



IFA Report 4/2023

Vorstudie zur Entstehung von Weichgewebe- verletzungen in Fallturmversuchen

Impressum

Herausgegeben von: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV)
Glinkastraße 40
10117 Berlin
Telefon: 030 13001-0 (Zentrale)
E-Mail: info@dguv.de
Internet: www.dguv.de

Verfasst von: Dipl.-Ing. Felicitas Lanzl und Prof. Dr. Steffen Peldschus,
Arbeitsgruppe Biomechanik und Unfallforschung am Institut für Rechtsmedizin der
Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München.

Jan Zimmermann, M.Sc.
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.

Ausgabe: September 2023

Satz und Layout: IFA

Bildnachweis: LMU/IFA

ISBN (online) 978-3-948657-61-1

ISSN: 2190-7994

Copyright: Diese Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Die Vervielfältigung, auch auszugsweise,
ist nur mit ausdrücklicher Genehmigung gestattet.

Bezug: Bei Ihrem zuständigen Unfallversicherungsträger oder unter
www.dguv.de/publikationen › Webcode: p022446

Kurzfassung

Vorstudie zur Entstehung von Weichgewebeverletzungen in Fallturmversuchen

Die Gruppe der oberflächlichen Zerreißen war 2018 mit einem Anteil von rund einem Fünftel die zweithäufigste Verletzungsart im Arbeitsbereich, im Bereich Kita und Tagespflege mit 35,8 % sogar die häufigste Verletzungsart. Dennoch ist bisher wenig zum Entstehungsmechanismus von Verletzungen des Weichgewebes bekannt. Insbesondere gibt es noch keine gesicherte Datengrundlage, anhand derer man die Verletzungsschwere abschätzen könnte. In einem zum Veröffentlichungszeitpunkt dieser Publikation laufenden Forschungsprojekt der Arbeitsgruppe Biomechanik und Unfallforschung am Institut für Rechtsmedizin der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München und des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) wird daher der Verletzungsmechanismus von Quetschrischwunden näher untersucht.

In einem Arbeitspaket des laufenden Projekts werden „Validierungsexperimente an ex vivo Weichgewebe“ durchgeführt, die bisher nicht in der Literatur verfügbar waren und für die Einordnung und Validierung benötigt werden. Die Ergebnisse einer Vorstudie zur Entstehung

von Weichgewebeverletzungen in Fallturmversuchen sind in diesem Bericht zusammengetragen.

In den entsprechenden Versuchen wurden mit vier verschiedenen Geometrien mindestens drei Proben für fünf verschiedene Gewebetypen (Haut, Fett, Muskel, Haut-Fett, Haut-Fett-Muskel) bei mindestens drei Fallhöhen untersucht, was eine Gesamtanzahl von 276 Vorversuchen ergab. Dabei wurden einzelne Proben mehrmals verwendet – wenn auch an anderen Positionen – und der Zustand (verletzt, gerissen etc.) nach jedem Versuch dokumentiert, sodass die Verletzungsentstehung und Verletzungsbilder systematisch erfasst werden konnten. Auf Basis der Ergebnisse sollen weitere Versuche durchgeführt werden.

Die vorliegende Vorstudie wurde zu dem Zweck durchgeführt, die Entstehung von Weichgewebeverletzungen abhängig von Geometrie, Gewebetyp und Energieeintrag näher zu untersuchen und die Verletzungsentstehung und -bilder systematisch zu erfassen, um eine Planung für Folgeuntersuchungen zu ermöglichen.

Abstract

Pilot study on the mechanisms of soft-tissue injuries in drop tower experiments

Superficial tearing injuries were the second most common type of workplace injury in 2018, accounting for around one fifth of injuries in that year. In the preschool and daycare sector, they were the most common type of injury and accounted for 35.8 percent of injuries. However, to date little is known about the mechanisms of soft tissue injuries. In particular, there is no verified body of data according to which the severity of the injury might be gauged. The mechanisms of contused laceration injuries are therefore being investigated more closely in a research project that is, at the time of this publication, currently being carried out by the Working Group for Biomechanics and Accident Research at the Institute of Forensic Medicine at Ludwig-Maximilians University (LMU) in Munich alongside the Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance Institutions (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, IFA).

In a work package within the project, “validation experiments on ex vivo soft tissue” are being carried out that have previously not been covered in the literature and that are necessary for injury classification and

validation. The results of a pilot study on the mechanisms of soft-tissue injuries in drop tower experiments have been compiled in this report.

In the experiments in question, at least three samples of five different tissue types (skin, fat, muscle, skin-fat and skin-fat-muscle) were examined with four different geometries and at a minimum of three different drop heights, which resulted in a total of 276 pilot experiments. Individual samples were used several times – albeit in different experiments – and the condition (injured, torn, etc.) was documented after each experiment, so that the occurrence and nature of injuries could be recorded systematically. Further experiments are to be carried out on the basis of these results.

The present pilot study was carried out for the purpose of investigating the mechanisms of soft-tissue injuries more closely in relation to geometry, tissue type and energy input and systematically recording the occurrence and nature of injuries in order to pave the way for further experiments.

Résumé

Étude préliminaire sur l'apparition des lésions des tissus mous lors d'essais en tour de chute

En 2018, la catégorie des lacérations superficielles représentait le deuxième type de blessure le plus fréquent en milieu professionnel, soit environ une sur cinq, voire le plus fréquent dans le secteur des crèches et garderies (35,8 %). Toutefois, on en sait encore peu sur le mécanisme de formation des lésions des tissus mous. À ce jour, il n'existe notamment aucune base de données fiable permettant d'évaluer la gravité de ces lésions. C'est pourquoi un projet de recherche en cours au moment de la publication de cette étude, mené par le groupe de travail Biomécanique et accidentologie de l'Institut de médecine légale de l'université Louis-et-Maximilien de Munich (LMU) et l'Institut pour la sécurité et la santé au travail de l'Assurance légale allemande contre les accidents (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, IFA), étudie plus en détail le mécanisme traumatique des lésions par écrasement.

L'un des volets du projet consiste à réaliser des « expériences de validation sur tissus mous ex vivo », qui jusqu'ici n'ont fait l'objet d'aucune publication et sont nécessaires à la classification et à la validation.

Le présent rapport compile les résultats d'une étude préliminaire sur la formation des lésions des tissus mous lors d'essais en tour de chute.

Au cours des essais correspondants, quatre géométries différentes ont été étudiées sur au moins trois échantillons de cinq types de tissus différents (peau, graisse, muscle, peau-graisse, peau-graisse-muscle), à au moins trois hauteurs de chute, soit un total de 276 essais préliminaires. Certains échantillons ont été utilisés plusieurs fois, dans d'autres positions toutefois, échantillons dont l'état (lésé, lacéré, etc.) a été documenté après chaque essai, ce qui a permis un relevé systématique de l'origine des lésions et de leurs caractéristiques. D'autres essais suivront sur la base des résultats obtenus.

La présente étude préliminaire a été menée dans le but d'étudier plus en détail la formation des lésions des tissus mous selon la géométrie, le type de tissu et la quantité d'énergie appliquée, et de recenser systématiquement l'origine et les caractéristiques des lésions, afin de permettre la planification d'examen de suivi.

Resumen

Estudio preliminar sobre el desarrollo de lesiones en tejidos blandos en ensayos con torres de caída

En 2018, el grupo de lesiones superficiales fue el segundo tipo de lesión más frecuente en el sector laboral, representando aproximadamente una quinta parte de las lesiones, mientras que, en el ámbito de guarderías y cuidados diurnos, incluso llegó a ser el tipo de lesión más frecuente, con un 35,8 % de incidencia. Sin embargo, hoy en día no se sabe mucho sobre el mecanismo de desarrollo de las lesiones en tejidos blandos. En particular, aún no existe una base de datos sólida que permita estimar con seguridad la gravedad de las lesiones. Por ello, en el marco de un proyecto de investigación del Grupo de Biomecánica e Investigación de Accidentes del Instituto de Medicina Legal de la Universidad Ludwig Maximilian (LMU) de Múnich y el Instituto de Seguridad y Salud en el Trabajo del Seguro Social Alemán de Accidentes (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, IFA), que está en curso en el momento de la publicación de este documento, se está investigando con más detalle el mecanismo de desarrollo de las lesiones causadas por aplastamiento.

En una fase de trabajo del proyecto, se están llevando a cabo «experimentos de validación en tejidos blandos ex vivo», que no estaban disponibles en la literatura

hasta ahora y que son necesarios para la clasificación y validación. En este informe, se recopilan los resultados de un estudio preliminar sobre la formación de lesiones en tejidos blandos en ensayos con torres de caída.

En los ensayos correspondientes, se examinaron al menos tres muestras de cinco tipos de tejidos diferentes (piel, grasa, músculo, piel-grasa, piel-grasa-músculo) con cuatro geometrías diferentes y al menos tres alturas de caída, lo que dio lugar a un total de 276 ensayos preliminares. En este proceso, algunas muestras se reutilizaron varias veces, aunque en diferentes posiciones, y se documentó su estado (lesionado, desgarrado, etc.) después de cada prueba, lo que permitió una captura sistemática del proceso de desarrollo y de los patrones de lesiones. En función de los resultados, se realizarán más pruebas.

El presente estudio preliminar se llevó a cabo con el propósito de seguir investigando el desarrollo de lesiones en tejidos blandos en función de la geometría, el tipo de tejido y la entrada de energía, así como para registrar sistemáticamente el desarrollo y los patrones de las lesiones con el objetivo de facilitar la planificación de investigaciones posteriores.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	8
2	Methodik	9
3	Ergebnisse – Verletzungsentstehung	12
3.1	Haut.....	12
3.2	Fettgewebe.....	13
3.3	Muskelgewebe	14
3.4	Verbund aus Haut und Fettgewebe.....	15
3.5	Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe.....	16
3.6	Zusammenfassung	17
4	Ergebnisse – Verletzungsbilder	20
4.1	Haut.....	20
4.2	Fettgewebe.....	21
4.3	Muskelgewebe	22
4.4	Verbund aus Haut und Fettgewebe.....	23
4.5	Verbund aus Haut-, Fett- und Muskelgewebe.....	25
4.6	Zusammenfassung	26
5	Ausblick	27
	Anhang A1 – Haut	29
	Anhang A2 – Fettgewebe	32
	Anhang A3 – Muskelgewebe	35
	Anhang A4 – Haut und Fettgewebe.....	38
	Anhang A5 – Haut, Fett- und Muskelgewebe.....	46
	Literatur	55
	Anhang Statistik.....	58

1 Einführung

Die Gruppe der oberflächlichen Zerreißen bildete 2018 mit rund einem Fünftel die zweithäufigste Verletzungsart im Arbeitsbereich, mit 35,8 % im Bereich Kita und Tagespflege sogar die häufigste Verletzungsart [1 bis 3]. Dennoch ist bisher wenig zum Entstehungsmechanismus von Verletzungen des Weichgewebes bekannt. Insbesondere gibt es bisher keine gesicherte Datengrundlage, anhand derer man die Verletzungsschwere abschätzen könnte.

Im Projekt „Gewinnung von Weichgewebedaten und Entwicklung eines Versagensmodells der Haut bei der Entstehung von Quetschrisswunden“ (<https://www.dguv.de/ifa/forschung/projektverzeichnis/ifa5170.jsp>) untersuchen die Arbeitsgruppe Biomechanik und Unfallforschung am Institut für Rechtsmedizin der LMU München und das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) den Verletzungsmechanismus von Quetschrisswunden. Diese beschreiben offene Verletzungen der oberflächennahen Weichgewebe und entstehen unter stumpfer Gewalteinwirkung auf den Körper, was zu einem Aufreißen der Gewebsschichten führt [4, 5]. Sie sind im Alltag häufig zu beobachten, z. B. als Folge von Stürzen, des Anpralls gegen Gegenstände oder von Unfällen im Sport- und Arbeitsbereich [6 bis 9]. Im Arbeitsumfeld bedeutet eine Quetschrisswunde eine Arbeitsunterbrechung, das Aufsuchen eines Arztes und eine bis zu mehreren Wochen andauernde vollständige Ausheilung mit der Gefahr von Entzündungen.

Innerhalb des Projektes werden in einem Arbeitspakt „Validierungsexperimente an ex vivo Weichgewebe“ durchgeführt, die bisher nicht in der Literatur verfügbar waren und für die eine Einordnung und Validierung benötigt werden. Die Ergebnisse der Vorstudie zur Entstehung von Weichgewebeverletzungen in Fallturmsuchen sind in diesem Bericht zusammengetragen.

Die fehlenden Validierungsexperimente wurden an Schweinegewebeproben durchgeführt. Der Aufbau von Schweinehaut entspricht dem Aufbau der menschlichen Haut sehr gut: Die Haut ist ebenfalls in Epidermis und Dermis gegliedert, wobei das Dickenverhältnis von Epidermis zu Dermis wie beim Menschen in etwa 1:10 beträgt [10 bis 14]. Die Mikrostruktur der Dermis, die maßgeblich die mechanischen Eigenschaften der Haut beeinflusst, entspricht der des Menschen und ist aus einer Matrix aus Proteoglykanen und Glykosaminoglykanen aufgebaut, die von einem dreidimensionalen Geflecht aus Kollagen- und Elastinfasern durchzogen wird [10, 11, 13 bis 16]. Ebenso weist die Schweinehaut ähnliche mechanische Eigenschaften auf. Sie verhält sich nicht linear, dehnratenabhängig und anisotrop bezüglich der sogenannten Langerlinien, die sowohl beim Schwein als auch beim

Menschen nachgewiesen werden konnten, und weist unterschiedliches Verhalten je nach Belastungsart (Zug, Druck, Scherung) auf [17 bis 22]. Schweinehaut wird daher in vielen experimentellen Studien zum Materialverhalten von Haut als Ersatzmodell für menschliches Gewebe verwendet [12, 18 bis 21, 23 bis 28]. Aufgrund der großen Ähnlichkeit wird das Schwein aber auch als Ersatzmodell für Wundheilungsstudien, zur Untersuchung von trockener Haut oder für Studien zur Durchlässigkeit der Haut gegenüber bestimmten Chemikalien herangezogen [11, 29, 30]. Des Weiteren sind der mikrostrukturelle Aufbau des Unterhautfettgewebes beim Schwein, der aus Adipozyten (Fettzellen) und einem Geflecht aus verschiedenen Kollagentypen besteht, sowie der mikrostrukturelle Aufbau des Muskelgewebes aus Faszien mit Muskelbündeln, die wiederum aus Myofibrillen aufgebaut sind, dem des Menschen sehr ähnlich [31 bis 37]. Auch für diese beiden Gewebetypen wird das Schwein häufig als Ersatzmodell zur experimentellen Bestimmung der Materialeigenschaften gewählt [31, 32, 34 bis 37, 39 bis 43].

Die verschiedenen Weichgewebe wurden bisher vor allem unter uniaxialem Zug und Druck sowie in Scherexperimenten untersucht [18, 19, 31, 40, 44 bis 48]. Da jedoch wenig kontrollierte Experimente unter stumpfer Gewalteinwirkung existieren, wurden hier Impaktversuche durchgeführt. Diese sind mithilfe eines Fallprüfstandes realisiert, bei dem ein Impaktor aus verschiedenen Fallhöhen auf eine Weichgewebprobe fallengelassen wird. In Vorversuchen wurden die Versuchsproben mit vier Impaktorgeometrien bei unterschiedlichen Energieniveaus getestet, um die für das Projekt relevantesten Konstellationen zu identifizieren. Hierbei wird die Fallhöhe ausgehend von einer minimalen Fallhöhe sukzessive erhöht, um das Energieniveau einzugrenzen, ab dem Verletzungen in den verschiedenen Gewebetypen entstehen. Mit den vier verschiedenen Geometrien wurden mindestens $n = 3$ Proben für fünf verschiedene Gewebetypen (Haut, Fett, Muskel, Haut-Fett, Haut-Fett-Muskel) bei mindestens drei Fallhöhen untersucht, was eine Gesamtversuchszahl von 276 Vorversuchen ergab. Dabei wurden die Probengeometrie vor und nach dem Versuch, die Impaktorbeschleunigung während des Impakts mittels eines Beschleunigungssensors sowie die Verletzung der Probe nach dem Versuch dokumentiert und ausgewertet.

Die Methodik der Untersuchung wird in Kapitel 2 ausführlicher beschrieben. Die Ergebnisse werden – sortiert nach Verletzungsentstehung und Verletzungsbild – in den Kapiteln 3 und 4 dargestellt. Im Kapitel 5 ist ein kurzer Ausblick gegeben, der wesentliche Schlussfolgerungen für weitere Untersuchungen enthält.

2 Methodik

Für die Experimente wurde am jeweiligen Versuchstag frisches Schweinegewebe aus dem Abdominalbereich des Schweins von einem lokalen Metzger (Fa. Herrmannsdorfer Landwerkstätten) geholt. Die Versuchsproben wurden mit einem Skalpell (Klingennummer 22, Fa. Bayha) zugeschnitten und präpariert. Anschließend wurden die Proben mit einer Stanze (Sonderanfertigung, Fa. Wiedemann) auf eine Größe von 5 x 5 cm gebracht. Es wurden fünf verschiedene Probentypen präpariert – isolierte Haut, isoliertes Fettgewebe, isoliertes Muskelgewebe, ein Verbund aus Haut und Fettgewebe sowie ein Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe. Die Dicke der jeweiligen Proben wurde im nativen Zustand des gelieferten Schweinegewebes belassen und nicht verändert. Vor Versuchsdurchführung wurde die Dicke der jeweiligen Proben mit Ultraschall vermessen. Hierfür wurde die Dicke der jeweiligen Gewebeschichten sowie die Gesamtdicke der Probe in zwei sich kreuzenden Messstrecken an drei Stellen längs und quer der Probenachse vermessen, wobei sich eine Messstelle jeweils im Probenzentrum und die anderen beiden Messstellen ca. 1 cm entfernt von diesem Punkt

befanden (**Abbildung 1**), d. h. die Stelle im Probenzentrum wurde in beiden Messstrecken vermessen. Aus den sechs ermittelten Werten wurde anschließend der Mittelwert gebildet. Für die Ultraschalluntersuchung wurde ein portables Ultraschallsystem (E-CUBE i7, Fa. Alpinion Medical Systems) zusammen mit einem Linearschallkopf (L3-12T, Fa. Alpinion Medical Systems) und einem Kontaktgel (Fa. SONOGEL) bei einer Frequenz von 12 kHz verwendet.

Für die Versuche wurden die Proben auf einer Stahlplatte mit den Dimensionen 10 x 10 x 2 cm unter dem Fallturm platziert. Der Fallturm bestand aus einer Plexiglasröhre, in der ein Impaktor (Sonderanfertigung, Fa. Wiedemann) reibungsfrei auf die Probe fallen gelassen werden kann. Der Impaktor selbst bestand aus einem Hohlzylinder (Außendurchmesser: 36 mm, Innendurchmesser: 12 mm, Länge: 147 mm) aus Aluminium, der mit verschiedenen Impaktorkopfgeometrien verschraubt werden kann. Für die Versuche wurden vier unterschiedliche Impaktorkopfgeometrien verwendet (**Abbildung 2**): eine flache Geometrie, eine kegelförmige Geometrie (Radius = 3 mm) und

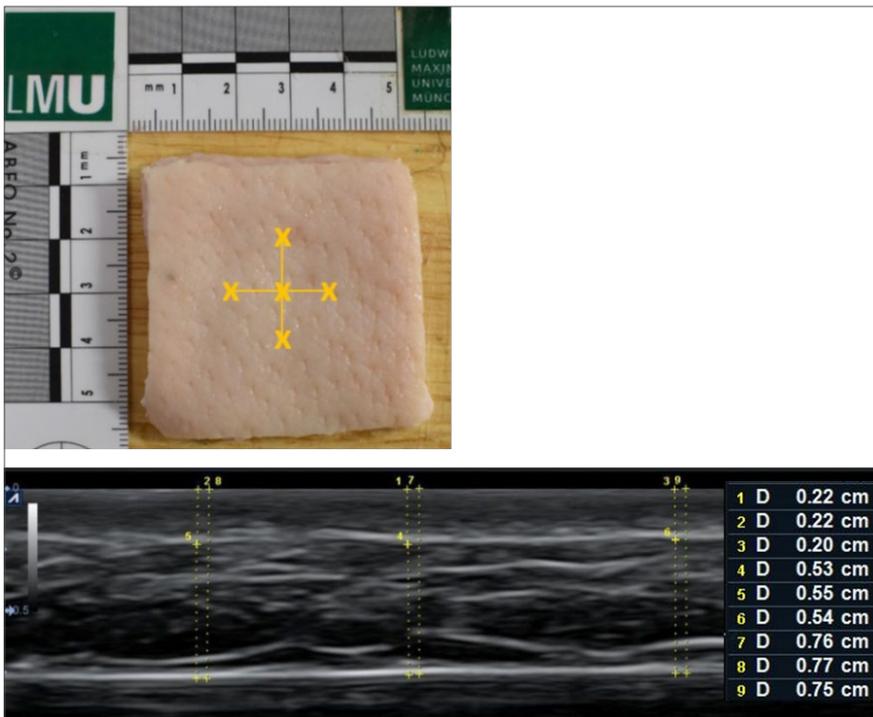


Abbildung 1:

Vermessung der Probengeometrie mittels Ultraschall. Die Probendicke wurde jeweils an zwei sich kreuzenden Messstrecken an drei Stellen längs und quer der Probenachse vermessen. Dabei befand sich eine Messstelle in der Probenmitte und die beiden anderen befanden sich ca. 1 cm links und rechts bzw. ober- und unterhalb der Probenmitte. Insgesamt wurden also sechs Stellen vermessen, wobei die Stelle in der Probenmitte aufgrund der sich überkreuzenden Messstrecken zweimal vermessen wurde (oben). Gezeigt ist eine Beispielmessung im Ultraschall einer Gewebeprobe aus Haut und subkutanem Fettgewebe in Längsrichtung. An den drei Messstellen wurden jeweils die Dicke der Haut (D1 bis D3), die Dicke des Fettgewebes (D4 bis D6) und die Gesamtdicke der Probe (D7 bis D9) vermessen (unten).



