpose oil

Chamois leather, thickness of 0.1 cm, was placed directly on the surface of the solidifying gelatine block and then evenly

wetted with “Ballistol® Universalöl Spray” (BALLISTOL, Germany). Perpendicular shots were delivered from 10 m and 0.3 m.

Chamois leather with beeswax

100 % pure beeswax was heated in a water bath until completely melted. The liquid wax was applied in the thinnest possible layer (layer thickness < 0.05 cm) on the chamois leather, the excess wax was removed with a heated spatula. Furthermore, chamois leather was placed in liquefied pure beeswax until it was completely soaked. The excess beeswax was removed from both sides of the leather using a heated spatula until no wax remained adhering to the spatula. The single-side-waxed chamois leather was then directly laminated onto the gelatine block with a small amount of melted 20 % gelatine (by mass). The double-side-waxed chamois leather was attached to a gelatine block with adhesive tape. Perpendicular shots were delivered from 10 m and 0.3 m distances.

Dental alginate

Chromatic alginate impression material „Tropicalgin” and high precision alginate impression material “Neocolloid” (Zhermack S.p.A., Italy) were prepared according to the manufacturer's instructions – each alginate impression material was mixed with water in a mixture ratio of alginate : water = 1 : 2. These were stirred for 45 sec. until a homogenous mass was formed and then rolled out into thin even sheets of 0.05 cm and 0.3 cm thickness (“Tropicalgin processing time” 1:35 min, setting time 2:35 min; “Neocolloid” processing time 2:00 min, setting time 3:30 min). The alginate sheets were stored in an airtight humidity chamber, to prevent moisture loss, until they were attached directly to the gelatine block with adhesive tape and shot perpendicularly from 10 m and 0.3 m.

Skin simulants for medical suture training proposes

In this study the “Transparent Intracutaneous Suture Pad for use with trainer 7060” (Erler-Zimmer, Germany), the “RealSuture 1-layer translucent suture pad” (Erler-Zimmer, Germany), the “Double-sided Skin Suture Pad” (3B Scientific, Germany) and the “Life/Form Replacement Suture Pad – Light Skin” (Nasco, USA) were attached directly to the gelatine block with adhesive tape. Perpendicular shots were delivered from 10 m and 0.3 m.

Latex

Natural low ammonia latex milk with over 60 % solid content (Latex-24, Germany) was poured onto a flat ceramic

surface in the thinnest possible layer (layer thickness < 0.05 cm). After drying at ambient temperature, this step was repeated twice to obtain a latex skin of about 0.1 cm. The latex was then fixed to the gelatine block by means of 20 % gelatine (by mass). Perpendicular shots from 10 m and 0.3 m were delivered.

Methods

Firearm and ammunition

The shots were fired using a SIG Sauer P226 X-Five All-round pistol, cal. 9 x 19 mm Luger (SIG Sauer, Eckernförde, Germany) and 9 x 19 mm Luger full metal jacket (FMJ) round head ammunition, weight: 8.0 g/124 grs (Sellier & Bellot, Czech Republic). Basic ballistic parameters v_{1m} , E_{1m} , v_{10m} and E_{10m} of the weapon-ammunition combination were collected using an infrared photoelectric sensor DRELLO IMS 8500-1 (DRELLO, Germany) by shooting 10 rounds prior to the main experiments on simulants tested in this study.

Analysis

The skin simulants listed above were each prepared as described and fixed to the gelatine blocks. Subsequently, perpendicular shots were fired at the models from 10 m and 0.3 m (n=10 each) to imitate a long-range shot and a relatively close-range shot. The morphology of the bullet entry defects was photographed and macroscopically independently examined by three expert forensic pathologists using characteristic criteria of bullet entry wounds (central substance defect, circular contusion ring and radial tears, bullet wipe) after perpendicular (and oblique) impact of full metal jacket projectiles on uncovered skin. In addition, the gunshot entry defect in the skin simulants were compared with those in human skin from comparable real cases. Skin simulants exhibiting characteristic bullet impact features and bullet impact defects, comparable to real bullet injuries, were subsequently shot at from an angle of 45° from distances of 10 m and 0.3 m (n=10 each) and the results were evaluated macroscopically, as described above.

Results

Basic ballistic parameters

The velocity of the projectiles measured at distances of 1 m (v_{1m}) and 10 m (v_{10m}) from the muzzle was 367 m/s and 347 m/s on average, respectively.

According to Eq. (1)

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

E_k : kinetic energy, m: mass, v: velocity
the average kinetic energies E_{1m} and E_{10m} of the projectiles were calculated to be 542 J and 481 J, respectively.

Ballistic gelatine

Irrespective of gelatine concentration, layer thickness and shooting range, a central substance defect with a maximum diameter of 0.2 cm (perpendicular shots), or 0.4 × 0.6 cm (angled shots), was detected in all gelatine sheets. A further superficial material defect, comparable to a contusion ring, was observed in all gelatine concentrations and layer thicknesses around the central substance defect, after perpendicular shots. The contusion ring was crescent-shaped, pointing in the direction of the shooter, after oblique shots. The diameter of the contusion ring increased with the concentration of the gelatine, with diameters of 0.3 cm to 0.5 cm observed after perpendicular shots. Radial tears of max. 0.5 cm length were detectable around the central substance defect, their length being inversely correlated with increasing concentration of the gelatine. For gelatine concentrations at, or above, 40 % (by mass), a bullet wipe was visible and increasingly pronounced with increasing concentration levels (Fig. 2, ESM-Fig. 1–11).

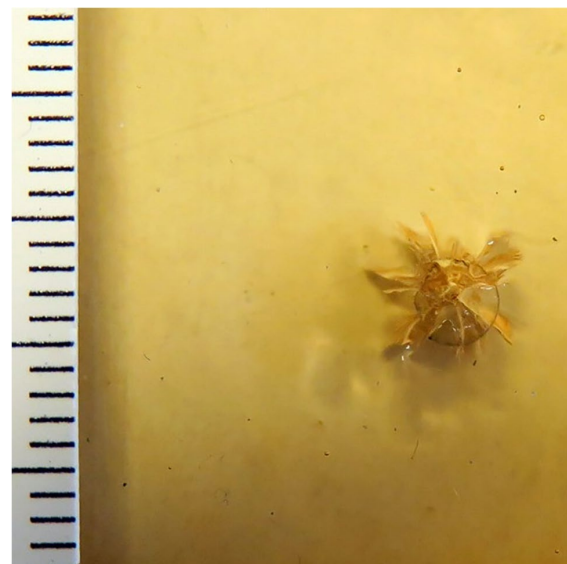


Fig. 2 Gelatine 40 % (by mass) (thickness 0.3 cm, perpendicular shot, 10 m distance)

Dental silicones

Simulants containing kneadable silicones of shore hardness 60, 70 and 85 in 0.3 cm layer thickness, were characterized by a superficial central substance defect of max. 0.3 cm diameter (perpendicular shots), which tapered crater-like in the direction of the shot. Within this area, a dark bullet wipe and a superficial, circular material defect were observed. In silicones of shore hardness 60 and 85 with a layer thickness of 0.15 cm, the diameter of the central substance defects was up to 0.5 cm (perpendicular shots). A circular superficial tissue defect, comparable to a contusion ring was visible in both cases. A bullet wipe was visible on the silicone shore hardness 60, but absent on the silicone shore hardness 85. Radial tears were not detectable and shots from an angle of 45° were not carried.

Silicone shore hardness 70, with a layer thickness of 0.15 cm, showed a central substance defect with a maximum diameter of 0.4 cm after perpendicular shots, and 0.3 cm x 0.7 cm after oblique shots, irrespective of the shooting range. In each case, a bullet wipe up to 0.2 cm width was apparent — crescent-shaped in the direction of the shooter in the case of the oblique impact. Analogous to the bullet wipe, a contusion ring was visible, accompanied by radial cracks up to 0.5 cm length (after perpendicular impact) and up to 1 cm length (diagonally opposite to the shooter) after oblique impact.

The investigated silicones shore hardness 16, 22 and 32 in a layer thickness of 0.6 cm did not show a clearly detectable central substance defect (diameter < 0.1 cm) regardless of the shooting range. A dark/black bullet wipe was demarcated within a superficial material defect comparable to a contusion ring (diameter approx. 0.4 cm) located circularly around the central substance defect. Radial tears were not visible. Shots from an angle of 45° were not carried out on layers in this thickness.

Simulants, each made with silicone shore hardness 16, 22 or 32 (thickness 0.05 cm) showed a central substance defect of max. 0.4 cm diameter, after perpendicular shots, and 0.5 cm x 0.3 cm, after oblique shots. The material was lifted in a bubble-like form from the gelatine beneath; the bullet wipe was mainly visible on the inner side of the central substance defect near the gelatine. At an impact angle of 45°, a crescent-shaped bullet wipe pointing in the direction of the shooter was visible. A zone of superficial material loss in a circular pattern comparable to a contusion ring around the bullet defect, was slightly pronounced (max. 0.1 cm width). Irrespective of the distance and the direction of the shot, radial tears of up to 2.5 cm length were present (Fig. 3, ESM-Fig. 12–17).

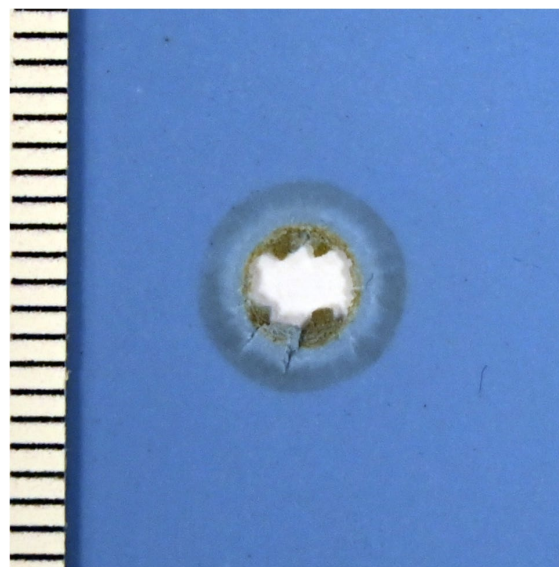


Fig. 3 Dental silicone shore hardness 70 (thickness 0.15 cm, perpendicular shot, 10 m distance)

Dental silicone (shore hardness 70)-artificial/chamois leather-compound

A sheet of 0.15 cm thick silicone shore hardness 70 was applied to the artificial leather and chamois leather by means of the thinnest possible layer (layer thickness < 0.05 cm) of a silicone shore hardness 22. Following perpendicular shots, the material showed a partially punched-out central substance defect of about 0.4 cm diameter, irrespective of the shooting range. The artificial/chamois leather below showed a central substance defect of ca. 0.1 cm in diameter. The superficial material defect, comparable to a contusion ring, extended over the entire area between the central substance defect in the leather and the edge of the bullet defect in the skin simulant. Circularly adjacent to this, a narrow seam with radial tears was apparent. A central substance defect of up to approx. 0.1 cm x 0.2 cm was visible after the oblique shots. A crescent-shaped bullet wipe in the direction of the shooter of approximately 0.6 cm x 0.4 cm was visible. On the opposite side of the bullet wipe, a crescent-shaped spalling of the uppermost silicone layer up to 0.3 cm width was adjacent to the central substance defect. Radial tears were not apparent. (ESM-Fig. 18–20).

Dental silicone (shore hardness 22)-chamois-leather-compound

The chamois leather, coated with the thinnest possible (layer thickness < 0.05 cm) layer of silicone shore hardness

22, showed central substance defects of 0.1 cm diameter at 10 m shooting range, and of 0.3 cm diameter at 0.3 m shooting range, irrespective of the angle of impact. In each case, radial tears were detected along with circular (perpendicular shots) or crescent-shaped (oblique shots) bullet wipes. Superficial material defects comparable to a contusion ring were not detectable. (Fig. 4, ESM-Fig. 21).

Chamois leather

Irrespective of the shooting range, both the chamois leather impregnated with Ballistol® and the chamois leather treated with pure beeswax showed central substance defects up to the size of the calibre used, “punched out” in appearance. Circular material defects comparable to a contusion ring, radial tears, and a bullet wipe were not present. The untreated chamois leather showed central substance defects of max. 0.2 cm diameter and a bullet wipe up to 0.3 cm width. Shots from an angle of 45° were not carried out (Fig. 5, ESM-Fig. 22, 23).

Alginates

Independent of the shooting range, central “punched-out” tissue defects, with a maximum diameter of 0.7 cm (thickness 0.05 cm) and 0.3 cm (thickness 0.3 cm), were present. Around the central substance defect, a circular loss of substance reaching deep into the material was detectable, particularly in the thick layer alginate. A bullet wipe and radial

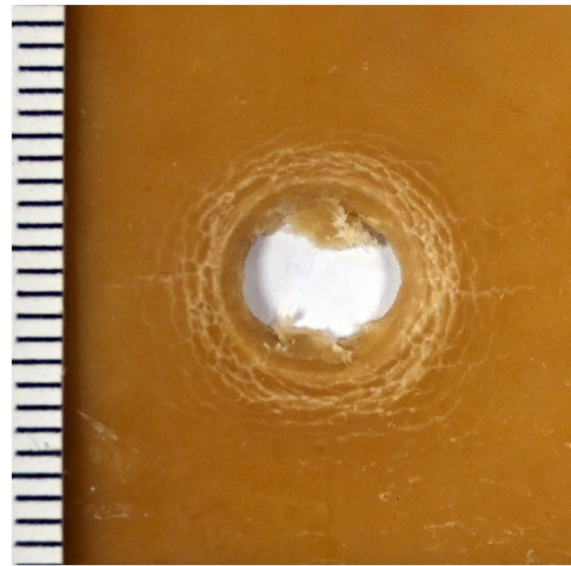


Fig. 5 Chamois leather impregnated with beeswax (perpendicular shot, 10 m distance)

tears were not apparent. Shots from an angle of 45° were not carried out (Fig. 6, ESM-Fig. 24).

Skin simulants for medical training purposes

All four synthetic skin models tested for medical suture training purposes showed no visible central substance



Fig. 4 Dental silicone shore hardness 22-chamois leather-compound (perpendicular shot, 10 m distance)

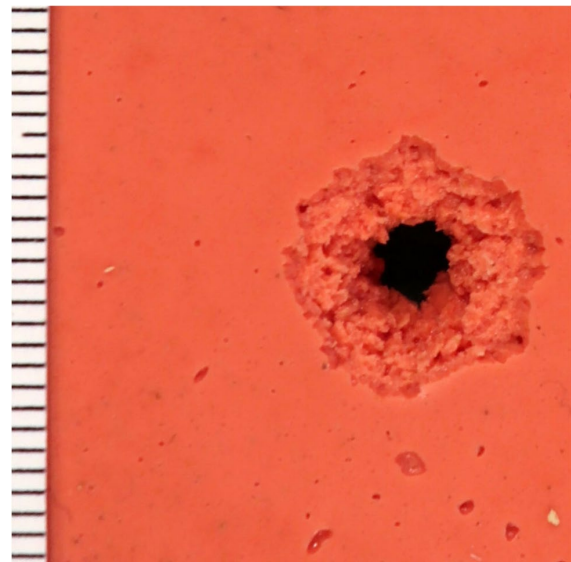


Fig. 6 Dental alginate “Neocolloid” (thickness 0.3 cm, perpendicular shot, 10 m distance)

defects (diameter < 0.1 cm) visible to the naked eye, regardless of the shooting range and the angle of impact. Only the top layer of material showed a crater-like defect with a diameter of max. 0.3 cm. Radial tears and a bullet wipe were not macroscopically detectable. Shots from an angle of 45° were not performed. (ESM-Fig. 25).

Latex

The latex skin simulant showed a central substance defect with a maximum diameter of 0.1 cm, irrespective of the shooting range. No circular substance defect, comparable to a contusion ring, could be clearly delineated, but a circular bullet wipe of up to 0.2 cm wide was present. Shots from an angle of 45° were not performed. (Fig. 7).

Discussion

Wound ballistic examinations are indispensable in forensic pathology practice, particularly in cases involving direct bullet impact to the skin. Energy transmission from the bullet to the tissue, initiated by first contact between the bullet-tip and primary target, often skin or textiles, results in tissue damage (injury). In addition to assessing the projectile's trajectory through the body and induced injuries, the morphology of the bullet impact location is particularly important for obtaining information on, for instance, the angle of impact and the distance between the muzzle and the body.

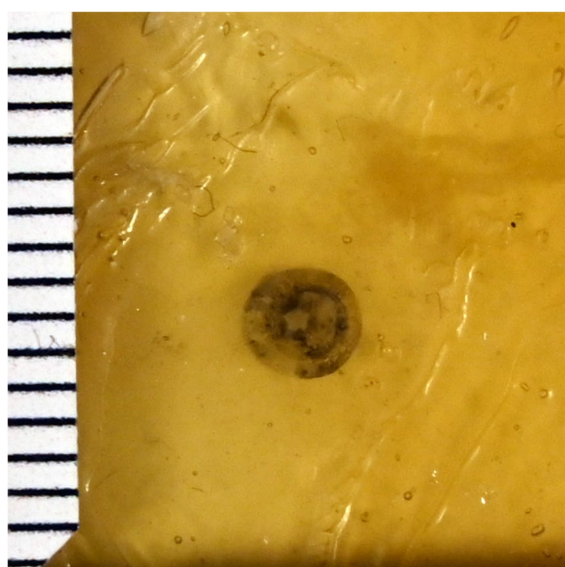


Fig. 7 Latex (thickness 0.1 cm, perpendicular shot, 10 m distance)

Complex reconstructions are often necessary to address extensive forensic issues. Numerous studies exist on several simulants used to emulate various tissues, such as muscle and bone, in wound ballistics examinations. Further studies, on synthetic and natural skin simulants, address the comparability of the biomechanical properties of potential simulants to those of human or animal skin [3, 9–11, 36–39]. To the best of our knowledge, this study is the first to assess potential wound ballistic skin simulants that – from the macroscopic aspect – produce gunshot entry defects comparable to real bullet wounds encountered in casework and that fulfil the established criteria for a simulant.

Full metal jacket bullets, excluding shots from point blank range, produce typical characteristics when they impact the skin perpendicularly [20, 46–48], see (Fig. 1): The central substance defect, a hole-like tissue defect with non-adaptable wound edges. The epidermis-free zone around the central substance defect, referred to by Kneubuehl et al. (2022) [20] as a “contusion ring”, is caused by temporary increased localised pressure within the tissue, as a function of the high kinetic energy, resulting in superficial tissue particles being lifted off in a conical shape. This can lead to radial tears at the edge of the contusion ring, due to the circular overstretching, and marks the onset of the temporal cavity by radial acceleration of the tissue away from the projectile. Prior to the mechanism being understood, it was assumed that the impacting projectile superficially abraded the surrounding skin, hence the contusion ring being formerly referred to as “abrasion ring”. In the case of an obliquely impacting bullet, the contusion ring is crescent-shaped with an eccentric widening in the direction of the shooter. According to Kneubuehl et al. (2022) [20], the contusion ring may be surrounded by the margin of distension, especially on skin that covers bone. The bullet wipe (“ring of dirt”) is generated by residues on the surface of the bullet, such as gunshot particles or barrel oil, shed in a circular pattern around the bullet defect when it impacts the skin. Particles from the bullet itself may also be sloughed off. The bullet wipe can partially cover the epidermis-free zone of the contusion ring in shots fired at uncovered skin.

According to DiMaio [5] and Sellier [46], the diameter of the central substance defect of a gunshot wound does not allow for any conclusions to be drawn about the projectile's calibre. However, it is commonly accepted that the bullet defects formed by perpendicular impact of a non-deforming full metal jacket bullet are usually smaller than the projectile's calibre. This can be attributed to (1) the presence of elastic and collagen fibres in the dermis, which form the basis of the skin's extensibility and retractability [49], and (2) due to the radial movement of the surrounding tissue when impacted by the entry wound bullet, meaning that only the tip of the projectile comes into contact with the skin [46]. Peonim et al. (2016) came to similar conclusions

from post-mortem examinations after a public mass shooting event in Bangkok in 2010, where an M-16 and munition cal. 5.56×45 mm were used. In almost three quarters of the deceased victims, the entry wounds observed during autopsy were smaller than the projectiles' calibre. Most of the detected bullet entry wounds classified as "round" had a diameter of 0.3 cm [50]. In their work, Geisenberger et al. (2022) compared the size of bullet defects in pig skin depending on their localization (front and back of the trunk). After perpendicular shots from a distance of 1.6 m with a 9×19 mm Luger, they measured a mean diameter of the bullet defects of 5.61 ± 0.57 mm on the anterior trunk and 3.33 ± 1.17 mm on the back of the trunk [38]. Pircher et al. (2017) compared the influence of different bullet shapes on the size of the central substance defect and the shape of the contusion ring. After perpendicular shots using calibre 0.38 special on pig skin (belly region) from 2 m, gunshot entry wound diameters of 4.43 ± 1.33 mm (round nose), 8.43 ± 1.17 mm (wadcutter), and 6.01 ± 0.84 mm (truncated cone) were observed; the contusion ring was largest with round nose bullets, and smallest with the wadcutter projectiles [51]. Thali et al. (2002) indicated the contusion ring as being "generally 1–3 mm wide" [48].

