



MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Rippenverletzungen durch scharfe Gewalt:
Multimodale morphologische Analyse mittels
Mikro-CT, REM und Makrofotografie“

verfasst von / submitted by

Larissa Barbara Komo BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien, 2016 / Vienna 2016

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 066 827

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Anthropologie

Betreut von / Supervisor:

Mag. DDr. Martin Grassberger, Privatdoz.

It is believed that forensic scientists in other disciplines would find radiologists in their area interested in cooperative efforts. Sharing of interdisciplinary skills and knowledge would improve the economy and effectiveness of investigative efforts, prevent some false starts and/or reinventions of well-worn wheels, and most important, expand scientific horizons.

B. Gil Brogdon 1998

DANKSAGUNG

Danke Martin, dass Du mir die Möglichkeit gegeben hast meine Masterarbeit im Bereich der forensischen Anthropologie zu schreiben. Dein kreatives Engagement beim Bau des Fallbeils machte diese Studie erst möglich. Außerdem wäre die Arbeit ohne Deine fachlichen Ratschläge nicht so fundiert (und bildreich) wie sie jetzt ist.

Des Weiteren möchte ich mich bei Prof. Gerhard Weber und der Arbeitsgruppe „Virtuelle Anthropologie“ bedanken; besonders bei Martin Dockner für seine Geduld und Hilfsbereitschaft bei den μ CT-Scans und Rekonstruktionen.

Für die Benutzung des REMs danke ich Stephan Puchegger vom Fakultätszentrum für Nanostrukturforschung.

Ich möchte mich ganz herzlich bei Tristan Gelfelder und Tanja Mederer für die hilfreichen Verbesserungsvorschläge und Korrekturen bedanken. Ihr habt unermüdlich meine Entwürfe gelesen und meine ausschweifenden Beschreibungen in Schach gehalten. Außerdem danke ich Christine Zwergel dafür, dass sie während meiner gesamten Studienzeit bei Fragen zur englischen Grammatik (ob bei *project reports*, *application documents* oder dem weiter hinten zu lesenden Abstract) immer ein offenes Ohr und eine passende Erklärung parat hatte.

Bei den IT-Superhelden Constanze Froböse und Thomas Ricker möchte ich mich ebenfalls bedanken. Ihr hattet für alle meine technischen Probleme eine Lösung und habt jederzeit meine seitenlangen Manuskripte ausgedruckt.

Des Weiteren geht ein dickes Dankeschön an alle, die mir ein Messer von sich für die Versuche zur Verfügung gestellt haben.

Zu guter Letzt danke ich meiner großartigen Familie, die mich bedingungslos in Hessen und in Wien unterstützt. Für die finanzielle Unterstützung bedanke ich mich bei meinen supercalifragilisticexpialigetischen Sponsoren: Mama, Papa, Oma Margret, Barbara und Tristan. Vielen lieben Dank Euch allen!

INHALTSVERZEICHNIS

Danksagung	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XII
Formelverzeichnis	XV
Abkürzungsverzeichnis	XVI
Zusammenfassung	1
Abstract	3
1 EINLEITUNG	5
1.1 Virtuelle Anthropologie	5
1.2 Bildgebende Verfahren	6
1.2.1 Die Verwendung des REMs in der Forensischen Medizin	6
1.2.2 Die Verwendung des CTs in der Forensischen Medizin	6
1.2.3 Computertomographische Bilder - Die Grundlagen	7
1.3 Geometrische Morphometrie	10
1.4 Stichwunden und Werkzeugspuren	13
1.4.1 Messer	13
1.4.2 Stich- und Schnittverletzungen	15
1.4.3 Rekonstruktion einer Tat	19
1.4.4 Statistiken	21
1.5 Experimente mit Schweinekadavern	23
1.6 Fragestellung der Studie	24
2 MATERIAL UND METHODEN	25
2.1 Material	25
2.1.1 Geräte & Verbrauchsmaterialien	25
2.1.2 Versuchsmesser	26
2.1.3 Schweinerippen	28
2.2 Methoden	30
2.2.1 Zufügen der Stichwunden	30
2.2.2 Mikro-Computertomographie	32
2.2.3 Mazeration der Knochen	34
2.2.4 Makrofotografie	34
2.2.5 Rasterelektronenmikroskopie und EDX	36
2.2.6 Bilddaten-Analyse	38
2.2.7 Statistische Auswertung	46

3	ERGEBNISSE	49
3.1	Mikro-Computertomographie	50
3.1.1	Charakteristika der Kerbmarken	51
3.1.2	Einfluss der Mazeration	65
3.1.3	Zuordnung der Versuchsmesser	70
3.2	Makrofotografie	74
3.2.1	Versuchsmesser	74
3.2.2	Einstichmerkmale	76
3.3	Rasterelektronenmikroskop	80
3.4	Gestaltanalyse	84
3.4.1	Versuchsmesser	84
3.4.2	Einstichmerkmale	85
3.5	Zurückverfolgung auf Klingendicke	89
3.5.1	Klingendicke vs. Einstichhöhe	89
3.5.2	Klingenwinkel vs. Einstichwinkel	93
4	DISKUSSION	97
4.1	Verwendung eines Fallbeils	98
4.2	Auswertung mittels morphometrischer Software	100
4.3	Möglichkeit der Zuordnung einer Tatwaffe	102
4.3.1	Größe und Gestalt des Messers	103
4.3.2	Typus des Messers	107
4.3.3	Anzahl der Messer	107
4.4	µCT versus Makrofotografie versus REM	109
4.5	Fleischhaltige versus mazerierte Knochen	115
4.6	Röntgenmikroanalyse	120
4.7	Limitationen	122
4.8	Zukünftige Studien	125
4.9	Resümee	128
5	Literaturverzeichnis	129
6	Anhang	137
6.1	Abbildungen Anhang	137
6.2	Tabellen Anhang	146

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 01: Konfiguration eines μ CT Scanners.....	8
Abb. 02: Procrustes Superimposition.....	10
Abb. 03: Thin-Plate Spline.....	12
Abb. 04: Der verwundete Mann.....	13
Abb. 05: Aufbau von Messern.....	14
Abb. 06: Formen von Kerbmarken.....	15
Abb. 07: Drehstich.....	20
Abb. 08: Waffenwahl im Ländervergleich.....	21
Abb. 09: Opfer von scharfer Gewalt.....	22
Abb. 10: Messerauswahl.....	27
Abb. 11: Schweinerippen.....	28
Abb. 12: Fallvorrichtung.....	30
Abb. 13: Verwendung des μ CTs.....	33
Abb. 14: Maße einer Messerklinge.....	34
Abb. 15: Klingenabdrücke in Modelliermasse.....	36
Abb. 16: Besputterung der Rippenfragmente.....	37
Abb. 17: Verwendung des REMs.....	38
Abb. 18: Messerklingen digital vermessen.....	39
Abb. 19: Kurven zeichnen.....	40
Abb. 20: Sekundäre Punkte digitalisieren.....	41
Abb. 21: Semilandmarks digitalisieren.....	41
Abb. 22: Punkte und Kurve entlang der Knocheneinstiche kreieren.....	42
Abb. 23: Line Probe.....	43
Abb. 24: Grenzlinien zeichnen.....	44
Abb. 25: Einstichmorphologie.....	49
Abb. 26: Rippenrekonstruktionen 1-9.....	50
Abb. 27: Rippenrekonstruktionen 10-12.....	51
Abb. 28: Segmentierte Einstiche.....	51
Abb. 29: Histogramme der Distanzen und Winkel.....	54
Abb. 30: Distanzmessung vor Mazeration.....	55
Abb. 31: Distanzmessung nach Mazeration.....	56
Abb. 32: Knocheneinstichdistanzen vor und nach der Mazeration.....	57
Abb. 33: Winkelmessungen an Querschnittsbildern von μ CT-Aufnahmen.....	59
Abb. 34: Öffnungs- und Bodenwinkel vor und nach der Mazeration.....	60
Abb. 35: Unterer und oberer Neigungswinkel vor und nach der Mazeration.....	61
Abb. 36: Lineare Regressionen zwischen Öffnungswinkel und maximale Höhe.....	64

Abb. 37: Lineare Regressionen zwischen Neigungswinkel und maximaler Höhe	64
Abb. 38: Einstichmarken vor und nach Mazeration in Amira	66
Abb. 39: Vergleich der Distanzen vor und nach Mazeration	67
Abb. 40: Höhendifferenzen der Kerbmarken durch Mazeration	68
Abb. 41: Vergleich der Winkel vor und nach Mazeration.....	69
Abb. 42: Lineare Regression der Winkel vor und nach Mazeration.....	69
Abb. 43: ÖW-Gruppen.....	70
Abb. 44: NWoben-Gruppen	70
Abb. 45: NWunten-Gruppen	71
Abb. 46: BW-Gruppen	71
Abb. 47: KEL & MSL-Gruppen.....	71
Abb. 48: KEH-Gruppen.....	72
Abb. 49: MKEH-Gruppen.....	72
Abb. 50: KEB-Gruppen.....	72
Abb. 51: Klingendicke.....	75
Abb. 52: Messungen an makroskopischen Aufnahmen	77
Abb. 53: Vergleich der Messwerte von Makrofotos und μ CT-Scans vor Mazeration	79
Abb. 54: Messungen an REM-Aufnahmen.....	81
Abb. 55: Vergleich der Messwerte von REM-Aufnahmen und μ CT-Scans vor Mazeration ...	82
Abb. 56: Energiedispersive Röntgenanalyse	83
Abb. 57: Messergestalt.....	84
Abb. 58: Relative Warp der Messer	85
Abb. 59: Einstichgestalt.....	85
Abb. 60: Relative Warp der Einstiche mit PC2 und 3.....	86
Abb. 61: Relative Warp der Einstiche mit PC1 und 4.....	87
Abb. 62: Centroid Size der Einstiche von verschiedenen Messertypen vor Mazeration	88
Abb. 63: Klingendicke des Messers Nr. 1 und 2 im Vergleich	91
Abb. 64: Klingendicke des Messers Nr. 3 und 4 im Vergleich	91
Abb. 65: Klingendicke des Messers Nr. 7 und 10 im Vergleich	92
Abb. 66: Boxplot Klingewinkel und Einstichwinkel aller Messer	93
Abb. 67: Klingewinkel des Messers Nr. 3 und 6 im Vergleich	93
Abb. 68: Klingewinkel und Einstichwinkel im Vergleich.....	94
Abb. 69: Axialkraft-Zeit-Profil eines Messerstiches	98
Abb. 70: Klingquerschnitte der Sektionsmesser und des Sägemessers	103
Abb. 71: Intercostalraum	105
Abb. 72: Gestaltvariable der Messerklinge in Bezug auf den NWunten	106
Abb. 73: Partial volume averaging	110

Abb. 74: Bildlicher Vergleich der verschiedenen Methoden	111
Abb. 75: Vergleich des Einstichs 7.1	112
Abb. 76: Vergleich eines Ausschnitts des Einstichs 1a.1	112
Abb. 77: Zoom im REM	113
Abb. 78: Artefakte bei REM-Bildern	114
Abb. 79: Veränderung von Knochenchips nach Mazeration	116
Abb. 80: Knochenauffaserung nach Mazeration	117
Abb. 81: Kraftverteilung eines Messerstiches	118
Abb. 82: Einstichkontur.....	124
Abb. 83: Analyse der segmentierten Rippeneinstiche.....	127
Abb. 84: Steakmesser (Messer Nr. 1).....	137
Abb. 85: Pizzamesser (Messer Nr. 2).....	137
Abb. 86: Seziermesser (Messer Nr. 3).....	137
Abb. 87: Knorpelmesser I (Messer Nr. 4)	137
Abb. 88: Knorpelmesser II (Messer Nr. 5).....	138
Abb. 89: Zubereitungsmesser (Messer Nr. 6).....	138
Abb. 90: Blockmesser (Messer Nr. 7).....	138
Abb. 91: Grobes Sägemesser (Messer Nr. 8).....	138
Abb. 92: Jagdmesser (Messer Nr. 9).....	138
Abb. 93: Tomatenmesser (Messer Nr. 10).....	139
Abb. 94: Schere (Messer Nr. 11)	139
Abb. 95: Klappmesser (Messer Nr. 12).....	139
Abb. 96: Distanzmessungen μ CT mit nicht-mazerierten Rippen	140
Abb. 97: Winkelmessungen μ CT mit nicht-mazerierten Rippen	141
Abb. 98: : Distanzmessungen μ CT mit mazerierten Rippen.....	142
Abb. 99: Winkelmessungen μ CT mit mazerierten Rippen.....	143
Abb. 100: Höhenmessungen REM	144
Abb. 101: Distanzmessungen Makrofotografie	145

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 01: Auflistung der benutzten Verbrauchsmaterialien	25
Tabelle 02: Auflistung der eingesetzten Geräte	26
Tabelle 03: Versuchsmesser	26
Tabelle 04: Durchschnittliche Rippengröße	28
Tabelle 05: μ CT Scanaufteilung	32
Tabelle 06: Scanparameter	33
Tabelle 07: Ausmessung der Messerklingen	35
Tabelle 08: REM Scanaufteilung	37
Tabelle 09: Definitionen der verwendeten LMs und SLMs an Messerklingen	39
Tabelle 10: Definitionen der verwendeten LMs und SLMs an Knocheneinstichen	42
Tabelle 11: Knocheneinstich-Messparameter	45
Tabelle 12: Einstichcharakteristika vor der Mazeration	52
Tabelle 13: Einstichcharakteristika nach der Mazeration	53
Tabelle 14: Ausreißer	54
Tabelle 15: Varianzanalyse der Distanzen	58
Tabelle 16: Varianzanalyse der Winkel	61
Tabelle 17: Korrelation mit Öffnungswinkel und Distanzen	63
Tabelle 18: Vergleich der Distanzen vor und nach Mazeration	65
Tabelle 19: Vergleich der Winkel vor und nach Mazeration	68
Tabelle 20: Gruppeneinteilung des Öffnungswinkels	70
Tabelle 21: Gruppeneinteilung des oberen Neigungswinkels	70
Tabelle 22: Gruppeneinteilung des unteren Neigungswinkels	71
Tabelle 23: Gruppeneinteilung des Bodenwinkels	71
Tabelle 24: Gruppeneinteilung der Länge (KEL & MSL)	71
Tabelle 25: Gruppeneinteilung der Knocheneinstichhöhe	72
Tabelle 26: Gruppeneinteilung der maximalen Einstichhöhe	72
Tabelle 27: Gruppeneinteilung der Knocheneinstichbreite	72
Tabelle 28: Messercharakteristika der gezahnten Messer	74
Tabelle 29: Messercharakteristika der glatten Messer	75
Tabelle 30: Vergleich der Klingendicke	76
Tabelle 31: Einstichcharakteristika anhand der Makroaufnahmen	78
Tabelle 32: Einstichcharakteristika anhand der REM-Aufnahmen	80
Tabelle 33: Vergleich der Centroid Size	87
Tabelle 34: Gültigkeit der Messereinstichhöhe	89
Tabelle 35: Gültigkeit der makrofotografischen und REM-Messungen	90
Tabelle 36: Korrelation mit Klingendicke	92

Tabelle 37: Korrelation mit Klingenwinkeln	95
Tabelle 38: Korrelation mit Klingenspitzenwinkeln	96
Tabelle 39: μ CT vs. Makrofotografie vs. REM	114
Tabelle 40: Normalverteilung der Kerbmarken-Distanzen und -Winkel	146
Tabelle 41: KEL vor Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	146
Tabelle 42: MSL vor Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	146
Tabelle 43: KEH vor Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	147
Tabelle 44: MKEH vor Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	147
Tabelle 45: KEB vor Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	148
Tabelle 46: ÖW vor Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	149
Tabelle 47: NWoben vor Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	149
Tabelle 48: NWunten, Tukey multiple comparisons of means	149
Tabelle 49: BW vor Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	150
Tabelle 50: KEL nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	150
Tabelle 51: MSL nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	150
Tabelle 52: KEH nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	151
Tabelle 53: MKEH nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	152
Tabelle 54: KEB nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	152
Tabelle 55: ÖW nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	153
Tabelle 56: NWunten nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	153
Tabelle 57: NWoben nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	153
Tabelle 58: BW nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of means	154
Tabelle 59: Korrelation mit Distanzen	154
Tabelle 60: Korrelation mit Winkeln und Distanzen	155
Tabelle 61: Korrelation mit Winkeln	155
Tabelle 62: Deskriptive Statistik Messer 1 vor Mazeration	156
Tabelle 63: Deskriptive Statistik Messer 2 vor Mazeration	156
Tabelle 64: Deskriptive Statistik Messer 3 vor Mazeration	157
Tabelle 65: Deskriptive Statistik Messer 4 vor Mazeration	157
Tabelle 66: Deskriptive Statistik Messer 5 vor Mazeration	158
Tabelle 67: Deskriptive Statistik Messer 6 vor Mazeration	158
Tabelle 68: Deskriptive Statistik Messer 7 vor Mazeration	159
Tabelle 69: Deskriptive Statistik Messer 8 vor Mazeration	159
Tabelle 70: Deskriptive Statistik Messer 9 vor Mazeration	160
Tabelle 71: Deskriptive Statistik Messer 10 vor Mazeration	160
Tabelle 72: Deskriptive Statistik Messer 11 vor Mazeration	161
Tabelle 73: Deskriptive Statistik Messer 1 nach Mazeration	161

Tabelle 74: Deskriptive Statistik Messer 2 nach Mazeration	162
Tabelle 75: Deskriptive Statistik Messer 3 nach Mazeration	162
Tabelle 76: Deskriptive Statistik Messer 4 nach Mazeration	163
Tabelle 77: Deskriptive Statistik Messer 5 nach Mazeration	163
Tabelle 78: Deskriptive Statistik Messer 6 nach Mazeration	164
Tabelle 79: Deskriptive Statistik Messer 7 nach Mazeration	164
Tabelle 80: Deskriptive Statistik Messer 8 nach Mazeration	165
Tabelle 81: Deskriptive Statistik Messer 9 nach Mazeration	165
Tabelle 82: Deskriptive Statistik Messer 10 nach Mazeration	166
Tabelle 83: Deskriptive Statistik Messer 11 nach Mazeration	166
Tabelle 84: Deskriptive Statistik Messer 12 nach Mazeration	167
Tabelle 85: Klingendicke	168
Tabelle 86: Verwendung von spitzen Waffen in den USA 2014	169

FORMELVERZEICHNIS

(1) Fallhöhe der Messer	31
(2) Fallzeit der Messer.....	31
(3) Fallgeschwindigkeit der Messer	31
(4) Umrechnung der Distanzen auf nicht-mazerierte Rippe	103
(5) Umrechnung der Winkel auf nicht-mazerierte Rippe	103

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abb.	Abbildung
ANOVA	Englisch: analysis of variance; Varianzanalyse
BW	Bodenwinkel
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
ca.	Lateinisch: circa; ungefähr
cm	Zentimeter
CS	Centroid Size
CT	Computertomograph
d	Dicke
df	Englisch: degrees of freedom; Freiheitsgrade
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
et al.	Lateinisch: et alii / et aliae /et alia; und andere
F	Teststatistik (nach Fisher)
g	Gramm
ggf.	gegebenenfalls
h	Stunde
HMHV	Englisch: half-maximum height value; halbmaximaler Höhenwert
HU	Hounsfield Units
ICP-MS	Englisch: inductively coupled plasma mass spectrometry; Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
Jh.	Jahrhundert
KEB	Knocheneinstichbreite
KEH	Knocheneinstichhöhe
KEL	Knocheneinstichlänge
kg	Kilogramm
LRA	Englisch: linear regression analysis; Lineare Regressionsanalyse
max.	maximal
Maz.	Mazerierung
min	Minute

MKEH	maximale Knocheneinstichhöhe
ml	Milliliter
mm	Millimeter
mm ³	Kubikmillimeter
MSL	maximale Schulterlänge
m/s	Meter pro Sekunde
n	Stichprobenumfang
N	Newton
Nr.	Nummer
NWo	oberer Neigungswinkel
NWu	unterer Neigungswinkel
o. Ä.	oder Ähnliches
o. J.	ohne Jahresangabe
ÖW	Öffnungswinkel
p	Englisch: probability; Irrtumswahrscheinlichkeit
PCA	Englisch: Principal Component Analysis; Hauptkomponentenanalyse
R ²	Korrigiertes Bestimmtheitsmaß
REM	Rasterelektronenmikroskop
s.	siehe
SD	Englisch: standard deviation; Standardabweichung
u. a.	unter anderem
μCT	Mikro-Computertomograph
μm	Mikrometer
wiss.	wissenschaftlich
z. B.	zum Beispiel
zw.	zwischen
vs.	Lateinisch: versus; gegen(über)
Ø	Durchmesser
°C	Grad Celsius
%	Prozent

ZUSAMMENFASSUNG

Die meisten tödlichen Stich-/Schnittverletzungen treten im Rumpfbereich auf und werden durch Messer verursacht (Cassidy & Curtis 2005). Die von Messerklingen herbeigeführten Kerbmarken an Knochen können morphometrisch analysiert werden, um ggf. eine Zuordnung der „Tatwaffen“ zu den jeweiligen Verletzungsmorphologien zu ermöglichen. Capuani et al. (2014) definierten dazu einzigartige Merkmale in Knochenverletzungen durch scharfe Gewalt. Geometrische Morphometrie wurde in diesem Zusammenhang bisher nur von Kieser et al. (2008) zur Analyse von mit Schraubenziehern zugefügten Hautverletzungen eingesetzt. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, mittels verschiedener bildgebender Verfahren Messerklingenspuren an Knochen einer detaillierten morphologischen Analyse zu unterziehen.

Mithilfe von zwölf Versuchsmessern (Küchen-, Jagd-, Klapp- und Sektionsmesser sowie eine Schere) und einer eigens für diese Arbeit konstruierten Fallvorrichtung, welche eine reproduzierbare Stichserie gewährleisten soll, wurden an unbehandelten Schweinerippen Stich-/Schnittverletzungen gesetzt. Die experimentell erzeugten Verletzungen wurden im Anschluss mittels drei bildgebender Verfahren (Mikro-CT, Makrofotografie und REM) morphologisch erfasst und mit unterschiedlicher morphometrischer Software (Amira, tps und Morpheus) ausgewertet. Dabei wurden beständige, gemeinsame Merkmale und individuelle Besonderheiten der unterschiedlichen Messertypen registriert und quantifiziert. Für die metrische Analyse wurden Distanzen wie Höhe, Breite und Länge der Kerbmarken sowie Winkel der Einstichwände vermessen.

Lediglich ein gezahntes Messer hinterließ eine einseitige Rille am Kerbboden, die auf einen Wellenschliff der Klinge hinwies. Anhand der mittels Amira vermessenen Distanzen zwischen den Wänden der Kerbmarken, die der Dicke der Messerklingen entsprechen, konnte mit einer Abweichung von max. $\pm 0,35$ mm auf die jeweilige Klingendicke geschlossen und die Verletzungen den Messern zugeordnet werden. Die Varianz der Messwerte innerhalb der einzelnen Messer war teilweise höher im Vergleich zur Varianz zwischen Einstichen von verschiedenen Messertypen. Bei neuerlicher Analyse nach Mazeration ergab sich ein durchschnittlicher Schrumpfungsfaktor von bis zu 8,6 %.

Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse widersprechen den Resultaten von Capuani et al. (2014) teilweise. Mögliche Gründe hierfür ebenso wie weiterführende Versuche werden diskutiert. Des Weiteren werden Vor- und Nachteile der einzelnen bildgebenden Verfahren und der verwendeten Software für die morphometrische Analyse der Messerstichverletzungen an Rippen erörtert. Dabei stehen die konkreten Charakterisierungen von Klingen- und Einstichgestalt mittels der Software tps im Vordergrund. Außerdem finden die Kerbwinkel, die nur mittels der Querschnitte von Mikro-CT-Scans detektier- und ausmessbar sind, besondere Berücksichtigung.

ABSTRACT

Most fatal sharp-force/stab injuries are directed to the trunk and are caused by knives (Cassidy & Curtis 2005). Tool marks on bones induced by knife blades can be morphometrically analysed in order to enable an allocation of the “inflicting weapon” to the particular morphology of the bone lesions. Capuani et al. (2014) defined unique class characteristics of bone kerf marks induced by sharp instruments. Until now, geometric morphometrics was only used by Kieser et al. (2008) in this context to analyse skin wounds from screwdriver trauma. The purpose of this study is to examine the morphology of knife lesions on bones in detail with different imaging techniques.

By using twelve experimental knives (kitchen, hunting, folding and necropsy knives as well as a pair of scissors) and a drop weight tower especially constructed for this study, which should warrant a reproducible series of lesions, stab/cut injuries were inflicted on untreated pork ribs. The morphology of the experimentally produced lesions were subsequently recorded with three imaging techniques (Micro-CT, macro photography and SEM) and with different morphometric software (Amira, tps and Morphueus). In applying these methods, constant and common characteristics as well as individual specifics of the various knife types were registered and quantified. For the metric analysis distances like height, width and length of the bone kerfs as well as angles of the kerf walls were measured.

Only one serrated knife left a one-sided groove on the kerf floor, which was caused by the serrated edge of the blade. Based on the measured distances between the walls of the kerf marks by Amira, which correspond to the thickness of the blade, one could conclude to the respective blade thickness with a deviation of max. ± 0.35 mm and match the injuries to the knives. The variance of the measurement values within the individual knives were partly higher compared to the variance between the injuries of different knife types. With renewed analysis after maceration, an average shrinkage factor up to 8.6 % was noticed.

The results of this work partially contradict the findings of Capuani et al. (2014). Possible reasons for this and further experiments will be discussed. In addition, advantages and disadvantages of the individual imaging techniques and the software used for the morphometric analysis of sharp force injuries to ribs will be elaborated. Thereby, focusing on the concrete characterizations of the blades' and kerfs' shapes by using the software tps. Additionally, special attention is given to the angles of the kerf marks, which could only be detected and measured on the cross sections of the micro-CT scans.

1 EINLEITUNG

Messer stellen in Österreich und Großbritannien das am häufigsten verwendete Tatwerkzeug bei Mord bzw. Totschlag dar. Dabei werden vor allem Stichverletzungen des Brustkorbs beobachtet (Cassidy & Curtis 2005, Knight 1975, United Nations Office on Drugs and Crime 2015). Die von den Messerklingen zurückgelassenen Einstichmarken am Knochen können morphometrisch analysiert werden, um hilfreiche Anhaltspunkte zum verwendeten Messer und Tatgeschehen zu liefern. Hierzu könnten zukünftig vermehrt Methoden der virtuellen Anthropologie und geometrischen Morphometrie eingesetzt werden.

1.1 VIRTUELLE ANTHROPOLOGIE

Die virtuelle Anthropologie zeichnet sich durch die quantitative Auswertung biologischer Strukturen und digitaler, anatomischer Daten in mindestens drei Dimensionen aus. Dazu setzt die virtuelle Anthropologie auf eine multidisziplinäre Zusammenarbeit aus den Fächern der Anthropologie, Medizin, Mathematik, Physik, Computerwissenschaft und des Produktdesigns. Ihr Einsatzbereich ist sehr vielfältig und deckt sowohl Bereiche der funktionellen Morphologie, evolutionären Biologie und Hominidenentwicklung als auch Gebiete der medizinischen Diagnostik und Forensik ab. Die Daten resultieren vor allem auf Aufnahmen mit Computertomographen (CT), Magnetresonanztomographen (MRT) oder Positronen-Emissionstomographen (PET); Technologien aus dem sogenannten Medical-Imaging-Bereich (Weber et al. 2014, Weber & Bookstein 2011).

Seit den 1990er Jahren wird die virtuelle Anthropologie in den oben angeführten Gebieten angewendet. Vor allem aufgrund der Digitalen Revolution gab es in den letzten Jahrzehnten viele Forschungsansätze, die in der physischen Welt nicht möglich wären. Im virtuellen Labor eröffnen sich völlig neue Möglichkeiten in Bezug auf Datenmanipulierung und -auswertung (Neubauer 2005, Weber & Bookstein 2011).

Zu den Vorteilen der virtuellen Anthropologie gehören:

- Messbarkeit jeder anatomischen Struktur, selbst wenn sie verborgen liegt, da in der virtuellen Welt alle physikalischen Barrieren überwunden werden können.
- Schöpfung aus einer hohen Dichte an quantitativen Daten, welche neue und einflussreiche Auswertungen von Form und Funktion der Objekte ermöglichen. Aufgrund der hohen Messgenauigkeit können außerdem feinste Gestaltsunterschiede von Hunderten Objekten zeitgleich analysiert werden.
- Ständige Verfügbarkeit und langfristige Speicherung virtueller Objekte auf dem Computerbildschirm oder einem transportablen Speichermedium; und dies nicht nur für eine einzige Person. Mehrere Personen können zeitgleich an einem Objekt arbeiten.

- Breite Auswahl an Optionen bei der Datenverarbeitung, den Statistiken, der Visualisierung und dem Datenaustausch trotz zunehmender Probengröße.
- Verbesserte Reproduzierbarkeit des Verfahrens und der 3D-basierten linearen Messungen.
- Verbesserte Beweisführung der Experten aufgrund erweiterter Datendarstellung von Form- und Gestaltvarianten.

1.2 BILDGEBENDE VERFAHREN

In der Rechtsmedizin wird die Autopsie („Selber-Sehen“) und deren herkömmlichen Methoden nach und nach durch das virtuelle Sehen ergänzt. Dabei finden bildgebende Verfahren Anwendung, die zwei- oder dreidimensionale Bilddaten von menschlichen Strukturen dokumentieren, um klinische und postmortale Befunde am Lebenden und Verstorbenen zu erfassen. Auf diese Weise können erfasste Verletzungen elektronisch gespeichert und mehrere Monate oder sogar Jahre später, wenn ein potentiell Tatwerkzeug zur Verfügung steht, analysiert werden (Grassberger 2016c, Madea 2015).

Konventionelle Röntgenuntersuchungen finden schon seit vielen Jahrzehnten routinemäßig Anwendung in der Leichendiagnostik. Insbesondere bei der Fremdkörperlokalisierung und der Frakturdiagnostik bringt ihr Einsatz einen deutlichen Gewinn (Stein & Grünberg 2009).

1.2.1 DIE VERWENDUNG DES REMS IN DER FORENSISCHEN MEDIZIN

Manfred von Ardenne und seine Arbeitsgruppe bauten 1937 (ihrer Einschätzung nach erstmals) ein Rasterelektronenmikroskop (REM) zur Abbildung von Objektoberflächen mit hoher Tiefenschärfe. Im Bereich der Kriminalistik wurde dieses frühe Modell insbesondere zur Untersuchung von Haaren, Strommarken und Knochenoberflächen eingesetzt (Schneider 1972, Böhm 1970, Boyde 1972).

1970 gelang es einer amerikanischen Forschergruppe um Albert V. Crewe mit dem Einbau eines Feldemissions-Elektronenstrahlers eine Grenzauflösung von bis zu 0,5 nm zu erreichen (Reball 1977). Doch erst ab den 1990er Jahren begann eine zaghafte Verwendung dieser weiterentwickelten Technologie im forensischen Arbeitsgebiet. Neben der Analyse von Bodenpartikeln und Schmauchspuren (McVicar & Graves 1997, Saverio & Margot 2001) wurde das verfeinerte REM in der forensischen Anthropologie u. a. zur Analyse von Mikrofrakturen angewandt (Bartelink et al. 2001, Melki et al. 2011, Zhi-Jin & Jia-Zhen 1991).

1.2.2 DIE VERWENDUNG DES CTs IN DER FORENSISCHEN MEDIZIN

Wilhelm Röntgen entdeckte am 8. November 1895 in seinem Labor an der Julius Maximilian Universität in Würzburg die später nach ihm benannten Röntgenstrahlen. Die frühesten Röntgenbilder zeigten Knochenbrüche und Schussprojekte in Körpern (Thali & Dirnhofer 2004).

Das Röntgenverfahren beeinflusste somit von Anfang an die forensische Medizin, sowohl in der klinisch-forensischen, als auch in der forensisch-pathologischen Radiologie. Im Dezember 1896 fanden Röntgenbilder auch erstmals Einzug in einen amerikanischen Gerichtssaal. Sie dienten als Beweismittel in einem Prozess wegen Verdachts auf einen ärztlichen Kunstfehler (Dommann 2003).