Abbildung 2:

Impaktorkopfgeometrien. Dargestellt sind die vier verschiedenen Impaktorkopfgeometrien, die in den Versuchen verwendet wurden. Von links nach rechts: eine flache Geometrie, zwei kegelförmige Geometrien mit unterschiedlich großen Radien (Radius = 55 mm bzw. Radius = 18 mm) sowie eine kegelförmige Geometrie (Radius = 3 mm).

zwei kugelförmige Geometrien mit unterschiedlich großen Radien (Radius = 18 bzw. 55 mm, im Folgenden als runde bzw. flach-runde Geometrie bezeichnet).

Insgesamt wies der Impaktor mit jeder Impaktorkopfgeometrie ein Gewicht von 0,9 kg auf. Die Fallhöhe und somit der Energieeintrag konnte für jedes Experiment stufenlos und frei wählbar eingestellt werden, da der Impaktor über einen Elektromagneten mit einem Stahlseil verbunden war. Ein Schema des Setups ist in **Abbildung 3** dargestellt.

Die Energie bzw. der Energieeintrag (E) des Impaktors lässt sich somit aus der Impaktormasse (m) und der Fallhöhe (h) bestimmen. Hierzu wird beides miteinander und mit der Fallbeschleunigung (g) multipliziert, die Formel lautet $E = m \cdot g \cdot h$ und die Maßeinheit ist Joule (J).

Während jedes Versuchs wurde die Impaktorbeschleunigung über einen Beschleunigungssensor (Messbereich von ± 500 g, Modell 352C04, Fa. PCB Piezotronics) aufgezeichnet, der im jeweiligen Impaktorkopf fest verschraubt war. Die Aufzeichnung erfolgte über einen Messverstärker (MV3001-370, Fa. IHM Messtechnik) bei einer Frequenz von 50 kHz.

Die Auswertung der Beschleunigungs-Zeit-Kurven erfolgte mit dem Programm Hypergraph (Version 2021.2, Fa. Altair). Hierzu wurden die Kurven mit einem speziellen Tiefpassfilter (SAE-J211) gefiltert. In **Abbildung 4** sind beispielhaft die verschiedenen Beschleunigungs-Zeit-Kurven für eine Hautprobe bei verschiedenen Fallhöhen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Form der Kurven ab einer Fallhöhe von 45 cm deutlich asymmetrisch wird. Dies deutet auf ein Versagen der Probe während des

Impakts hin, was auch in der Beurteilung der Probenverletzung nach Testung bestätigt werden konnte.

Nach jedem Versuch wurden die Verletzungen der Probe und der einzelnen Gewebeschichten dokumentiert. Für eine übersichtliche Auswertung der Ergebnisse erfolgte die Einteilung in die Kategorien „gerissen“ bzw. „nicht gerissen“ wie folgt: Als gerissen werden nur Proben bezeichnet, bei denen ein Durchriss durch alle Gewebeschichten erfolgte. Alle anderen Proben werden als „nicht gerissen“ bezeichnet, auch wenn einzelne Gewebeschichten beschädigt waren.

In den Vorversuchen wurden die jeweiligen Versuchsproben bei unterschiedlichen Energieniveaus getestet, wobei jede Probe mehrmals beaufschlagt wurde. Der Probenname für jeden Gewebetypen setzt sich daher aus zwei Nummern zusammen: Die erste Nummer gibt die Probennummer an, wohingegen die zweite Nummer angibt, wie oft die Probe schon beaufschlagt wurde. P1-1 bedeutet demnach Versuchsprobe 1, erster Impakt. Während der Präparation und der Versuchsdurchführung wurden die Proben regelmäßig mit 0,9 % Natriumchlorid-Lösung befeuchtet, um ein Austrocknen der Proben zu verhindern. Für die fünf verschiedenen Probentypen (Haut, Fett, Muskel, Haut-Fett, Haut-Fett-Muskel) wurden mindestens $n = 3$ Proben bei mindestens drei Fallhöhen untersucht, wobei die maximalen Fallhöhen für die verschiedenen Impaktorgeometrien folgendermaßen waren: 150 cm für die flache Geometrie, 150 cm für die flach-runde Geometrie, 140 cm für die runde Geometrie und 60 cm für die kegelförmige Geometrie. Die Versuchsmatrix ist in **Tabelle 1** dargestellt. Insgesamt wurden $k = 276$ Experimente durchgeführt.

Abbildung 3: Schema des Fallturmsetups (links) und Versuchsaufbau im Labor (rechts). Die Versuchsproben wurden auf einer Stahlplatte unter dem Fallturm platziert und mit den verschiedenen Impaktorgeometrien aus unterschiedlichen Fallhöhen und somit mit unterschiedlichen Energieeinträgen beaufschlagt.

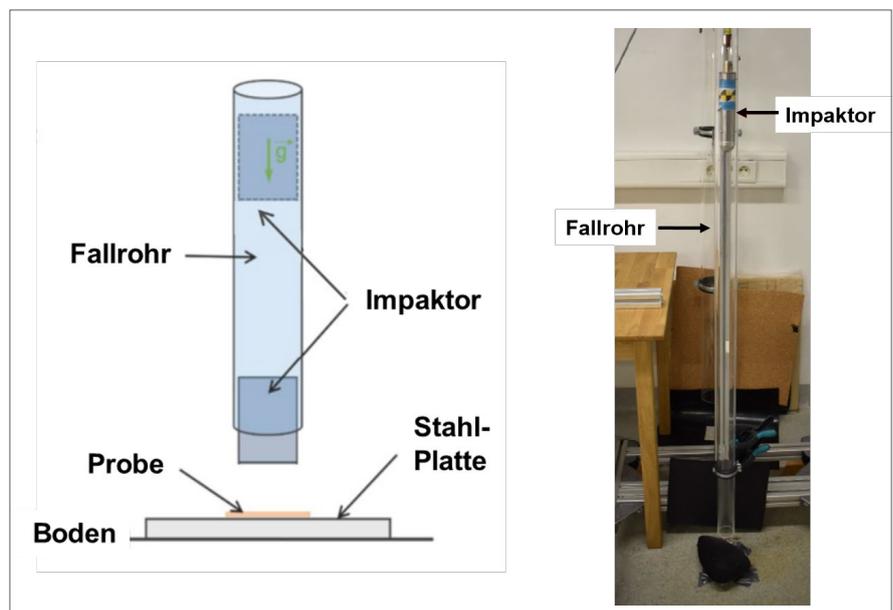
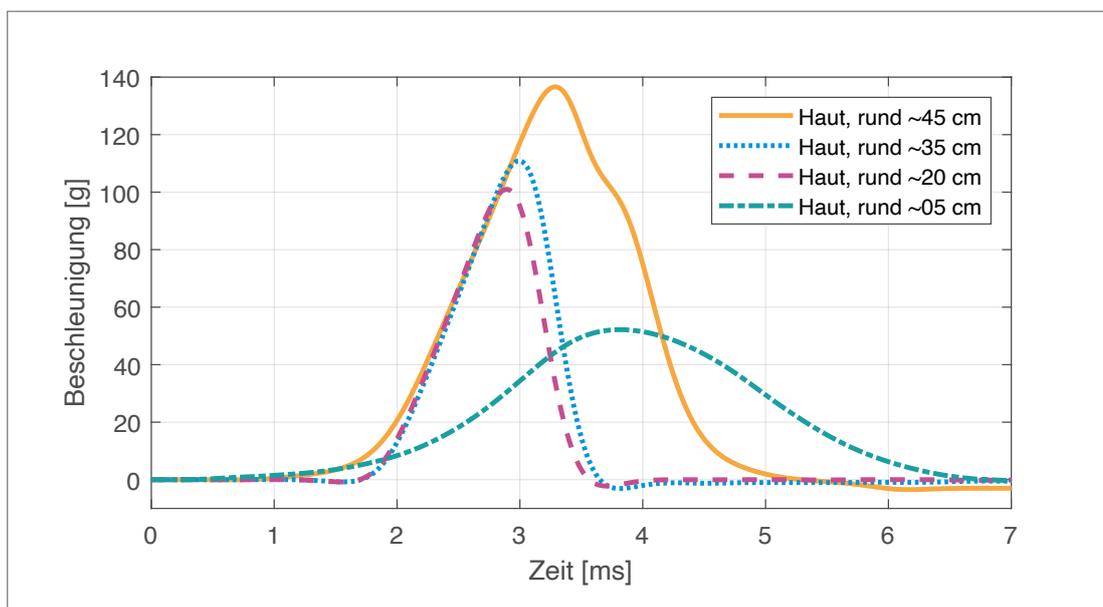


Tabelle 1:
Versuchsmatrix der Vorversuche. Dargestellt ist die Anzahl der jeweiligen Versuche für die verschiedenen Gewebetypen und Impaktorgeometrien

Probentyp	Impaktorgeometrie			
	flach	flach-rund	rund	spitz
Haut	n = 13	n = 26	n = 15	n = 9
Fettgewebe	n = 12	n = 14	n = 16	n = 10
Muskelgewebe	n = 15	n = 17	n = 16	n = 6
Haut + Fettgewebe	n = 8	n = 10	n = 23	n = 15
Haut + Fett- + Muskelgewebe	n = 14	n = 12	n = 11	n = 14
Insgesamt	k = 276			

Abbildung 4:
Beschleunigungskurven. Gezeigt sind die Beschleunigungskurven für Hautproben, die mit der runden Impaktorgeometrie bei verschiedenen Fallhöhen getestet wurden. Bei einer Fallhöhe von 45 cm ist die Kurvenform deutlich asymmetrisch, was auf ein Versagen der Versuchsprobe hindeutet.



3 Ergebnisse – Verletzungsentstehung

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Verletzungsentstehung der einzelnen Versuche für die verschiedenen Probentypen und die verschiedenen Impaktorgeometrien dargestellt.

3.1 Haut

In Tabelle A1 bis A4 (Anhang A1) sind die Ergebnisse der Versuche für die jeweilige Impaktorgeometrie für isoliertes Hautgewebe zusammengefasst. Die mittlere Dicke der jeweiligen Hautproben betrug zwischen 1,4 und 3,4 mm. Die getesteten Energieeinträge umfassten 1,77 bis 13,24 J für den flachen Impaktor, 0,44 bis 7,06 J für den flach-runden Impaktor ($r = 55 \text{ mm}$), 0,44 bis 3,09 J für den runden Impaktor ($r = 18 \text{ mm}$) und 0,18 bis 1,32 J für den

spitzen Impaktor. Zur besseren Übersicht sind ebenfalls die entsprechenden Fallhöhen angegeben. Der minimale Energieeintrag, bei dem eine Verletzung (d. h. ein komplettes Durchreißen der Haut) erzeugt wurde, betrug für den flachen Impaktor 8,83 J, für den flach-runden Impaktor 3,53 J ($r = 55 \text{ mm}$), für den runden Impaktor 1,32 J ($r = 18 \text{ mm}$) und für den spitzen Impaktor 0,88 J. Zusätzlich angegeben ist die Energie geteilt durch die jeweilige Dicke der Probe, um den Einfluss der Probendicke auf die Verletzungsentstehung abschätzen zu können.

In **Abbildung 5** ist für jede Impaktorgeometrie die Rissbildung über den Energieeintrag dargestellt, wohingegen **Abbildung 6** die Rissbildung über den Energieeintrag geteilt durch die Probendicke für jede Impaktorgeometrie

Abbildung 5: Rissbildung über den Energieeintrag für isolierte Hautproben für die verschiedenen Impaktorgeometrien. Gezeigt ist die Probenverletzung für jedes Experiment über den jeweiligen Energieeintrag (blau = kein Riss, rot = Riss). Mehrere Versuche mit demselben Ergebnis bei gleichem Energieeintrag sind durch Zahlenangaben neben den Datenpunkten gekennzeichnet. Zusätzlich kann jedem Diagramm die Gesamtanzahl der Versuche mit verletzten bzw. nicht verletzten Proben entnommen werden.

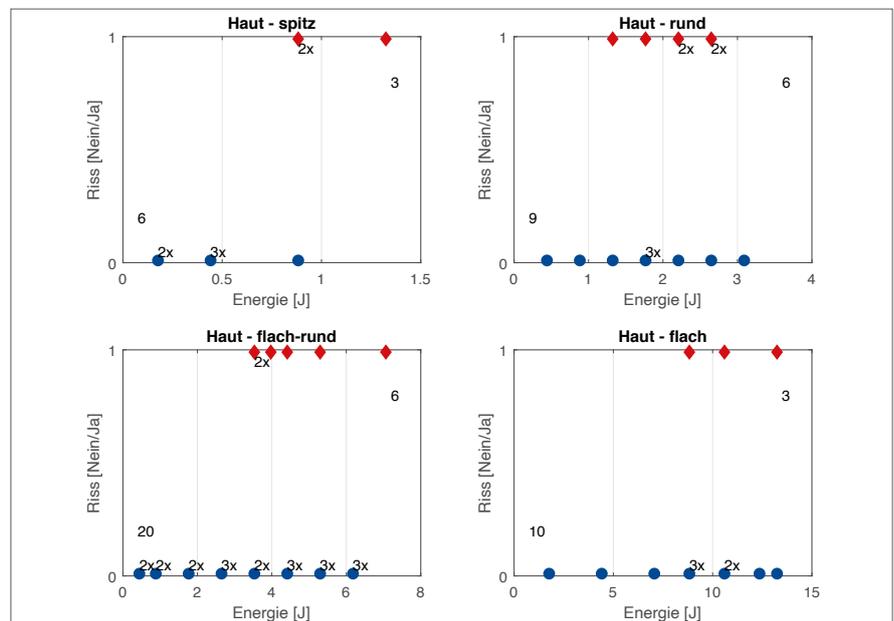
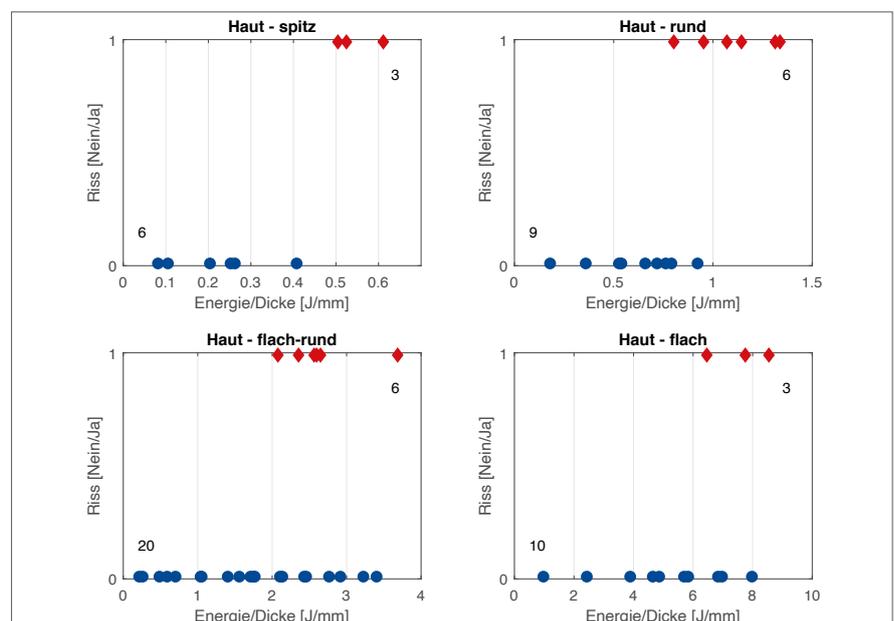


Abbildung 6: Rissbildung über den Energieeintrag normiert auf die Probendicke für isolierte Hautproben für die verschiedenen Impaktorgeometrien. Gezeigt ist die Rissbildung für jedes Experiment über den jeweiligen Energieeintrag (blau = kein Riss, rot = Riss). Zusätzlich kann jedem Diagramm die Gesamtanzahl der Versuche mit verletzten bzw. nicht verletzten Proben entnommen werden.



zeigt. Mehrere Versuche mit demselben Ergebnis bei gleichem Energieeintrag sind durch Zahlenangaben neben den Datenpunkten gekennzeichnet.

3.2 Fettgewebe

In Tabelle A5 bis A8 (Anhang A2) sind die Ergebnisse der Versuche für die jeweilige Impaktorgeometrie für isoliertes Fettgewebe zusammengefasst. Die mittlere Dicke der jeweiligen Fettproben betrug zwischen 1,9 und 7,1 mm. Die getesteten Energieeinträge umfassten 0,44 bis 4,41 J für den flachen Impaktor, 0,44 bis 4,41 J für den flach-runden Impaktor ($r = 55 \text{ mm}$), 0,18 bis 2,65 J für den runden Impaktor ($r = 18 \text{ mm}$) und 0,09 bis 0,53 J für den spitzen Impaktor. Zur besseren Übersicht sind ebenfalls

die entsprechenden Fallhöhen angegeben. Der minimale Energieeintrag, bei dem eine Verletzung erzeugt wurde, betrug 4,41 J für den flachen Impaktor, 0,88 J für den flach-runden Impaktor ($r = 55 \text{ mm}$), 0,44 J für den runden Impaktor ($r = 18 \text{ mm}$) und 0,09 J für den spitzen Impaktor. Zusätzlich angegeben ist ebenfalls die Energie geteilt durch die jeweilige Dicke der Probe, um den Einfluss der Probendicke auf die Verletzungsentstehung abschätzen zu können.

Abbildung 7 zeigt für jede Impaktorgeometrie die Rissbildung über den Energieeintrag, wohingegen in **Abbildung 8** die Rissbildung über den Energieeintrag geteilt durch die Probendicke für jede Impaktorgeometrie dargestellt ist. Mehrere Versuche mit demselben Ergebnis

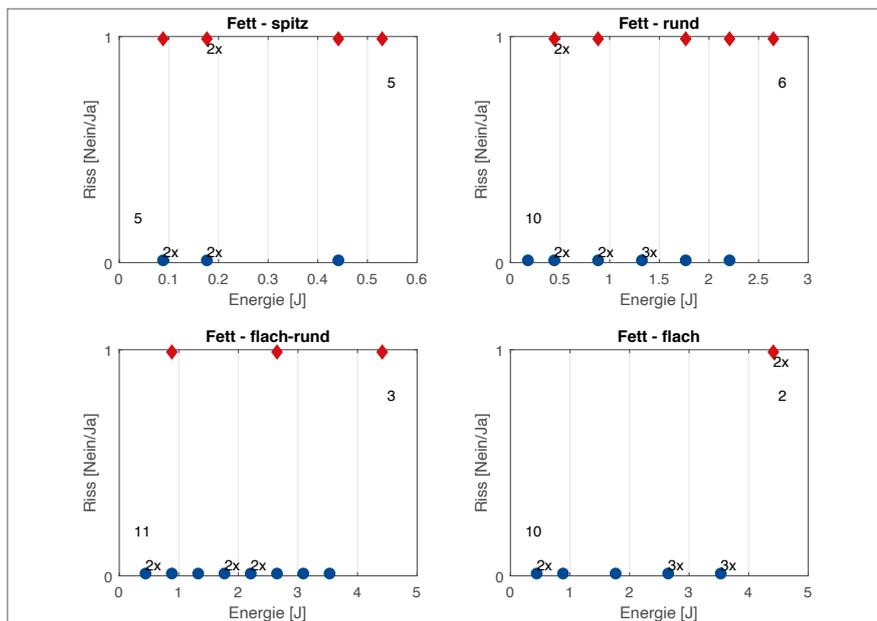


Abbildung 7: Rissbildung über den Energieeintrag für isoliertes Fettgewebe für die verschiedenen Impaktorgeometrien. Gezeigt ist die Probenverletzung für jedes Experiment über den jeweiligen Energieeintrag (blau = kein Riss, rot = Riss). Mehrere Versuche mit demselben Ergebnis bei gleichem Energieeintrag sind durch Zahlenangaben neben den Datenpunkten gekennzeichnet. Zusätzlich kann jedem Diagramm die Gesamtanzahl der Versuche mit verletzten bzw. nicht verletzten Proben entnommen werden.

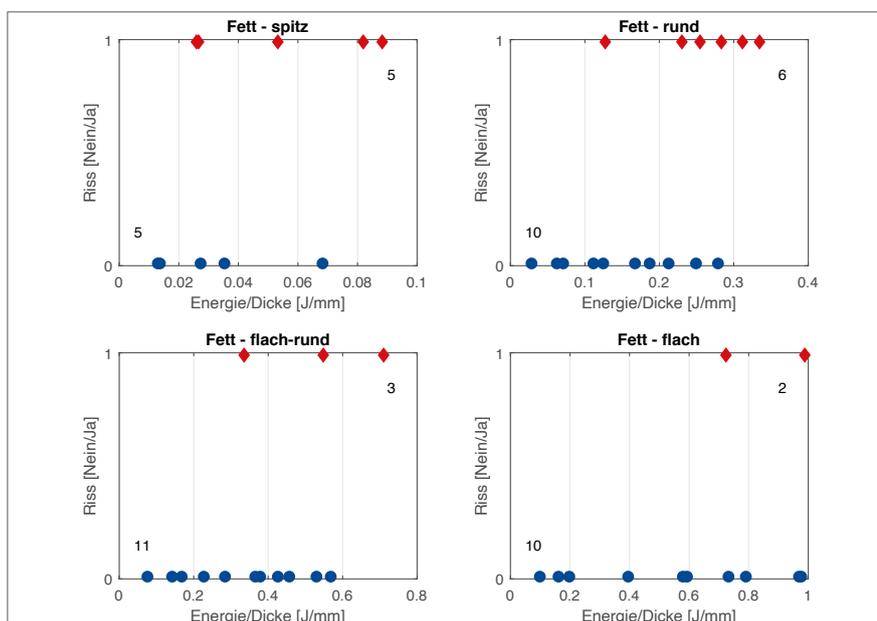


Abbildung 8: Rissbildung über den Energieeintrag normiert auf die Probendicke für isoliertes Fettgewebe für die verschiedenen Impaktorgeometrien. Gezeigt ist die Probenverletzung für jedes Experiment über den jeweiligen Energieeintrag (blau = kein Riss, rot = Riss). Zusätzlich kann jedem Diagramm die Gesamtanzahl der Versuche mit verletzten bzw. nicht verletzten Proben entnommen werden.

bei gleichem Energieeintrag sind durch Zahlenangaben neben den Datenpunkten gekennzeichnet.