Ballistic gelatine as skin simulant

Gelatine was chosen due to being: well researched; in common use in wound ballistic examinations; possessing physical properties and ballistic behavior that are well understood following decades of use in emulating solid soft tissues [15–18, 20]. Jussila et al. (2005), described sheets of 40 % gelatine (by mass) exhibiting a leathery consistency, thus possibly functioning as a skin simulant [40]. In their study, Hes et al. (2023) examined gelatine sheets, incorporating various gelatine concentrations between 30 % and 45%, as a possible skin simulant. They shot 4.5 mm air rifle steel balls at the sheets, concluding that gelatine at these concentrations could be "very effective and repeatable" [41].

Building on these observations, gelatine-water mixtures, in concentrations ranging from 10 % to 60 % (in increments of ten), were poured to form sheets of different thicknesses which were then fixed to a gelatine block. The production of gelatine sheets with a gelatine concentration above 40 % (by mass) was challenging, impeding the manufacturing process (e.g., due to reduced solubility), their use as a skin simulant and their use in the final product (e.g., due to interspersions with air bubbles). For these reasons, gelatine-water-mixtures with gelatine concentration levels > 60 % were omitted in pre-tests.

Regardless of the concentration or layer thickness, the formation of the gunshot entry defects in the gelatine sheets tested herein exhibited identical patterns. The maximum diameter of the central substance defect was 0.2 cm

(perpendicular shots), ranging notably below values reported in the literature [38, 51] and observations from the authors' forensic routine experience. The diameter of the visible superficial material defect, reminiscent of a contusion ring (max. 0.5 cm diameter), increased slightly with gelatine concentration. In all gelatine sheets, radial tears were detected around the central substance defect. A bullet wipe was only visible at gelatine concentrations of ≥ 40 %, for all shooting distances and angles.

Gelatine meets the criteria for a good skin simulant in terms of availability and easy handling. Individual layers of gelatine as a potential skin simulant, and blocks of 20 % gelatine (by mass) as a tissue simulant, can be easily combined to create a compound model. Difficulties in producing gelatine sheets with concentrations > 40 % (by mass), limited storage life, as well as cooled storage (refrigerator) requirement can be considered as limiting factors. Although some authors have reported gelatine at higher concentrations as having similar biomechanical properties to human skin [40, 41], the results of our investigations did not confirm full comparability with regards to macromorphological criteria of bullet entry defects. Other simulants appear more effective for exact reconstruction of a gunshot wound.

Dental silicone as skin simulant

In 2002, Thali et al. [52] published their study on the "skin-skull-brain-model" for wound ballistic examinations. Using a silicone "cap" (not specified in detail) stretched onto a gelatine-filled sphere of a synthetic bone simulant, the authors reported results as being "comparable to the morphology of equivalent real gunshot injuries". Based on the latter study, Falland-Cheung et al. (2015) [28] used the "skin-skull-brain-model" to investigate blunt force effects on artificial skin made of dental silicones. Furthermore, dental silicones with various degrees of hardness (shore hardness) were declared as "good alternative materials" to pig skin and human skin with regards to their mean hardness and tear strength. In addition, their observed pig skin properties did not correspond to those for human skin previously reported in the literature [28]. Pittar et al. (2018) [27] showed that duplication silicones and different polyvinylsiloxanes meet the requirements of a skin simulant in terms of durability, reproducibility and dimensional stability.

The morphology of gunshot entry wounds in the silicones of low shore hardness 16, 22 and 32 and high shore hardness 60, 70 and 85 in thick layers included in our study did not show characteristics comparable to those of real bullet wounds. However, silicones with a higher shore hardness (in particular shore hardness 70) in very thin layers (thickness 0.15 cm), backed by 20 % gelatine (by mass), exhibited

bullet entry defects similar to bullet wounds as encountered in forensic casework. This differs from the results of the test series in which the silicone of shore hardness 70 was first applied to artificial leather/chamois leather and then backed by gelatine 20 % (by mass).

All silicones assessed in our study were chosen for simple, fast processing (requiring no further technical support, devices, etc.); their manufacturer's characteristics of long-term dimensional stability, high elasticity, and tear resistance; stability at room temperature without special storage requirements; and the ready availability of standardized controlled mixtures facilitating reproducibility. Solid compounds produced with other simulants, such as polyurethane, can be combined in the construction of complex anatomical models for extensive wound ballistics studies. With regards to materials utilised in the present study, silicones backed with gelatine (20% by mass) demonstrated the best potential for use as a ballistic skin simulant.

Dental alginates as skin simulant

Alginates had been studied as brain simulants by Falland-Cheung et al. (2016) [23]. Nonetheless, dental alginates, while readily available, are more complex to produce than dental silicones. Our results showed a central substance defect of approximately the same size as encountered in real cases. However, as previously observed [23], the alginates were brittle, with large pieces breaking away from the surface when impacted by a projectile, barring any contusion ring comparison. Thus far, firm attachment of alginates to other simulants (e.g., polyurethane, gelatine) for wound ballistic investigations has not been successful, considerably limiting their usefulness. In addition, high storage requirements (humidity chamber) and low durability, renders the material unsuitable as a skin simulant.

Latex as skin simulant

Production of an artificial skin layer from liquid latex proved difficult, requiring an ammonium-containing latex mixture with a solid content of at least 60 % for consistent production and setting. Despite several attempts, production of a uniform, reproduceable latex layer was not successful. Results of comparative showed no resemblance to bullet entry wounds from forensic cases; hence, latex was deemed unsuitable as a ballistic skin simulant.

Commercial medical training simulants / suture trainers as skin simulant

Manufactured for medical training purposes, these materials contained silicones whose composition and shore hardness were not precisely defined or specified by the manufacturers.

The macromorphological appearance of the entry defects generated by both shots from long distance (10 m), and relatively close distance (0.3 m), did not correspond to the bullet entry wound morphology of comparable forensic cases. Central substance defects were distinctly too small, with a maximum diameter of max. 0.1 cm; bullet wipe and contusion ring were hardly detectable. Commercial suture trainers were, therefore, deemed not suitable as skin simulants.

Chamois leather as skin simulant

Chamois leather was used in a variety of ways in our experiments. Chamois leather, thinly coated with dental silicone of shore hardness 22, exhibited a central substance defect and a visible contusion ring. Manufacture and attachment to the gelatine block was straightforward. However, chamois leather is a natural material that can be subject to major variations in material properties. Further skin simulants including chamois leather, such as: coated with pure beeswax; oiled with Ballistol®; and with dental silicone shore hardness 70, did not produce results comparable to gunshot entry wounds in forensic cases.

Limitations

Skin wound morphology is very challenging, depending as it does on numerous factors such as the type of weapon and ammunition (e.g., in terms of caliber, shape, velocity), the shooting range and angle of impact, intermediate targets, the localization of the affected body region, general skin conditions, etc. This article only reports findings produced by a single combination of weapon system and ammunition type. Results are likely to differ when alternative ammunition types and calibers are used. In addition, gelatine 20 % (by mass) was used as backing material due to its higher (temperature) stability over the time taken for these experiments. In subsequent studies, gelatine 10 % (by mass) should be used as backing material, being most frequently used as soft tissue simulant in wound ballistic investigations. Furthermore, this study focusses on macromorphological observations of the tested skin simulants and the materials that would be principally suitable for reproducing the FMJ bullet morphology (as depicted in Fig. 1). The biomechanical properties, such as tensile strength and the mean hardness of each skin simulant, were not included in the discussion and are not the main rationale for recommending a particular skin simulant in this work. These biomechanical variables may be important for the mechanical behavior of a projectile exhibiting initial deformation and energy distribution at first contact with the target. Unfortunately, skin simulants fulfilling these requirements do not produce comparable entry wounds, which are important for shot reconstruction by medicolegal experts (e.g., forensic pathologists). Some

of the tested skin simulants (e.g., alginates) failed to establish a strong bond with the gelatine block as a soft tissue simulant, which may have influenced the bullet entry defect morphology. Further investigations of possible skin simulant materials should include their biomechanical properties in combination with their macroscopic appearance, along with consideration of biological factors that can influence human skin. In addition, the influence of different weapon/ammunition systems on the macromorphology of the bullet defects should be tested.

Conclusions

Our results show dental silicones as fulfilling most requirements for an adequate skin simulant in wound ballistic examinations. Commercial dental silicones are of consistent quality, readily available, possess favorable properties such as ease of processing, storage, durability and adaptability and are easily amalgamated with gelatine to create more complex anatomical models. Gelatine, in concentrations higher than those used in soft tissue simulant models, exhibits some visually distinguishable aspects typical of gunshot entrance wound criteria, but is an insufficient match to forensic gunshot wounds. Evaluation of data, regarding macroscopic bullet impact criteria, identified silicone with shore hardness 70 backed with gelatine 20 % (by mass) as a good candidate — it exhibited the most extensive similarities to FMJ impact defects detectable with the unaided eye in forensic morphological practice. The remaining materials assessed in this work are not recommended for use as ballistic skin simulants, due to either a lack of comparability to cases from forensic practice, or their partial – or total – failure in matching requirements for a simulant. The findings reported herein will be predominantly helpful in investigations aimed at identifying an appropriate skin simulant for wound ballistic investigation, particularly with regards to macromorphological comparability.

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1007/s00414-024-03223-1>.

Acknowledgements We thank Dr. rer. nat. J. Mercer-Chalmers-Bender, Prof. C. Courts and Dr. rer. nat. M. Juebner for their excellent editing.

Author contribution This article is based primarily on the dissertation of Victoria K. S. Fischer. All authors made substantial contributions to the study conception and design. Material preparation, data collection and analysis were performed by Victoria K. S. Fischer. The first draft of the manuscript was written by Victoria K. S. Fischer and all authors critically revised it for important intellectual content and commented on versions of the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Data Availability The data that support the findings of this study are securely archived on a server of the Institute of Legal Medicine, University of Cologne, Germany, and can be made available upon request.

Declarations

Research involving human participants and/or animals Our research did not involve human participants or animals.

Competing interest All authors certify that they have no affiliation with or involvement in any organization or entity with any financial interest or non-financial interest in the subject matter or materials discussed in this manuscript. No funds, grants, or other support was received.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

- Huelke DF, Harger JH, Buege LJ, Dingman HG (1968) An experimental study in bio-ballistics: femoral fractures produced by projectiles—II. Shaft impacts. *J Biomech* 1:313–321. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(68\)90025-0](https://doi.org/10.1016/0021-9290(68)90025-0)
- Sights WP Jr (1969) Ballistic analysis of shotgun injuries to the central nervous system. *J Neurosurg* 31:25–33. <https://doi.org/10.3171/jns.1969.31.1.0025>
- Sperrazza J, Kokinakis W (1968) Ballistic limits of tissue and clothing. *Ann N Y Acad Sci* 152:163–167. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1968.tb11973.x>
- DeMuth WE Jr, Nicholas GG, Munger BL (1978) Buckshot wounds. *J Trauma* 18:53–57. <https://doi.org/10.1097/00005373-197801000-00010>
- DiMaio VJ, Copeland AR, Besant-Matthews PE, Fletcher LA, Jones A (1982) Minimal velocities necessary for perforation of skin by air gun pellets and bullets. *J Forensic Sci* 27:894–898
- Viano DC, Bir C, Walilko T, Sherman D (2004) Ballistic impact to the forehead, zygoma, and mandible: comparison of human and frangible dummy face biomechanics. *J Trauma* 56:1305–1311. <https://doi.org/10.1097/01.ta.0000064209.21216.4e>
- Prat N, Rongieras F, de Freminville H et al (2012) Comparison of thoracic wall behavior in large animals and human cadavers submitted to an identical ballistic blunt thoracic trauma. *Forensic Sci Int* 222:179–185. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.05.022>
- Rossi C, Herold LD, Bevel T, McCauley L, Guadarrama S (2018) Cranial Backscatter Pattern Production Utilizing Human Cadavers. *J Forensic Sci* 63:1526–1532. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13713>

9. Tikka S, Cederberg A, Levänen J, Lötjönen V, Rokkanen P (1982) Local effects of three standard assault rifle projectiles in live tissue. *Acta Chir Scand Suppl* 508:61–77
10. Berlin RH, Janzon B, Lidén E et al (1988) Wound ballistics of Swedish 5.56-mm assault rifle AK 5. *J Trauma* 28:S75-83. <https://doi.org/10.1097/00005373-198801001-00017>
11. Janzon B (1982) Soft soap as a tissue simulant medium for wound ballistic studies investigated by comparative firings with assault rifles Ak 4 and M16A1 into live, anesthetized animals. *Acta Chir Scand Suppl* 508:79–88
12. Mabbott A, Carr DJ, Champion S, Malbon C (2016) Comparison of porcine thorax to gelatine blocks for wound ballistics studies. *Int J Legal Med* 130:1353–1362. <https://doi.org/10.1007/s00414-015-1309-9>
13. Breeze J, Hunt N, Gibb I, James G, Hepper A, Clasper J (2013) Experimental penetration of fragment simulating projectiles into porcine tissues compared with simulants. *J Forensic Leg Med* 20:296–299. <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2012.12.007>
14. Mahoney PF, Carr DJ, Miller D, Teagle M (2017) The effect of helmet materials and simulated bone and tissue layers on bullet behaviour in a gelatine model of overmatch penetrating head injury. *Int J Legal Med* 131:1765–1776. <https://doi.org/10.1007/s00414-017-1665-8>
15. Fackler ML, Malinowski JA (1988) Ordnance gelatin for ballistic studies. Detrimental effect of excess heat used in gelatin preparation. *Am J Forensic Med Pathol* 9:218–219
16. Jussila J (2004) Preparing ballistic gelatine—review and proposal for a standard method. *Forensic Sci Int* 141:91–98. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2003.11.036>
17. Mattijssen EJ, Alberink I, Jacobs B, van den Boogaard Y (2016) Preservation and storage of prepared ballistic gelatine. *Forensic Sci Int* 259:221–223. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.12.027>
18. Carr DJ, Stevenson T, Mahoney PF (2018) The use of gelatine in wound ballistics research. *Int J Legal Med* 132:1659–1664. <https://doi.org/10.1007/s00414-018-1831-7>
19. Thali MJ, Kneubuehl BP, Dirnhofer R, Zollinger U (2001) Body models in forensic ballistics: reconstruction of a gunshot injury to the chest by bullet fragmentation after shooting through a finger. *Forensic Sci Int* 123:54–57. [https://doi.org/10.1016/S0379-0738\(01\)00519-9](https://doi.org/10.1016/S0379-0738(01)00519-9)
20. Kneubuehl BP, Coupland R, Rothschild MA, Thali M (2022) *Wundballistik: Grundlagen und Anwendungen*. Springer, Berlin Heidelberg
21. Große Perdekamp M, Braunwarth R, Kromeier J, Nadjem H, Pollak S, Thierauf A (2013) Muzzle-loading weapons discharging spherical lead bullets: two case studies and experimental simulation using a skin-soap composite model. *Int J Legal Med* 127:791–797. <https://doi.org/10.1007/s00414-012-0808-1>
22. Perdekamp MG, Kneubuehl BP, Ishikawa T et al (2010) Secondary skull fractures in head wounds inflicted by captive bolt guns: autopsy findings and experimental simulation. *Int J Legal Med* 124:605–612. <https://doi.org/10.1007/s00414-010-0450-8>
23. Falland-Cheung L, Piccione N, Zhao T et al (2016) Investigation of dental alginate and agar impression materials as a brain simulant for ballistic testing. *Forensic Sci Int* 263:169–175. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.04.005>
24. Bolliger SA, Poschmann SA, Thali MJ, Eggert S (2017) A fully synthetic lung model for wound-ballistic experiments—First results. *Forensic Sci Int* 275:254–259. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2017.03.024>
25. Henwood BJ, Appleby-Thomas G (2020) The suitability of Synbone® as a tissue analogue in ballistic impacts. *J Mater Sci* 55:3022–3033. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-04231-y>
26. Bir C, Andreacovich C, DeMaio M, Dougherty PJ (2016) Evaluation of bone surrogates for indirect and direct ballistic fractures. *Forensic Sci Int* 261:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.01.023>
27. Pittar N, Winter T, Falland-Cheung L, Tong D, Waddell JN (2018) Scalp simulation - A novel approach to site-specific biomechanical modeling of the skin. *J Mech Behav Biomed Mater* 77:308–313. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.09.024>
28. Falland-Cheung L, Pittar N, Tong D, Waddell JN (2015) Investigation of dental materials as skin simulants for forensic skin/skull/brain model impact testing. *Forensic Sci Med Pathol* 11:552–557. <https://doi.org/10.1007/s12024-015-9718-0>
29. Shergold OA, Fleck NA (2005) Experimental investigation into the deep penetration of soft solids by sharp and blunt punches, with application to the piercing of skin. *J Biomech Eng* 127:838–848. <https://doi.org/10.1115/1.1992528>
30. Whittle K, Kieser J, Ichim I et al (2008) The biomechanical modelling of non-ballistic skin wounding: blunt-force injury. *Forensic Sci Med Pathol* 4:33–39. <https://doi.org/10.1007/s12024-007-0029-y>
31. Gilchrist MD, Keenan S, Curtis M, Cassidy M, Byrne G, Destrade M (2008) Measuring knife stab penetration into skin simulant using a novel biaxial tension device. *Forensic Sci Int* 177:52–65. <https://doi.org/10.1007/s00414-022-02879-x>
32. Nolan G, Lawes S, Hainsworth S, Ruttly G (2012) A study considering the force required for broken glass bottles to penetrate a skin simulant. *Int J Legal Med* 126:19–25. <https://doi.org/10.1007/s00414-011-0556-7>
33. Carr DJ, Wainwright A (2011) Variability of simulants used in recreating stab events. *Forensic Sci Int* 210:42–46. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.01.032>
34. Parmar K, Hainsworth SV, Ruttly GN (2012) Quantification of forces required for stabbing with screwdrivers and other blunter instruments. *Int J Legal Med* 126:43–53. <https://doi.org/10.1007/s00414-011-0562-9>
35. Ankersen J, Birkbeck AE, Thomson RD, Vanezis P (1999) Puncture resistance and tensile strength of skin simulants. *Proc Inst Mech Eng H* 213:493–501. <https://doi.org/10.1243/0954411991535103>
36. Pircher R, Große Perdekamp M, Thierauf-Emberger A, Kramer L, Pollak S, Geisenberger D (2017) Wound morphology in contact shots from blank cartridge handguns: a study on composite models. *Int J Legal Med* 131:1333–1339. <https://doi.org/10.1007/s00414-017-1650-2>
37. Vennemann B, Dautel F, Braunwarth R et al (2008) Textile fibres along the bullet path—experimental study on a skin-gelatine composite model. *Int J Legal Med* 122:213–218. <https://doi.org/10.1007/s00414-007-0221-3>
38. Geisenberger D, Große Perdekamp M, Pollak S, Thierauf-Emberger A, Thoma V (2022) Differing sizes of bullet entrance holes in skin of the anterior and posterior trunk. *Int J Legal Med* 136:1597–1603. <https://doi.org/10.1007/s00414-022-02879-x>
39. Grosse Perdekamp M, Vennemann B, Mattern D, Serr A, Pollak S (2005) Tissue defect at the gunshot entrance wound: what happens to the skin? *Int J Legal Med* 119:217–222. <https://doi.org/10.1007/s00414-005-0542-z>
40. Jussila J, Leppäniemi A, Paronen M, Kulomäki E (2005) Ballistic skin simulant. *Forensic Sci Int* 150:63–71. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2004.06.039>
41. Hes RAG, Painter JD, Appleby-Thomas GJ (2023) Optimal skin simulant for ballistic testing. *Forensic Sci Int* 346:111653. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2023.111653>
42. Kerkhoff W, Visser M, Mattijssen E, Hermsen R, Alberink IB (2022) A combined cowhide/gelatine soft tissue simulant for ballistic studies. *Forensic Sci Int* 338:111392. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2022.111392>

43. Breeze J, James GR, Hepper AE (2013) Perforation of fragment simulating projectiles into goat skin and muscle. *J R Army Med Corps* 159:84–89. <https://doi.org/10.1136/jramc-2013-000065>
44. Geisenberger D, Giorgetti A, Glardon M, Große Perdekamp M, Pollak S, Pircher R (2020) The punched-out tissue complex (skin-bone “imprimatum”) in shots from captive-bolt guns: does it act as a secondary projectile? *Int J Legal Med* 134:1095–1102. <https://doi.org/10.1007/s00414-020-02262-8>
45. Das R, Collins A, Verma A, Fernandez J, Taylor M (2015) Evaluating simulant materials for understanding cranial backscatter from a ballistic projectile. *J Forensic Sci* 60:627–637. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12701>
46. Sellier K (1982). *Schusswaffen und Schusswirkungen*, Bd. 1: Ballistik, Medizin und Kriminalistik. Verlag Max Schmidt-Roemhildt, Lübeck, pp 207–230
47. Sellier K (1969) Bullet entry studies of the skin. *Beitr Gerichl Med* 25:265–270
48. Thali MJ, Kneubuehl BP, Zollinger U, Dirnhofer R (2002) A study of the morphology of gunshot entrance wounds, in connection with their dynamic creation, utilizing the “skin-skull-brain model.” *Forensic Sci Int* 125:190–194. [https://doi.org/10.1016/S0379-0738\(01\)00638-7](https://doi.org/10.1016/S0379-0738(01)00638-7)
49. Rettinger G, Hosemann W, Hüttenbrink K-B, Werner JA (2018) *HNO-Operationslehre: Mit allen wichtigen Eingriffen*. Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart, p 17
50. Peonim V, Srisont S, Udnoon J, Wongwichai S, Thapon A, Worasuwanarak W (2016) Entrance and exit wounds of high velocity bullet: An autopsy analysis in the event of dispersing the mass rally in Bangkok Thailand, May 2010. *Leg Med (Tokyo)* 23:10–16. <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2016.08.010>
51. Pircher R, Preiß D, Pollak S, Thierauf-Emberger A, Perdekamp MG, Geisenberger D (2017) The influence of the bullet shape on the width of abrasion collars and the size of gunshot entrance holes. *Int J Legal Med* 131:441–445. <https://doi.org/10.1007/s00414-016-1501-6>
52. Thali MJ, Kneubuehl BP, Zollinger U, Dirnhofer R (2002) The “skin-skull-brain model”: a new instrument for the study of gunshot effects. *Forensic Sci Int* 125:178–189. [https://doi.org/10.1016/S0379-0738\(01\)00637-5](https://doi.org/10.1016/S0379-0738(01)00637-5)

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Additional information Results of our research and parts of this manuscript have been presented at the annual meetings of the German Society of Legal Medicine: Frühjahrstagung der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin, April 29th 2022, Potsdam, Germany and Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin, September 12th 2023, Jena, Germany.