Im 20. Jahrhundert kam es zu einer raschen Entwicklung der forensisch-radiologischen Untersuchungsmethoden, die durch Sir Godfrey Newbold Hounsfield 1971 mit der Vorstellung des ersten CTs gekrönt wurde. Nun maß ein Detektor in vielen verschiedenen Winkeln die Absorption der Röntgenstrahlung. Da somit Röntgenbilder aus allen möglichen Richtungen vorhanden waren, konnte mithilfe von Bildverarbeitungsprogrammen ein dreidimensionales, virtuelles Objekt geschaffen werden (Pfeiffer 2010, Thali & Dirnhofer 2004,). Mit der Einführung des CTs und der damit einhergehenden Querschnittsmethode – im Gegensatz zur klassischen Projektionsmethode von Röntgen – folgten zahlreiche postmortale forensisch-radiologische Studien (Wüllenweber et al. 1977, Schneider et al. 1979, Schmidt & Kallieris 1982, Bratzke et al. 1982).

Jim Elliott entwickelte in den frühen 80er Jahren den ersten Mikro-Computertomographen (μ CT) und lichtete eine kleine tropische Schnecke ab (Elliott & Dover 1982). Feldkamp et al. (1989) bauten ein μ CT und stellten trabekuläre Knochenstrukturen optisch dar. Heute werden in der forensischen Medizin μ CTs u. a. für Untersuchungen von Knochenpathologien, Schussverletzungen und Werkzeugspuren in Knochen, Altersbestimmungen an Knochen und Zähnen sowie für die Bestimmung der Leichenliegezeit eingesetzt (Rutty et al. 2013).

1.2.3 COMPUTERTOMOGRAPHISCHE BILDER - DIE GRUNDLAGEN

Bei einem Computertomographen werden der Bedeutung des Wortes Tomographie (‘*tomos*’ = Schicht und ‘*graphia*’ = beschreiben) entsprechend Schichten beschrieben. Aus allen gescannten Schichten wird eine dreidimensionale Rekonstruktion erstellt, die in allen drei Ebenen (Transversal-, Sagittal- und Koronarebene) und aus jeder erdenklichen Sicht (*oblique slices*) betrachtet werden kann (Keil 1983). Im Gegensatz zum klinischen CT, bei dem das Detektorsystem um ein Objekt bewegt wird, rotiert bei einem μ CT das Versuchsobjekt um seine eigene Achse (Abb. 1). Dabei lässt sich die Vergrößerung mittels der Distanz zwischen dem Detektor und dem Versuchsobjekt variieren. Je näher sich das Objekt am Detektor befindet, desto kleiner ist das Messfeld.

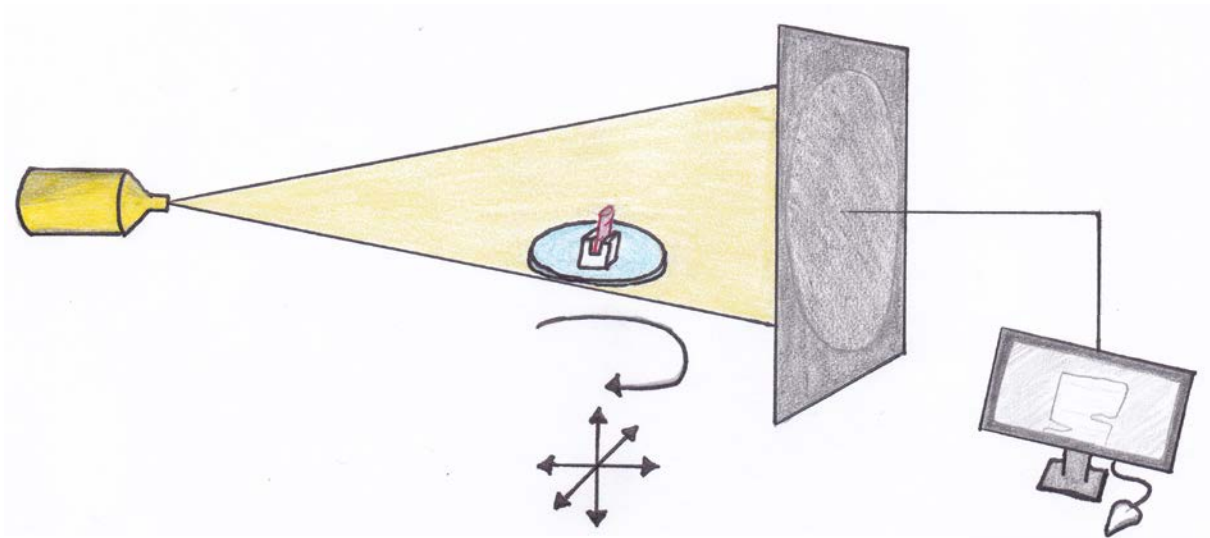


Abb. 1: Konfiguration eines μ CT Scanners

Das Objekt auf dem Drehtisch kann mithilfe des Manipulators in allen drei Achsen bewegt werden. Eine Mikrofokus-Röntgenröhre gibt Röntgenstrahlen ab, die das Probeobjekt durchqueren und auf dem gegenüberliegenden Detektor auftreffen, der aus einem digitalen Flachdetektor oder einem Szintillator-Bildschirm mit einer angeschlossenen Videokamera besteht. Die gesammelten Daten werden an den Rekonstruktionsrechner weitergeleitet (eigene Zeichnung nach Weber & Bookstein 2011).

Grauwerte

Die kleinsten Informationseinheiten bzw. Bildelemente einer Abbildung werden **Pixel** genannt. Jeder Pixel besitzt eine bestimmte Position im Bildgitter, die durch die Koordinaten x und y bestimmt sind. Zusätzlich enthält ein Pixel Informationen über dessen Grauwerte oder Farben. Dabei gibt es in den meisten Fällen 256 oder 4096 Möglichkeiten.

Wie beim traditionellen Röntgenbild auch zeigt ein CT-Bild aufgrund des unterschiedlichen Dämpfungsverhaltens verschiedener Materialien oder Gewebearten unterschiedliche Grauwerte. Die Dämpfung richtet sich nach Absorption und Streuung der Röntgenstrahlen während sie die Probe durchqueren. Je dichter ein Material der Probe ist, desto höher ist die Dämpfung und desto heller erscheint sie im Abbild. Bei medizinischen CT-Scannern kann unterschiedliche Dichte reproduzierbar erfasst werden, wenn ein Phantomobjekt bekannter Dichte zuvor kalibriert wurde. Während Luft in medizinischen CT-Bildern einen Grauwert von -1000 **Hounsfield Units** (HU) besitzt und somit schwarz dargestellt wird, zeigen Knochen einen deutlich höheren CT-Wert zwischen 50 und 3000 HU. Im Arbeitsfeld der Anthropologie werden Dichteprofile jedoch in CT-Grauwerten angegeben und nicht in HU. In der sogenannten Line Probe werden deswegen die unterschiedlichen Intensitäten bzw. die Sequenz der Grauwerte entlang einer Linie oder Kurve eines Schnittes bestimmt. Das erhaltene Minimum entspricht in den meisten Fällen dem Grauwert von Luft und das Maximum dem von kompakter Knochensubstanz. Neben der „Line Probe“ kann auch ein Histogramm zur Hilfe genommen werden.

In einem Volumendatenset spricht man von Volumenelementen bzw. **Voxel**, die einem bestimmten Grauwert zugeordnet werden. Die z-Koordinate wird dabei von der Schichtdicke

repräsentiert, sodass ein Volumenelement von der Pixelgröße und der Schichtdicke bestimmt wird. Ein isotopischer Voxel bzw. **Isovoxel** liegt vor, wenn alle Längen in jeder der drei Dimensionen identisch sind.

Auflösung

Die Höhe und Breite eines Schnittes werden durch das Messfeld festgelegt, das bei der Datenaufnahme verwendet wurde. Die Pixelgröße wird durch das Verhältnis zwischen dem Display-Messfeld (herangezoomtes Bild; z. B. 200 x 200 mm) und der Matrixgröße (Anzahl der Pixel im Bildraster; z. B. 512 x 512) definiert. Je kleiner die Pixelgröße, desto höher die Auflösung. Mit verbesserter räumlicher Auflösung verschlechtert sich jedoch gleichzeitig die Kontrastaufklärung (Weber & Bookstein 2011).

1.3 GEOMETRISCHE MORPHOMETRIE

Für die Auswertung der gesammelten virtuellen Daten findet „Geometric Morphometrics“ häufig Anwendung. Unter Morphometrie versteht man laut Bookstein (1991) die Wissenschaft von Gestaltvarianten und deren Kovariation mit anderen Variablen, wie z. B. Geschlecht oder Alter.

Shape Variables

Die **Gestalt** beschreibt die geometrischen Eigenschaften eines Objektes, die unveränderlich in ihrer Lage, Größe und Orientierung sind. Für biologisch, statistische Gestalt- und Formanalysen sowie für biomechanische Modellierungen werden dreidimensionale Koordinaten von anatomischen Messpunkten (Landmarks) gesammelt und die relative räumliche Anordnung von Strukturen verglichen. Die morphologischen Unterschiede werden in einem kartesischen Koordinatensystem durch verschiedene Werte der Landmark-Koordinaten wiedergespiegelt. Diese Koordinatenwerte werden als „Shape Variables“ bezeichnet und beinhalten alle geometrischen Informationen, die das Datenmaterial umfasst (Slice 2007).

Procrustes Superimposition

Mit der *Procrustes Superimposition* können Messpunkte mehrerer Objekte bzw. Individuen verglichen werden, solange sie jeweils die gleichen biologischen Strukturen beschreiben. Entscheidend ist dabei, dass die Lage, die Richtung und der Maßstab der verschiedenen Objekte identisch sein muss, um ihre **Form** (= Gestalt + Größe) vergleichen zu können. Da sich aber alle Rohdaten in der Regel in diesen drei Punkten unterscheiden, müssen die Objekte genormt werden (Abb. 2).

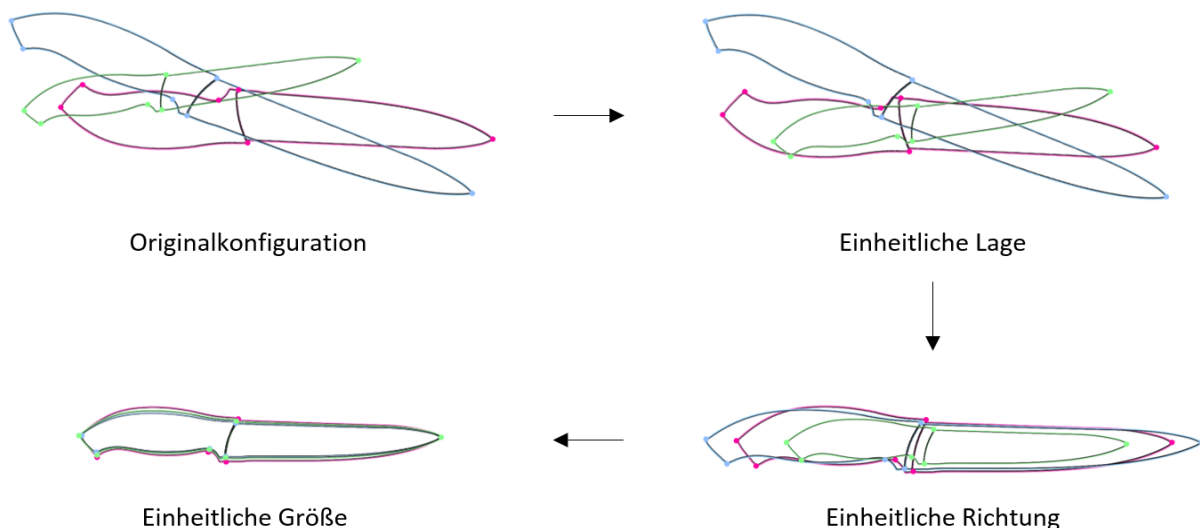


Abb. 2: Procrustes Superimposition

Gestaltsunterschiede lassen sich morphometrisch nur ermitteln, wenn die zu untersuchenden Objekte in ihrer Lage, Richtung und Größe konform vorliegen. Hier kommt die Procrustes Superimposition ins Spiel: Die Rohdaten bekommen im ersten Schritt einen einheitlichen Ursprung. Im zweiten Schritt folgt die Rotation in eine gemeinsame Richtung und schließlich die Skalierung auf eine Standardgröße.

Dazu werden aus den unbearbeiteten Landmarks zunächst zentrierte Landmarks, indem die Messpunkte analog verschoben werden bis sie einen gemeinsamen Nullpunkt haben (**centroid** = Mittelpunkt aller Landmarks). Danach werden diese durch Drehung in eine einheitliche Richtung zu rotierten Landmarks, die wiederum durch ein definiertes, übereinstimmendes Größenmaß (mit der Einheit „Centroid Size“) zu skalierten Landmarks werden. Zum Vergleich der Objekte wird die Generalisierte Procrustes Analyse durchgeführt, welche *Procrustes Shape Coordinates* im *Procrustes Shape Space* liefert, anstatt traditionelle Distanz- und Winkelverhältnisse. Die Gestaltsunterschiede zwischen den verschiedenen Objekten werden mit der *Procrustes Distance* angegeben. Die Distanz ergibt sich aus der Wurzel der Summe der quadrierten Abweichungen der jeweiligen Landmark-Koordinaten nach ihrer *Superimposition*. Einziger Nachteil der *Procrustes Superimposition* ist der sogenannte **Pinocchio-Effekt**. Dieser beschreibt eine fehlerhafte Angabe der ermittelten Abweichungen, wenn ein oder zwei Landmarks weit von den restlichen Landmarks verlagert sind. *Procrustes Superimposition* versucht diese zu großen lokalen Differenzen auf alle Landmarks zu verteilen, um insgesamt kleinere Unterschiede zu erlangen. Dadurch wird jedoch die gesamte Konfiguration verändert (Neubauer & Gunz 2014, Slice 2015).

Deformationsgitter

Um die Ergebnisse zu visualisieren, kommt neben dem Vektorplot die sogenannte **Thin-Plate Spline** zur Anwendung. Sie enthält die relative Lage aller Landmarks und ist in der Lage morphologische Veränderungen bildlich darzustellen. Bei der *Thin-Plate Spline* handelt es sich um ein Deformationsgitter, das wie eine unendlich dünne und unendlich große Metallplatte nur mit Energieaufwand verbogen werden kann. Dieser Energieaufwand wird als *Bending Energy* bezeichnet. Im Ausgangszustand, in dem keine Energie aufgewandt wird, ist das Gitter maximal glatt und liefert eine minimal gebogene Interpolation im Interlandmark-Raum. Außerdem sind in diesem Zustand alle Punkte des Gitters äquidistant. Mit dem Deformationsgitter können auch Veränderungen der Gestalt an Stellen beobachtet werden, die gar nicht zuvor vermessen und als Landmarks festgehalten wurden (Neubauer & Gunz 2014, Slice 2007, Slice 2015, Weber 2014).

Um die Interpolationsfunktion in allen drei Koordinatenachsen zu berechnen, werden die Abweichungen der Landmark-Koordinaten zwischen einer Referenz- und einer Zielgestalt ermittelt. Je unterschiedlicher die Gestalten sind, desto mehr **Biegeenergie** muss aufgebracht werden. Der Zustand mit geringster Biegeenergie wird vom ersten *Partial Warp* visualisiert und besitzt den geringsten Wert der Eigenvektoren. Die *Partial Warps* sind jedoch nur geometrische Achsen, die von den Messpunkten der Referenzprobe ausgerechnet wurden. Für biologische Belange sind grafische Darstellungen der *Partial Warp Scores* deutlich interessanter. Diese werden durch die sogenannten **Relative Warps** (Abb. 3) aus den Ergebnissen der

Hauptkomponentenanalyse bzw. *Principal Component Analysis* (PCA) dargestellt (Neubauer & Gunz 2014, Slice 2007, Slice 2015, Weber 2014).

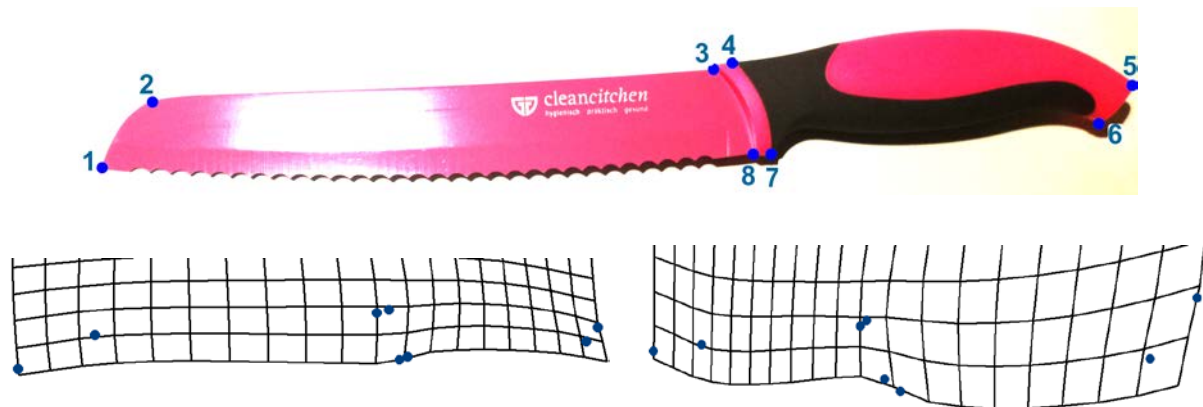


Abb. 3: Thin-Plate Spline

Ein Brotmesser – das als Referenzprobe dient – wurde mit acht Landmarks versehen. Mögliche Gestaltunterschiede zwischen verschiedenen Messern lassen sich anhand von *Relative Warps* mit den digitalisierten Landmarks als *Thin-Plate Splines* darstellen. Hier beispielhaft zwei Deformationsgitter von weiteren Küchenmessern. Mithilfe von tpsDig2 (Rohlf 2005a) und tpsRelw (Rohlf 2005d) kreiert.

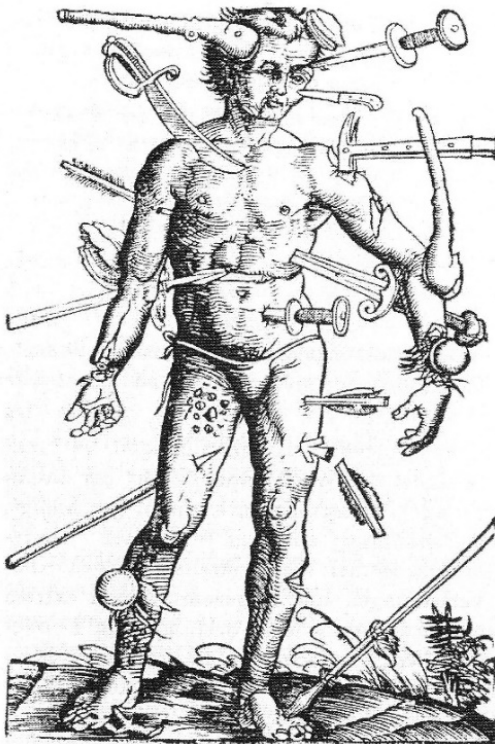
Semilandmarks

Zu Beginn der Entwicklung von *Geometric Morphometrics* wurden ausschließlich eindeutig definierbare, anatomische Landmarks verwendet, von denen man annahm, dass sie relevante Aspekte über morphologische Veränderungen beinhalten. Um auch Kurven einer Gestalt und nicht gezielt definierte Punkte einer Oberfläche vergleichen zu können, werden heutzutage Semilandmarks digitalisiert (Slice et al. 1998, Slice 2005, Slice 2007). Semilandmarks auf Oberflächen und Kurven werden von Weber & Bookstein (2014) als Typ 4 und 5 von insgesamt sechs Arten von Landmarkpunkten definiert.

Für eine bestmögliche Gegenüberstellung von Strukturen werden die Semilandmarks entlang einer imaginären Tangente verschoben bis sie bei jedem Objekt der Stichprobe die gleiche (aber nicht eindeutig definierbare) anatomische Stelle beschreiben. Das Gleiten (*Sliden*) entlang der Tangente erfolgt nach dem Minimalen-Biegeenergie-Kriterium. Da sich die Semilandmarks nach dem *Sliden* meist nicht mehr auf der Oberfläche des Objektes befinden, werden sie nach jedem *Sliden* wieder auf die Zieloberfläche projiziert. Somit gewinnen Semilandmarks an geometrische Homologie innerhalb der Stichprobe und gewährleisten eine optimale Vergleichsmöglichkeit (Weber 2014).

1.4 STICHWUNDEN UND WERKZEUGSPUREN

Die Spannweite von äußeren Gewalteinwirkungen ist sehr vielfältig. Sie reicht von einem Pfeil bis zu einem Hammer, wie es der fast 500 Jahre alte mittelalterliche Wundenmann verkörpert (Abb. 4). Bei dieser Vielzahl an damaligen und heutigen Waffen bzw. Verletzungen werden im Folgenden besonders Stichwunden (*Vulnus ictum*) thematisiert, die durch Messer verursacht wurden.



*Wiewol ich bin voll streich und stich /
zermorscht / verwundet iämerlich /
Doch hoff ich gott / kunstlich artzney /
Schylhans der wird mir helfen frey.*

Abb. 4: Der verwundete Mann

Hans von Gersdorff beschreibt in seinem Feldbuch der Verwundungen "Wundartzney" aus dem Jahre 1517 den "Wundenmann" mit multiplen Verletzungen (Gersdorff 1517).

1.4.1 MESSER

Messer üben seit jeher eine spezielle Faszination aus, die ihren Funktionswert weit übersteigen. Sie gelten als die ältesten Werkzeuge in der Geschichte. Prähistorische Messer aus Obsidian bzw. Feuerstein wurden weltweit ausgegraben. Klappmesser sind seit der Bronzezeit bekannt. Im 16. und 17. Jh. wird das Messer zu einem Symbol von Unfrieden, Aggression und Tod. Aus diesem Grund bekamen Tischmesser im 17. Jh. eine abgerundete Spitze. Dabei waren Deutschland und Italien die Vorreiter. Bis heute gelten Messer (vor allem Jagdmesser) als **Symbol für Kraft und Stärke** und lassen sich in Nationalflaggen, Standeszeichen und Trachten wiederfinden (Grieshofer 2003).

Messeraufbau

Das Schwert für Speisen, wie das Messer aus dem althochdeutschen Wort „mezzisahs“ übersetzt heißen würde, kann allgemein in fünf Bestandteile aufgeteilt werden (Abb. 5): die Messerspitze, der Grat, die Schneide, das Ricasso, der Messerrücken, das Heft bzw. der Griff und der Fingerschutz. Das Ricasso bzw. die **Fehlschärfe** ist bei spitzen Waffen ein nicht geschliffener Teil der Klinge. Ist der Klingenrücken leicht angeschliffen, aber nicht scharf geschliffen, handelt es sich um eine sogenannte **falsche Schneide**. Bei einem Messerstich sind vor allem die Geometrie und Gestalt der Messerspitze von Relevanz. Die Spitze muss nicht zwangsläufig spitz zulaufen, sie kann – wie z. B. bei einem Brotmesser – auch abgerundet oder gebogen sein (Gilchrist et al. 2008, Grassberger et al. 2009, Grieshofer 2003, Strömer 1999).

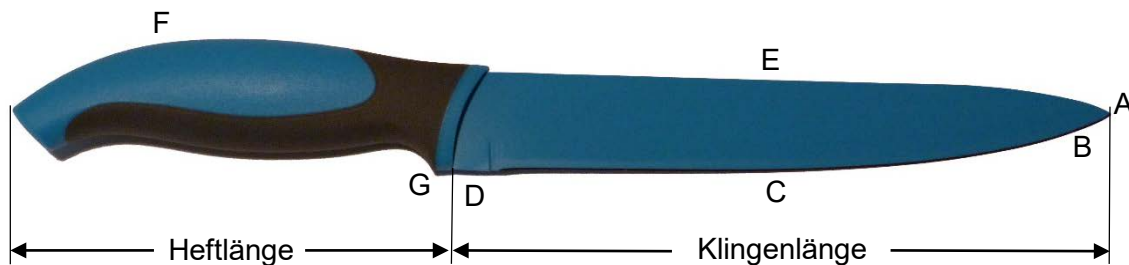


Abb. 5: Aufbau von Messern

Jedes handelsübliche Messer (hier Küchenmesser von cleancitchen) besteht aus einer Messerspitze (A), einem Grat (B), einer Schneide (C), einem Ricasso (D), einem Messerrücken (E), einem Heft (F) und einem Fingerschutz. Die absolute Messerlänge gliedert sich in die Klingen- und Heftlänge.

Messerwerkstoffe

Die meisten Messer sind aus Karbonstahl oder Edelstahl und bestehen in der Regel aus **Eisen**, **Chrom**, **Silizium** und **Mangan**. Keramikmesser beinhalten **Zirkonium** und **Hafnium**; in Messerlegierungen sind **Titan** oder **Kobalt** nachweisbar. Gewöhnlich werden Messerklingen aus einem Stahlband ausgestanzt oder aus Stahlrohlingen geschmiedet. Die schneidende Kante wird dann mit einer Reihe von Walzen geschliffen (Gibelli et al. 2012, Hainsworth et al. 2008, Vermeij et al. 2012).

Messervariationen

Entsprechend der Verarbeitung werden verschiedene Messervariationen unterschieden: breite oder schmale; spitze oder abgerundete; gerade oder geschwungene; gezahnte, gewellte oder glatte; ein- oder zweischneidige; mit Materialien wie Wolframkarbid beschichtete oder unbeschichtete; mit aufwendig geschnitzten und verzierten Heften oder aus blankem Stahl bestehend. In vorliegender Arbeit wurden Messer gemäß ihrem Verwendungsbereich eingeteilt. Daraus resultierten die Rubriken **Haushalts-**, **Jagd-**, **Freizeit-** und **Sektionsmesser** sowie **Scheren**.

Auch Werkzeuge wie Teppichmesser, Rasierklingen oder Scheren werden im weiteren Sinne als Messer bezeichnet (Symes & Chapman 2010). Während Kampf- und Jagdmesser explizit als Waffen bezeichnet werden, können auch Haushaltsmesser als Waffe verwendet werden. Gerade weil Messer – vor allem in der Küche – leicht zugänglich bzw. häufig griffbereit sind, werden sie oft als impulsive Tatwaffe bei Gewaltverbrechen eingesetzt (Benker 1978, Grieshofer 2003).

1.4.2 STICH- UND SCHNITTVERLETZUNGEN

Eine Schnittwunde, die tiefer als breit ist, wird von Knight (1996) als Stichwunde definiert. Bei dieser Definition wird von den oberflächlichen Stichwunden mit einem flachen Wundkanal abgesehen. Stichwunden werden durch eine Schubkraft von einem Messer oder einem anderen spitzen bzw. scharfen Gegenstand hervorgerufen, der senkrecht oder schräg in den Körper eindringt und unter Druck ziehend in Richtung Schneide geführt wird (Grassberger et al. 2009, Hochmeister et al. 2007, Knight 1996, Ohshima 2005). Wenn die Schubkraft des Stichwerkzeuges ausreicht, um in den Knochen einzudringen, bleibt eine Kerbe im Knochen zurück.

Kerbmarken am Knochen

Sägeschnitte hinterlassen Kerben in Knochen mit einem quadratischen Querschnitt am Boden der Schnittfuge. Während die Kerbe einer geschärften Fuchsschwanzsäge im Querschnitt einem „W“ gleicht, ist die Furche eines spitzen Messers „**V**“-förmig, unabhängig davon ob die Klinge gezahnt ist oder nicht (Symes & Chapman 2010). Laut Thompson & Inglis (2009) erzeugen glatte Messerklingen oberflächlich betrachtet immer klar definierte, T-förmige Einschnitte (Abb. 6A). Gezahnte Messerklingen weisen hingegen eher die Form eines „Y“s auf (Abb. 6B).

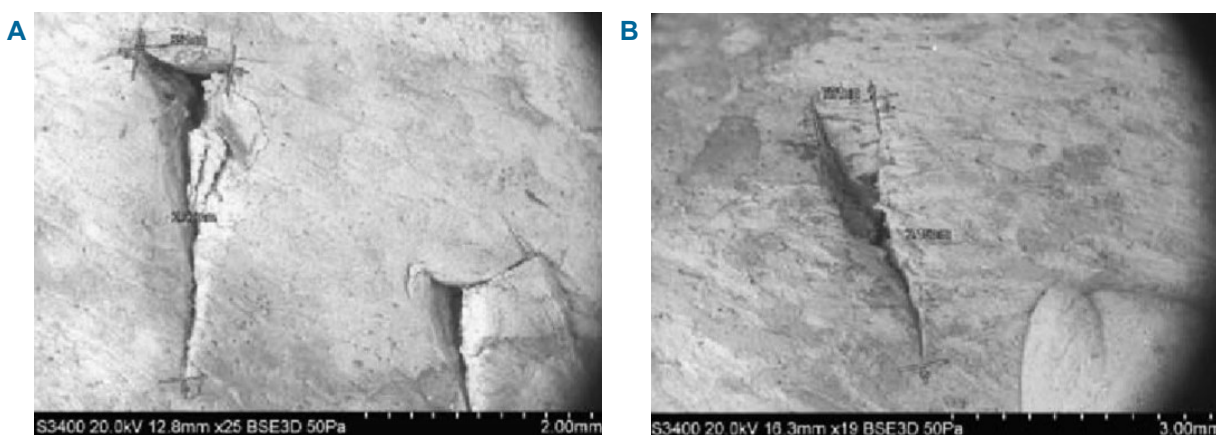


Abb. 6: Formen von Kerbmarken

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von unterschiedlich geformten Stichverletzungen an Dornfortsätzen der Wirbelkörper (Thompson & Inglis 2009).

A Die Oberfläche der Kerben von glatten Messerklingen erinnern an den Buchstaben „T“.

B Die Oberfläche der Kerben von gezahnten Messerklingen erinnern an den Buchstaben „Y“.

Im Mittel erscheint ihnen zufolge die **Y-Form** länger und enger als die **T-förmige** Einkerbung. Beide Arten von Einschnitten (mit glatter und gezahnter Klinge verursacht) sind von einem dreieckigen Bereich der zusammengedrückten *Substantia compacta* umgeben. Mit der gezahnten Klinge entsteht jedoch eine seitliche Kurve zum Ende des äußeren Einschnittes hin. Thompson & Inglis (2009) fanden außerdem heraus, dass Knocheneinkerbungen umso klarer definiert sind, je größer die dortige relative Menge an *Substantia spongiosa* ist. Ferllini (2012) konnte diese eindeutigen Formunterschiede jedoch nicht in ihrer Studie bestätigen.

Während bei glatten Messern höchstens die Form der Klinge im Knochen zu erkennen ist, zeigen sich bei gezahnten Messern Reliefbilder auf beiden Seiten des Stichkanals. Diese Reliefbilder können sich je nach Messertyp unterscheiden. Vertikale Riefen können z. B. einen Eindruck über die Distanz zwischen den Zähnen der Klinge geben. Die Böden einer Einkerbung können hingegen Hinweise auf den Winkel der Messerspitze geben (Bosch 1993, Saville et al. 2007, Symes & Chapman 2010).

Symes et al. (2010) unterscheiden zwischen einer **Messerstichwunde** und einer **Messerschnittwunde**. Dabei ist eine Messerschnittwunde (*Vulnus scissum*) nicht ausdrücklich auf ein Zustechnen zurückzuführen. Sie liegt vor, wenn ein scharfer Gegenstand einen Knochen oberflächlich einschneidet, während die Klinge oder Ähnliches die Knochenoberfläche überquert (Symes & Chapman 2010). In der vorliegenden Arbeit wird diese Art von Wunde nicht weiter berücksichtigt, sondern lediglich Messerstichwunden, die Furchen und Kerben im Knochen hinterlassen.

Stichverletzungen des Weichgewebes

Jede Stichwunde ist durch eine Einstichöffnung in der Epidermis und einen Stichkanal charakterisiert. Bei einem Durchstich tritt zusätzlich auch eine Ausstichöffnung auf. Der **Stichkanal** ist schlitzförmig. Seine Form und Richtung wird durch die Spaltbarkeitsrichtung der Haut entlang der sogenannten Langer'schen Hautspaltlinien determiniert. Wenn ein Messer in einem anderen Winkel aus dem Körper des Opfers gezogen wird als es hineingestochen wurde (z. B. durch eine Bewegung des Opfers), erscheint der Stichkanal deutlich größer als die Messerklinge breit ist (Grassberger et al. 2009, Hochmeister et al. 2007).

Bei einem Messerstich werden alle Gewebsschichten scharf durchtrennt, so dass keine Gewebsbrücken zu finden sind. Wenn die durchtrennten Muskeln zum Zeitpunkt des Messerstiches jedoch angespannt waren, können im Stichkanal intakte Gewebsschichten vorhanden sein.