3.3 Muskelgewebe

In Tabelle A9 bis A12 (Anhang A3) sind die Ergebnisse der Versuche für die jeweilige Impaktorgeometrie für isoliertes Muskelgewebe zusammengefasst. Die mittlere Dicke der jeweiligen Muskelproben betrug zwischen 4,0 und 7,1 mm. Die getesteten Energieeinträge umfassten 0,44 bis 4,41 J für den flachen Impaktor, 0,44 bis 2,65 J für den flach-runden Impaktor ($r = 55 \text{ mm}$), 0,18 bis 1,32 J für den runden Impaktor ($r = 18 \text{ mm}$) und 0,09 bis 0,44 J für den spitzen Impaktor. Zur besseren Übersicht sind ebenfalls die entsprechenden Fallhöhen angegeben. Der minimale Energieeintrag, bei dem eine Verletzung erzeugt wurde,

betrug 1,32 J für den flach-runden Impaktor ($r = 55 \text{ mm}$), 0,88 J für den runden Impaktor ($r = 18 \text{ mm}$) und 0,09 J für den spitzen Impaktor. Bei den Versuchen mit dem flachen Impaktor wurde kein kompletter Durchriss der Muskelprobe erzeugt. Zusätzlich angegeben ist ebenfalls die Energie geteilt durch die jeweilige Dicke der Probe, um den Einfluss der Probendicke auf die Verletzungsentstehung abschätzen zu können.

In **Abbildung 9** ist für jede Impaktorgeometrie die Rissbildung über den Energieeintrag gezeigt, wohingegen **Abbildung 10** für jede Impaktorgeometrie die Rissbildung über den Energieeintrag geteilt durch die Probendicke vergleicht. Mehrere Versuche mit demselben Ergebnis bei gleichem Energieeintrag sind durch Zahlenangaben neben den Datenpunkten gekennzeichnet.

Abbildung 9: Rissbildung über den Energieeintrag für isoliertes Muskelgewebe für die verschiedenen Impaktorgeometrien. Gezeigt ist die Probenverletzung für jedes Experiment über den jeweiligen Energieeintrag (blau = kein Riss, rot = Riss). Mehrere Versuche mit demselben Ergebnis bei gleichem Energieeintrag sind durch Zahlenangaben neben den Datenpunkten gekennzeichnet. Zusätzlich kann jedem Diagramm die Gesamtanzahl der Versuche mit verletzten bzw. nicht verletzten Proben entnommen werden.

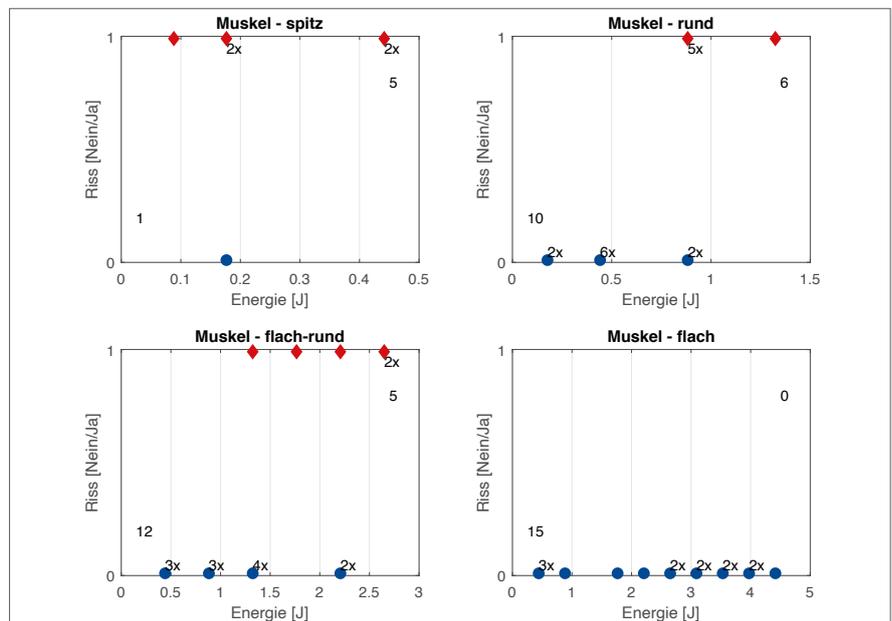
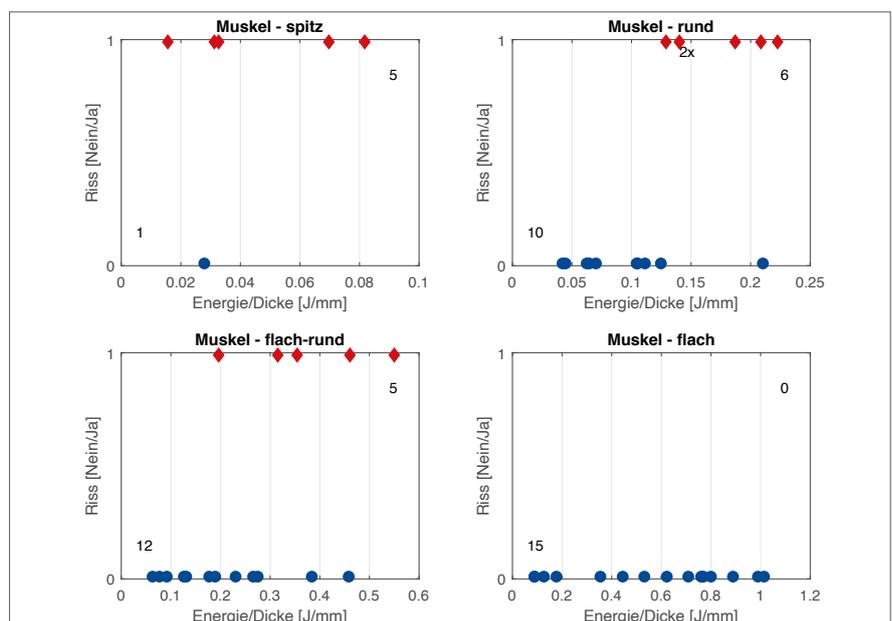


Abbildung 10: Rissbildung über den Energieeintrag normiert auf die Probendicke für isoliertes Muskelgewebe für die verschiedenen Impaktorgeometrien. Gezeigt ist die Probenverletzung für jedes Experiment über den jeweiligen Energieeintrag (blau = kein Riss, rot = Riss). Zusätzlich kann jedem Diagramm die Gesamtanzahl der Versuche mit verletzten bzw. nicht verletzten Proben entnommen werden.



3.4 Verbund aus Haut und Fettgewebe

In Tabelle A13 bis A16 (Anhang A4) sind die Ergebnisse der Versuche für die jeweilige Impaktorgeometrie für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe zusammengefasst. Tabelle A17 bis A20 bzw. Tabelle A21 bis A24 (Anhang A4) gliedern die Ergebnisse bezogen auf die Dicke der Haut bzw. die Dicke der Fettschicht auf. Die mittlere Gesamtdicke der jeweiligen Proben betrug 5,9 bis 9,9 mm, die mittlere Hautdicke 1,2 bis 3,3 mm und die mittlere Fettdicke 4,4 bis 7,6 mm. Die getesteten Energieeinträge umfassten 0,88 bis 13,24 J für den flachen Impaktor, 0,44 bis 7,06 J für den flach-runden Impaktor ($r = 55$ mm), 0,4 bis 8,83 J für den runden Impaktor ($r = 18$ mm) und 0,44 bis 3,97 J für den spitzen Impaktor. Zur besseren Übersicht sind ebenfalls die entsprechenden Fallhöhen angegeben.

Der minimale Energieeintrag, bei dem eine Verletzung erzeugt wurde, betrug 6,18 J für den runden Impaktor ($r = 18$ mm) und 1,77 J für den spitzen Impaktor. Bei den Versuchen mit dem flachen Impaktor und dem flach-runden Impaktor ($r = 55$ mm) wurde kein kompletter Durchriss der Versuchsproben erzeugt. Zusätzlich angegeben ist die Energie geteilt durch die jeweilige Gesamtdicke der Probe. Ebenfalls ist die Energie geteilt durch die Dicke der Haut, sowie geteilt durch die Dicke der Fettschicht angegeben. Somit kann der Einfluss der Probendicke und der Dicke der einzelnen Gewebeschichten auf die Verletzungsentstehung abgeschätzt werden.

Abbildung 11 vergleicht für jede Impaktorgeometrie die Rissbildung über den Energieeintrag, wohingegen in **Abbildung 12** für jede Impaktorgeometrie die Rissbildung

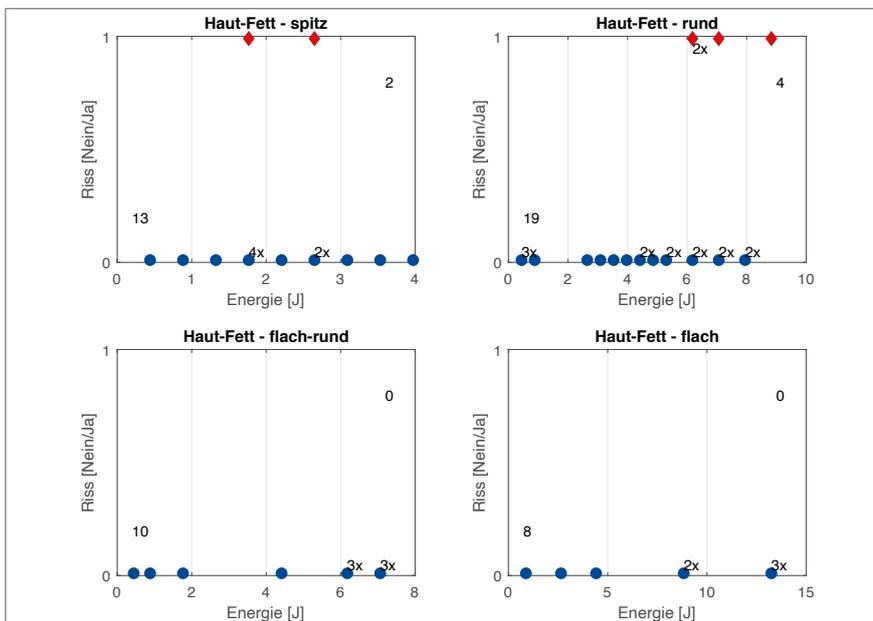


Abbildung 11: Rissbildung über den Energieeintrag für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe für die verschiedenen Impaktorgeometrien. Gezeigt ist die Probenverletzung für jedes Experiment über den jeweiligen Energieeintrag (blau = kein Riss, rot = Riss). Mehrere Versuche mit demselben Ergebnis bei gleichem Energieeintrag sind durch Zahlenangaben neben den Datenpunkten gekennzeichnet. Zusätzlich kann jedem Diagramm die Gesamtanzahl der Versuche mit verletzten bzw. nicht verletzten Proben entnommen werden.

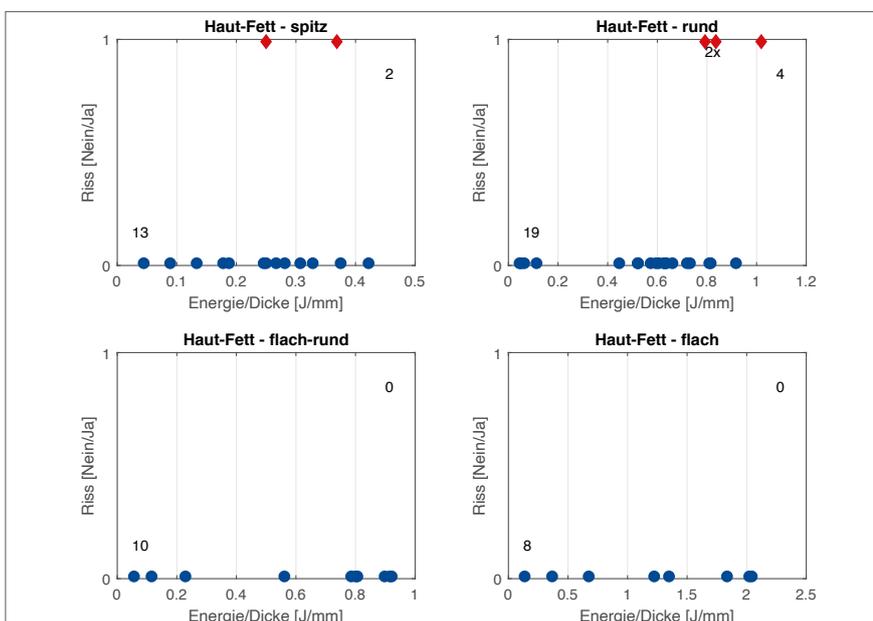


Abbildung 12: Rissbildung über den Energieeintrag normiert auf die gesamte Probendicke für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe für die verschiedenen Impaktorgeometrien. Gezeigt ist die Rissbildung für jedes Experiment über den jeweiligen Energieeintrag (blau = kein Riss, rot = Riss). Mehrere Versuche mit demselben Ergebnis bei gleichem Energieeintrag sind durch Zahlenangaben neben den Datenpunkten gekennzeichnet. Zusätzlich kann jedem Diagramm die Gesamtanzahl der Versuche mit verletzten bzw. nicht verletzten Proben entnommen werden.

über den Energieeintrag geteilt durch die Gesamtdicke der Probe dargestellt ist. Für die runde Impaktorgeometrie ($r = 18 \text{ mm}$) und die spitze Impaktorgeometrie ist in **Abbildung 13** die Rissbildung über den Energieeintrag geteilt durch die Hautdicke der Probe dargestellt, in **Abbildung 14** die Rissbildung über den Energieeintrag geteilt durch die Dicke der Fettschicht der jeweiligen Probe. Mehrere Versuche mit demselben Ergebnis bei gleichem Energieeintrag sind durch Zahlenangaben neben den Datenpunkten gekennzeichnet.

3.5 Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe

In Tabelle A25 bis A28 (Anhang A5) sind die Ergebnisse der Versuche für die jeweilige Impaktorgeometrie für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe zusammengefasst. Tabelle A29 bis A32, Tabelle A33 bis A36 und Tabelle A37 bis A40 (Anhang A5) gliedern die Ergebnisse bezogen auf die Dicke der Haut bzw. die Dicke der Fett-

schicht bzw. die Dicke der Muskelschicht auf. Die mittlere Gesamtdicke der jeweiligen Proben betrug zwischen 12,3 und 18,2 mm, die mittlere Hautdicke zwischen 1,2 und 2,3 mm, die mittlere Fettdicke zwischen 3,1 und 9,5 mm sowie die mittlere Muskeldicke zwischen 4,2 und 13,8 mm. Die getesteten Energieeinträge umfassten 0,44 bis 13,24 J für den flachen Impaktor, 0,44 bis 13,24 J für den flach-runden Impaktor ($r = 55 \text{ mm}$), 0,44 bis 12,36 J für den runden Impaktor ($r = 18 \text{ mm}$) und 0,44 bis 5,30 J für den spitzen Impaktor. Zur besseren Übersicht sind ebenfalls die entsprechenden Fallhöhen angegeben. Der minimale Energieeintrag, bei dem eine Verletzung erzeugt wurde, betrug 12,36 J für den runden Impaktor ($r = 18 \text{ mm}$) und 3,53 J für den spitzen Impaktor. Bei den Versuchen mit dem flachen Impaktor und dem flachrunden Impaktor ($r = 55 \text{ mm}$) wurde kein kompletter Durchriss der Versuchsproben erzeugt. Zusätzlich angegeben ist die Energie geteilt durch die jeweilige Gesamtdicke der Probe. Ebenfalls ist die Energie geteilt durch die Dicke der Haut und geteilt durch die Dicke der Fettschicht sowie

Abbildung 13:

Rissbildung über den Energieeintrag normiert auf die Hautdicke für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe für die spitze und die runde Impaktorgeometrie. Gezeigt ist die Probenverletzung für jedes Experiment über den jeweiligen Energieeintrag (blau = kein Riss, rot = Riss). Mehrere Versuche mit demselben Ergebnis bei gleichem Energieeintrag sind durch Zahlenangaben neben den Datenpunkten gekennzeichnet. Zusätzlich kann jedem Diagramm die Gesamtanzahl der Versuche mit verletzten bzw. nicht verletzten Proben entnommen werden.

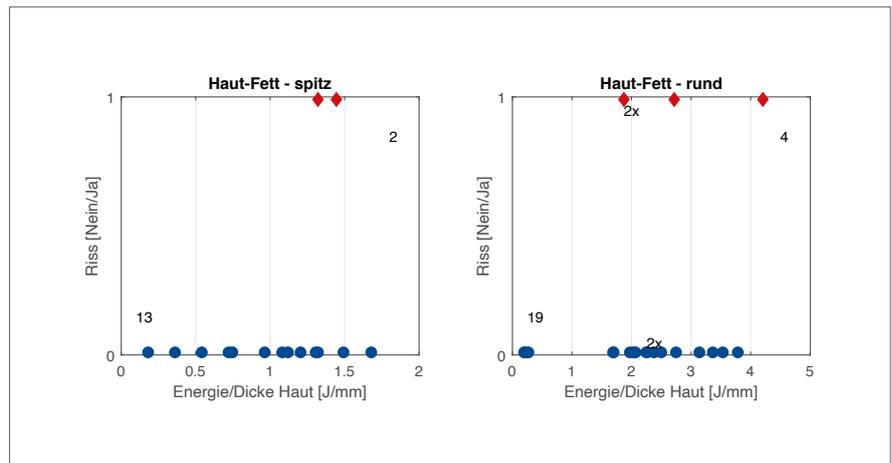
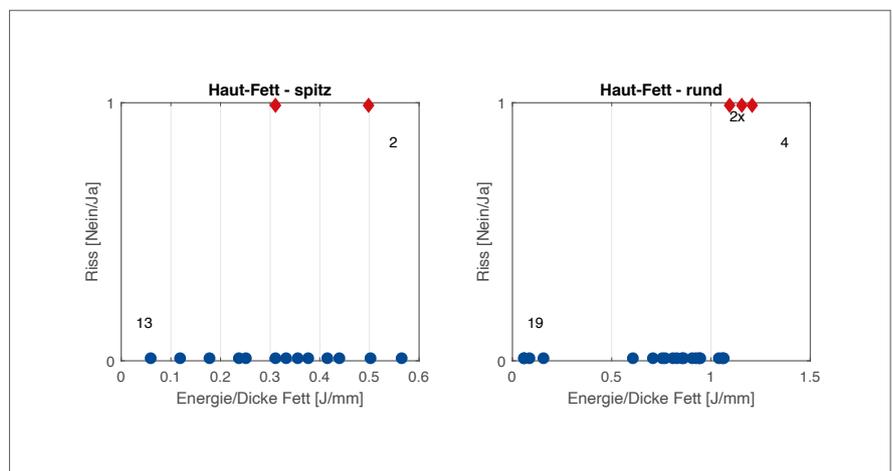


Abbildung 14:

Rissbildung über den Energieeintrag normiert auf die Fettdicke für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe für die spitze und die runde Impaktorgeometrie. Gezeigt ist die Probenverletzung für jedes Experiment über den jeweiligen Energieeintrag (blau = kein Riss, rot = Riss). Mehrere Versuche mit demselben Ergebnis bei gleichem Energieeintrag sind durch Zahlenangaben neben den Datenpunkten gekennzeichnet. Zusätzlich kann jedem Diagramm die Gesamtanzahl der Versuche mit verletzten bzw. nicht verletzten Proben entnommen werden.



geteilt durch die Dicke der Muskelschicht angegeben. Somit kann der Einfluss der Probendicke und der Dicke der einzelnen Gewebeschichten auf die Verletzungsentstehung abgeschätzt werden.

In **Abbildung 15** ist für jede Impaktorgeometrie die Rissbildung über den Energieeintrag dargestellt, wohingegen **Abbildung 16** für jede Impaktorgeometrie die Rissbildung über den Energieeintrag geteilt durch die Gesamtdicke der Probe zeigt. **Abbildung 17** vergleicht für die spitze Impaktorgeometrie den Energieeintrag normiert auf die jeweilige Gesamtdicke der Probe, die jeweilige Hautdicke der Probe, die jeweilige Fettdicke der Probe und die jeweilige Muskeldicke der Probe. Mehrere Versuche mit

demselben Ergebnis bei gleichem Energieeintrag sind durch Zahlenangaben neben den Datenpunkten gekennzeichnet.

3.6 Zusammenfassung

Tabelle 2 fasst nochmals die minimalen Energieeinträge zur Erzeugung eines kompletten Durchrisses für jeden Probentyp und jede Impaktorgeometrie zusammen. Für beinahe jede Kombination aus Gewebetyp und Impaktorgeometrie konnte ein kompletter Durchriss erzeugt werden. Es ist zu erkennen, dass die minimale Energie, die zur Erzeugung eines kompletten Durchrisses nötig ist, mit abnehmendem Impaktorradius ebenfalls abnimmt.