4. Diskussion

Wundballistische Untersuchungen stellen einen wichtigen Anteil der rechtsmedizinischen Praxis dar und können einen wesentlichen Beitrag zu der Beantwortung insbesondere komplexer forensischer Fragestellungen leisten. Mitunter werden Schussrekonstruktionen zur Aufklärung eines spezifischen Sachverhaltes notwendig; deren Durchführung kann jedoch stellenweise durch das Fehlen technischer und räumlicher Voraussetzungen bzw. der fachlichen Expertise behindert werden, da neben geeigneten Räumlichkeiten (bspw. zugelassene Raumschießanlage) auch Personen mit einer entsprechenden Sachkunde, im vorliegenden Fall der Waffensachkunde nach § 7 WaffG (und §§ 1-3 AWaffV), beteiligt sein müssen. Um möglichst exakte wundballistische Untersuchungen bzw. Rekonstruktionen gewährleisten zu können, sollten sowohl die geforderten physikalisch-ballistischen als auch die biologischen Parameter möglichst präzise abgebildet werden. Während die technischen Erfordernisse für Schussrekonstruktionen in der Regel ohne größere Probleme bedient werden können, indem etwa Waffensysteme bzw. spezielle Munitionstypen beschafft und eingesetzt werden, kann das Bereitstellen eines Äquivalentes des zu simulierenden Gewebes, welches ein ähnliches Verhalten gegenüber Geschossen zeigt wie das originäre Gewebe, eine mitunter enorme Herausforderung darstellen.

Seit jeher bedient man sich in der Wundballistik verschiedenster Materialien bzw. Simulantien, um Wechselbeziehungen zwischen Geschossen und biologischem Gewebe zu veranschaulichen. Wie in der Einleitung ausgeführt, existieren für Weichgewebe (Muskulatur) langjährig etablierte Simulantien wie ballistische Gelatine und Glycerinseife, für Knochengewebe Materialien wie Polyurethan. Überdies war der Einsatz von Geweben tierischen und menschlichen Ursprungs (bspw. Tierkadaver, Leichenteile, Tierhaut) insbesondere in der Vergangenheit weit verbreitet. Die Verwendung derartiger biologischer Materialien sollte – neben der Berücksichtigung ethischer Aspekte – zunehmend durch den Einsatz synthetischer bzw. natürlicher Simulantien abgelöst werden, da anderenfalls insbesondere auf Grund intra- und interindividueller Unterschiede keine verlässliche Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden und darüber hinaus keine Extrapolation der physikalisch-ballistischen Ergebnisse vom Tier bzw. von tierischem Gewebe auf den Menschen erfolgen kann.

Die Energieübertragung vom Geschoss auf das Gewebe führt in der Regel zu einer mit dem bloßen Auge sichtbaren Gewebeschädigung (Verletzung), anhand derer sich Rückschlüsse u. a. über den Abstand zwischen der Waffenmündung und dem Körper (Schussentfernung) und der Schussrichtung ableiten lassen. Darüber hinaus ist die Haut nicht unwesentlich bei der Absorption der Energie eines auftreffenden Geschosses beteiligt⁴¹. Der Einsatz eines

adäquaten Hautsimulanz, mit dem sich reproduzierbare Ergebnisse erzielen lassen und welches die Geschossbewegung bzw. das Verhalten des Geschosses in der Haut bzw. dem darunter befindlichen Gewebe lediglich in der Art ändert, wie es auch beim Durchdringen menschlicher Haut zu erwarten wäre, ist für wundballistische Untersuchungen demnach unerlässlich. Zur Beantwortung der gegenständlichen Forschungsfrage wurden in der vorliegenden groß angelegten, experimentellen Pilotstudie mehr als dreißig Materialien bzw. Materialverbunde als potentielle Hautsimulantien hinsichtlich der makromorphologischen Vergleichbarkeit der erzielten Einschussdefekte mit denen von Einschussverletzungen aus vergleichbaren realen Fällen untersucht. Nach einer Literaturrecherche konnte festgestellt werden, dass in der Wundballistik – bis zum Erscheinen der dieser Dissertation zugrundeliegenden Publikation⁵⁶ – keine Veröffentlichungen zu Hautsimulantien existierten, in denen Einschussdefekte in potentiellen Hautsimulanzen anhand makroskopisch abgrenzbarer Kriterien mit Einschussverletzungen menschlicher Haut eingehend verglichen worden sind.

Beim orthogonalen Auftreffen von Vollmantelgeschossen auf unbekleidete Haut bilden sich bei relativen Nah- und Fernschüssen die in Abb. 1 (siehe Einleitung) erkennbaren typischen Charakteristika aus, über die eine Einschussverletzung definiert wird und welche in der vorliegenden Arbeit als Grundlage des Vergleiches der in den getesteten Materialien erzielten Einschussdefekte herangezogen wurden. Für die Fernschüsse wurde eine Entfernung von 10 m ausgewählt, für die relativen Nahschüsse eine Entfernung von 0,3 m; absolute Nahschüsse mit Kontakt der Waffenmündung auf dem Hautsimulanz sind in der vorliegenden Studie nicht durchgeführt worden. Die Auswahl der im Rahmen der Forschungsarbeit zu testenden potenziellen Hautsimulantien basierte auf einer Vielzahl verschiedener Faktoren.

4.1. Ballistische Gelatine

Gelatine ist ein vornehmlich aus Haut bzw. Knochen tierischen Ursprunges gewonnenes Polypeptid. Gelatine wurde für die Testreihen ausgewählt, da es als bewährtes Weichgewebssimulanz für wundballistische Untersuchungen gilt, die physikalischen Eigenschaften des Materials bekannt sind und das ballistische Verhalten bereits umfangreich untersucht worden ist^{19-22,24}. Jussila et al. postulierten 2005, dass Platten aus 40 %iger Gelatine eine lederartige Konsistenz aufweisen würden und demnach als Hautsimulanz fungieren könnten⁴¹. Hes et al. (2023) untersuchten Gelatineplatten in verschiedenen Konzentrationen zwischen 30 % und 45 % und führten Beschussversuche mit 4,5 mm Luftgewehrkugeln durch. Sie kamen zu dem Schluss, dass die Ergebnisse, die mit Gelatine in diesen Konzentrationen erzielt wurden, „sehr wirkeffektiv und reproduzierbar“ seien⁵⁷. Diesen Ansatz verfolgend wurden Gelatine-Wasser-Gemische in aufsteigenden Gelatine-Konzentrationen von 10 % bis 60 % (jeweils in Zehnerschritten) als dünne Platten gegossen,

diese je auf einen Block aus 20 %iger Gelatine als Weichgewebssimulanz aufgetragen und anschließend beschossen.

Gelatine erfüllt die Kriterien für ein Simulanz vornehmlich in Bezug auf die Verfügbarkeit und einfache Handhabung. Gelatineblöcke mit einem Masseanteil von 10 % (bzw. 20 %) Gelatine sind als Weichgewebssimulanz etabliert und lassen sich leicht mit anderen Materialien kombinieren. Sowohl die Herstellung der 20 %igen Gelatineblöcke als Weichgewebssimulanz als auch der Gelatineplatten in aufsteigenden Konzentrationen als Hautsimulantien orientierte sich im gegenständlichen Fall an den Empfehlungen von Jussila et al. (2004)²⁰; lediglich die einzelnen Gelatine-Wasser-Mischungsverhältnisse wurden angepasst. Die Herstellung der zu testenden Gelatineplatten erwies sich mit in Zehnerschritten steigender Gelatine-Konzentration, insbesondere über 40 %, als schwierig, was u. a. auf den mit steigender Konzentration reduzierten Wasseranteil zur Lösung der Gelatine zurückzuführen ist. In Vortests für die vorliegende Arbeit wurde versucht, Gelatine-Wasser-Gemische mit Gelatineanteilen von bis zu 90 % herzustellen, was jedoch in Konzentrationen ab 70 % nicht mehr möglich war. Obgleich einige Autoren berichten, dass Gelatine in höheren Konzentrationen ähnliche biomechanische Eigenschaften wie die menschliche Haut aufweisen würde^{41,57}, ließ sich in den vorliegenden Experimenten keine Vergleichbarkeit in Bezug auf makromorphologische Kriterien von Einschussdefekten erkennen. Ferner wiesen die Gelatineplatten in den höheren Konzentrationen trotz sorgsamer Einhaltung der Herstellungsempfehlungen teils erhebliche Artefakte u. a. im Sinne von Luftblaseneinschlüssen auf, welche zu einer herabgesetzten Reproduzierbarkeit führen, so dass insgesamt von einer Verwendung von Gelatine als Hautsimulanz abzuraten ist. Ferner ist die Haltbarkeit der Gelatinezubereitungen begrenzt und eine gekühlte Lagerung notwendig, weshalb andere Simulantien für die Rekonstruktion von Einschussverletzungen in Haut effektiver zu sein scheinen und der Gelatine vorzuziehen sind.

4.2. Dentalsilikone

2002 entwickelten Thali et al. das „skin-skull-brain-model“ für wundballistische Untersuchungen: Es wurde eine Silikonkappe als Hautsimulanz über eine mit Gelatine gefüllte Kugel aus Knochensimulanz (Polyurethan) gestülpt⁵⁸. Den Autoren zufolge seien Ergebnisse erzielt worden, die vergleichbar mit der Morphologie äquivalenter Schussverletzungen realer Fälle sind, wengleich anzumerken ist, dass der Fokus in der vorgenannten Studie nicht auf der Wundmorphologie der Einschussdefekte und demnach nicht auf dem als Hautsimulanz verwendeten Silikon gelegen hat. Falland-Cheung et al. (2015) haben dieses „skin-skull-brain-model“ für Untersuchungen der Folgen stumpfer Gewalteinwirkungen in der Art abgewandelt, als dass sie Dentalsilikone als Hautsimulanz verwendet haben³³. Hierbei wurden u. a. Dentalsilikone verschiedener Härtegrade (sog. Shore grades) sowohl mit Schweine- als auch

Menschenhaut hinsichtlich des Härtegrades und der Reißfestigkeit verglichen; die Autoren kamen unter anderem zu dem Schluss, dass Dentalsilikone „gute Alternativen“ zu menschlicher Haut darstellen würden³³. Pittar et al. (2018) zeigten in ihrer Arbeit auf, dass Dubliersilikone und Polyvinylsiloxane die Anforderungen an ein Simulanz im Hinblick auf die Haltbarkeit, die Reproduzierbarkeit und die Dimensionsstabilität erfüllen³². Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden Silikone verschiedener Härtegrade, wie sie in der Zahnmedizin zum Einsatz kommen, als potenzielles Hautsimulanz für die Beschussversuche ausgewählt.

Die in der vorliegenden Forschungsarbeit getesteten Silikone der niedrigeren Härtegrade wurden aus zwei Komponenten von flüssiger Konsistenz hergestellt, sie ließen sich einfach in die gewünschten Schichtdicken gießen bzw. gegebenenfalls mit einem Spachtel auf einer soliden, nicht saugfähigen Unterlage in der gewünschten Schichtdicke ausstreichen. Die getesteten Silikone der höheren Härtegrade bestehen ebenfalls aus zwei Komponenten, welche jedoch von festerer Konsistenz sind und manuell durch Kneten miteinander verbunden werden mussten. Es wurden zahlreiche Vortests durchgeführt, in denen der Fokus zunächst auf der Herstellung ebenmäßiger, homogener Silikonplatten lag. Nach zahlreichen Versuchen konnte letztlich eine Methode zur Herstellung gleichmäßiger Silikonplatten entwickelt werden, die für jede anwendende Person nachvollziehbar und einfach in der Handhabung ist. Bei den in der Publikation hervorgehobenen Dentalsilikon des Härtegrades Shore 70 handelt es sich um Knetsilikone aus zwei Komponenten, die nach dem Mischvorgang unter Zuhilfenahme eines zylindrisch geformten Kunststoffrohres mit entsprechenden Abstandshaltern aus Gummi an den jeweiligen Enden auf einem glatten, nicht saugfähigen Untergrund auf eine Schichtdicke von 0,15 cm ausgerollt wurden. Mit den Dentalsilikon der niedrigen Härtegrade Shore 16, 22 und 32 (unabhängig von der Schichtdicke) sowie mit den Silikon höherer Härtegrade Shore 60, 70 und 85 in dickeren Schichten ließen sich die dieser Studie zugrunde gelegten Einschusskriterien nicht oder nur unzureichend nachweisen, wohingegen das Silikon des Härtegrades Shore 70 in einer Schichtdicke von 0,15 cm gleichartige Einschusskriterien auswies wie Haut in vergleichbaren realen Fällen. Alle für diese Studie ausgesuchten Silikone weisen den Herstellerangaben zufolge eine hohe Langzeit-Dimensionsstabilität auf und bedürfen keiner speziellen Lagerung bzw. Entsorgung. Zudem sind sie in standardisierten und kontrollierten Abpackungen erhältlich. Es konnte überdies nachgewiesen werden, dass auch komplexere anatomische Verbundmodelle mit den Dentalsilikon hergestellt werden können (bspw. Verbindung verschiedener Dentalsilikon untereinander oder Verbundmodelle aus Dentalsilikon mit anderen Materialien), weshalb sie in der Zusammenschau der aufgeführten Kriterien für den Einsatz als Hautsimulanz empfohlen werden.

4.3. Alginate

Alginat sind Salze der Alginsäure, einem Polysaccharid, das aus den Zellwänden von Braunalgen gewonnen wird. In der Zahnmedizin werden die Alginat als irreversible Hydrokolloide häufig als Abformmasse zum Erstellen von Abdrücken des Gebisses verwendet. Alginat-Abformmaterialien sind kostengünstig und haben eine schnelle Abbindezeit⁵⁹. Alginat wurden in der Arbeit von Falland-Cheung et al. (2016) bereits als Hirngewebsstimulanz für wundballistische Untersuchungen eingesetzt, weshalb sie im gegenständlichen Fall hinsichtlich ihrer möglichen Eignung als Hautstimulanz untersucht wurden²⁹. In den gegenständlichen Testreihen wurde versucht, aus den Alginaten ebene Schichtdicken herzustellen, wofür letzten Endes die gleichen Techniken wie bei den Dentalsilikon zur Anwendung kamen. Im Ergebnis konnten nach Durchführung der Beschussversuche ähnliche Beobachtungen gemacht werden wie Falland-Cheung et al. (2016) es in ihrer Arbeit beschrieben: Insbesondere die Alginat höherer Schichtdicken waren spröde und es platzten in der Umgebung des zentralen Einschussdefektes größere Teile oberflächlich ab; makromorphologisch konnte keine Vergleichbarkeit zu realen Einschussverletzungen gezogen werden²⁹. Überdies entsprechen die Alginat hinsichtlich ihrer aufwändigen Lagerungsbedingungen in einer Feuchtkammer und ihrer kurzen Haltbarkeit nicht den allgemeinen Anforderungen an ein Stimulanz, weshalb Alginat als Hautstimulanz für wundballistische Untersuchungen ungeeignet erscheinen.

4.4. Latex

Latex ist ein Material, das bereits in anderen Kontexten als Hautstimulanz zur Anwendung kommt, etwa bei der Herstellung sogenannter Biofidel-Dummies für Verkehrsunfallrekonstruktionen⁶⁰. Die Herstellung eines Hautstimulanz aus flüssigem Latex mit einem Feststoffanteil von mindestens 60 % erwies sich als ausgesprochen zeitaufwändig und es war weder möglich, ebene Latexplatten herzustellen, noch konnten nach dem Beschussversuch Einschusskriterien im Latex nachgewiesen werden, welche mit den oben aufgeführten Einschusskriterien (vgl. Abb. 1) vergleichbar gewesen wären. Auf Grundlage dieser Ergebnisse ist Latex als Hautstimulanz für wundballistische Untersuchungen nicht zu empfehlen.

4.5. Hautstimulanz für medizinische Trainingszwecke

Die getesteten Hautstimulanz für medizinische Trainingszwecke (Hautnahtrainer) bestanden u. a. aus vom Hersteller nicht näher bezeichneten Silikon. Die der Bewertung zugrundeliegenden Einschusscharakteristika ließen sich in keinem der getesteten Hautnahtrainer nachweisen, vielmehr fielen zu kleine zentrale Einschussdefekte mit einem maximalen Durchmesser von 0,1 cm auf, ein Abstreif- und Kontusionsring war gar nicht oder nur angedeutet abgrenzbar. Aus dem Fehlen typischer, eine Einschussverletzung durch

Vollmantelgeschosse definierende Charakteristika sowie einer nur unzureichend angegebenen Materialzusammensetzung ergibt sich eine Ungeeignetheit der getesteten Materialien für medizinische Trainingszwecke für den Einsatz im Rahmen wundballistischer Untersuchungen.

4.6. Gamsleder

Gamsleder wurde sowohl unbehandelt als auch ein- bzw. doppelseitig mit Bienenwachs behandelt oder mit einem Silikon des Härtegrades Shore 22 sowie auch zusätzlich zum Silikon des Härtegrades 22 mit einem Silikon des Härtegrades Shore 70 beschichtet oder mit Ballistol® benetzt getestet. Es wurde in Vortests eine Methode entwickelt, um das Gamsleder ebenmäßig mit dem Bienenwachs zu beschichten. Die Beschichtung des Gamsleders mit Bienenwachs erwies sich als ausgesprochen aufwändig und zeitintensiv. Positiv fiel die hervorragende Verbundmöglichkeit des Leders mit dem als Weichgewebssimulanz fungierenden, noch flüssigen Gelatineblock auf. Auch anderweitige Verbundmöglichkeiten, etwa mit Dentalsilikonen insbesondere niedrigerer Härtegrade, wurden mit positivem Ergebnis getestet. Mit keiner der aufgeführten Variationen des Leders ließen sich jedoch Einschussdefekte erzielen, die mit Schussverletzungen realer Fälle vergleichbar gewesen wären. Darüber hinaus gilt es zu bedenken, dass es sich bei Gamsleder um ein Naturprodukt handelt, das zudem deutlichen qualitativen Materialschwankungen unterliegen kann, so dass Gamsleder als Hautsimulanz für wissenschaftliche Untersuchungen nicht verwendet werden sollte.

