

Aus dem Institut für Rechtsmedizin
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Vorstand: Prof. Dr. med. Matthias Graw

Zugfestigkeit und Dehnbarkeit der Haut unter dynamischen Bedingungen am Modell Schwein

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität
zu München

vorgelegt von
Miriam Leiderer
aus München

2020

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. med. Matthias Graw

Mitberichterstatter: PD Dr. med. Denis Ehrl
PD Dr. med. Markus Reinholtz

Betreuung durch die promovierte Mitarbeiterin: Dr. med. Sylvia Schick

Dekan: Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel

Tag der mündlichen Prüfung: 19.11.2020

Meinen Eltern.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Material und Methoden	5
2.1 Versuchsaufbau	5
2.2 Materialbeschaffung und Präparation der Proben	8
2.3 Versuchsdurchführung	9
2.3.1 Ausschlusskriterien	11
2.3.2 Aufbereitung der Rohdaten	11
2.4 Versuchsparameter	13
2.4.1 Dehnrate	13
2.4.2 Lagerungszeit	14
2.4.3 Zugrichtung	15
2.4.4 Herkunft der Schweinehaut	16
2.5 Zielparameter	16
2.5.1 Reißspannung	16
2.5.2 Reißdehnung	16
2.6 Versuchsmatrix	17
2.7 Auswertung	19
2.7.1 Gesamtbetrachtung	19
2.7.2 Herkömmliche Mastschweine und Bio-Schweine	19
2.7.3 Normierung	20
3 Ergebnisse	21
3.1 Gesamtbetrachtung	21
3.2 Herkömmliche Mastschweine	25
3.2.1 Normierte Ergebnisse	28

3.3 Bio-Schweine	30
3.3.1 Normierte Ergebnisse	32
4 Diskussion	35
5 Zusammenfassung	45
A Übersicht aller Versuchsergebnisse	47
B Tabellarische Darstellung der Mediane und Spannweiten	53
C Quelltext des Programms zur Datenextraktion	57

Abbildungsverzeichnis

1	Versuchsaufbau in der Vorbereitungsphase	7
2	Stanze nach DIN 53504	8
3	Eingespannter Versuchskörper	9
4	Probe vor und nach der Versuchsdurchführung	10
5	Zonen des Präparats	11
6	Schematische Darstellung der Zitzen und Hautspaltlinien auf der exzidierten Bauchhaut mit beispielhaften Positionen der Stanze	15
7	Verlauf der Spannung und Dehnung vom Auftreffen auf den oberen Stoßdämpfer bis kurz nach dem Zerreißen der Probe	17
8	Vergleich der Messverteilungen zwischen den Dehnraten	21
9	Vergleich der Messverteilungen zwischen den Lagerungszeiten	22
10	Vergleich der Messverteilungen zwischen den Zugrichtungen	22
11	Vergleich der Messverteilungen bei den unterschiedlichen Individuen . .	23
12	Vergleich der Messverteilungen zwischen herkömmlichen Mastschweinen und Bio-Schweinen	24
13	Reißspannung und -dehnung aller durchgeführten Versuche: Herkömmliche Mastschweine und Bio-Schweine	24
14	Herkömmliche Mastschweine: Vergleich der Messverteilungen zwischen den Dehnraten	25
15	Individuum Nr. 4: Vergleich der Messverteilungen zwischen den Lagerungszeiten	26
16	Herkömmliche Mastschweine: Vergleich der Messverteilungen zwischen den Zugrichtungen	26
17	Herkömmliche Mastschweine: alle durchgeführten Versuche, farblich markiert nach Zugrichtung	27

18	Bio-Schweine: Vergleich der Messverteilungen zwischen den Dehnraten	30
19	Individuum Nr. 5: Vergleich der Messverteilungen zwischen den Lage- rungszeiten	31
20	Bio-Schweine: Vergleich der Messverteilungen zwischen den Zugrichtungen	31
21	Bio-Schweine: alle durchgeführten Versuche, farblich markiert nach Zug- richtung	32

Tabellenverzeichnis

1	Beziehung von Fallhöhe zu Geschwindigkeit und nomineller Dehnrate	14
2	Versuchsmatrix aufgegliedert nach herkömmlichen Mastschweinen und Bio-Schweinen	18
3	Normierte Werte herkömmliche Mastschweine	29
4	Normierte Werte Bio-Schweine	33
5	Vergleich der eigenen Ergebnisse mit dynamischen Zugversuchen mit menschlicher Haut aus der Literatur	40
6	Übersicht über die durchgeführten Versuche	47
7	Reißspannung und -dehnung in Abhängigkeit vom Individuum	53
8	Reißspannung und -dehnung in Abhängigkeit von Zugrichtung, Fallhöhe und Lagerungszeit	54
9	Herkömmliche Mastschweine - Reißspannung und -dehnung in Abhängigkeit von Zugrichtung und Fallhöhe	55
10	Bio-Schweine - Reißspannung und -dehnung in Abhängigkeit von Zugrichtung und Fallhöhe	56

1. Einleitung

In den vergangenen Jahren wurde in der Fahrzeugsicherheitsforschung immer mehr dazu übergegangen, Unfälle mit computergenerierten Mensch-Modellen, sogenannten Finite-Elemente-Modellen zu simulieren (??). Diese haben im Vergleich zu konventionellen Crash-Tests bzw. Simulationen mit Anthropomorphic Test Devices (sogenannten Dummies) neben der Materialersparnis den Vorteil, dass die verschiedenen Gewebe des menschlichen Körpers mit ihren individuellen Materialeigenschaften sehr detailliert modelliert werden können.

Das Anwendungsgebiet der Finite-Elemente-Modelle des Menschen ist aber grundsätzlich nicht nur auf die Crashtest-Simulation beschränkt. Es sind auch in der Industrie Einsatzgebiete denkbar, denn an Arbeitsplätzen, an welchen Menschen mit Robotern zusammenarbeiten (sogenannte kollaborierende Roboter) kann es durch menschliche oder technische Fehler sehr leicht zu Verletzungen kommen (?). Auch um diese Risiken zu beurteilen, könnten Finite-Elemente-Modelle zum Einsatz kommen.

Der Haut kommt dabei eine besondere Rolle zu. Die oberflächlichen Verletzungen der Haut wie Abschürfungen, Hämatome und Quetsch-Riss-Wunden haben mit über 20 % den zahlenmäßig größten Anteil an allen meldepflichtigen Arbeits- und Wegeunfällen (?).

Während aber eine Verletzung von Knochen oder inneren Organen grundsätzlich nicht zu tolerieren ist, ist nicht jede Verletzung der Haut gleich zu beurteilen. Laut Empfehlung des Instituts ? sind bei Kollisionen mit kollaborierenden Robotern Hautabschürfungen und einfache Hämatome als vertretbare Bagatellverletzungen einzustufen, eine Quetsch-Riss-Wunde muss aber durch eine adäquate Gestaltung des Arbeitsplatzes unbedingt vermieden werden.

Um diese Risiken durch Simulation mit Finite-Elemente-Modellen realitätsnah abschätzen zu können, ist es notwendig, belastbare Daten für die mechanischen Eigenschaften der Haut zu generieren. Insbesondere ist es in Hinblick auf Riss-Quetsch-Wunden

wichtig zu wissen, bei welcher Krafteinwirkung die Haut intakt bleibt und bei welcher Krafteinwirkung sie reißt.

Die Verwendung von menschlicher Haut zur Verletzungssimulation ist ethisch problematisch, daher wird das Schwein vielfach als Modell für menschliche Haut herangezogen. Für die Eignung insbesondere des hellhäutigen Hausschweins für diesen Zweck gibt es verschiedene Gründe.

Die meisten Säugetiere haben ein dichtes Fell, welches durch die Vielzahl an Haarfollikeln und den Schutz vor Umwelteinflüssen die Eigenschaften der Haut bestimmt (?). Das Schwein dagegen ist eines der wenigen Säugetiere ohne Fell. Dadurch ist vor allem die Haut hellhäutiger Hausschweine der menschlichen Haut strukturell sehr ähnlich (?).

Die Epidermis ist ähnlich aufgebaut (?). Ihre Dicke (mit Stratum corneum) beim Schwein ($77 - 113 \mu\text{m}$) entspricht relativ genau der beim Menschen ($75 - 97 \mu\text{m}$). Sie fällt im Vergleich zur Dicke der Dermis am Abdomen des Schweins ($1,5 - 3,5 \text{ mm}$) nicht ins Gewicht (??). Die Dermis des Hausschweins ist etwas dicker als die des Menschen (?). Die Haut des Abdomens ist vergleichsweise dünn und kommt damit den Verhältnissen beim Menschen am nächsten (?).

Die Dermis hat beim Hausschwein wie beim Menschen einen klaren zweischichtigen Aufbau. Die Kollagenfasern verlaufen im Stratum reticulare netzartig in Bündlen parallel zur Hautoberfläche oder leicht schräg von der Hypodermis zur Epidermis, und bevorzugt parallel zu den Hautspaltlinien. Das trifft sowohl beim Menschen (?) als auch beim hellhäutigen Hausschwein zu (?).

Das Kollagen ist das wichtigste Strukturprotein im Bindegewebe der Säugetiere. Der vorherrschende Kollagen-Typ in der Haut sowohl des Menschen als auch des Hausschweins ist Typ 1 (?), die Aminosäuresequenzen der N-terminalen Peptidketten stimmen zu über 80 % überein (?) und die Durchmesser der Fibrillen sind mit $0,06 - 0,1 \mu\text{m}$ beim Schwein gegenüber $0,07 - 0,1 \mu\text{m}$ beim Menschen fast gleich (?).

Die abdominalen Hautspaltlinien (Langer-Linien) verlaufen beim Menschen senkrecht zur Wirbelsäule, beim Schwein verlaufen sie parallel zur Wirbelsäule (??).

Die Hauptfaserrichtung der Kollagenfasern verläuft sowohl beim Menschen als auch beim hellhäutigen Hausschwein in Richtung der Hautspaltlinien (?). Die elastischen Fasern folgen in ihrer Ausrichtung weitgehend den Kollagenfasern (?). Kollagenfasern und elastische Fasern bestimmen maßgeblich das Dehnungsverhalten der Haut; durch den Zusammenhang der Kollagenfaserrichtung mit der Richtung der Hautspaltlinien sind die Dehnungseigenschaften der Haut von der Zugrichtung abhängig (?). Hyaluronsäure und Uronsäure, weitere Komponenten der extrazellulären Matrix, scheinen dagegen

keinen signifikanten Einfluss auf die Dehnungseigenschaften zu besitzen (?).

Durch Vergleich von unbehandelten Hautproben mit aus ihnen durch enzymatische Zerstörung aller anderen Proteine gewonnenen Kollagenfilmen konnte in der Vergangenheit festgestellt werden, dass das Kollagen vor allem zur Steifigkeit der Haut beiträgt (?). Steifigkeit bedeutet hier eine geringe Dehnung bei hoher Krafteinwirkung. Isolierte elastische Fasern besitzen eine exponentielle Spannungs-Dehnungs-Kurve. Sie reagieren bereits auf geringe Krafteinwirkung mit hoher Dehnung und zerreißen im Versuch meist erst bei einer Dehnung von über 100 % (?).

Das Dehnungsverhalten der Haut bei niedrigen Geschwindigkeiten ist hinreichend erforscht. In quasi-statischen Zugversuchen mit Haut von Kaninchen wurde gezeigt, dass die Dehnung der Dermis in zwei Phasen abläuft. Zunächst richten sich die Kollagenfibrillen entlang der Krafteinwirkung aus und werden begradigt. In der zweiten Phase überwiegt die Verformung durch Delamination (d.h. durch das Lösen von Quervernetzungen) und Längsbewegung der Fibrillen gegeneinander. Zu einem geringeren Anteil findet gleichzeitig eine elastische Dehnung der Fibrillen statt (?).

Es wurden in der Vergangenheit darüber hinaus quasi-statische Zugversuche sowohl mit menschlicher Haut (???????) als auch mit Schweinehaut (??) durchgeführt. Bei den Quellen über quasi-statische Zugversuche mit humaner Haut werden Reißdehnungen zwischen 17 % und 207 % und Reißspannungen zwischen 2,9 MPa und 118,2 MPa berichtet. Die Ergebnisse von ? mit Schweinehaut liegen mit Reißdehnungen von 27 - 118 % und Reißspannungen von 5 - 30 MPa grob in einer ähnlichen Größenordnung, während bei ? die Versuche nicht bis zum Zerreißen durchgeführt wurden.

Im dynamischen Bereich sind die vorhandenen Daten weniger umfangreich. Inwie weit die Ergebnisse zum zeitlichen Ablauf der Verformung bei quasi-statischen Zugversuchen auf dynamische Zugversuche übertragbar sind, ist nicht bekannt.

?, ? und ? haben dynamische Zugversuche mit menschlicher Haut durchgeführt, wobei sich die Ergebnisse von ? und ? um den Faktor 10 von denjenigen von ? unterscheiden. Für dynamische Versuche mit Schweinehaut gibt es bislang nur eine Quelle, dabei wurden die Versuche aber nicht bis zum Zerreißen durchgeführt (?).

Es ist aus diesen Gründen für die Prävention von Verletzungen auf Basis einer angemessenen Simulation notwendig, mehr Daten zum mechanischen Verhalten der Haut unter dynamischen Bedingungen zu generieren.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, durch eine ausreichend hohe Probenzahl folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Reißspannungen und Reißdehnungen treten beim Zerreißen von Schweinhaut in dynamischen Zugversuchen auf?
- Wie unterscheiden sich diese Ergebnisse in unterschiedlichen Zugrichtungen und je nach Herkunft des Schweins (herkömmliches Mastschwein oder Bio-Schwein), und welchen Einfluss haben Dehnrate und Lagerungszeit?

2. Material und Methoden

2.1 Versuchsaufbau

Die Zugprüfung wurde mithilfe eines eigens für solche Versuche konstruierten 3,65 m hohen Fallturms durchgeführt (siehe Abb. 1). Dieser besteht aus vier vertikalen Schienen, zwei beweglichen Fallschlitten, einer Seilwinde und den Messvorrichtungen. Die Schienen sind auf einer quadratischen Grundfläche angeordnet. Je ein Schlitten wird von zwei diagonal gegenüberliegenden Schienen geführt. Die beiden Schlitten werden in der Ausgangsposition von Elektromagneten, welche an der Seilwinde befestigt sind, ca. 20 cm höhenversetzt gehalten. Es befindet sich an jedem Schlitten eine Haltevorrichtung, sodass eine Probe zwischen die beiden Schlitten eingespannt werden kann.

Zwischen dem unteren Schlitten und der Einspannung für die Probe befindet sich ein Kraftsensor (Typ Kistler 9321 B, Messbereich: $\pm 10 \text{ kN}$), der alle auf die Probe wirkenden Zugkräfte aufnimmt. Die Wegmessung erfolgt durch einen Stabsensor zwischen den beiden Schlitten (Typ WA-Electronic, Messbereich: 0 - 300 mm), der zu jedem Zeitpunkt den Abstand zwischen den Schlitten misst. Ein Abstandhalter aus Holz ist am oberen Schlitten befestigt und verhindert, dass sich die Schlitten im freien Fall annähern. Der Luftwiderstand ist bei den verwendeten Fallhöhen zu vernachlässigen. Der Reibungsverlust zwischen Schlitten und Schienen kann minimiert, aber nicht vollständig aufgehoben werden. Er kann als weitgehend konstant angenommen werden, denn die Leitschienen wurden vor jedem Versuch in gleicher Weise gereinigt und geölt. Sämtliche von den Sensoren gelieferten Daten werden von einem Datenlogger binär auf handelsüblichen CompactFlash®-Speicherkarten aufgezeichnet.

Eine Seilwinde bringt die Versuchsanordnung mit Hilfe von drei Elektromagneten auf die gewünschte Höhe. Die Höhe ist dabei definiert als Abstand zwischen aktueller Position des oberen Schlittens und Stoßdämpfern, die auf halber Höhe des Turms an den Leitschienen des oberen Schlittens angebracht sind. Die Stoßdämpfer besitzen

einen Federweg von 7 cm. Um nach Ablauf des jeweiligen Versuchs den freien Fall des unteren Schlittens abzufedern, sind an dessen Leitschienen baugleiche Stoßdämpfer auf Bodenniveau vorhanden.