Die **Wundränder** sind bei einem Messerstich glatt – können aber gelegentlich klaffen – und zeigen in den meisten Fällen weder Schürfungen, noch Quetschungen oder Blutunterlaufungen. Nur am Rand der Stichwunde kann es durch das Heft des Messers zu Schürfungen und Quetschungen kommen, wenn das Messer mit hoher Energie in den Körper gestoßen wird

und die Klinge in voller Länge in den Körper eindringt. Diskrete Schürfungen können ebenfalls auftreten, wenn das verwendete Werkzeug stumpf ist (z. B. ein Schraubenzieher). Diese geschürften Wundränder können einen Hinweis auf die Stichrichtung geben (Grassberger et al. 2009, Hochmeister et al. 2007).

Stichverletzungen der inneren Organe

Penetrierende Thorax- oder Bauchverletzungen der lebenswichtigen, inneren Organe enden häufig tödlich. Vor allem bei Verletzungen des Herzens ist das Leben des Opfers gefährdet. Eine Herzbeuteltamponade (ab ca. 150 ml Blut) behindert die Herztätigkeit und impliziert in der Regel einen raschen Tod. Stichwunden im Nacken können ebenfalls schnell zum Tode führen, wenn das Stammhirn Schäden erleidet. Außerdem erreicht der Geschädigte bei Verletzung der Luftwege oder der großen Halsgefäße ein lebensgefährliches Stadium (Hochmeister et al. 2007, Grassberger 2016b).

Laut einer Studie aus dem Osten der USA ist die Überlebenswahrscheinlichkeit von **Herzverletzungen** durch Stichwunden höher (32,6 %) als die durch Schusswunden (9,7 %) (Rhee et al. 1998). Die Mortalitätsrate von nicht kardialen, thorakalen Verwundungen ist vergleichsweise niedrig, tritt aber gelegentlich mit letalen Verletzungen gemeinsam auf (Hochmeister et al. 2007).

Die häufigste **Todesursache** von Stichverletzungen ist eine innere und/oder äußere Verblutung. Weiterhin kann eine Luftembolie oder ein Ersticken durch Blutaspiration todesursächlich sein. Zu einer Luftembolie kommt es vor allem bei Verletzungen in der Hals- und Nackenregion, wenn während der Diastole ein Unterdruck in der verletzten Vene entsteht und Luft aufgrund der Sogwirkung eingezogen wird (Hochmeister et al. 2007).

Läsionen, die zu Lebzeiten zugefügt und überlebt wurden (**prämortale**), weisen in der Regel Verheilungs- und Umbaupuren auf. Um **perimortale** (d.h. Läsionen, die mit dem Todeseintritt einhergingen und womöglich auch todesursächlich waren) und **postmortale** Verletzungen zu unterscheiden kann die Färbung der Schnittfläche am Knochen herangezogen werden. Während die Schnittfläche einer perimortalen Verletzung dieselbe Farbe besitzt wie der umliegende Knochenbereich, ist die Schnittfläche einer postmortalen Veränderung sichtlich heller als die angrenzende Knochenoberfläche. Bei Dekompositionszeichen an den Knochen ist die Schnittfläche im Fall einer postmortalen Verletzungen meist ausgespart (Verhoff et al. 2006).

Krafteinwirkung

Die Kinematik von Messerangriffen lässt sich grob in zwei Arten von Angriffen einteilen: „Overarm“ und „Underarm“. Bei einem „Overarm“-Angriff erfolgt der Stich von oben und die Klinge des Messers zeigt zur Ulna des Angreifers. „Underarm“-Angriffe werden dagegen von unten nach oben ausgeführt, wobei sich die Messeklinge auf der Unterarmseite des Radius befindet.

Die beiden zu messenden Grundparameter, die eine Person auf das Messer übertragen muss, sind Kraft und Geschwindigkeit. Die Starrheit des Klingenmaterials sowie die Belastbarkeit und Festigkeit des Messers hängen von der **Stichgeschwindigkeit** ab (Gilchrist et al. 2008). Während bei „Overarm“-Angriffen das Messer eine durchschnittliche Eintrittsgeschwindigkeit zwischen 8 und 12 m/s erreicht, sind es bei „Underarm“-Angriffen 6 bis 10 m/s (Horsfall et al. 1999, Knight 1975, Miller & Jones 1996). Horsfall et al. (1999) und Weber & Milz (1974) zeigten aber auch, dass die mittlere Auftreffgeschwindigkeit eines Messerstiches bei weiblichen Probanden deutlich geringer ausfallen kann. Mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 4,16 m/s zeigten Frauen bei Verwendung ihrer Arbeitshand eine um 48 % niedrigere Auftreffgeschwindigkeit als die männlichen Probanden (-43 % mit der Nicht-Arbeitshand).

Mit einem sehr spitzen Messer genügen 5 bis 12 N $\left[= \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right]$ an Kraft, um die menschliche Haut zu durchdringen (Knight 1975, Parmar et al. 2012). Bei einem stumpfen Messer gehen die Meinungen deutlich auseinander. Während laut Jones et al. (1994) noch nicht mal 250 N reichen, um die menschenähnliche Schweinehaut zu durchstechen, nennen Parmar et al. (2012) eine **Stichkraft** von etwa 35 N. Dieser Wert wird auch von O'Callaghan et al. (1999) für das Durchstechen von Fett und Muskeln genannt. Für das Durchdringen von Fett, Muskeln und der Haut sind ihrer Meinung hingegen zwischen 35 und 55 N nötig ($\bar{x} = 49,5 \text{ N}$). Bei Versuchen von Chadwick et al. (1999) erreichten einige der freiwilligen Angreifer mehr als 2.000 N an Axialkraft. Horsfall et al. (1999) dokumentierten um die 1.000 N an Belastung, die auf das Ziel (12-schichtige Aeroflex^{®2} Platte) ihrer Versuche einwirkten. Die speziell zusammengebauten, instrumentalisierten Messer haben jedoch einen deutlich größeren Griff und Fingerschutz als herkömmliche Messer. Aufgrund dieses Schutzes hat der Angreifer einen besseren Halt am Messerheft und erreicht eine größere **Axialkraft** als mit einem Küchenmesser, bei dessen Gebrauch die Hand über die Klinge rutschen kann. Während die Axialkraft wirkt, zeigt sich das **Drehmoment** gegensätzlich zu dieser. Vor und nach dem Wirken der Axialkraft agiert die Schnittkraft. Eine seitliche Kraft ist nur minimal wirksam (Gilchrist et al. 2008).

Wie viel Kraft tatsächlich benötigt wird, um einen Menschen mit einem Messer zu verletzen, hängt von vielen Faktoren ab. Zum einen spielen die getroffene Körperstelle, die Ausrichtung zu den Langer'schen Hautspaltlinien, der Angriffswinkel und die Bewegung des Angreifers relativ zum Opfer eine wichtige Rolle. Zum anderen ist die oben erwähnte Schärfe des Messers ausschlaggebend.

Bei einer stumpfen Klinge ist der Radius sehr entscheidend. Je kleiner der Radius der Messerspitze, desto tiefer ist in der Regel das Eindringen des Messers. Schlanke Messer durchstechen das Gewebe einfacher als dicke Klingen. Messer mit kleinem Querschnitt dringen tiefer in das Gewebe ein als Messer mit größerem Querschnitt. Beim Zusteichen ist die Messerspitze deutlich relevanter als die Schneide. Wenn die Haut jedoch einmal durchstochen

ist, bekommt die Kantenschärfe eine wichtige Funktion, um weiter ins Gewebe durchzudringen (Hainsworth et al. 2008).

Ein axialer Stich (ohne jegliche Abweichung von der Stichrichtung) wird von zwei Komponenten kontrolliert. Zum einen von dem **gleitenden Messerrücken** und zum anderen von der **schneidenden Klinge**. Bei einem Messer mit nach unten laufendem Messerrücken zur Schneide hin, überwiegt nach dem Einstich die schneidende Komponente. Sobald sich das Messer mit voller Klingenbreite im Opfer befindet, ist nur noch die schneidende Komponente der gesamten Klinge wirksam. Bei waagrechtem Messerrücken oder nach oben gezogener Schneide übernimmt der Messerrücken alleine die Kontrolle. Die schneidende Klingenspitze formt die gesamte Breite des Stichkanals (Bosch 1993).

1.4.3 REKONSTRUKTION EINER TAT

Aus der Lokalisation, Anordnung und Morphologie von Stichverletzungen ergeben sich wertvolle Anhaltspunkte in Bezug auf die Tatrekonstruktion. Während Unfälle vor allem aufgrund der Fundsituation leicht zu erkennen sind, ist die Unterscheidung zwischen einer Selbsttötung und einer Tötung durch fremde Hand häufig schwieriger zu klären.

Bei **Suiziden** befinden sich die Stichverletzungen zumeist gehäuft und parallel an einer Körperstelle, vor allem in der Herzgegend. Gelegentlich auch in der Leistenbeuge, am Hals oder an anderen Körperregionen, von denen sich der Selbstmörder gute Erfolgsaussichten verspricht. Probier- oder Zauderstiche, die in unmittelbarer Umgebung der wesentlichen Stichwunde nicht sehr tief verlaufen, zeigen sich nur bei Suiziden. Diese Verletzungsmorphologie darf nicht verwechselt werden mit Stichen oder Schnitten, die mit einem stumpfen Messer oder vor einer Tötungshandlung durch fremde Hand beigebracht wurden. Dazu zählt das Aufsetzen eines Messers zur Bedrohung und Einschüchterung. Im Gegensatz zu Stichverletzung durch fremde Hand sind selbst beigebrachte Stichverletzungen im Brustbereich häufig horizontal angeordnet. Damit soll die Wahrscheinlichkeit gegen eine Rippe zu stechen und das Herz unversehrt zu lassen gemindert werden (Grassberger et al. 2009, Hochmeister et al. 2007).

Ein Unterschied zwischen Mord und Selbstmord, der häufig überinterpretiert wird, stellt die Bekleidung dar. Während bei **Tötungsdelikten** das Opfer zwar in der Regel bekleidet ist und das Messer durch die Faserstoffe gestochen wird, entkleiden sich Selbstmörder nicht zwingend vor dem Zusteichen. Vor allem bei Psychosen sticht der Selbstmörder durch die Kleidung. Ebenfalls nicht zwingend notwendig ist das Vorliegen der Tatwaffe bei einem Suizid. In den meisten Fällen bleibt noch genügend Zeit, um sich der Tatwaffe zu entledigen. Denn solange der Stich nicht die Halsschlagader, Körperhauptschlagader oder das Stammhirn stark verletzt hat, bleibt das Opfer noch eine Weile handlungsfähig. Deswegen muss die Verteilung von Blutlachen und Blutspritzern am Tatort sowie die Beschmutzung der Hände und Bekleidung

des Opfers mit Blut genauestens untersucht werden (Grassberger et al. 2009, Hochmeister et al. 2007).

Allgemein kann festgehalten werden: Wird ein Stich **von oben** ausgeführt, sind meist der Kopf, die Schultern, der Brustkorb oder die Oberschenkel verletzt. **Von unten** geführte Stiche treffen dagegen eher den Bauch und die Leistenregion.

Im Hinblick auf die Klinge des Tatwerkzeuges kann das Wund- bzw. Verletzungsmuster Aufschluss geben. Anhand der beiden geformten Enden einer geradlinigen Stichwunde lässt sich z. B. oft feststellen, ob es sich bei der Tatwaffe um ein einschneidiges oder um ein zweischneidiges Messer gehandelt hat. Ein **einschneidiges** Messer hinterlässt auf der einen Seite der Wunde einen spitz zulaufenden Winkel (von der Schneide) und auf der anderen Seite einen flachen Rand mit einem stumpfen Wundwinkel (vom Messerrücken). Eine schwalbenschwanzartige Wunde auf der Seite der Messerschneide weist auf eine Drehung des Messers in der Längsachse nach dem Einstich hin. In diesem Fall spricht der Forensiker vom „großen Schwalbenschwanz“. Besitzt das Messer einen scharfen Messerrücken ist der „kleine Schwalbenschwanz“ häufig zu beobachten (Abb. 7). Dreht der Täter ein **zweischneidiges** Messer im Stichkanal, kommt es zum sogenannten „doppelten Schwalbenschwanz“ mit einer X-förmigen Stichwunde. Diese Muster lassen sich nur schwer von zwei Einstichen an fast identischer Position unterscheiden (Grassberger et al. 2009, Hochmeister et al. 2007).

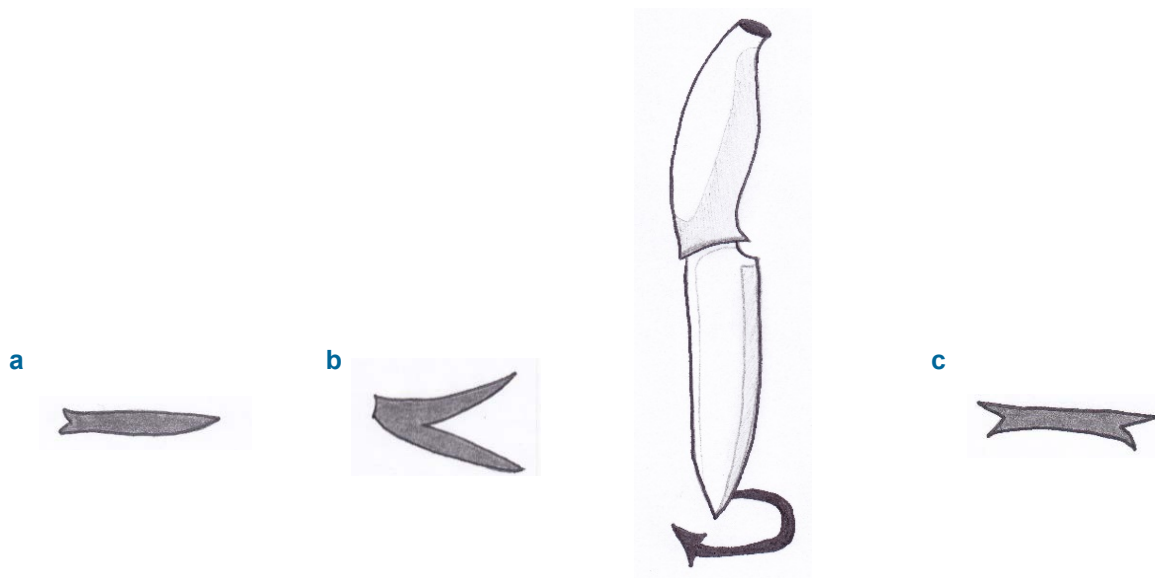


Abb. 7: Drehstich

Ein „kleiner Schwalbenschwanz“ (a) ist bei Messern mit einem sehr scharfen Messerrücken gelegentlich festzustellen. Der sogenannte „große Schwalbenschwanz“ (b) ist typisch für Stichwunden bei denen das Messer vor oder während des Herausziehens gedreht wurde und kennzeichnet die Schneide des Messers. Der „doppelte Schwalbenschwanz“ (c) entsteht bei Drehung eines zweischneidigen Messers (eigene Zeichnung nach Hochmeister et al. 2007, Grassberger et al. 2009).

1.4.4 STATISTIKEN

2012 wurden in Österreich 83 Tötungsdelikte (knapp 17 % mehr als im Vorjahr) dokumentiert, in Deutschland waren es 578 (knapp 15 % weniger als im Vorjahr). Auf 100.000 Einwohner kamen in Österreich jedoch 0,97 Tötungsdelikte, während es in Deutschland nur 0,71 waren (Eurostat 2015). In den USA wurden 14.856 Morde und nicht-fahrlässige Tötungen 2012 dokumentiert. Dies entspricht 4,73 polizeilich registrierte Straftaten je 100.000 Einwohner (U.S. Department of Justice 2014).

In Österreich werden im Vergleich zu den USA deutlich häufiger **Messer oder andere schneidende Instrumente als Tatwaffe** verwendet (Abb. 8). Zwischen den Bundesstaaten der USA zeichnen sich jedoch klare Unterschiede ab. So ragen z. B. Kalifornien, Texas und New York besonders bei dem Einsatz von scharfer Gewalt hervor (s. Tabelle 86 im Anhang; United Nations Office on Drugs and Crime 2015, U.S. Department of Justice 2014).

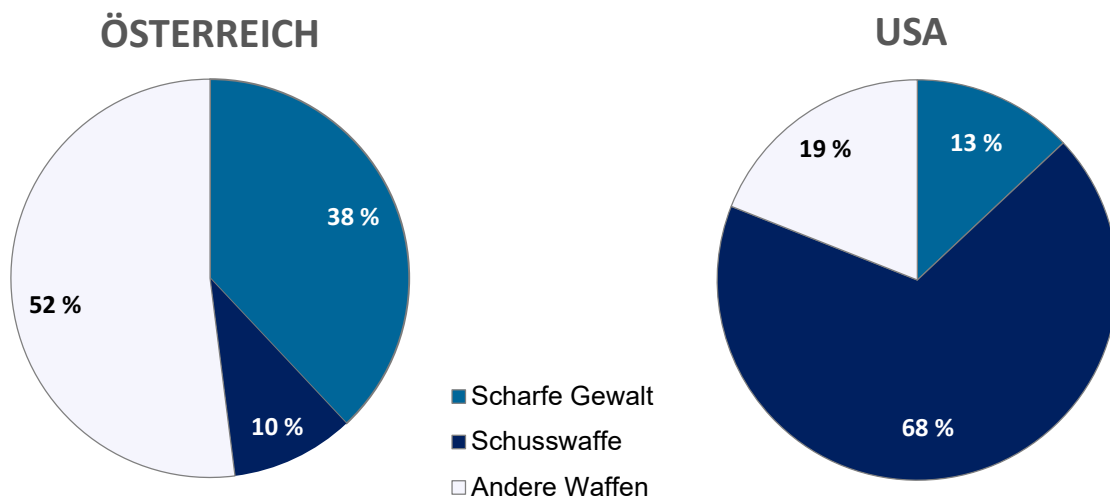


Abb. 8: Waffennwahl im Ländervergleich

2011 wurde in Österreich ein Messer bzw. eine andere scharfe Gewalt als häufigste Mordwaffe eingesetzt. In den USA dagegen nur als zweithäufigstes. 2014 wurden in den USA 1.567 Morde mit einem Messer oder einem schneidenden Instrument begangen. Bei insgesamt 11.961 Morden entspricht dies 13,1 %. Mit 67,9 % wurden die meisten Verbrechen mit Schusswaffen verübt (Daten von United Nations Office on Drugs and Crime 2015, U.S. Department of Justice 2014).

In einer irischen Untersuchung von 200 Todesfällen innerhalb von etwa 10 Jahren wurden 1.680 Verwundungen in verschiedenen Städten (u. a. Glasgow, Dublin, Belfast und Sydney) dokumentiert, die mit einem scharfen Gegenstand verübt wurden. 882 Wunden waren nach Definition Stichwunden. Mit Abstand die meisten Stichwunden fanden sich im **Rumpfbereich** (61,8 %, Abb. 9). 93 der 200 untersuchten Todesfälle waren reine Stichwunden und 101 Fälle zeigten eine Kombination aus Schnitt- und Stichwunden. Die restlichen 6 Todesfälle wiesen lediglich Schnittwunden auf (Cassidy & Curtis 2005).

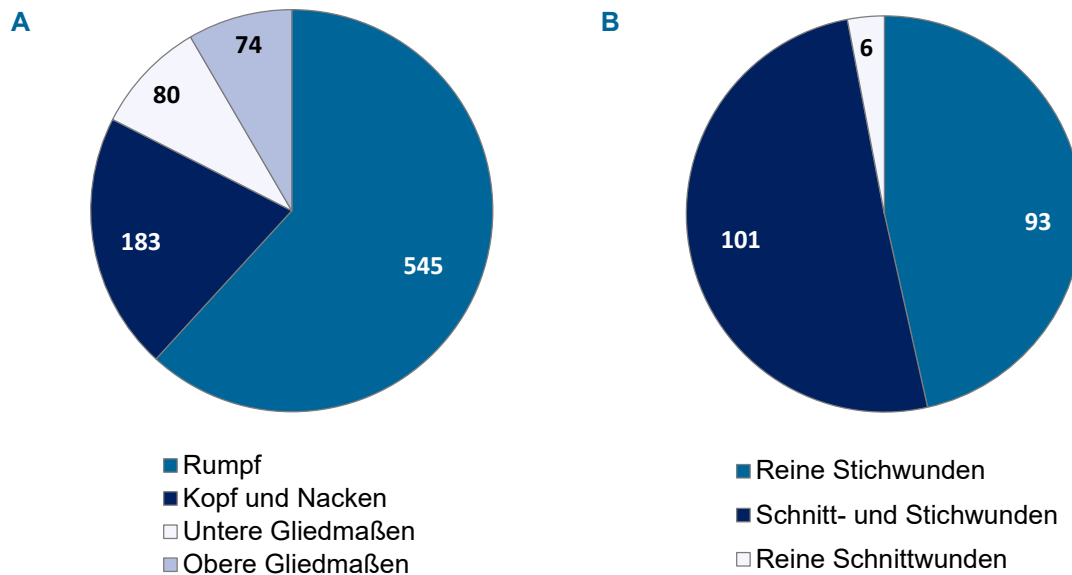


Abb. 9: Opfer von scharfer Gewalt

In einer irischen Untersuchung von 200 Todesfällen innerhalb von etwa 10 Jahren wurden 1.680 Verwundungen durch scharfe Gewalt verübt (Daten von Cassidy & Curtis 2005).

A Darunter fielen 882 Stichwunden, die unterschiedliche Körperpartien trafen. 61,8 % der Wunden befanden sich im Rumpfbereich, 20,7 % am Kopf oder Nacken, 9,1 % an den unteren sowie 8,4 % an den oberen Gliedmaßen.

B Unter den 200 untersuchten Todesfällen zeigten 50,5 % eine Kombination aus Schnitt- und Stichwunden, 46,5 % reine Stichwunden und lediglich 3 % reine Schnittwunden.

Insbesondere aufgrund der einfachen Zugänglichkeit zu Messern werden diese im Rahmen von Straftaten in Österreich am häufigsten eingesetzt. Es ist somit davon auszugehen, dass zum einen bei Gewaltverbrechen in Österreich ein scharfer Gegenstand benutzt wurde und zum anderen sich die Stichwunden im Rumpfbereich des Opfers befinden.

1.5 EXPERIMENTE MIT SCHWEINEKADAVERN

Die Wahl eines geeigneten Modellsystems für die forensische Forschung ist schwierig. Generell dürfen menschliche Überreste in Österreich, wie in vielen anderen Ländern auch, aus **ethischen Gründen** nicht für forensische Experimente verwendet werden. Darüber hinaus eignen sich diverse gespendete, menschliche Überreste nicht für forensisch-osteologische Zwecke, da sie nicht das durchschnittliche Todesopfer repräsentieren. Bei den Spendern handelt es sich meist um ältere Menschen mit fragilen und pathologisch veränderten Knochen. Neben Leichen bzw. Leichenteilen (Alunni-Perret et al. 2005, O'Callaghan et al. 1999, Ohshima 2005) fanden in früheren Studien auch schaumstoffummantelte Sandsäcke (Miller & Jones 1996), Gelatine (Pollak 2007), Styropor (Carr & Wainwright 2011), thermoplastische Aramid Platten (Horsfall et al. 1999), Roma Plastilina (Horsfall et al. 2005), Silikon bzw. offenzelliger und dichtzelliger Polyethylen-Schaumstoff (Kemp et al. 2009) Verwendung als Ziel einer experimentellen „Messerattacke“.

Heute werden gewöhnlich Ratten, Hasen oder Schweine in forensischen Experimenten eingesetzt (Schotsmans et al. 2014). Vor allem Schweine (*Sus scrofa domestica* oder *Sus scrofa linnaeus*) eignen sich in Versuchen als Ersatz, da sie viele anatomische und physiologische Gemeinsamkeiten mit den Menschen teilen (Payne 1963). Zu den Gemeinsamkeiten zählen die **vergleichbare Hautstruktur**, das **Fettgewebe** und die **Größe zahlreicher innerer Organe**. Des Weiteren ist das **Körpergewicht** von Menschen eher mit dem von Schweinen zu vergleichen als mit dem von Ratten oder Hasen (Schotsmans et al. 2014). Im letzten halben Jahrhundert wurden Schweinekadaver in taphonomischen (z. B. Ritz 2009), entomologischen (z. B. Goff 1991, Grassberger & Frank 2004) und geophysikalischen (z. B. Schultz 2008) Untersuchungen als Versuchstier eingesetzt.

Unterschiede zwischen Mensch und Schwein sind trotz vergleichbarer Strukturen des Hartgewebes in der **Mikrostruktur der Knochen** zu finden. Der mittlere Durchmesser von menschlichen Havers-Kanälen ist z. B. breiter als der in Schweine- oder auch Rattenknochen. Menschliche Knochen enthalten außerdem weniger Fett und sind stärker perforiert als Schweineknochen. Ihre unterschiedlich großen Osteone zeigen weitgehend eine plexiforme Anordnung, während die annähernd gleichgroßen und rundlichen Osteone in menschlichen Knochen zufällig verteilt sind. Allgemein haben Schweine kompaktere und schwerere Knochen als Menschen. Das Gewebe von Schweinen ist in der Regel dicker und zäher als menschliches Gewebe, da es eine höhere **Dichte an Kollagen** enthält. Letztlich unterscheiden sich auch die Gliedmaßen in ihren anatomischen Proportionen. Tierische Extremitäten sind aufgrund der quadrupeden Haltung u. a. proportional kürzer als menschliche Gliedmaßen (Harsányi 1993, Parmar et al. 2012, Schotsmans et al. 2014, Verhoff et al. 2006).

1.6 FRAGESTELLUNG DER STUDIE

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, mithilfe von verschiedenen bildgebenden Verfahren Messerklingenspuren an Knochen einer detaillierten morphologischen Analyse zu unterziehen. Dazu werden im Wesentlichen folgende sechs Fragenkomplexe bzw. Problemstellungen behandelt:

1. Zunächst sollen mithilfe von verschiedenen Messertypen (s. Kapitel 2.1.2) Stich-/Schnittverletzungen an unbehandelten Schweinerippen erzeugt werden. Hierzu wird zunächst eine **spezielle Fallvorrichtung** konstruiert, welche eine standardisierte und reproduzierbare Stichserie mit den unterschiedlichen Messertypen gewährleisten soll.
2. Die Rippen mit den experimentell erzeugten Verletzungen werden im Anschluss mittels drei unterschiedlicher **bildgebender Verfahren** (μ CT, Makrofotografie und Rasterelektronenmikroskopie) morphologisch erfasst. Die Auswertung erfolgt zunächst deskriptiv und anschließend mit **morphometrischer Software** (Amira, tps und Morphheus).
3. **Beständige, gemeinsame Merkmale** und individuelle Besonderheiten der unterschiedlichen Messer sollen registriert und quantifiziert werden, um ggf. eine Zuordnung der „Tatwaffen“ zu den jeweiligen Verletzungsmorphologien zu ermöglichen.
4. Nach Auswertung der erhobenen Messdaten soll ermittelt und diskutiert werden, welche **Vor- und Nachteile** die einzelnen bildgebenden Verfahren bei der Analyse von experimentellen Messerstichverletzungen an Rippen aufweisen und welche Software für eine entsprechende morphometrische Analyse am geeignetsten ist. In diesem Zusammenhang stellt sich vor allem die Frage, ob die teurere μ CT-Methode genauere Ergebnisse liefert als die kostengünstigeren Verfahren wie REM oder Makrofotografie.
5. In weiterer Folge soll untersucht werden, wie sich der Prozess der in gegenständlicher Studie angewandten Mikrowellen-**Mazerationsmethode** auf die einzelnen Messwerte vor und nach Mazeration auswirkt und ob ggf. ein Schrumpfungsfaktor bei Analysen nach Mazeration der Rippen zu berücksichtigen ist.
6. Abschließend soll an ausgesuchten Stichproben untersucht werden inwieweit mittels **Röntgenmikroanalyse** (EDX) Metallpartikel in den Kerben nachgewiesen werden können und ob, bei positivem Nachweis, über die Elementenzusammensetzung in der Knochenkerbe auf die Tatwaffe geschlossen werden kann.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 MATERIAL

2.1.1 GERÄTE & VERBRAUCHSMATERIALIEN

Folgende Materialien (Tabelle 1) und Geräte (Tabelle 2) wurden im Verlauf der Versuche eingesetzt. Die verwendeten Messer und Rippen werden separat in Kapitel 2.1.2 und 2.1.3 beschrieben.

Tabelle 1: Auflistung der benutzten Verbrauchsmaterialien

Material	Hersteller
Holzbrett	unbekannt
2 Rohrdoppelnippel 200 cm ($\frac{3}{4}$ Zoll), verzinkt	unbekannt (Bezugsquelle Hornbach)
Deckenwinkel IG ($\frac{1}{2}$ Zoll), verzinkt	unbekannt (Bezugsquelle Hornbach)
4 T-Stücke Gewindefitting ($\frac{3}{4} \times \frac{1}{2}$ Zoll) verzinkt	unbekannt (Bezugsquelle Hornbach)
2 Rohrdoppelnippel 20 cm ($\frac{1}{2}$ Zoll), verzinkt	unbekannt (Bezugsquelle Hornbach)
2 Rohrschellen schallgedämpft ($\frac{1}{2}$ Zoll)	unbekannt (Bezugsquelle Hornbach)
2 Rohrwandscheiben Gewindefitting ($\frac{3}{4}$ Zoll)	unbekannt (Bezugsquelle Hornbach)
Gewindestange (7 mm)	unbekannt (Bezugsquelle Hornbach)
2 Pufferscheiben	unbekannt (Bezugsquelle Hornbach)
Polyethylen-Rohrisolierung, selbstklebend (3cm)	unbekannt (Bezugsquelle Hornbach)
Schrauben	SPAX International GmbH & Co. KG
Schraubenmuttern M7 und Ringmutter C15	unbekannt (Bezugsquelle Hornbach)
2 Hantelscheiben Guss à 2 kg	ENERGETICS, Intersport Deutschland eG
Lochplattenwinkel	unbekannt (Bezugsquelle Hornbach)
2 Holzstäbchen	unbekannt
Einwegkabelbinder	unbekannt (Bezugsquelle Hornbach)
Styropor-Boxen und Styroporplatten	unbekannt
Gewebeklebeband (X-Way)	Schuller Eh'klar
Vaseline	Vaseline®
Probenbeutel	unbekannt
Destilliertes Wasser	Megaspeed
2 Glasschalen	Schott & Gen
Kinderzahnbürste	Mentadent
Blumensteckschaum	TEDi
Handbügelsäge	Simatix
Modelliermasse air BASIC	FIMO
Fotomakrografisches Winkellineal ABFO No.2	Tritech Forensics
Stahlmaßstab (0,5 mm Teilung)	Fa. Vogel GmbH & Co.KG

Tabelle 2: Auflistung der eingesetzten Geräte

Geräte	Hersteller
μCT X8060-25 im Vienna μCT Lab (Department für Anthropologie)	VISCOM
Kombi-Mikrowellengerät	De'Longhi
Digitalkamera Lumix DMC-FZ45	Panasonic
Spiegelreflexkamera EOS 5D Mark II	Canon Inc.
Makro-Objektiv EX 105mm 1:2.8	Sigma
Digitaler Messschieber (Art.Nr.: 10109)	Herbert Müllner Werkzeuggroßhandel GmbH
Sputtergerät EM SCD050	Leica
Rasterelektronenmikroskop Supra 55 VP im Fakultätszentrum für Nanostrukturforschung (Fa- kultät für Physik)	Zeiss
Digitale Küchenwaage	SOEHNLE

2.1.2 VERSUCHSMESSER

Die Versuche der vorliegenden Arbeit wurden mit 12 verschiedenen Messern durchgeführt (Tabelle 3, Abb. 10). Darunter befanden sich Küchenmesser (Steak-, Pizza-, Zubereitungs-, Säge-, Tomaten- bzw. Blockmesser), Sektionsmesser (Knorpel- bzw. Seziermesser), ein Jagd- und Klappmesser sowie eine Schere. Alle Messer wurden mit der Skala eines Winkellineals fotografiert und einer Nummer zugeordnet (Abb. 84-95 im Anhang).

Tabelle 3: Versuchsmesser

Zwölf verschiedene Messer aus den Rubriken Küchen-, Jagd-, Freizeit- und Sektionsmesser sowie eine Schere wurden als Versuchsmesser eingesetzt.