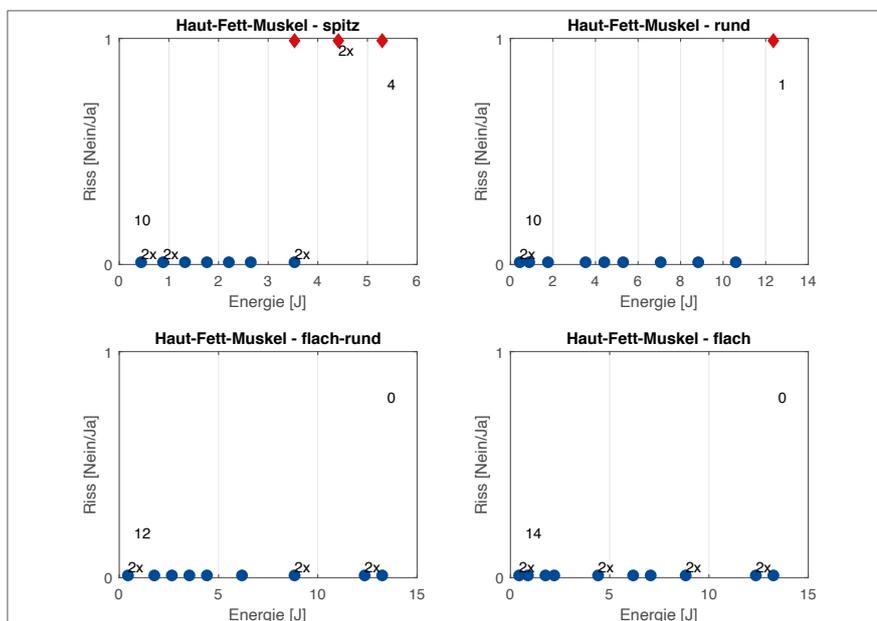


Abbildung 15: Rissbildung über den Energieeintrag für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe für die verschiedenen Impaktorgeometrien. Gezeigt ist die Probenverletzung für jedes Experiment über den jeweiligen Energieeintrag (blau = kein Riss, rot = Riss). Mehrere Versuche mit demselben Ergebnis bei gleichem Energieeintrag sind durch Zahlenangaben neben den Datenpunkten gekennzeichnet. Zusätzlich kann jedem Diagramm die Gesamtanzahl der Versuche mit verletzten bzw. nicht verletzten Proben entnommen werden.

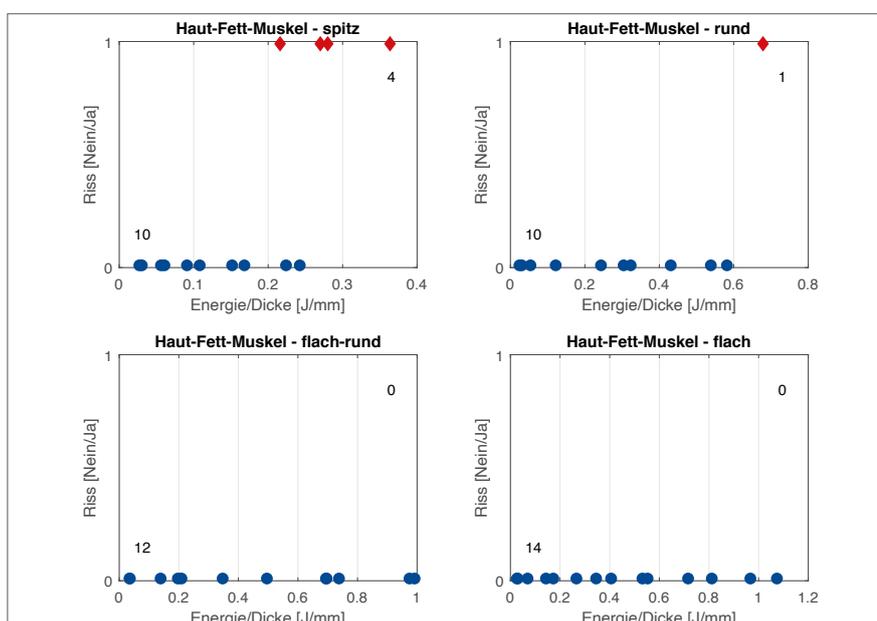


Abbildung 16: Rissbildung über den Energieeintrag normiert auf die gesamte Probendicke für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe für die verschiedenen Impaktorgeometrien. Gezeigt ist die Probenverletzung für jedes Experiment über den jeweiligen Energieeintrag (blau = kein Riss, rot = Riss). Mehrere Versuche mit demselben Ergebnis bei gleichem Energieeintrag sind durch Zahlenangaben neben den Datenpunkten gekennzeichnet. Zusätzlich kann jedem Diagramm die Gesamtanzahl der Versuche mit verletzten bzw. nicht verletzten Proben entnommen werden.

Betrachtet man ausschließlich die isolierten Gewebeschichten, so war am meisten Energie nötig, um einen Riss in der Haut zu erzeugen. Die geringsten Energien zur Erzeugung eines Durchrisses wies das isolierte Fettgewebe auf. Für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe bzw. einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe wurde im Vergleich eine höhere Energie zur Erzeugung eines kompletten Durchrisses benötigt, was wahrscheinlich mit der größeren Dicke gegenüber den isolierten Gewebeschichten zu erklären ist. In **Abbildung 18** wird die Rissbildung über den Energieeintrag am Beispiel der runden Impaktorgeometrie für jeden Gewebetyp verglichen.

Ein Vergleich der Diagramme zur Verletzungsentstehung über den Energieeintrag mit denen zur Verletzungsentstehung über den auf die Probendicke normierten Energieeintrag zeigt, dass die Probendicke für die Verletzungsentstehung eine Rolle spielt. In **Tabelle 3** sind

daher nochmals die minimalen Energieeinträge zur Erzeugung eines kompletten Durchrisses normiert auf die Gesamtdicke der Probe für jeden Probentyp und jede Impaktorgeometrie zusammengefasst. Betrachtet man diese Ergebnisse, so ist zu erkennen, dass für die auf die Probendicke normierte Energie isolierte Haut den größten Widerstand gegen Risserzeugung aufzuweisen scheint. Fett- und Muskelgewebe weisen einen weitaus geringeren Widerstand auf, befinden sich jedoch beide in einem ähnlichen Bereich. Der Widerstand für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe bzw. einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe liegt für die runde Impaktorgeometrie in einem ähnlichen Bereich wie für isolierte Haut – für den spitzen Impaktor jedoch fast um die Hälfte darunter. Inwiefern die Dicke der einzelnen Schichten gegenüber der Gesamtdicke bei den Verbundproben die Verletzungsentstehung beeinflusst, kann auf Basis der Ergebnisse der Vorversuche noch nicht abschließend geklärt werden.

Tabelle 2:

Minimale Energieeinträge zur Risserzeugung. Dargestellt ist jeweils der minimale Energieeintrag zur Erzeugung eines kompletten Durchrisses für alle Probentypen und alle Impaktorgeometrien

Probentyp	Impaktorgeometrie			
	flach [Joule]	flach-rund [Joule]	rund [Joule]	spitz [Joule]
Haut	8,83	3,53	1,32	0,88
Fettgewebe	4,41	0,88	0,44	0,09
Muskelgewebe	-	1,32	0,88	0,09
Haut + Fettgewebe	-	-	6,18	1,77
Haut + Fett- + Muskelgewebe	-	-	12,36	3,53

Tabelle 3:

Minimale Energieeinträge normiert auf die Gesamtdicke der Probe zur Risserzeugung. Dargestellt ist jeweils der minimale Energieeintrag zur Erzeugung eines kompletten Durchrisses normiert auf die Gesamtdicke der Probe für alle Probentypen und alle Impaktorgeometrien

Probentyp	Impaktorgeometrie			
	flach [Joule/mm]	flach-rund [Joule/mm]	rund [Joule/mm]	spitz [Joule/mm]
Haut	6,46	2,08	0,80	0,50
Fettgewebe	0,72	0,34	0,13	0,03
Muskelgewebe	-	0,20	0,13	0,02
Haut + Fettgewebe	-	-	0,79	0,25
Haut + Fett- + Muskelgewebe	-	-	0,68	0,22

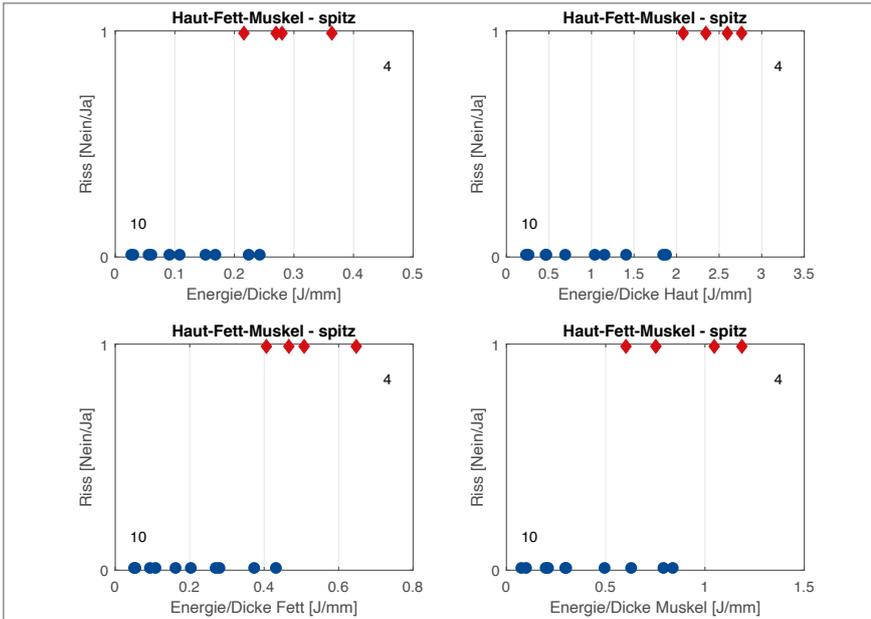


Abbildung 17: Rissbildung über den Energieeintrag normiert auf die Gesamtdicke, die Hautdicke, die Fettdicke sowie die Muskeldicke für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe für die spitze Impaktorgeometrie. Gezeigt ist die Probenverletzung für jedes Experiment über den jeweiligen Energieeintrag (blau = kein Riss, rot = Riss). Zusätzlich kann jedem Diagramm die Gesamtanzahl der Versuche mit verletzten bzw. nicht verletzten Proben entnommen werden.

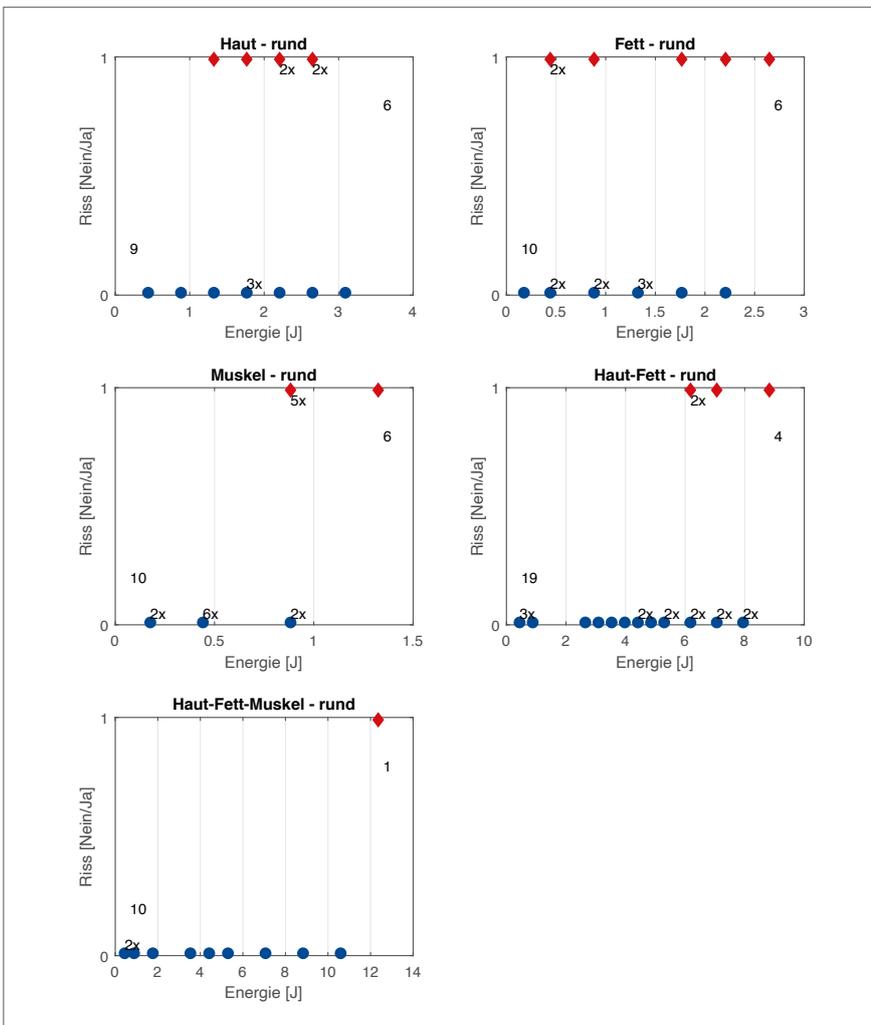


Abbildung 18: Rissbildung über den Energieeintrag für jeden Gewebetyp für die runde Impaktorgeometrie. Gezeigt ist die Probenverletzung für jedes Experiment über den jeweiligen Energieeintrag (blau = kein Riss, rot = Riss). Mehrere Versuche mit demselben Ergebnis bei gleichem Energieeintrag sind durch Zahlenangaben neben den Datenpunkten gekennzeichnet. Zusätzlich kann jedem Diagramm die Gesamtanzahl der Versuche mit verletzten bzw. nicht verletzten Proben entnommen werden.

4 Ergebnisse – Verletzungsbilder

Im Folgenden werden typische Verletzungsbilder der Versuche für die verschiedenen Probenarten sowie die verschiedenen Impaktorgeometrien dargestellt.

4.1 Haut

In den nachfolgenden Abbildungen sind verschiedene Verletzungsgrade der Versuchsproben nach dem Impakt jeweils für alle Impaktorgeometrien dargestellt. **Abbildung 19** zeigt Proben, bei denen makroskopisch keine Verletzung erkennbar war. **Abbildung 20** zeigt Proben, bei denen eine Beschädigung erkennbar war, die jedoch nicht vollständig gerissen waren. **Abbildung 21** zeigt Proben, die nach Testung einen Riss über die gesamte Probendicke aufwiesen.

Je nach Impaktorgeometrie konnten verschiedene Wundformen beobachtet werden. Weder mit der flachen noch mit der spitzen Geometrie konnten Verletzungen erzeugt werden, die einer realen Quetschrisse ähneln. Bei der flachen Geometrie wurde das Gewebe im Impaktbereich stark komprimiert, kleinere Risse entstanden im Kantenbereich des Impaktors. Mit der spitzen Geometrie wurden sehr lokale, eher kreisförmige Beschädigungen induziert. Mit der runden bzw. flach-runden Impaktorgeometrie hingegen konnten aufklaffende Risse mit einer

Abbildung 20: Hautproben mit Beschädigung nach Impakt für alle Impaktorgeometrien. Die Abbildung zeigt Hautproben, bei denen nach Testung eine Beschädigung erkennbar war, die jedoch keinen Riss über die komplette Probendicke aufwiesen.

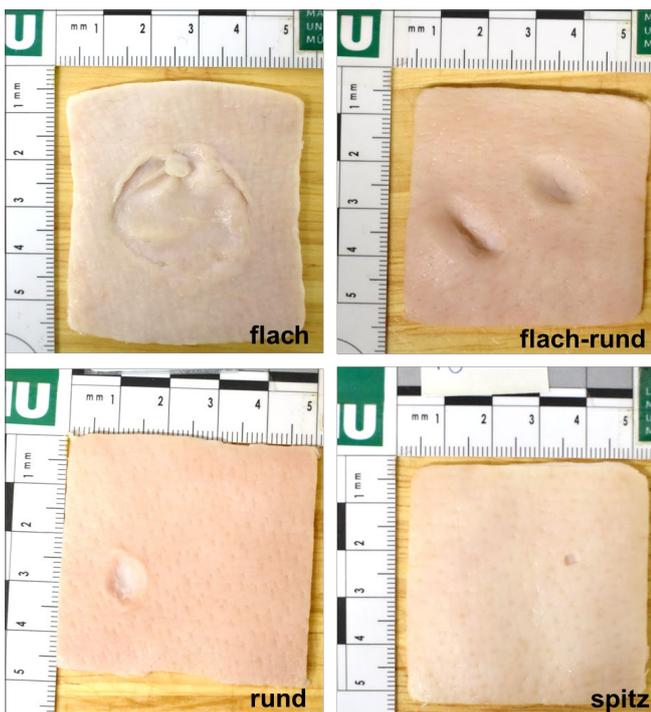


Abbildung 19: Hautproben ohne Beschädigung nach Impakt für alle Impaktorgeometrien. Die Abbildung zeigt Hautproben, bei denen nach Testung makroskopisch keine Beschädigung erkennbar war.

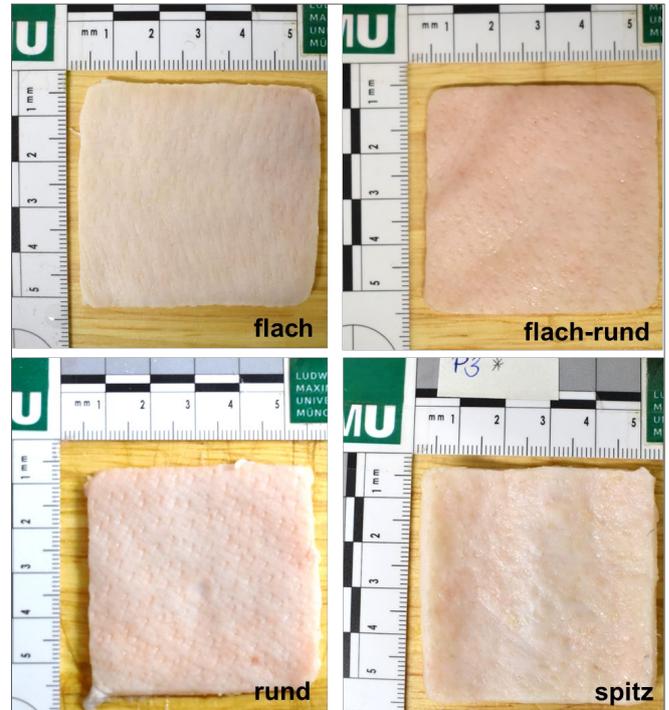


Abbildung 21: Hautproben mit Riss nach Impakt für alle Impaktorgeometrien. Nach Testung konnte ein Riss über die komplette Hautdicke beobachtet werden. Für die flache Impaktorgeometrie ist zusätzlich eine Nahaufnahme der Beschädigung gezeigt, in der der Riss besser zu erkennen ist.

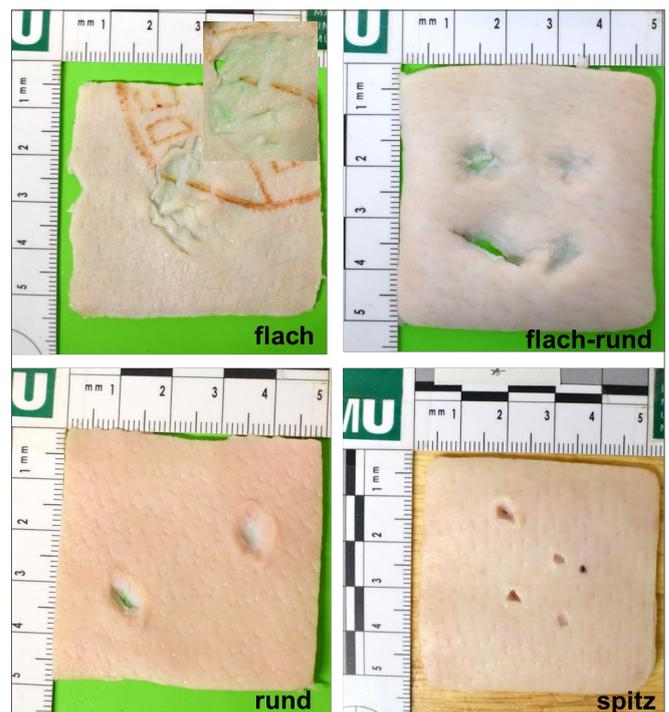


Abbildung 22:

Fettgewebeproben ohne Beschädigung nach Impact. Nach Testung war makroskopisch keine Beschädigung erkennbar. Für die spitze Impaktorgeometrie konnte jedoch auch bei der geringsten Fallhöhe eine leichte Beschädigung der Versuchsproben beobachtet werden (Impactstelle in gelbem Kreis).

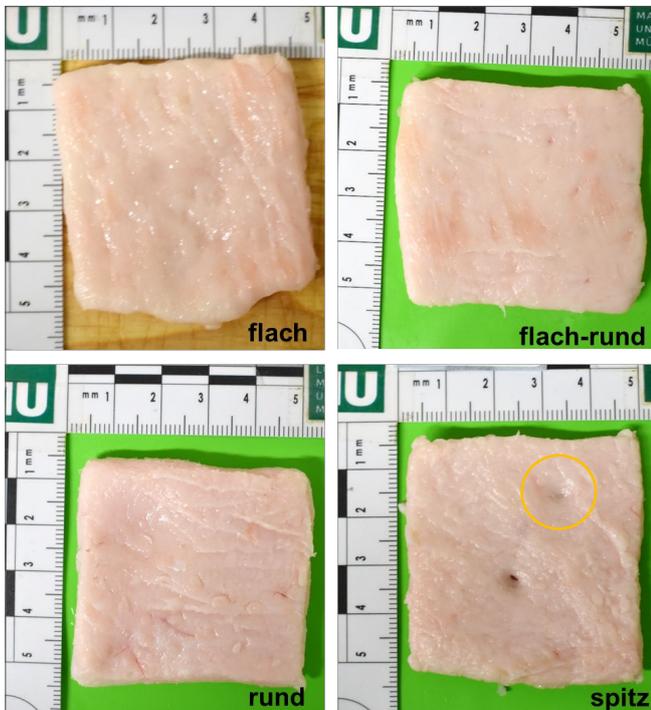
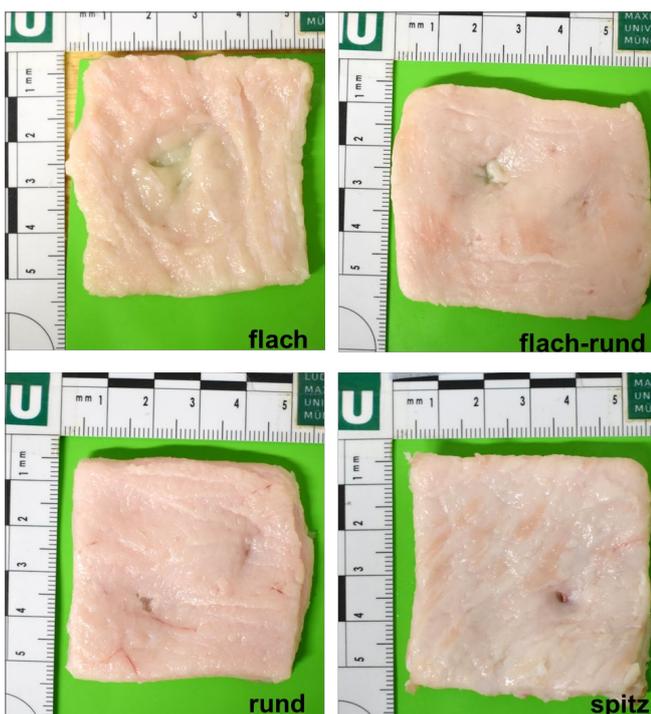


Abbildung 23:

Fettgewebeproben mit Beschädigung nach Impact für alle Impaktorgeometrien. Nach Testung war eine Beschädigung erkennbar, die jedoch keinen Riss über die komplette Probendicke aufwies.



länglichen Form erzeugt werden, die irreguläre Wundränder sowie Gewebsbrücken innerhalb der Verletzung aufwies, was einer realen Quetschrisse ähnlich ist [49].