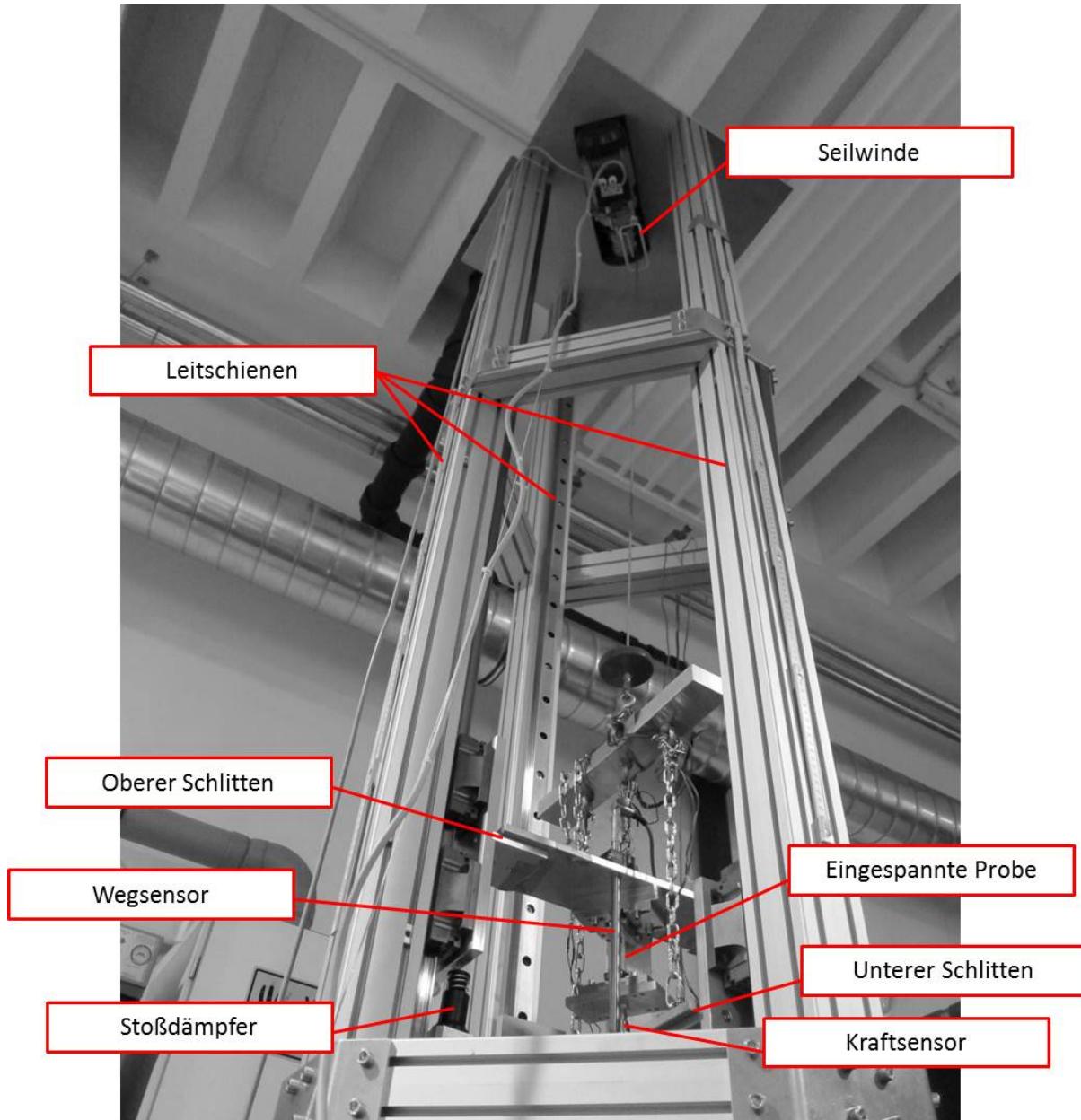


Abbildung 1: Versuchsaufbau in der Vorbereitungsphase. Die eingespannte Probe ist hier teilweise vom Wegsensor verdeckt. Die Schlitten werden von Elektromagneten gehalten, außerdem liegt der obere Schlitten auf seinen Stoßdämpfern auf (davon ist der linke im Bild sichtbar). Durch diesen Stoßdämpfer wird beim späteren Versuch der obere Schlitten abgebremst, während der untere Schlitten weiter fällt.

2.2 Materialbeschaffung und Präparation der Proben

Direkt am Tag der Schlachtung wird vom Metzger von der Mittellinie ausgehend ein ca. 40 cm langes und 30 cm breites Stück Bauchhaut mitsamt der gesamten anhaftenden Subkutis entnommen. Dann wird die Haut sofort luftdicht in Frischhaltefolie verpackt und bis zum Versuchstag im Kühlschrank bei 6 - 8 °C gelagert. Auf eine Lagerung in Kochsalzlösung wird verzichtet, da dies bei anderen Bindegeweben zu einer deutlichen Veränderung der biomechanischen Eigenschaften führt (?).

An den folgenden beiden Tagen wird zu Beginn des jeweiligen Versuchstages das Hautstück vorbereitet. Dafür wird sämtliches Fettgewebe mit einem Skalpell vorsichtig abpräpariert, ohne dabei das Bindegewebe der Dermis zu beschädigen. Danach wird das Hautstück spannungsfrei auf einem Schneidbrett aus Kunststoff positioniert und die Haut wieder mit Frischhaltefolie bedeckt, um ein Austrocknen zu verhindern.

Unmittelbar vor Durchführen eines Versuchs wird mit einer Stanze aus Metall und einem Vorschlaghammer der hantelförmige Versuchskörper ausgestanzt. Es wird die Form nach DIN 53504 verwendet, ursprünglich entwickelt zur Zugprüfung von Kautschuk und Elastomeren (siehe Abb. 2). Diese Form hat mit einer Gesamtlänge von 75 mm und einer Breite von 12,5 mm eine kleine Größe, sodass wenig Material verbraucht wird und eine große Zahl von Proben aus dem gleichen Hautstück entnommen werden kann. Durch die große Auflagefläche an den Enden reißt die Form im Vergleich zu anderen Alternativen selten aus der Halterung.

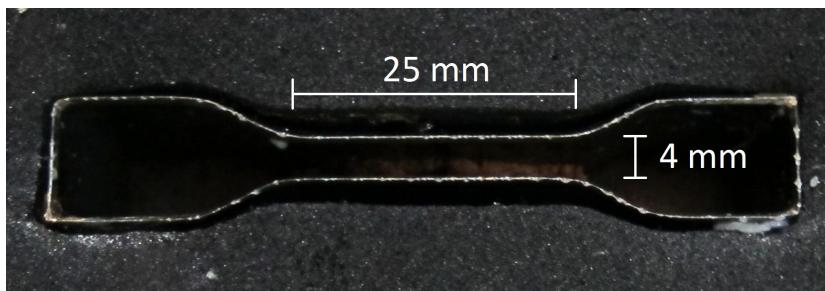


Abbildung 2: Stanze nach DIN 53504

Die Dicke jeder einzelnen Probe wird mit einem Lineal auf 0,5 mm genau gemessen und dokumentiert. Eine genauere Messung erscheint aufgrund der Verformbarkeit der Haut und des makroskopisch unscharfen Übergangs zwischen Dermis und Subcutis nicht sinnvoll.

Auf einer Zeichnung wird vor jedem Versuch der genaue Entnahmestand und die Aus-

richtung der Stanze festgehalten. Die Zitzen sind parallel zur Wirbelsäule angeordnet, und auch die Hautspaltlinien verlaufen parallel zur Wirbelsäule. Somit kann die Ausrichtung der Stanze in Bezug auf die Hautspaltlinien direkt abgelesen werden.

Eine Prökonditionierung der Proben ist anders als bei quasi-statischen Zugversuchen nicht notwendig, da das Dehnungsverhalten bei dynamischen Dehngeschwindigkeiten nicht von einer Prökonditionierung beeinflusst wird (?).

2.3 Versuchsdurchführung

Die so vorbereitete Probe wird exakt vertikal an beiden Seiten im Abstand von 1,3 cm zur Kante in die Halterungen eingespannt, welche ihrerseits am oberen und unteren Schlitten befestigt sind (siehe Abb. 3). Die Probe ist damit die einzige mechanische Verbindung zwischen den beiden Schlitten. Es muss die gerade, aber spannungsfreie Befestigung der Probe gewährleistet sein. Zeigt sich in der Startposition ein Ausschlag des Kraftsensors, so weist das auf eine Vorspannung der Probe hin und sie muss neu eingespannt werden.

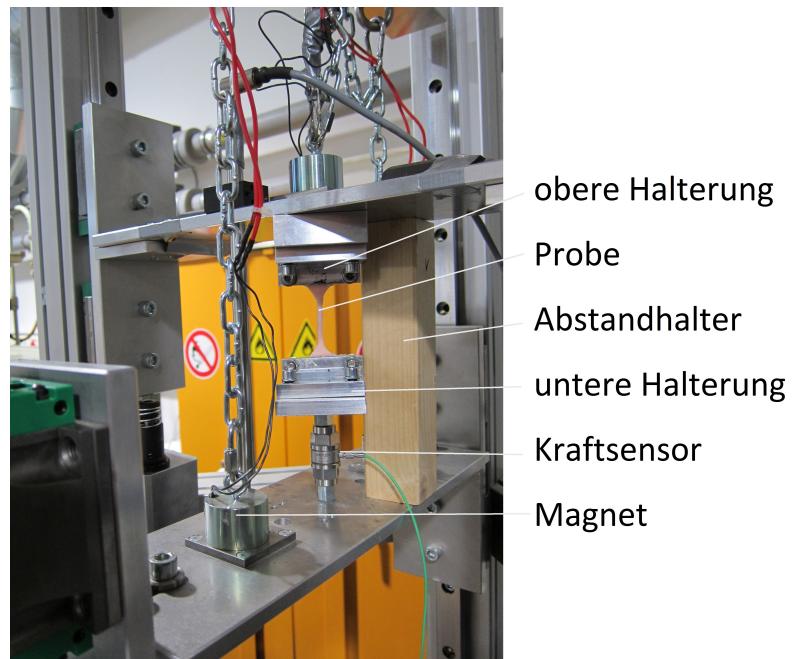


Abbildung 3: Startposition, mit eingespannter Probe. Die Halterungen verdecken oben und unten jeweils 1,3 cm der Probe.

Beide Schlitten und die Probe werden durch drei Elektromagneten und die Seilwinde auf die gewünschte, an den Leitschienen markierte Höhe gezogen.

Durch einen einzigen Knopfdruck werden dann gleichzeitig die Elektromagneten abgeschaltet und sämtliche Messungen gestartet. Die Schlitten gleiten im freien Fall die Leitschienen hinab. Ein Datenlogger zeichnet währenddessen die von den Sensoren aufgenommenen Daten auf einer CompactFlash®-Speicherplatte auf.

Im freien Fall befindet sich die Probe im entspannten Zustand, denn beide Schlitten werden durch die Erddanziehungskraft gleichmäßig beschleunigt. Es wirkt keine Kraft auf die Probe, und der untere Schlitten legt in Bezug auf den oberen Schlitten keinen Weg zurück. Sobald der obere Schlitten durch die Stoßdämpfer abrupt gestoppt wird, bewirkt das Gewicht des unteren Schlittens die Dehnung der Probe. Die dabei auf die Probe wirkende Kraft sowie die Dehnung der Probe steigen solange, bis das Material letztendlich versagt und die Probe zerreißt. Danach ist keine weitere Kraft mehr messbar.

Die Probe wird nach dem Versuch auf die vorher festgelegten Ausschlusskriterien überprüft (siehe unten). Ist sie ordnungsgemäß gerissen, wird der Versuch in die Studie eingeschlossen (siehe Abb. 4). Die aufgezeichneten Rohdaten werden dann von der Speicherplatte auf einen PC übertragen, kurz grafisch auf Plausibilität überprüft und unter einer laufenden Nummer als Textdatei abgespeichert.



Abbildung 4: Probe vor und nach der Versuchsdurchführung

2.3.1 Ausschlusskriterien

Wenn eine Probe im breiten Bereich, der nur dem Einspannen in den Versuchsaufbau dient, oder im schrägen Übergang reißt, gilt der Versuch als nicht auswertbar (siehe Zone a und b in Abb. 5). Das gleiche gilt, wenn sich bei Durchsicht der aufgezeichneten Daten eine Verschiebung des Nullpunktes des Kraftsensors oder Kraftausschläge während des freien Falls zeigen, da das auf eine Vorspannung der Probe bzw. auf eine Verschmutzung der Leitschienen hinweist.

Wenn ein Versuch versehentlich mit einer anderen Fallhöhe als den definierten durchgeführt wurde, ist der Versuch keiner der Versuchsreihen zuzuordnen und er fließt ebenfalls nicht in die Auswertung mit ein.

Bei sechs Versuchen wurde erst nach Vergabe der laufenden Nummer festgestellt, dass der Versuch ungültig war. Daher sind die Nummern 5, 22, 23, 32, 37 und 55 nicht vergeben, und die Nummerierung der 89 Proben reicht bis Nr. 95 (siehe Anhang A).

Insgesamt wurden rund 180 Versuche durchgeführt, von welchen 89 in die Auswertung eingeschlossen werden konnten.

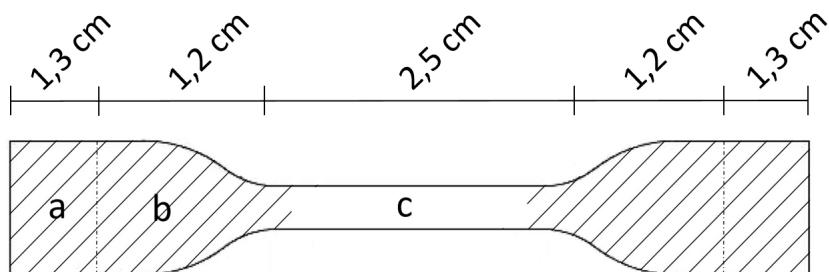


Abbildung 5: Zonen des Präparats. Die schraffierte Bereiche dienen lediglich der besseren Verankerung der Probe in der Halterung und sind daher nicht Teil des Versuchs. a) Hier ist die Probe in die Halterung geklemmt. b) Übergangsbereich. Wenn die Probe beim Versuch hier reißt, gilt der Versuch als nicht auswertbar. c) Eigentlicher Versuchskörper. Nur wenn die Probe in diesem Bereich reißt, wird der Versuch in die Auswertung eingeschlossen.

2.3.2 Aufbereitung der Rohdaten

Die Messdaten der einzelnen Versuche werden auf den PC übertragen und als Textdateien gespeichert. Aus diesen Daten müssen dann die Werte der Zielparameter (Reißspannung und Reißdehnung) schrittweise berechnet werden. Zu diesem Zweck wurde von

der Autorin selbst in der Programmiersprache Pascal ein Programm implementiert. Der Quelltext ist in Anhang C zu finden.

Dieses Programm schneidet zunächst die Messdaten nach Ablauf des eigentlichen Versuchs ab, um nicht den Ausschlag des Kraftsensors beim Aufprall des unteren Schlittens am Boden als falsches Maximum zu werten. Das Kraftmaximum in Bit ($F[bit]$) entspricht der Reißkraft. Dieses wird durch direkten Vergleich der gemessenen Einzelwerte ermittelt. Das Wegmaximum in Bit ($L[bit]$) wird berechnet, indem die Differenz gebildet wird zwischen dem zum Zeitpunkt des Kraftmaximums aufgenommenen Wert und dem im freien Fall vor Beginn der Dehnung gemessenen Wert. Aus dem Wegmaximum wird später die Reißdehnung berechnet.

Die Umrechnung der Einheiten erfolgt in Microsoft Excel 2010®. Um aus Bit Newton bzw. Millimeter zu erhalten, werden folgende beiden Formeln verwendet, welche sich aus den Datenblättern der Sensoren ergeben (??):

$$F[N] = \frac{F[bit] \cdot 8 \cdot 200}{2^{16}}$$

$$L[mm] = \left(\frac{L[bit] \cdot 8}{2^{16}} \cdot 2,83207 - 0,5 \right) \cdot \frac{200}{9,5}$$

Als Reißspannung (σ) bezeichnet man die maximal gemessene Kraft (F_{max}) bezogen auf die Querschnittsfläche. Dabei ist die Breite der Proben durch die Stanze auf 4 mm festgelegt, die Dicke (d) wird vor der Versuchsdurchführung bei jeder Probe einzeln gemessen und liegt zwischen 1,5 und 3,5 mm. Wenn eine Probe nicht über die ganze Länge die gleiche Dicke hat, wird an den beiden Enden und in der Mitte der Probe gemessen und der Durchschnitt dieser drei Werte verwendet.

$$\sigma = \frac{F_{max}}{4mm \cdot d}$$

Die Reißspannung markiert den Zeitpunkt des Materialversagens: die Probe reißt. Die zum gleichen Zeitpunkt aufgenommene Dehnung stellt die Reißdehnung (λ) dar. Sie errechnet sich aus der Längenveränderung (ΔL) der Probe beim Zerreißen in Bezug auf die ursprüngliche Länge (L_0). L_0 ist durch die Stanze vorgegeben als 25 mm (entspre-

chend Bereich c in Abbildung 5; Bereich b dehnt sich durch die größere Breite kaum und kann deshalb vernachlässigt werden). ΔL erhält man, indem man die ursprüngliche Länge von derjenigen Länge abzieht, die zu einem bestimmten Zeitpunkt durch den Stabsensor gemessen wird (L).

$$\Delta L = L - 25\text{mm}$$

$$\lambda = \frac{L - 25\text{mm}}{25\text{mm}}$$

2.4 Versuchspараметer

2.4.1 Dehnrate

Eine bestimmte Fallhöhe im Versuchsaufbau korrespondiert mit einer durch die Erdbeschleunigung von $9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ definierten Geschwindigkeit und Dehnrate. Die Dehngeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit des unteren Schlittens beim abrupten Abbremsen des oberen Schlittens. Die Dehnrate ist diese Geschwindigkeit in Bezug auf die Ausgangslänge der Probe. Da die Ausgangslänge mit 25 mm ($\frac{1}{40}$ Meter) konstant ist, stehen Geschwindigkeit und Dehnrate stets in einem Verhältnis von 1 : 40.

Bei den im Folgenden bezeichneten Geschwindigkeiten und Dehnaten (siehe Tabelle 1) handelt es sich nicht um empirische, sondern um aus der Fallhöhe und der Erdbeschleunigung berechnete Werte. Sie sind daher nur als Näherungswerte zu betrachten.