4.7. Studienbeschränkungen

Die Verletzungsmorphologie von Einschussdefekten hängt von zahlreichen Faktoren ab, wodurch die Interpretation der Befunde mitunter eine große Herausforderung darstellen kann. Zu den Einflussfaktoren gehören beispielsweise die Art der verwendeten Waffe und die Munition (u. a. abhängig von Kaliber, Form, Treibladung), die Schussentfernung und der Auftreffwinkel sowie mögliche Zwischenziele, die Lokalisierung der betroffenen Körperregion sowie der Hautzustand. Kritisch anzumerken ist, dass die gegenständliche Forschungsarbeit ausschließlich Ergebnisse enthält, die mit einer fixen Kombination aus einem Waffensystem und einem Munitionstyp erzielt worden sind. Pircher et al. (2017) verglichen den Einfluss verschiedener Patronenformen auf die Größe des zentralen Einschussdefektes und die Form des Kontusionsringes. Nach dem orthogonalen Beschuss von Schweinehaut (Bauchregion) mit dem Kaliber .38 special aus 2 m Entfernung stellten sie Einschussdefekte von $4,43 \pm 1,33$ mm (runder Geschosskopf), $8,43 \pm 1,17$ mm (sog. Wadcutter, flacher Geschosskopf) und $6,01 \pm 0,84$ mm (kegelstumpfförmiger Geschosskopf) fest. Ferner detektierten sie, dass der Kontusionsring durch die Rundkopfgeschosse in den Testreihen am größten und in den Versuchen mit den Wadcutter-Projektilen am kleinsten war⁶¹. Hieraus

ergibt sich, dass der Einsatz verschiedener Munitions- und Waffentypen einen Einfluss auf die Makromorphologie der Einschussdefekte nehmen kann, was bei weiterführenden Studien berücksichtigt werden sollte. Ferner wurden bei den dieser Forschungsarbeit zugrundeliegenden Versuchen 20 %ige Gelatine als Weichgewebssimulanz verwendet, da sie eine höhere (Temperatur-)Stabilität als 10 %ige Gelatine aufweist und somit besser für die teils ausgesprochen zeitaufwändigen Experimente geeignet schien. In zukünftigen Studien sollte 10 %ige Gelatine als Weichgewebssimulanz verwendet werden, da sie üblicherweise bei wundballistischen Untersuchungen bzw. Schussrekonstruktionen zum Einsatz kommt. Es ist überdies anzumerken, dass mit manchen getesteten Materialien (bspw. Alginate) kein fester Verbund zum eingesetzten Weichgewebssimulanz möglich war, was die Ergebnisse beeinflusst haben könnte. Ein weiterer limitierender Faktor der Forschungsarbeit ist die Konzentration der Beobachtungen ausschließlich auf makroskopisch abgrenzbaren Kriterien der Materialien, welche grundsätzlich geeignet wären, die Einschussmorphologie durch Vollmantelgeschosse zu reproduzieren (wie in Abb. 1 beschrieben). Tabellenwerke, etwa zur Größe zentraler Substanzdefekte nach dem Auftreffen eines bestimmten Geschosses aus einer bestimmten Entfernung in einem bestimmten Winkel, liegen nicht vor. DiMaio et al. (1982) und Sellier (1982) zufolge lässt der Durchmesser des zentralen Einschussdefektes einer Einschussverletzung keinerlei Rückschlüsse auf das verwendete Kaliber zu^{5,53}. Aus der Praxis ist jedoch bekannt, dass die Einschussdefekte beim orthogonalen Auftreffen eines nicht deformierenden Vollmantelgeschosses auf Weichgewebe in der Regel kleiner sind als das verwendete Kaliber. Dieser Umstand kann auf das Vorhandensein elastischer und kollagener Fasern in der Dermis zurückgeführt werden, die verantwortlich sind für die Dehnbarkeit und das Retraktionsvermögen der Haut⁶²; sowie auf die radiale Bewegung des Gewebes in der Umgebung der Eintrittsstelle des Geschosses (Einschussverletzung), welche dafür verantwortlich ist, dass lediglich die Geschosspitze mit der Haut in Kontakt kommt⁵³. Peonim et al. (2016) kamen im Rahmen der postmortalen Untersuchungen nach einer Massenschießerei in Bangkok 2010 mit einem M16-Gewehr und Munition des Kalibers 5,56 × 45 mm zu gleichartigen Ergebnissen. Bei fast drei Vierteln der Verstorbenen waren die im Rahmen der Obduktion detektierten Einschussverletzungen kleiner als das Kaliber der Projektile, die meisten der als „rund“ eingestuften Einschussverletzungen hatten einen Durchmesser von 0,3 cm⁶³. Thali et al. (2002) geben in ihrer Arbeit an, dass der Kontusionsring in der Regel 0,1 - 0,3 cm breit ist⁵⁵. Die Beurteilung von Schussverletzungen hinsichtlich der Ausprägung der einzelnen Charakteristika, über welche eine Einschussverletzung definiert wird, hängt in der Praxis zumindest anteilig von der Erfahrung der begutachtenden Person ab; die Einschätzung unterliegt sonach zumindest nicht in Gänze objektivierbaren Parametern. Objektivierbare biomechanische bzw. physikalische Eigenschaften, wie beispielsweise die Zugfestigkeit und der Härtegrad der einzelnen

Hautsimulantien, wurden in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt, obgleich diese Kenngrößen das Verhalten eines Projektils beim Primärkontakt mit dem biologischen Gewebe (in der Regel Haut) beeinflussen können (etwa im Hinblick auf eine Verformung). In weiterführenden Studien sollten die Materialien, welche sich als geeignet hinsichtlich des Einsatzes als Hautsimulanz erwiesen haben, in der Zusammenschau der biomechanischen Eigenschaften einerseits und der makroskopisch abgrenzbaren Charakteristika andererseits untersucht werden. Geisenberger et al. (2022) verglichen in ihrer Arbeit die Größe von Einschussdefekten in Schweinehaut abhängig von deren Lokalisation an der Rumpfvorder- bzw. -rückseite. Nach dem orthogonalen Beschuss aus 1,6 m Entfernung mit Munition im Kaliber 9 x 19 mm Luger stellten sie in der Haut der Rumpfvorderseite einen Durchmesser der Einschussdefekte von $5,61 \pm 0,57$ mm und an der Rückseite des Rumpfes von $3,33 \pm 1,17$ mm fest⁴⁸, was dafür spricht, dass auch die Lokalisation von Schussverletzungen Einfluss auf die Wundmorphologie nimmt. Es sollte demzufolge darauf geachtet werden, dass in die Konzeption zukünftiger Versuchsreihen auch biologische Faktoren, welche die menschliche Haut beeinflussen können (u. a. Alter, Geschlecht, Körperregion), einbezogen werden.

4.8. Konklusion

In der synoptischen Bewertung der im Rahmen der vorliegenden experimentellen Studie erzielten Ergebnisse zur makromorphologischen Vergleichbarkeit der Einschussdefekte in den untersuchten Hautsimulantien zu denen von Schussverletzungen realer Fälle lässt sich festhalten, dass sich mit Dentalsilikonem sowohl im Hinblick auf die allgemeinen als auch speziellen Anforderungen an ein Hautsimulanz die besten Ergebnisse erzielen ließen. Dentalsilikonem bestechen im Gegensatz zu den übrigen getesteten Materialien mit einer langen Haltbarkeit und Stabilität, breiten Verfügbarkeit, einer mit der entwickelten und hier vorgestellten Methode simplen Herstellungsprozedur und einer unkomplizierten Lagerung sowie Entsorgung. Hervorzuheben ist das Silikon des Härtegrades Shore 70 (Schichtdicke 0,15 cm) auf einem Block 20 %iger Gelatine als Weichgewebssimulanz, da es mit realen Schussverletzungen vergleichbare Einschusskriterien nach dem Beschuss mit einem Vollmantelrundkopfgeschoss aufgewiesen hat. Die übrigen getesteten Materialien eignen sich ob der fehlenden Vergleichbarkeit der Einschussdefekte mit denen realer Schussverletzungen vergleichbarer Fälle oder aber auf Grund ihrer Eigenschaften, die den Anforderungen an ein Simulanz entgegenstehen, nicht für den Einsatz als Hautsimulanz für wundballistische Untersuchungen.

5. Literaturverzeichnis

1. Huelke DF, Harger JH, Buege LJ, Dingman HG. An experimental study in bio-ballistics: femoral fractures produced by projectiles--II. Shaft impacts. *J Biomech* 1968; **1**(4): 313-21.
2. Sights WP, Jr. Ballistic analysis of shotgun injuries to the central nervous system. *J Neurosurg* 1969; **31**(1): 25-33.
3. Sperrazza J, Kokinakis W. Ballistic limits of tissue and clothing. *Ann N Y Acad Sci* 1968; **152**(1): 163-7.
4. DeMuth WE, Jr., Nicholas GG, Munger BL. Buckshot wounds. *J Trauma* 1978; **18**(1): 53-7.
5. DiMaio VJ, Copeland AR, Besant-Matthews PE, Fletcher LA, Jones A. Minimal velocities necessary for perforation of skin by air gun pellets and bullets. *J Forensic Sci* 1982; **27**(4): 894-8.
6. Viano DC, Bir C, Walilko T, Sherman D. Ballistic impact to the forehead, zygoma, and mandible: comparison of human and frangible dummy face biomechanics. *J Trauma* 2004; **56**(6): 1305-11.
7. Prat N, Rongieras F, de Fremerville H, et al. Comparison of thoracic wall behavior in large animals and human cadavers submitted to an identical ballistic blunt thoracic trauma. *Forensic Sci Int* 2012; **222**(1-3): 179-85.
8. Rossi C, Herold LD, Bevel T, McCauley L, Guadarrama S. Cranial Backspatter Pattern Production Utilizing Human Cadavers. *J Forensic Sci* 2018; **63**(5): 1526-32.
9. Sarron JC, Dannawi M, Faure A, Caillou JP, Da Cunha J, Robert R. Dynamic effects of a 9 mm missile on cadaveric skull protected by aramid, polyethylene or aluminum plate: an experimental study. *J Trauma* 2004; **57**(2): 236-42; discussion 43.
10. Tikka S, Cederberg A, Levänen J, Lötjönen V, Rokkanen P. Local effects of three standard assault rifle projectiles in live tissue. *Acta Chir Scand Suppl* 1982; **508**: 61-77.
11. Berlin RH, Janzon B, Lidén E, et al. Wound ballistics of Swedish 5.56-mm assault rifle AK 5. *J Trauma* 1988; **28**(1 Suppl): S75-83.
12. Janzon B. Soft soap as a tissue simulant medium for wound ballistic studies investigated by comparative firings with assault rifles Ak 4 and M16A1 into live, anesthetized animals. *Acta Chir Scand Suppl* 1982; **508**: 79-88.
13. Radford GE, Taylor MC, Kieser JA, et al. Simulating backspatter of blood from cranial gunshot wounds using pig models. *Int J Legal Med* 2016; **130**(4): 985-94.
14. Mabbott A, Carr DJ, Champion S, Malbon C. Comparison of porcine thorax to gelatine blocks for wound ballistics studies. *Int J Legal Med* 2016; **130**(5): 1353-62.
15. Breeze J, Hunt N, Gibb I, James G, Hepper A, Clasper J. Experimental penetration of fragment simulating projectiles into porcine tissues compared with simulants. *J Forensic Leg Med* 2013; **20**(4): 296-9.
16. Taylor SC, Kieser DC, Hammer N, et al. Viability of Bos taurus scapulae as a flat bone proxy for ballistic testing. *BMJ Mil Health* 2022; **168**(3): 196-9.
17. Mahoney PF, Carr DJ, Miller D, Teagle M. The effect of helmet materials and simulated bone and tissue layers on bullet behaviour in a gelatine model of overmatch penetrating head injury. *Int J Legal Med* 2017; **131**(6): 1765-76.
18. Stevenson T, Carr DJ, Gibb IE, Stapley SA. The effect of military clothing on gunshot wound patterns in a cadaveric animal limb model. *Int J Legal Med* 2019; **133**(6): 1825-33.
19. Fackler ML, Malinowski JA. Ordnance gelatin for ballistic studies. Detrimental effect of excess heat used in gelatin preparation. *Am J Forensic Med Pathol* 1988; **9**(3): 218-9.
20. Jussila J. Preparing ballistic gelatine--review and proposal for a standard method. *Forensic Sci Int* 2004; **141**(2-3): 91-8.
21. Mattijssen EJ, Alberink I, Jacobs B, van den Boogaard Y. Preservation and storage of prepared ballistic gelatine. *Forensic Sci Int* 2016; **259**: 221-3.
22. Carr DJ, Stevenson T, Mahoney PF. The use of gelatine in wound ballistics research. *Int J Legal Med* 2018; **132**(6): 1659-64.
23. Thali MJ, Kneubuehl BP, Dirnhofer R, Zollinger U. Body models in forensic ballistics: reconstruction of a gunshot injury to the chest by bullet fragmentation after shooting through a finger. *Forensic Sci Int* 2001; **123**(1): 54-7.

24. Kneubuehl BP, Coupland R, Rothschild MA, Thali M. Wundballistik: Grundlagen und Anwendungen. 4 ed: Springer Berlin, Heidelberg; 2022.
25. Große Perdekamp M, Braunwarth R, Kromeier J, Nadjem H, Pollak S, Thierauf A. Muzzle-loading weapons discharging spherical lead bullets: two case studies and experimental simulation using a skin-soap composite model. *Int J Legal Med* 2013; **127**(4): 791-7.
26. Perdekamp MG, Kneubuehl BP, Ishikawa T, et al. Secondary skull fractures in head wounds inflicted by captive bolt guns: autopsy findings and experimental simulation. *Int J Legal Med* 2010; **124**(6): 605-12.
27. Henwood BJ, Appleby-Thomas G. The suitability of Synbone® as a tissue analogue in ballistic impacts. *J Mater Sci* 2020; **55**(7): 3022-33.
28. Bir C, Andrecovich C, DeMaio M, Dougherty PJ. Evaluation of bone surrogates for indirect and direct ballistic fractures. *Forensic Sci Int* 2016; **261**: 1-7.
29. Falland-Cheung L, Piccione N, Zhao T, et al. Investigation of dental alginate and agar impression materials as a brain simulant for ballistic testing. *Forensic Sci Int* 2016; **263**: 169-75.
30. Lazarjan MS, Geoghegan PH, Jermy MC, Taylor M. Experimental investigation of the mechanical properties of brain simulants used for cranial gunshot simulation. *Forensic Sci Int* 2014; **239**: 73-8.
31. Bolliger SA, Poschmann SA, Thali MJ, Eggert S. A fully synthetic lung model for wound-ballistic experiments-First results. *Forensic Sci Int* 2017; **275**: 254-9.
32. Pittar N, Winter T, Falland-Cheung L, Tong D, Waddell JN. Scalp simulation - A novel approach to site-specific biomechanical modeling of the skin. *J Mech Behav Biomed Mater* 2018; **77**: 308-13.
33. Falland-Cheung L, Pittar N, Tong D, Waddell JN. Investigation of dental materials as skin simulants for forensic skin/skull/brain model impact testing. *Forensic Sci Med Pathol* 2015; **11**(4): 552-7.
34. Shergold OA, Fleck NA. Experimental investigation into the deep penetration of soft solids by sharp and blunt punches, with application to the piercing of skin. *J Biomech Eng* 2005; **127**(5): 838-48.
35. Whittle K, Kieser J, Ichim I, et al. The biomechanical modelling of non-ballistic skin wounding: blunt-force injury. *Forensic Sci Med Pathol* 2008; **4**(1): 33-9.
36. Gilchrist MD, Keenan S, Curtis M, Cassidy M, Byrne G, Destrade M. Measuring knife stab penetration into skin simulant using a novel biaxial tension device. *Forensic Sci Int* 2008; **177**(1): 52-65.
37. Nolan G, Lawes S, Hainsworth S, Rutty G. A study considering the force required for broken glass bottles to penetrate a skin simulant. *Int J Legal Med* 2012; **126**(1): 19-25.
38. Carr DJ, Wainwright A. Variability of simulants used in recreating stab events. *Forensic Sci Int* 2011; **210**(1-3): 42-6.
39. Parmar K, Hainsworth SV, Rutty GN. Quantification of forces required for stabbing with screwdrivers and other blunter instruments. *Int J Legal Med* 2012; **126**(1): 43-53.
40. Ankersen J, Birkbeck AE, Thomson RD, Vanezis P. Puncture resistance and tensile strength of skin simulants. *Proc Inst Mech Eng H* 1999; **213**(6): 493-501.
41. Jussila J, Leppäniemi A, Paronen M, Kulomäki E. Ballistic skin simulant. *Forensic Sci Int* 2005; **150**(1): 63-71.
42. Kerkhoff W, Visser M, Mattijssen E, Hermsen R, Alberink IB. A combined cowhide/gelatine soft tissue simulant for ballistic studies. *Forensic Sci Int* 2022; **338**: 111392.
43. Breeze J, James GR, Hepper AE. Perforation of fragment simulating projectiles into goat skin and muscle. *J R Army Med Corps* 2013; **159**(2): 84-9.
44. Geisenberger D, Giorgetti A, Glardon M, Große Perdekamp M, Pollak S, Pircher R. The punched-out tissue complex (skin-bone "imprimatum") in shots from captive-bolt guns: does it act as a secondary projectile? *Int J Legal Med* 2020; **134**(3): 1095-102.
45. Das R, Collins A, Verma A, Fernandez J, Taylor M. Evaluating simulant materials for understanding cranial backspatter from a ballistic projectile. *J Forensic Sci* 2015; **60**(3): 627-37.

46. Pircher R, Große Perdekamp M, Thierauf-Emberger A, Kramer L, Pollak S, Geisenberger D. Wound morphology in contact shots from blank cartridge handguns: a study on composite models. *Int J Legal Med* 2017; **131**(5): 1333-9.
47. Vennemann B, Dautel F, Braunwarth R, et al. Textile fibres along the bullet path--experimental study on a skin-gelatine composite model. *Int J Legal Med* 2008; **122**(3): 213-8.
48. Geisenberger D, Große Perdekamp M, Pollak S, Thierauf-Emberger A, Thoma V. Differing sizes of bullet entrance holes in skin of the anterior and posterior trunk. *Int J Legal Med* 2022; **136**(6): 1597-603.
49. Grosse Perdekamp M, Vennemann B, Mattern D, Serr A, Pollak S. Tissue defect at the gunshot entrance wound: what happens to the skin? *Int J Legal Med* 2005; **119**(4): 217-22.
50. Grosse Perdekamp M, Pollak S, Thierauf A, Strassburger E, Hunzinger M, Vennemann B. Experimental simulation of reentry shots using a skin-gelatine composite model. *Int J Legal Med* 2009; **123**(5): 419-25.
51. Plattner T, Kneubuehl B, Thali M, Zollinger U. Gunshot residue patterns on skin in angled contact and near contact gunshot wounds. *Forensic Sci Int* 2003; **138**(1-3): 68-74.
52. Riva F, Lombardo P, Zech WD, Jackowski C, Schyma C. Individual synthetic head models in wound ballistics - A feasibility study based on real cases. *Forensic Sci Int* 2019; **294**: 150-9.
53. Sellier K. Schußwaffen und Schußwirkungen, Bd. 1: Ballistik, Medizin und Kriminalistik. 2 ed. Lübeck: Verlag Max Schmidt-Roemhildt; 1982.
54. Sellier K. Bullet entry studies of the skin. *Beitr Gerichtl Med* 1969; **25**: 265-70.
55. Thali MJ, Kneubuehl BP, Zollinger U, Dirnhofer R. A study of the morphology of gunshot entrance wounds, in connection with their dynamic creation, utilizing the "skin-skull-brain model". *Forensic Sci Int* 2002; **125**(2-3): 190-4.
56. Fischer VKS, Rothschild MA, Kneubuehl BP, Kamphausen T. Skin simulants for wound ballistic investigation – an experimental study. *Int J Legal Med* 2024.
57. Hes RAG, Painter JD, Appleby-Thomas GJ. Optimal skin simulant for ballistic testing. *Forensic Sci Int* 2023; **346**: 111653.
58. Thali MJ, Kneubuehl BP, Zollinger U, Dirnhofer R. The "skin-skull-brain model": a new instrument for the study of gunshot effects. *Forensic Sci Int* 2002; **125**(2-3): 178-89.
59. Cervino G, Fiorillo L, Herford AS, et al. Alginate Materials and Dental Impression Technique: A Current State of the Art and Application to Dental Practice. *Mar Drugs* 2018; **17**(1).
60. Schäuble A. Crash test dummies – how realistic are currently used dummies? *Diploma Thesis, Technische Universität Wien* 2019.
61. Pircher R, Preiß D, Pollak S, Thierauf-Emberger A, Perdekamp MG, Geisenberger D. The influence of the bullet shape on the width of abrasion collars and the size of gunshot entrance holes. *Int J Legal Med* 2017; **131**(2): 441-5.
62. Rettinger G, Hosemann W, Hüttenbrink K-B, et al. HNO-Operationslehre: mit allen wichtigen Eingriffen. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2018.
63. Peonim V, Srisont S, Udnoon J, Wongwichai S, Thapon A, Worasuwanarak W. Entrance and exit wounds of high velocity bullet: An autopsy analysis in the event of dispersing the mass rally in Bangkok Thailand, May 2010. *Leg Med (Tokyo)* 2016; **23**: 10-6.