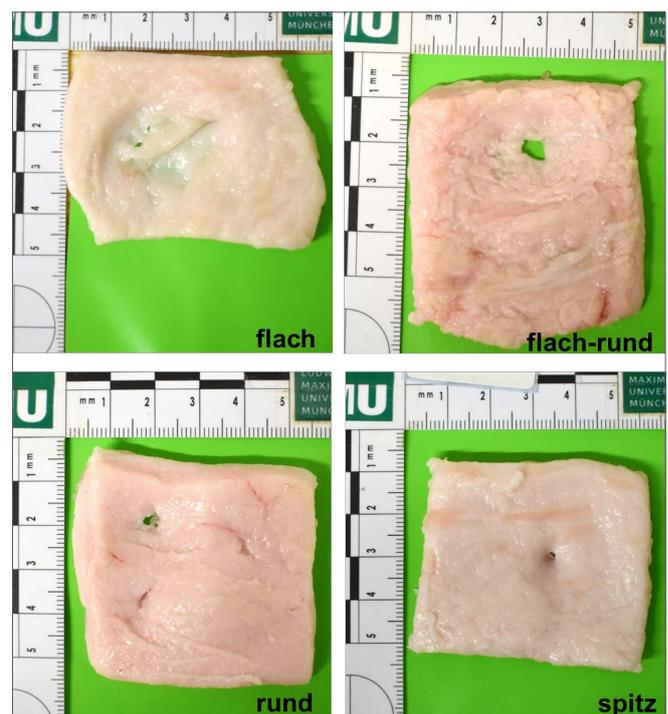
4.2 Fettgewebe

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen verschiedene Verletzungsgrade der Versuchsproben nach dem Impact jeweils für alle Impaktorgeometrien. In **Abbildung 22** sind für die flache, die flach-runde sowie die runde Impaktorgeometrie Proben dargestellt, bei denen makroskopisch keine Verletzung erkennbar war. Für die spitze Impaktorgeometrie konnte jedoch auch bei der geringsten Fallhöhe bereits eine Beschädigung des Fettgewebes beobachtet werden, wie in **Abbildung 22** ersichtlich wird. **Abbildung 23** zeigt Proben, bei denen eine Beschädigung erkennbar war, die jedoch nicht vollständig gerissen waren. In **Abbildung 24** sind Proben dargestellt, die nach Testung einen Riss über die gesamte Probendicke aufwiesen.

Die verschiedenen Impaktorgeometrien erzeugten unterschiedliche Verletzungsformen im Fettgewebe. Während die flache Impaktorgeometrie einen Abdruck des Impaktors im Fettgewebe an der Impactstelle erzeugte, konnten bei der spitzen Impaktorgeometrie lokale, kreisförmige

Abbildung 24:

Fettgewebeproben mit Riss nach Impact für alle Impaktorgeometrien. Die Abbildung zeigt Fettgewebeproben, bei denen nach Testung ein Riss über die komplette Fettstärke beobachtet werden konnte.



Verletzungen des Fettgewebes beobachtet werden. Die flache bzw. flach-runde Impaktorgeometrie erzeugte kraterförmige Abdrücke an der Impaktstelle mit kreisförmigen Verletzungen bei den Proben, die einen kompletten Durchriss aufwiesen.

4.3 Muskelgewebe

In den nachfolgenden Abbildungen sind verschiedene Verletzungsgrade der Versuchsproben nach dem Impakt jeweils für alle Impaktorgeometrien dargestellt. **Abbildung 25** zeigt für die flache, die flach-runde und die runde Impaktorgeometrie Proben, bei denen makroskopisch keine Verletzung beobachtet werden konnte. Für die spitze Impaktorgeometrie war jedoch auch bei der geringsten Fallhöhe bereits eine Beschädigung des Muskelgewebes zu erkennen, wie in **Abbildung 25** gezeigt ist. In **Abbildung 26** sind Proben dargestellt, bei denen eine Beschädigung erkennbar war, die jedoch nicht vollständig gerissen waren. **Abbildung 27** zeigt Proben, die nach Testung mit der flach-runden, der runden bzw. der spitzen Impaktorgeometrie einen Riss über die gesamte Probendicke aufwiesen. Für die flache Impaktorgeometrie konnte in den Muskelgewebeproben kein kompletter Durchriss erzeugt werden, weshalb diejenige Probe mit der stärksten Beschädigung dargestellt ist.

Abbildung 26: Muskelgewebeproben mit Beschädigung nach Impakt für alle Impaktorgeometrien. Die Abbildung zeigt Muskelgewebeproben, bei denen nach Testung eine Beschädigung erkennbar war, die jedoch keinen Riss über die komplette Probendicke aufwiesen.

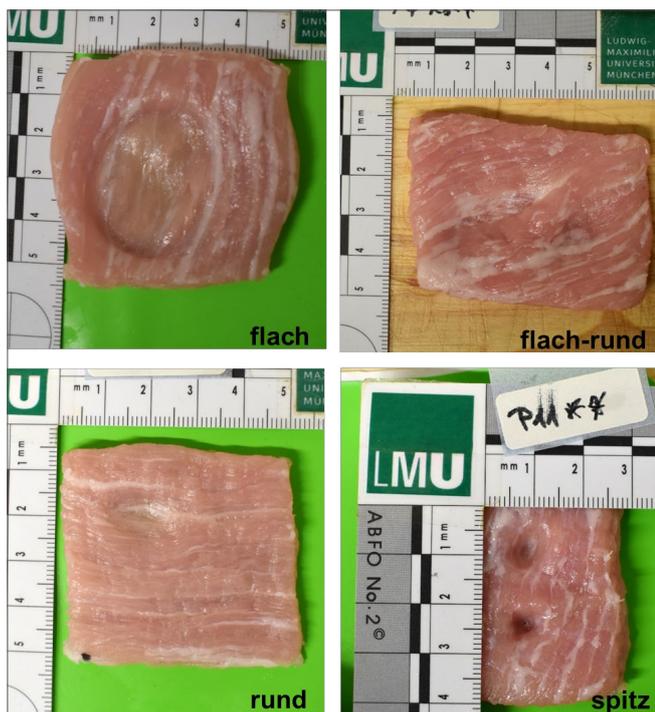


Abbildung 25: Muskelgewebeproben ohne Beschädigung nach Impakt. Nach Testung war makroskopisch keine Beschädigung erkennbar. Für die spitze Impaktorgeometrie konnte jedoch auch bei der geringsten Fallhöhe eine leichte Beschädigung der Versuchsproben beobachtet werden.

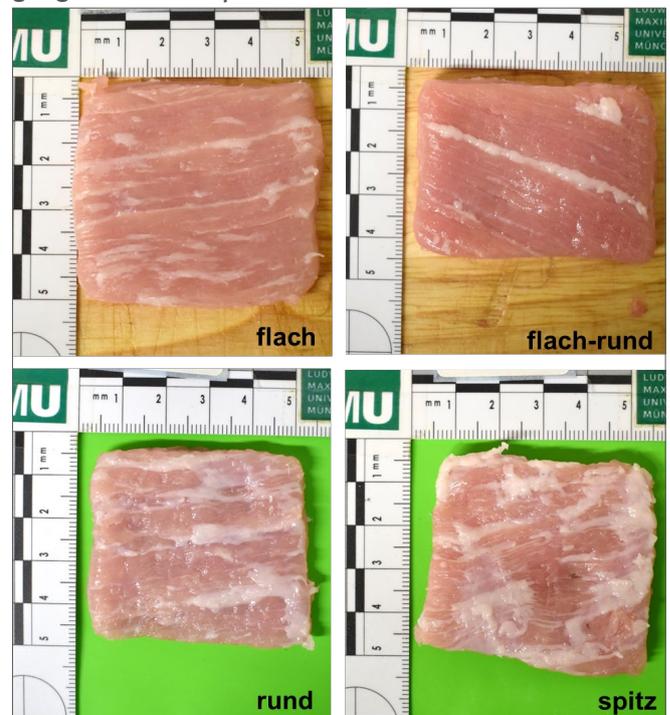
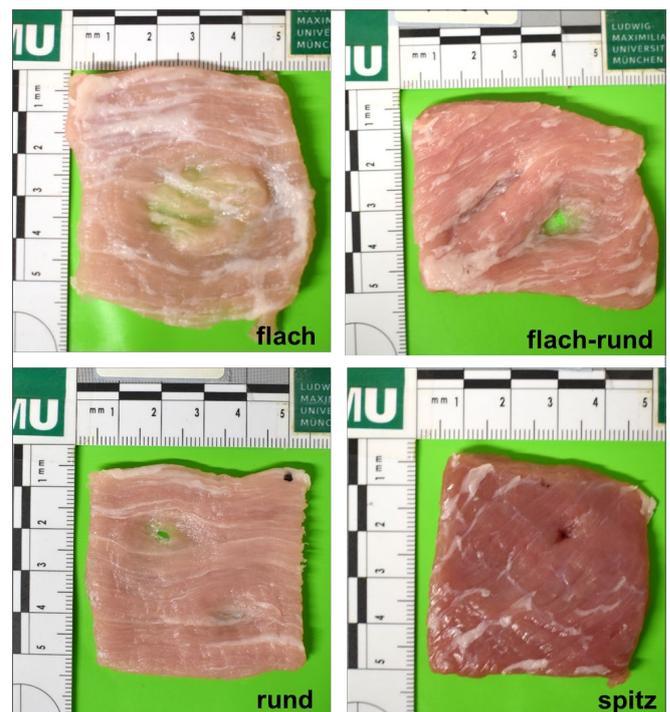


Abbildung 27: Muskelgewebeproben mit Riss nach Impakt. Nach Testung konnte ein Riss über die komplette Muskeldicke beobachtet werden. Für die flache Impaktorgeometrie konnte in den Muskelgewebeproben kein kompletter Durchriss erzeugt werden.



Je nach Impaktorgeometrie konnten unterschiedliche Verletzungsformen im Muskelgewebe beobachtet werden. Die flache Impaktorgeometrie induzierte eine Art Impaktorabdruck an der Impaktstelle im Muskelgewebe, erzeugte jedoch in keinem Experiment einen kompletten Durchriss. Für die spitze Impaktorgeometrie konnten lokale, kreisförmige Verletzungen im Muskelgewebe beobachtet werden. Die flache bzw. flach-runde Impaktorgeometrie erzeugten im Gegensatz dazu großflächigere Abdrücke an der Impaktstelle und kreisförmige Verletzungen bei den Proben, die nach Testung einen kompletten Durchriss aufwiesen. Für beide Geometrien schien es, als ob die Muskelfasern durch die Testung an der Impaktstelle zur Seite geschoben werden.

4.4 Verbund aus Haut und Fettgewebe

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen verschiedene Verletzungsgrade der Versuchsproben nach dem Impact jeweils für alle Impaktorgeometrien. Da für die Proben aus Haut und Fettgewebe stets das Fettgewebe zuerst versagte, ist für die Gegenüberstellung der Proben jeweils die Probenunterseite, d. h. die im Versuch dem Impaktor abgewandte Seite mit dem Fettgewebe, dargestellt. **Abbildung 28** zeigt Proben, bei denen makroskopisch keine Verletzung beobachtet werden konnte. In **Abbildung 29** sind Proben dargestellt, bei denen eine Beschädigung im Fettgewebe bzw. in der Haut erkennbar war, die jedoch nicht vollständig gerissen waren.

Abbildung 28:

Proben aus Haut und Fettgewebe ohne Beschädigung nach Impact für alle Impaktorgeometrien. Die Abbildung zeigt Proben aus Haut und Fettgewebe, bei denen nach Testung makroskopisch keine Beschädigung erkennbar war. Gezeigt ist jeweils die Probenunterseite (entspricht der Seite mit Fettgewebe).

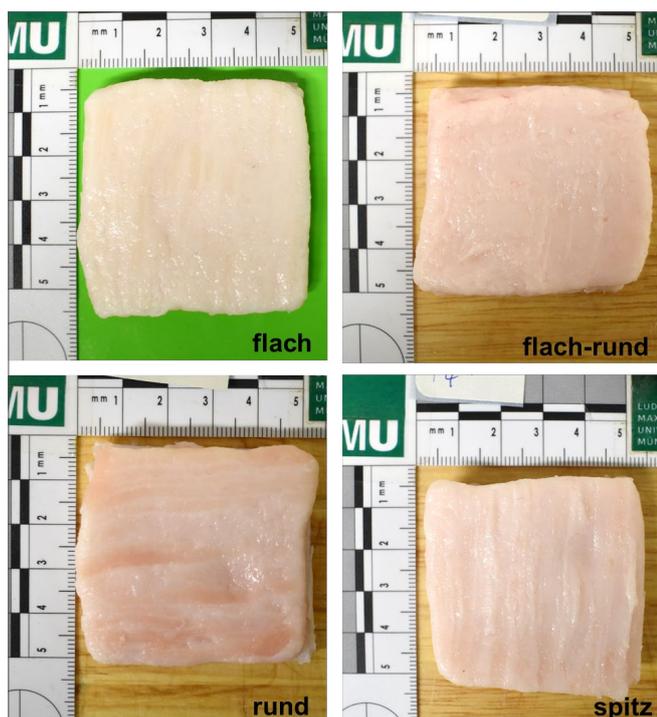


Abbildung 29:

Proben aus Haut und Fettgewebe mit Beschädigung nach Impact für alle Impaktorgeometrien. Die Abbildung zeigt Proben aus Haut und Fettgewebe, bei denen nach Testung eine Beschädigung im Fettgewebe erkennbar war, die jedoch keinen Riss über die komplette Probendicke aufwiesen. Gezeigt ist jeweils die Probenunterseite (entspricht der Seite mit Fettgewebe).

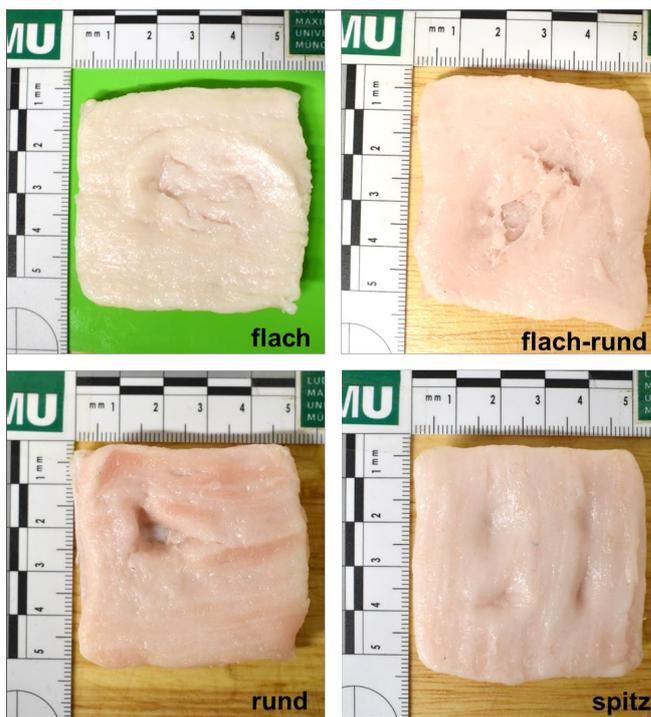


Abbildung 30 zeigt Proben, die nach Testung mit der runden bzw. der spitzen Impaktorgeometrie einen Riss über die gesamte Probendicke aufwiesen. Für die flache bzw. flach-runde Impaktorgeometrie konnte in den Proben aus Haut und Fettgewebe kein kompletter Durchriss erzeugt werden, weshalb diejenigen Proben gezeigt sind, die die größte Beschädigung nach der Testung aufwiesen. **Abbildung 31** zeigt für Proben, bei denen mit der runden bzw. spitzen Impaktorgeometrie ein Riss erzeugt werden konnte, die Probenoberseite, d. h. die im Versuch dem Impaktor zugewandte Hautseite.

Durch die verschiedenen Impaktorgeometrien wurden unterschiedliche Verletzungsbilder in den Versuchsproben hervorgerufen. Nach Testung mit der flachen Impaktorgeometrie konnte ein Abdruck des Impaktors im Fettgewebe an der Impaktstelle beobachtet werden. Es konnte jedoch keine Beschädigung der Haut hervorgerufen werden. Die spitze Impaktorgeometrie erzeugte sowohl im Fettgewebe als auch in der Haut lokale, kreisförmige Verletzungen. Die flache und die flach-runde Impaktorgeometrie induzierten kraterförmige Abdrücke im Fettgewebe an der Impaktstelle, wobei mit der runden Impaktorgeometrie aufklaffende Risse mit einer länglichen Form erzeugt werden konnten.

Abbildung 30: Proben aus Haut und Fettgewebe mit Riss nach Impact. Für die spitze und die runde Impaktorgeometrie sind Proben gezeigt, bei denen nach Testung ein Riss über die komplette Probendicke beobachtet werden konnte. Für die flache bzw. flach-runde Impaktorgeometrie konnte in den Proben aus Haut und Fettgewebe kein kompletter Durchriss erzeugt werden. Gezeigt ist jeweils die Probenunterseite (entspricht der Seite mit Fettgewebe).

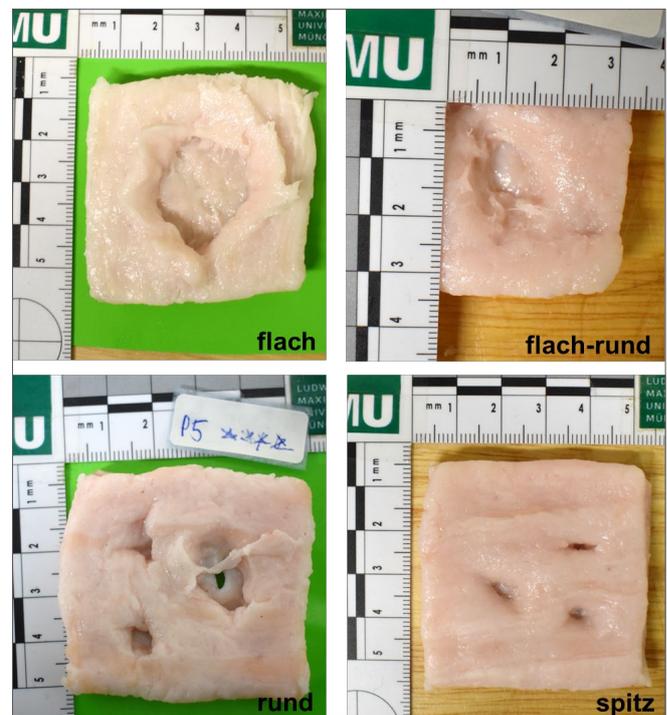


Abbildung 31: Proben aus Haut und Fettgewebe mit Riss nach Impact für runde und spitze Impaktorgeometrie. Für die spitze und die runde Impaktorgeometrie sind Proben gezeigt, bei denen nach Testung ein Riss über die komplette Probendicke beobachtet werden konnte. Gezeigt ist jeweils die Probenoberseite (entspricht der Seite mit Haut).

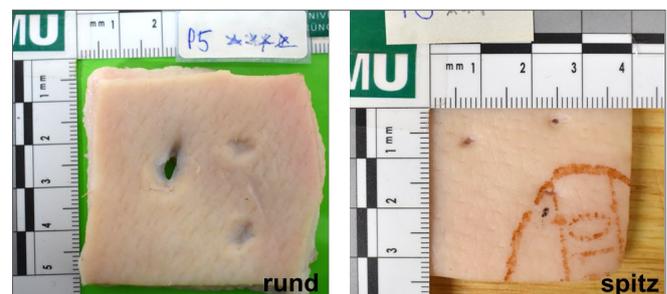


Abbildung 32:

Proben aus Haut, Fett- und Muskelgewebe ohne Beschädigung nach Impact für alle Impactorgeometrien. Nach Testung war makroskopisch keine Beschädigung erkennbar. Gezeigt ist jeweils die Probenunterseite (entspricht der Seite mit Muskelgewebe).