Messer	1	2	3	4	5	6
Bezeichnung	Steak- messer	Pizza- messer	Knorpel- messer I	Knorpel- messer II	Sezier- messer	Zubereitungs- messer
Hersteller	unbekannt	Bofrost	unbekannt	Aesculap	Babicky GmbH	WMF
Zustand	gebraucht	neu	gebraucht	gebraucht	gebraucht	gebraucht
Klingentyp	gerader Messerrü- cken, tiefer Schliff, gezahnt	gebogen, wellig ge- zahnt	Hohlschliff (konkav)	bauchig (konvex)	gerader Messerrü- cken	spitz zulau- fend, gerader Mes- serrücken

Fortsetzung Tabelle 3

Messer	7	8	9	10	11	12
Bezeichnung	Block-messer	Säge-messer	Jagd-messer	Tomaten-messer	Schere	Klapp-messer
Hersteller	Signal	Heintel	unbekannt	unbekannt	Silit	unbekannt
Zustand	gebraucht	gebraucht	gebraucht	gebraucht	gebraucht	gebraucht
Klingentyp	sehr breit, flach	grob gezahnt, einseitiger Schliff	tiefer, breiter Schliff, Damaszener Stahl	zweischneidig, gezahnt	gerader, steiler Schliff	spitz zulau-fend, tiefer Schliff

Die Mehrheit der verwendeten Messer ist üblicherweise auch in privaten Haushalten verfügbar. Damit deckt das Repertoire auch die Tatwaffen ab, die in impulsiven Auseinandersetzungen häufig Verwendung finden, da sie leicht zugänglich sind.

**Abb. 10: Messerauswahl**

Die abgebildeten 12 Messer wurden in gegenständlicher Arbeit nacheinander in ein Fallbeil eingebaut, um deren Einstichmorphologie im Knochen zu analysieren.

Bis auf das Pizzamesser waren alle Messer zuvor im Haushalt, in der Freizeit oder am Arbeitsplatz zum Einsatz gekommen. Während es sich bei dem Knorpelmesser I um ein klassisches Knorpelmesser mit kurzer, geschwungener Klinge handelte, besaß das Knorpelmesser II eine deutlich länglichere, gerade Klinge. Die Schere wurde in komplett geöffnetem Zustand verwendet, damit nur ein Einstich durch eine Klinge entstehen konnte.

2.1.3 SCHWEINERIPPEN

Siebzehn mit Weichgewebe verbundene Rippenstücke von einem Hausschwein (*Sus scrofa domesticus*) wurden in der vorliegenden Studie eingesetzt (Abb. 11, Tabelle 4). Die Form der Rippenquerschnitte variierte von rund über elliptisch bis dreieckig. Das Weichgewebe – bestehend aus subkutanem Fett und Brustmuskeln – maß zwischen 1,5 und 3,1 cm Dicke. Die Rippenstücke befanden sich einst ventro-lateral am Sternum des Schweines und enthielten an jeweils einer Seite noch Rippenknorpel.

Tabelle 4: Durchschnittliche Rippengröße

Rippen	Mittelwert	Standard-abweichung
Länge [cm]	6,80	1,15
Breite [cm]	1,55	0,30
Tiefe [cm]	0,90	0,24

A



B

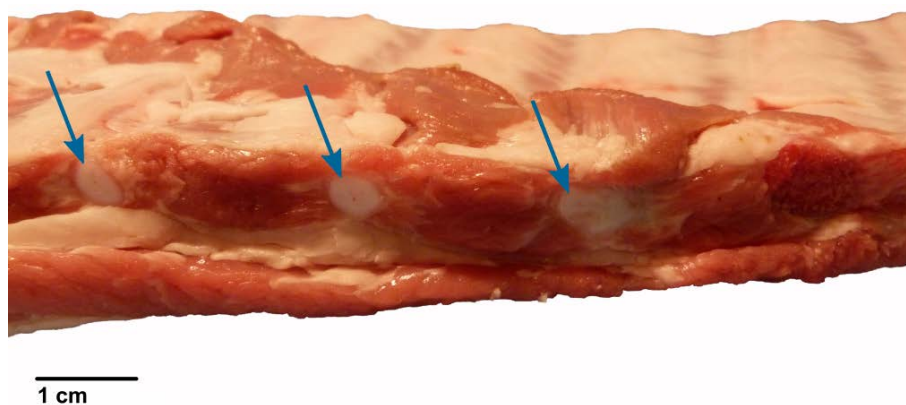


Abb. 11: Schweinerippen

- A** Das ca. 70 cm lange Stück Schweinefleisch mit Rippen, hier mit der medialen Seite oben, wurde von der Fleischerei Ringl in Wien erworben.
- B** Nahaufnahme der verwendeten Schweinerippen mit Sicht auf die von der Brustmuskulatur umgebenden Rippenknorpel (mit Pfeilen gekennzeichnet).

Die unbehandelten Schweinerippen (ohne Zusatzstoffe, Salz oder Marinade) stammte von der Fleischerei Ringl in Wien, deren Schweine in klein strukturierten Bauernhöfen im Waldviertel aufgezogen werden. Zwei weitere Rippen stammten von einem Stück Schweinefleisch, das im Supermarkt erworben wurde. Diese beiden Rippen wurden in den ersten Probetests verwendet.

2.2 METHODEN

2.2.1 ZUFÜGEN DER STICHWUNDEN

Das eigens für diese Arbeit konstruierte „Fallbeil“ kann mit jedem beliebigen Messer bestückt werden. Dazu wurde in der vorliegenden Studie das jeweilige Messer mit zwei Kabelbindern an einen Lochplattenwinkel fixiert (Abb. 12). Um zu gewährleisten, dass die Messer beim Eindringen in das Gewebe und die Rippen nicht verrutschten, wurden zwei Holzstäbchen seitlich zwischen Messer und Kabelbinder eingesetzt. Der Lochplattenwinkel wurde mit einer angebohrten Gewindestange an einen kurzen Rohrdoppelnippel und zwei Hantelscheiben festgeschraubt. Diese Apparatur konnte mittels zwei T-Gewindestücken, deren Innengewinde ausgebohrt wurden, zwischen zwei 2 m langen Rohrdoppelnippeln entlanggleiten. Für ein nahezu reibungsloses Gleiten wurden die beiden langen Rohre zusätzlich mit Vaseline eingerieben.

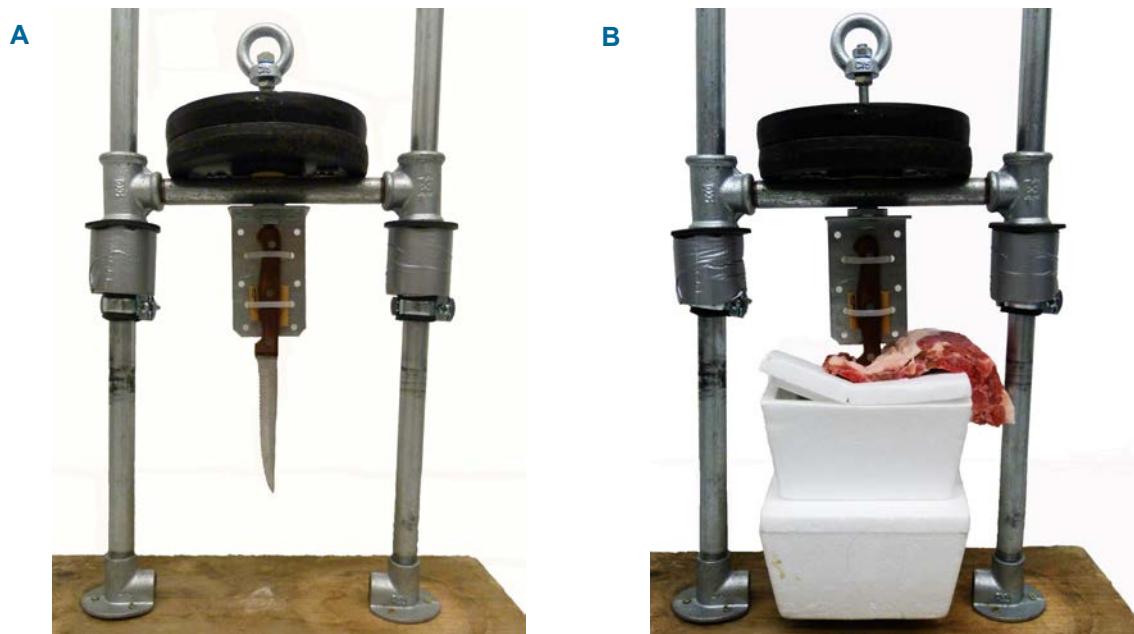


Abb. 12: Fallvorrichtung

Das „Fallbeil“ in Verwendung mit Messer Nr. 1 vor (A) und nach (B) dem Einstechen in das Rippenfragmente enthaltene Stück Schweinefleisch, welches auf zwei Styroporboxen lag.

Als Unterlage und Äquivalent der inneren Organe im Bereich des Brustkorbs wurden Styroporboxen verwendet. Die Anzahl an Boxen richtete sich nach der Länge der Klinge. Auf die oberste Box wurden die Schweinerippen mit der Pleuraseite nach unten gelegt und so ausgerichtet, dass die Klinge im Optimalfall mindestens eine Rippe seitlich penetrierte. Eine vollständige Zerteilung der Rippen sollte für eine optimale Analyse der Kerbmarken vermieden werden. Mit jedem Messer wurden jeweils bis zu drei Stichverletzungen zugefügt. Auf eine einheitliche Reinigung der Messer vor Gebrauch wurde bewusst verzichtet, um den realen Begebenheiten als Tatwerkzeug möglichst nahe zu kommen.

Die durchschnittliche Energie, die beim Zufügen einer Stichwunde eingesetzt wird, liegt laut Horsfall et al. (2005) und Chadwick et al. (1999) bei 36 J. Horsfall und seine Kollegen gaben sechs Jahre zuvor noch 8 J weniger an (Horsfall et al. 1999). Die Maximalwerte lagen bei diesen drei Studien zwischen 72 und 115 J und wurden in den Versuchen von Chadwick et al. (1999) nur durch horizontal geschwungene Messer erreicht.

In vorliegender Studie wurde eine standardisierte potentielle Energie von 45 J gewählt. Dies entspricht dem Mittelwert zwischen den errechneten 36 J von Horsfall et al. (2005) bzw. Chadwick et al. (1999) und dem 95. Perzentil aller „Underarm“-Stiche (54,5 J) in der Studie von Horsfall et al. (1999), welches als der signifikanteste Wert klassifiziert wurde. Bei einem Fallbeil verhält sich die Energie des Einstiches proportional zur Höhe des herabfallenden Messers. Aufgrund des Gewichtes des hinuntergleitenden Konstruktionselements von 4,5 kg (4 kg Hantelscheiben + ca. 0,5 kg Messer und Halterung) benötigten die Messer gemäß der Formel 1 eine Fallhöhe von 102 cm, um die intendierten 45 J Energie auf die Rippen auszuüben.

$$\text{Höhe} = \frac{\text{potentielle Energie}}{\text{Gravitationskonstante} * \text{Masse}} = \frac{45 \text{ J}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 4,5 \text{ kg}} \approx 1,02 \text{ m} \quad (1)$$

Die beiden Hantelscheiben à 2 kg wurden verwendet, um eine schnellere Beschleunigung der Messer zu erreichen und somit eine große Höhe der Fallbeil-Konstruktion zu vermeiden. Mit einer Höhe von 102 cm wurden eine Fallzeit von ca. 0,46 Sekunden und eine Fallgeschwindigkeit von rund 4,47 m/s erreicht (Formeln 2 und 3).

$$\text{Fallzeit} = \sqrt{\frac{2 * \text{Fallhöhe}}{\text{Gravitationskonstante}}} = \sqrt{\frac{2 * 1,02 \text{ m}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} \approx 0,456 \text{ s} \quad (2)$$

$$\text{Fallgeschwindigkeit} = \text{Gravitationskonstante} * \text{Fallzeit} = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,456 \text{ s} \approx 4,474 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3)$$

Das jeweilige Messer wurde mit den Hantelscheiben an einem daran befestigten Ring aufgehoben und bis zur markierten Höhe hinaufgezogen. Die absolute Höhe änderte sich, je nach Anzahl der Styroporboxen. Befanden sich die Hantelscheiben in der richtigen Höhe ausbalanciert und parallel zum Boden wurden sie losgelassen, um der Erdanziehungskraft folgend in die Schweinerippen und das umliegende Weichgewebe einzudringen. Als Stoßdämpfer wurden 3 cm hohe Ringe einer Rohrisolierung mit Gewebeklebeband an die langen Röhren über den (die Apparatatur stoppenden) Rohrschellen fixiert.

Zum Schluss wurden die Messer vorsichtig in einem Zug wieder aus dem Fleisch gezogen, um Artefakte weitgehend auszuschließen. Jede Schnittwunde wurde dokumentiert und bekam in Bezug auf das Tatmesser eine Nummer zugeordnet. Die katalogisierten Rippenstücke wurden bis zur weiteren Analyse in Probenbeuteln aus Polyethylen verpackt und eingefroren.

2.2.2 MIKRO-COMPUTERTOMOGRAPHIE

Das Scannen der Schweinerippen erfolgte mit dem μ CT X8060-25 im Vienna μ CT Lab (Department für Anthropologie, Fakultät für Lebenswissenschaften der Universität Wien). Die vor Ort befindliche Röntgenröhre XT9190-THP von VISCOS liefert generell einen Röhrenstrom zwischen 10 und 800 μ A und erreicht eine Hochspannung zwischen 10 und 190 kV sowie eine maximale Trägerleistung von 80 Watt (Vienna Micro-CT Lab o. J.).

Insgesamt wurden sieben Scans durchgeführt (Tabelle 5). Die letzten drei Scans wurden mit den einzelnen entfleischten Rippenfragmenten getätigt, um mögliche Größenveränderungen durch die Mazeration festzustellen.

Tabelle 5: μ CT Scanaufteilung

Siebzehn Rippen mit insgesamt 27 Rippenfrakturen wurden in vier μ CT-Scans bildlich festgehalten. Dazu befanden sich 1-3 Fleischproben in der μ CT-Kammer. Nach der Mazeration wurden drei weitere Scans mit den entfleischten Rippenfragmenten ausgeführt. Aufgrund von Rippenbrüchen konnten nach Mazeration nur noch 26 Frakturen analysiert werden.

Scan Nr.	Anzahl der Proben	Messer Nr.	Anzahl der Rippenfrakturen
1	1 à 1 Rippe	1	2
2	3 à 6 Rippen	2 (b), 6, 7, 8	8
3	2 à 6 Rippen	2 (a), 9, 10, 11	10
4	1 à 4 Rippen	3, 4, 5	7
5	7 Rippenfragmente	1-4	10
6	8 Rippenfragmente	5-10	12
7	5 Rippenfragmente	11, 12	4

In einem ersten Probescan wurde ein aufgetautes Rippenstück aus dem Probenbeutel entnommen und vertikal in eine Vertiefung eines niedrigeren Styroporwürfels hineingestellt. Das senkrechte Aufstellen des Rippenstückes erfolgte, um die Distanz, welche die Röntgenstrahlen durch die Probestücke zurücklegen mussten bis sie auf den Detektor trafen, so gering wie möglich zu halten. Um das Probestück festzuklemmen wurde der Würfel mit Gewebeklebeband umwickelt. Während des zweieinhalbstündigen Scanvorgangs – in der die Probekammer etwa 30 °C erreicht – veränderte die Rippe jedoch durch Transpiration von Wassermolekülen ihre Position leicht, sodass bei den Folgescans auf eine andere Technik zurückgegriffen wurde.

Für die Folgescans wurden jeweils 1-3 Probestücke – aufgetaut im Probenbeutel – vertikal um einen Styroporwürfel positioniert und mit Haushaltstüchern sowie Gewebeklebeband umwickelt (Abb. 13). Nichtsdestotrotz musste der Scan Nr. 3 wiederholt werden, da durch eine leichte Bewegung der Probe Artefakte entstanden waren. Schon die geringsten Bewegungen

des Probeobjekts können bei einer Aufnahme von wenigen Mikrometern zu erheblichen Veränderungen der Scanbilder führen.

Für die Scans nach Mazeration der Rippen wurden diese hochkant, nebeneinander einen Kreis formend, in einem Blumensteckschaum platziert.

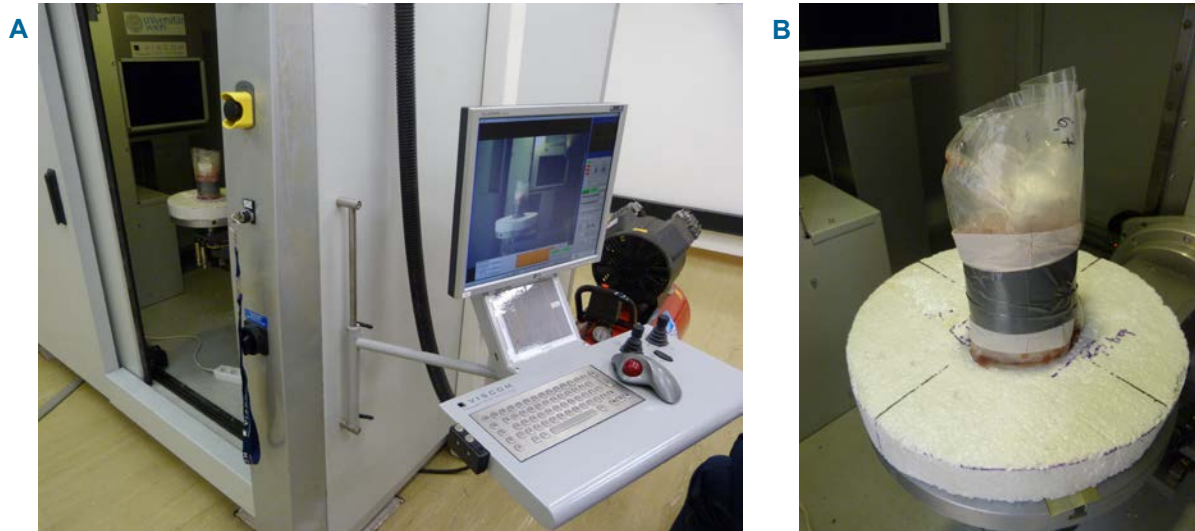


Abb. 13: Verwendung des µCTs

Probenexemplare vor Mazeration der Rippen im Mikro-CT X8060-25 im Vienna µCT Lab.

A Sicht auf die Probestücken 2a, 9, 10 und 11 durch das offene µCT und über die Videoübertragung.

B Drehtisch mit den Probenbeuteln der Rippen 2b, 6, 7 und 8 vertikal um einen Styroporwürfel befestigt.

Die Auflösung und somit auch die Isovoxelgröße betrug bei allen Scans 39,69 µm mit einem Zoomfaktor von 3200. Bei einer besseren Auflösung (< 40 µm) war der Gewinn an feinen Verletzungsmustern geringer als der Verlust von Bildinformationen durch Artefakte.

Für den ersten Scan wurde ein 0,25 mm dicker Kupfer-Vorfilter verwendet. In den Scans 2-7 war dieser 0,75 mm dick (Tabelle 6). Dieser Filter absorbiert die langwelligen Strahlen, um nur hochenergetische Strahlung auf das Probeobjekt auftreffen zu lassen. Hohe Strahlendosen reduzieren Artefakte wie z. B. Strahlauhärtung, bei der die Grauwerte zum Zentrum des Objektes hin dunkler werden, oder strahlenförmiger Signalmangel, wenn die Röntgenstrahlen fast vollständig beim Durchqueren des Objektes absorbiert werden (Dockner 2015, Weber & Bookstein 2011).

Tabelle 6: Scanparameter

Scan Nr.	Belichtungszeit [ms]	Spannung [kV]	Stromstärke [µV]
1	1.400	120	240
2-4	1.400	130	350
5-7	1.400	130	330

2.2.3 MAZARATION DER KNOCHEN

Zur Mazeration diente die Mikrowellen-Methode von King & Birch (2015) als Orientierung. Diese ist laut den Autoren die vielversprechendste Methode, um Gewebe rückstandsfrei zu entfernen ohne zusätzliche Spuren auf den Knochen zu hinterlassen. Die von King & Birch (2015) beschriebene Methode wurde leicht abgewandelt, da das vorgegebene 10-Sekunden-Intervall in der Mikrowelle für die Schweinerippen deutlich zu kurz gewählt war. Im Folgenden wird die Methode der gegenständlichen Arbeit näher beschrieben.

Bis zu drei der gescannten Probestücke wurden in eine Glasschale gelegt und mit destilliertem Wasser bis zu einem Wasserstand von etwa 5 mm aufgefüllt. Um ein Austrocknen der Rippen zu verhindern, wurden die Proben mit einem befeuchteten Haushaltstuch abgedeckt. Die abgedeckten Proben wurden für 4 Minuten im Mikrowellenherd bei 450 W erwärmt. Danach blieb die Schale für weitere 4 min bei 390 W in der Mikrowelle. Bei Probestücken von größerem Volumen wurde nach der initialen Erwärmung bei 450 W das Gewebe für je 30 s weiter bei 450 W erwärmt, bis ein Ablösen von den Rippen zu beobachten war. Dieses wurde vorsichtig mit behandschuhten Händen und einer Kinderzahnbürste mit abgerundeten weichen Borsten entfernt, um die mechanische Einwirkung auf die Knochen so niedrig wie möglich zu halten. Die Rippen konnten am einfachsten durch ein vorsichtiges Hindurchdrücken aus dem Weichgewebe gelöst werden.

Die Probestücke inklusive der Einstichstellen wurden jeweils auf ein Haushaltstuch gemalt und die herausgenommenen Rippen in ihrer entsprechenden Position daraufgelegt. Jedes Rippenfragment bekam eine entsprechende Identifikationsnummer zugeordnet. Im Anschluss wurden die Rippen für mindestens 7 Tage bei Raumtemperatur getrocknet und einzeln (in Haushaltstuchstreifen gewickelt) in Probenbeuteln verwahrt.

2.2.4 MAKROFOTOGRAFIE

Mit einer Vollformat-Spiegelreflexkamera (Canon EOS 5D Mark II, Canon Inc., Japan) inklusive Makro-Objektiv Sigma EX 105mm 1:2.8 und Stativ wurden die Versuchsmesser und die mazerierten Rippen makroskopisch fotografiert. Bei diesen Makroaufnahmen wurde ein Stahlmaßstab mit 0,5 mm Teilung (Fa. Vogel GmbH & Co.KG) verwendet.

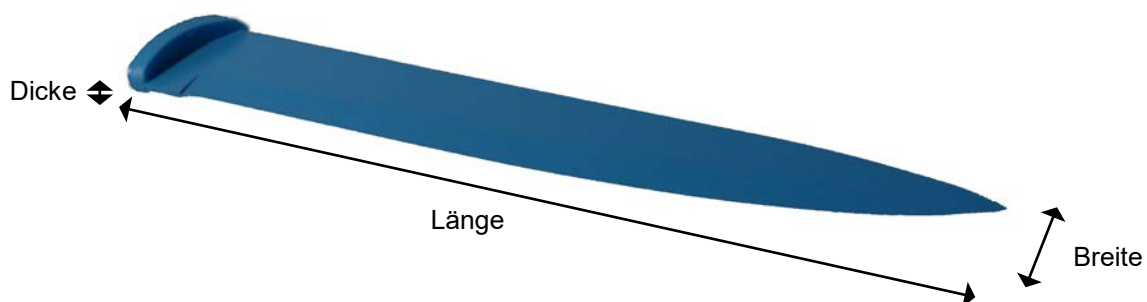


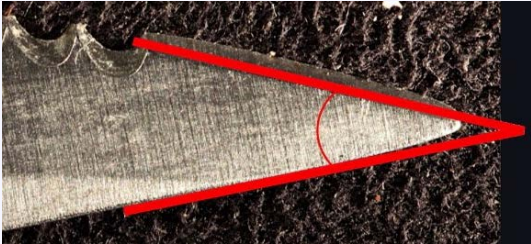
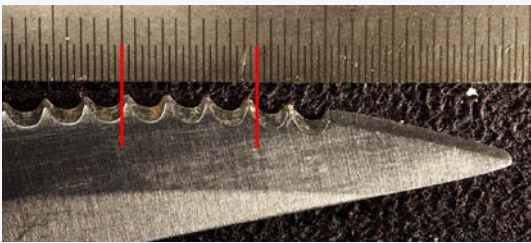
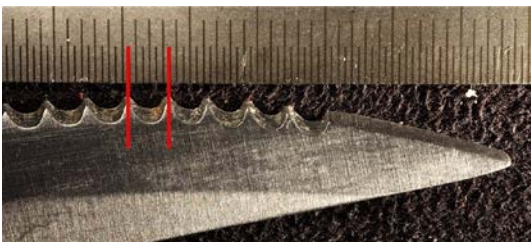
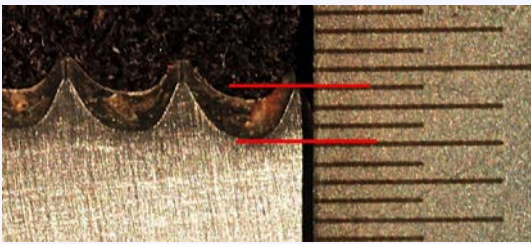
Abb. 14: Maße einer Messerklinge

Jedes Messer wird durch die individuellen Maße der Klingendicke, -länge und -breite definiert.

Unterschiedliche Maße der Messerklingen, wie z. B. deren Dicke (Abb. 14) oder die Anzahl der Klingenzähne pro Zentimeter (Tabelle 7), wurden mit einem digitalen Messschieber (Art.Nr.: 10109, Herbert Müllner Werkzeuggroßhandel GmbH) ausgemessen bzw. anhand des Maßstabs abgelesen. Um die Radien der Messerklingen zu bestimmen, wurde tpsDig2 (Rohlf 2005a) eingesetzt.

Tabelle 7: Ausmessung der Messerklingen

Von jeder Messerklinge wurde der Radius der gesamten Klinge entlang des Grats und der Klingenspitze in tpsDig2 ausgemessen. Bei gezahnten Messern wurden zusätzlich die Anzahl der Zähne pro Zentimeter, der Abstand der einzelnen Zahnspitzen und die Höhe der Zähne bestimmt. Der verwendete Stahlmaßstab zeigt Teilstriche mit 0,5 mm Abstand. Bildliche Darstellung exemplarisch mit Messer 1.

Messung	Bildliche Darstellung
Radius der Klinge	
Radius der Klingenspitze	
Anzahl der Zähne pro cm	
Abstand der Zahnspitzen [mm]	
Höhe der Zähne [mm]	

Für die Ausmessung der Klingendicke und -breite wurden außerdem Querschnitte von den Messerklingen in lufthärtender Modelliermasse (air BASIC; FIMO) angefertigt. Dazu wurden alle Messer mit eingefetteter Klinge in den Block aus Modelliermasse gestochen und dort für 24 h stecken gelassen (Abb. 15A). Nachdem die Masse mit den halbfesten Klingenabdrücken erhärtet war, wurde der Block mit einem Abstand von 1,5 cm der Länge nach zerschnitten (Abb. 15B). Die Querschnitte der Messerklingen wurden anhand von Fotoaufnahmen in tps-Dig2 vermessen.

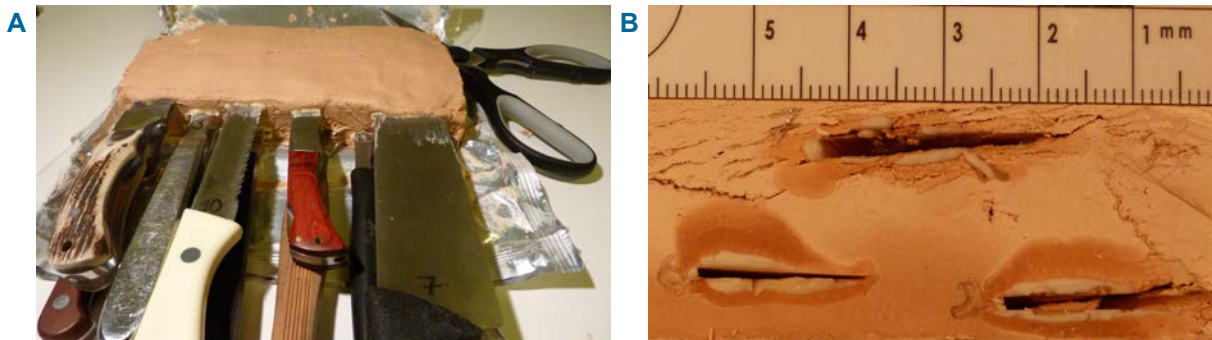


Abb. 15: Klingenabdrücke in Modelliermasse

- A** Für die Ausmessung der Klingendurchmesser wurden alle Messerklingen mit Butter eingefettet, in die lufthärtende Modelliermasse air BASIC (FIMO) gestochen und nach ca. 24 h wieder vorsichtig heraus gezogen.
- B** Exemplarischer Ausschnitt des Blocks aus Modelliermasse mit den Einstichen der Messerklingen 6, 7 und 2 (von links nach rechts). Die abgebildeten Querschnitte der Messerklingen an der Schnittkante der Modelliermasse entsprechen dem Klingendurchmesser 3 cm von der jeweiligen Klingenspitze entfernt. Das Fotomakrografische Winkellineal zeigt eine 1 mm Teilung.

Die Rippenfragmente lagen bei den Aufnahmen sowohl auf der dorsalen als auch auf der ventralen Seite und wurden wenn nötig händisch zusammengehalten. Die Knocheneinstichlänge, -höhe, maximale Einstichhöhe und wenn möglich die Einstichbreite wurden danach ebenfalls in tpsDig2 anhand einer Auswahl an verwertbaren Fotoaufnahmen vermessen.

2.2.5 RASTERELEKTRONENMIKROSKOPIE UND EDX

Die REM-Aufnahmen der vorliegenden Studie erfolgten mit dem Supra VP 55 der Firma Zeiss im Fakultätszentrum für Nanostrukturforschung der Universität Wien (Fakultät für Physik). Dieses Elektronenmikroskop verfügt über vier bildgebende Detektoren, drei sensitive für Sekundärelektronen (Elektronen, die aus der Probe herausgeschlagen werden, wenn der primäre Elektronenstrahl aus der Elektronenkanone auf die Probe trifft) und einen für rückgestreute Elektronen (Primärelektronen, die von positiven Atomkernen der Probe abgelenkt und zurückgestreut werden). Ein EDX-Detektor der Firma Oxford Instruments erlaubte zusätzlich eine Elementanalyse der Probeobjekte. Allgemein liefert das REM einen Probenstrom von 4 pA bis 100 nA und erreicht eine Beschleunigungsspannung zwischen 0,02 und 30 kV (Universität Wien o. J.).



Abb. 16: Besputterung der Rippenfragmente

Nach dem Zerstäubungsprozess besaßen die Rippenfragmente eine oberflächliche Goldbeschichtung, die zur elektrischen Leitfähigkeit beiträgt.

Um die Herstellung eines Hochvakuums trotz des Ausgasens der Rippen zu ermöglichen, wurden die Rippen weiter zerkleinert. Zur Verkürzung der Rippen wurden die Messereinstiche fest mit Frischhaltefolie umwickelt, sodass keine Spuren von der Säge in die zuvor beigebrachten Stiche übertragen werden konnten. Im Zerstäubungsprozess wurden die isolierenden Probenoberflächen mittels des Sputtergerätes EM SCD050 mit Gold beschichtet und somit elektrisch leitfähig gemacht (Abb. 16).

Tabelle 8: REM Scanaufteilung

Zwölf Rippenfragmente mit 19 Frakturen wurden in fünf REM-Analyseschritten bildlich festgehalten. Dazu befanden sich 1-3 Fragmente gleichzeitig in der Probenkammer.

Analyse Nr.	Anzahl der Rippenfragmente	Rippen Nr.	Anzahl der Rippenfrakturen
1	1	6	2
2	3	1a, 10.1, 10.2	4
3	3	1b, 2b, 11.2	5
4	2	5, 8.2	4
5	3	3, 7.1, 12	4

Die Probekammer wurde fünfmal mit 1-3 der bearbeiteten Rippenfragmente beladen (Tabelle 8). Dabei wurden die Proben entweder an die Seiten eines speziellen, sechskantigen Probentischs mit leitfähigem Klebeband befestigt (Abb. 17) oder auf einen runden Probentisch gelegt bzw. zwischen kleinen Stiftprobentellern eingeklemmt.