6. Anhang

6.1. Abbildungen aus der Publikation Fischer et al. (2024)

Im Folgenden sind die Abbildungen in der Reihenfolge aufgeführt, wie sie in der dieser Dissertationsschrift zugrundeliegenden Publikation Fischer et al. (2024) vorkommen. Die Bildunterschriften sind ins Deutsche übersetzt worden, an der Bildreihenfolge selbst wurde nichts geändert.

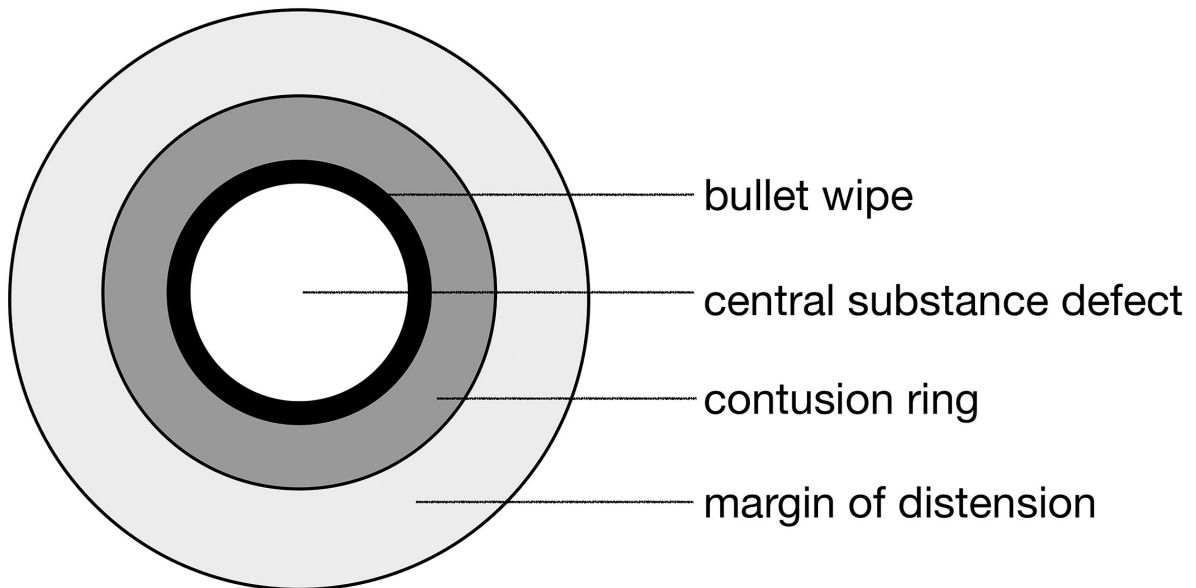


Fig. 1 Terminologie einer Einschussverletzung (senkrechter Schuss mit einem Vollmantelgeschoss), aus Fischer et al. (2024)

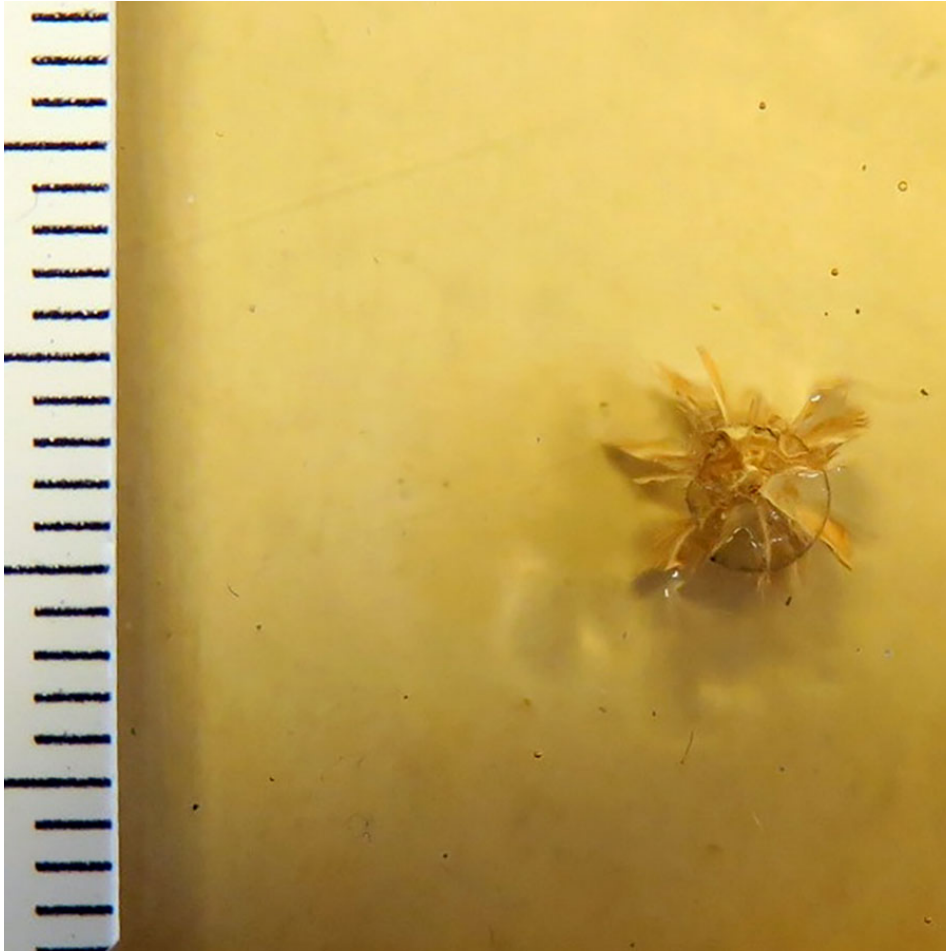


Fig. 2 Gelatine 40 % (Schichtdicke 0,3 cm, senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)

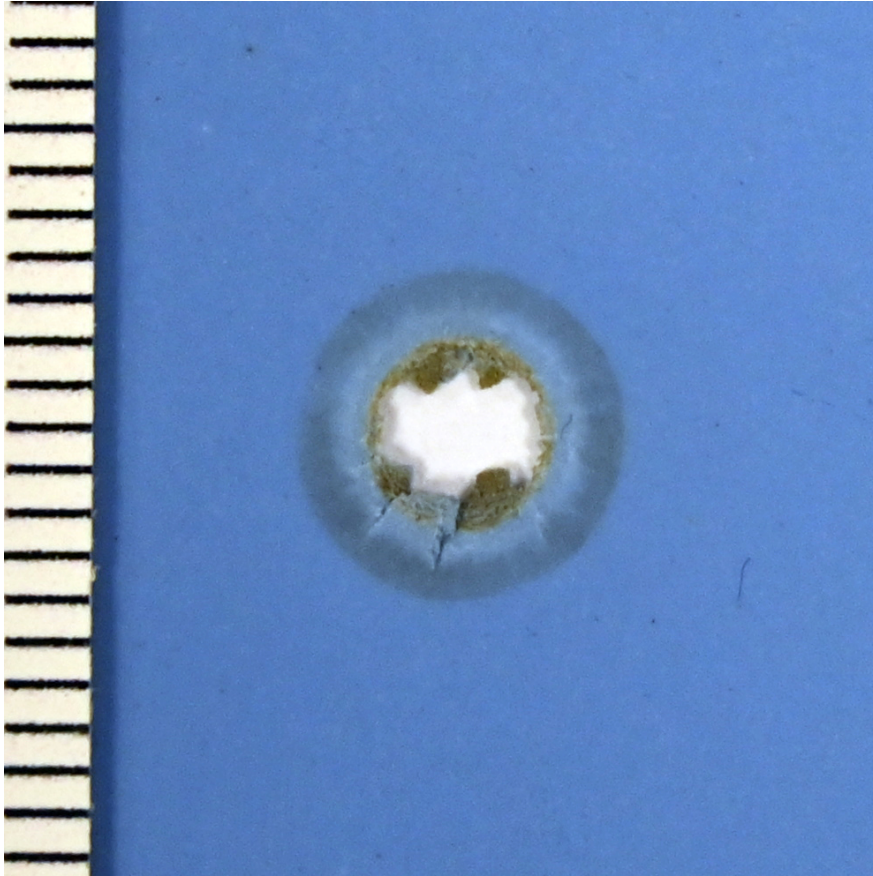


Fig. 3 Dentalsilikon Shore 70 (Schichtdicke 0,15 cm, senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)

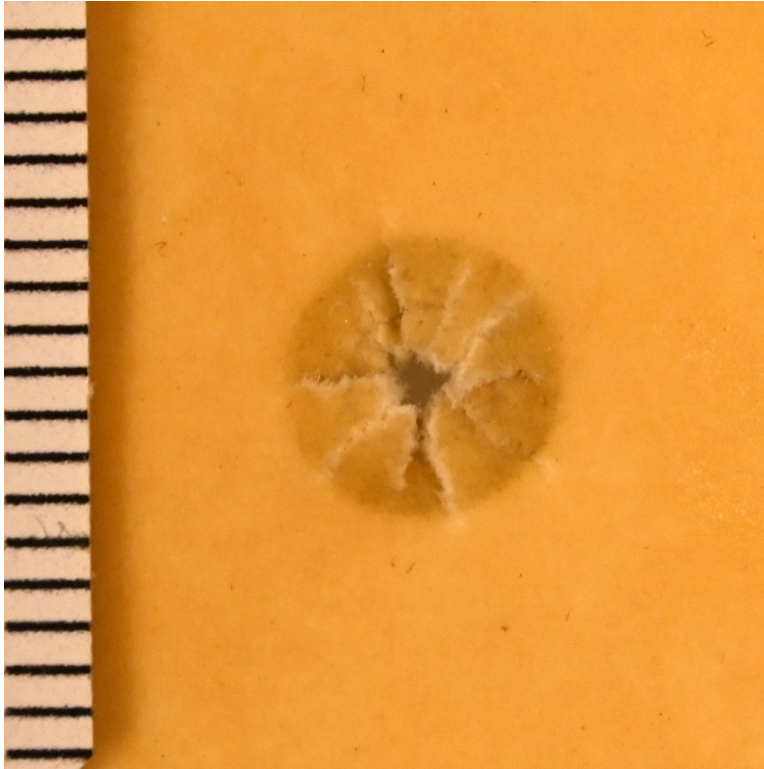


Fig. 4 Dentalsilikon Shore 22-Gamsleder-Verbund (senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)

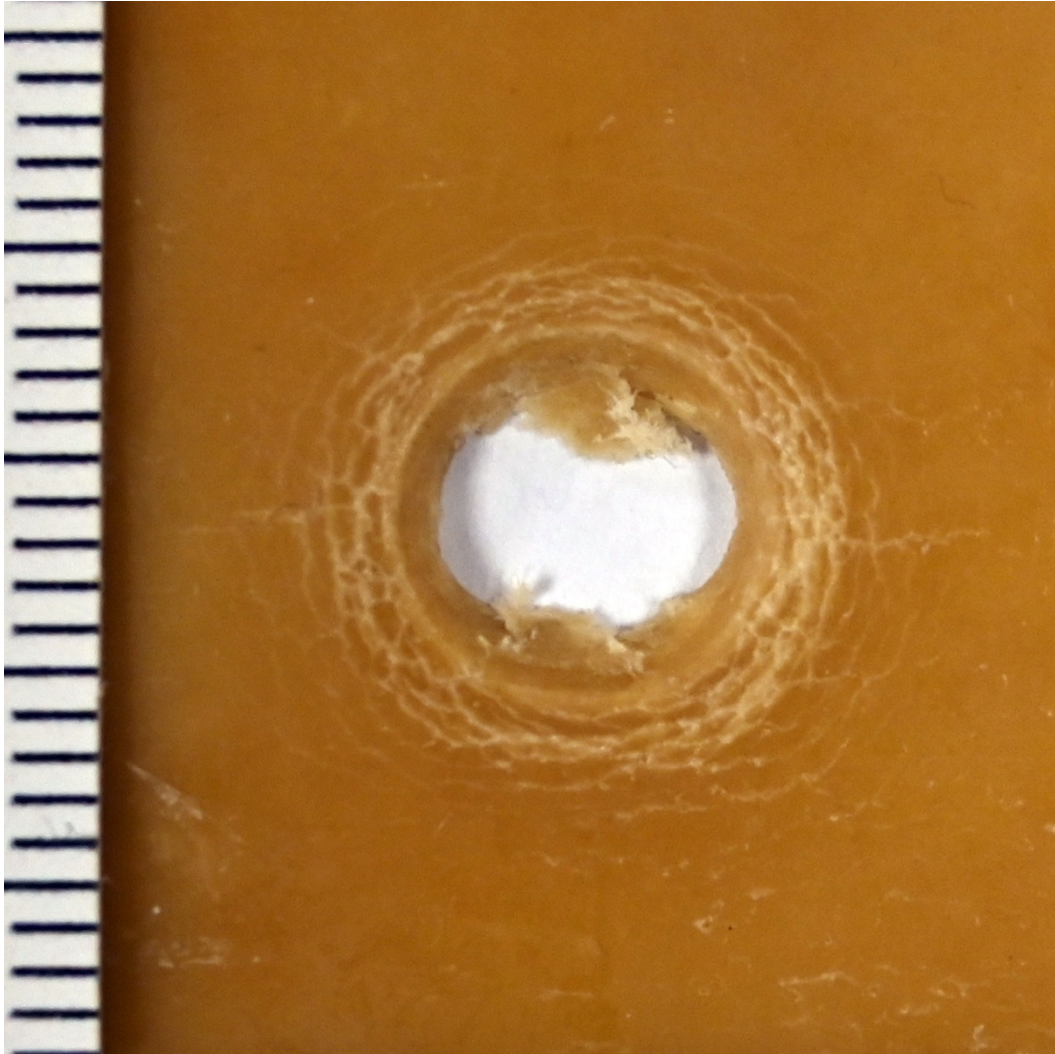


Fig. 5 Gamsleder beschichtet mit Bienenwachs (senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)

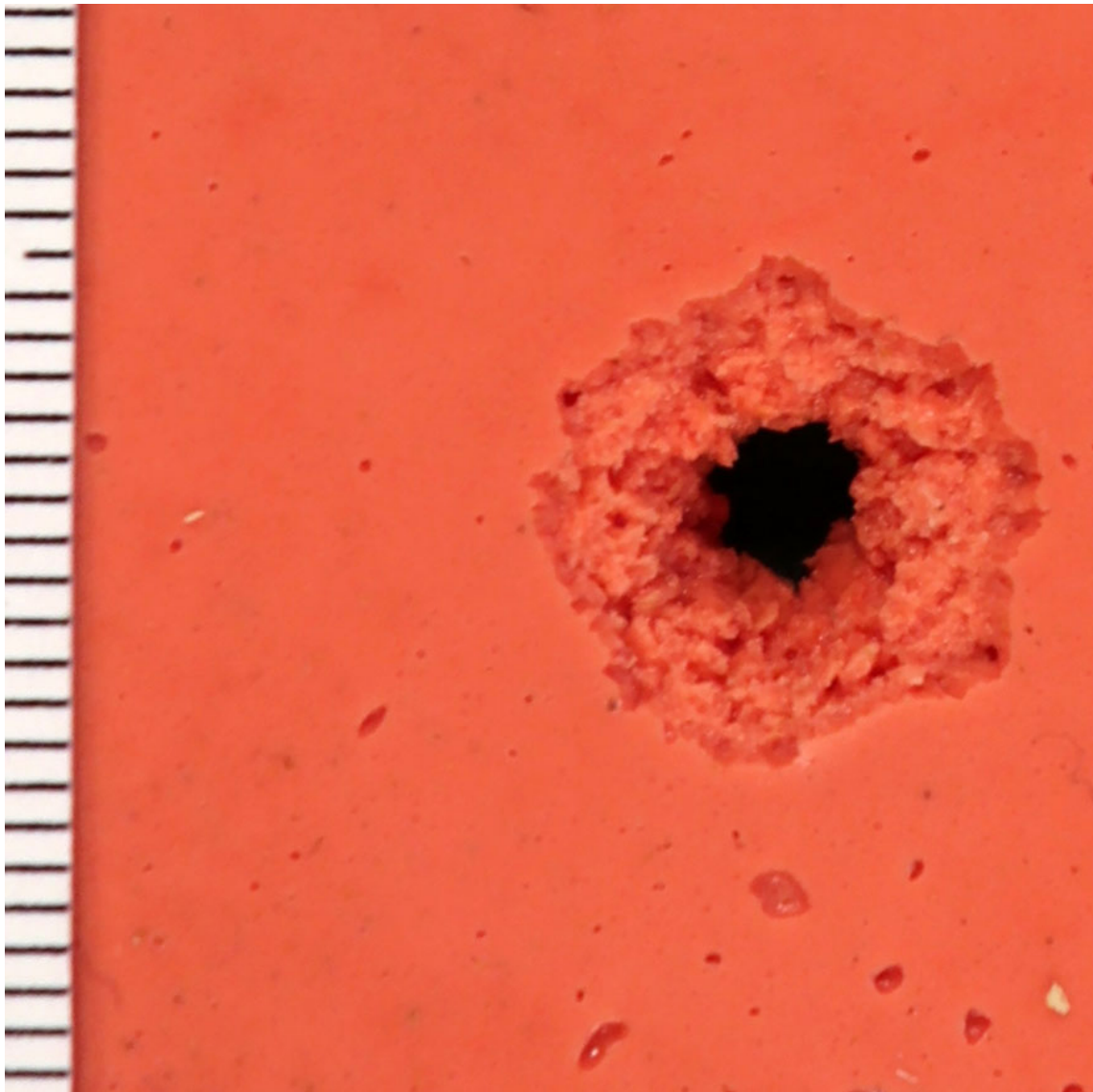


Fig. 6 Alginat "Neocolloid" (Schichtdicke 0,3 cm, senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)