Aus zwei Gründen sind die tatsächlichen Dehnaten etwas niedriger:

- Durch Reibung der Schlitten an den Leitschienen ist auch bei sorgfältiger Reinigung und Ölung ein gewisser Geschwindigkeitsverlust zu erwarten.
- Ein Stoßdämpfer mit Federweg 7 cm bremst den oberen Schlitten ab. Dies ist notwendig, um den Fallturm bei der Versuchsdurchführung nicht zu beschädigen. Daher ist die Dehngeschwindigkeit im ersten Moment bis zum Stillstand des oberen Schlittens etwas geringer.

Tabelle 1: Beziehung von Fallhöhe zu Geschwindigkeit und nomineller Dehnrate

Fallhöhe (cm)	Geschwindigkeit ($\frac{m}{s}$)	Nominelle Dehnrate ($\frac{1}{s}$)
14,4	1,7	67
46,5	3,0	121
151,8	5,5	218

Die in Tabelle 1 angegebenen Fallhöhen und Dehnraten sind von der Dissertation von Sarah ? übernommen und sind so gewählt, dass die Studie außerdem weitgehend mit den dynamischen Zugversuchen mit menschlicher Haut von ? und ? vergleichbar ist.

Dabei ist zu beachten, dass bei ? die Geschwindigkeit von $3,0 \frac{m}{s}$, jedoch keine Dehnraten und auch keine Abmessungen der Proben angegeben sind, sodass die Resultate nur unter der Annahme einer ähnlichen Länge der Proben vergleichbar sind. Bei ? hingegen wurden Dehngeschwindigkeiten zwischen $1 \frac{m}{s}$ und $2 \frac{m}{s}$ und eine rund-konkave Hantelform der Länge 3 cm gewählt, was annäherungsweise mit der hier verwendeten Stanze nach DIN 53504 (siehe Abb. 2) mit gerader Länge 2,5 cm vergleichbar sein sollte.

2.4.2 Lagerungszeit

Die Versuche wurden zu etwa gleichen Teilen am 1. oder am 2. Tag nach der Schlachtung durchgeführt. Bisher ist in der Literatur nicht beschrieben, ob sich das Dehnungsverhalten von Haut durch die reine Aufbewahrung signifikant verändert.

2.4.3 Zugrichtung

Es wurden drei verschiedene Zugrichtungen getestet: senkrecht und parallel zu den Hautspaltlinien und diagonal im Winkel von 45° (siehe Abb. 6).

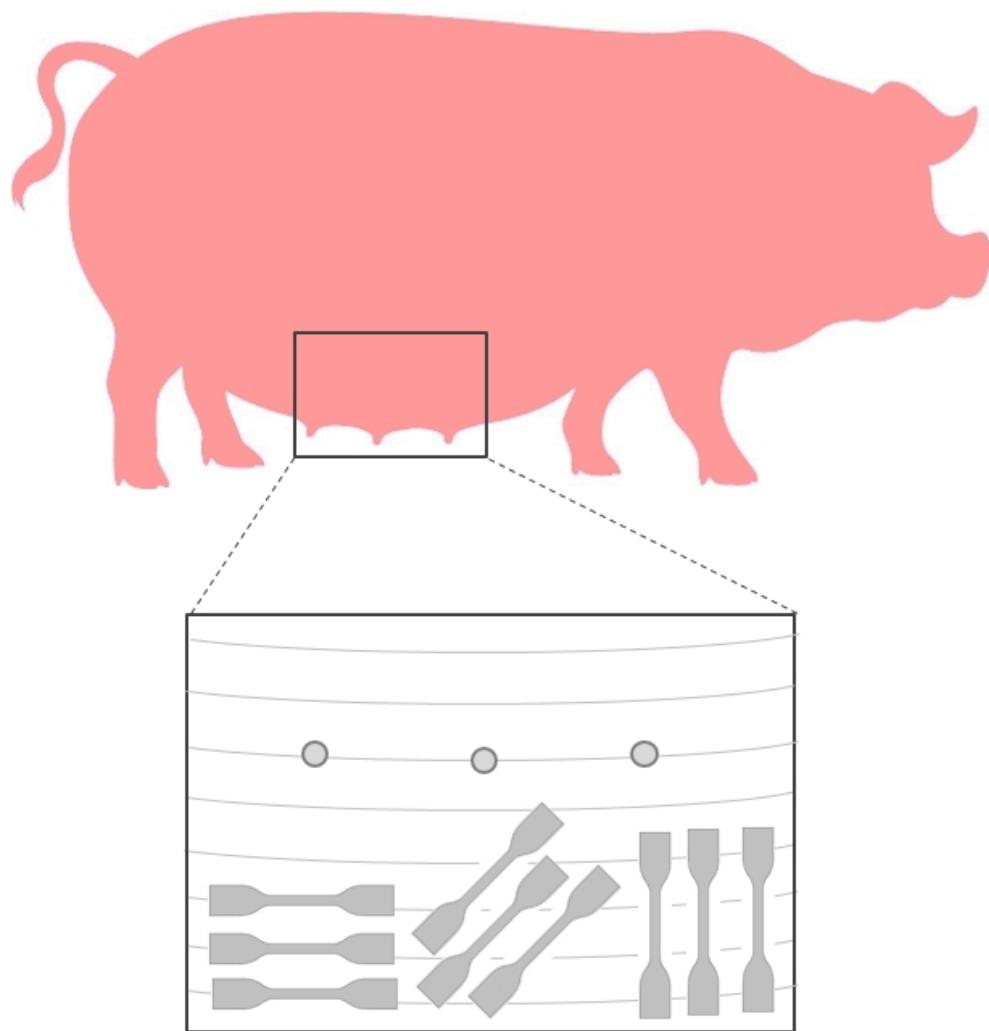


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Zitzen (graue Kreise) und Hautspaltlinien (hellgraue Linien) auf der exzidierten Bauchhaut, mit beispielhaften Positionen der Stanze.

2.4.4 Herkunft der Schweinehaut

Es wurde Haut von 7 Individuen verwendet. Die Individuen Nr. 1-4 waren 6 Monate alte gemischtrassige, hellhäutige Hausschweine aus herkömmlicher Stallhaltung.

Die Individuen Nr. 5-7 stammten von einem Bio-Metzger und waren mit 8-9 Monaten etwas älter. Es handelte sich ebenfalls um gemischtrassige, hellhäutige Haus-schweine. Jedoch waren für die Bio-Schweine mehr Stallfläche und die vorgeschriebenen Freilaufflächen vorhanden (?), während die herkömmlichen Mastschweine ausschließlich im Stall gehalten wurden.

Sowohl die Bio-Schweine als auch die herkömmlichen Mastschweine waren zum Zeitpunkt der Schlachtung etwa 120 kg schwer.

2.5 Zielparameter

Pro durchgeföhrtem Versuch werden zwei Werte ermittelt, die Reißspannung und die Reißdehnung. Diese Werte sind voneinander abhängig. Sie stellen den Endpunkt der Verformung der Haut dar.

2.5.1 Reißspannung

Die Reißspannung ist die Zugkraft, die zum Zerreissen der Probe führt, bezogen auf die Querschnittsfläche der Probe. Sie entspricht der höchsten durch den Kraftsensor gemessenen Kraft, denn danach ist zum Zerreissen der Probe keine weitere Krafteinwirkung mehr notwendig. Das heißt, würde man genau in diesem Moment die einwirkende Kraft plötzlich entfernen, würde die Probe trotzdem zerreißen. Tatsächlich trennt sich die Probe erst unmittelbar daran anschließend in zwei Teile. Aus diesem Kraftmaximum wird die Reißspannung berechnet. Die Einheit der Spannung ist Megapascal (MPa), was einem Newton pro Quadratmillimeter entspricht (siehe auch Aufbereitung der Rohdaten, Kapitel 2.3.2).

2.5.2 Reißdehnung

Die zum über die Reißspannung definierten Zeitpunkt des Zerreißens durch den Stabsensor gemessene Dehnung ist die Reißdehnung (siehe Abb. 7). Sie wird in Prozent der Ausgangslänge angegeben. Eine Reißdehnung von 100 % bedeutet also beispielsweise, dass sich die Länge der Probe bis zum Zerreißen verdoppelt hat.

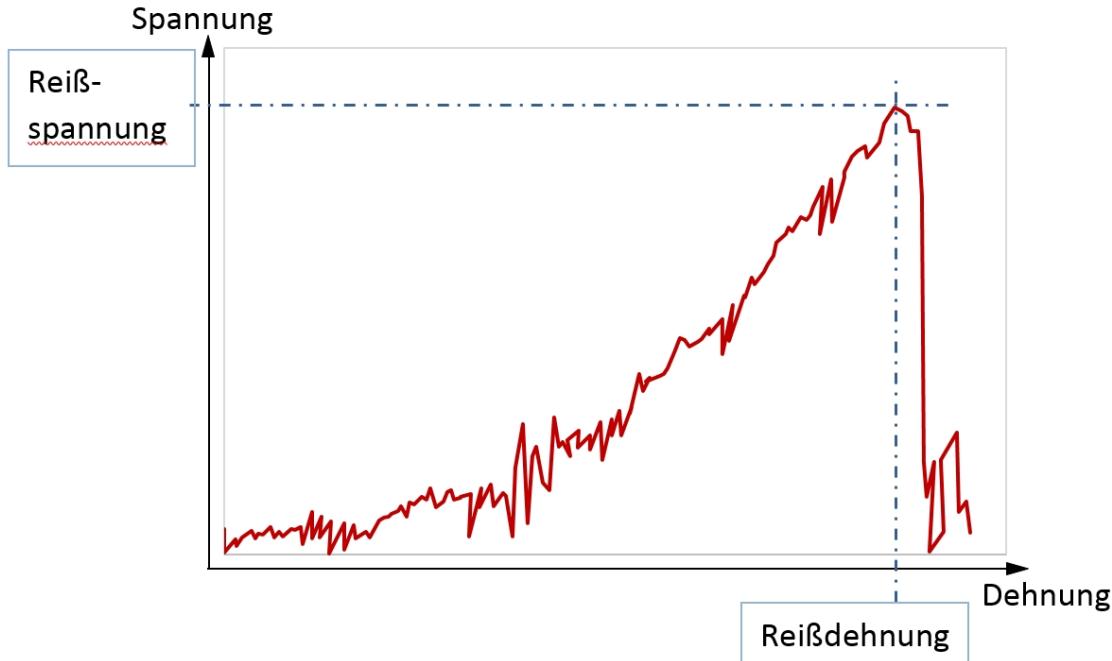


Abbildung 7: Verlauf der Spannung und Dehnung vom Auftreffen auf den oberen Stoßdämpfer (Nullpunkt) bis kurz nach dem Zerreißen der Probe.

2.6 Versuchsmatrix

Es waren insgesamt für jede der neun Kombinationen aus den drei Fallhöhen und drei Zugrichtungen zehn Versuche geplant. Dafür wurden, einschließlich der ausgeschlossenen Versuche, etwa 180 Fallversuche durchgeführt. Aufgrund der Ergebnisse wurde die geplante Auswertung erweitert. Die folgenden Tabellen beziehen neben Fallhöhe und Zugrichtung auch die Faktoren Herkunft und Lagerungszeit mit ein.

Von den 89 gültigen Versuchen entfallen 29 Versuche auf die Richtung senkrecht zu den Hautspaltlinien und jeweils 30 Versuche auf die Richtungen diagonal und parallel zu den Hautspaltlinien. 32 Versuche wurden mit der Fallhöhe 14,4 cm, 28 mit der Fallhöhe 46,5 cm und 29 mit der Fallhöhe 151,8 cm durchgeführt. 48 Versuche wurden einen Tag nach der Hautentnahme durchgeführt, die übrigen am zweiten Tag. Die Versuche wurden mit Haut von sieben verschiedenen Schweinen durchgeführt, davon vier herkömmliche Mastschweine und drei Bio-Schweine.

Tabelle 2: Matrix sämtlicher gültiger Versuche, aufgegliedert nach herkömmlichen Mastschweinen (a) und Bio-Schweinen (b). Ungültige Versuche sind nicht aufgeführt.

(a) Herkömmliche Mastschweine

Fallhöhe	Liegezeit	senkrecht	diagonal	parallel	Summe
14,4 cm	1 Tag	3	2	2	7
	2 Tage	4	4	3	11
	Summe	7	6	5	18
46,5 cm	1 Tag	2	2	2	6
	2 Tage	3	4	4	11
	Summe	5	6	6	17
151,8 cm	1 Tag	1	1	1	3
	2 Tage	2	2	2	6
	Summe	3	3	9	9
Summe	1 Tag	6	5	5	16
	2 Tage	9	10	9	28
	Summe	15	15	14	44

(b) Bio-Schweine

Fallhöhe	Liegezeit	senkrecht	diagonal	parallel	Summe
14,4 cm	1 Tag	3	3	5	11
	2 Tage	1	1	1	3
	Summe	4	4	6	14
46,5 cm	1 Tag	2	3	3	8
	2 Tage	1	1	1	3
	Summe	3	4	4	11
151,8 cm	1 Tag	5	5	4	14
	2 Tage	2	2	2	6
	Summe	7	7	6	20
Summe	1 Tag	10	11	12	33
	2 Tage	4	4	4	12
	Summe	14	15	16	45

2.7 Auswertung

2.7.1 Gesamtbetrachtung

Zunächst wurden über alle 89 gültigen Versuche die mediane Reißspannung und -dehnung sowie die dazugehörigen Spannweiten bestimmt. Dann wurden die Versuche nacheinander nach den Einflussfaktoren Fallhöhe, Zugrichtung, Lagerungszeit, Herkunft und Individuum gruppiert. Es wurden jeweils die Mediane, Minima und Maxima bestimmt und die Werte in Boxplot-Diagrammen dargestellt. Das obere und untere Quartil sind als Rechteck dargestellt; dieses entspricht damit 50 % der Daten. Der Median ist als Linie innerhalb der Box markiert. Die Whiskers reichen bis zum höchsten bzw. niedrigsten Wert innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands. Ausreißer ober- oder unterhalb dieses Bereichs sind als Punkte dargestellt.

In einem Punktdiagramm wurde die Reißspannung über die Reißdehnung aufgetragen und jeder Datenpunkt je nach Zugehörigkeit zur Gruppe der herkömmlichen Mastschweine oder der Bio-Schweine farblich markiert.

2.7.2 Herkömmliche Mastschweine und Bio-Schweine

Vor dem Hintergrund der gemachten Beobachtungen wurden die beiden Kohorten – herkömmliche Mastschweine und Bio-Schweine – getrennt betrachtet.

Die beiden Gruppen wurden analog zur Vorgehensweise bei der Gesamtbetrachtung ausgewertet. In den Punktdiagrammen wurden die Datenpunkte je nach Zugrichtung farblich markiert. Die Achseninteilung ist zur besseren Vergleichbarkeit in beiden Gruppen gleich gewählt.

Die Versuche waren in beiden Gruppen sehr ungleich auf 1 und 2 Tage Lagerungszeit verteilt: es wurden nur bei Individuum Nr. 4 (herkömmliches Mastschwein, 10 Versuche am 1. Tag und 12 Versuche am 2. Tag) und Nr. 5 (Bio-Schwein, 11 Versuche am 1. Tag und 12 Versuche am 2. Tag) Versuche an 2 verschiedenen Tagen durchgeführt. Deshalb wurden bei der Bestimmung der Mediane und Spannweiten in Abhängigkeit von der Liegezeit nur die Messwerte von Individuum Nr. 4 bzw. Nr. 5 einbezogen. Andernfalls hätten die großen Unterschiede bei der Reißspannung und -dehnung zwischen den Individuen (siehe Tabelle 7 im Anhang) zu einer starken Verzerrung der Ergebnisse geführt.

2.7.3 Normierung

Zur besseren Vergleichbarkeit und um die ungleiche Verteilung der Versuche auf die Versuchsreihen innerhalb der Kohorten auszugleichen, wurden die Ergebnisse normiert und anschließend die Unterschiede als Prozentwerte angegeben. Das Ergebnis ist zu verstehen als Darstellung des relativen Einflusses von Zugrichtung und Fallhöhe auf das Dehnungsverhalten, wobei die absoluten Messwerte außer Betracht gelassen werden. Es ist unabhängig von Herkunft und Lagerungszeit, denn herkömmliche Mastschweine und Bio-Schweine wurden getrennt betrachtet, und es wurde nur der 1. Versuchstag eingeschlossen.

Es wurden zunächst alle Versuche mit Liegezeit 2 Tage ausgeschlossen. Dann wurde für jedes Schwein einer Kohorte derjenige Wert der Reißspannung und -dehnung als Referenzwert gewählt, der bei Zugrichtung diagonal und Fallhöhe 46,5 cm gemessen wurde. Dieser entspricht per Definition 100 %. Es gibt bei jedem Schwein genau einen Versuch mit dieser Parameterkombination.

Abhängig vom Referenzwert wurden die normierten Werte für alle anderen Versuche des Individuums bestimmt:

$$\text{Normierter Wert} = \frac{\text{Ausgangswert}}{\text{Referenzwert}}$$

Gibt es bei einem Schwein für eine Kombination aus Zugrichtung und Fallhöhe mehr als einen Versuch, dann wurde der Median gebildet, sodass trotzdem nur ein Wert pro Individuum in die Auswertung einfließt. Für jede Kombination aus Zugrichtung und Fallhöhe wurde dann der Median aus den Werten der verschiedenen Schweine ermittelt und diese Mediane wurden tabellarisch dargestellt.