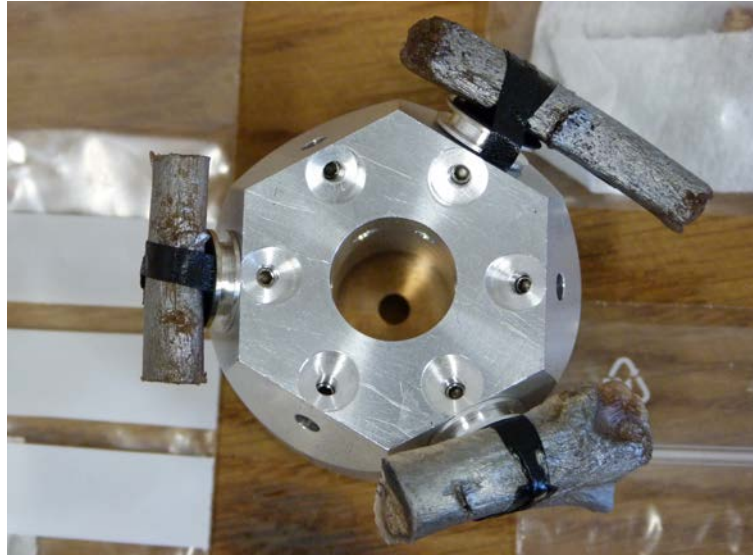


Abb. 17: Verwendung des REMs

Die Rippenfragmente 3, 7.1 und 12 wurden an den sechskantigen Probetisch befestigt, sodass alle Einstiche senkrecht einsehbar waren.

Für die Aufnahmen im Vakuum wurden Sekundärelektronen der Klasse 2 und eine 30 μm Blende verwendet. Die Spannung betrug 5 kV und der Arbeitsabstand (Distanz zwischen Probe und Objektivlinse) variierte von 6,9 mm bis 36,7 mm.

Von jeder Fraktur wurden ein Gesamtbild des Einstiches und die beiden seitlichen Kanten der Einstichwand aufgenommen. Anschließend wurde mittels energiedispersiver Röntgenanalyse die elementare Zusammensetzung der Einstiche überprüft.

2.2.6 BILDDATEN-ANALYSE

Die Datenaufbereitung und Visualisierung der Rippenfragmente und -einstiche sowie der Messer wurden mit Amira 5.6 (von der Arbeitsgruppe „Virtuelle Anthropologie“ zur Verfügung gestellt), tps-Programmen (lizenzfreie Software, <http://life.bio.sunysb.edu/morph/>) und Morpheus (lizenzfreie Software, <http://morphlab.sc.fsu.edu/software.html>) vollzogen. Dazu wurden eigens für diese Arbeit definierte Landmarks (LMs) und Semilandmarks (SLMs) digitalisiert sowie Kurven entlang der Messerklingen und Einstiche kreiert.

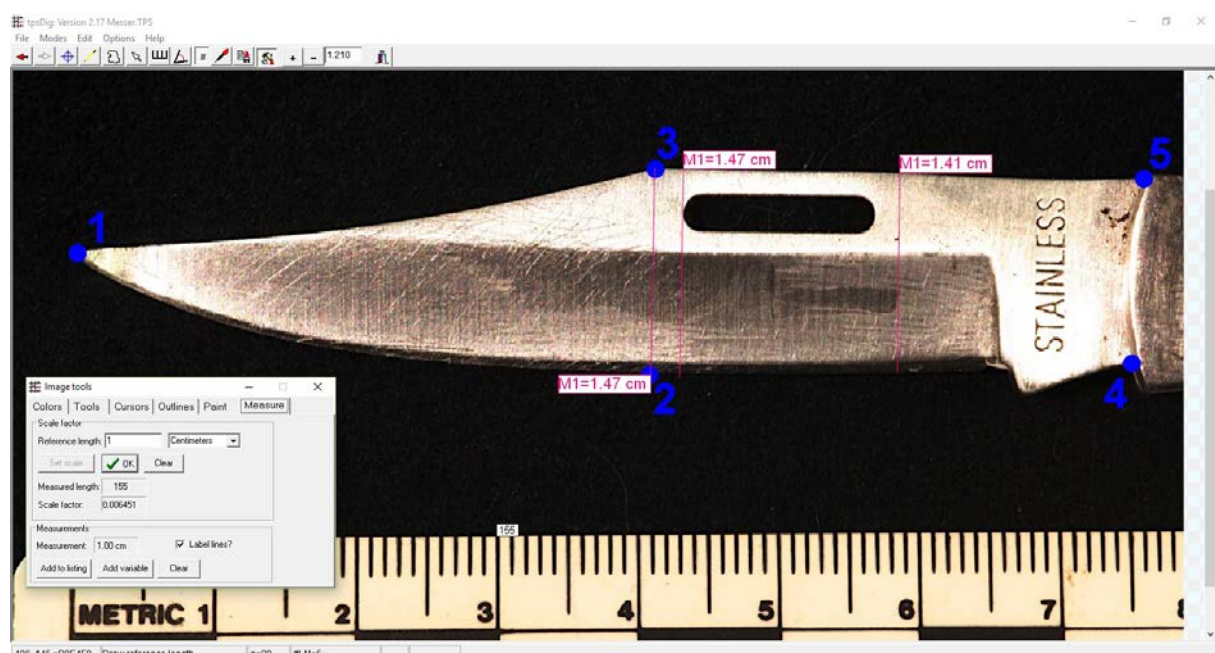
Versuchsmesser

Eine morphologische Analyse der angefertigten Bilddateien der Messerklingen erfolgte mittels tps Programmen und Morpheus. Mit tpsUtil (Rohlf 2005b) wurden die Bilder zu einer tps-Datei zusammengestellt und mit tpsDig2 jeweils fünf eindeutig identifizierbare LMs – nach Definition von Bookstein (1991) Typ I LMs – digitalisiert (Tabelle 9).

Tabelle 9: Definitionen der verwendeten LMs und SLMs an Messerklingen

Die Punkte 1-5 kennzeichneten eindeutig zuordenbare Landmarks (LMs), während die Punkte 6-11 als Semilandmarks (SLMs) auf einer Kurve lagen und verschoben werden konnten.

LMs und SLMs	Definition
1	Messerspitze
2	Maximale Klingenbreite an der Messerschneide (Stelle an der Messerschneide, wo Steigung der Klinge erstmals = 0)
3	Maximale Klingenbreite am Messerrücken
4	Ende der Klinge/Anfang des Hefts an der Messerschneide
5	Ende der Klinge/Anfang des Hefts am Messerrücken
6-11	Auf der Kurve entlang der Klingenkantur zwischen LM 2 und 3 über LM 1

**Abb. 18: Messerklingen digital vermessen**

Mit der Option „Make linear measurements“ konnte die Breite der Messerklinge an jeder beliebigen Stelle ausgemessen werden. Hier exemplarisch an Messer Nr. 12 gezeigt. Die erste Stelle an dem die Klinge ihre maximale Breite (in diesem Fall von 1,47 cm) erreicht hatte, wurde mit den Landmarks 2 und 3 versehen (blaue Ziffern an der Klinge). Für die Längenangaben in Zentimeter musste zuvor einer bekannten Strecke auf dem Foto dessen Größe zugeordnet werden. In diesem Fall entsprachen 155 Bildpunkte 1 cm; der Strecke zwischen Zentimeter 2 und 3 auf dem fotomakrografischen Winkellineal.

Die LMs 2 und 3 kennzeichnen jeweils die gegenüberliegenden Stellen der Messerklinge, an denen die Klinge **erstmalig** ihre maximale Breite erreichte und somit die Klingenkante eine Steigung von null annahm (Abb. 18). Um diese Stellen zu finden, wurden lineare Messungen entlang der Klinge durchgeführt. Mithilfe des Imagetools „Scale factor“ wurde das digitale Messinstrument zuvor kalibriert. Bei der Schere wurde die Stelle am schwarzen Schraubenknopf, der die beiden Klingen zusammenhält, als maximale Breite angesehen.

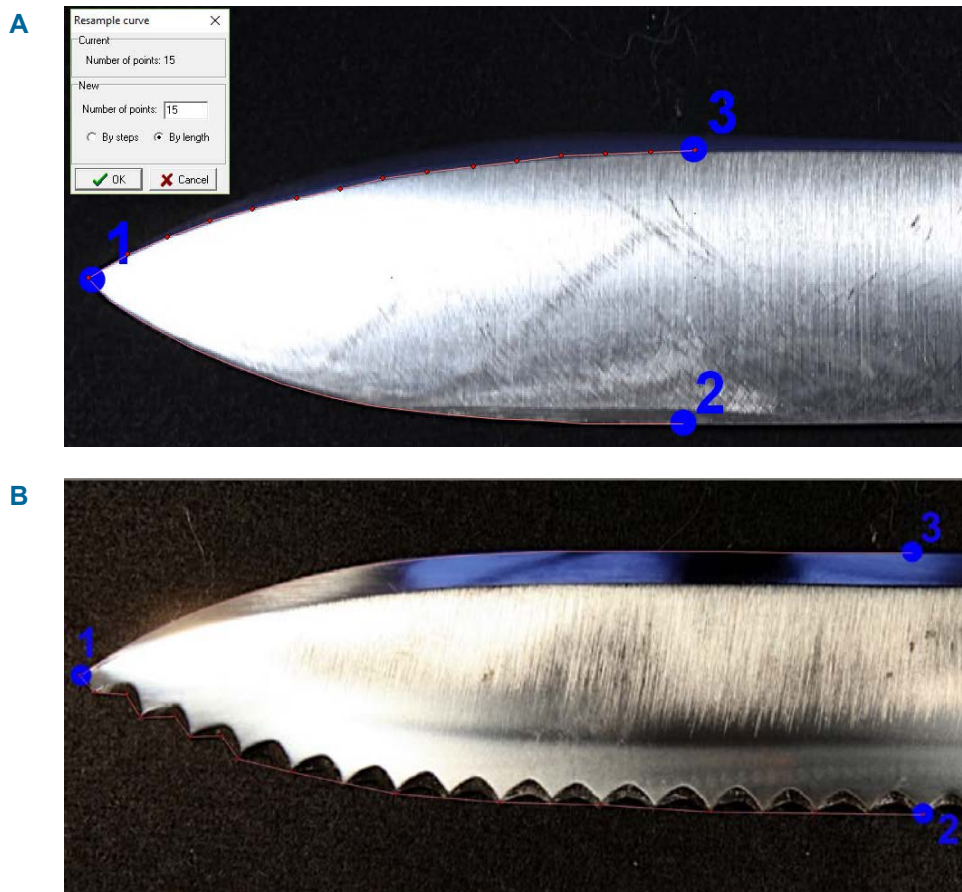


Abb. 19: Kurven zeichnen

- A** Auf jeder Messerklinge wurden zwei Kurven gezeichnet (rote Punkte durch hellrote Linie verbunden). Sie definierten die Messerspitze und den Bereich der Klinge bis zu ihrer breitesten Stelle, die durch die LMs 2 und 3 (blaue Ziffern an der Klinge) bestimmt war. Hier exemplarisch an Messer 4.
- B** Eine Kurve am Sägemesser zog das Muster der ersten drei Zähne nach, da diese Zähne im Gegensatz zu denen von Messer 1 und 10 besonders groß und einheitlich waren. Im restlichen Bereich wurde von Zahnspitze zu Zahnspitze verfahren.

Im Anschluss wurden zwei Kurven gezeichnet, die jeweils von der Messerspitze (LM 1) zu den LMs 2 und 3 verlaufen (Abb. 19A). Insgesamt wurden somit 24 Kurven kreiert. Jede Kurve wurde durch 15 Punkte charakterisiert. Bei dem Tomatenmesser (Messer Nr. 10) verlief die Kurve auf der einen Klingenseite erst über die zweite Messerspitze (zweite Schneide wurde damit einem Messerrücken gleichgesetzt) bis die Kurve die Schneide tatsächlich erreichte. Die Kurve von LM 1 zu LM 3 zog beim Sägemesser (Messer Nr. 8) die Konturen der ersten drei Zähne entlang und erstreckt sich dann von Zahn- zu Zahnspitze weiter (Abb. 19B).

Die erstellte tps-Datei inklusive Landmarks und Kurven wurde in Morpheus geöffnet. In dieser Software wurden zunächst die 11 gesetzten Punkte aller 12 Messer – dies ergibt insgesamt 132 Rohkoordinaten – mittels einer GPA überlagert bzw. *superimposed*.

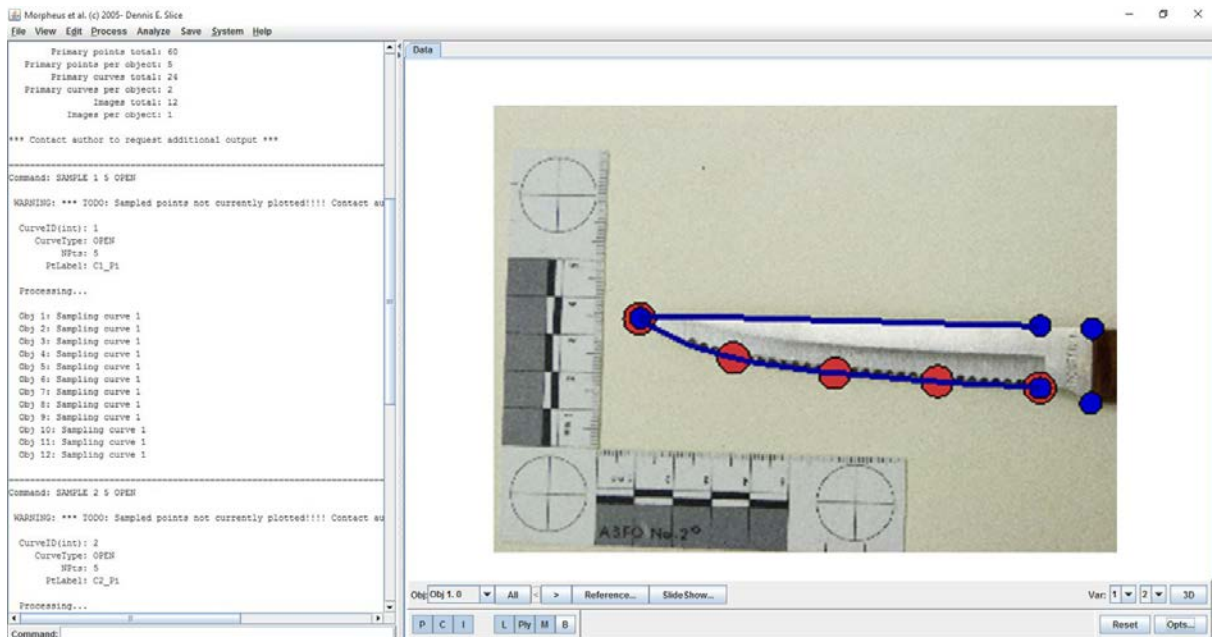


Abb. 20: Sekundäre Punkte digitalisieren

Fünf Punkte (rosa; zur besseren Visualisierung vergrößert) wurden entlang einer Kurve (blau) bestimmt. Dabei befanden sich der erste und letzte Punkt immer am Beginn und am Ende der Kurve. Diese Einstellung wurde automatisch für jedes Messer übernommen. Hier exemplarisch an Messer 1.

Danach wurden auf jeder der insgesamt 24 Kurven fünf SLMs digitalisiert. Diese LMs dienten dazu die Form der Messer vergleichen zu können. Dabei besaßen der erste und letzte SLM jeweils die gleichen Koordinaten wie die LMs 1 und 2 bzw. 3. Aus diesem Grund wurden diese SLMs verworfen und nur mit den drei mittleren SLMs im Anschluss weiter verfahren (Abb. 20).

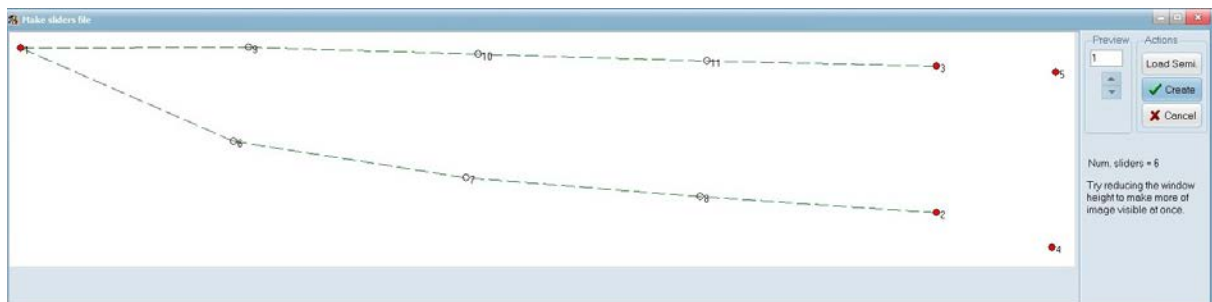


Abb. 21: Semilandmarks digitalisieren

Mittels tpsUtil konnten zuvor definierte Punkte zu SLMs (Sliders) bestimmt werden. Die Slider wurden durch einen leeren Kreis gekennzeichnet, während die rotgefüllten Kreise die LMs repräsentierten.

Da SLMs als *Secondary Points* in Morpheus nicht in der Superimposition berücksichtigt werden, mussten sie mit der Option „marge - sample from curve“ zu *Primary Points* deklariert werden. In tpsUtil wurden diese drei Punkte mittels der Anweisung „Make sliders file“ wieder zu SLMs bzw. *Sliders* (= Gleiter) deklariert (Abb. 21).

Diese Slider-Datei wurde daraufhin zusammen mit der zuvor erstellten tps-Datei, die alle Koordinaten der LMs und Kurven enthielt, in tpsRelw (Rohlf 2005c) eingespielt. TpsRelw erstellt

u. a. *Relative Warps* und Deformationsgitter zur Visualisierung der Ergebnisse. Mithilfe von tpsRegr (Rohlf 2005d) wurde die jeweilige Messergestalt mit verschiedenen Variablen wie z. B. dem Bodenwinkel der Knocheneinstiche verglichen und Graphen erstellt.

Kerbmarken

Um die Kerbmarken zu vergleichen, wurde mittels tps und Morpheus ähnlich wie bei der Messermorphologie verfahren. Für die tps-Datei wurden jeweils zwei unterschiedliche Querschnittsbilder pro Einstichmarke verwendet. Diese Querschnittsbilder bildeten die Einstiche im Profil ab und wurden als *Snapshots* in Amira gespeichert. Jede Kerbmarke wurde durch 4 LMs, 4 SLMs (Tabelle 10) und einer Kurve definiert, die entlang der Kontur des Knocheneinstichs verlief (Abb. 22).

Tabelle 10: Definitionen der verwendeten LMs und SLMs an Knocheneinstichen

Die Punkte 1-4 kennzeichneten eindeutig zuordenbare Landmarks (LM), während die Punkte 5-8 als Semilandmarks (SLM) auf einer Kurve lagen und verschoben werden konnten.

LMs und SLMs	Definition
1	An der unteren Einstichwand an der Knochenoberfläche
4	An der unteren Einstichwand an der tiefsten Einstichfläche
5	An der oberen Einstichwand an der tiefsten Einstichfläche
8	An der oberen Einstichwand an der Knochenoberfläche
2-3	An der unteren Einstichwand zwischen LM 1 und 2
6-7	An der oberen Einstichwand zwischen LM 3 und 4

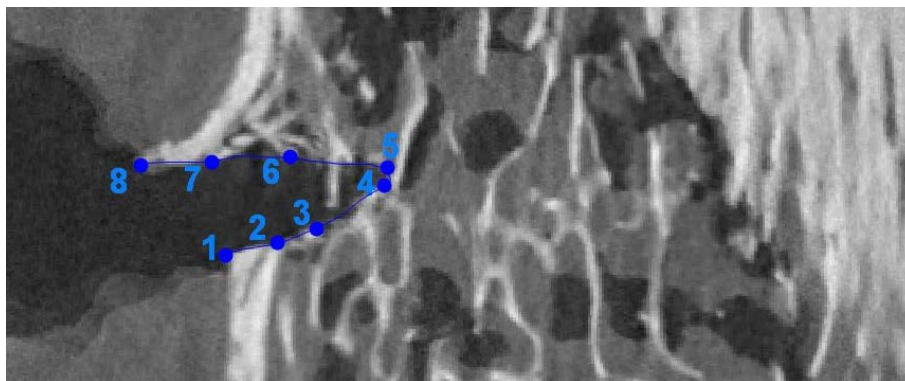


Abb. 22: Punkte und Kurve entlang der Knocheneinstiche kreieren

In tpsDig2 wurden 8 Punkte gesetzt und eine Kurve mit 20 Unterpunkten entlang des Einstichs kreiert. Hier exemplarisch an Einstich 1a.2 zu sehen.

Mittels der Rohdaten der μ CT-Scans wurden die einzelnen Rippen entsprechend rekonstruiert und in Amira zusammen mit den Kerbmarken segmentiert. Das Ziel einer Segmentierung ist die Identifizierung und Isolierung von charakteristischen Strukturen innerhalb eines Datenvolumens. Diese Strukturen ähneln sich in der Regel in ihren Grauwerten (Weber & Bookstein 2011, Neubauer 2005).

Um die Schwellenwerte zwischen Knochen und Weichgewebe sowie zwischen Weichgewebe und Luft bestimmen zu können, wurde *eine Line Probe* durchgeführt (Abb. 23). Dieses Dichteprofil zeigte eine deutliche Abnahme der Grauwerte beim Übergang vom Weichgewebe in Luft sowie an der Grenze zwischen Luft und Knochen. Bei der Segmentierung wurde daraufhin ein Grauwertbereich zwischen 37.042 und 65.535 für das Knochengewebe der Rippen gewählt. Ein Einstich wurde bei einem Grauwert zwischen 0 und maximal 24.314 ausgemacht (Max-Wert-Durchschnitt = $21.599,3 \pm 2.024,1$).

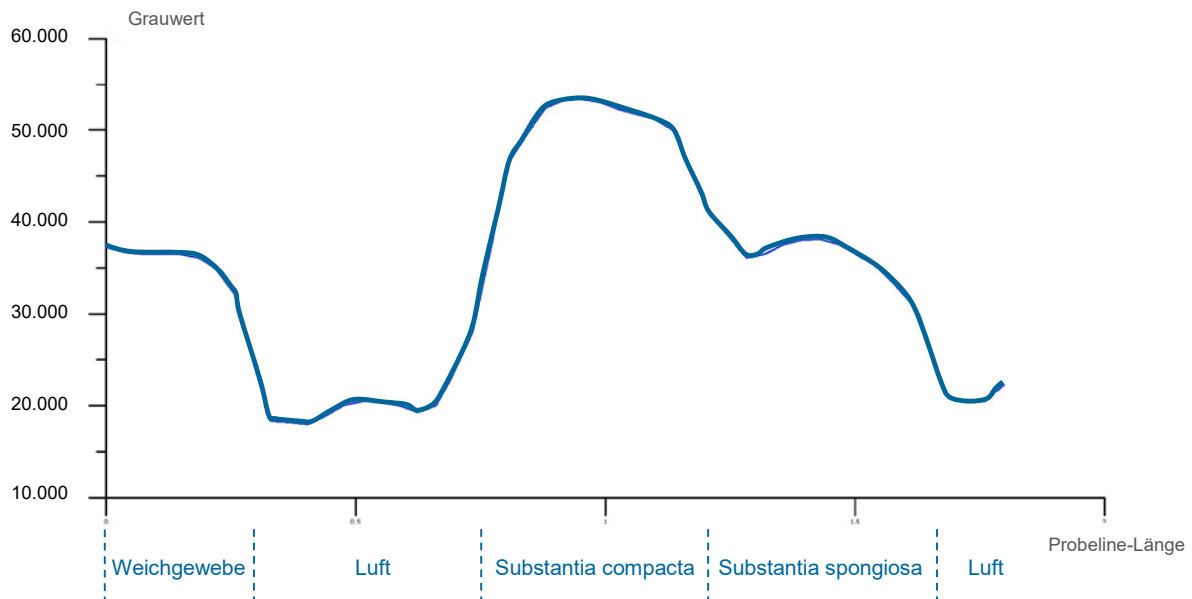


Abb. 23: Line Probe

Verlauf einer knapp 2 mm langen *Probeline* durch Weichgewebe, Luft und Knochen. Dabei erreichte der Graph einen minimalen Grauwert von 18.001,2 und ein Maximum von 53.427,9.

Mit diesen Werten konnte die Aufteilung von Knochen und Einstich (bzw. Luft) automatisch durch einen Bildsegmentierungsalgorithmus ausgeführt werden. Eine automatische Segmentierung erfolgte mittels Segmentation Editor, wohingegen eine manuelle Bildbearbeitung bei den luftgefüllten Zwischenräumen in der Spongiosa nötig war. In diesen Fällen überschritten sich die Grauwerte der zu trennenden Bereiche und bildeten ein Leck in der festgelegten Schwellenwert-Region, was zu einer Überschreitung des gewünschten Umrisses der Stichwunde geführt hätte. Deswegen wurden die Lecke, wie in Abb. 24, mit einer manuell gezeichneten Begrenzung geschlossen.

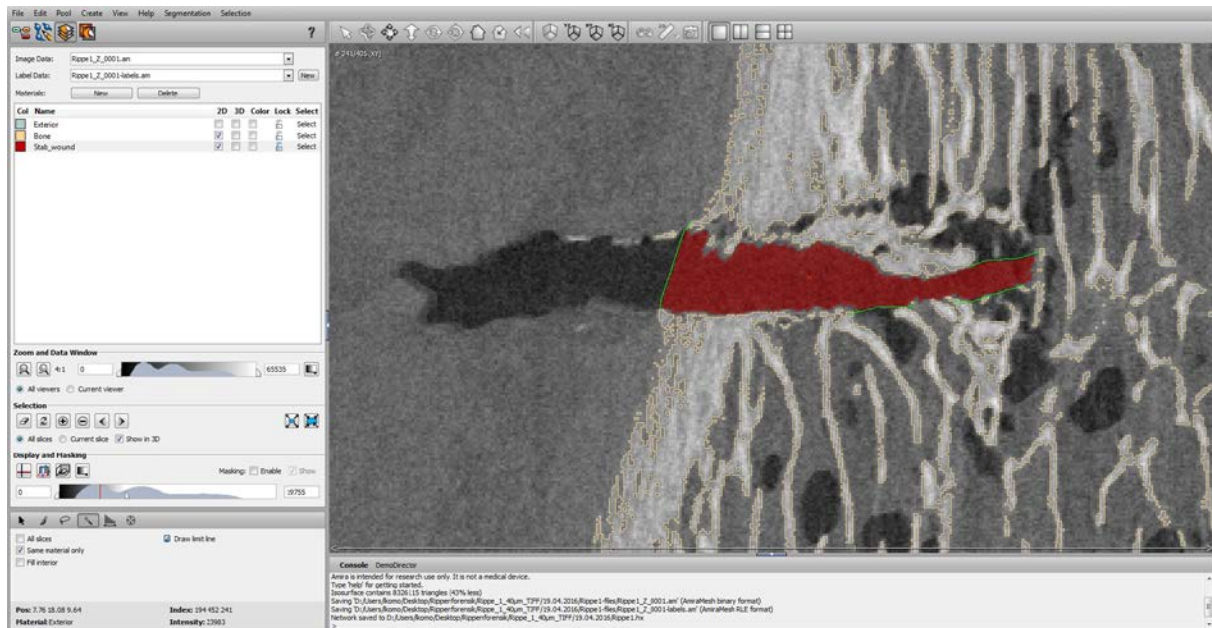


Abb. 24: Grenzlinien zeichnen

Die segmentierte Rippe (hellgrau und gelb umrahmt) zeigte einen deutlichen Einstich (rot). Um diesen auf den durch das Messer entstandenen Hohlraum im Knochen zu begrenzen, wurden Grenzlinien (grün) eingezeichnet. Während der Segmentierung musste „same material only“ aktiviert sein.

Beim Segmentieren wurde bewusst auf ein Glätten der Oberflächen (smoothing) verzichtet, um das Volumen des Einstichs so genau wie möglich bestimmen zu können. Nach der automatischen bzw. manuellen Segmentierung des Stichkanals wurde dessen Volumen berechnet ($\text{Volumenwert} = \text{Voxelanzahl} \cdot \text{Voxelgröße}$). Außerdem erfolgte die Bearbeitung der Oberflächenmodelle durch Farbkodierung.

Von jeder Messerspur im Knochen wurden die Breite, Länge und Höhe sowie unterschiedliche Radien der Kerbe digital in Amira vermessen. Zu den Radien zählten der Boden-, Öffnungs-, und jeweils zwei Neigungswinkel der Kerbmarken (Tabelle 11). Die Breite, Länge und Höhe jeder Kerbmarken wurden sowohl am segmentierten Knochen (*Isosurface*) als auch an einem Querschnittsbild (*Orthoslice*), das orthogonal zur Einstichrichtung und parallel zur Rippenlängsachse verlief, vermessen. Alle Messungen wurden im *Orthoview*-Modus durchgeführt.

Tabelle 11: Knocheneinstich-Messparameter

Als Messparameter dienen neben der Einstichbreite sowohl die Länge und Höhe der Einstiche als auch deren Maximalwerte. Drei Einstichwinkel wurden ebenfalls einheitlich für jede Rippe dokumentiert. Die Skizzen zeigen einen kleinen Knochenabschnitt mit einem parabelförmigen Einstich. Dabei bildet die Kontur der Parabel die Einstichwände des von links zugefügten Messerstiches. An der Knochenoberfläche der unteren Einstichwand hat sich der Knochen leicht aufgewölbt. Die Skizze der Knocheneinstichbreite zeigt die Einstichöffnung aus dem Winkel von dem das Messer eingestochen wurde.

Messung	Abkürzung	Definition	Skizze
Knocheneinstichhöhe	KEH	Distanz zwischen den Einstichwänden an der tiefsten Einstichfläche (entlang der Rippenlängsachse)	
Maximale Knocheneinstichhöhe	MKEH	Distanz zwischen den Einstichwänden an der Knochenoberfläche (entlang der Rippenlängsachse)	
Knocheneinstichlänge	KEL	Senkrechte Tiefe vom tiefsten Einstichpunkt bis zur natürlichen Knochenoberfläche (entlang der Rippenquerachse)	
Maximale Schulterlänge	MSL	Senkrechte Tiefe vom tiefsten Einstichpunkt bis zum höchsten Rand der Einstichwand (entlang der Rippenquerachse)	
Knocheneinstichbreite	KEB	Distanz zwischen den beiden seitlichen Einstichwänden, senkrecht zu MKEH (entlang der Rippenquerachse)	
Öffnungswinkel	ÖW	Winkel zwischen den beiden Einstichwänden	
Neigungswinkel	NW	Winkel zwischen der natürlichen Knochenoberfläche und den Einstichwänden. NW _{unten} und NW _{oben} repräsentieren den Winkel unterhalb und oberhalb des Einstiches	
Bodenwinkel	BW	Winkel zwischen der unteren Einstichwand und dem Einstichboden	

2.2.7 STATISTISCHE AUSWERTUNG

Für die Bestimmung der messerspezifischen Mittelwerte und Standardabweichungen aus je vier Distanz- und Winkelmessungen der Knocheneinstiche wurde Microsoft Excel verwendet. Mit dem Software-Programm RStudio (R version 3.2.0) wurde die explorative Datenanalyse und mathematische Statistik durchgeführt sowie Graphiken wie z. B. Histogramme und Boxplots erstellt. Die Boxplots zeigen jeweils den Median, Interquartilsabstand und die „Whiskers“, welche die jeweiligen Extremwerte indizieren. Wären die Whiskers allerdings länger als der 1,5-fache Interquartilsabstand, werden sie nur bis zum letzten Datenpunkt eingezeichnet, der weniger als das 1,5-fache des Interquartilsabstands vom 25 % bzw. 75 %-Perzentil entfernt ist. Alle außerhalb liegenden Datenpunkte sind somit Ausreißer und werden einzeln als Kreise eingezeichnet. Die PCA und F-Tests erfolgten mittels den tps-Programmen.

Die statistischen Tests in RStudio beinhalteten im Einzelnen folgende Analysen:

Zunächst wurden die gemessenen Distanzen und Winkeln mittels des **Shapiro-Wilk-Tests** auf Normalverteilung überprüft, da bei Analyseverfahren wie der linearen Regression die Residuen aus einer normalverteilten Grundgesamtheit stammen sollten.

Ob sich die Distanzen und Winkeln zwischen den einzelnen Messern signifikant unterscheiden, wurde mit einer Varianzanalyse (**ANOVA**) und einem Post-hoc-Test (**Tukey's HSD Test**) untersucht. Der Tukey's HSD Test – der sich ideal für paarweise Vergleiche eignet – gab an, welche Mittelwerte der gemessenen Distanzen und Winkeln eines bestimmten Messers sich von einem anderen Messer auf dem 5% Signifikanzniveau unterschieden. ANOVA und der Tukey's HSD Test wurden ausgewählt, da sie relativ robust gegen Missachtungen der Normalverteilungsannahme sind. Mittels ANOVA wurden außerdem die Volumenwerte der segmentierten Rippen und Einstiche auf signifikante Unterschiede geprüft.