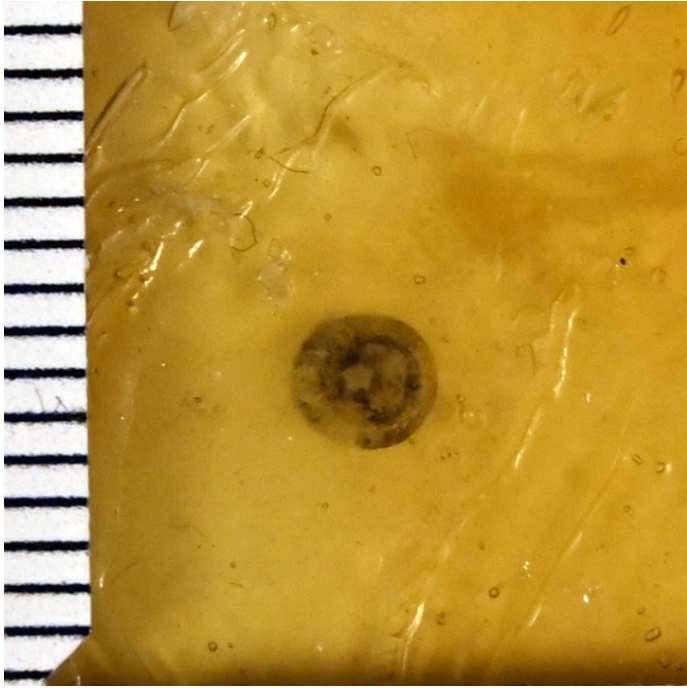
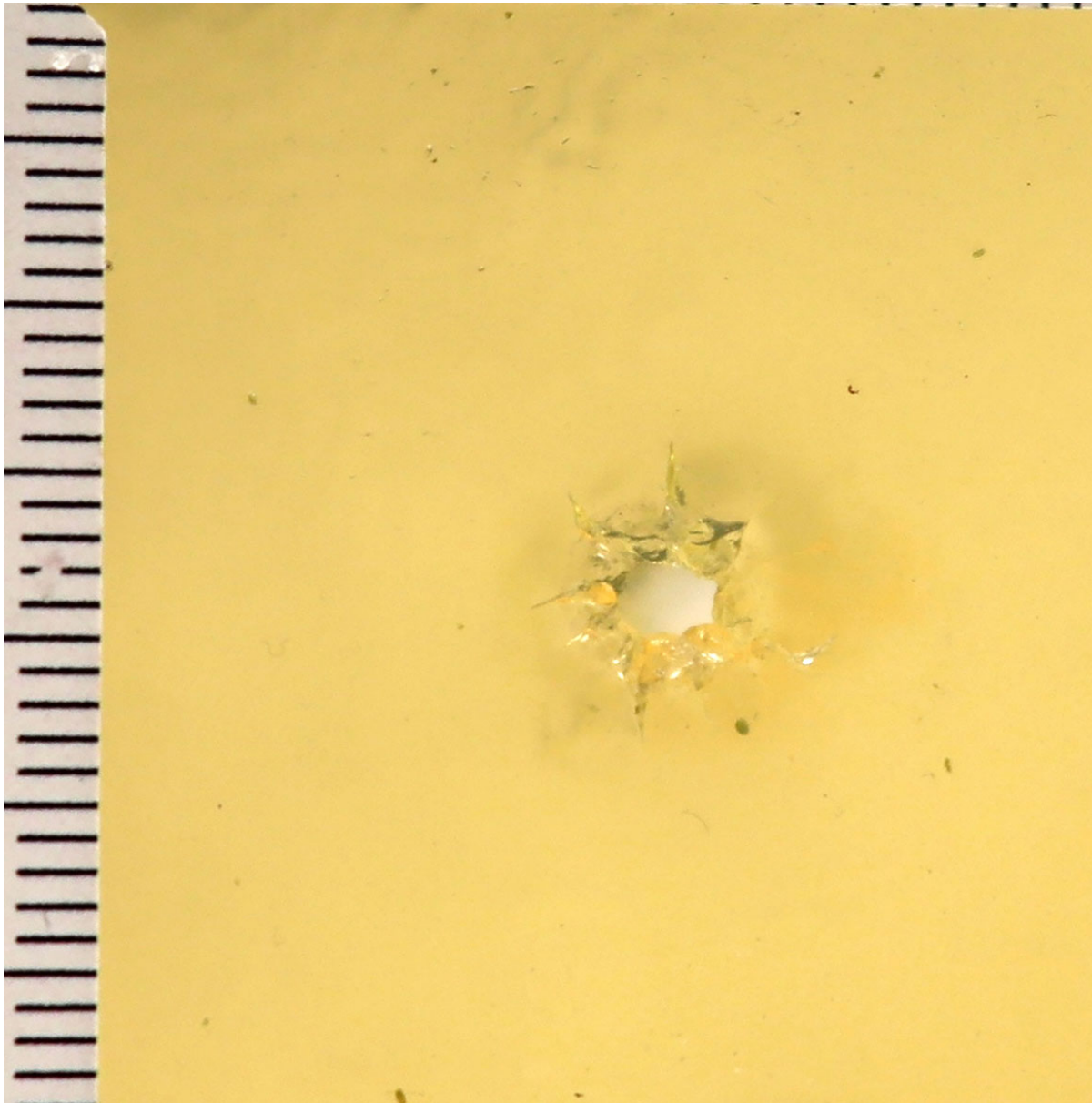


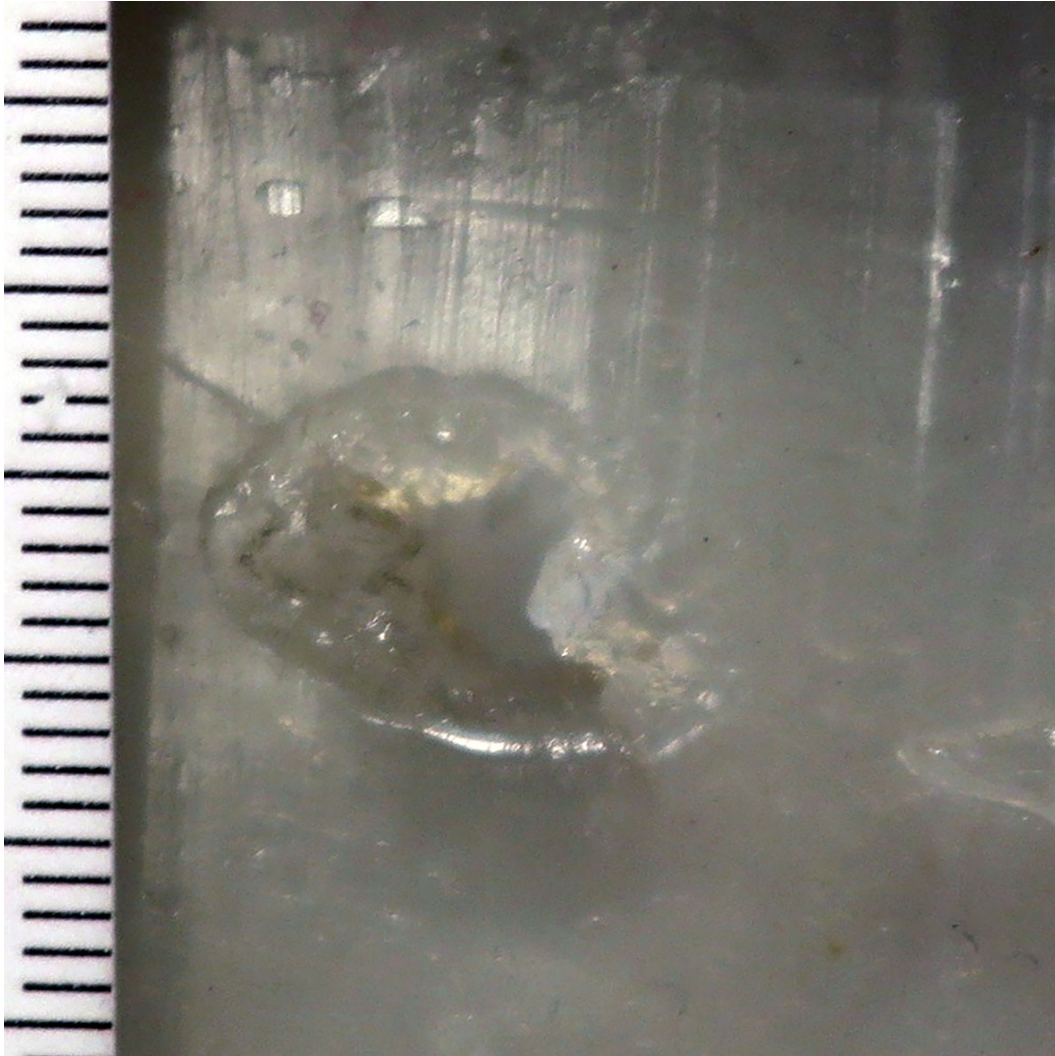
Fig. 7 Latex (Schichtdicke 0,1 cm, senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)

6.2. Abbildungen aus dem *electronic supplementary material (ESM)* zur Publikation Fischer et al. (2024)

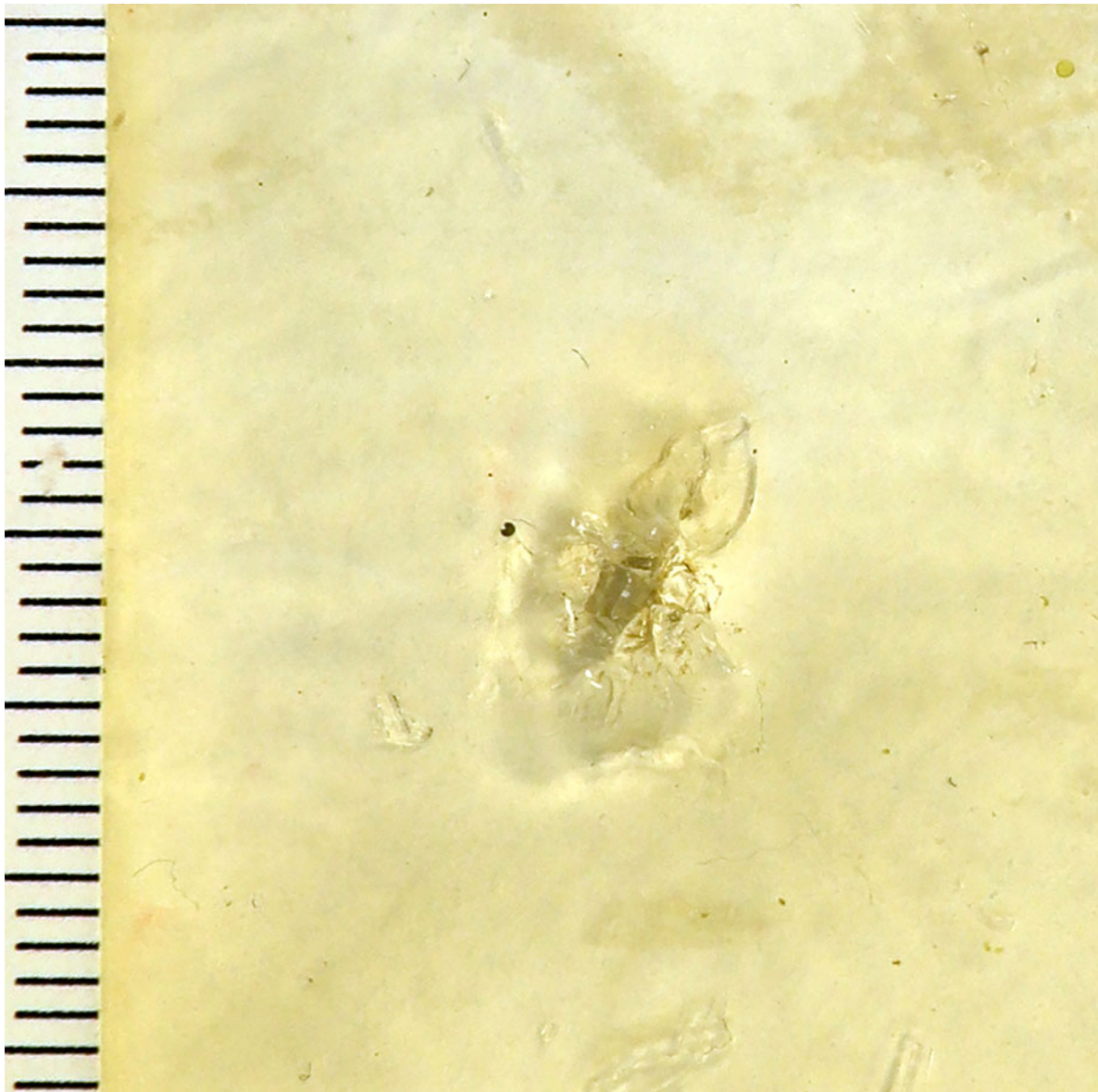
Im Folgenden sind die Abbildungen aus dem *electronic supplementary material (ESM)* in der Reihenfolge aufgeführt, wie sie in der dieser Dissertationsschrift zugrundeliegenden Publikation Fischer et al. (2024) vorkommen. Die Bildunterschriften sind ins Deutsche übersetzt worden, an der Bildreihenfolge selbst wurde nichts geändert.



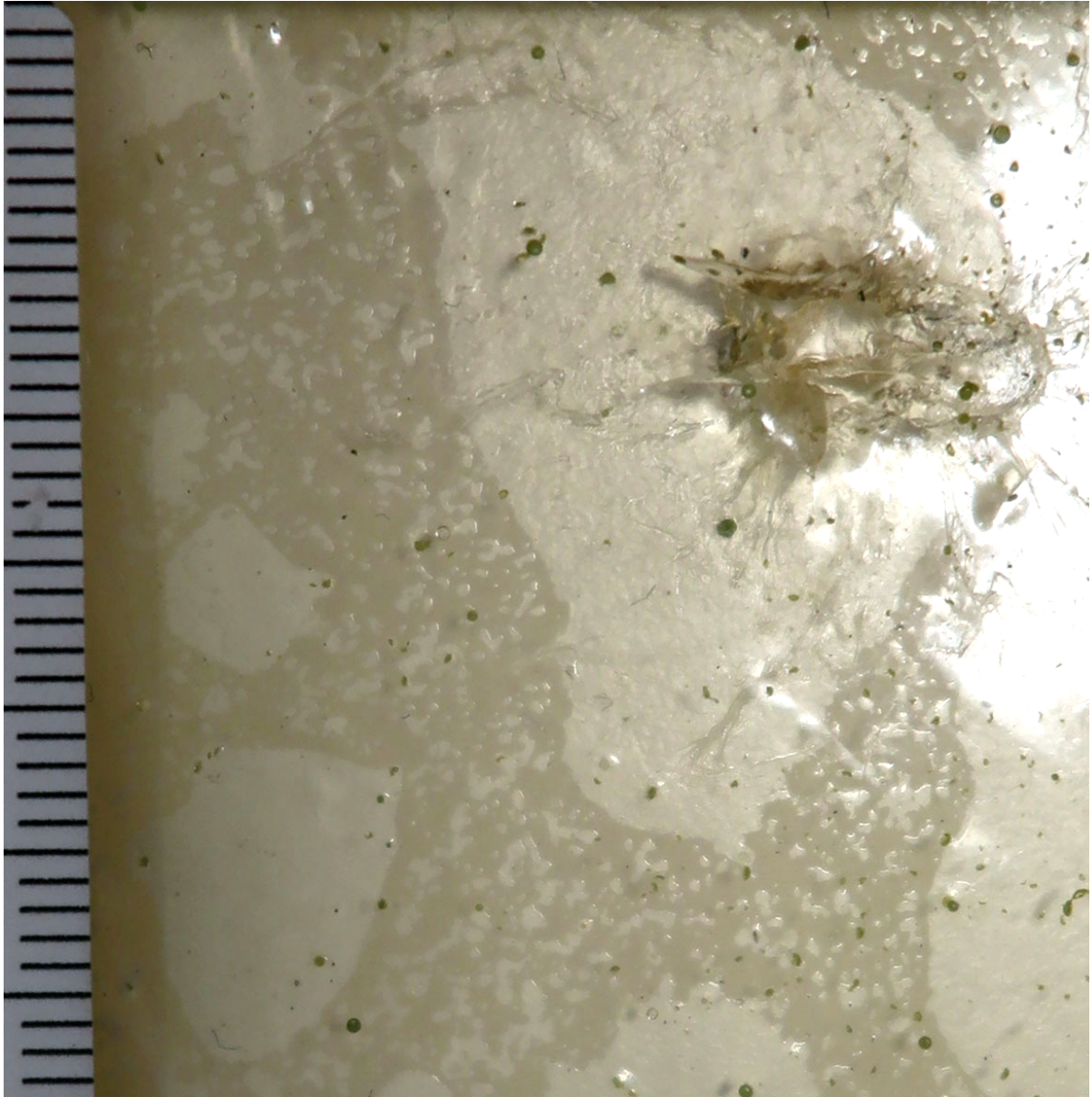
ESM-Fig. 1 Gelatine 10 % (Schichtdicke 0,3 cm, senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



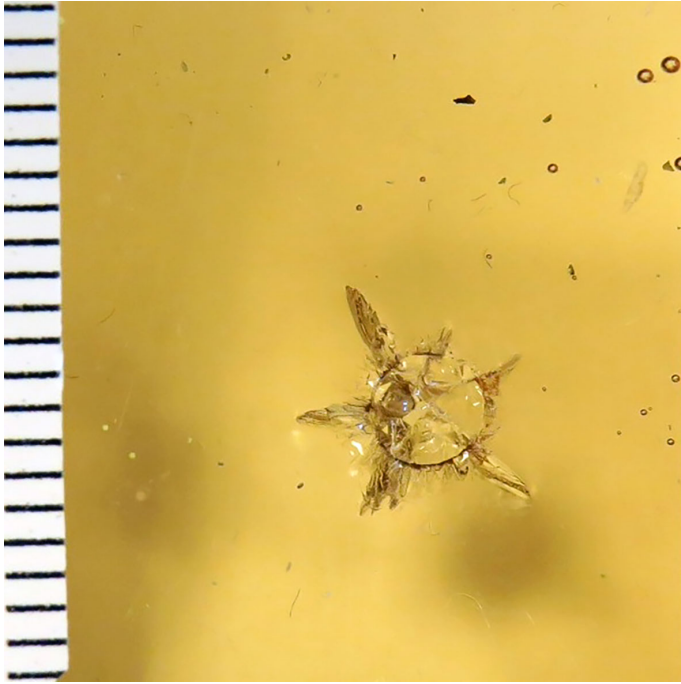
ESM-Fig. 2 Gelatine 10 % (Schichtdicke 0,6 cm, schräger Schuss, 0,3 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



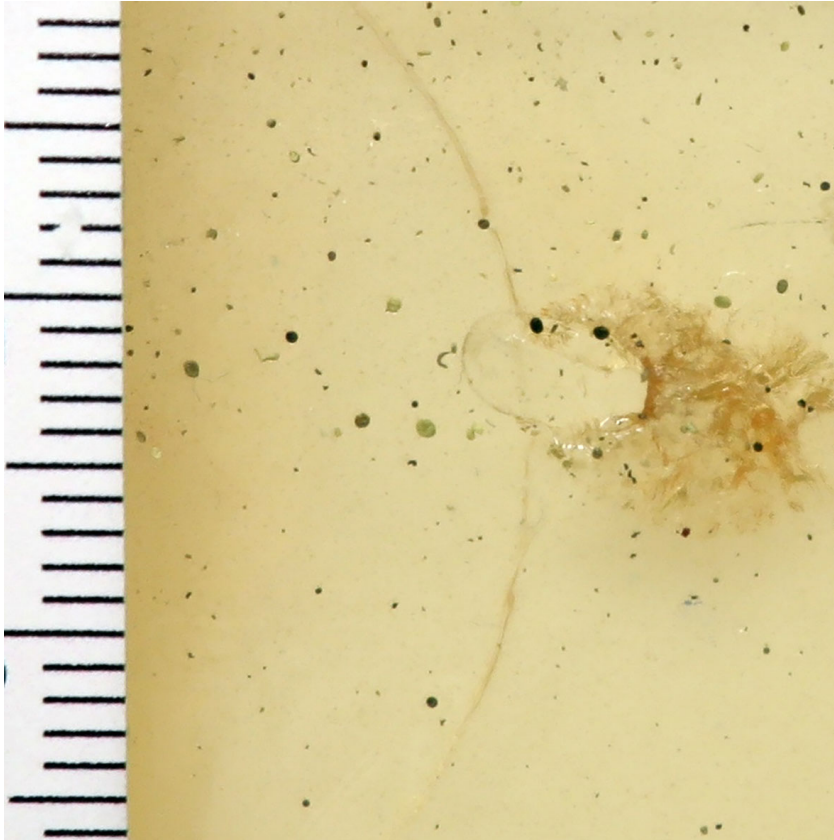
ESM-Fig. 3 Gelatine 20 % (Schichtdicke 0,3 cm, senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