3. Ergebnisse

3.1 Gesamtbetrachtung

Insgesamt ist über sämtliche 89 Versuche der Median der Reißspannung 22,3 MPa und der Reißdehnung 52 %. Zum Zerreißen der Haut führen Spannungen von mindestens 7,2 MPa und maximal 61,1 MPa, bei Dehnungen von 6 % bis 387 %. Die Ergebnisse aller Versuche sind in Anhang A aufgeführt.

Die Messverteilungen für Reißspannung und Reißdehnung in Abhängigkeit von den Versuchsparametern Fallhöhe, Zugrichtung und Lagerungszeit sind in den Abbildungen 8 bis 12 grafisch dargestellt.

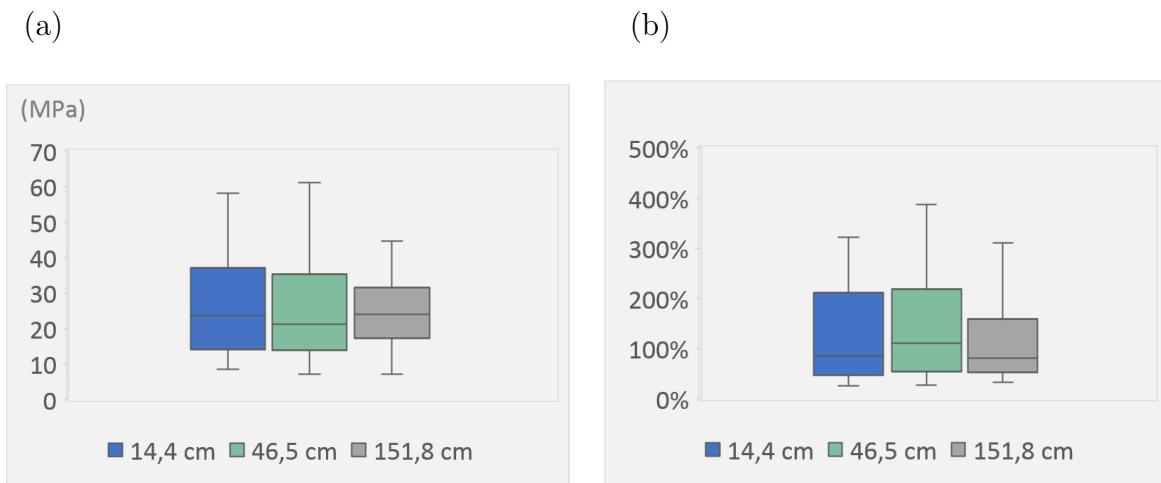


Abbildung 8: Vergleich der Messverteilungen zwischen den Dehnraten.
a) Reißspannung b) Reißdehnung

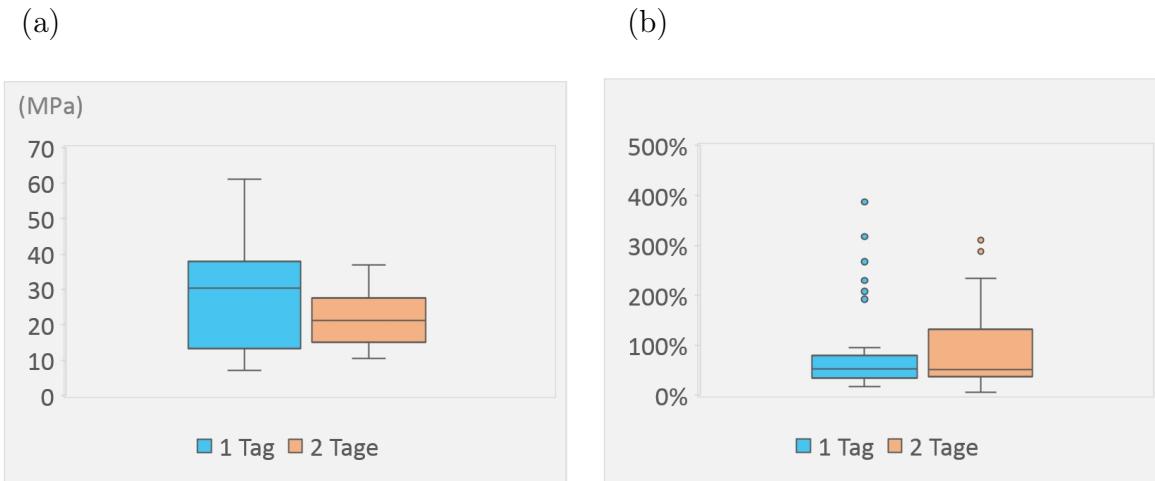


Abbildung 9: Vergleich der Messverteilungen zwischen den Lagerungszeiten.
a) Reißspannung b) Reißdehnung

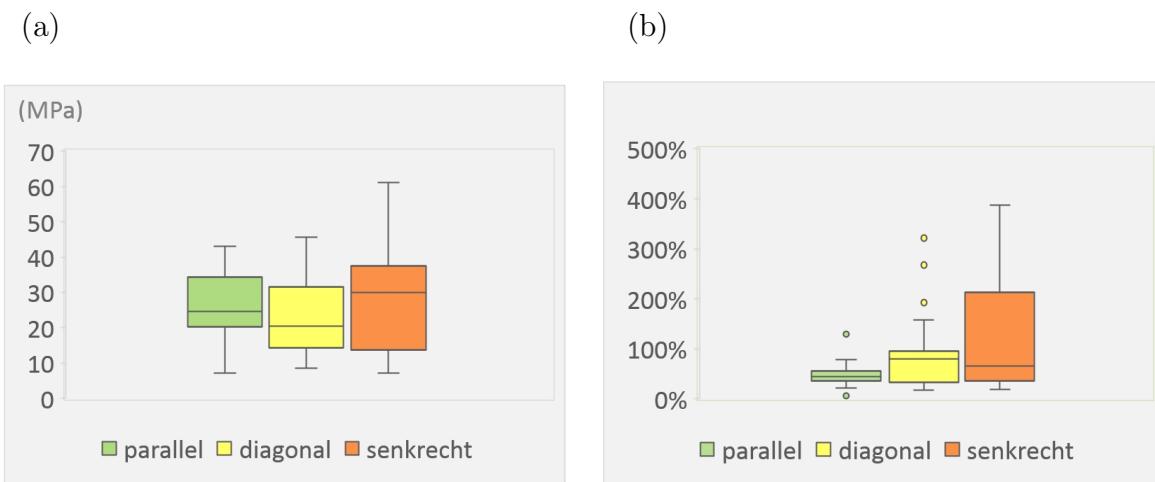


Abbildung 10: Vergleich der Messverteilungen zwischen den Zugrichtungen.
a) Reißspannung b) Reißdehnung

Aus der gemeinsamen Betrachtung von herkömmlichen Mastschweinen und Bio-Schweinen resultieren große Spannweiten und inhomogene Verteilungen bei allen Versuchsparametern. Für genaue Werte der entsprechenden Medianen, Minima und Maxima siehe Anhang B.

Abbildung 11 zeigt die unterschiedlichen Messverteilungen je nach Individuum. Man erkennt, dass die Werte der Reißspannung und der Reißdehnung sich zwischen herkömmlichen Mastschweinen und Bio-Schweinen, aber auch innerhalb der Gruppen und innerhalb des einzelnen Individuums stark unterscheiden.

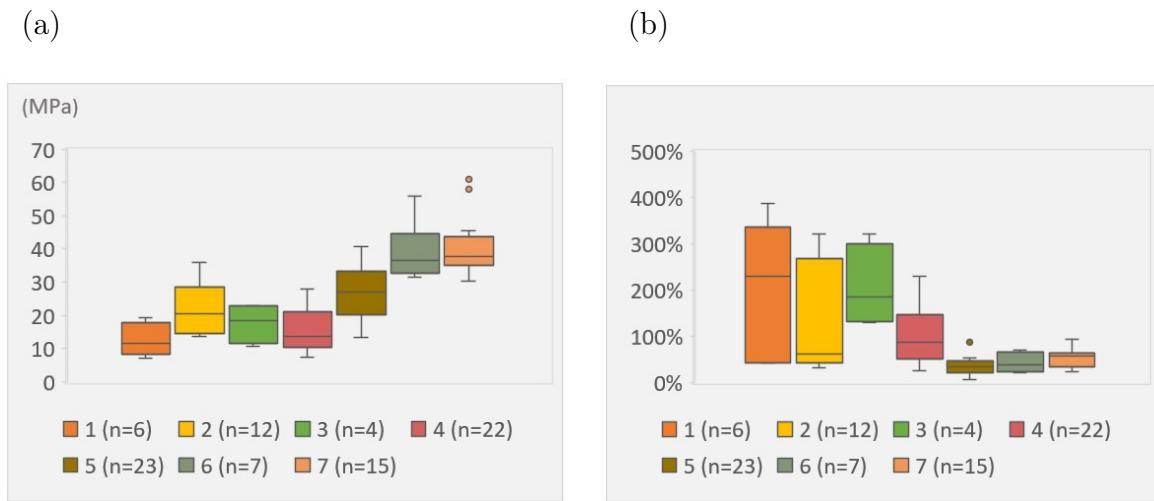


Abbildung 11: Vergleich der Messverteilungen bei den unterschiedlichen Individuen.
(Individuum Nr. 1-4: herkömmliche Mastschweine; Individuum Nr. 5-7: Bio-Schweine)
a) Reißspannung b) Reißdehnung; n: Anzahl Versuche pro Individuum

Die unterschiedlichen Wertebereiche bei herkömmlichen Mastschweinen und Bio-Schweinen sind auch in Abbildung 12 und 13 zu sehen. Man erkennt die im Allgemeinen höhere Reißspannung bei den Bio-Schweinen bei Reißdehnungen von stets unter 100 %. Bei den herkömmlichen Mastschweinen ist die Reißspannung niedriger und die Reißdehnung sehr viel höher. Diese Beobachtung begründet die separate Auswertung von herkömmlichen Mastschweinen und Bio-Schweinen.

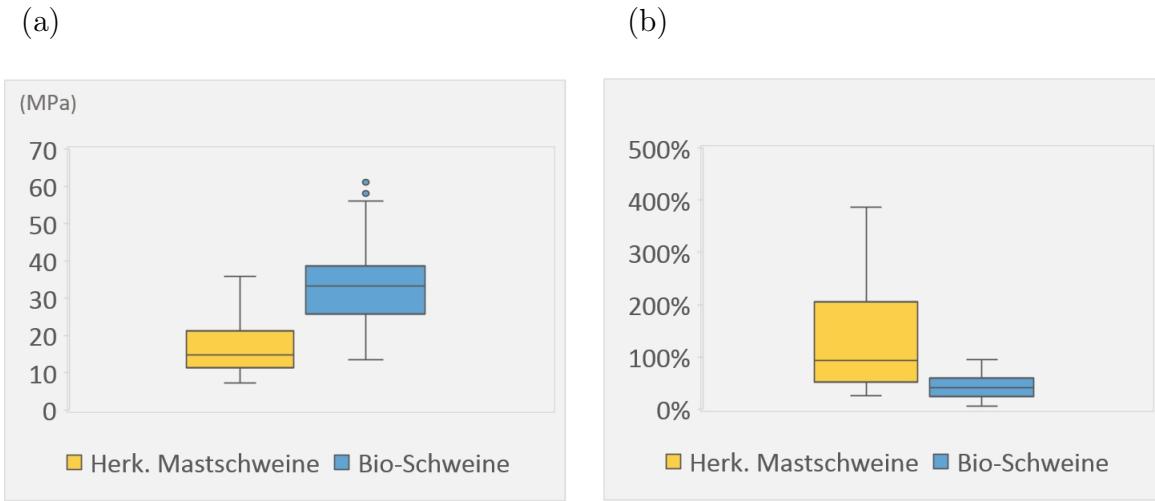


Abbildung 12: Vergleich der Messverteilungen zwischen herkömmlichen Mastschweinen ($n = 44$) und Bio-Schweinen ($n = 45$).
a) Reißspannung b) Reißdehnung

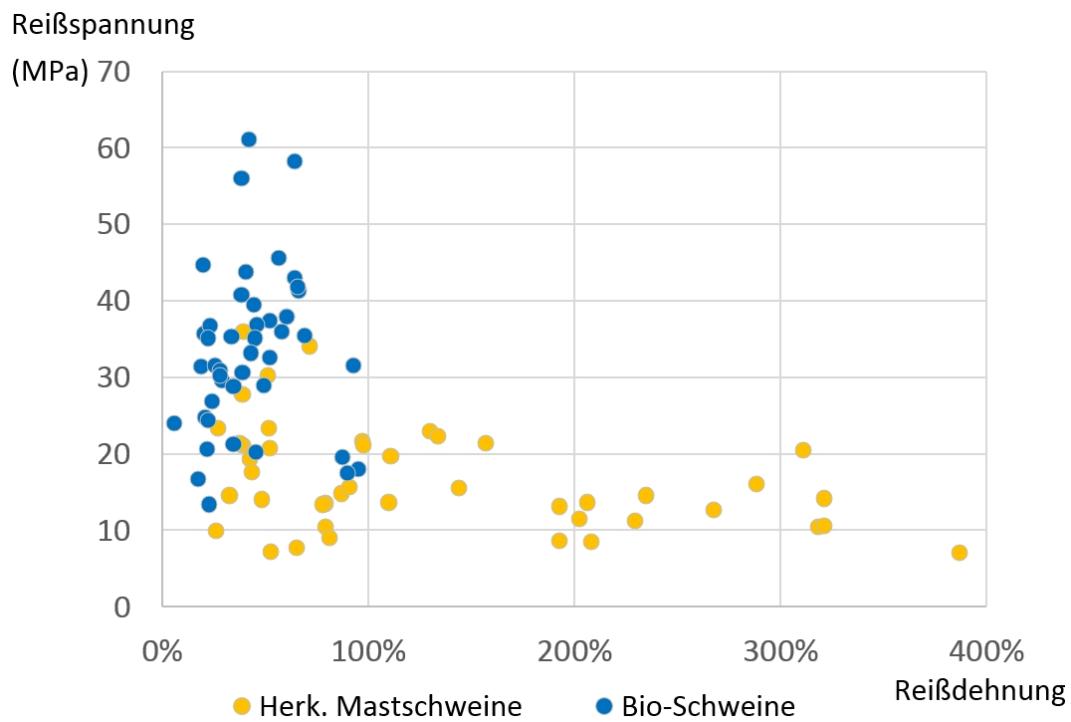


Abbildung 13: Reißspannung und -dehnung aller durchgeführten Versuche: Herkömmliche Mastschweine und Bio-Schweine

3.2 Herkömmliche Mastschweine

Mit der Bauchhaut von Individuen Nr. 1, 2, 3 und 4 wurden über alle Versuchsreihen verteilt insgesamt 44 Versuche durchgeführt. Der Median der Reißspannung über alle Versuche dieser Kohorte ist 14,7 MPa mit Spannweite von 7,2 MPa bis 35,9 MPa. Der Median der Reißdehnung beträgt 94 % mit Werten zwischen 26 % und 387 %.

Abbildung 14a und 14b zeigen die relativ ähnlichen Verteilungen der Reißspannungen bzw. Reißdehnungen in Abhängigkeit von den drei getesteten Fallhöhen.

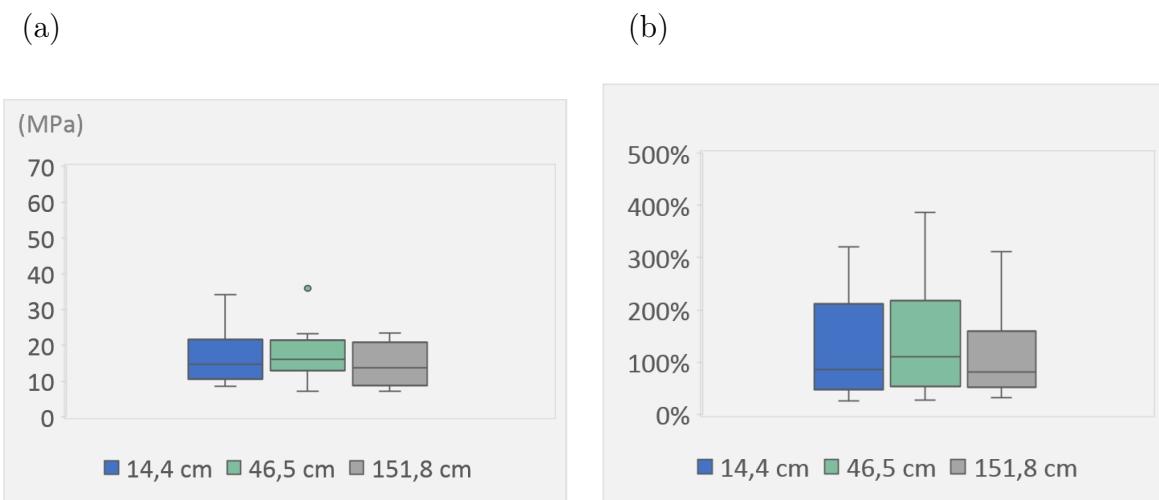


Abbildung 14: Herkömmliche Mastschweine: Vergleich der Messverteilungen zwischen den Dehnraten.

a) Reißspannung b) Reißdehnung

In Bezug auf die Lagerungszeit wird, um eine etwaige Verzerrung durch interindividuelle Unterschiede auszuschließen, nur das Individuum Nr. 4 betrachtet. Die Reißdehnung ändert sich vom 1. zum 2. Versuchstag wenig, der Median der Reißspannung ist am 2. Tag höher mit 20,4 MPa gegenüber 10,3 MPa am 1. Tag (siehe Abb. 15).