Des Weiteren wurden die Distanz- und Winkelwerte auf mögliche lineare Regressionen und Korrelationen getestet. Bei der **linearen Regressionsanalyse** gibt der t-Wert den Quotienten aus der Steigung der Regressionsgeraden und dem Standardfehler an. Der p-Wert gibt Auskunft über die Wahrscheinlichkeit, dass ein t-Wert größer als der berechnete t-Wert beobachtet wird. Somit weist ein sehr niedriger p-Wert auf eine von null abweichende Steigung hin. Das in der vorliegenden Studie angegebene Bestimmtheitsmaß bzw. das Quadrat des multiplen Korrelationskoeffizienten (R^2) wurde an die Freiheitsgrade der jeweiligen Daten angepasst.

Mögliche Korrelationen zwischen den gepaarten Messungen vor und nach der Mazeration wurden mit dem **Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test** untersucht, da mit diesem Test dieselben Stichproben vor und nach einer Behandlung verglichen werden können. Dieser zweiseitige Test fand ebenfalls Anwendung beim Vergleich der mazerierten Rippen zwischen den Einstichdistanzen, die mittels μ CT und Makrofotografie festgehalten wurden sowie beim Vergleich der Daten von μ CT und REM. Denn auch hier erfolgten jeweils zwei verschiedene Messungen

an derselben Stichverletzung. Die Gegenüberstellung der Einstichhöhen und Klingendicken bzw. der Einstichwinkel und Klingenwinkel erfolgte mittels **Mann-Whitney U-Test**, weil die Stichproben in diesem Fall unabhängig und nicht gepaart sind.

Die statistischen Tests in tps beinhalteten im Einzelnen folgende Analysen:

Der **Goodall's F-Test** wurde mit den Gestaltvariablen der Klingen und Kerbmarken in tpsRegr durchgeführt, um eine mögliche Korrelation zwischen den einzelnen Messparametern und den Messern festzustellen.

Um Formvariationen innerhalb und zwischen den verschiedenen Messertypen zu beschreiben, wurde eine **Hauptkomponentenanalyse** (PCA) durchgeführt. Die Hauptkomponenten stellen dabei unkorrelierte Variablen in einer orthogonalen Transformation dar, d. h. die ursprünglichen Variablen werden in eine neue, kleinere Anzahl „dahinter liegender“ Variablen transformiert, die unkorreliert sind und als Hauptkomponenten bezeichnet werden. Außerdem bleibt die totale Varianz innerhalb der Daten immer die gleiche. Die wichtigsten Variablen des Datensatzes erklären hierbei die meiste Varianz, um den Blick auf das Wesentliche zu fokussieren und die effektive Dimension der Daten zu verringern. Dementsprechend beschreibt die erste Hauptkomponente die Richtung der größten Varianz. Die zweite Hauptkomponente beschreibt die Richtung der zweitgrößten Varianz orthogonal zur ersten Hauptkomponente. Alle nachfolgenden Komponenten kommen den gleichen Kriterien nach (Mitteröcker & Gunz 2014, Böker 2005).

Die Variation der Größen zwischen den einzelnen Messern wurde mithilfe der **Varianz** der *Centroid Size* angegeben. Die Variation der Gestalt wurde dagegen mit dem Mittelwert der Varianzen der z-standardisierten *Partial-Warps*-Werte und *uniform component scores* analysiert. Während die gestaltbeschreibenden Variablen (Shape Variables) in morphometrischen Analysen als abhängige Variablen klassifiziert werden, stellen Größenveränderungen unabhängige Variablen dar (Weber 2014).

3 ERGEBNISSE

Eine fundierte Interpretation der Verletzungsmorphologie im Knochengewebe soll bei der Identifizierung der „Tatwaffen“ und der Rekonstruktion der Geschehnisse beitragen. Dafür wurden in gegenständlicher Studie zwölf unterschiedliche Versuchsmesser eingesetzt: ein Steakmesser (1), ein Pizzamesser (2), ein klassisches Knorpelmesser (3), ein gerades Knorpelmesser (4), ein Seziermesser (5), ein Zubereitungsmesser (6), ein Blockmesser (7), ein Sägemesser (8), ein Jagdmesser (9), ein Tomatenmesser (10), eine Schere (11) und ein Klappmesser (12).

Morphologie

Schon beim Kauf der Schweinerippen lagen Rippen gebrochen vor. Nach Mazeration der Rippen innerhalb dieser Studie waren 61,11 % der Rippen zweigeteilt. Lediglich die Rippen 1a, 1b, 2a, 2b, 5 und 9 bestanden aus einem Stück. Rippe 2b zeigte eine ca. 90%ige Rippen-durchsetzung.

Alle 29 Stiche, die den Rippenfragmente enthaltenen Stücken Schweinefleisch zugefügt wurden, haben eine Rippe penetriert. Drei Einstiche waren nur minimal in den Knochen eingedrungen (Einstich 7.2, 11.1 und 11.2). Die beiden Stiche von Messer 7 trafen so auf, dass zwei Rippen gleichzeitig penetriert wurden. Während Stich 7.2 lediglich mit dem Messerrücken die sechste Rippe leicht penetrierte, verlief der Einstich 7.1 quer über den Einstich 6.1, welcher mit dem Messer 6 zugefügt wurde.

Bei Stichverletzungen, die vorwiegend die *Substantia compacta* durchstachen, zeigten sich die erwarteten **V-förmigen** Stichmarken (Abb. 25A). Die restlichen Einstiche waren hauptsächlich parabelförmig oder wiesen langgestreckte Stichvertiefungen mit **U-Form** auf (Abb. 25B).

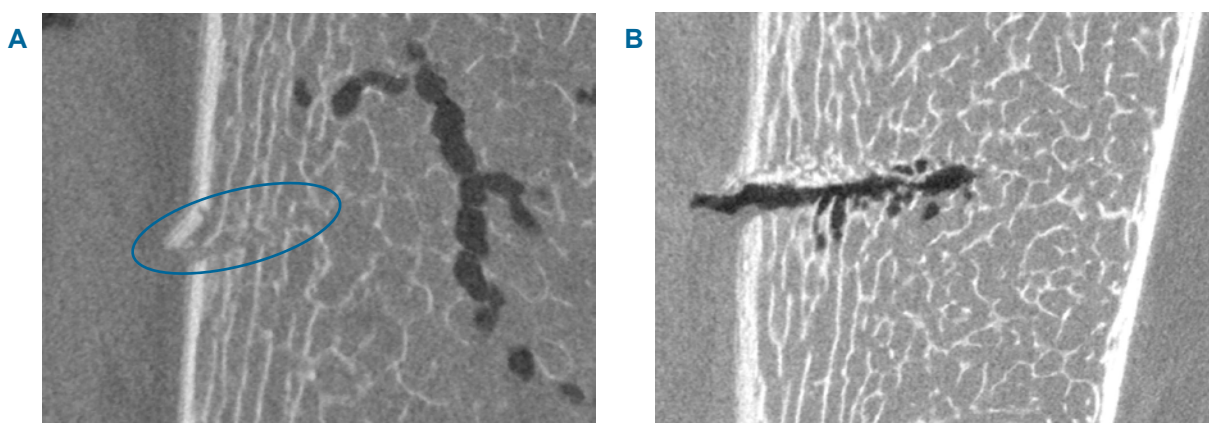


Abb. 25: Einstichmorphologie

- A** V-förmiger Einstich (innerhalb der Markierung), der hauptsächlich die *Substantia compacta* penetrierte. Orthoslice von μ CT-Scan der Rippe 5.
- B** Langgestreckter, U-förmiger Stich verläuft durch die *Substantia compacta* und einen Großteil der *S. spongiosa*. Orthoslice von μ CT-Scan der Rippe 2a.

3.1 MIKRO-COMPUTERTOMOGRAPHIE

Anhand von dreidimensionalen Rekonstruktionen (Abb. 26, 27) wurden die Gestaltsunterschiede zwischen den Knocheneinstichen verglichen.



Abb. 26: Rippenrekonstruktionen 1-9

Rekonstruktionen der mazerierten Rippen von μ CT-Scans. Mit den Messern 1, 2 und 8 wurde auf jeweils zwei Rippen Stichverletzungen gesetzt. Die Rippen 8a und 8b lagen in zwei Bruchstücken vor.

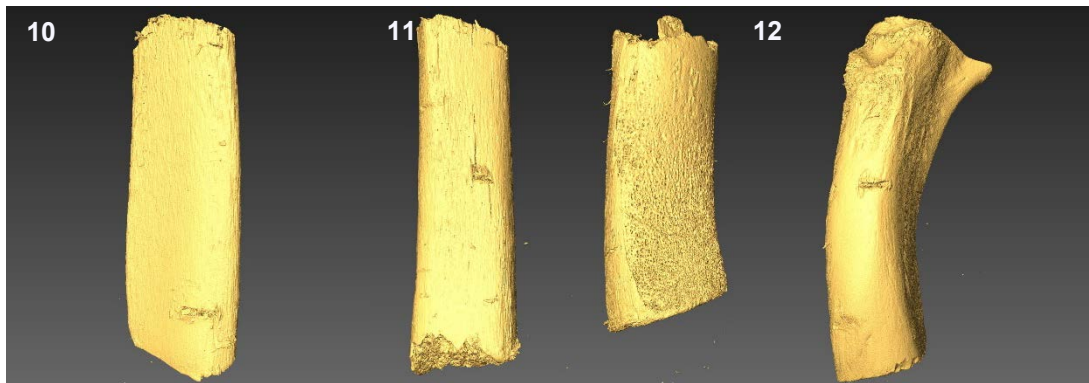


Abb. 27: Rippenrekonstruktionen 10-12

Rekonstruktionen der mazerierten Rippen von μ CT-Scans. Mit den Messern 1, 2 und 8 wurde auf jeweils zwei Rippen Stichverletzungen gesetzt. Die Rippen 10 und 11 lagen in zwei Bruchstücken vor. Nur das mit Kerbmarken versehene Fragment der Rippe 10 wurde eingescannt.

3.1.1 CHARAKTERISTIKA DER KERBMARKEN

Die voluminösesten Einstiche im Knochen zeigten sich mit den Messern 1, 2 und 9. Dies war jedoch hauptsächlich der größeren Auftrefffläche am Knochen geschuldet (Abb. 28). Im Weichgewebe hinterließen die Messer 2, 7 und 11 die großflächigsten Verletzungen. Die deutlich unterschiedlichen **Volumenwerte** der Knocheneinstiche – von $0,08 \text{ mm}^3$ (Einstich 6.1) bis $140,22 \text{ mm}^3$ (Einstich 1.2) – waren nicht signifikant different (ANOVA: $n = 18$; $df = 1$; $F = 3,986$; $p = 0,0632$).

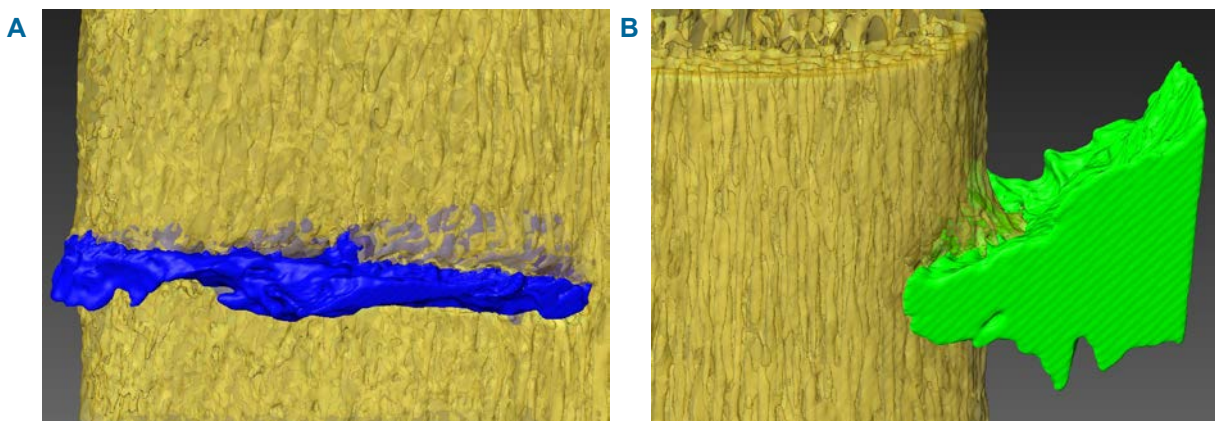


Abb. 28: Segmentierte Einstiche

Exemplarische Auswahl zweier segmentierter Einstiche in Rippe 1a.

- A** Der blau segmentierte Bereich entspricht dem ersten Einstich der Rippe 1a innerhalb des defekten Knochens (gelb transparent).
- B** Der grün segmentierte Bereich entspricht dem Stichkanal des zweiten Einstichs an der Rippe 1a (gelb transparent). Der Stichkanal ist jedoch nicht für die ganze Messerklinge repräsentativ, da die Probe zerteilt und dicht neben der Rippe abgeschnitten wurde.

Tabelle 12: Einstichcharakteristika vor der Mazeration

Mittelwerte aus jeweils vier Messungen der Distanzen (Länge, maximale Schulterlänge, Höhe, max. Höhe und Breite) und Winkel (Öffnungs-, Neigungs- und Bodenwinkel) der Knocheneinstiche durch die ersten elf Versuchsmesser, die bei den nicht-mazierten Rippen gemessen wurden.

Messer	KEL [µm]	MSL [µm]	KEH [µm]	MKEH [µm]	KEB [µm]	ÖW	NW _{unten}	NW _{oben}	BW
1	10.544,71	11.457,95	837,50	1.225,00	5.123,03	13,11°	99,98°	65,16°	91,89°
2	9.959,31	12.484,73	563,21	1.535,82	3.365,96	5,09°	89,63°	73,55°	93,11°
3	1.562,17	1.914,32	321,50	587,72	5.278,63	9,65°	71,02°	95,37°	87,89°
4	6.272,85	6.939,60	244,17	848,95	9.198,98	8,64°	81,33°	93,44°	97,39°
5	2.912,87	3.197,04	220,58	440,79	5.009,74	15,51°	109,64°	62,96°	95,71°
6	4.587,70	4.732,38	160,77	240,84	1.450,10	12,61°	96,72°	88,02°	83,83°
7	2.714,42	2.961,51	251,14	844,07	5.464,83	8,43°	136,37°	55,77°	116,63°
8	5.939,75	6.449,22	201,16	403,53	5.059,55	7,71°	85,59°	83,76°	99,73°
9	8.856,54	9.314,83	205,60	730,58	7.362,48	5,85°	103,03°	78,25°	97,38°
10	3.348,04	3.601,99	411,52	1.175,55	5.310,75	10,64°	71,76°	80,92°	83,94°
11	2.397,57	2.673,00	197,96	2.113,59	2.358,69	28,68°	53,48°	137,25°	84,38°

Während sich die Durchschnittswerte der ermittelten Einstichhöhen zwischen den mazierten und nicht-mazierten Rippen signifikant unterschieden, zeigten die mittleren Winkel der Kerbmarken im Knochen durchgängig ähnliche Werte (Tabelle 12, 13; Kapitel 3.1.2). Weitere Daten zur deskriptiven Statistik aller Kerbmarken finden sich im Anhang wieder (Tabellen 62-84).

Tabelle 13: Einstichcharakteristika nach der Mazeration

Mittlere Einstich-Distanzen (Länge, maximale Schulterlänge, Höhe, max. Höhe und Breite) und Winkel (Öffnungs-, Neigungs- und Bodenwinkel) der mazerierten Rippen verursacht durch alle zwölf Versuchsmesser. Bis auf Messer 4 ($n = 1$) gingen die Mittelwerte aller Einstiche aus vier Messungen hervor.

Messer	KEL [µm]	MSL [µm]	KEH [µm]	MKEH [µm]	KEB [µm]	ÖW	NW _{unten}	NW _{oben}	BW
1	1.747,38	2.287,08	598,31	1.014,26	1.210,29	8,68°	102,02°	67,75°	90,28°
2	13.195,04	14.049,28	583,10	1.585,72	7.885,82	7,74°	90,24°	92,79°	90,89°
3	1.517,72	1.890,36	138,02	255,88	5.170,19	7,28°	78,27°	94,49°	80,52°
4	297,75	287,02	139,90	153,30	2.450,00	11,24°	125,73°	58,42°	138,38°
5	1.980,83	2.596,73	116,92	229,84	6.130,71	13,54°	114,68°	56,26°	81,74°
6	2.414,83	2.595,85	118,46	198,50	3.485,84	10,89°	82,82°	100,95°	88,16°
7	2.125,88	2.705,39	196,97	477,96	5.262,55	12,61°	118,73°	47,04°	93,76°
8	4.835,65	5.074,16	147,76	278,39	4.969,61	7,17°	81,98°	80,56°	85,73°
9	1.945,58	2.240,56	163,24	610,70	4.537,68	10,33°	92,48°	78,62°	91,95°
10	2.453,11	3.362,53	700,53	943,82	5.229,91	12,56°	76,73°	106,85°	90,34°
11	260,43	305,67	169,30	1.171,52	2.532,99	34,61°	64,06°	133,40°	137,79°
12	3.425,37	3.739,08	121,74	688,40	4.037,09	9,80°	76,43°	88,76°	91,18°

Bis auf die Knocheneinstichbreite waren alle Distanzen laut dem Shapiro-Wilk-Test nicht normalverteilt ($p < 0,005$). Dagegen zeigte mit dem Bodenwinkel und dem unteren Neigungswinkel die Hälfte der Winkelmaße eine Normalverteilung auf (Abb. 29A-I). Die in Tabelle 12 aufgelisteten Einzelwerte sind in den Histogrammen der Größenmaße an den

jeweiligen Achsenenden zu erkennen. Diese sieben Ausreißer stammten zu 71 % von Einstichen in Rippe 1a, die durch das Steakmesser verursacht wurden (Tabelle 14).

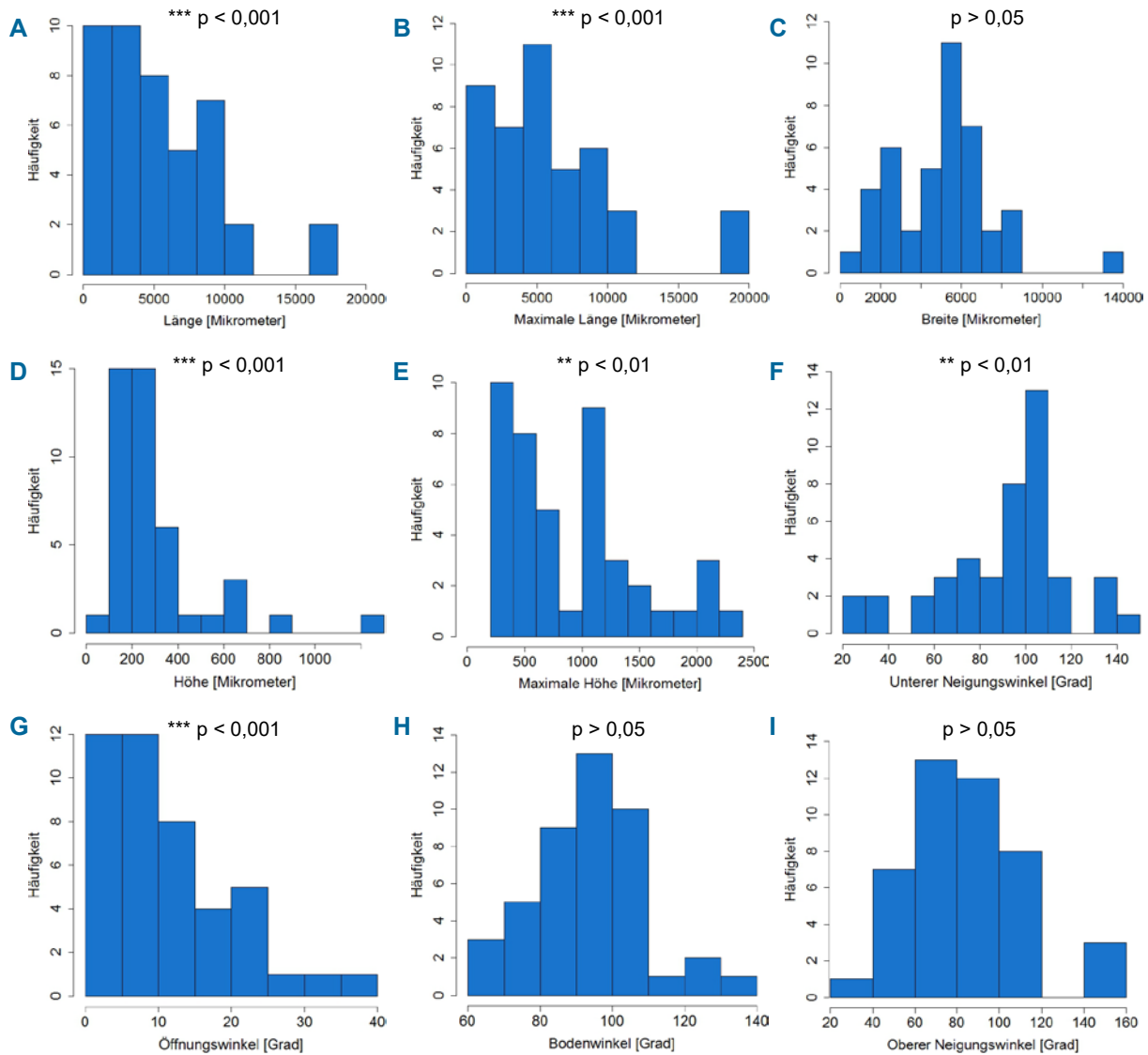


Abb. 29: Histogramme der Distanzen und Winkel

Die Häufigkeit der gemessenen Distanz- und Winkelparmer mit den ersten elf Messern bei den nicht-mazierten Rippen ($n = 44$). Die Normalverteilung wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test überprüft. Ein Signifikanzwert von $p > 0,05$ indiziert einen normalverteilten Datensatz.

Tabelle 14: Ausreißer

Einzelwerte bei den gemessenen Distanzen Länge (KEL), Höhe (KEH), maximale Schulterlänge (MSL) und Breite (KEB) vor der Mazeration.

Variable	Anzahl	Werte [μm]	Messer
KEL	2	17.800,00; 17.924,70	Steak
KEH	1	1.290,00	Steak
MSL	3	18.640,00; 18.108,12 19.182,21	Steak Pizza
KEB	1	13.113,49	Knorpel II

Distanzen

Die Messwerte der Kerbmarken an den Rekonstruktionen der nicht-mazerierten und mazerierten Schweinerippen in Amira wurden hinsichtlich der drei Hauptdistanzen – **Länge, Höhe und Breite** – ausgewertet (Abb. 30, 31).

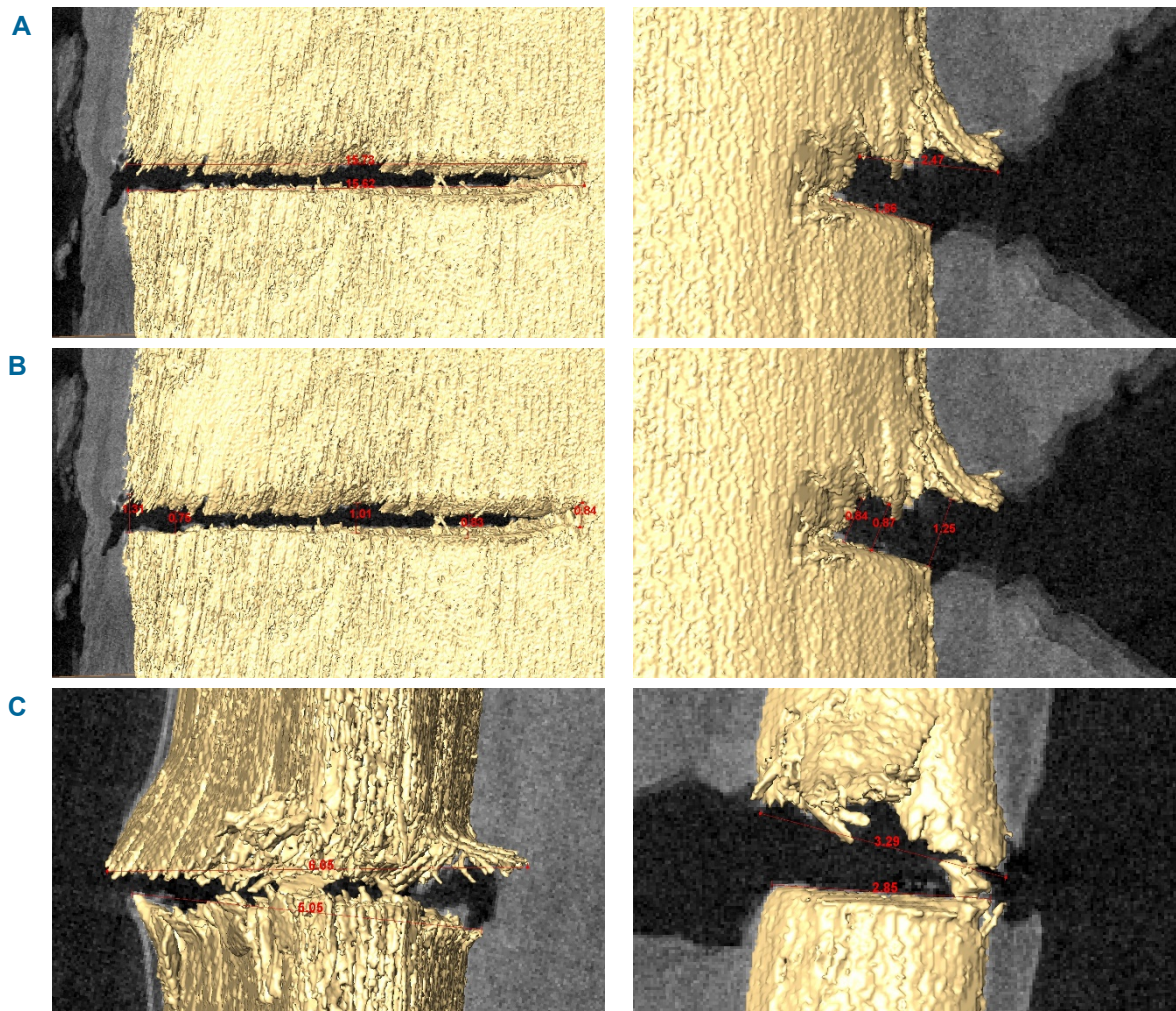


Abb. 30: Distanzmessung vor Mazeration

An den μ CT-Rekonstruktionen konnte die Länge (A), Höhe (B) und Breite (C) der Kerbmarken vermessen werden. Hier exemplarisch die Vermessung der nicht-mazerierten Rippe 1a mit den Einstichen 1.1 (links) und 1.2 (rechts).

Die Längen der Kerbmarken vor der Mazeration beliefen sich im Ganzen von 0,175 bis 17,925 mm ($\bar{x}_{\text{KEL}} = 5,37$ mm; Abb. 32A) und die Einstichhöhen von 0,097 bis 1,290 mm ($\bar{x}_{\text{KEH}} = 0,31$ mm). Die maximalen Knocheneinstichhöhen variierten zwischen 0,209 und 2,212 mm ($\bar{x}_{\text{MKEH}} = 0,92$ mm; Abb. 32B) und die der maximalen Schulterlänge erstreckten sich von 0,176 bis 19,182 mm ($\bar{x}_{\text{MSL}} = 5,98$ mm). In der Breite nahmen die Einstiche einen Wert zwischen 0,046 und 13,113 mm ($\bar{x}_{\text{KEB}} = 4,99$ mm; Abb. 32C) an.

Nach der Mazerierung variierte die Länge zwischen 0,181 und 17,889 mm ($\bar{x}_{\text{KEL}} = 3,19$ mm; Abb. 32A) und die Höhe zwischen 0,091 und 1,023 mm ($\bar{x}_{\text{KEH}} = 0,27$ mm). Bei der maximalen Höhe wurden Messwerte von 0,112 bis 2,439 mm ($\bar{x}_{\text{MKEH}} = 0,65$ mm; Abb. 32B) beobachtet und bei der maximalen Schulterlänge von 0,182 bis 18,221 mm ($\bar{x}_{\text{MSL}} = 3,64$ mm). Die Breite der Kerbmarken nach der Mazerierung nahm Werte zwischen 0,263 und 10,956 mm ($\bar{x}_{\text{KEB}} = 4,54$ mm; Abb. 32C) an.

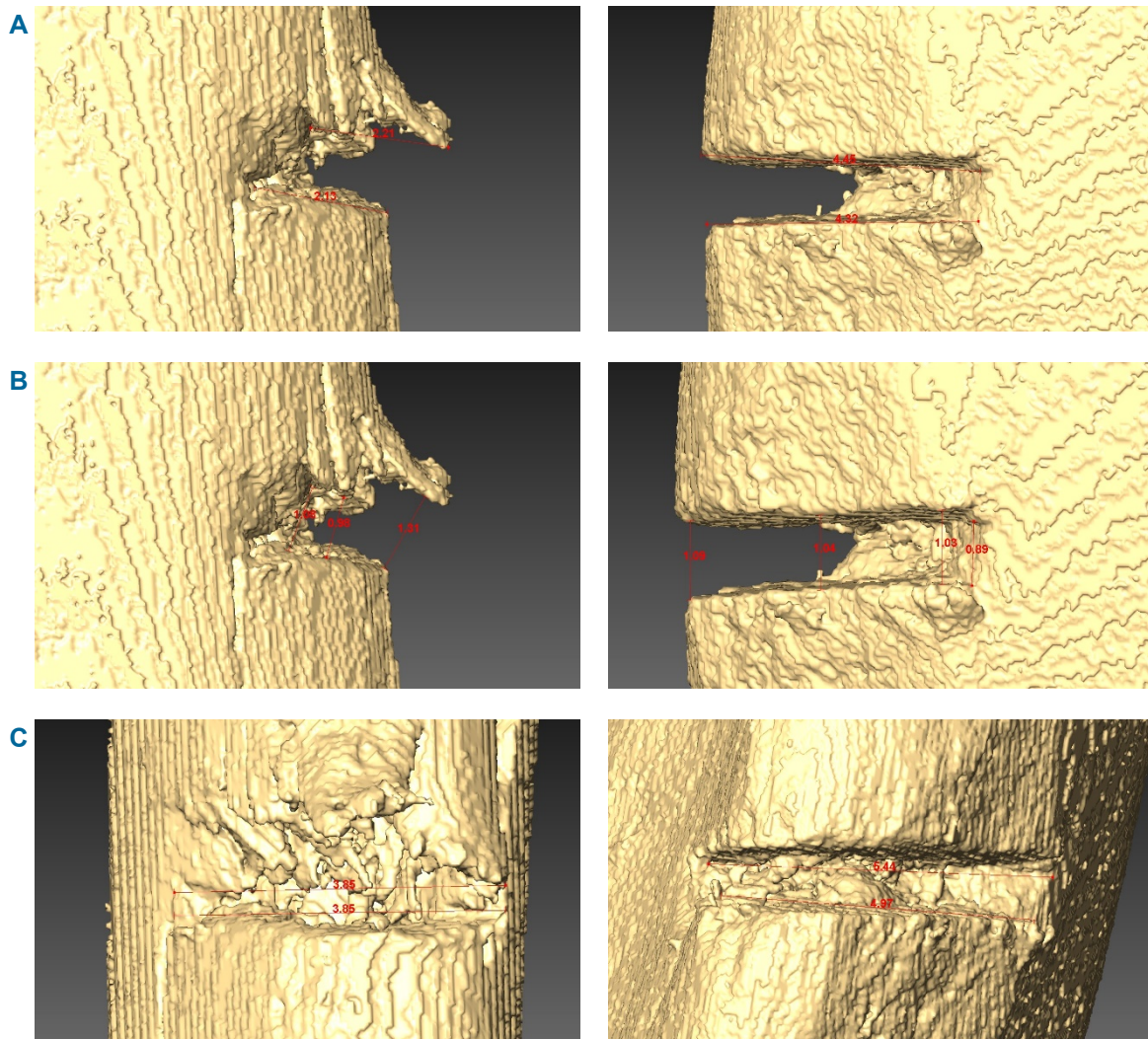


Abb. 31: Distanzmessung nach Mazeration

An den μ CT-Rekonstruktionen konnte die Länge (A), Höhe (B) und Breite (C) der Kerbmarken vermessen werden. Hier exemplarisch die Vermessung der mazerierten Rippe 1a und 1b mit den Einstichen 1.2 (links) und 1.3 (rechts).