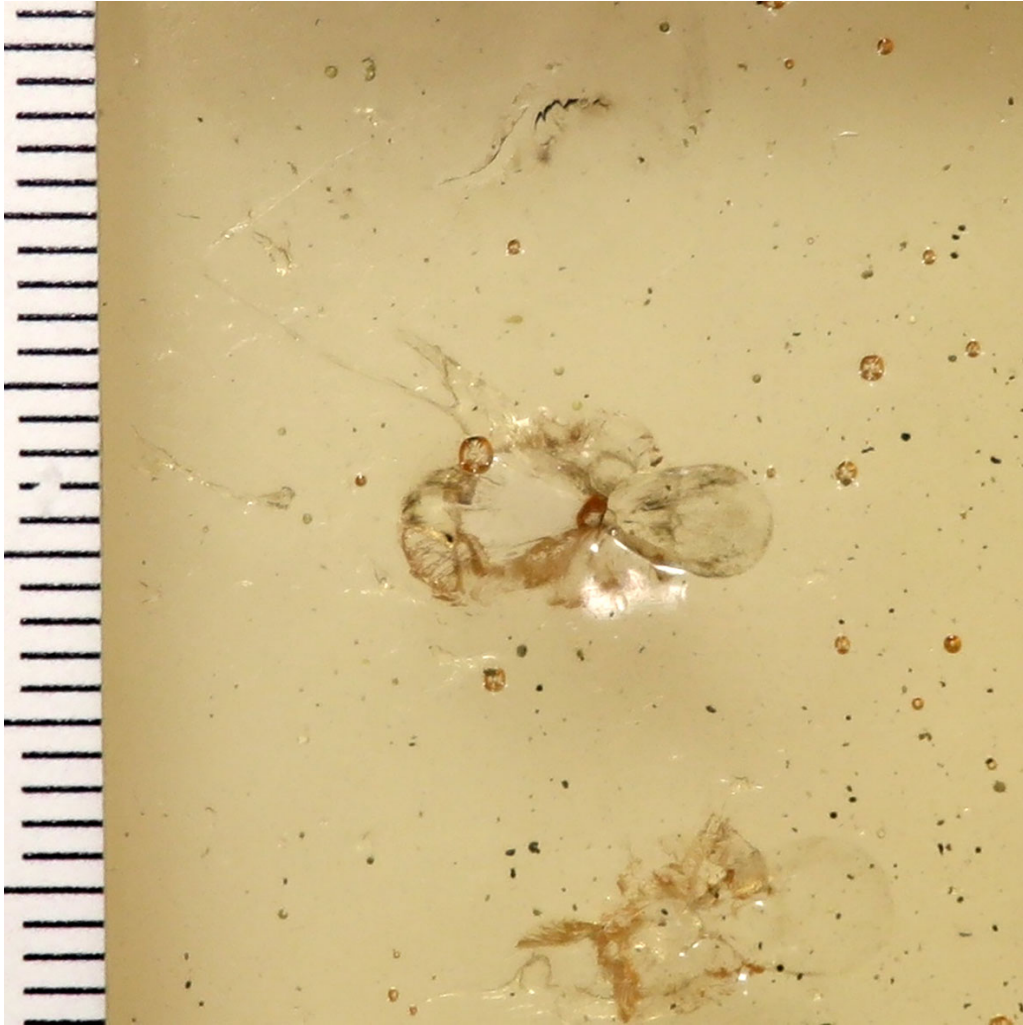
ESM-Fig. 4 Gelatine 20 % (Schichtdicke 0,6 cm, schräger Schuss, 0,3 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



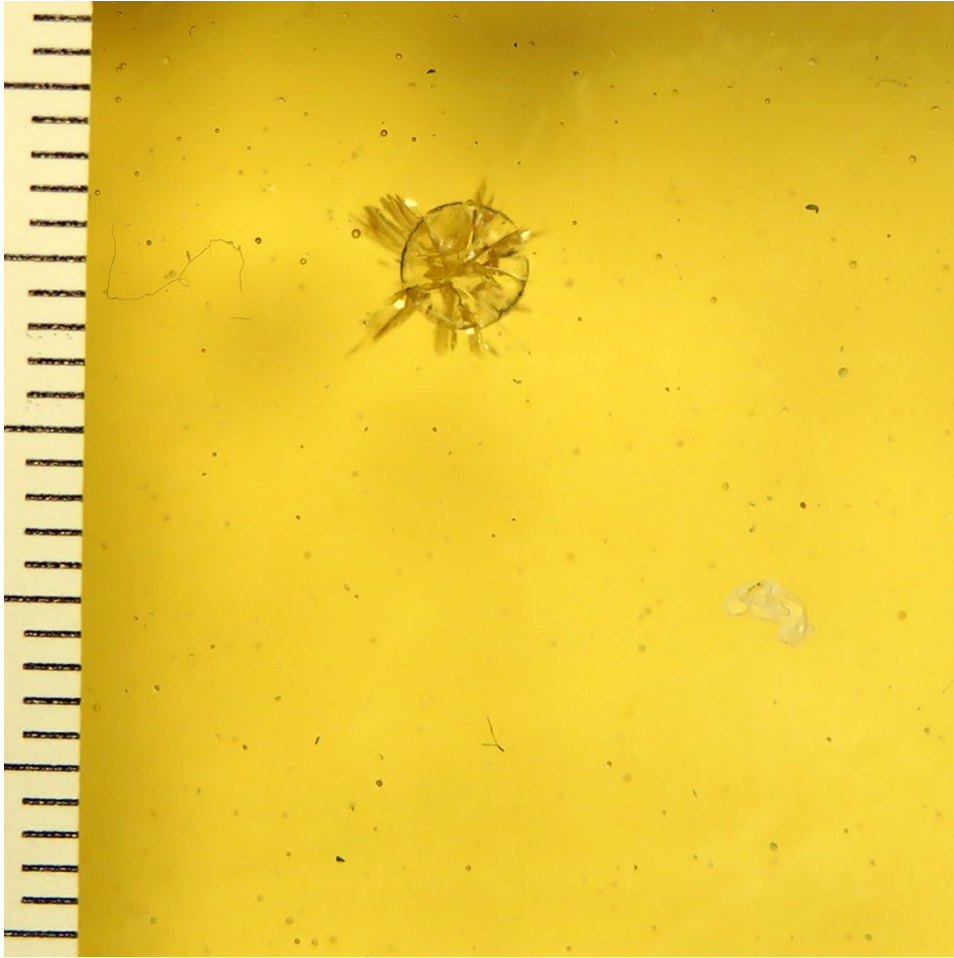
ESM-Fig. 5 Gelatine 30 % (Schichtdicke 0,3 cm, senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



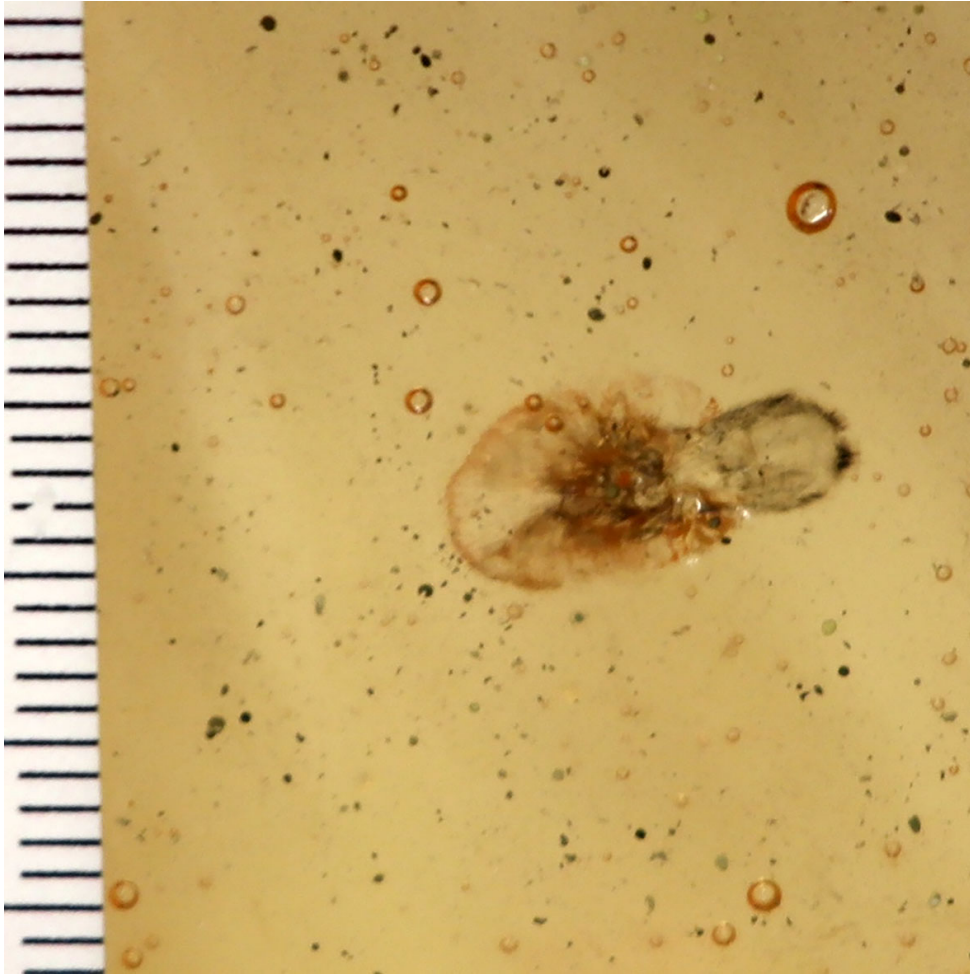
ESM-Fig. 6 Gelatine 30 % (Schichtdicke 0,6 cm, schräger Schuss, 0,3 m Distanz),
aus Fischer et al. (2024)



ESM-Fig. 7 Gelatine 40 % (Schichtdicke 0,6 cm, schräger Schuss, 0,3 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



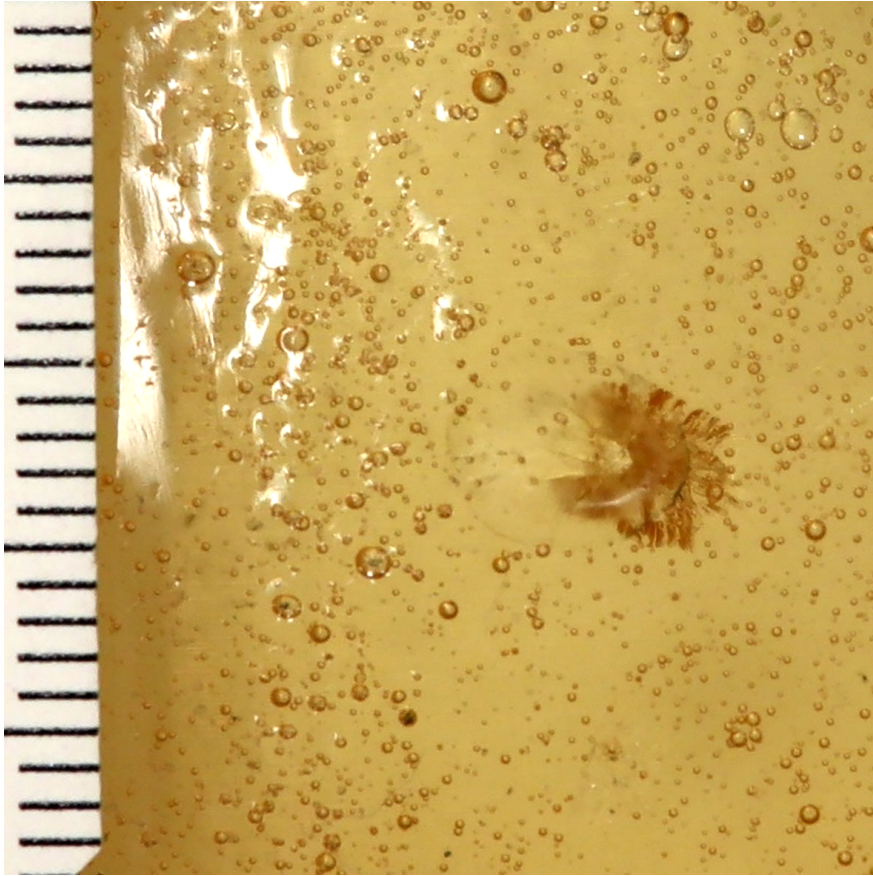
ESM-Fig. 8 Gelatine 50 % (Schichtdicke 0,3 cm, senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



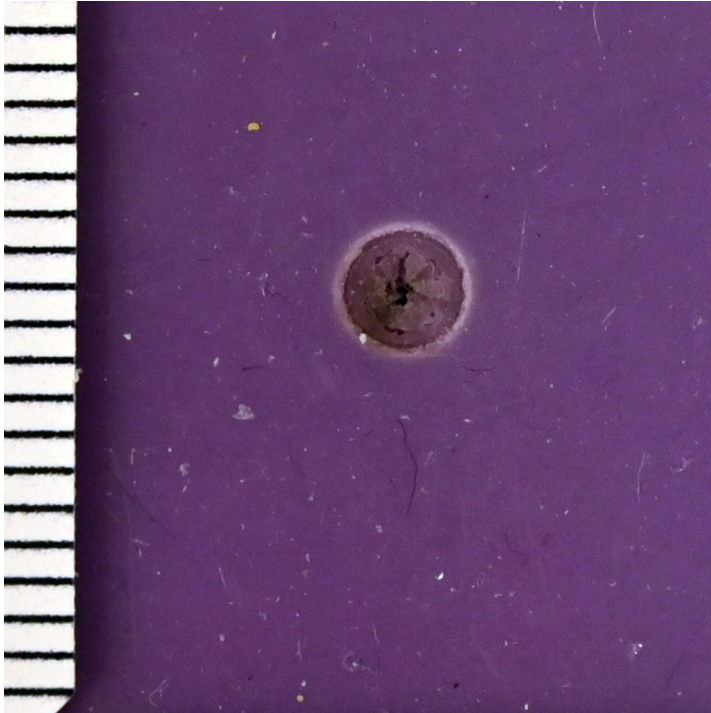
ESM-Fig. 9 Gelatine 50 % (Schichtdicke 0,6 cm, schräger Schuss, 0,3 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



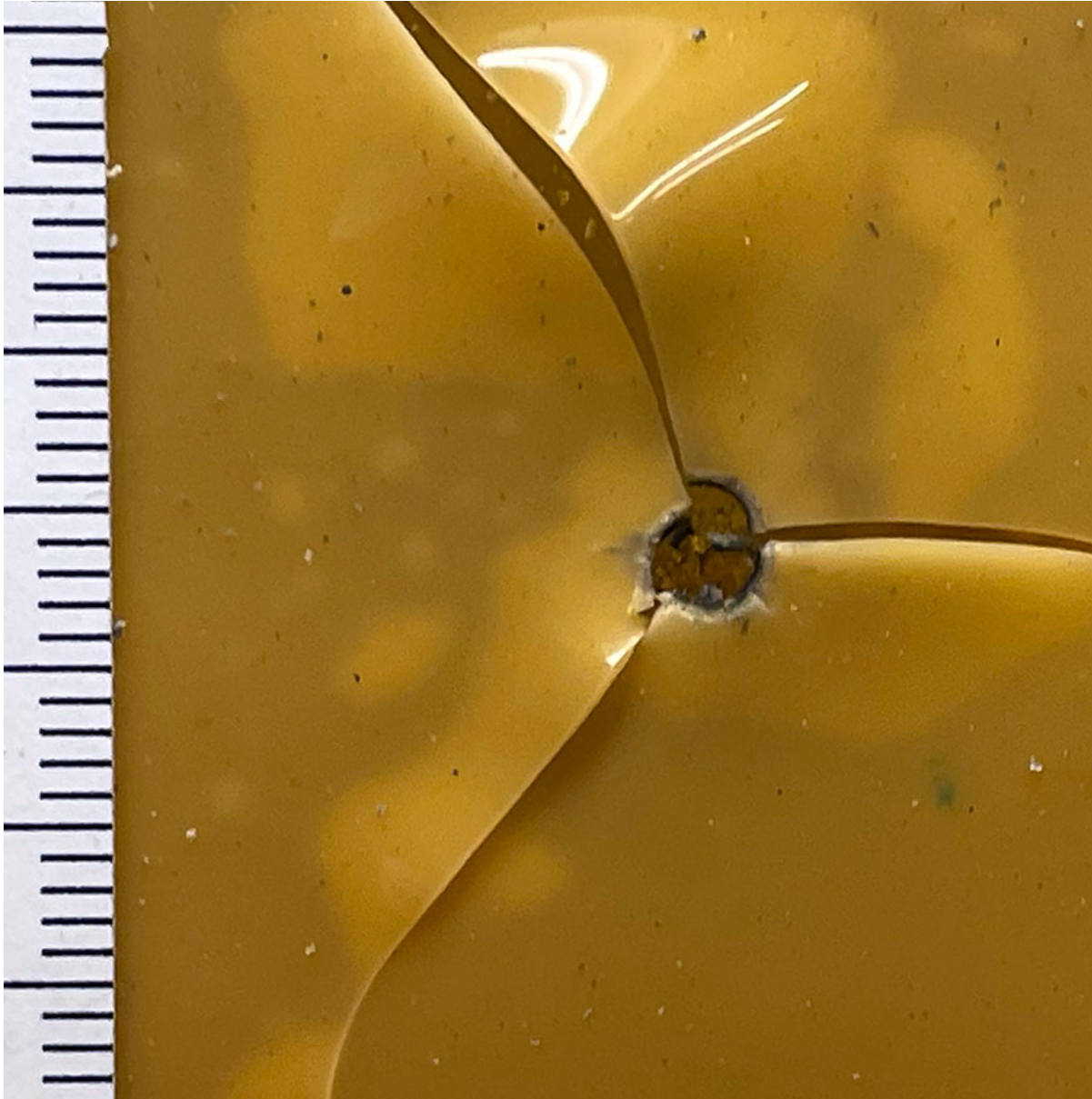
ESM-Fig. 10 Gelatine 60 % (Schichtdicke 0,3 cm, senkrechter Schuss, 10 m Distanz),
aus Fischer et al. (2024)



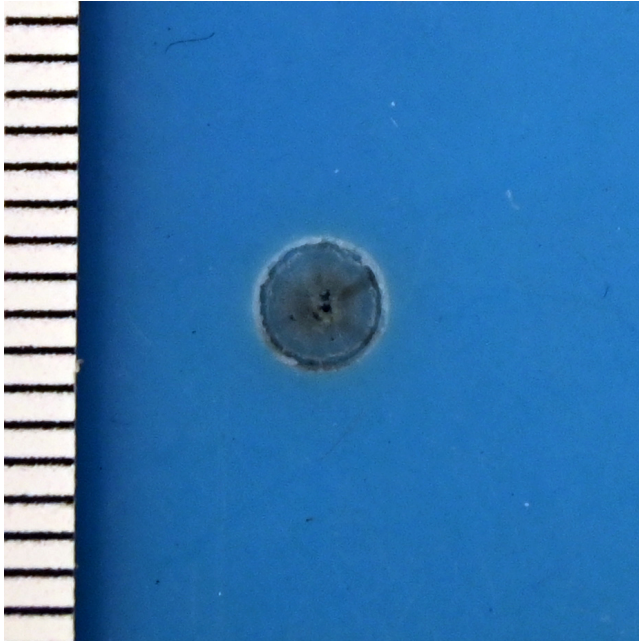
ESM-Fig. 11 Gelatine 60 % (Schichtdicke 0,6 cm, schräger Schuss, 0,3 m Distanz),
aus Fischer et al. (2024)



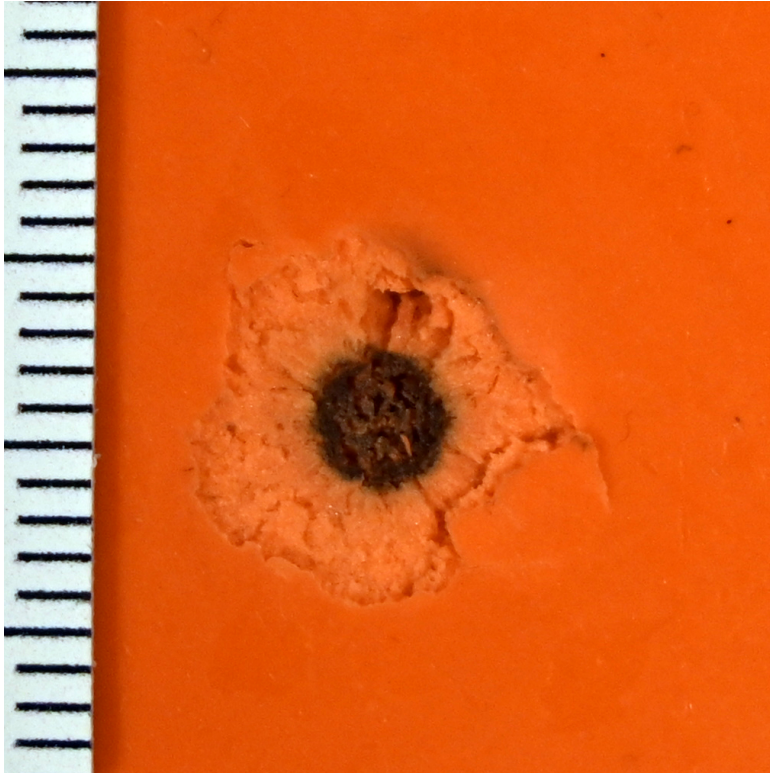
ESM-Fig. 12 Dentalsilikon Shore 16 (Schichtdicke 0,6 cm, senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