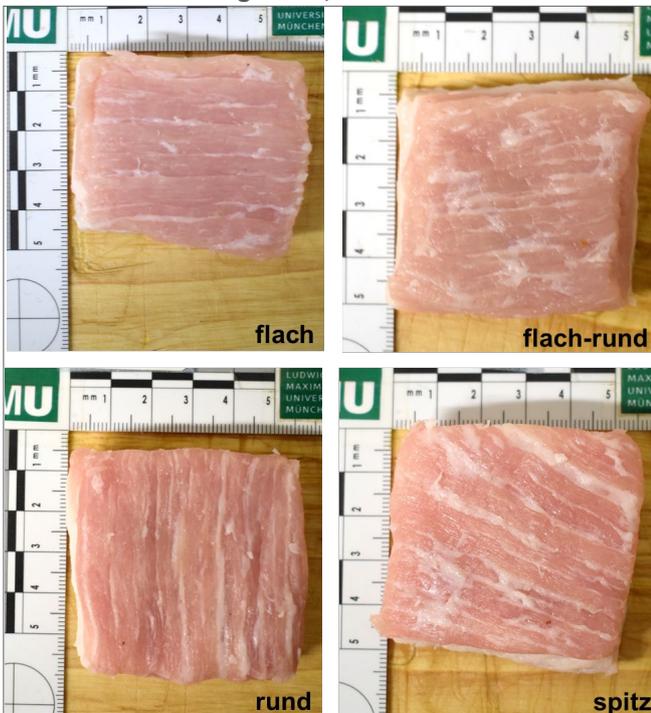
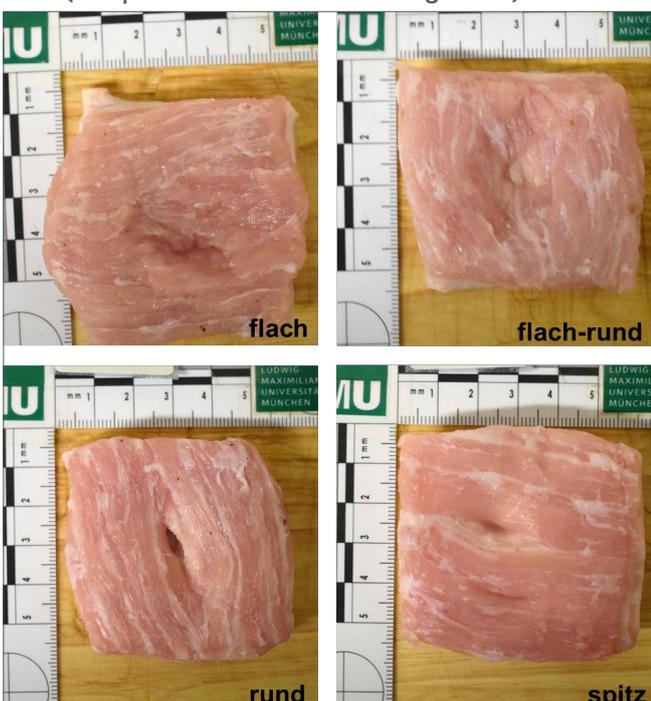


Abbildung 33:

Proben aus Haut, Fett- und Muskelgewebe mit Beschädigung nach Impact für alle Impactorgeometrien. Nach Testung war eine Beschädigung im Muskel- bzw. Fettgewebe erkennbar, die jedoch keinen Riss über die komplette Probendicke aufwies. Gezeigt ist jeweils die Probenunterseite (entspricht der Seite mit Muskelgewebe).

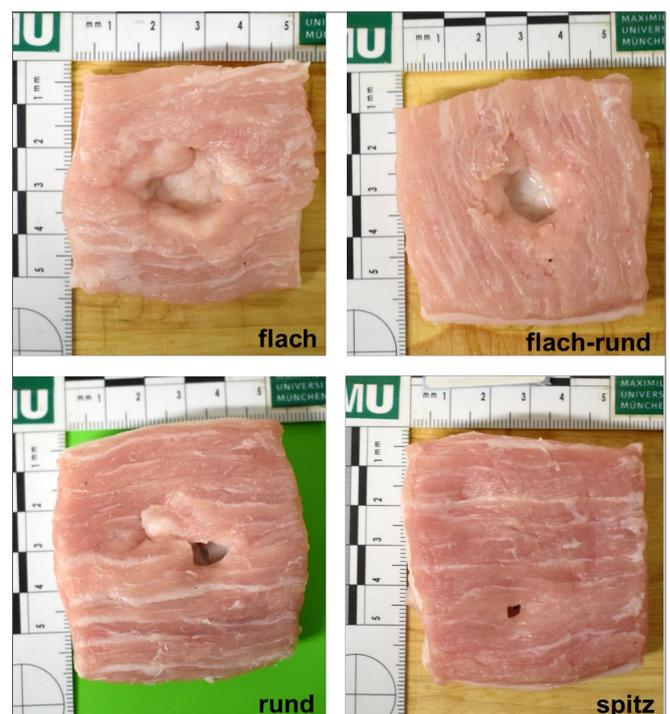


4.5 Verbund aus Haut-, Fett- und Muskelgewebe

In den nachfolgenden Abbildungen sind verschiedene Verletzungsgrade der Versuchsproben nach dem Impact jeweils für alle Impactorgeometrien dargestellt. Für die Proben aus Haut, Fett- und Muskelgewebe versagte stets zuerst das Muskelgewebe, dann das Fettgewebe und schließlich die Haut. Daher ist für die Gegenüberstellung der Proben jeweils die Probenunterseite, d. h. die im Versuch dem Impactor abgewandte Seite mit dem Muskelgewebe, dargestellt. **Abbildung 32** zeigt Proben, bei denen makroskopisch nach Testung keine Verletzung beobachtet werden konnte. **Abbildung 33** vergleicht Proben, bei denen eine Beschädigung im Muskel-, bzw. Fettgewebe erkennbar war, die jedoch nicht vollständig gerissen waren. In **Abbildung 34** sind Proben dargestellt, die nach Testung mit der runden bzw. der spitzen Impactorgeometrie einen Riss über die gesamte Probendicke aufwies. Nach Testung mit der flachen bzw. flach-runden Impactorgeometrie konnte in den Proben aus

Abbildung 34:

Proben aus Haut, Fett- und Muskelgewebe mit Riss nach Impact. Für die spitze und die runde Impactorgeometrie sind Proben gezeigt, bei denen nach Testung ein Riss über die komplette Probendicke beobachtet werden konnte. Für die flache bzw. flach-runde Impactorgeometrie konnte in den Proben aus Haut, Fett- und Muskelgewebe kein kompletter Durchriss erzeugt werden. Gezeigt ist jeweils die Probenunterseite (entspricht der Seite mit Muskelgewebe).



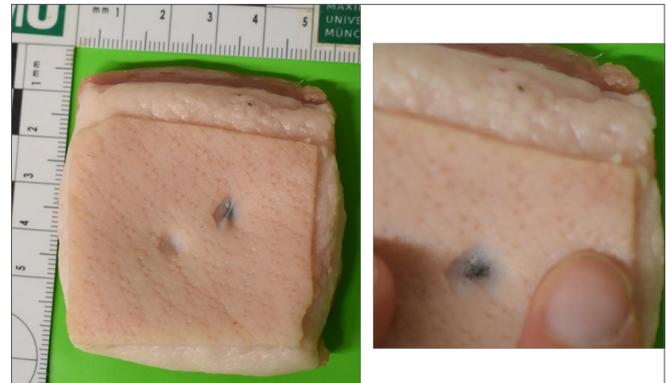
Haut, Fett- und Muskelgewebe kein kompletter Durchriss beobachtet werden, weshalb diejenigen Proben gezeigt sind, die die größte Beschädigung nach dem Impakt aufwiesen. **Abbildung 35** zeigt die Probenoberseite, d.h. die im Versuch dem Impaktor zugewandte Hautseite, einer Versuchsprobe aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, bei der mit der runden Impaktorgeometrie ein Riss erzeugt werden konnte.

Je nach Impaktorgeometrie wurden unterschiedliche Verletzungsbilder in den Versuchsproben erzeugt. Durch die flache Impaktorgeometrie wurde ein Abdruck des Impaktors im Fett- bzw. Muskelgewebe an der Impaktstelle erzeugt. Es konnte jedoch keine Beschädigung der Haut hervorgerufen werden. Nach Testung mit der spitzen Impaktorgeometrie konnten sowohl im Fett- und Muskelgewebe als auch in der Haut lokale, kreisförmige Verletzungen beobachtet werden. Die flache und die flach-runde Impaktorgeometrie riefen sowohl im Fett- als auch im Muskelgewebe kraterförmige Abdrücke an der Impaktstelle hervor. Mit der runden Impaktorgeometrie konnte in einer Probe ein Riss erzeugt werden, der eine längliche Form aufwies.

4.6 Zusammenfassung

Die verschiedenen Impaktorgeometrien erzeugten unterschiedliche Verletzungsbilder, die sich jedoch für jeden Impaktortyp für die verschiedenen Gewebetypen ähnelten. Bei der flachen Impaktorgeometrie konnte jeweils ein Impaktorabdruck an der Impaktstelle beobachtet werden. Die spitze Impaktorgeometrie hingegen erzeugte jeweils lokale, kreisförmige Verletzungen. Die flache und die flach-runde Impaktorgeometrie riefen im Fett- bzw. Muskelgewebe kraterförmige Verletzungen hervor. In der Haut erzeugten beide Geometrien länglich Risse, die in Form und Ausprägung einer realen Quetschrischwunde ähnelten. Es ist daher geplant, die eigentlichen Versuche mit der runden bzw. flach-runden Impaktorgeometrie durchzuführen.

Abbildung 35: Probe aus Haut, Fett- und Muskelgewebe mit Riss nach Testung mit runder Impaktorgeometrie. Gezeigt ist eine Probe, bei der nach Testung ein Riss über die komplette Probendicke beobachtet werden konnte in Gesamtansicht (links) und Nahaufnahme (rechts).



5 Ausblick

Anhand der Ergebnisse wurde zwischen den Projektpartnern das weitere Vorgehen für die nachfolgenden Untersuchungen (Hauptversuch) abgesprochen. Ziel war es, auf Basis der Vorversuche (Vorstudie) mindestens zwei Impaktorgeometrien ($IMP = 2$) und mindestens drei unterschiedliche Energieniveaus (Fallhöhen = 3) pro Gewebetyp für die Validierungsexperimente auszuwählen, wobei ein Energieniveau so gewählt werden soll, dass nach dem Impact keine Verletzung des Gewebes sichtbar ist und das andere so, dass nach dem Impact eine deutliche Verletzung im Gewebe zu erkennen ist. Das dritte Energieniveau soll zwischen diesen beiden Niveaus liegen.

Die Verletzungsbilder der verschiedenen Impaktorgeometrien unterschieden sich wesentlich, auch wenn sie sich für jeden Impactortyp für die verschiedenen Gewebetypen ähnelten. Bei der flachen Impaktorgeometrie konnte jeweils ein Impaktorabdruck an der Impactstelle beobachtet werden. Angemerkt sei, dass das planare Auftreffen zweier ebener Flächen ein sehr seltenes reales Szenario darstellt, da durch die Kontur des menschlichen Körpers zumeist eine eigene Wölbung vorliegt. Die spitze Impaktorgeometrie hingegen erzeugte jeweils lokale, kreisförmige Verletzungen. Beide Impaktoren erzeugten also keine typische Quetschrischwunde und schieden für die geplanten Folgeuntersuchungen aus. Dennoch sollte in Erwägung gezogen werden, die Verletzungsmechanismen – besonders bei spitzen Geometrien – zukünftiger noch genauer zu untersuchen. Insbesondere da alle Proben vom Gewebetyp Haut in den Versuchen mit der spitzen Geometrie, auch wenn sie nicht vollständig gerissen waren, sichtbare Verletzung an Epidermis und Dermis aufwiesen.

Im Gegensatz dazu erzeugten die flache bzw. flach-runde Impaktorgeometrie in der Haut längliche Risse, die in Form und Ausprägung einer realen Quetschrischwunde ähnelten, sodass die Hauptversuche mit der runden bzw. flach-runden Impaktorgeometrie durchgeführt werden.

Da der minimale Energieeintrag zur Erzeugung eines kompletten Durchrisses für jeden Probetyp und jede Impaktorgeometrie ermittelt werden konnte, war es möglich, ein unteres Energieniveau für die Versuche festzulegen, bei dem kein Durchriss zu erwarten ist.

Auch wenn für beinahe jede Kombination aus Gewebetyp und Impaktorgeometrie ein kompletter Durchriss erzeugt werden konnte, war es schwierig, ein oberes Energieniveau festzulegen, bei dem ein Durchriss in jedem Fall

zu erwarten ist, da hier die individuelle Probendicke einen Einfluss haben kann. Die Hauptversuche werden daher in einem zweiphasigen Vorgehen durchgeführt: Zunächst wird die Hälfte aller Versuche durchgeführt und anschließend kann – falls nötig – die Versuchsmatrix, z. B. um eine zusätzliche Fallhöhe, angepasst werden. Bisher sind alle Versuche nur mit einem Fallgewicht von 0,9 kg ausgeführt worden. Falls möglich, sollen zum Ende der Studie weitere Versuche mit einem höheren Fallgewicht durchgeführt werden.

Während in den Vorversuchen die Proben mehrfach – wenn auch an anderen Positionen – beaufschlagt worden waren, werden in den Hauptversuchen die Proben nur einmal verwendet, um mögliche Vorschädigungen auszuschließen. Pro Konstellation sollen mindestens $n = 4$ Versuchsproben getestet werden, um die biologische Variabilität der Versuchsproben zu erfassen.

Daraus ergeben sich $m = 24$ Versuche für die fünf unterschiedlichen Gewebetypen (Haut, Fettgewebe, Muskelgewebe, Verbund aus Haut und Fettgewebe, Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe), weshalb insgesamt mindestens $k = 120$ weitere Versuche durchgeführt werden. Zusammen mit den Vorversuchen werden dann ausreichen viele Daten vorliegen, die im weiteren Projektverlauf zur Validierung von Finite-Elemente-Modellen verwendet werden.

Die qualitative Beobachtung, dass mit zunehmendem Radius der Kontaktgeometrie und zunehmender Probendicke bzw. steigender Anzahl an Schichten verschiedener Gewebetypen der für die Verletzungsentstehung notwendige Energieeintrag ebenfalls anwächst, ist erkennbar. In der Praxis bedeutet dieses, dass Körperstellen, die nur von einer Hautschicht mit geringem Fettgewebeanteil bedeckt sind, prinzipiell gefährdeter sind, eine Quetschrischwunde zu erfahren. Dazu zählen beispielweise Knie, Schienbein, Ellenbogen, Handoberseite oder Teile von Gesicht bzw. Kopf. Ebenfalls ist die Beobachtung ein Indikator dafür, dass Körperstellen mit hohen Weichgewebeanteilen eine geringere Anfälligkeit aufweisen, eine Quetschrischwunde zu erfahren. Dieses bedeutet jedoch nicht, dass es dort nicht zu anderen tieferliegenden Verletzungen wie Hämatomen oder Frakturen kommen kann. Auffällig war, dass bei den mehrschichtigen Proben die unteren Schichten aus Fettgewebe bzw. Fett- und Muskelgewebe bereits deutliche Beschädigungen aufwiesen, auch wenn die Haut nicht gerissen war.

Eine teilweise eingeschränkte Aussagefähigkeit weisen die quantitativen Daten auf, da sie sich nur auf das Setup der Versuche in dieser Studie beziehen. Erst die Simulation von realitätsnahen Szenarien kann aussagekräftigere Erkenntnisse liefern, die eine Abschätzung der Verletzungsschwere ermöglichen, insbesondere, da aufgrund der Anthropometrie an verschiedenen Körperstellen und durch Wechselwirkungen mit der tiefliegenden Körperstruktur (z. B. Knochen) Abweichungen erwartbar sind. Die ermittelten Daten dienen – zusammen mit Angaben aus der Fachliteratur – als Grundlage für den Aufbau und die dabei notwendige Validierung von Finite-Elemente-Modellen, die im weiteren Projektverlauf (Projektnummer IFA-5170) erstellt und für die Simulation verschiedener Unfallszenarien verwendet werden.

Der Zweck der vorliegenden Vorstudie war, die Entstehung von Weichgewebeverletzungen abhängig von Geometrie, Gewebetyp und Energieeintrag näher zu untersuchen und die Verletzungsentstehung und die Verletzungsbilder systematisch zu erfassen. Die Untersuchungen bilden, aufgrund ihrer großen Anzahl und der verschiedenen Varianten die vielleicht bisher am besten dokumentierte Grundlage an Fallturmexperimenten mit Weichgewebeproben. Basierend auf den Ergebnissen konnte die Planung der Hauptversuche erfolgen, die im Anschluss durchgeführt werden, und die vorgestellten Studiendaten erweitern werden.

Anhang A1 – Haut

In den Vorversuchen wurden die jeweiligen Versuchsproben bei unterschiedlichen Energieniveaus getestet, wobei jede Probe mehrmals beaufschlagt wurde. Der Probenname für jeden Gewebetypen setzt sich daher aus zwei Nummern zusammen: Die erste Nummer gibt die Probennummer an, wohingegen die zweite Nummer angibt, wie oft die Probe schon beaufschlagt wurde. P1-1 bedeutet demnach: Versuchsprobe 1, erster Impact.

Tabelle A1:

Versuchsergebnisse für isolierte Haut, flache Impaktorgeometrie. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben

Impaktor flach					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	1,8	20	1,77	0,97	0
P1-2	1,8	50	4,41	2,43	0
P1-3	1,8	80	7,06	3,89	0
P1-4	1,8	100	8,83	4,86	0
P1-5	1,8	120	10,59	5,83	0
P2-1	1,6	100	8,83	5,70	0
P2-2	1,6	120	10,59	6,84	0
P2-3	1,6	140	12,36	7,97	0
P2-4	1,6	150	13,24	8,54	1
P3-1	1,9	100	8,83	4,65	0
P3-2	1,9	150	13,24	6,97	0
P4-1	1,4	100	8,83	6,46	1
P4-2	1,4	120	10,59	7,75	1

Tabelle A2:

Versuchsergebnisse für isolierte Haut, flach-runde Impaktorgeometrie. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben

Impaktor flach-rund (r = 55 mm)					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	2,5	20	1,77	0,70	0
P1-2	2,5	30	2,65	1,05	0
P1-3	2,5	40	3,53	1,40	0
P1-4	2,5	50	4,41	1,75	0
P1-5	2,5	60	5,30	2,10	0
P1-6	2,5	70	6,18	2,46	0
P2-1	1,8	10	0,88	0,49	0
P2-2	1,8	50	4,41	2,43	0
P2-3	1,8	60	5,30	2,92	0
P2-4	1,8	70	6,18	3,40	0
P3-1	1,9	60	5,30	2,76	0
P3-2	1,9	70	6,18	3,22	0
P3-3	1,9	80	7,06	3,69	1
P4-1	1,7	5	0,44	0,26	0
P4-2	1,7	20	1,77	1,04	0
P4-3	1,7	30	2,65	1,56	0
P4-4	1,7	40	3,53	2,08	1
P4-5	1,7	50	4,41	2,60	1
P5-1	2,1	5	0,44	0,21	0
P5-2	2,1	40	3,53	1,71	0
P5-3	2,1	50	4,41	2,14	0
P5-4	2,1	60	5,30	2,56	1
P6-1	1,5	10	0,88	0,59	0
P6-2	1,5	30	2,65	1,96	0
P6-3	1,5	40	3,53	2,62	1
P6-4	1,5	45	3,97	2,94	1

Tabelle A3:

Versuchsergebnisse für isolierte Haut, runde Impaktorgeometrie. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor rund (r = 18 mm)					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	1,7	25	2,21	1,34	1
P1-2	1,7	20	1,77	1,07	1
P1-3	1,7	15	1,32	0,80	1
P2-1	2,3	20	1,77	0,76	0
P2-2	2,3	25	2,21	0,95	1
P2-3	2,3	30	2,65	1,14	1
P3-1	2,5	5	0,44	0,18	0
P3-2	2,5	10	0,88	0,36	0
P3-3	2,5	15	1,32	0,54	0
P3-4	2,5	20	1,77	0,72	0
P4-1	3,4	20	1,77	0,53	0
P4-2	3,4	25	2,21	0,66	0
P4-3	3,4	30	2,65	0,79	0
P4-4	3,4	35	3,09	0,92	0
P5-1	2,0	30	2,65	1,31	1

Tabelle A4:

Versuchsergebnisse für isolierte Haut, spitze Impaktorgeometrie. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke, sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben

Impaktor spitz					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	1,8	5	0,44	0,25	0
P1-2	1,8	10	0,88	0,50	1
P2-1	1,7	2	0,18	0,10	0
P2-2	1,7	5	0,44	0,26	0
P2-3	1,7	10	0,88	0,52	1
P3-1	2,2	2	0,18	0,08	0
P3-2	2,2	5	0,44	0,20	0
P3-3	2,2	10	0,88	0,41	0
P3-4	2,2	15	1,32	0,61	1

Anhang A2 – Fettgewebe

In den Vorversuchen wurden die jeweiligen Versuchsproben bei unterschiedlichen Energieniveaus getestet, wobei jede Probe mehrmals beaufschlagt wurde. Der Probenname für jeden Gewebetypen setzt sich daher aus zwei Nummern zusammen: Die erste Nummer gibt die Probennummer an, wohingegen die zweite Nummer angibt, wie oft die Probe schon beaufschlagt wurde. P1-1 bedeutet demnach: Versuchsprobe 1, erster Impakt.