Als Darstellungsform der Ergebnisse wurden Boxplots gewählt. Diese zeigen deutliche Unterschiede vor und nach der Mazeration zwischen den einzelnen Messern. So hinterließ das Messer 11 die durchschnittlich höchsten Einstiche ($\bar{x}_{\text{MKEH}} = 2.113,59$ μm) und Messer 6 die durchschnittlich niedrigsten Einstiche ($\bar{x}_{\text{MKEH}} = 240,84$ μm) vor der Mazerierung der Rippen.

Nach der Mazeration konnten die im Mittel höchsten Einstiche dem Messer 2 ($\bar{x}_{\text{MKEH}} = 1.585,72 \mu\text{m}$) und die niedrigsten Messer 4 ($\bar{x}_{\text{MKEH}} = 153,30 \mu\text{m}$) zugeordnet werden. Die größte minimale Einstichhöhe wiesen im mazerierten Zustand Einstiche vom zehnten Messer ($\bar{x}_{\text{KEH}} = 700,53 \mu\text{m}$) – und nicht mehr von Messer 1 ($\bar{x}_{\text{KEH}} = 837,50 \mu\text{m}$) – auf.

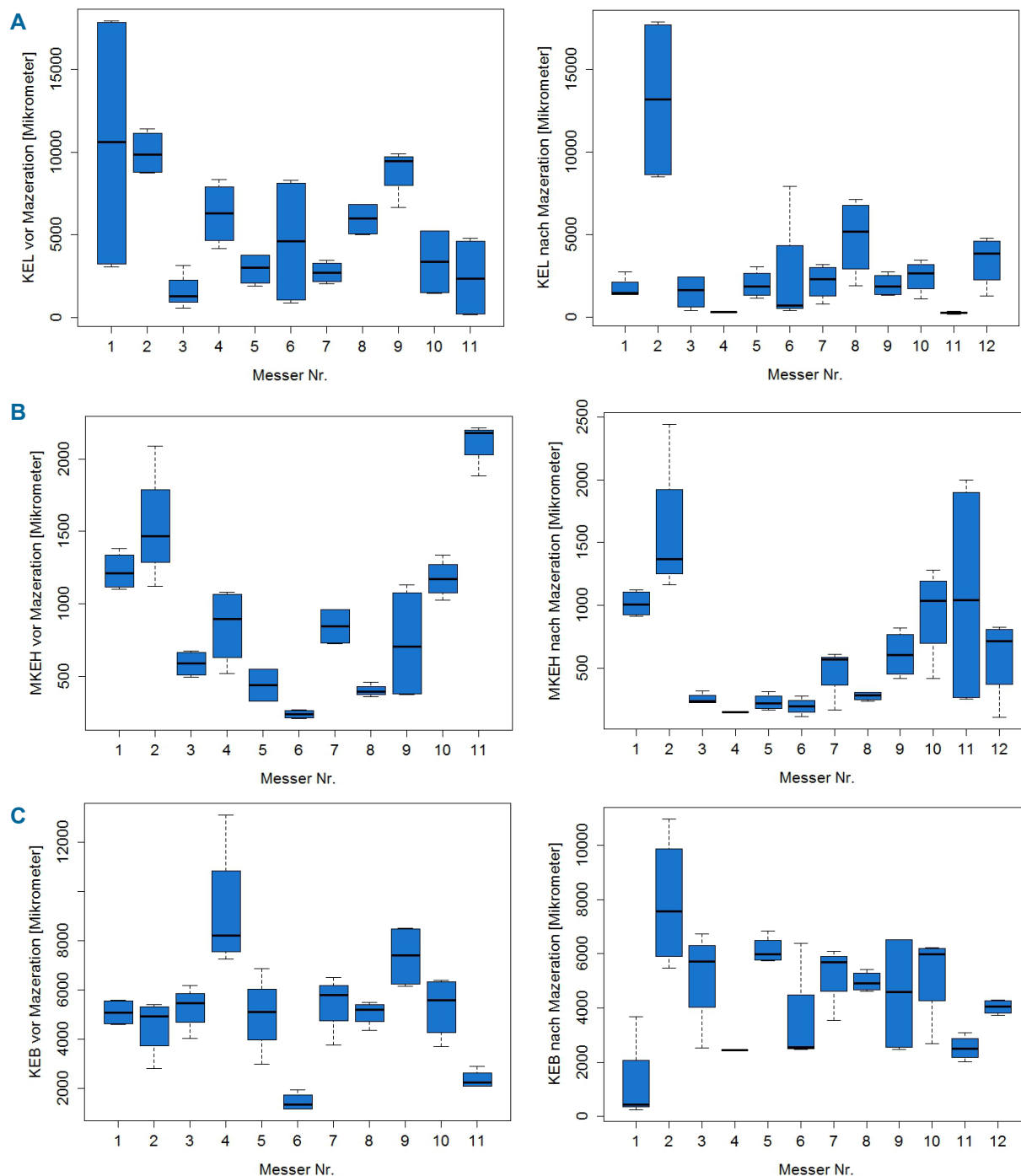


Abb. 32: Knocheneinstichdistanzen vor und nach der Mazeration

Die horizontalen Linien der Boxen stellen jeweils die 75 %-Perzentile, Mediane und 25 %-Perzentile dar. Die gesamte Spanne wird durch die „Whisker“ zum Minimum bzw. Maximum begrenzt.

A Boxplots der Knocheneinstichlänge vor und nach Mazeration der Rippen.

B Boxplots der maximalen Einstichhöhen vor und nach Mazeration der Rippen.

C Boxplot der Knocheneinstichbreite vor und nach Mazeration der Rippen.

Vergleichbare Werte der Höhe, Länge sowie Breite der Einstiche an den nicht-mazierten Rippen und somit eine fast quadratische Einstichmarke wurden lediglich bei Einstichen des Messers 11 beobachtet. Die Einstiche aller drei Sektionsmesser (Nr. 3, 4, 5), sowie der Messer 7 und 10 wiesen sowohl vor als auch nach der Mazeration eine größere durchschnittliche Einstichbreite im Vergleich zu den mittleren Längen der Knocheneinstiche auf. Die geringsten Durchschnittsdistanzen wurden vor der Mazeration bei Einstichen von Messer 6 und in mazeriertem Zustand von Messer 4 festgestellt.

Insgesamt wiesen die max. Schulterlänge und die Einstichlänge bzw. die Einstichhöhe und max. Höhe jeweils ähnliche Größen auf. Ein linearer Zusammenhang lag jedoch nur bei den beiden Längenmaßen und nicht bei den Höhen vor (s. Korrelationen ab S. 56).

Die fünf Kategorien der Knocheneinstichdistanzen – Höhe, max. Höhe, Länge, max. Länge und Breite – zeigten sowohl vor als auch nach Mazeration der Rippen signifikante Unterschiede auf dem 5 % Niveau zwischen den einzelnen Messern (Tabelle 15). So konnte z. B. bei der Knocheneinstichlänge der nicht-mazierten Rippen ein signifikanter Unterschied zwischen Messer 1 und 3 (Tukey's HSD-Test: $n = 44$; $p = 0,0127619$), Messer 2 und 3 ($p = 0,0248702$), Messer 1 und 11 ($p = 0,0327737$) sowie zwischen Messer 1 und 7 ($p = 0,0460852$) festgestellt werden. Bei den mazerierten Rippen unterschied sich die Knocheneinstichlänge von Messer 2 signifikant zu allen anderen Messern (Tukey's HSD-Test: $n = 48$; $p \leq 0,0001540$).

Tabelle 15: Varianzanalyse der Distanzen

Ergebnisse der ANOVA vor Mazeration ($n = 44$, $df = 10$) und nach Mazeration ($n = 48$, $df = 11$).

Messparameter	Analyse	F	p
KEL	vor Mazeration	4,056	0,00109
	nach Mazeration	10,41	3,31e-08
MSL	vor Mazeration	4,829	0,000274
	nach Mazeration	11,92	5,74e-09
KEH	vor Mazeration	20,82	1,73e-11
	nach Mazeration	5,85	2,41e-05
MKEH	vor Mazeration	27,06	4,38e-13
	nach Mazeration	6,158	1,42e-05
KEB	vor Mazeration	10,98	6,39e-09
	nach Mazeration	6,015	1,81e-05

Die Mittelwerte der **maximalen Knocheneinstichhöhen** unterschieden sich vor der Mazeration signifikant in 27 Messerpaarungen. Dabei zeigten Kerbmarken, die mit Messer 11 gesetzt wurden, zu allen anderen Kerben einen signifikanten Unterschied ($p \leq 0,0197243$). Die mittlere maximale Höhe nach Mazeration der Rippen war nur zwischen neun Messerpaarungen signifikant unterschiedlich ($p \leq 0,0357433$). Bei acht dieser Messerpaarungen war

Messer 2 involviert. Dabei konnten lediglich zwischen den Einstichen von Messer 2 und den Messern 1, 10 bzw. 11 keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die neunte Messerpaarung bestand zwischen Kerben von Messer 4 und 11 ($p = 0,0357433$). Die vollständige Auflistung aller signifikanter Messerpaarungen ist im Anhang (Tabellen 41-45, 50-54) zu finden.

Winkel

Die Winkelmaße (Abb. 33) zeigten zwischen den einzelnen Einstichen eine ähnliche Variabilität wie bei den Distanzwerten.

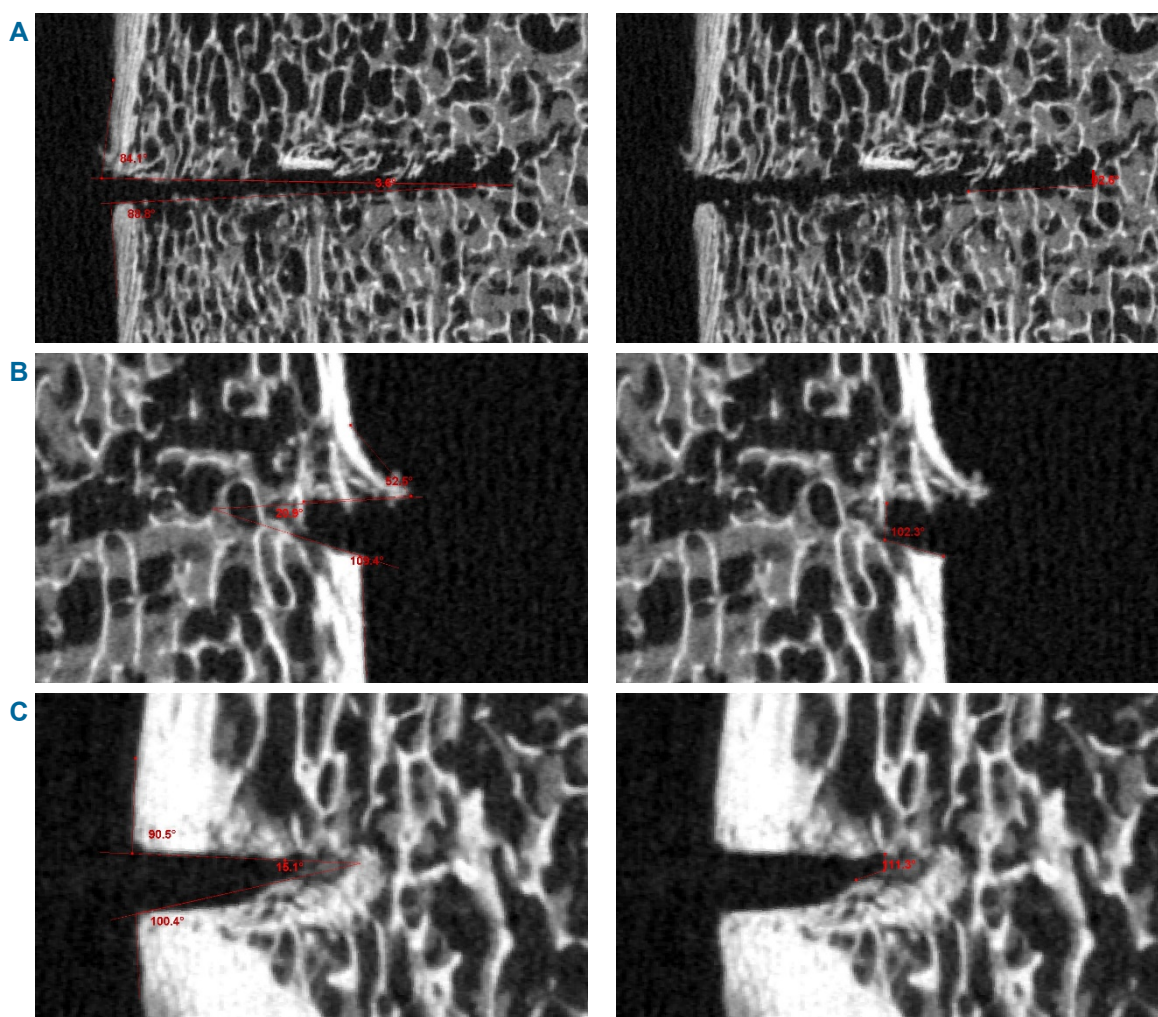


Abb. 33: Winkelmessungen an Querschnittsbildern von μ CT-Aufnahmen

Exemplarisch die Vermessung der Öffnungs-, unteren und oberen Neigungswinkel (links) sowie des Bodenwinkels (rechts) an Rippe 1a und 1b mit den Einstichen 1.1 (A), 1.2 (B) und 1.3 (C).

Die Öffnungswinkel variierten zwischen $1,90^\circ$ und $39,60^\circ$ und die Werte der Bodenwinkel zwischen $63,73^\circ$ und $137,80^\circ$ ($\bar{x}_{\text{ÖW}} = 11,45^\circ$, $\bar{x}_{\text{BW}} = 93,81^\circ$, Abb. 34A und B). Während die oberen Neigungswinkel vor Mazeration einen Wert zwischen $39,70^\circ$ und $156,90^\circ$ annahmen,

zeigten die unteren Neigungswinkel mit einer Spannbreite von $27,10^\circ$ bis $140,70^\circ$ sehr ähnliche Ergebnisse ($\bar{x}_{NW_o} = 83,13^\circ$, $\bar{x}_{NW_u} = 90,78^\circ$, Abb. 35A und B).

Auch nach der Mazerierung glichen sich die Messwerte der oberen und unteren Neigungswinkel mit einer Spannbreite von $32,16^\circ$ bis $155,99^\circ$ bzw. $29,96^\circ$ bis $139,13^\circ$ ($\bar{x}_{NW_o} = 86,10^\circ$, $\bar{x}_{NW_u} = 89,60^\circ$, Abb. 35A und B). Die Öffnungswinkel variierten bei den mazerierten Rippen zwischen $1,41^\circ$ und $42,97^\circ$ und der Bodenwinkel zwischen $53,44^\circ$ und $153,08^\circ$ ($\bar{x}_{\text{ÖW}} = 12,32^\circ$, $\bar{x}_{\text{BW}} = 94,34^\circ$, Abb. 34A und B).

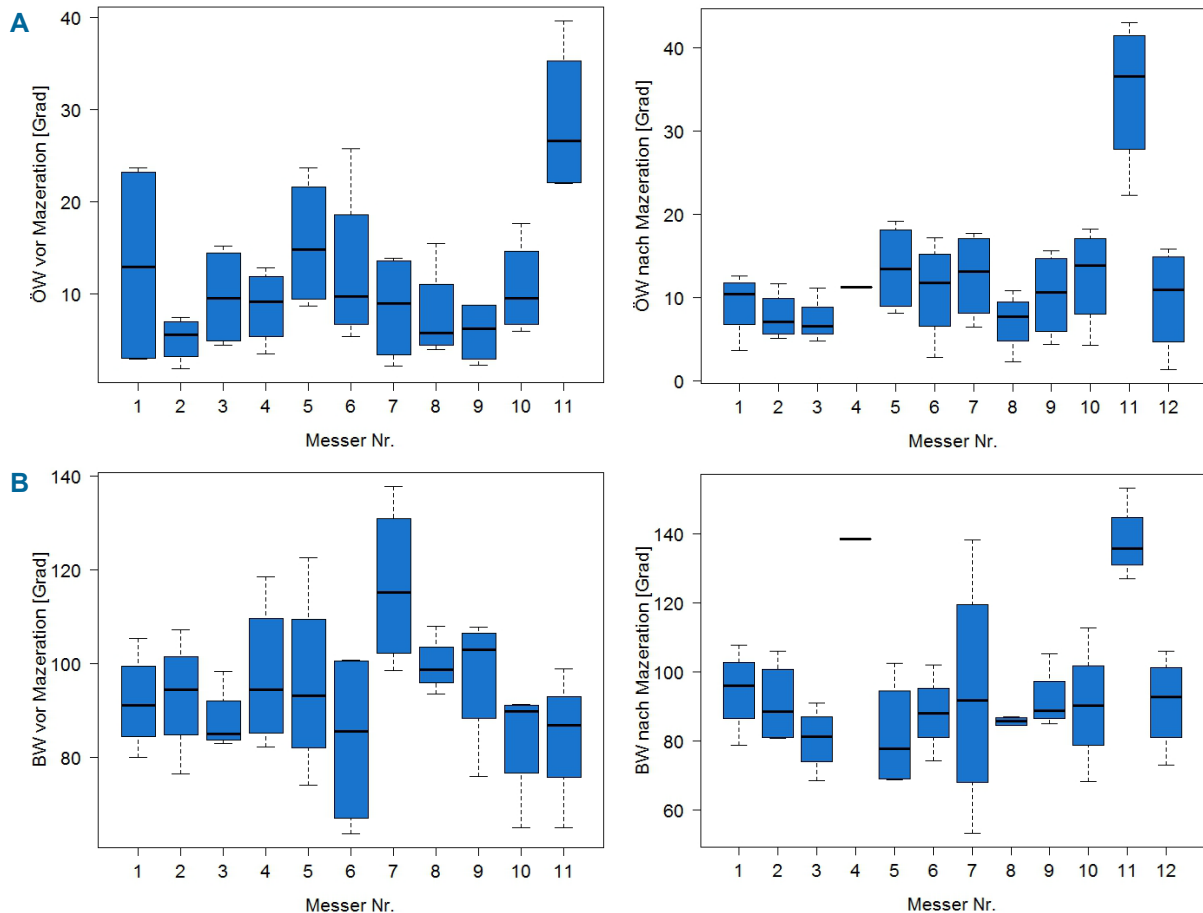


Abb. 34: Öffnungs- und Bodenwinkel vor und nach der Mazeration

A Boxplots mit den Öffnungswinkeln der Einstiche vor und nach Mazerierung der Rippen.

B Boxplots mit den Bodenwinkeln der Einstiche vor und nach Mazerierung der Rippen.

Innerhalb der oberen Neigungswinkeln zeigte sich eine Abweichung von den nicht-mazerierten zu den mazerierten Rippen, indem nicht nur Messer 11 ($NW_{o_{\max}} = 155,99^\circ$) sehr große obere Neigungswinkel aufzeigte, sondern auch Messer 6 und 10 (6: $NW_{o_{\max}} = 154,00^\circ$; 10: $NW_{o_{\max}} = 141,16^\circ$). Messer 2 und 3 ähnelten sich im oberen Neigungswinkel wie bei den nicht-segmentierten Rippen ($\bar{x}_2 = 92,79^\circ$; $\bar{x}_3 = 94,49^\circ$), gleichzeitig konnte aber auch zwischen Messer 4 und 5 ein vergleichbarer Winkel festgestellt werden ($\bar{x}_4 = 58,42^\circ$; $\bar{x}_5 = 56,26^\circ$). Außerdem wiesen die Einstiche von Messer 11 an den mazerierten Knochen die größten Bodenwinkel auf ($\bar{x}_{11} = 137,79^\circ$).

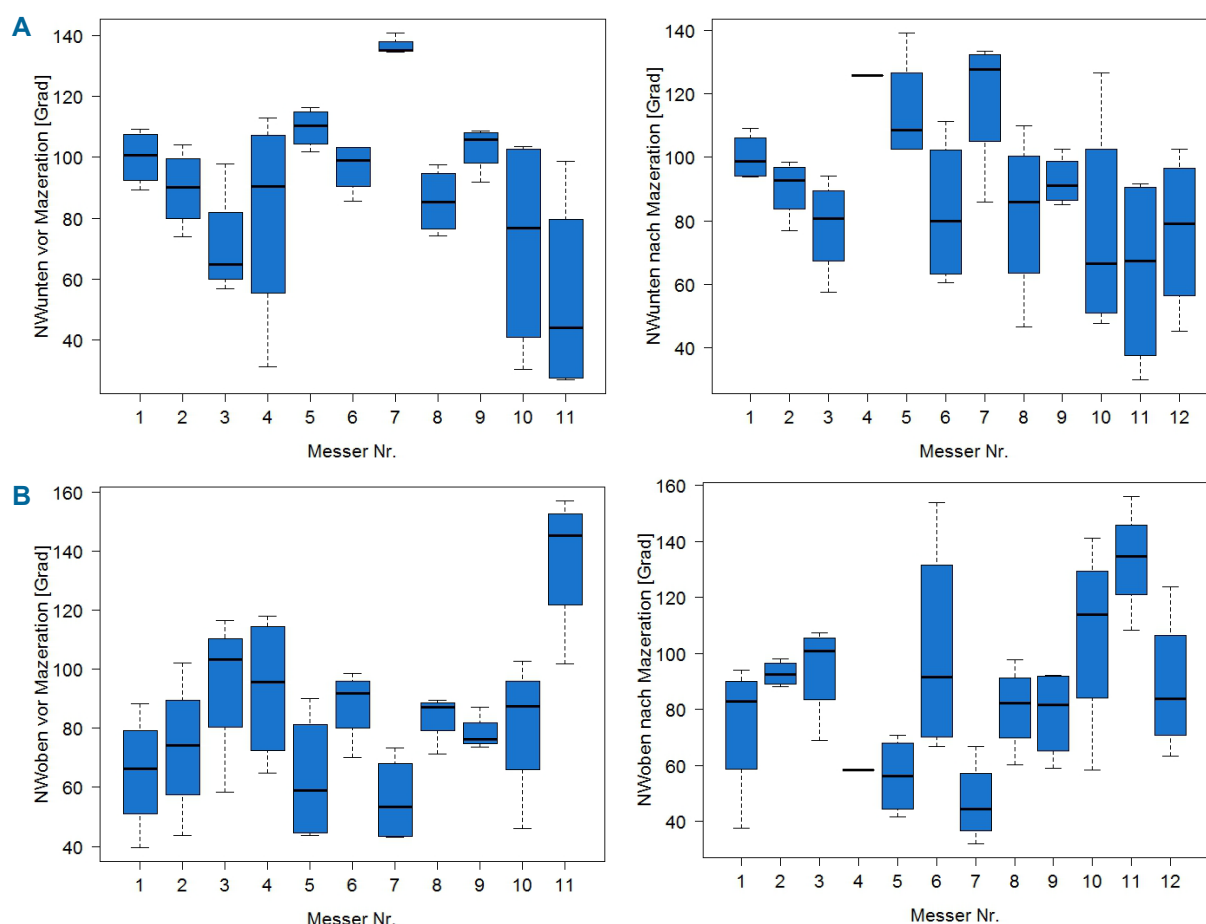


Abb. 35: Unterer und oberer Neigungswinkel vor und nach der Mazeration

A Boxplots mit den unteren Neigungswinkeln der Einstiche vor und nach Mazeration der Rippen.

B Boxplots mit den oberen Neigungswinkeln der Einstiche vor und nach Mazeration der Rippen.

Die Einstichwinkel wiesen mit Ausnahme des Bodenwinkels vor Mazeration signifikante Unterschiede auf dem 5 %-Niveau zwischen den verschiedenen Messern auf (Tabelle 16).

Tabelle 16: Varianzanalyse der Winkel

Ergebnisse der ANOVA vor Mazeration (n = 44, df = 10) und nach Mazeration (n = 48, df = 11).

Messparameter	Analyse	F	p
ÖW	vor Mazeration	3,733	0,002
	nach Mazeration	7,859	9,95e-07
NW_{unten}	vor Mazeration	4,665	0,000364
	nach Mazeration	3,273	0,00346
NW_{oben}	vor Mazeration	4,776	0,000299
	nach Mazeration	4,863	0,000142
BW	vor Mazeration	1,743	0,112
	nach Mazeration	6,725	5,64e-06

Die **unteren Neigungswinkel** bei den Einstichen der Messer 7 und 11 präsentieren sich vor Mazeration deutlich verschieden im Vergleich zu den restlichen Messern. Auch statistisch war Messer 7 von Messer 3, 4, 10 und 11 signifikant unterschiedlich (Tukey's HSD-Test: $n = 44$; $p_3 = 0,0035309$; $p_4 = 0,0228919$; $p_{10} = 0,0040561$; $p_{11} = 0,0001165$). Messer 11 zeigte außerdem einen signifikanten Unterschied zu Messer 5 ($p_5 = 0,0188512$). Nach Mazeration war das Messer 11 zu Messer 4 und 7 im unteren Neigungswinkel signifikant unterschiedlich ($n = 48$; $p \leq 0,0347634$). Zwischen den anderen Messerkombinationen konnte keinerlei signifikanter Unterschiede festgestellt werden.

Der **Öffnungswinkel** der Einstiche von Messer 11 war vor Mazeration sowohl zu dem zweiten Messer, als auch zu dem 3., 4., 7., 8., 9. und 10. Messer signifikant unterschiedlich (Tukey's HSD-Test: $n = 44$; $p_2 = 0,0009481$; $p_3 = 0,0130719$; $p_4 = 0,0074454$; $p_7 = 0,0066338$; $p_8 = 0,0043924$; $p_9 = 0,0014954$; $p_{10} = 0,0222478$). Die Einstiche des Messers 1, 5 und 6 zeigten keine signifikant unterschiedlichen Öffnungswinkel auf dem Signifikanzniveau von 5 % im Vergleich zu Messer 11 ($p_1 = 0,0769224$; $p_5 = 0,2166026$, $p_6 = 0,0604249$). Nach Mazeration wiesen im Öffnungswinkel alle verwendeten Messer einen signifikanten Unterschied zu Messer 11 auf ($n = 48$; $p \leq 0,0001059$).

Beim **Bodenwinkel** konnten nach der Mazeration signifikante Unterschiede innerhalb der Messer 4 und 11 beobachtet werden. Sie waren, abgesehen von den Gemeinsamkeiten zueinander, zu jedem Messer signifikant verschieden ($n = 48$; $p \leq 0,0127029$). Beim Vergleich der Bodenwinkel von den Einstichen 4 und 10 mittels Tukey's HSD-Test nahm das Signifikanzniveau einen Wert von 1 an. Alle signifikanten Messerkombinationen in Bezug auf die gemessenen Winkel der Einstiche finden sich im Anhang (Tabellen 46-49,55-58).

81,97 % ($\sum d^2 = 0,167608$) des unteren Neigungswinkels, welcher vor der Mazeration gemessen wurde, wurden durch die **Messergestalt** erklärt (Goodall's F-Test: $n = 11$; $F = 2,1567$; $df = 26$; $p = 0,0014$). Die anderen Winkel oder auch Distanzen hatten dagegen keinerlei Aussagekraft über die Gestalt des Messers. Hinsichtlich der Einstichgestalt zeigte sich die Verbindung zum unteren Neigungswinkel nicht (Goodall's F-Test: $n = 29$; $F = 0,5247$; $df = 24$; $p = 0,9711$; $R^2 = 0,01896$; $\sum d^2 = 0,059178$).

Korrelationen

Eine sehr geringe Streuung und hohe positive, lineare Abhängigkeit zeigte sich mit einem Pearson'schen Korrelationskoeffizienten von 0,9363471 bzw. 0,9909876 ($p < 2,2e-16$; $n = 88$ bzw. $n = 96$) zwischen den beiden gemessenen **Längen** der Knocheneinstiche (KEL und MSL). Alle anderen Distanzen waren nicht miteinander korreliert, sondern wiesen eine starke Streuung der Daten auf (Pearson: Vor Mazeration: $r \leq 0,2616776$; Nach Mazeration: $r \leq 0,5509314$).

Die gepaarten Messwerte der Winkelparameter lagen leicht verstreut vor. Mit einem Pearson'schen Korrelationskoeffizienten von -0,59356 ($n = 88$; $p = 2,169e-05$) bzw. -0,7632561 ($n = 96$; $p = 2,837e-10$) zeigten der **untere und obere Neigungswinkel** den stärksten Zusammenhang (Lineare Regressionsanalyse: Vor Mazeration: $n = 44$; $R^2 = 0,3369$; $t = 11,77$; $p = 6,91e-15$; Nach Mazeration: $n = 48$; $R^2 = 0,5735$; $t = 15,804$; $p < 2e-16$). Die negative Richtung der linearen Abhängigkeit verdeutlichte: Je größer der obere Neigungswinkel war, desto kleiner erwies sich der untere Winkel. Die beiden Winkel wiesen zusammen einen Durchschnittswert von $86,95^\circ$ bzw. $87,85^\circ$ auf. Besaß der obere Neigungswinkel einen kleineren Wert als der für diesen Einstich berechnete Mittelwert, war der Wert des unteren Neigungswinkels immer größer als der Mittelwert. Somit summierten sie sich durchschnittlich auf einen Winkel von $173,91^\circ$ bzw. $175,70^\circ$ ($SD = 25,06^\circ$ bzw. $20,30^\circ$).

Tabelle 17: Korrelation mit Öffnungswinkel und Distanzen

Die nach Pearson berechneten Korrelationskoeffizienten des Öffnungswinkels der Einstiche vor und nach der Mazeration zu den fünf Einstichdistanzen mit dem jeweiligen p-Wert.

Messparameter	Analyse	p	r
KEL	vor Mazeration	0,02762	-0,33213
	nach Mazeration	0,01759	-0,34131
MSL	vor Mazeration	0,03371	-0,32085
	nach Mazeration	0,016	-0,34599
KEH	vor Mazeration	0,5252	-0,09837
	nach Mazeration	0,5527	-0,08785
MEKH	vor Mazeration	0,01949	0,35098
	nach Mazeration	0,2682	0,16303
KEB	vor Mazeration	0,01139	-0,37809
	nach Mazeration	0,08536	-0,25095

Zwischen dem **Öffnungswinkel** und den vier Distanzen – Breite, Länge, maximale Schulterlänge und maximale Höhe – nahmen alle Korrelationskoeffizienten vor Mazeration einen Wert von ca. 0,35 an (Tabelle 17). Der Öffnungswinkel war in keiner Weise mit der (minimalen) Knocheneinstichhöhe korreliert. Nach der Mazeration korrelierten nur noch die beiden Längen leicht mit dem Öffnungswinkel, indem sie einen Korrelationskoeffizienten von ca. 0,35 aufwiesen.

Ein linearer Zusammenhang zwischen dem Öffnungswinkel und der maximalen Einstichhöhe konnte zwar sowohl vor als auch nach der Mazeration festgestellt werden, jedoch ließ sich die maximale Höhe nur durch 10 % bzw. 0,01 % des Öffnungswinkels erklären (Vor Mazeration: $R^2 = 0,1023$; 4,857; $p = 1,69e-05$; Nach Mazeration: $R^2 = 0,005417$; 3,577; $p = 0,00083$; Abb. 36).

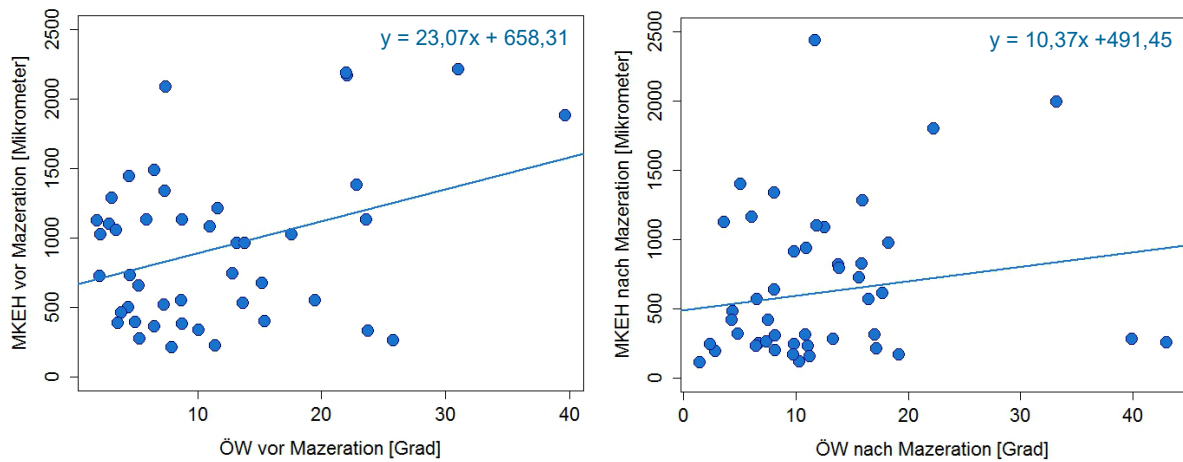


Abb. 36: Lineare Regressionen zwischen Öffnungswinkel und maximaler Höhe

Zwischen dem Öffnungswinkel und der maximalen Einstichhöhe lag vor und nach der Mazeration ein signifikanter Zusammenhang vor.