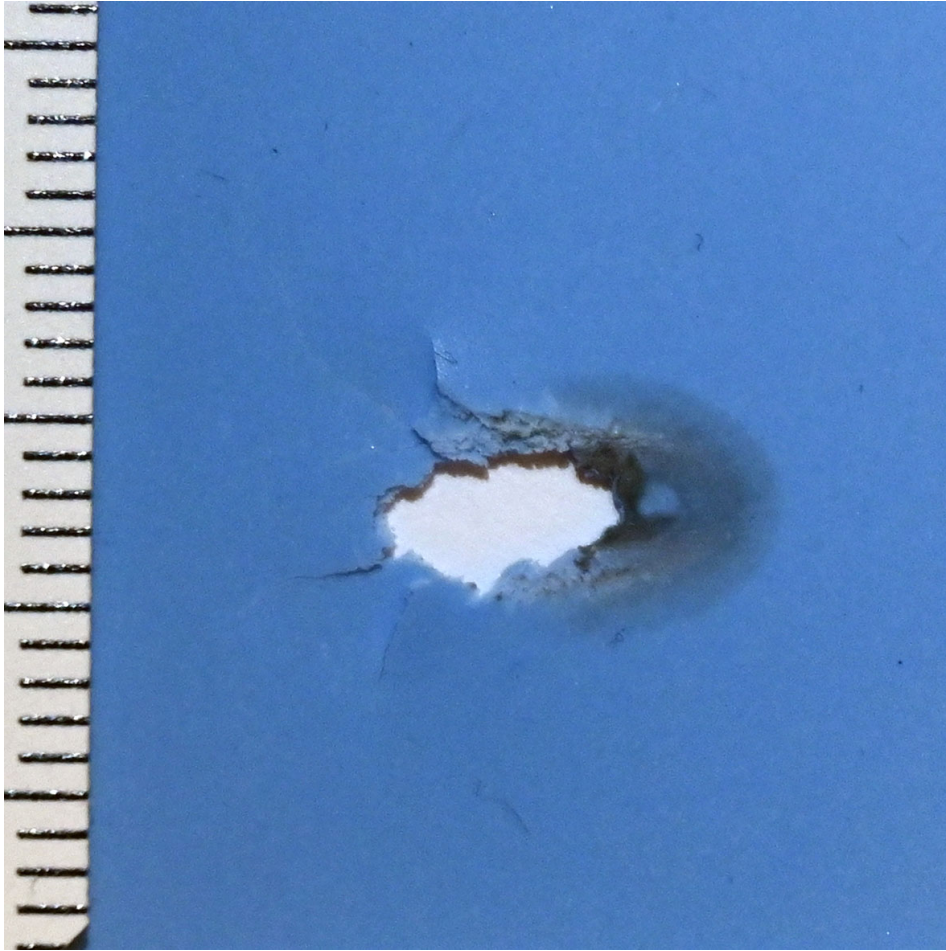
ESM-Fig. 13 Dentalsilikon Shore 22 (Schichtdicke 0,05 cm, senkrechter Schuss, 0,3 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



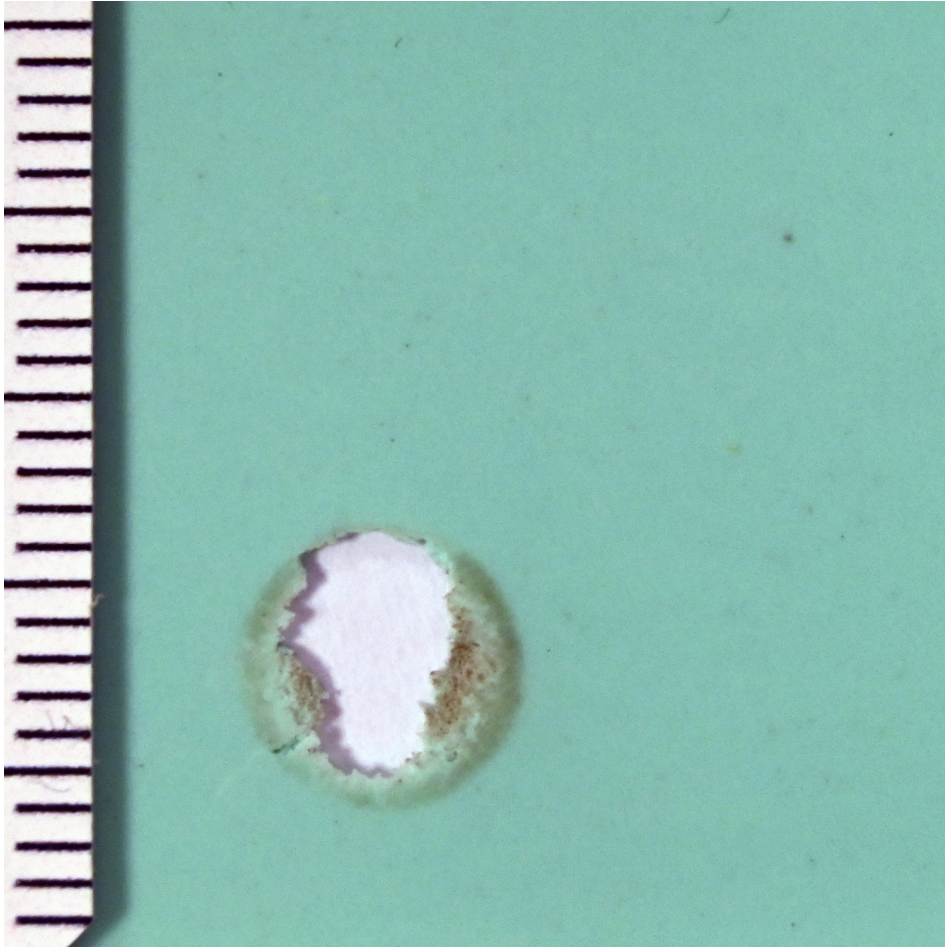
ESM-Fig. 14 Dentalsilikon Shore 32 (Schichtdicke 0,6 cm, senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



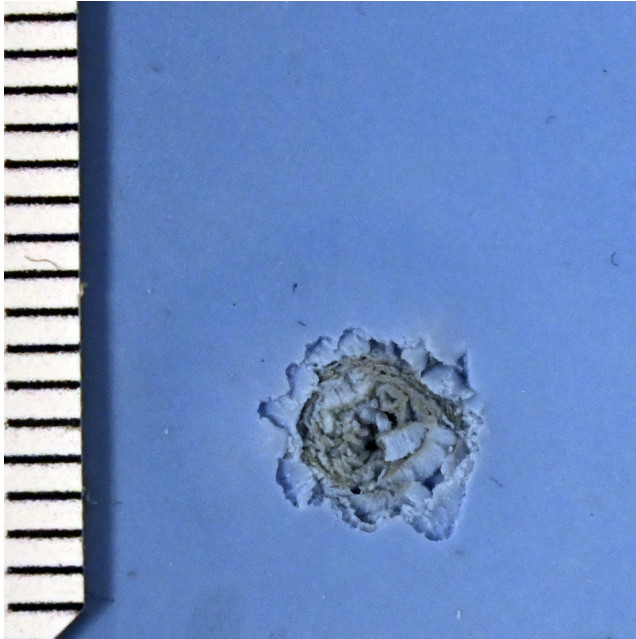
ESM-Fig. 15 Dentalsilikon Shore 60 (Schichtdicke 0,3 cm, senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



ESM-Fig. 16 Dentalsilikon Shore 70 (Schichtdicke 0,15 cm, schräger Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



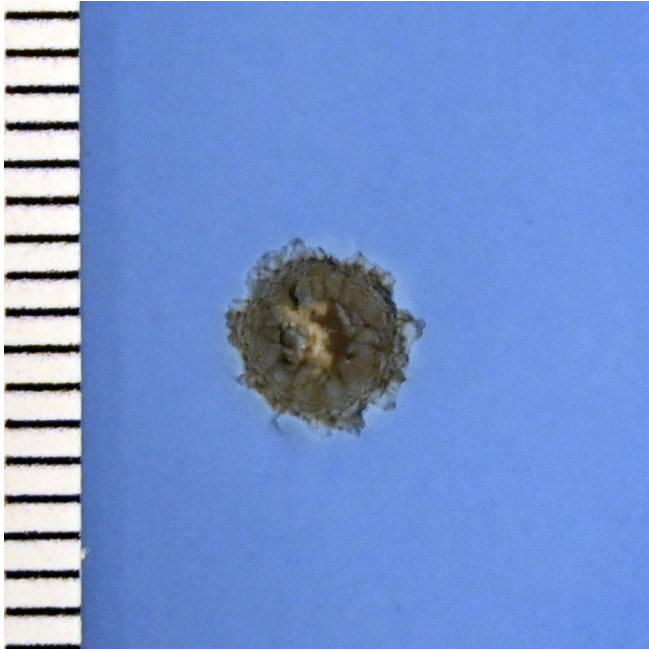
ESM-Fig. 17 Dentalsilikon Shore 85 (Schichtdicke 0,15 cm, senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



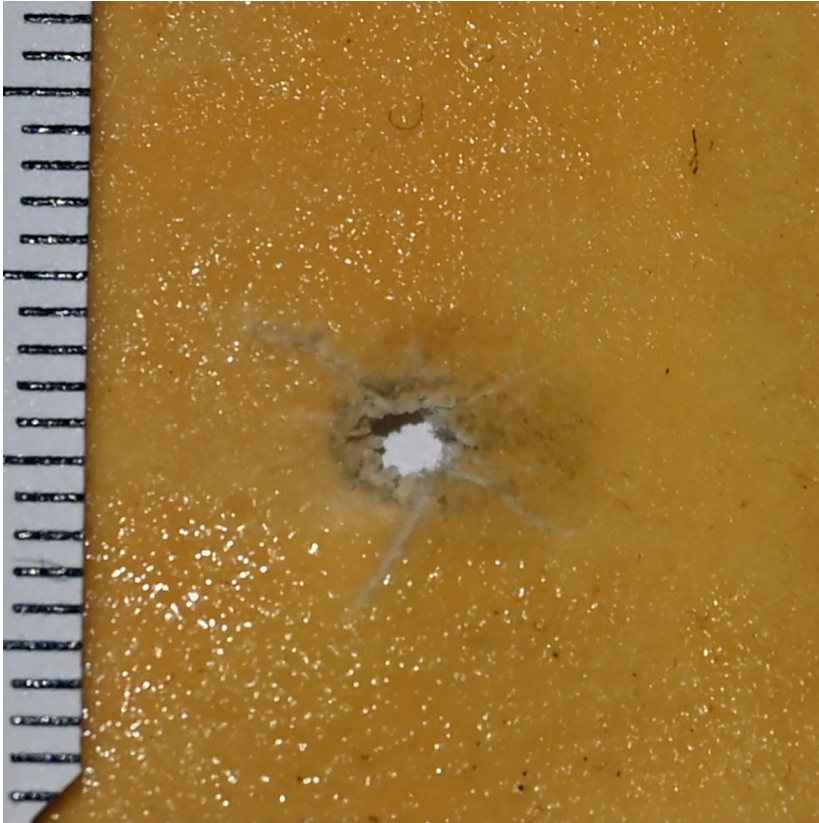
ESM-Fig. 18 Dentalsilikon Shore 70-Kunstleder-Verbund (senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



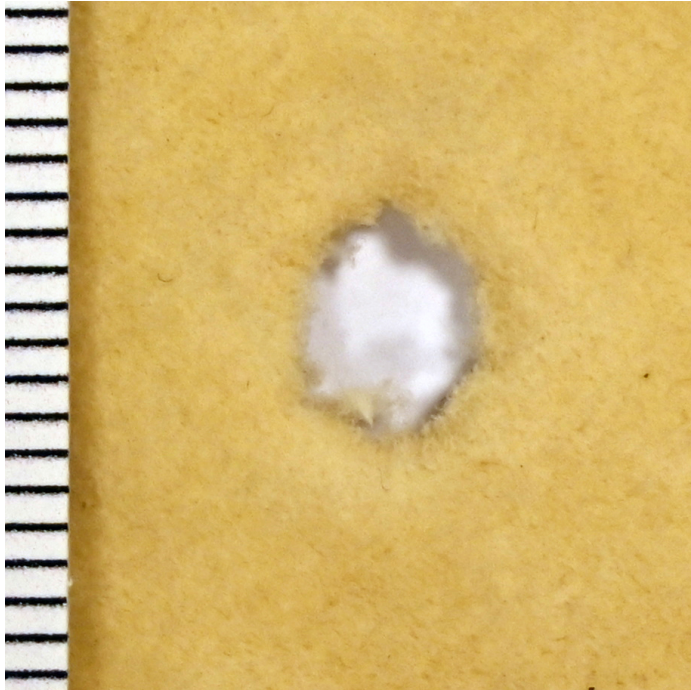
ESM-Fig. 19 Dentalsilikon Shore 70-Kunstleder-Verbund (schräger Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



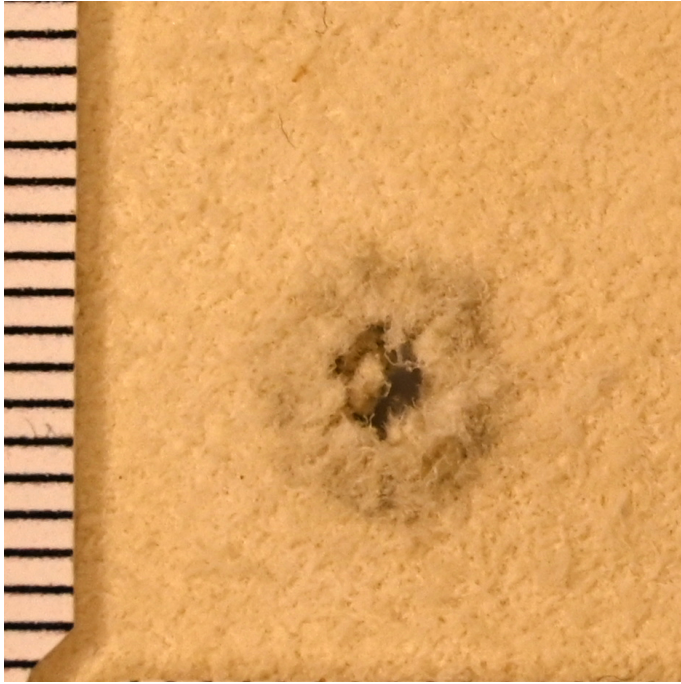
ESM-Fig. 20 Dentalsilikon Shore 70-Gamsleder-Verbund (senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



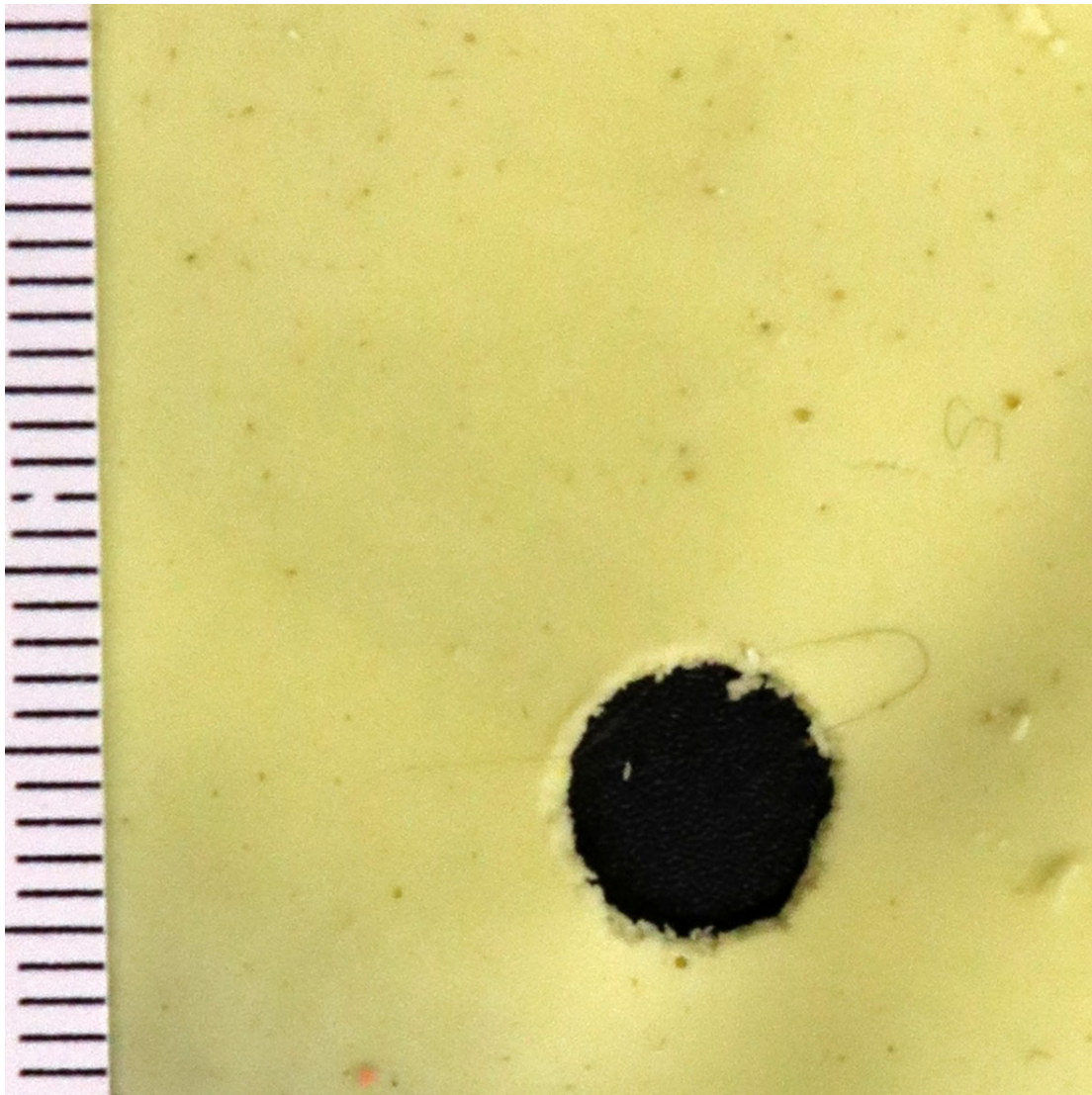
ESM-Fig. 21 Dentalsilikon Shore 22-Gamsleder (schräger Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



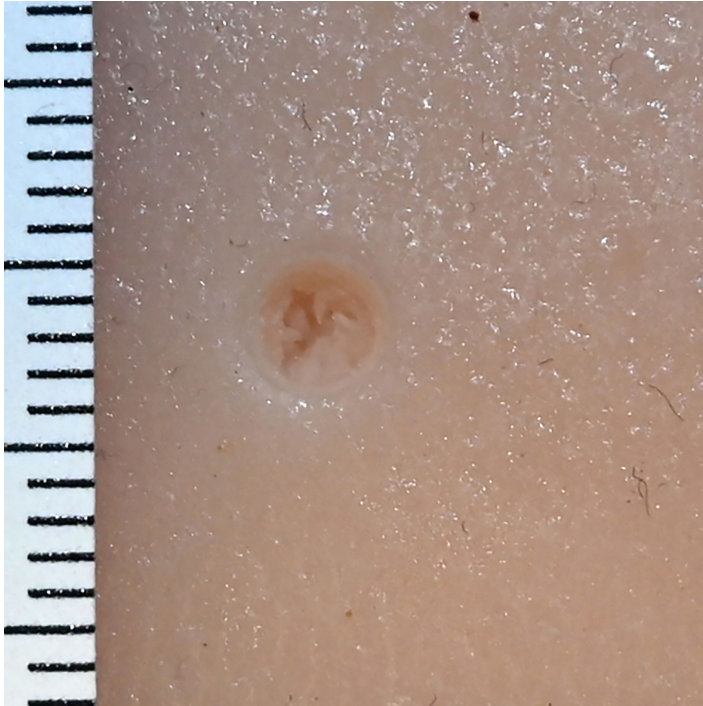
ESM-Fig. 22 Gamsleder mit Ballistol® (senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



ESM-Fig. 23 Gamsleder, unbehandelt (senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



ESM-Fig. 24 Alginat "Tropicalgin" (Schichtdicke 0,05 cm, senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)



ESM-Fig. 25 Hautnahttrainer (exemplarisch, senkrechter Schuss, 10 m Distanz), aus Fischer et al. (2024)

7. Vorabveröffentlichungen von Ergebnissen

Teile der Ergebnisse dieser Forschungsarbeit wurden am 29.04.2022 auf der Frühjahrstagung der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin in Potsdam und auf der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin am 12.09.2023 in Jena (Abstract in: 102. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin. *Rechtsmedizin* 2023; 33(4): 333) jeweils im Rahmen eines von mir gehaltenen Vortrages präsentiert.

Die Publikation mit dem Titel „Skin simulants for wound ballistic investigation – an experimental study“, welche Bestandteil der vorliegenden Dissertationsschrift ist (siehe S. 14-25), wurde am 03.04.2024 im *International Journal of Legal Medicine* unter meiner Erstautorenschaft online veröffentlicht.