Tabelle A5:

Versuchsergebnisse für isoliertes Fettgewebe, flache Impaktorgeometrie. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	4,5	5	0,44	0,10	0
P1-2	4,5	10	0,88	0,20	0
P1-3	4,5	20	1,77	0,40	0
P1-4	4,5	30	2,65	0,59	0
P1-5	4,5	40	3,53	0,79	0
P1-6	4,5	50	4,41	0,99	1
P2-1	3,6	30	2,65	0,73	0
P2-2	3,6	40	3,53	0,98	0
P3-1	2,7	5	0,44	0,16	0
P3-2	2,7	30	2,65	0,97	0
P4-1	6,1	40	3,53	0,58	0
P4-2	6,1	50	4,41	0,72	1

Tabelle A6:

Versuchsergebnisse für isoliertes Fettgewebe, flach-runde Impaktorgeometrie. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach-rund (r = 55 mm)					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	5,8	5	0,44	0,08	0
P1-2	5,8	15	1,32	0,23	0
P1-3	5,8	25	2,21	0,38	0
P1-4	5,8	35	3,09	0,53	0
P2-1	6,2	10	0,88	0,14	0
P2-2	6,2	20	1,77	0,28	0
P2-3	6,2	30	2,65	0,43	0
P2-4	6,2	40	3,53	0,57	0
P2-5	6,2	50	4,41	0,71	1
P3-1	4,8	25	2,21	0,46	0
P3-2	4,8	30	2,65	0,55	1
P3-3	4,8	20	1,77	0,37	0
P4-1	2,6	10	0,88	0,34	1
P4-2	2,6	5	0,44	0,17	0

Tabelle A7:

Versuchsergebnisse für isoliertes Fettgewebe, runde Impaktorgeometrie. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor rund (r = 18 mm)					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	6,2	2	0,18	0,03	0
P1-2	6,2	5	0,44	0,07	0
P1-3	6,2	15	1,32	0,21	0
P1-4	6,2	20	1,77	0,28	1
P2-1	7,1	5	0,44	0,06	0
P2-2	7,1	10	0,88	0,12	0
P2-3	7,1	15	1,32	0,19	0
P2-4	7,1	20	1,77	0,25	0
P2-5	7,1	25	2,21	0,31	1
P3-1	7,9	10	0,88	0,11	0
P3-2	7,9	15	1,32	0,17	0
P3-3	7,9	25	2,21	0,28	0
P3-4	7,9	30	2,65	0,33	1
P4-1	3,5	10	0,88	0,25	1
P4-2	3,5	5	0,44	0,13	1
P5-1	1,9	5	0,44	0,23	1

Tabelle A8:

Versuchsergebnisse für isoliertes Fettgewebe, spitze Impaktorgeometrie. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor spitz					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	6,5	1	0,09	0,01	0
P1-2	6,5	2	0,18	0,03	0
P1-3	6,5	5	0,44	0,07	0
P1-4	6,5	6	0,53	0,08	1
P2-1	3,3	1	0,09	0,03	1
P2-2	3,3	2	0,18	0,05	1
P3-1	5,0	5	0,44	0,09	1
P3-2	5,0	2	0,18	0,04	0
P4-1	6,8	2	0,18	0,03	1
P4-2	6,8	1	0,09	0,01	0

Anhang A3 – Muskelgewebe

In den Vorversuchen wurden die jeweiligen Versuchsproben bei unterschiedlichen Energieniveaus getestet, wobei jede Probe mehrmals beaufschlagt wurde. Der Probenname für jeden Gewebetypen setzt sich daher aus zwei Nummern zusammen: Die erste Nummer gibt die Probennummer an, wohingegen die zweite Nummer angibt, wie oft die Probe schon beaufschlagt wurde. P1-1 bedeutet demnach: Versuchsprobe 1, erster Impact.

Tabelle A9:

Versuchsergebnisse für isoliertes Muskelgewebe, flache Impaktorgeometrie. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	5,0	5	0,44	0,09	0
P1-2	5,0	10	0,88	0,18	0
P1-3	5,0	20	1,77	0,35	0
P1-4	5,0	30	2,65	0,53	0
P1-5	5,0	40	3,53	0,71	0
P2-1	5,0	5	0,44	0,09	0
P2-2	5,0	25	2,21	0,44	0
P2-3	5,0	35	3,09	0,62	0
P2-4	5,0	45	3,97	0,80	0
P2-5	5,0	50	4,41	0,89	0
P3-1	3,5	5	0,44	0,13	0
P3-2	3,5	30	2,65	0,76	0
P3-3	3,5	40	3,53	1,01	0
P4-1	4,0	35	3,09	0,77	0
P4-2	4,0	45	3,97	0,99	0

Tabelle A10:

Versuchsergebnisse für isoliertes Muskelgewebe, flach-runde Impaktorgeometrie. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach-rund (r = 55 mm)					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	5,8	5	0,44	0,08	0
P1-2	5,8	15	1,32	0,23	0
P1-3	5,8	25	2,21	0,38	0
P1-4	5,8	30	2,65	0,46	1
P2-1	4,8	5	0,44	0,09	0
P2-2	4,8	15	1,32	0,27	0
P2-3	4,8	25	2,21	0,46	0
P2-4	4,8	30	2,65	0,55	1
P3-1	7,0	5	0,44	0,06	0
P3-2	7,0	10	0,88	0,13	0
P3-3	7,0	15	1,32	0,19	0
P3-4	7,0	25	2,21	0,32	1
P4-1	6,8	10	0,88	0,13	0
P4-2	6,8	15	1,32	0,20	1
P5-1	5,0	10	0,88	0,18	0
P5-2	5,0	15	1,32	0,27	0
P5-3	5,0	20	1,77	0,35	1

Tabelle A11:

Versuchsergebnisse für isoliertes Muskelgewebe, runde Impaktorgeometrie. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor rund (r = 18 mm)					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	4,0	5	0,44	0,11	0
P1-2	4,0	10	0,88	0,22	1
P1-3	4,0	2	0,18	0,04	0
P2-1	4,2	2	0,18	0,04	0
P2-2	4,2	5	0,44	0,11	0
P2-3	4,2	10	0,88	0,21	0
P3-1	4,2	5	0,44	0,10	0
P3-2	4,2	10	0,88	0,21	1
P4-1	6,3	5	0,44	0,07	0
P4-2	6,3	10	0,88	0,14	1
P4-3	6,3	10	0,88	0,14	1
P5-1	6,9	5	0,44	0,06	0
P5-2	6,9	10	0,88	0,13	1
P6-1	7,1	5	0,44	0,06	0
P6-2	7,1	10	0,88	0,12	0
P6-3	7,1	15	1,32	0,19	1

Tabelle A12:

Versuchsergebnisse für isoliertes Muskelgewebe, spitze Impaktorgeometrie. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor spitz					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	5,7	2	0,18	0,03	1
P1-2	5,7	1	0,09	0,02	1
P2-1	5,4	5	0,44	0,08	1
P2-2	5,4	2	0,18	0,03	1
P3-1	6,3	5	0,44	0,07	1
P3-2	6,3	2	0,18	0,03	0

Anhang A4 – Haut und Fettgewebe

In den Vorversuchen wurden die jeweiligen Versuchspröben bei unterschiedlichen Energieniveaus getestet, wobei jede Probe mehrmals beaufschlagt wurde. Der Probenname für jeden Gewebetypen setzt sich daher aus zwei Nummern zusammen: Die erste Nummer gibt die Probennummer an, wohingegen die zweite Nummer angibt, wie oft die Probe schon beaufschlagt wurde. P1-1 bedeutet demnach: Versuchsprobe 1, erster Impakt.

Tabelle A13:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe, flache Impaktorgeometrie, Gesamtdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach – Gesamtdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	6,6	50	4,41	0,67	0
P1-2	6,6	100	8,83	1,35	0
P1-3	6,6	150	13,24	2,02	0
P2-1	7,2	30	2,65	0,37	0
P2-2	7,2	100	8,83	1,22	0
P2-3	7,2	150	13,24	1,84	0
P3-1	6,5	10	0,88	0,14	0
P3-2	6,5	150	13,24	2,04	0

Tabelle A14:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe, flach-runde Impaktorgeometrie, Gesamtdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke, sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach-rund (r = 55 mm) – Gesamtdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	7,9	5	0,44	0,06	0
P1-2	7,9	50	4,41	0,56	0
P1-3	7,9	70	6,18	0,79	0
P1-4	7,9	80	7,06	0,90	0
P2-1	7,7	10	0,88	0,12	0
P2-2	7,7	70	6,18	0,81	0
P2-3	7,7	80	7,06	0,92	0
P3-1	7,7	20	1,77	0,23	0
P3-2	7,7	70	6,18	0,80	0
P3-3	7,7	80	7,06	0,92	0

Tabelle A15:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe, runde Impaktorgeometrie, Gesamtdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke, sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor rund (r = 18 mm) – Gesamtdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	8,5	50	4,41	0,52	0
P1-2	8,5	60	5,30	0,63	0
P1-3	8,5	70	6,18	0,73	0
P1-4	8,5	80	7,06	0,84	1
P2-1	7,8	10	0,88	0,11	0
P2-2	7,8	70	6,18	0,79	1
P2-3	7,8	70	6,18	0,79	1
P3-1	9,8	5	0,44	0,04	0
P3-2	9,8	70	6,18	0,63	0
P3-3	9,8	80	7,06	0,72	0
P3-4	9,8	90	7,95	0,81	0
P4-1	8,7	5	0,44	0,05	0
P4-2	8,7	80	7,06	0,81	0
P4-3	8,7	90	7,95	0,92	0
P4-4	8,7	100	8,83	1,02	1
P5-1	5,9	30	2,65	0,45	0
P5-2	5,9	35	3,09	0,52	0
P5-3	5,9	40	3,53	0,60	0
P6-1	6,9	45	3,97	0,57	0
P6-2	6,9	50	4,41	0,64	0
P6-3	6,9	5	0,44	0,06	0
P7-1	8,0	55	4,86	0,61	0
P7-2	8,0	60	5,30	0,66	0

Tabelle A16:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe, spitze Impaktorgeometrie, Gesamtdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor spitz – Gesamtdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	9,9	5	0,44	0,04	0
P1-2	9,9	10	0,88	0,09	0
P1-3	9,9	15	1,32	0,13	0
P1-4	9,9	20	1,77	0,18	0
P1-5	9,9	30	2,65	0,27	0
P2-1	7,2	30	2,65	0,37	1
P2-2	7,2	20	1,77	0,25	0
P2-3	7,2	25	2,21	0,31	0
P3-1	9,4	20	1,77	0,19	0
P3-2	9,4	30	2,65	0,28	0
P3-3	9,4	35	3,09	0,33	0
P3-4	9,4	40	3,53	0,38	0
P3-5	9,4	45	3,97	0,42	0
P4-1	7,1	20	1,77	0,25	0
P4-2	7,1	20	1,77	0,25	1

Tabelle A17:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe, flache Impaktorgeometrie, Hautdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Hautdicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Hautdicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach – Hautdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	1,3	50	4,41	3,44	0
P1-2	1,3	100	8,83	6,88	0
P1-3	1,3	150	13,24	10,32	0
P2-1	1,3	30	2,65	1,99	0
P2-2	1,3	100	8,83	6,62	0
P2-3	1,3	150	13,24	9,93	0
P3-1	1,2	10	0,88	0,73	0
P3-2	1,2	150	13,24	10,89	0

Tabelle A18:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe, flach-runde Impaktorgeometrie, Hautdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Hautdicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Hautdicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach-rund (r = 55 mm) – Hautdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	2,8	5	0,44	0,16	0
P1-2	2,8	50	4,41	1,58	0
P1-3	2,8	70	6,18	2,21	0
P1-4	2,8	80	7,06	2,52	0
P2-1	2,6	10	0,88	0,35	0
P2-2	2,6	70	6,18	2,42	0
P2-3	2,6	80	7,06	2,77	0
P3-1	1,8	20	1,77	0,96	0
P3-2	1,8	70	6,18	3,37	0
P3-3	1,8	80	7,06	3,85	0

Tabelle A19:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe, runde Impaktorgeometrie, Hautdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Hautdicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Hautdicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor rund (r = 18 mm) – Hautdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	2,6	50	4,41	1,70	0
P1-2	2,6	60	5,30	2,04	0
P1-3	2,6	70	6,18	2,38	0
P1-4	2,6	80	7,06	2,72	1
P2-1	3,3	10	0,88	0,27	0
P2-2	3,3	70	6,18	1,87	1
P2-3	3,3	70	6,18	1,87	1
P3-1	2,3	5	0,44	0,20	0
P3-2	2,3	70	6,18	2,75	0
P3-3	2,3	80	7,06	3,14	0
P3-4	2,3	90	7,95	3,53	0
P4-1	2,1	5	0,44	0,21	0
P4-2	2,1	80	7,06	3,36	0
P4-3	2,1	90	7,95	3,78	0
P4-4	2,1	100	8,83	4,20	1
P5-1	1,6	30	2,65	1,69	0
P5-2	1,6	35	3,09	1,97	0
P5-3	1,6	40	3,53	2,25	0
P6-1	1,8	45	3,97	2,25	0
P6-2	1,8	50	4,41	2,50	0
P6-3	1,8	5	0,44	0,25	0
P7-1	2,4	55	4,86	2,07	0
P7-2	2,4	60	5,30	2,25	0

Tabelle A20:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe, spitze Impaktorgeometrie, Hautdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Hautdicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Hautdicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor spitz – Hautdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	2,5	5	0,44	0,18	0
P1-2	2,5	10	0,88	0,36	0
P1-3	2,5	15	1,32	0,54	0
P1-4	2,5	20	1,77	0,72	0
P1-5	2,5	30	2,65	1,08	0
P2-1	1,8	30	2,65	1,44	1
P2-2	1,8	20	1,77	0,96	0
P2-3	1,8	25	2,21	1,20	0
P3-1	2,4	20	1,77	0,75	0
P3-2	2,4	30	2,65	1,12	0
P3-3	2,4	35	3,09	1,31	0
P3-4	2,4	40	3,53	1,49	0
P3-5	2,4	45	3,97	1,68	0
P4-1	1,3	20	1,77	1,32	0
P4-2	1,3	20	1,77	1,32	1

Tabelle A21:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe, flache Impaktorgeometrie, Fettdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Fettdicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Fettdicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach – Fettdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	5,2	50	4,41	0,85	0
P1-2	5,2	100	8,83	1,70	0
P1-3	5,2	150	13,24	2,55	0
P2-1	5,8	30	2,65	0,45	0
P2-2	5,8	100	8,83	1,51	0
P2-3	5,8	150	13,24	2,27	0
P3-1	5,2	10	0,88	0,17	0
P3-2	5,2	150	13,24	2,54	0

Tabelle A22:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe, flach-runde Impaktorgeometrie, Fettdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Fettdicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Fettdicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach-rund (r = 55 mm) – Fettdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	5,0	5	0,44	0,09	0
P1-2	5,0	50	4,41	0,88	0
P1-3	5,0	70	6,18	1,23	0
P1-4	5,0	80	7,06	1,40	0
P2-1	5,1	10	0,88	0,17	0
P2-2	5,1	70	6,18	1,21	0
P2-3	5,1	80	7,06	1,38	0
P3-1	5,9	20	1,77	0,30	0
P3-2	5,9	70	6,18	1,05	0
P3-3	5,9	80	7,06	1,20	0

Tabelle A23:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe, runde Impaktorgeometrie, Fettdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Fettdicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Fettdicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor rund (r = 18 mm) – Fettdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	5,9	50	4,41	0,75	0
P1-2	5,9	60	5,30	0,91	0
P1-3	5,9	70	6,18	1,06	0
P1-4	5,9	80	7,06	1,21	1
P2-1	5,7	10	0,88	0,16	0
P2-2	5,7	70	6,18	1,09	1
P2-3	5,7	70	6,18	1,09	1
P3-1	7,5	5	0,44	0,06	0
P3-2	7,5	70	6,18	0,83	0
P3-3	7,5	80	7,06	0,95	0
P3-4	7,5	90	7,95	1,06	0
P4-1	7,6	5	0,44	0,06	0
P4-2	7,6	80	7,06	0,92	0
P4-3	7,6	90	7,95	1,04	0
P4-4	7,6	100	8,83	1,16	1

Impaktor rund (r = 18 mm) – Fettdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P5-1	4,4	30	2,65	0,61	0
P5-2	4,4	35	3,09	0,71	0
P5-3	4,4	40	3,53	0,81	0
P6-1	5,2	45	3,97	0,77	0
P6-2	5,2	50	4,41	0,85	0
P6-3	5,2	5	0,44	0,09	0
P7-1	5,6	55	4,86	0,86	0
P7-2	5,6	60	5,30	0,94	0

Tabelle A24 – Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut und Fettgewebe, spitze Impaktorgeometrie, Fettdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Fettdicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Fettdicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor spitz – Fettdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	7,5	5	0,44	0,06	0
P1-2	7,5	10	0,88	0,12	0
P1-3	7,5	15	1,32	0,18	0
P1-4	7,5	20	1,77	0,24	0
P1-5	7,5	30	2,65	0,36	0
P2-1	5,3	30	2,65	0,50	1
P2-2	5,3	20	1,77	0,33	0
P2-3	5,3	25	2,21	0,42	0
P3-1	7,0	20	1,77	0,25	0
P3-2	7,0	30	2,65	0,38	0
P3-3	7,0	35	3,09	0,44	0
P3-4	7,0	40	3,53	0,50	0
P3-5	7,0	45	3,97	0,56	0
P4-1	5,7	20	1,77	0,31	0
P4-2	5,7	20	1,77	0,31	1

Anhang A5 – Haut, Fett- und Muskelgewebe

In den Vorversuchen wurden die jeweiligen Versuchsproben bei unterschiedlichen Energieniveaus getestet, wobei jede Probe mehrmals beaufschlagt wurde. Der Probenname für jeden Gewebetypen setzt sich daher aus zwei Nummern zusammen: Die erste Nummer gibt die Probennummer an, wohingegen die zweite Nummer angibt, wie oft die Probe schon beaufschlagt wurde. P1-1 bedeutet demnach: Versuchsprobe 1, erster Impakt.

Tabelle A25:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, flache Impaktorgeometrie, Gesamtdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach – Gesamtdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	12,8	10	0,88	0,07	0
P1-2	12,8	25	2,21	0,17	0
P1-3	12,8	50	4,41	0,35	0
P1-4	12,8	80	7,06	0,55	0
P1-5	12,8	140	12,36	0,97	0
P2-1	16,6	5	0,44	0,03	0
P2-2	16,6	50	4,41	0,27	0
P2-3	16,6	100	8,83	0,53	0
P3-1	15,2	5	0,44	0,03	0
P3-2	15,2	70	6,18	0,41	0
P3-3	15,2	140	12,36	0,81	0
P4-1	12,3	20	1,77	0,14	0
P4-2	12,3	100	8,83	0,72	0
P4-3	12,3	150	13,24	1,07	0

Tabelle A26:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, flach-runde Impaktorgeometrie, Gesamtdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach-rund (r = 55 mm) – Gesamtdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	12,7	5	0,44	0,03	0
P1-2	12,7	20	1,77	0,14	0
P1-3	12,7	50	4,41	0,35	0
P1-4	12,7	100	8,83	0,69	0
P2-1	12,5	5	0,44	0,04	0
P2-2	12,5	70	6,18	0,50	0
P2-3	12,5	140	12,36	0,99	0
P3-1	12,7	30	2,65	0,21	0
P3-2	12,7	100	8,83	0,70	0
P3-3	12,7	140	12,36	0,97	0
P4-1	18,0	40	3,53	0,20	0
P4-2	18,0	150	13,24	0,74	0

Tabelle A27:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, runde Impaktorgeometrie, Gesamtdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Muskeldicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor rund (r = 18 mm) – Gesamtdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	14,5	5	0,44	0,03	0
P1-2	14,5	20	1,77	0,12	0
P1-3	14,5	40	3,53	0,24	0
P1-4	14,5	50	4,41	0,30	0
P2-1	16,4	10	0,88	0,05	0
P2-2	16,4	60	5,30	0,32	0
P2-3	16,4	80	7,06	0,43	0
P2-4	16,4	100	8,83	0,54	0
P3-1	18,2	5	0,44	0,02	0
P3-2	18,2	120	10,59	0,58	0
P3-3	18,2	140	12,36	0,68	1

Tabelle A28:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, spitze Impaktorgeometrie, Gesamtdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Probendicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Probendicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor spitz – Gesamtdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	14,6	5	0,44	0,03	0
P1-2	14,6	10	0,88	0,06	0
P1-3	14,6	15	1,32	0,09	0
P1-4	14,6	25	2,21	0,15	0
P1-5	14,6	40	3,53	0,24	0
P1-6	14,6	60	5,30	0,36	1
P2-1	16,4	5	0,44	0,03	0
P2-2	16,4	20	1,77	0,11	0
P2-3	16,4	50	4,41	0,27	1
P2-4	16,4	40	3,53	0,22	1
P3-1	15,8	10	0,88	0,06	0
P3-2	15,8	30	2,65	0,17	0
P3-3	15,8	40	3,53	0,22	0
P3-4	15,8	50	4,41	0,28	1

Tabelle A29:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, flache Impaktorgeometrie, Hautdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Hautdicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Hautdicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach – Hautdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	2,1	10	0,88	0,42	0
P1-2	2,1	25	2,21	1,06	0
P1-3	2,1	50	4,41	2,12	0
P1-4	2,1	80	7,06	3,39	0
P1-5	2,1	140	12,36	5,93	0
P2-1	1,5	5	0,44	0,29	0
P2-2	1,5	50	4,41	2,88	0
P2-3	1,5	100	8,83	5,76	0
P3-1	1,9	5	0,44	0,23	0
P3-2	1,9	70	6,18	3,25	0
P3-3	1,9	140	12,36	6,51	0

Impaktor flach – Hautdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P4-1	2,2	20	1,77	0,82	0
P4-2	2,2	100	8,83	4,11	0
P4-3	2,2	150	13,24	6,16	0

Tabelle A30:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, flach-runde Impaktorgeometrie, Hautdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Hautdicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Hautdicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach-rund (r = 55 mm) – Hautdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	1,6	5	0,44	0,28	0
P1-2	1,6	20	1,77	1,12	0
P1-3	1,6	50	4,41	2,79	0
P1-4	1,6	100	8,83	5,58	0
P2-1	1,4	5	0,44	0,31	0
P2-2	1,4	70	6,18	4,31	0
P2-3	1,4	140	12,36	8,62	0
P3-1	2,3	30	2,65	1,14	0
P3-2	2,3	100	8,83	3,78	0
P3-3	2,3	140	12,36	5,30	0
P4-1	1,2	40	3,53	3,07	0
P4-2	1,2	150	13,24	11,52	0

Tabelle A31:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, runde Impaktorgeometrie, Hautdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Hautdicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Hautdicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor rund (r = 18 mm) – Hautdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	1,9	5	0,44	0,24	0
P1-2	1,9	20	1,77	0,95	0
P1-3	1,9	40	3,53	1,91	0
P1-4	1,9	50	4,41	2,39	0
P2-1	2,0	10	0,88	0,45	0
P2-2	2,0	60	5,30	2,69	0
P2-3	2,0	80	7,06	3,59	0
P2-4	2,0	100	8,83	4,49	0
P3-1	1,8	5	0,44	0,25	0
P3-2	1,8	120	10,59	6,05	0
P3-3	1,8	140	12,36	7,06	1