In Abbildung 16a ist die Messverteilung der Reißspannung in Abhängigkeit von der Zugrichtung in Bezug auf die Hautspaltlinien dargestellt. Die Minima sind ähnlich, der Median ist in der senkrechten Zugrichtung mit 13,6 MPa niedriger als in der parallelen Zugrichtung mit 21,2 MPa, der Median in der diagonalen Zugrichtung liegt mit 14,9 MPa dazwischen. Hohe Reißspannungen von über 20,4 MPa werden bei Versuchen senkrecht zu den Hautspaltlinien nicht beobachtet.



Abbildung 15: Individuum Nr. 4: Vergleich der Messverteilungen zwischen den Lagerungszeiten.

a) Reißspannung b) Reißdehnung

In Abbildung 16b ist analog die Messverteilung der Reißdehnung in Abhängigkeit von der Zugrichtung dargestellt. Der Median der Reißdehnung parallel zu den Hautspaltlinien ist 43 %, diagonal zu den Hautspaltlinien beträgt er 91 %. Senkrecht zu den Hautspaltlinien ist der Median mit 219 % am höchsten, und es wurden keine Reißdehnungen unter 110 % gemessen.

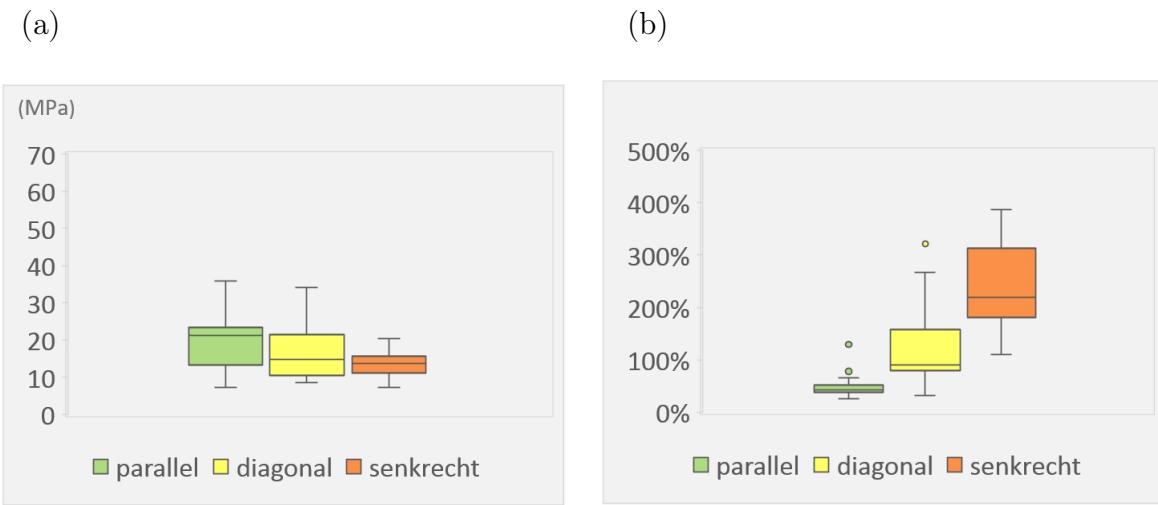


Abbildung 16: Herkömmliche Mastschweine: Vergleich der Messverteilungen zwischen den Zugrichtungen.

a) Reißspannung b) Reißdehnung

Da jeder Versuch je einen Wert für die Reißspannung und einen Wert für die Reißdehnung liefert, können die einzelnen Werte einander zugeordnet werden. In Abbildung 17 sind sie grafisch gegeneinander aufgetragen. Es handelt sich also um alle orange gefärbten Datenpunkte des Punktdiagramms im vorhergehenden Kapitel (siehe Abb. 13). Auch hier zeigt sich, dass Reißspannungen über 23 MPa nur mit Reißdehnungen unter 100 % auftreten. Kein Versuch senkrecht zu den Hautspaltlinien liegt in diesem Bereich, aber 5 der Versuche parallel zu den Hautspaltlinien (entspricht 33 %) und 1 Versuch diagonal zu den Hautspaltlinien. Die Wertebereiche der Reißdehnung der Versuche parallel zu den Hautspaltlinien und der Versuche senkrecht zu den Hautspaltlinien sind fast vollständig getrennt.

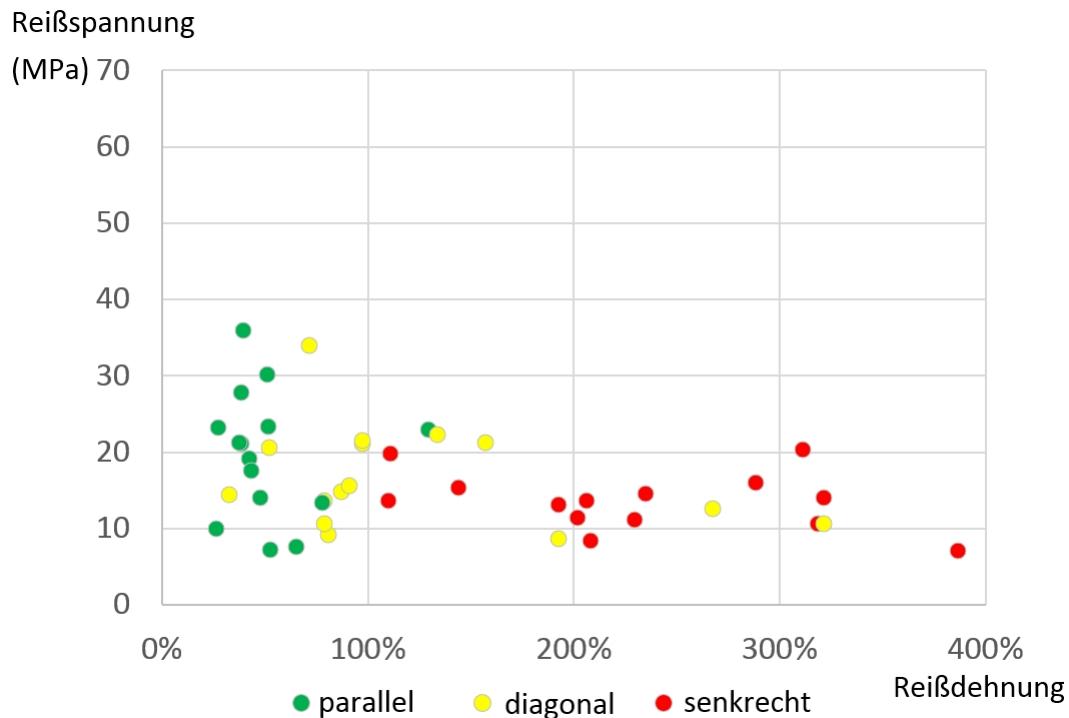


Abbildung 17: Herkömmliche Mastschweine: alle durchgeführten Versuche, farblich markiert nach Zugrichtung

Die einzelnen Ergebnisse aller Versuche sind in Anhang A nachzulesen. Für die Werte aller Mediane, Minima und Maxima unter Berücksichtigung der verschiedenen Versuchsparameter siehe Anhang B.

3.2.1 Normierte Ergebnisse

Tabelle 3 zeigt die normierten Werte der Reißspannung und Reißdehnung aller Versuche, die am 1. Tag nach Entnahme der Haut durchgeführt wurden, im Vergleich zum Referenzwert (Fallhöhe 46,5 cm, Zugrichtung diagonal). Mit Haut von Individuen Nr. 2 und Nr. 3 wurden Versuche nur am 2. Tag nach der Schlachtung durchgeführt, diese Individuen sind daher in der vorliegenden Auswertung nicht vertreten. Den normierten Werten liegen 6 Versuche von Individuum Nr. 1 und 10 Versuche von Individuum Nr. 4 zugrunde.

Die relative Reißspannung ist in allen drei Zugrichtungen am niedrigsten bei der Fallhöhe 151,8 cm.

Die Reißdehnung ist im Vergleich zum Referenzwert bei allen drei Fallhöhen um etwa die Hälfte niedriger in der senkrechten Zugrichtung und um etwa das Doppelte höher in der parallelen Zugrichtung.

Die Reißdehnung ist außerdem bei der Fallhöhe 151,8 cm am höchsten und bei der Fallhöhe 14,4 cm am niedrigsten, bei der Fallhöhe 46,5 cm liegen die Werte dazwischen. Lediglich in der senkrechten Zugrichtung ist der relative Wert bei der Fallhöhe 46,5 cm etwas niedriger als bei der Fallhöhe 14,4 cm.

Tabelle 3: Prozentualer Unterschied der normierten Messwerte im Vergleich zum Referenzwert in Abhängigkeit von Fallhöhe und Zugrichtung für Haut von herkömmlichen Mastschweinen

a) Reißspannung b) Reißdehnung

(a)

Zugrichtung	Fallhöhe		
	14,4 cm	46,5 cm	151,8 cm
parallel	+ 13%	+ 4%	- 47%
diagonal	- 27%	± 0%	- 33%
senkrecht	- 17%	- 24%	- 38%

(b)

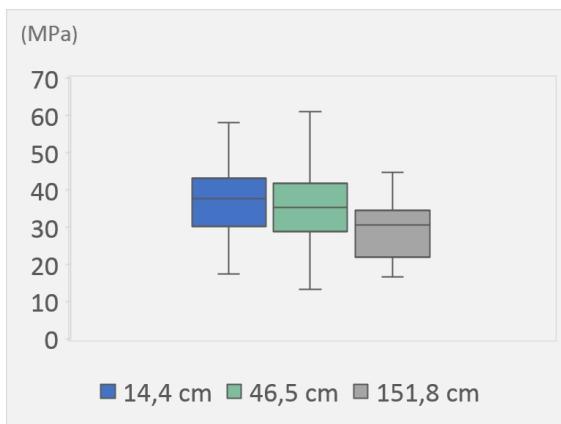
Zugrichtung	Fallhöhe		
	14,4 cm	46,5 cm	151,8 cm
parallel	- 69%	- 49%	- 34%
diagonal	- 14%	± 0%	+ 3%
senkrecht	+ 105%	+ 94%	+ 163%

3.3 Bio-Schweine

Mit der Bauchhaut der Bio-Schweine (Individuen Nr. 5, 6 und 7) wurden 45 Versuche durchgeführt. Der Median der Reißspannung über alle Versuchsreihen beträgt 33,2 MPa mit Werten zwischen 13,4 MPa und 61,6 MPa. Der Median der Dehnung beträgt 40 % mit einer Spannweite von 6 % bis 95 %.

Die Abbildungen 18a und 18b zeigen die Messverteilungen in Abhängigkeit von der Fallhöhe. Die Werte der Reißspannung und Reißdehnung sind bei der Fallhöhe 151,8 cm am niedrigsten, zwischen den Fallhöhen 14,4 cm und 46,5 cm sind keine großen Unterschiede zu erkennen.

(a)



(b)

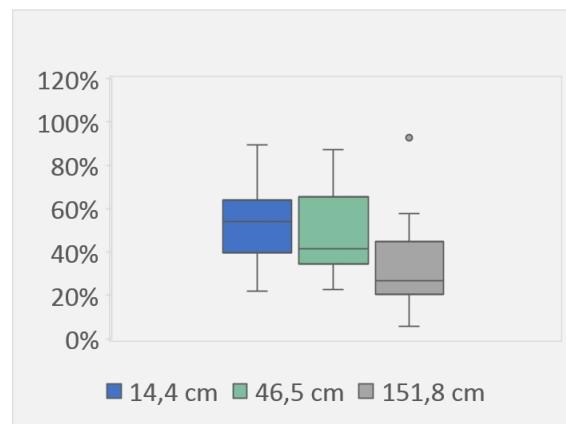


Abbildung 18: Bio-Schweine: Vergleich der Messverteilungen zwischen den Dehnraten.
a) Reißspannung b) Reißdehnung

Nur bei Individuum Nr. 5 wurden Versuche mit verschiedenen Lagerungszeiten durchgeführt. Der Median der Reißspannung am 1. Tag beträgt 24,7 MPa, am 2. Tag werden mit Median 28,2 MPa ähnliche Werte beobachtet. Auch bei den Medianen der Reißdehnung zeigen sich mit 38 % und 27 % keine großen Unterschiede (siehe Abb. 19).

Abbildung 20a zeigt die Messverteilungen der Reißspannung in Abhängigkeit von der Zugrichtung. Mit 37,0 MPa ist der Median der Reißspannung bei Versuchen mit Zugrichtung senkrecht zu den Hautspaltlinien am größten.

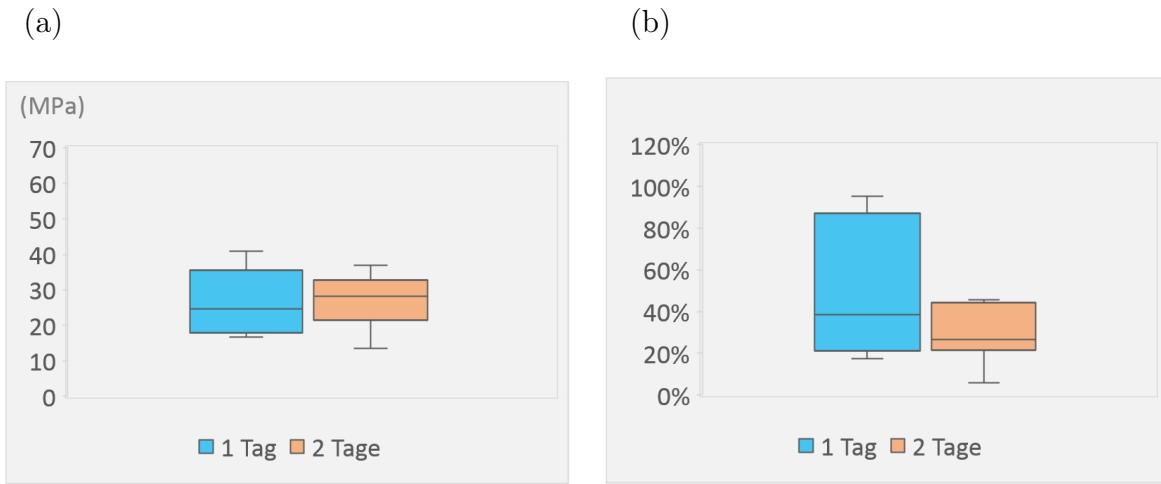


Abbildung 19: Individuum Nr. 5: Vergleich der Messverteilungen zwischen den Lagerungszeiten.

a) Reißspannung b) Reißdehnung

Bei Versuchen mit Zugrichtung diagonal dazu ist der Median der Reißspannung mit 24,4 MPa am geringsten. Bei Versuchen mit Zugrichtung parallel zu den Hautspaltlinien liegt die mediane Reißspannung mit 31,6 MPa dazwischen. Senkrecht zu den Hautspaltlinien wurden nur Reißspannungen über 29,0 MPa gemessen.