Tabelle A32:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, spitze Impaktorgeometrie, Hautdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Hautdicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Hautdicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor spitz – Hautdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	1,9	5	0,44	0,23	0
P1-2	1,9	10	0,88	0,46	0
P1-3	1,9	15	1,32	0,69	0
P1-4	1,9	25	2,21	1,15	0
P1-5	1,9	40	3,53	1,84	0
P1-6	1,9	60	5,30	2,76	1
P2-1	1,7	5	0,44	0,26	0
P2-2	1,7	20	1,77	1,04	0
P2-3	1,7	50	4,41	2,60	1
P2-4	1,7	40	3,53	2,08	1
P3-1	1,9	10	0,88	0,47	0
P3-2	1,9	30	2,65	1,41	0
P3-3	1,9	40	3,53	1,88	0
P3-4	1,9	50	4,41	2,34	1

Tabelle A33:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, flache Impaktorgeometrie, Fettdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Fettdicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Fettdicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach – Fettdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	5,9	10	0,88	0,15	0
P1-2	5,9	25	2,21	0,37	0
P1-3	5,9	50	4,41	0,74	0
P1-4	5,9	80	7,06	1,19	0
P1-5	5,9	140	12,36	2,08	0
P2-1	8,4	5	0,44	0,05	0
P2-2	8,4	50	4,41	0,53	0
P2-3	8,4	100	8,83	1,06	0
P3-1	4,3	5	0,44	0,10	0
P3-2	4,3	70	6,18	1,45	0
P3-3	4,3	140	12,36	2,90	0
P4-1	5,6	20	1,77	0,32	0
P4-2	5,6	100	8,83	1,58	0
P4-3	5,6	150	13,24	2,37	0

Tabelle A34:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, flach-runde Impaktorgeometrie, Fettdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Fettdicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Fettdicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach-rund (r = 55 mm) – Fettdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	4,2	5	0,44	0,10	0
P1-2	4,2	20	1,77	0,42	0
P1-3	4,2	50	4,41	1,04	0
P1-4	4,2	100	8,83	2,09	0
P2-1	3,9	5	0,44	0,11	0
P2-2	3,9	70	6,18	1,60	0
P2-3	3,9	140	12,36	3,20	0
P3-1	4,9	30	2,65	0,55	0
P3-2	4,9	100	8,83	1,82	0
P3-3	4,9	140	12,36	2,55	0
P4-1	3,1	40	3,53	1,13	0
P4-2	3,1	150	13,24	4,25	0

Tabelle A35:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, runde Impaktorgeometrie, Fettdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Fettdicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Fettdicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor rund (r = 18 mm) – Fettdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	7,6	5	0,44	0,06	0
P1-2	7,6	20	1,77	0,23	0
P1-3	7,6	40	3,53	0,46	0
P1-4	7,6	50	4,41	0,58	0
P2-1	9,1	10	0,88	0,10	0
P2-2	9,1	60	5,30	0,58	0
P2-3	9,1	80	7,06	0,77	0
P2-4	9,1	100	8,83	0,97	0
P3-1	9,0	5	0,44	0,05	0
P3-2	9,0	120	10,59	1,18	0
P3-3	9,0	140	12,36	1,37	1

Tabelle A36:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, spitze Impaktorgeometrie, Fettdicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Fettdicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Fettdicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor spitz – Fettdicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	8,2	5	0,44	0,05	0
P1-2	8,2	10	0,88	0,11	0
P1-3	8,2	15	1,32	0,16	0
P1-4	8,2	25	2,21	0,27	0
P1-5	8,2	40	3,53	0,43	0
P1-6	8,2	60	5,30	0,65	1
P2-1	8,7	5	0,44	0,05	0
P2-2	8,7	20	1,77	0,20	0
P2-3	8,7	50	4,41	0,51	1
P2-4	8,7	40	3,53	0,41	1
P3-1	9,5	10	0,88	0,09	0
P3-2	9,5	30	2,65	0,28	0
P3-3	9,5	40	3,53	0,37	0
P3-4	9,5	50	4,41	0,47	1

Tabelle A37:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, flache Impaktorgeometrie, Muskeldicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Muskeldicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Muskeldicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach – Muskeldicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	5,1	10	0,88	0,17	0
P1-2	5,1	25	2,21	0,43	0
P1-3	5,1	50	4,41	0,87	0
P1-4	5,1	80	7,06	1,39	0
P1-5	5,1	140	12,36	2,43	0
P2-1	6,7	5	0,44	0,07	0
P2-2	6,7	50	4,41	0,66	0
P2-3	6,7	100	8,83	1,31	0
P3-1	9,0	5	0,44	0,05	0
P3-2	9,0	70	6,18	0,69	0
P3-3	9,0	140	12,36	1,37	0
P4-1	4,6	20	1,77	0,39	0
P4-2	4,6	100	8,83	1,93	0
P4-3	4,6	150	13,24	2,89	0

Tabelle A38:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, flach-runde Impaktorgeometrie, Muskeldicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Muskeldicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Muskeldicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor flach-rund (r = 55 mm) – Muskeldicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	6,9	5	0,44	0,06	0
P1-2	6,9	20	1,77	0,26	0
P1-3	6,9	50	4,41	0,64	0
P1-4	6,9	100	8,83	1,28	0
P2-1	7,2	5	0,44	0,06	0
P2-2	7,2	70	6,18	0,86	0
P2-3	7,2	140	12,36	1,73	0
P3-1	5,4	30	2,65	0,49	0
P3-2	5,4	100	8,83	1,64	0
P3-3	5,4	140	12,36	2,29	0
P4-1	13,8	40	3,53	0,26	0
P4-2	13,8	150	13,24	0,96	0

Tabelle A39:

Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, runde Impaktorgeometrie, Muskeldicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Muskeldicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Muskeldicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor rund (r = 18 mm) – Muskeldicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	5,1	5	0,44	0,09	0
P1-2	5,1	20	1,77	0,35	0
P1-3	5,1	40	3,53	0,70	0
P1-4	5,1	50	4,41	0,87	0
P2-1	5,3	10	0,88	0,17	0
P2-2	5,3	60	5,30	1,00	0
P2-3	5,3	80	7,06	1,33	0
P2-4	5,3	100	8,83	1,67	0
P3-1	7,4	5	0,44	0,06	0
P3-2	7,4	120	10,59	1,43	0
P3-3	7,4	140	12,36	1,67	1

Tabelle A40 – Versuchsergebnisse für einen Verbund aus Haut, Fett- und Muskelgewebe, spitze Impaktorgeometrie, Muskeldicke. Für jedes Experiment sind der Probenname, der Mittelwert der Muskeldicke, die Fallhöhe, der Energieeintrag, der Energieeintrag normiert auf die Muskeldicke sowie die Rissbildung (0 = kein Riss, 1 = Riss) angegeben.

Impaktor spitz – Muskeldicke					
Probenname	Mittelwert Dicke [mm]	Fallhöhe [cm]	Energie [J]	Energie/Dicke [J/mm]	Riss [0/1]
P1-1	4,5	5	0,44	0,10	0
P1-2	4,5	10	0,88	0,20	0
P1-3	4,5	15	1,32	0,30	0
P1-4	4,5	25	2,21	0,49	0
P1-5	4,5	40	3,53	0,79	0
P1-6	4,5	60	5,30	1,19	1
P2-1	5,9	5	0,44	0,08	0
P2-2	5,9	20	1,77	0,30	0
P2-3	5,9	50	4,41	0,75	1
P2-4	5,9	40	3,53	0,60	1
P3-1	4,2	10	0,88	0,21	0
P3-2	4,2	30	2,65	0,63	0
P3-3	4,2	40	3,53	0,84	0
P3-4	4,2	50	4,41	1,05	1

Literatur

- [1] Statistik Arbeitsunfallgeschehen 2018. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2019. <https://publikationen.dguv.de/zahlen-fakten/schwerpunkt-themen/3680/arbeitsunfallgeschehen-2018>
- [2] Interne Statistik. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2019
- [3] Statistik Schülerunfallgeschehen 2018. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2019. <https://publikationen.dguv.de/zahlen-fakten/schwerpunkt-themen/3666/statistik-zum-schuelerunfallgeschehen-2018>
- [4] *Madea, B.*: Traumatologie und gewaltsamer Tod. In: Praxis Rechtsmedizin: Befunderhebung, Rekonstruktion, Begutachtung. S. 83-228. Berlin, Springer 2007. https://doi.org/10.1007/978-3-540-33720-1_3
- [5] *Dettmeyer, R.B.; Schütz, H.F.; Verhoff, M.A.*: Forensische Traumatologie. In: Rechtsmedizin. Springer-Lehrbuch. S. 39-101. Berlin, Springer 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55022-5_5
- [6] *Mankowitz, S.L.*: Laceration Management. *J Emerg Med* 2017; 53:369-82. <https://doi.org/10.1016/j.jemermed.2017.05.026>
- [7] *Singer, A; Hollander, J.; Quinn, J.*: Evaluation and management of traumatic lacerations. *N Engl J Med* 1997; 337:1142-8. <https://doi.org/10.1056/NEJM199710163371607>
- [8] *Schnyder, I.*: Weichteilverletzungen. In: Praxis der Kinder- und Jugendtraumatologie. S. 498-514. Berlin, Springer, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12935-3>
- [9] *Sharkey, E.J.; Cassidy, M.; Brady, J.; Gilchrist, M.D.; NicDaeid, N.*: Investigation of the force associated with the formation of lacerations and skull fractures. *Int J Legal Med* 2012;126:835-44. <https://doi.org/10.1007/s00414-011-0608-z>
- [10] *Vardaxis, N.J.; Brans, T.; Boon, M.E.; Kreis, R.W.; Marres, L.M.*: Confocal laser scanning microscopy of porcine skin: implications for human wound healing studies. *J Anat* 1997;190:601-11. [doi:10.1046/j.1469-7580.1997.19040601.x](https://doi.org/10.1046/j.1469-7580.1997.19040601.x)
- [11] *Sullivan, T.; Eaglstein, W.; Davis, S.; Mertz, P.*: The pig as a model for human wound healing. *Wound Repair Regen.* 2001; 9:66-76.
- [12] *Ankersen, J.; Birkbeck, A.E.; Thomson, R.D.; Vanezis, P.*: Puncture resistance and tensile strength of skin simulants. *Proc Inst Mech Eng H* 1999; 213:493-501.
- [13] *Meyer, W.*: Bemerkungen zur Eignung der Schweinehaut als biologisches Modell für die Haut des Menschen. *Hautarzt* 1996;47:178-82. [doi:10.1007/s001050050399](https://doi.org/10.1007/s001050050399)
- [14] *Montagna, W.; Yun, J.S.*: The Skin of the Domestic Pig. *J Invest Dermatol* 1964; 42:11-21. [doi:10.1038/jid.1964.5](https://doi.org/10.1038/jid.1964.5)
- [15] *Mowafy, M.; Cassens, R.*: Microscopic structure of pig skin. *J Anim Sci* 1975; 41:1281-90.
- [16] *Meyer, W.; Neurand, K.; Radke, B.*: Collagen fibre arrangement in the skin of the pig. *J Anat* 1982;134:13948.
- [17] *Doerfel, S.*: Generierung von Grundlagen für die Simulation von Weichgewebeerletzungen. Ludwig-Maximilians-Universität München, 2014.
- [18] *Schick, S.; Leiderer, M.; Lanzl, F.; Graw, M.; Peldschus, S.*: Maximum tensile stress and strain of skin of the domestic pig – differences concerning pigs from organic and nonorganic farming. *Int J Legal Med* 2019;1-10. [doi:10.1007/s00414-019-02207-w](https://doi.org/10.1007/s00414-019-02207-w)
- [19] *Shergold, O.A.; Fleck, N.A.; Radford, D.*: The uniaxial stress versus strain response of pig skin and silicone rubber at low and high strain rates. *Int J Impact Eng* 2006; 32:1384-402. [doi:10.1016/j.ijimpeng.2004.11.010](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.11.010)
- [20] *Trotta, A.; Ní Annaidh, A.*: Mechanical characterisation of human and porcine scalp tissue at dynamic strain rates. *J Mech Behav Biomed Mater* 2019; 100:103381. [doi:10.1016/j.jmbbm.2019.103381](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103381)
- [21] *Pissarenko, A.; Yang, W.; Quan, H.; Brown, K.A.; Williams, A.; Proud, W.G.* et al. Tensile behavior and structural characterization of pig dermis. *Acta Biomater* 2019; 86:77-95. [doi:10.1016/j.actbio.2019.01.023](https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.01.023)

- [22] *Rose, E.H.*: Skin tension lines in the domestic pig. *Plast Reconstr Surg* 1976; 57:729-32.
- [23] *Lim, J.; Hong, J.; Chen, W.W.; Weerasooriya, T.*: Mechanical response of pig skin under dynamic tensile loading. *Int J Impact Eng* 2011; 38:130-5. [doi:10.1016/j.ijimpeng.2010.09.003](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.09.003)
- [24] *Wu, J.Z.; Dong, R.G.; Smutz, W.P.; Schopper, A.W.*: Nonlinear and viscoelastic characteristics of skin under compression: experiment and analysis. *Bio-med Mater Eng* 2003; 13:373-85.
- [25] *Caro-Bretelle, A.S.; Gountsop, P.N.; Lenny, P.; Leger, R.; Corn, S.; Bazin, I.* et al.: Effect of sample preservation on stress softening and permanent set of porcine skin. *J Biomech* 2015; 48:3135-41. [doi:10.1016/j.jbiomech.2015.07.014](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.07.014)
- [26] *Caro-Bretelle, A.S.; Lenny, P.; Leger, R.; Corn, S.; Bazin, I.; Bretelle, F.*: Constitutive modeling of stress softening and permanent set in a porcine skin tissue: Impact of the storage preservation. *J Biomech* 2016; 49:2863-9. [doi:10.1016/j.jbiomech.2016.06.026](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.06.026)
- [27] *Remache, D.; Caliez, M.; Gratton, M.; Dos Santos, S.*: The effects of cyclic tensile and stress-relaxation tests on porcine skin. *J Mech Behav Biomed Mater* 2018; 77:242-9. [doi:10.1016/j.jmbbm.2017.09.009](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.09.009)
- [28] *Wong, W.L.E.; Joyce, T.J.; Goh, K.L.*: Resolving the viscoelasticity and anisotropy dependence of the mechanical properties of skin from a porcine model. *Biomech Model Mechanobiol* 2016; 15:433-46. [doi:10.1007/s10237-015-0700-2](https://doi.org/10.1007/s10237-015-0700-2)
- [29] *Bissett, D.; McBride, J.*: The use of the domestic pig as an animal model of human dry skin and for comparison of dry and normal skin properties. *J Soc Cosmet Chem* 1983 ;326:317-26
- [30] *Barbero, A.M.; Frasc, H.F.*: Pig and guinea pig skin as surrogates for human in vitro penetration studies: a quantitative review. *Toxicol In Vitro* 2009; 23:1-13. [doi:10.1016/j.tiv.2008.10.008](https://doi.org/10.1016/j.tiv.2008.10.008)
- [31] *Comley, K.; Fleck, N.*: The compressive response of porcine adipose tissue from low to high strain rate. *Int J Impact Eng* 2012; 46:1-10. [doi:10.1016/j.ijimpeng.2011.12.009](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.12.009)
- [32] *Comley, K.; Fleck, N.A.*: A micromechanical model for the Young's modulus of adipose tissue. *Int J Solids Struct* 2010; 47:2982-90. [doi:10.1016/j.ijsolstr.2010.07.001](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.07.001)
- [33] *Alkhouli, N.; Mansfield, J.; Green, E.; Bell, J.; Knight, B.; Liversedge, N.* et al.: The mechanical properties of human adipose tissues and their relationships to the structure and composition of the extracellular matrix. *Am J Physiol Metab* 2013; 305:E1427-35. [doi:10.1152/ajpendo.00111.2013](https://doi.org/10.1152/ajpendo.00111.2013)
- [34] *Takaza, M.; Moerman, K.M.; Simms, C.K.*: Passive skeletal muscle response to impact loading: Experimental testing and inverse modelling. *J Mech Behav Biomed Mater* 2013; 27:214-25. [doi:10.1016/j.jmbbm.2013.04.016](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.04.016)
- [35] *Takaza, M.; Moerman, K.M.; Gindre, J.; Lyons, G.; Simms, C.K.*: The anisotropic mechanical behaviour of passive skeletal muscle tissue subjected to large tensile strain. *J Mech Behav Biomed Mater* 2013; 17:209-20. [doi:10.1016/j.jmbbm.2012.09.001](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.09.001)
- [36] *Comley, K.; Fleck, N.A.*: The toughness of adipose tissue: measurements and physical basis. *J Biomech* 2010; 43:1823-6. [doi:10.1016/j.jbiomech.2010.02.029](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.02.029)
- [37] *Chun, T.-H.*: Peri-adipocyte ECM remodeling in obesity and adipose tissue fibrosis. *Adipocyte* 2012; 1:89-95. [doi:10.4161/adip.19752](https://doi.org/10.4161/adip.19752)
- [38] *Van Loocke, M.; Lyons, C.G.; Simms, C.K.*: A validated model of passive muscle in compression. *J Biomech* 2006; 39:2999-3009. [doi:10.1016/j.jbiomech.2005.10.016](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.10.016)
- [39] *Van Loocke, M.; Lyons, C.G.; Simms, C.K.*: Viscoelastic properties of passive skeletal muscle in compression: stress-relaxation behaviour and constitutive modelling. *J Biomech* 2008; 41:1555-66. [doi:10.1016/j.jbiomech.2008.02.007](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.02.007)
- [40] *Geerligs, M.; Peters, G.W.M.; Ackermans, P.A.J.; Oomens, C.W.J.; Baaijens, F.P.T.*: Linear viscoelastic behavior of subcutaneous adipose tissue. *Biorheology* 2008; 45:677-88. [doi:10.3233/BIR-2008-0517](https://doi.org/10.3233/BIR-2008-0517)

- [41] *Geerligs, M.; Peters, G.W.M.; Ackermans, P.A.J.; Oomens, C.W.J.; Baaijens, F.P.T.*: Does subcutaneous adipose tissue behave as an (anti-)thixotropic material? *J Biomech* 2010; 43:1153-9.
[doi:10.1016/j.jbiomech.2009.11.037](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.11.037)
- [42] *Pietsch, R.; Wheatley, B.B.; Donahue, T.L.H.; Gilbrech, R.; Prabhu, R.; Liao, J.* et al.: Anisotropic compressive properties of passive porcine muscle tissue. *J Biomech Eng* 2014; 136:1-7.
[doi:10.1115/1.4028088](https://doi.org/10.1115/1.4028088)
- [43] *Song, B.; Chen, W.; Ge, Y.; Weerasooriya, T.*: Dynamic and quasi-static compressive response of porcine muscle. *J Biomech* 2007; 40:2999-3005.
[doi:10.1016/j.jbiomech.2007.02.001](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2007.02.001)
- [44] *Sommer, G.; Eder, M.; Kovacs, L.; Pathak, H.; Bonitz, L.; Mueller, C.* et al.: Multiaxial mechanical properties and constitutive modeling of human adipose tissue: A basis for preoperative simulations in plastic and reconstructive surgery. *Acta Biomater* 2013; 9:9036-48. [doi:10.1016/j.actbio.2013.06.011](https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.06.011)
- [45] *Van Sligtenhorst, C.; Cronin, D.S.; Wayne Brodland, G.*: High strain rate compressive properties of bovine muscle tissue determined using a split Hopkinson bar apparatus. *J Biomech* 2006; 39:1852-8.
[doi:10.1016/j.jbiomech.2005.05.015](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.05.015)
- [46] *Soetens, J.F.J.; van Vijven, M.; Bader, D.L.; Peters, G.W.M.; Oomens, C.W.J.*: A model of human skin under large amplitude oscillatory shear. *J Mech Behav Biomed Mater* 2018; 86:423-32.
[doi:10.1016/j.jmbbm.2018.07.008](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.07.008)
- [47] *Tan, K.; Cheng, S.; Jugé, L.; Bilston, L.E.*: Characterising skeletal muscle under large strain using eccentric and Fourier Transform-rheology. *J Biomech* 2015; 48:3788-95. [doi:10.1016/j.jbiomech.2015.08.025](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.08.025)
- [48] *Gras, L.L.; Laporte, S.; Mitton, D.; Crevier-Denoix, N.; Viot, P.*: Tensile Tests on a Muscle: Influence of Experimental Conditions and of Velocity on its Passive Response. *IRCOBI Conf.* 2012, 2012, p. 515-23
- [49] *Saukko, P.; Knight, B.*: *Knight's Forensic Pathology*. 3. Auflage. London: CRC Press; 2004.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b13642>

Anhang Statistik

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung Berichtsjahr 2018 Meldepflichtige Arbeitsunfälle (UART 1-4)*

Verletzungsart		Meldepflichtige Unfälle ¹⁾	
		Anzahl	%
Wunde, Zerreißung	Zerreißung o.n.A.	23.461	2,7%
	oberflächliche Zerreißung	170.905	19,5%
	Eröffnung Gelenke/Körperhöhlen	14.455	1,6%
	teilweise Zerreißung	17.670	2,0%
	vollständige Zerreißung	33.807	3,9%
	Zermalmung	1.003	0,1%
	Eindringen von Fremdkörpern	15.397	1,8%
	Imprgnationsverletzung	- ²⁾	- ²⁾
	Schussverl. ohne Knochenbet.	- ²⁾	- ²⁾
	Traumatische Amputation	2.276	0,3%
	Gesamt	279.067	31,8%
Sonstige	Sonstige	598.131	68,2%
	Gesamt	598.131	68,2%

*) Betrachtung aller Versichertengruppen und aller Arbeitsunfälle: UART1-4

¹⁾ Da es sich hierbei um eine hochgerechnete Stichprobenstatistik handelt, können Hochrechnungsunsicherheiten und Rundungsfehler auftreten.

²⁾ Wegen zu geringer Fallzahlen nicht separat ausweisbar.

Quelle: Referat Statistik, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)
05.02.2020

**Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung e.V. (DGUV)**

Glinkastraße 40

10117 Berlin

Telefon: 030 288763800

Fax: 030 288763808

E-Mail: info@dguv.de

Internet: www.dguv.de