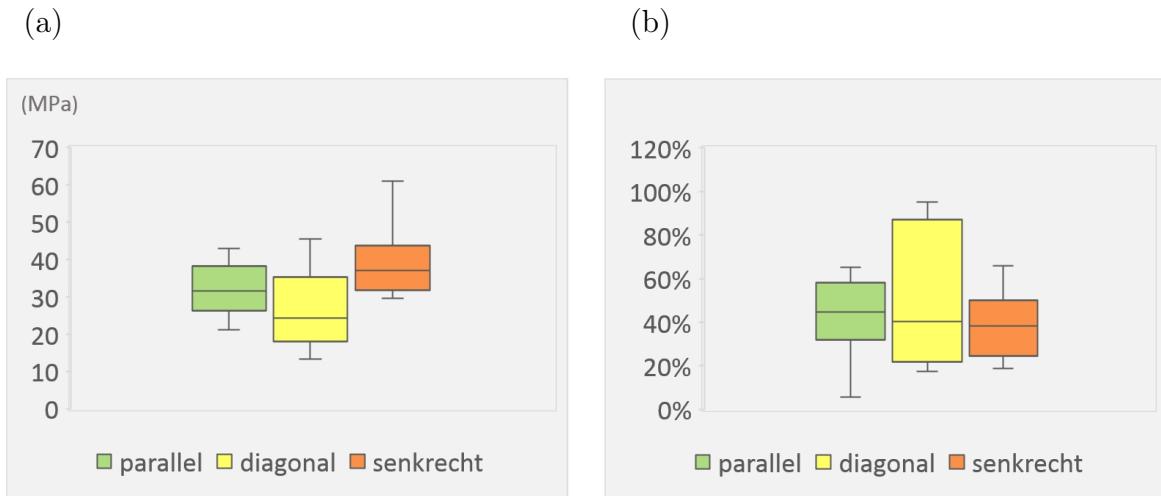
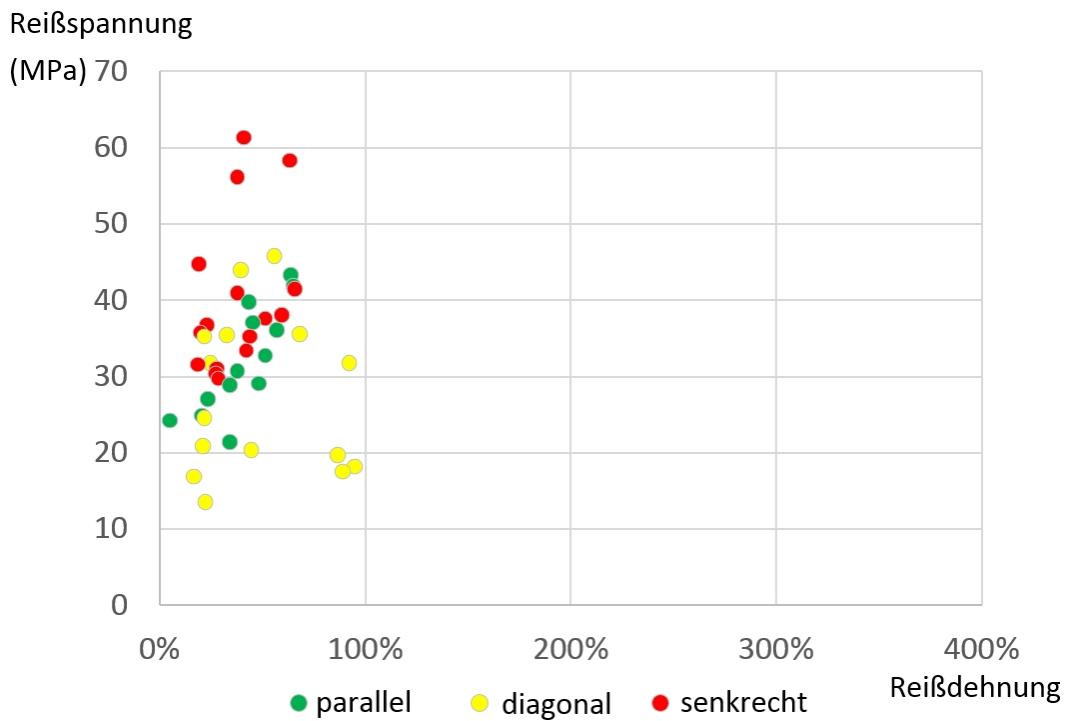


Abbildung 20: Bio-Schweine: Vergleich der Messverteilungen zwischen den Zugrichtungen.

a) Reißspannung b) Reißdehnung

In Abbildung 20b sind die Reißdehnungen in Abhängigkeit von der Zugrichtung dargestellt. Die Mediane sind ähnlich und betragen zwischen 38 % und 45 %. Die Werte streuen in der diagonalen Zugrichtung stärker.

Abbildung 21 zeigt alle Versuche, farblich markiert nach Zugrichtung (vgl. dazu die blau eingefärbten Punkte in Abbildung 13 aus Kapitel 3.1). Die meisten Versuche aller drei Zugrichtungen hatten Ergebnisse von 0 - 100 % für die Reißdehnung und 20 - 50 MPa für die Reißspannung. Sämtliche Versuche parallel zu den Hautspaltlinien liegen in diesem Wertebereich. 3 Versuche senkrecht zu den Hautspaltlinien ergaben eine Reißspannung von über 50 MPa (entsprechend 20 %). Bei 5 Versuchen diagonal zu den Hautspaltlinien (33 %) war die Reißspannung unter 20 MPa.



im Vergleich zum Referenzwert (Fallhöhe 46,5 cm, Zugrichtung diagonal). Die normierten Werte sind aus den Ergebnissen von 33 Versuchen von Individuen Nr. 5, Nr. 6 und Nr. 7 berechnet. Die relativen Werte der Reißspannung sind bei jeder Fallhöhe in der senkrechten Zugrichtung am höchsten und in der diagonalen Zugrichtung am geringsten. Weitere Regelmäßigkeiten sind weder für die Reißspannung noch für die Reißdehnung zu erkennen.

*Tabelle 4: Prozentualer Unterschied der normierten Messwerte im Vergleich zum Referenzwert in Abhängigkeit von Fallhöhe und Zugrichtung für Haut von Bio-Schweinen
a) Reißspannung b) Reißdehnung*

(a)			
Zugrichtung	Fallhöhe		
	14,4 cm	46,5 cm	151,8 cm
parallel	+ 32%	+ 33%	+ 6%
diagonal	+ 8%	± 0%	- 9%
senkrecht	+ 46%	+ 80%	+ 32%

(b)			
Zugrichtung	Fallhöhe		
	14,4 cm	46,5 cm	151,8 cm
parallel	+ 21%	+ 18%	- 13%
diagonal	- 24%	± 0%	- 9%
senkrecht	+ 3%	- 25%	- 55%

4. Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, welche mechanischen Kräfte und Dehnungen unter dynamischen Bedingungen zum Zerreißen der Haut führen. Zum ersten Mal wurden systematisch dynamische Zugversuche mit einer hohen Anzahl ($n = 89$) von Schweinehautproben durchgeführt. Die Proben wurden aus der Bauchhaut von herkömmlichen Mast- und von Bioschweinen entnommen. Sie wurden unter drei verschiedenen Zugrichtungen und bei drei verschiedenen Dehnraten getestet. Die Lagerungszeit der Proben vom Individualtod bis zur Versuchsdurchführung betrug entweder ein oder zwei Tage. Dabei wurden Reißspannungen bis zu 61 MPa und Reißdehnungen bis zu 387 % gemessen (Reißspannung = Zugkraft, die zum Zerreißen der Probe führt, bezogen auf die Querschnittsfläche der Probe; Reißdehnung = Dehnung in Prozent zum Zeitpunkt des Zerreißens). Insgesamt gesehen korrespondieren hohe Reißdehnungen von über 100 % immer mit Reißspannungen unter 23 MPa; bei höheren Reißspannungen von 23 MPa bis zu 61 MPa wurden nur Reißdehnungen von unter 100 % gemessen.

Eine mögliche Erklärung liegt in den unterschiedlichen Eigenschaften der beiden kraftaufnehmenden Strukturen, der Kollagenfasern und der elastischen Fasern (??). Je nachdem, welcher Anteil in der einzelnen Probe und in der getesteten Zugrichtung überwiegt, resultiert entweder die hohe Dehnbarkeit der elastischen Fasern bei niedriger Reißspannung oder die hohe Reißkraft der Kollagenfasern bei niedriger Dehnbarkeit.

Der genannte Zusammenhang wurde in wissenschaftlichen Publikationen zuvor noch nicht berichtet. Er zeigt sich aber auch in den Werten von ?, die wenige Versuche mit dem gleichen Versuchsaufbau durchgeführt hat. Insgesamt wurden dort für die Reißspannung ähnliche und für die Reißdehnung kleinere Werte berichtet.

Die Gruppen der Mastschweine und der Bio-Schweine unterscheiden sich in den absoluten Messergebnissen der Reißspannung und vor allem der Reißdehnung. Bei den herkömmlichen Mastschweinen kann die Reißdehnung bis zu 387 % betragen, bei Reißspannungen bis zu 35,9 MPa. Hingegen wurden bei den Bio-Schweinen keine Reißdeh-

nungen über 100 % gemessen, die Reißspannungen sind mit bis zu 61,1 MPa im Allgemeinen höher. Des Weiteren zeigt sich ein grundsätzlich unterschiedliches Verhalten in Abhängigkeit von der Zugrichtung.

Nach dem aktuellen Kenntnisstand wurde bisher bei keiner Studie zwischen herkömmlichen Mastschweinen und Bio-Schweinen unterschieden. ? verwendete den gleichen Versuchsaufbau mit den gleichen Fallhöhen und Zugrichtung parallel und senkrecht zu den Hautspaltlinien. Die Anzahl der Individuen sowie die Herkunft der Schweine ist nicht angegeben. Bei ? wurden bei insgesamt 48 durchgeführten Versuchen für die Reißspannung Werte von 6,1 MPa bis 38,4 MPa und für die Reißdehnung Werte von 15 % bis 138 % gemessen. Diese Werte liegen damit zwischen den eigenen Ergebnissen bei den Bio-Schweinen und bei den herkömmlichen Mastschweinen. Es wurden bei Versuchen parallel zu den Hautspaltlinien höhere Werte für die Reißspannung und niedrigere Werte für die Reißdehnung gemessen, entsprechend den eigenen Beobachtungen bei den herkömmlichen Mastschweinen.

? verwendete wie bei den eigenen Versuchen die Bauchhaut eines hellhäutigen gemischtrassigen Hausschweins. Es wurden Versuche parallel und senkrecht zu den Hautspaltlinien durchgeführt, jedoch nicht bis zum Zerreißen. Es wurde gezeigt, dass die Haut bei Zug parallel zur Wirbelsäule, also parallel zu den Hautspaltlinien steifer ist als bei Zug senkrecht zur Wirbelsäule (steif = geringere Dehnung bei gleicher Zugkraft). Dieses Ergebnis konnte bei den eigenen Versuchen mit Haut der herkömmlichen Mastschweine reproduziert werden.

Eine mögliche Erklärung für das unterschiedliche Dehnungsverhalten der Haut von herkömmlichen Mastschweinen und Bioschweinen könnte in der Struktur der kollagenen und elastischen Fasern der Dermis liegen, die sich durch Sonnenexposition verändert. Bei gleichbleibender Kollagenexpression steigt die Elastin-Biosynthese, die Quervernetzung nimmt bei beiden Faserarten zu und es treten vermehrt abnorme und verklumpte Fasern auf (?). Dass eine solche Verklumpung zu einer Verminderung der Elastizität und Erhöhung der Steifigkeit führen könnte, wie es bei den vorliegenden Ergebnissen der Fall ist, wäre grundsätzlich nachvollziehbar. Experimentelle Belege dafür gibt es in der Literatur allerdings nicht.

Weil jedes Individuum das Resultat einer Kreuzung aus vier verschiedenen Rassen ist, wäre es durchaus auch denkbar, dass diese Zusammensetzung bei den herkömmlichen Mastschweinen und den Bio-Schweinen unterschiedlich ist und beim Dehnungsverhalten der biologischen Gewebe eine Rolle spielt. Da das Rohmaterial vom Einzelhändler bezogen wurde, ist die genaue Rassezusammensetzung der verwendeten Schweine ist

nicht bekannt.

Auch innerhalb der Gruppe der herkömmlichen Mastschweine und der Gruppe der Bio-Schweine sind die quantitativen Unterschiede der Reißspannung und -dehnung zwischen den Individuen beträchtlich. Der Einfluss des Individuums ist weitaus größer als der der meisten untersuchten Versuchsparameter. Dies wurde auch bei statischen Zugversuchen beobachtet, wenn mehrere Individuen verglichen wurden. Es wird auf die biologische Variabilität des Materials zurückgeführt (?).

Die Zugrichtungsabhängigkeit äußert sich bei den herkömmlichen Mastschweinen und den Bio-Schweinen unterschiedlich, vor allem bei Versuchen senkrecht zu den Hautspaltlinien.

Bei den herkömmlichen Mastschweinen (Individuen Nr. 1, 2, 3 und 4) wurde eine Abhängigkeit vor allem der Reißdehnung, aber auch der Reißspannung von der Zugrichtung festgestellt. Geringe Werte von Reißspannung und -dehnung (kleiner als 23,0 MPa bzw. 100 %) treten sowohl parallel als auch diagonal zu den Hautspaltlinien auf; ein Unterschied zeigt sich in der Verteilung der Werte und darin, dass sehr hohe Reißdehnungen parallel zu den Hautspaltlinien nicht beobachtet wurden. Die Normierung der Ergebnisse zeigt, dass die Reißdehnung parallel zu den Hautspaltlinien im Mittel nur halb so groß ist wie diagonal. Bei den Versuchen senkrecht zu den Hautspaltlinien wurden bei den herkömmlichen Mastschweinen ausschließlich hohe Reißdehnungen über 100 % und niedrige Reißspannungen gemessen.

Bei den Bio-Schweinen (Individuen Nr. 5, 6 und 7) ist die mediane Reißdehnung bei allen drei Zugrichtungen sehr ähnlich. Die Werte der Reißspannungen lassen dagegen auf eine Abhängigkeit von der Zugrichtung schließen. Sie sind mit mindestens 29,6 MPa am höchsten senkrecht zu den Hautspaltlinien. Durch Normierung wurde gezeigt, dass die Reißspannung auch nach Herausrechnen der interindividuellen Unterschiede senkrecht zu den Hautspaltlinien am höchsten und diagonal zu den Hautspaltlinien am niedrigsten ist.

Das zugrichtungsabhängige Dehnungsverhalten der Haut ergibt sich vor allem aus der unterschiedlichen Ausrichtung der kollagenen Fasern in der Dermis (?). Diese verlaufen vorwiegend in Richtung der Hautspaltlinien, nehmen hohe Kräfte auf und sind wenig dehnbar (??). Elastinfasern nehmen vergleichsweise kleine Kräfte auf, sind aber sehr dehnbar (?).

Unter diesen Voraussetzungen stimmt die beobachtete Zugrichtungsabhängigkeit bei

den herkömmlichen Mastschweinen mit den Erwartungen überein.

Das Verhalten der Haut der Bio-Schweine ist weniger leicht nachzuvollziehen. Es gibt Belege, dass die Reißspannung und -dehnung sowohl von Kollagenfilmen als auch von einzelnen elastischen Fasern jeweils signifikant kleiner sei als die des Ausgangsgewebes. Demzufolge muss von weiteren Einflussfaktoren ausgegangen werden (??). Es wäre also denkbar, dass das Dehnungsverhalten auch von der Konfiguration der Fasern untereinander abhängt, dabei könnte die oben genannte Quervernetzung durch UV-Einwirkung eine Rolle spielen. Eine histologische Untersuchung der Dermis von herkömmlichen Mastschweinen und Bio-Schweinen könnte hier mehr Klarheit schaffen.

Von quasi-statischen Zugversuchen ist aus der Literatur bekannt, dass das Dehnungsverhalten der Haut unter anderem von der Dehnrate abhängt (?). Die Haut ist bei höherer Dehnrate steifer, das heißt die gleiche Zugkraft führt bei höherer Dehnrate zu einer geringeren Dehnung. ? haben diese Abhängigkeit auch bei hochdynamischen Zugversuchen mit 9 Hautproben von einem hellhäutigen Hausschwein bei Dehnraten von 1700/s bis 3500/s bestätigen können, wobei die Versuche jedoch nicht bis zum Zerreißen der Probe durchgeführt wurden.

Es wäre also auch in der eigenen Studie mit Dehnraten zwischen 67/s und 218/s eine Abhängigkeit der Reißspannung und -dehnung von der Fallhöhe zu erwarten gewesen, jedoch konnten diese Ergebnisse nicht reproduziert werden. Das mag daran liegen, dass die verwendeten Dehnraten keine genügend großen Veränderungen hervorrufen, oder der Versuchsaufbau und die verwendeten Sensoren für die vorhandenen Unterschiede nicht sensibel genug sind.

Es zeigt sich lediglich in der Gruppe der Bio-Schweine nach Normierung der Ergebnisse die Tendenz, dass bei höherer Dehnrate sowohl die Reißspannung als auch die Reißdehnung geringer sind als bei niedrigerer Dehnrate, und auch in der Gruppe der Mastschweine ist die normierte Reißspannung bei der Fallhöhe 151,8 cm am niedrigsten. Für einen solchen Zusammenhang gibt es aber in der Literatur keine Belege, sodass diese ohnehin geringen Unterschiede am ehesten auf eine zufällige Streuung zurückzuführen sind.

? konnte in den dynamischen Zugversuchen bei identischem Versuchsaufbau, aber kleinerer Versuchszahl keine eindeutige Dehnratenabhängigkeit feststellen. Dies ist nun auch mit einer größeren Anzahl von Versuchen nicht gelungen. Möglicherweise sind also die untersuchten Dehnraten zu ähnlich, um messbare Unterschiede hervorzurufen.

Es wurden nur mit Haut von Individuum Nr. 4 (herkömmliches Mastschwein) und Nr. 5 (Bio-Schwein) Versuche an zwei verschiedenen Tagen durchgeführt. Die Ergebnisse bei Individuum Nr. 5 legen keine Abhängigkeit von der Lagerungszeit nahe, bei Individuum Nr. 4 ist aber bei gleichbleibender Reißdehnung die Reißspannung am 2. Tag um fast das doppelte höher als am 1. Tag.

Kollagenfasern sind in den ersten Tagen nach dem Individualtod sehr resistent gegen Autolyse (?). Bei Untersuchungen an Bindegewebe vom Rind blieben in den ersten zehn Tagen nach der Schlachtung die Reißkraft und Reißdehnung gleich und nahmen erst danach linear ab (?).

Jansen und Rottier (1958) haben beobachtet, dass die Haut durch Austrocknung steifer wird, die Reißspannung deutlich steigt und die Reißdehnung geringfügig sinkt. Die eigenen Ergebnisse bei Individuum Nr. 4 wären demnach am ehesten auf eine schlechtere Lagerung mit entsprechender Austrocknung zurückzuführen.

Ein Einfluss der reinen Lagerungszeit unter optimalen Bedingungen, im Sinne von nach dem Individualtod einsetzendem enzymatischem Abbau der elastischen und kollagenen Fasern, wurde nicht beobachtet. Es könnte also eine längere Lagerungszeit akzeptabel sein, da die Werte nur von einem Individuum stammen wären allerdings weitere Studien nötig, um dies zu bestätigen.

Die unterschiedlichen Ergebnisse in den Gruppen der Bio-Schweine und der herkömmlichen Mastschweine werfen die Frage auf, ob und wenn ja welche Schweine als Modell für die Haut des Menschen geeignet sind.

? untersuchten insgesamt 33 humane Proben von 3 Körperspendern mit einem Alter zwischen 77 und 85 Jahren, dabei wurden Reißspannungen von 17,9 MPa bis 36,5 MPa sowie Reißdehnungen von 20 % bis 31 % gemessen. Es wurden die niedrigsten Reißspannungen diagonal zu den Hautspaltlinien gemessen, was mit den eigenen Beobachtungen bei den Bio-Schweinen übereinstimmt. Allerdings waren, anders als bei den Bio-Schweinen, parallel und senkrecht zu den Hautspaltlinien die Reißspannungen fast gleich.

? haben parallel zu den Hautspaltlinien etwas niedrigere Reißdehnungen gemessen, während in den eigenen Versuchen in der Gruppe der Bio-Schweine kein Einfluss der Zugrichtung auf die Reißdehnung festgestellt wurde.

Trotz dieser Unterschiede ist in Anbetracht der vorliegenden Ergebnisse der Einfluss der Zugrichtung beim Menschen eher mit dem bei den Bio-Schweinen vergleichbar als mit dem bei den herkömmlichen Mastschweinen.

Große Unterschiede der Reißdehnung, wie sie in der Gruppe der herkömmlichen Mastschweine beobachtet wurden, sind bisher beim Menschen nicht beschrieben, und auch in Bezug auf die Reißspannung gibt es keine Übereinstimmung mit den Ergebnissen von ?.

? kamen bei 3 Zugversuchen mit der Stirnhaut eines 85-jährigen menschlichen Individuums auf deutlich niedrigere Messwerte der Reißspannung- und dehnung als ?. In Tabelle 5 sind die Ergebnisse von ? und ? den eigenen Ergebnissen gegenübergestellt.

Tabelle 5: Vergleich der eigenen Ergebnisse mit dynamischen Zugversuchen mit menschlicher Haut aus der Literatur. Es sind die absoluten Spannweiten angegeben sowie der relative Einfluss der Zugrichtung in Bezug auf die Hautspaltlinien (\uparrow / \downarrow : die Messwerte sind in der entsprechenden Zugrichtung deutlich höher bzw. niedriger als der Durchschnittswert; \leftrightarrow : die Messwerte entsprechen in etwa dem Durchschnittswert). ? haben keine unterschiedlichen Zugrichtungen getestet.

	?	?	Bio-Schweine	Herkömmliche Mastschweine
	(n = 3)	(n = 33)	(n = 45)	(n = 44)
Reißspannung (MPa)	1,5 - 4,5	17,9 - 36,5	13,4 - 61,6	7,2 - 35,9
parallel	-	\leftrightarrow	\leftrightarrow	\leftrightarrow
diagonal	-	\downarrow	\downarrow	\leftrightarrow
senkrecht	-	\leftrightarrow	\uparrow	\downarrow
Reißdehnung (%)	8 - 11	20 - 31	6 - 95	26 - 387
parallel	-	\downarrow	\leftrightarrow	$\downarrow \downarrow$
diagonal	-	\leftrightarrow	\leftrightarrow	\leftrightarrow
senkrecht	-	\leftrightarrow	\leftrightarrow	$\uparrow \uparrow$

Da die untersuchten Hautproben von verschiedenen Körperstellen stammen, sind die unterschiedlichen Ergebnisse bei ? und ? nicht überraschend. ? haben bei statischen Zugversuchen von menschlichen Hautproben festgestellt, dass sich die Reißspannung selbst bei Proben von unterschiedlichen Stellen am Rücken des gleichen Individuums signifikant unterscheidet.

Sowohl bei den Bio-Schweinen als auch bei den herkömmlichen Mastschweinen wur-

den höhere Werte für Reißspannung und Reißdehnung gemessen als aus der Literatur für den Menschen bekannt. Dennoch befindet sich die Gruppe der Bio-Schweine in einer vergleichbaren Größenordnung mit den Ergebnissen von ?

Es ist auch zu beachten, dass die menschliche Haut ausschließlich von alten Menschen mit wahrscheinlich natürlicher Todesursache stammte, während es sich bei den Schweinen um gesunde und junge Individuen handelte. Obwohl beim Menschen im Alter der absolute Anteil von Kollagen und Elastin in der Dermis gleich bleibt, verändert sich die Struktur, was zu einer geringeren Dehnbarkeit der Haut führt (?). Man kann daher davon ausgehen, dass die Werte der Reißspannung und -dehnung beim jüngeren Menschen höher liegen.

Die Tatsache, dass auch innerhalb der Kohorten der herkömmlichen Mastschweine bzw. der Bio-Schweine die absoluten Werte für Reißspannung und -dehnung bei den unterschiedlichen Individuen weit auseinanderliegen, lässt außerdem erwarten, dass auch beim Menschen die Dehnbarkeit und Stabilität der Haut höchst variabel ist.

Es gibt bei der Interpretation der erhobenen Daten einige Einschränkungen, die sich teilweise aus der Versuchsanordnung ergeben. Die Dicke der Dermis konnte nur auf 0,5 mm genau gemessen werden, was zu einer Ungenauigkeit von bis zu 20 % bei den berechneten Werten der Reißspannung führt. Da es sich um einen zufälligen und nicht um einen systematischen Fehler handelt, führt dies zu größeren Spannweiten, aber nicht zu einer systematischen Veränderung der Mediane.

Durch die große Anzahl von Versuchsparametern (Fallhöhe, Zugrichtung, Lagerungszeit, herkömmliches Mastschwein – Bio-Schwein) bei vergleichsweise geringer Fallzahl kommt bei einem Individuum jede Kombination von Parametern nur ein bis maximal zwei Mal vor. Dadurch lässt sich nicht unmittelbar feststellen, wie gut die Messwerte zu reproduzieren sind. Es ist aufgrund der Inhomogenität der Haut als biologisches Material eine große Schwankung zu erwarten. Durch eine Beschränkung auf wenige Parameter und möglichst viele Versuche bei einem Individuum könnten die Daten verbessert werden. Allerdings ist die vergleichbare Hautfläche bei jedem einzelnen Individuum begrenzt.

Bei Übertragung von *in vitro* generierten Daten auf die reale Situation ergeben sich zudem gewisse grundsätzliche Schwierigkeiten. Die Haut ist als biologisches Material sehr von den Versuchsbedingungen abhängig. Es ist davon auszugehen, dass sich die gemessene Reißdehnung und Reißspannung in einer anderen Versuchsanordnung unterscheiden würden. Beispielsweise ist *in vivo* die Haut mit darunterliegenden Strukturen

(Fettgewebe, Muskeln, Knochen) verbunden. Es ist zu erwarten, dass diese einen großen Einfluss auf das Dehnungsverhalten der Haut haben. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wären beispielsweise Zugversuche ohne vorheriger Abpräparation allen Gewebes denkbar.

Die unverletzte Haut hat niemals offene Ränder. Allein durch die Verletzung der Kontinuität der Haut verändert sich die Richtung der Hautspaltlinien messbar (?).

Bei Versuchen von ?, die mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet wurden, zeigt sich im Bildmaterial deutlich, dass die Proben immer vom Rand her und nie aus der Mitte reißen, vergleichbar mit einem Blatt Papier. Die tatsächlichen Reißdehnungen und -kräfte der Haut *in vivo* könnten also viel höher sein als die hier festgestellten.

Vom uniaxialen Dehnungsverhalten kann nicht unmittelbar auf das Verhalten in zwei oder gar drei Dimensionen geschlossen werden; aus mathematischer Sicht können die Dehnungseigenschaften eines Materials durch nur uniaxiale Daten nicht vollständig charakterisiert werden (?). Wünschenswert wäre, dass man Versuche in der Ebene oder sogar in drei Dimensionen durchführt, bei welchen auch Scherkräfte in der Haut gemessen werden. Dies wäre für dynamische Zugversuche mit großem technischem Aufwand verbunden.

Es wurde gezeigt, dass die interindividuellen Unterschiede in den Dehnungseigenschaften der Haut sehr groß sind. Außerdem wurde ein grundlegend verschiedenes Verhalten in der Gruppe der herkömmlichen Mastscheine und der Bio-Schweine beobachtet. Worauf diese Unterschiede beruhen, konnte ohne histologische Untersuchung nicht abschließend geklärt werden. Am naheliegensten scheint eine Zurückführung auf die Auswirkungen des Sonnenlichts auf die Haut; ein Einfluss der Rassezusammensetzung kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Diese Überlegung wirft die Frage auf, ob sich nicht auch die biomechanischen Eigenschaften der Haut von Menschen unterschiedlicher Hautfarben und Ethnien unterscheiden.

Nach Vergleich mit bei hellhäutigen Menschen erhobenen Daten aus der Literatur eignet sich die Haut der Bio-Schweine am ehesten als Modell für die Haut des Menschen. Um der Variabilität der Haut als biologisches Material gerecht zu werden, sollte aber möglichst die Haut von Menschen verschiedener Hautfarben untersucht werden, und mit Hilfe einer großen Anzahl randomisierter Hautproben der individuelle Einfluss verringert werden. Die Mediane der erhobenen Daten bei den Bio-Schweinen von 33,2 MPa

für die Reißspannung und 40 % für die Reißdehnung können aber als Ausgangspunkt für die Erstellung eines Modells der Haut dienen.

5. Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, Daten für die mechanischen Eigenschaften der Haut zur Verletzungssimulation zu generieren. Bisher ist das Dehnungsverhalten der Haut unter dynamischen Bedingungen kaum erforscht. Daher wurden am Modell Schwein die Reißfestigkeit und Dehnbarkeit der Haut unter dynamischen Bedingungen bestimmt. Die erhobenen Daten sollen zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Haut in Finite-Elemente-Modellen des Menschen dienen, um auch das Risiko für Verletzungen wie Quetsch-Riss-Wunden angemessen darstellen zu können.

Es flossen 89 gültige Zugversuche mit Haut von sieben Individuen, davon vier herkömmlichen Mastschweinen und drei Bio-Schweinen, in die Auswertung ein. Die Versuche wurden mit einem Fallturm aus drei verschiedenen Fallhöhen durchgeführt, die nominellen Dehnraten von 67/s, 121/s und 218/s entsprechen. Es wurden die drei Zugrichtungen senkrecht, parallel und diagonal zu den Hautspaltlinien getestet. Die Versuche fanden zu etwa gleichen Teilen am ersten und am zweiten Tag nach der Schlachtung statt.

Bei jedem Versuch wurden zwei Zielparameter bestimmt: die Reißspannung, das heißt die Zugkraft, die zum Zerreißen der Probe führt, bezogen auf die Querschnittsfläche der Probe; und die Reißdehnung, das heißt die Dehnung (in Prozent) zum Zeitpunkt des Zerreißens.

Die ermittelte Reißfestigkeit und Dehnbarkeit der Haut ist inter- und intraindividuell sehr variabel. Insgesamt wurden Reißspannungen zwischen 7,2 MPa und 61,1 MPa und Reißdehnungen von 6 % bis 387 % gemessen.

Es zeigte sich bei den herkömmlichen Mastschweinen ein grundlegend anderes Verhalten als bei den Bio-Schweinen.

Bei den herkömmlichen Mastschweinen ist die Reißspannung mit 7,2 MPa bis 37,9 MPa niedriger als bei den Bio-Schweinen. Die Reißdehnung zeigt einen Zusammenhang mit der Zugrichtung in Bezug auf die Hautspaltlinien. Sie ist parallel zu den

Hautspaltlinien mit 26 % und 130 % am niedrigsten, und kann senkrecht dazu bis zu 387 % betragen.

Bei den Bio-Schweinen wurden Reißspannungen zwischen 13,4 MPa und 61,1 MPa gemessen. Die Reißspannung ist senkrecht zu den Hautspaltlinien am höchsten. Die Reißdehnung ist geringer als bei den herkömmlichen Mastschweinen. Sie ist unabhängig von der Zugrichtung und liegt zwischen 6 % und 95 %.

Worauf diese Unterschiede beruhen, kann ohne histologische Untersuchung nicht abschließend geklärt werden. Als mögliche Erklärung wird die durch UV-Exposition veränderte Struktur der kollagenen und elastischen Fasern der Dermis diskutiert; die Schweinerassen, aus welchen die gemischtrassigen Schweine gekreuzt wurden, könnten ebenfalls eine Rolle spielen.

Es wurde keine eindeutige Abhängigkeit von der Dehnrate beobachtet. Es scheinen entweder die Dehnraten bei gewähltem Versuchsaufbau zu nah zusammen zu liegen, oder die verwendeten Sensoren für die erwarteten Unterschiede nicht sensibel genug zu sein.

Es ist für die Lagerungszeit von bis zu zwei Tagen anhand der vorliegenden Daten kein Einfluss auf die Versuchsergebnisse anzunehmen.

Die unterschiedlichen Ergebnisse in den Gruppen der Bio-Schweine und der herkömmlichen Mastschweine werfen die Frage auf, ob und wenn ja welche Schweine als Modell für die Haut des Menschen geeignet sind. Nach Vergleich mit der Literatur sind die Ergebnisse bei den Bio-Schweinen dem Menschen am nächsten.

Es ist nicht bekannt, ob sich auch die biomechanischen Eigenschaften von menschlicher Haut je nach Ethnie und Hautfarbe unterscheiden. Um die Haut des Menschen mit einer angemessen hohen Sicherheit simulieren zu können, wären daher Zugversuche mit einer größeren Population menschlicher Individuen verschiedener Hautfarben sinnvoll. Vereinfacht könnte anhand der Mediane der Reißspannung und Reißdehnung der Haut der Bio-Schweine (33,2 MPa und 40 %) zunächst ein allgemeines, richtungsunabhängiges Modell der Haut erstellt werden.

A. Übersicht aller Versuchsergebnisse

Tabelle 6: Übersicht über die durchgeführten Versuche

Versuch Nr.	Individuum Nr.	Höhe (cm)	Zugrichtung (Hautspalt- linien)	Lagerungszeit (Tage)	Reißspannung (MPa)	Reißdehnung (%)
1	1	46,5 cm	parallel	1 Tag	19,21	42
2	1	46,5 cm	senkrecht	1 Tag	7,15	387
3	1	46,5 cm	diagonal	1 Tag	12,72	267
4	1	14,4 cm	diagonal	1 Tag	8,62	192
6	1	14,4 cm	senkrecht	1 Tag	10,54	318
7	1	14,4 cm	parallel	1 Tag	17,51	43
8	2	14,4 cm	parallel	2 Tage	21,16	39
9	2	14,4 cm	diagonal	2 Tage	20,70	52
10	2	14,4 cm	senkrecht	2 Tage	13,60	206
11	2	46,5 cm	parallel	2 Tage	35,90	39
12	2	46,5 cm	diagonal	2 Tage	14,87	87

Tabelle 6 – Fortsetzung

Versuch Nr.	Individuum Nr.	Höhe (cm)	Zugrichtung (Hautspaltlinien)	Liegezeit (Tage)	Reißspannung (MPa)	Reißdehnung (%)
13	2	46,5 cm	senkrecht	2 Tage	16,05	288
14	2	151,8 cm	parallel	2 Tage	23,37	52
15	2	151,8 cm	diagonal	2 Tage	14,52	32
16	2	151,8 cm	senkrecht	2 Tage	20,41	311
17	2	14,4 cm	parallel	2 Tage	30,27	51
18	2	14,4 cm	diagonal	2 Tage	34,11	71
19	2	14,4 cm	senkrecht	2 Tage	14,11	321
20	3	14,4 cm	parallel	2 Tage	22,99	130
21	3	14,4 cm	diagonal	2 Tage	10,58	321
24	3	46,5 cm	diagonal	2 Tage	22,31	134
25	3	46,5 cm	senkrecht	2 Tage	14,57	235
26	4	151,8 cm	parallel	1 Tag	7,24	52
27	4	14,4 cm	parallel	1 Tag	9,99	26
28	4	151,8 cm	diagonal	1 Tag	9,06	81
29	4	14,4 cm	diagonal	1 Tag	10,51	79
30	4	151,8 cm	senkrecht	1 Tag	8,48	208
31	4	14,4 cm	senkrecht	1 Tag	11,26	229
33	4	46,5 cm	parallel	1 Tag	7,72	65
34	4	46,5 cm	diagonal	1 Tag	13,57	79

Tabelle 6 – Fortsetzung

Versuch Nr.	Individuum Nr.	Höhe (cm)	Zugrichtung (Hautspalt- linien)	Liegezeit (Tage)	Reißspannung (MPa)	Reißdehnung (%)
35	4	14,4 cm	parallel	1 Tag	14,08	48
36	4	46,5 cm	senkrecht	1 Tag	13,11	192
38	4	14,4 cm	senkrecht	2 Tage	15,48	144
39	4	151,8 cm	parallel	2 Tage	13,35	78
40	4	151,8 cm	diagonal	2 Tage	21,16	97
41	4	151,8 cm	senkrecht	2 Tage	13,66	110
42	4	14,4 cm	diagonal	2 Tage	15,67	91
43	4	46,5 cm	senkrecht	2 Tage	19,69	111
44	4	46,5 cm	diagonal	2 Tage	21,35	157
45	4	46,5 cm	parallel	2 Tage	21,32	37
46	4	14,4 cm	parallel	2 Tage	27,82	39
47	4	46,5 cm	diagonal	2 Tage	21,65	97
48	4	46,5 cm	parallel	2 Tage	23,29	27
49	4	46,5 cm	senkrecht	2 Tage	11,54	202
50	5	151,8 cm	parallel	1 Tag	21,25	35
51	5	151,8 cm	diagonal	1 Tag	17,97	95
52	5	151,8 cm	senkrecht	1 Tag	35,64	20
53	5	151,8 cm	parallel	1 Tag	24,71	21
54	5	151,8 cm	diagonal	1 Tag	16,64	17

Tabelle 6 – Fortsetzung

Versuch Nr.	Individuum Nr.	Höhe (cm)	Zugrichtung (Hautspaltlinien)	Liegezeit (Tage)	Reißspannung (MPa)	Reißdehnung (%)
56	5	46,5 cm	parallel	1 Tag	28,79	34
57	5	46,5 cm	diagonal	1 Tag	19,51	87
58	5	46,5 cm	senkrecht	1 Tag	40,83	38
59	5	14,4 cm	parallel	1 Tag	28,95	49
60	5	14,4 cm	diagonal	1 Tag	17,42	90
61	5	14,4 cm	senkrecht	1 Tag	37,36	52
62	5	151,8 cm	parallel	2 Tage	24,05	6
63	5	151,8 cm	diagonal	2 Tage	20,63	21
64	5	151,8 cm	senkrecht	2 Tage	29,58	29
65	5	151,8 cm	parallel	2 Tage	26,90	24
66	5	151,8 cm	diagonal	2 Tage	20,24	45
67	5	151,8 cm	senkrecht	2 Tage	31,45	19
68	5	46,5 cm	parallel	2 Tage	36,84	46
69	5	46,5 cm	diagonal	2 Tage	13,42	23
70	5	46,5 cm	senkrecht	2 Tage	33,18	43
71	5	14,4 cm	parallel	2 Tage	30,64	39
72	5	14,4 cm	diagonal	2 Tage	24,41	22
73	5	14,4 cm	senkrecht	2 Tage	35,07	45
74	6	151,8 cm	parallel	1 Tag	32,63	52

Tabelle 6 – Fortsetzung

Versuch Nr.	Individuum Nr.	Höhe (cm)	Zugrichtung (Hautspalt- linien)	Liegezeit (Tage)	Reißspannung (MPa)	Reißdehnung (%)
75	6	151,8 cm	diagonal	1 Tag	31,64	25
76	6	151,8 cm	senkrecht	1 Tag	44,68	20
77	6	14,4 cm	senkrecht	1 Tag	41,34	66
78	6	46,5 cm	diagonal	1 Tag	35,39	69
79	6	46,5 cm	senkrecht	1 Tag	55,97	38
80	6	14,4 cm	senkrecht	1 Tag	36,67	23
81	7	151,8 cm	parallel	1 Tag	39,52	44
82	7	151,8 cm	diagonal	1 Tag	35,16	22
83	7	151,8 cm	senkrecht	1 Tag	30,30	28
84	7	151,8 cm	parallel	1 Tag	35,97	58
85	7	151,8 cm	diagonal	1 Tag	31,57	93
86	7	151,8 cm	senkrecht	1 Tag	30,90	28
87	7	46,5 cm	parallel	1 Tag	41,79	65
88	7	46,5 cm	diagonal	1 Tag	35,28	33
89	7	46,5 cm	senkrecht	1 Tag	61,11	41
90	7	14,4 cm	parallel	1 Tag	37,89	60
91	7	14,4 cm	diagonal	1 Tag	45,60	56
92	7	14,4 cm	senkrecht	1 Tag	58,13	64
93	7	14,4 cm	parallel	1 Tag	43,05	64

Tabelle 6 – Fortsetzung

Versuch Nr.	Individuum Nr.	Höhe (cm)	Zugrichtung (Hautspaltlinien)	Liegezeit (Tage)	Reißspannung (MPa)	Reißdehnung (%)
94	7	14,4 cm	diagonal	1 Tag	43,84	40
95	7	14,4 cm	senkrecht	1 Tag	37,86	60

B. Tabellarische Darstellung der Mediane und Spannweiten

Tabelle 7: Reißspannung und -dehnung in Abhängigkeit vom Individuum

Individuum		Reißspannung (MPa)	Reißdehnung (%)
Herk. Mastschweine	1 (n = 6)	Median Spannweite	11,6 7,2 - 19,2
	2 (n = 12)	Median Spannweite	20,6 13,6 - 35,9
Herk. Mastschweine	3 (n = 5)	Median Spannweite	18,4 10,6 - 23,0
	4 (n = 22)	Median Spannweite	13,6 7,2 - 27,8
Bio-Schweine	5 (n = 23)	Median Spannweite	26,9 13,4 - 40,8
	6 (n = 7)	Median Spannweite	36,7 31,6 - 56,0
7 (n = 15)	Median Spannweite	37,9 30,3 - 61,1	56 22 - 93

Tabelle 8: Reißspannung und -dehnung in Abhängigkeit von Zugrichtung, Fallhöhe und Lagerungszeit - Gesamtbetrachtung

(a) in Abhängigkeit von der Zugrichtung

Richtung		Reißspannung (MPa)	Reißdehnung (%)
parallel (n = 29)	Median	24,7	44
	Spannweite	7,2 - 43,0	6 - 130
diagonal (n = 30)	Median	20,4	79
	Spannweite	8,6 - 45,6	17 - 321
senkrecht (n = 30)	Median	29,9	65
	Spannweite	7,2 - 61,1	19 - 387

(b) in Abhängigkeit von der Fallhöhe

Höhe		Reißspannung (MPa)	Reißdehnung (%)
14,4 cm (n = 32)	Median	23,7	60
	Spannweite	8,6 - 58,1	22 - 321
46,5 cm (n = 28)	Median	21,3	67
	Spannweite	7,2 - 61,1	23 - 387
151,8 cm (n = 29)	Median	24,1	35
	Spannweite	7,2 - 44,7	6 - 311

(c) in Abhängigkeit von der Lagerungszeit

Lagerungszeit		Reißspannung (MPa)	Reißdehnung (%)
1 Tag (n = 48)	Median	27,8	52
	Spannweite	7,2 - 61,1	17 - 387
2 Tage (n = 41)	Median	21,2	49
	Spannweite	11,5 - 36,8	6 - 311

Tabelle 9: Herkömliche Mastschweine - Reißspannung und -dehnung in Abhängigkeit von Zugrichtung und Fallhöhe

(a) in Abhängigkeit von der Zugrichtung

Richtung		Reißspannung (MPa)	Reißdehnung (%)
parallel (n = 15)	Median	21,2	43
	Spannweite	7,2 - 35,9	26 - 130
diagonal (n = 15)	Median	14,9	91
	Spannweite	8,6 - 34,1	32 - 321
senkrecht (n = 14)	Median	13,6	219
	Spannweite	7,2 - 20,4	110 - 387

(b) in Abhängigkeit von der Fallhöhe

Höhe		Reißspannung (MPa)	Reißdehnung (%)
14,4 cm (n = 18)	Median	14,8	85
	Spannweite	8,6 - 34,1	26 - 321
46,5 cm (n = 17)	Median	16,1	111
	Spannweite	7,2 - 35,9	27 - 387
151,8 cm (n = 9)	Median	13,7	81
	Spannweite	7,2 - 23,4	32 - 311

(c) in Abhängigkeit von der Lagerungszeit (nur Individuum Nr. 4)

Lagerungszeit		Reißspannung (MPa)	Reißdehnung (%)
1 Tag (n =)	Median	10,3	79
	Spannweite	7,2 - 14,1	26 - 229
2 Tage (n =)	Median	20,4	97
	Spannweite	11,5 - 27,8	27 - 202

Tabelle 10: Bio-Schweine - Reißspannung und -dehnung in Abhängigkeit von Zugrichtung und Fallhöhe

(a) in Abhängigkeit von der Zugrichtung

Richtung		Reißspannung (MPa)	Reißdehnung (%)
parallel (n = 14)	Median	31,6	45
	Spannweite	21,3 - 43,0	6 - 65
diagonal (n = 15)	Median	24,4	40
	Spannweite	13,4 - 45,6	17 - 95
senkrecht (n = 16)	Median	37,0	38
	Spannweite	29,6 - 61,1	19 - 66

(b) in Abhängigkeit von der Fallhöhe

Höhe		Reißspannung (MPa)	Reißdehnung (%)
14,4 cm (n = 14)	Median	37,6	54
	Spannweite	17,4 - 58,1	22 - 90
46,5 cm (n = 11)	Median	35,4	41
	Spannweite	13,4 - 61,1	23 - 87
151,8 cm (n = 20)	Median	30,6	27
	Spannweite	16,6 - 44,7	6 - 95

(c) in Abhängigkeit von der Lagerungszeit (nur Individuum Nr. 5)

Lagerungszeit		Reißspannung (MPa)	Reißdehnung (%)
1 Tag (n =)	Median	24,7	38
	Spannweite	16,6 - 40,8	17 - 95
2 Tage (n =)	Median	28,2	27
	Spannweite	13,4 - 36,8	6 - 46

C. Quelltext des Programms zur Datenextraktion

Das folgende Programm wurde in der Programmiersprache Pascal implementiert. Es ermittelt aus den von Kraft- und Wegsensor gelieferten Daten jedes einzelnen Versuchs die zur Berechnung der Reißspannung und Reißdehnung relevanten Werte. Die weitere Umrechnung in SI-Einheiten erfolgte in Excel (siehe auch Kapitel 2.3.2).

dok.pas

```
Program Dok;

$N+
uses Crt;
const
  abstand = 100;
  probenlaenge_mm = 25;
  breite_mm = 4;

type
  datensatz = record
    zeit      : longint;
    weg       : longint;
    kraft     : longint;
    weg_diff100 : longint;
    steigung   : real;
  end;
```

```
weg_array = array[1..30] of longint;

var

  inFile          : Text;
  inFileName     : String[30];
  inFileType      : String[5];

  outFile         : Text;
  outFileFileName : String[30];
  outFolder       : String[30];

  Liste           : Text;
  y_n             : String[1];
  dicke_Str       : String[3];
  dicke_StrExcel : String[3];
  einlesezeile    : String[15];
  Exit            : Text;
  check           : Text;

  code            : Integer;

  recordStr      : String[6];
  ch1Str         : String[8];
  ch2Str         : String[7];

  recordInt      : Longint;
  ch1Int         : Longint;
  ch2Int         : Longint;

  maxkraft        : longint;
  weg_bei_maxkraft : longint;
  weg_bei_maxkraft_diff : real;
  zeit_bei_maxkraft : longint;
```

```
steigung_bei_maxkraft      : real;
max_steigung                : real;
weg_erste30                 : weg_array;
weg_summe                   : longint;
weg_start                   : real;
maxkraft_N                  : real;
weg_bei_maxkraft_mm         : real;
steigung_bei_maxkraft_mps  : real;
max_steigung_mps            : real;
dehnung                      : real;
dehnrate_s_1                 : real;
dicke_mm                     : real;
spannung_Npmm2               : real;

i                           : longint;
j                           : longint;
k                           : longint;

datRec, datRec2             : datensatz;
daten_file                  : file of datensatz;
```

```
(*-----*)
```

```
procedure infile_einlesen;

begin
  (* clrScr; *)
  writeln('');
  writeln(inFileName, ' in Arbeit...');
  writeln('');
  writeln('    inFile einlesen');
```

```
assign(inFile, 'C:\rohdaten\' + inFileNam + '.' + inFileTyp);
reset(inFile);

outFileName := 'out' + inFileNam;
outFolder := 'Output';

assign(daten_file, 'c:\' + outFolder + '\' + infilename + '.msg');
rewrite(daten_file);
readln(inFile);

i:=0;
repeat

    readln(inFile, recordStr, ch1Str, ch2Str);

    i:=i+1;
    Val(recordStr, recordInt, code);
    Val(ch1Str, ch1Int, code);
    Val(ch2Str, ch2Int, code);
    datRec.zeit:=recordInt;
    datRec.weg:=ch1Int;
    datRec.kraft:=ch2Int;
    datRec.steigung:=0;
    datrec.weg_diff100:=0;

    write(daten_file, datrec);

until eof(inFile);

close(inFile);
close(daten_file);

(* clrScr;  *)
```

```
end;

(*-----*)

procedure Steigung_berechnen;

begin
    writeln('      Steigung berechnen');

    assign(daten_file,'c:\'+outFolder+'\'+filename+'.msg');
    reset(daten_file);
    max_steigung:=0;
    maxkraft:=0;
    weg_bei_maxkraft:=0;
    zeit_bei_maxkraft:=0;

    assign(outFile,'C:\'+outFolder+'\'+outFileName+'.dat');
    rewrite(outFile);

    i:=abstand;
    j:=0;
    k:=0;

repeat
    seek(daten_file,i);

    read(daten_file,datrec);
    j := i-abstand;
    seek(daten_file,j);
    read(daten_file,datRec2);
```

```
datrec.weg_diff100:=datRec2.weg-datrec.weg;

datrec.steigung:=datRec.weg_diff100/abstand;

    if datrec.steigung > max_steingung then
        max_steingung:=datrec.steigung;
        seek(daten_file,i);
        write(daten_file,datrec);

        if datrec.kraft<maxkraft then
            begin
                maxkraft:=datrec.kraft;
                weg_bei_maxkraft:=datrec.weg;
                zeit_bei_maxkraft:=datrec.zeit;
                k:=i+50;
            end;

        if i=k then
            steigung_bei_maxkraft:=datrec.steigung;

        if i <= (abstand + 30) then
            weg_erste30[i-abstand] := datrec.weg;

        seek(daten_file,i);

        i:=i+1;

until datrec.weg < 2000;
close(daten_file);
close(outFile);

end;
```

```
(*-----*)  
  
procedure Einheiten_konvertieren;  
  
begin  
  
writeln(' Einheiten konvertieren und Ausgabe');  
  
    i := 1;  
    weg_summe := 0;  
repeat  
    weg_summe := weg_summe + weg_erste30[i];  
    write(weg_erste30[i]);  
    write(' ');  
    i := i + 1;  
until i > 30;  
weg_start := weg_summe / 30;  
writeln('');  
writeln(weg_start:8:1);  
writeln(weg_bei_maxkraft);  
  
Val(dicke_Str,dicke_mm,code);  
  
writeln('');  
  
if Dicke_Str      = '1.0' then Dicke_StrExcel := '1,0'  
else if Dicke_Str = '1.0' then Dicke_StrExcel := '1,0'  
else if Dicke_Str = '1.5' then Dicke_StrExcel := '1,5'  
else if Dicke_Str = '2.0' then Dicke_StrExcel := '2,0'  
else if Dicke_Str = '2.5' then Dicke_StrExcel := '2,5'  
else if Dicke_Str = '3.0' then Dicke_StrExcel := '3,0'
```

```
else if Dicke_Str = '3.5' then Dicke_StrExcel := '3,5'  
else Dicke_StrExcel := 'Error';  
  
writeln(Exit,inFileName:5,Dicke_StrExcel:10,maxkraft:11,  
       weg_bei_maxkraft_diff:9:0,steigung_bei_maxkraft:11:4);  
  
writeln(check,inFileName:5,Dicke_mm:10,Dehnung:10:2,  
       Dehnrate_s_1:14:2,Spannung_Npmm2:16:2);  
  
end;  
  
(*-----*)  
  
(* Hauptprogramm *)  
  
begin  
  
  ClrScr;  
  
  assign(Exit,'C:\Exit.dat');  
  rewrite(Exit);  
  writeln(Exit,'Datei Dicke_mm  Kraft_bit  Weg_bit  Steigung  ');\n  
  
  assign(check,'C:\check.dat');  
  rewrite(check);  
  writeln(check,'Datei Dicke[mm]  Dehnung[]  Dehnrate[s-1]  
           Spannung[N/qmm] ');\n  
  
  assign(Liste,'C:\Liste.txt');  
  reset(Liste);
```

```
repeat

    readln(liste,einlesezeile);
    infilename:=copy(einlesezeile,1,3);
    dicke_Str:=copy(einlesezeile,5,3);
    y_n:=copy(einlesezeile,9,1);
    inFileType := 'dat';
    if (y_n = 'y') then
        begin

            infile_einlesen;
            Steigung_berechnen;
            Einheiten_konvertieren;

        end;
    until eof(Liste);

    close(Liste);
    close(Exit);

    writeln('');
    writeln('Ergebnisse unter D:\DOSdrive\EXIT.dat gespeichert.');
    writeln('');
    writeln('Zum Beenden Taste druecken...');

    while not keypressed do;

end.
```

Erklärung

Hiermit erkläre ich, Miriam Theresa Leiderer, geboren am 3. Juli 1988 in München, an Eides statt, dass ich die der Medizinischen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München zur Promotion eingereichte Dissertation mit dem Titel

„Zugfestigkeit und Dehnbarkeit der Haut unter dynamischen Bedingungen am Modell Schwein“

am Institut für Rechtsmedizin selbständig angefertigt habe, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient habe und alle Erkenntnisse, die aus anderen Arbeiten ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Die hier vorgelegte Dissertation wurde nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht. Ich übertrage der Medizinischen Fakultät das Recht, weitere Kopien meiner Dissertation herzustellen und zu vertreiben.

Hamburg, den 10.12.2020

Miriam Leiderer