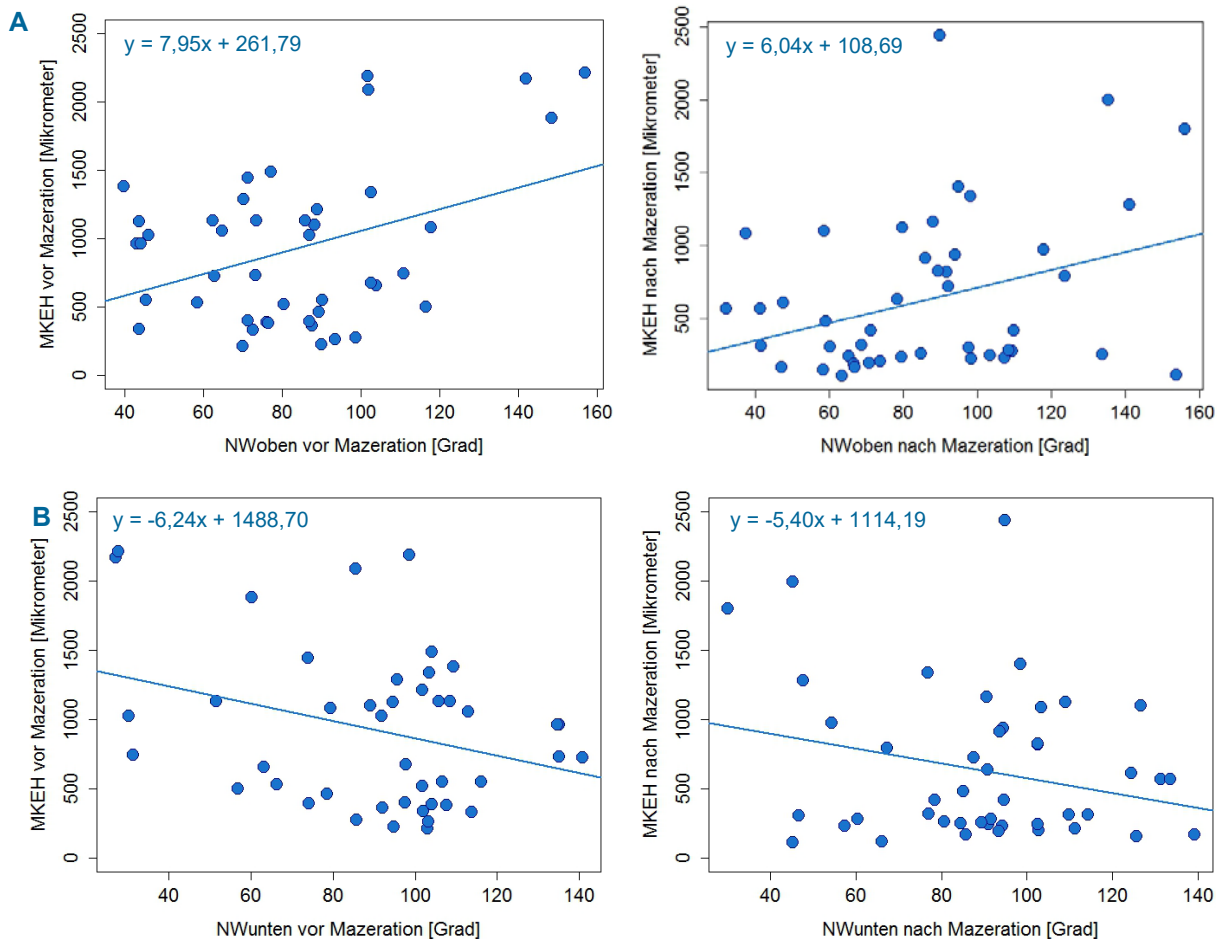


Abb. 37: Lineare Regressionen zwischen Neigungswinkel und maximaler Höhe

A Zwischen dem Neigungswinkel über dem Knocheneinstich und der MKEH lag vor und nach der Mazeration ein hochsignifikanter Zusammenhang vor.

B Zwischen dem Neigungswinkel unter dem Knocheneinstich und der MKEH lag vor und nach der Mazeration kein signifikanter Zusammenhang vor.

Die **maximale Höhe** indizierte einen signifikanten Zusammenhang mit dem oberen Neigungswinkel bevor und nachdem die Rippen mazeriert wurden (LRA: Vor Mazeration: $R^2 = 0,07405$; $t = 5,296$; $p = 4,05e-06$; Nach Mazeration: $R^2 = 0,04922$; $t = 4,007$; $p = 0,00223$). Zwischen dem unteren Neigungswinkel und der maximalen Höhe konnte dagegen kein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden (Vor Mazeration: $R^2 = 0,1284$; $t = 1,020$; $p = 0,31346$; Nach Mazeration: $R^2 = 0,09514$; $t = 0,490$; $p = 0,6265$). Während ein stumpfer oberer Winkel auf eine große max. Höhe hinwies, ging ein stumpfer unterer Winkel in der Regel mit einer niedrigen max. Höhe einher (Abb. 37).

3.1.2 EINFLUSS DER MAZARATION

Durch das Entfernen des Weichgewebes war der Zusammenhalt einiger Rippenfragmente, die derselben Rippe angehörten, nicht mehr gegeben. Lag ein Knochenbruch in unmittelbarer Nähe eines Rippeneinstiches vor (Einstiche 8.3 und 9.2) oder brach nach Entfernen des Weichgewebes ein distales Bruchstück ab (Einstich 5.1), war es nicht mehr möglich die Einstiche metrisch zu analysieren. Dementsprechend konnten beim direkten Vergleich nur Rippeneinstiche gegenübergestellt werden, die auch nach der Mazeration noch intakt vorlagen und vermessen werden konnten (Abb. 38).

Distanzen

Während sich die Spannweite der Einstichlängen, -höhen und -breite bei den mazerierten Rippen kaum von denen der nicht-mazerierten Rippen unterschieden, waren die Kerbmarken nach der Mazeration im Durchschnitt kleiner als zuvor. Dies zeigte sich vor allem in den Höhen und Breiten der Kerben (Abb. 39). Gleichzeitig wiesen die mazerierten Rippen insgesamt höhere Werte der Standardabweichung auf (Tabelle 18).

Tabelle 18: Vergleich der Distanzen vor und nach Mazeration

Für jeden Distanz-Messparameter wurde der Mittelwert und die Standardabweichung (SD) von den Kerbmarken der 11 nicht-mazerierten und 12 mazerierten Rippen berechnet.

Messparameter	Analyse	Mittelwert [μm]	SD [μm]
KEL	vor Mazeration	10.544,71	1.562,17
	nach Mazeration	3.016,63	3.432,67
MSL	vor Mazeration	12.484,73	1.914,32
	nach Mazeration	3.427,81	3.595,69
KEH	vor Mazeration	845,00	160,77
	nach Mazeration	271,99	217,97
MKEH	vor Mazeration	2.113,59	225,64
	nach Mazeration	618,54	449,78
KEB	vor Mazeration	9.198,98	1.450,10
	nach Mazeration	4.408,56	1.807,68

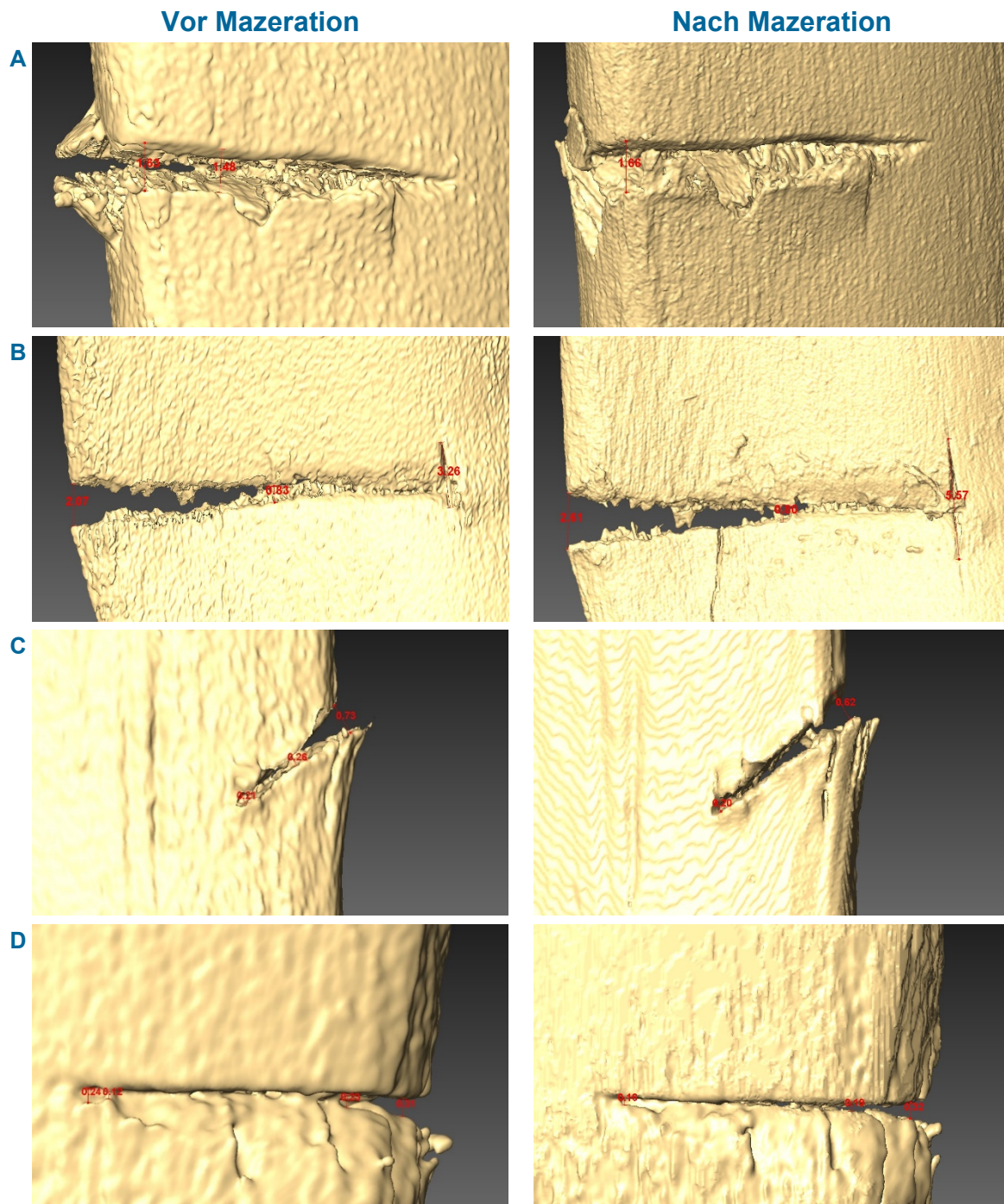


Abb. 38: Einstichmarken vor und nach Mazeration in Amira

Exemplarische Auswahl von Einstichmarken, die in Amira vor und nach dem Mazerieren der Rippen vermessen wurden. Von oben nach unten sind die Einstiche 2.1 (A), 2.2 (B), 7.1 (C) und 8.2 (D) abgebildet.

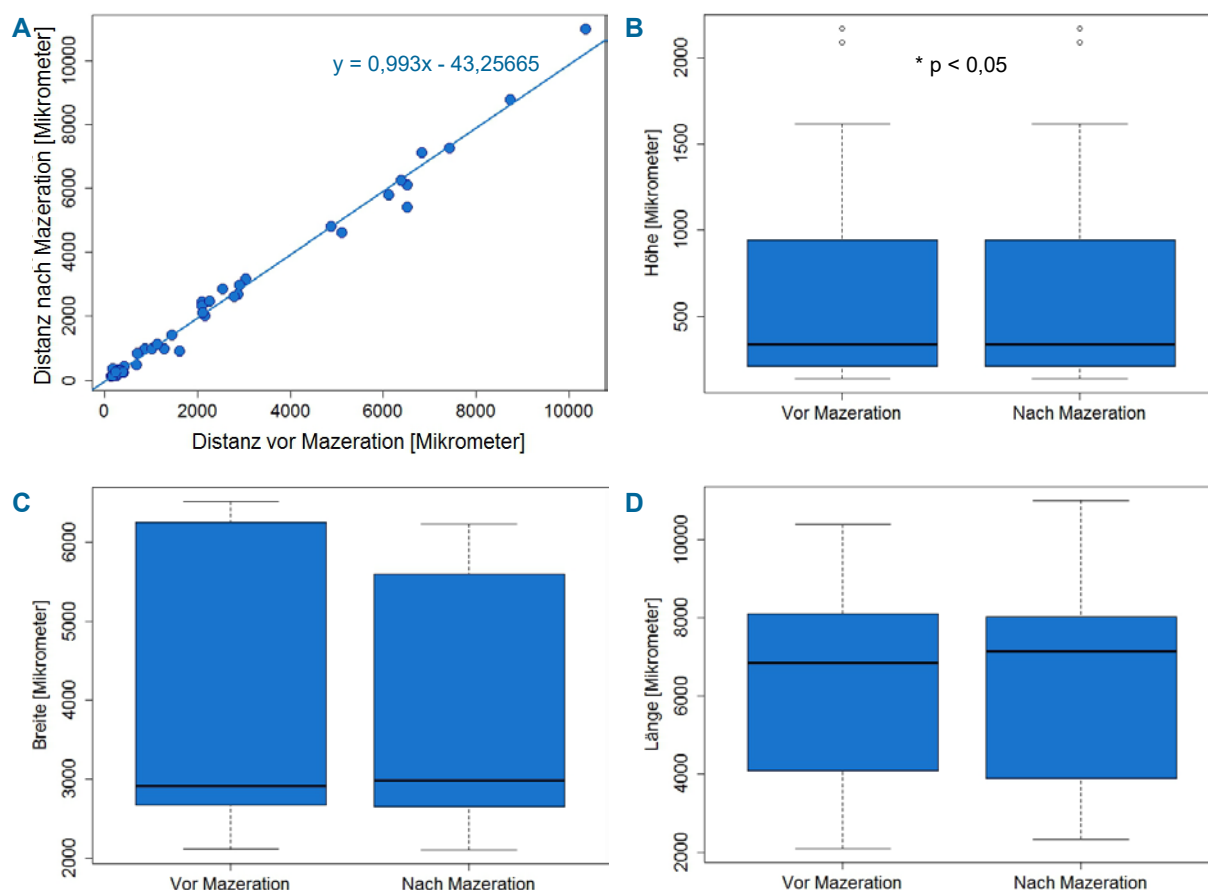


Abb. 39: Vergleich der Distanzen vor und nach Mazeration

Lineare Regression und Boxplots mit den drei Hauptdistanzen der Knocheneinstiche mit einer Auswahl aus den ersten elf Messern. Mithilfe des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test wurden die Distanzen auf signifikante Unterschiede vor und nach Mazeration der Rippen untersucht. Hochsignifikante Unterschiede ($p \leq 0,01$) zwischen den Messern sind durch zwei Sterne gekennzeichnet.

- A** Lineare Regression der Höhen-, Breiten- und Längenwerte ($n = 47$) vor und nach Mazeration der Rippen.
- B** Vergleich von vermessenen Einstichhöhen ($n = 28$) vor und nach der Mazeration der Rippen.
- C** Vergleich von vermessenen Einstichbreiten ($n = 11$) vor und nach der Mazeration der Rippen.
- D** Vergleich von vermessenen Einstichlängen ($n = 7$) vor und nach der Mazeration der Rippen.

Insgesamt folgten alle drei Hauptdistanzen – Höhe, Länge und Breite – einer linearen Regression beim Vergleich der Einstiche mit und ohne Weichgewebe an den Rippen. Die Distanzen zeigten somit eine signifikante Abhängigkeit vor und nach der Mazeration ($n = 47$; $R^2 = 0,9769$; $t = 44,10$; $p < 2e-16$; Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test: $n = 47$; $V = 664$; $p = 0,177$; Abb. 39A). Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test wies **bei der Höhe einen signifikanten Unterschied** zwischen den Knocheneinstichen vor und nach der Mazeration auf ($n = 28$; $V = 284,5$; $p = 0,02157$; Abb. 39B, 40). Nicht jedoch bei den Messwerten der Einstichbreite (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test : $n = 11$; $V = 49$, $p = 0,1549$; Abb. 39C) und -länge (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test : $n = 7$; $V = 11$; $p = 0,6121$; Abb. 39D).

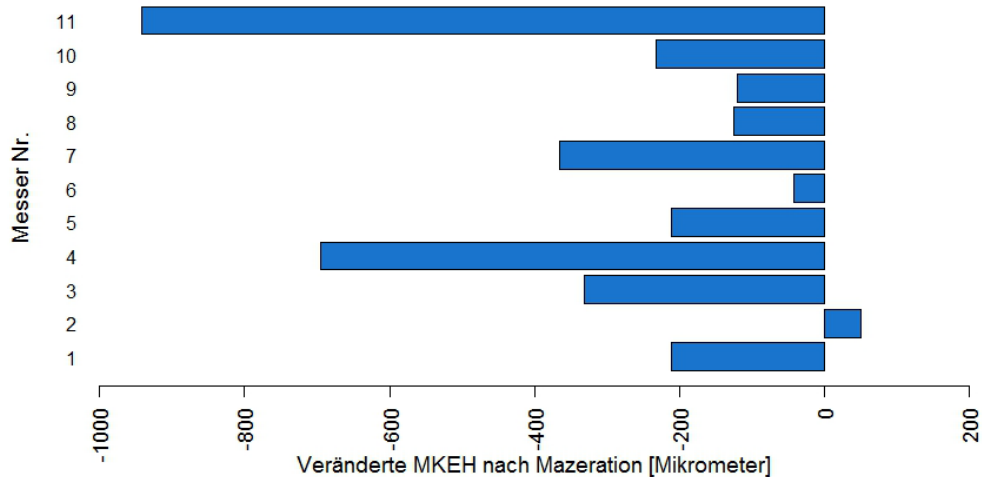


Abb. 40: Höhendifferenzen der Kerbmarken durch Mazeration

Eine generelle Schrumpfung der Kerbmarken in ihrer Höhe ist, mit Ausnahme der Einstiche durch Messer 2, einheitlich zu beobachten gewesen. Dabei reichte die Differenz von ca. 42 μm bis 942 μm .

Winkel

Auch die errechneten Mittelwerte der Winkel waren nach Mazeration kleiner als zuvor. Die Standardabweichungen waren hingegen bis auf den Öffnungswinkel nach Mazeration der Rippen geringer als vor der Mazeration (Tabelle 19).

Tabelle 19: Vergleich der Winkel vor und nach Mazeration

Für jeden Winkel-Messparameter wurde der Mittelwert und die Standardabweichung (SD) von den Kerbmarken der 11 nicht-mazierten und 12 mazierten Rippen berechnet.

Messparameter	Analyse	Mittelwert	SD
ÖW	vor Mazeration	26,68°	5,09°
	nach Mazeration	12,25°	7,35°
NWunten	vor Mazeration	136,37°	53,48°
	nach Mazeration	91,86°	19,22°
NWoben	vor Mazeration	137,25°	55,77°
	nach Mazeration	84,37°	24,09°
BW	vor Mazeration	116,63°	83,83°
	nach Mazeration	97,09°	19,64°

Die Nullhypothese, dass die ermittelten Mediane der jeweiligen Winkel trotz Mazeration der Rippen konstant groß bleiben, konnte bei allen vier Winkelparametern angenommen werden (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test: Alle Winkelparameter zusammen: $n = 76$; $V = 1491$; $p = 0,8847$; ÖW: $n = 22$; $V = 92$; $p = 0,2627$; Abb. 41A; NWoben: Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test : $n = 18$; $V = 122$; $p = 0,1119$; Abb. 41B; BW: Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test : $n = 14$; $V = 4$, $p = 0,4326$; Abb. 41C; NWunten: Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test : $n = 22$; $V = 123$; $p = 0,9095$; Abb. 41D). Mit einem Bestimmtheitsmaß von annähernd 1 und einem Signifikanzwert kleiner 0,01 zeigte sich bei der Gegenüberstellung aller Winkelmaße mit und ohne

Weichgewebe an den Rippen eine hohe Linearität ($n = 76$; $R^2 = 0,9944$; $t = 114,909$; $p < 2e-16$; Abb. 42). Die Regressionsgerade gab dabei, ähnlich wie bei den Distanzen, eine Steigung von nahezu Eins an.

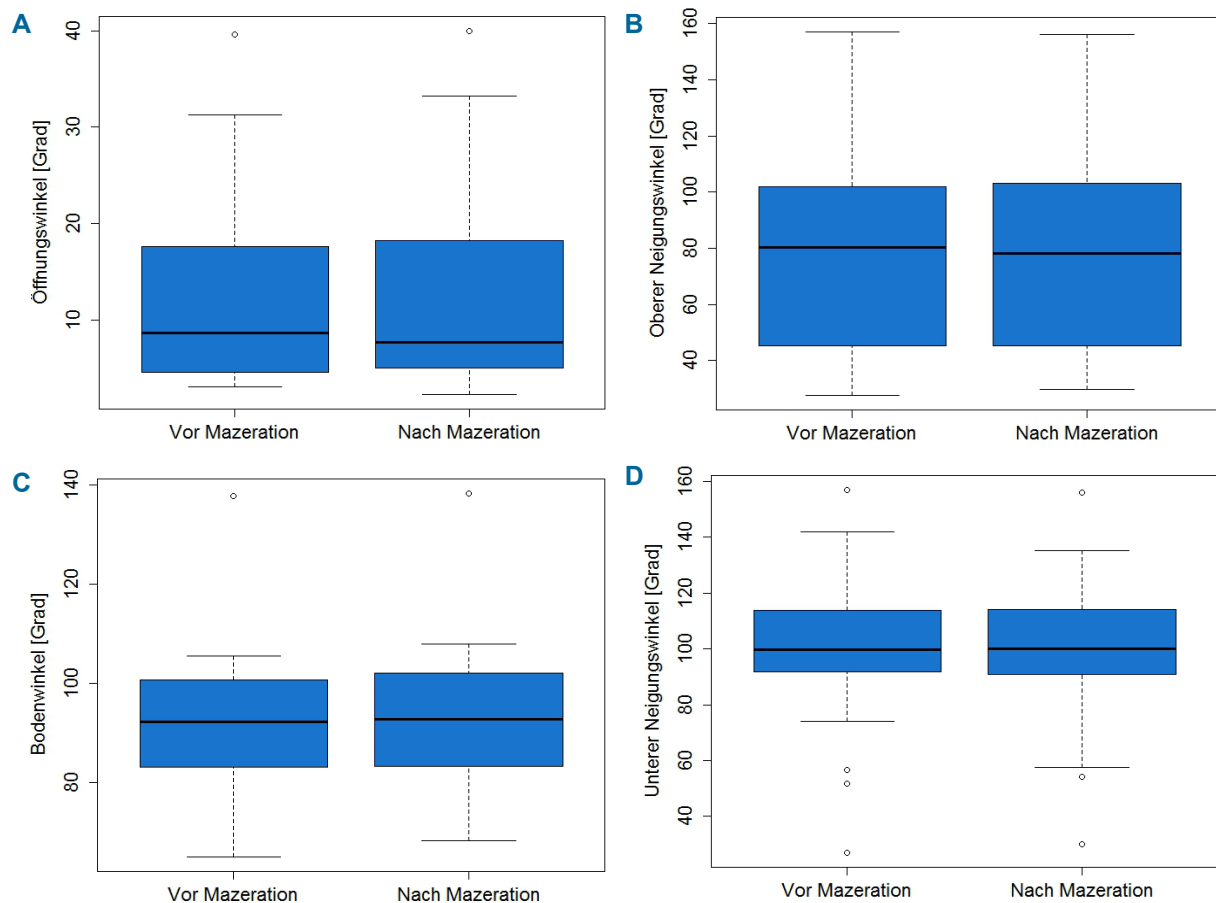


Abb. 41: Vergleich der Winkel vor und nach Mazeration

Boxplots aller vier Winkel der Kerbmarken (A: Öffnungswinkel, $n = 22$; B: Neigungswinkel oben; $n = 18$; C: Bodenwinkel; $n = 14$; D: Neigungswinkel unten; $n = 22$) mit einer Auswahl der pro Versuchsmesser. Bei keinem der Winkel zeigten sich signifikanten Unterschiede vor und nach Mazeration der Rippen.

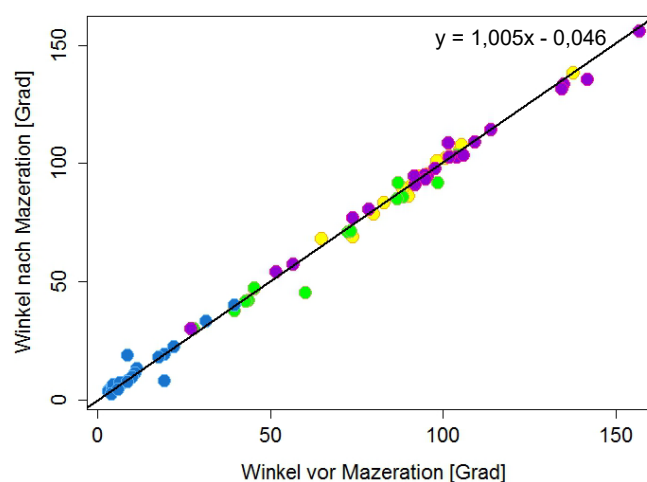


Abb. 42: Lineare Regression der Winkel vor und nach Mazeration

Vergleich aller vier Winkel (ÖW = •, NW_{unten} = •, NW_{oben} = •, BW = •) vor und nach der Mazeration.

3.1.3 ZUORDNUNG DER VERSUCHSMESSER

Während sich zwischen den Messertypen Schere, Haushalts-, Jagd-, Freizeit- und Sektionsmesser keine hochsignifikanten Unterschiede gezeigt haben, kristallisierte sich bei jedem Distanz- und Winkelmaß eine andere Zusammenstellung an Messern mit jeweils hochsignifikanten Unterschieden zwischen neu eingeteilten Messergruppen heraus (Tabellen 20-27). Da sich für jeden Winkel und jede Distanz andere Messergruppen einrichten ließen, konnte **keine einheitliche Klassifizierung** mit spezifischen Messermerkmalen definiert werden.

Die ermittelten Signifikanzwerte des TukeyHSD-Tests beziehen sich auf die Einteilung der neuen Messergruppen, die numerisch benannt wurden. Die Unterschiede zwischen den Messergruppen werden durch die jeweils nebenstehenden Boxplots verdeutlicht (Abb. 43-50).

Tabelle 20: Gruppeneinteilung des Öffnungswinkels

TukeyHSD-Test: n = 44; 1-2: p = 0,0000007; 1-3: p = 0,0005092; 2-3: p = 0,0298002.

Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Schere	Knorpel I und II	Steak
	Block	Zubereitung
	Säge	Sezier
	Tomaten	
	Jagd	
	Pizza	

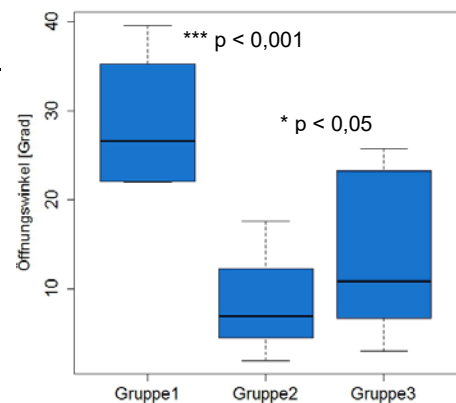


Abb. 43: ÖW-Gruppen

Tabelle 21: Gruppeneinteilung des oberen Neigungswinkels

TukeyHSD-Test: n = 44; 1-2: p = 0,0000215; 1-3: p = 0,0000001; 2-3: p = 0,0027424.

Gruppe 1	Gruppe 2b	Gruppe 3b
Schere	Knorpel I und II	Steak
	Zubereitung	Block
	Säge	Sezier
	Tomaten	
	Jagd	
	Pizza	

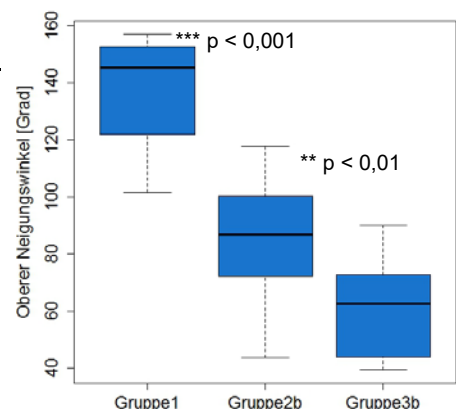
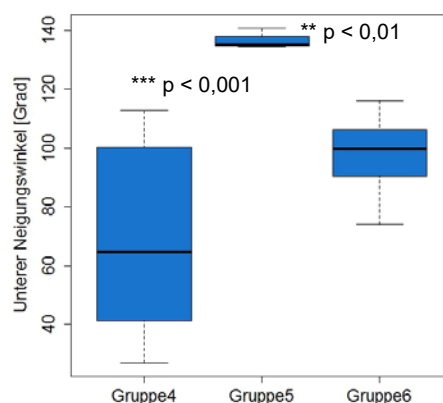


Abb. 44: NWoben-Gruppen

Tabelle 22: Gruppeneinteilung des unteren Neigungswinkels

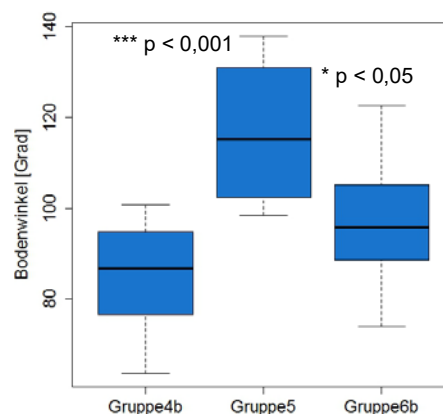
TukeyHSD-Test: n = 44; 1-2: p = 0,0000021; 1-3: p = 0,0003598; 2-3: p = 0,0030321.

Gruppe 4	Gruppe 5	Gruppe 6
Schere	Block	Steak
Tomaten		Zubereitung
Knorpel I und II		Säge
		Jagd
		Pizza
		Sezier

**Abb. 45: NWunten-Gruppen****Tabelle 23: Gruppeneinteilung des Bodenwinkels**

TukeyHSD-Test: n = 44; 1-2: p = 0,0003024; 1-3: p = 0,0376246; 2-3: p = 0,0153428.

Gruppe 4b	Gruppe 5	Gruppe 6b
Schere	Block	Steak
Tomaten		Knorpel II
Knorpel I		Säge
Zubereitung		Jagd
		Pizza
		Sezier

**Abb. 46: BW-Gruppen****Tabelle 24: Gruppeneinteilung der Länge (KEL & MSL)**

TukeyHSD-Test: n = 44; 1-2: p = 0,0002787; 1-3: p < 2,2e-16; 2-3: p = 0,0006122.

Gruppe 7	Gruppe 8	Gruppe 9
Pizza	Knorpel II	Schere
Steak	Säge	Zubereitung
Jagd		Knorpel I
		Tomaten
		Block
		Sezier

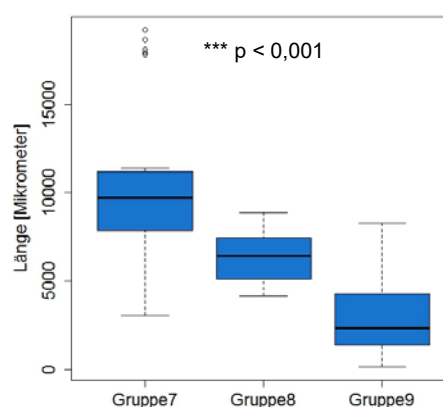
**Abb. 47: KEL & MSL-Gruppen**

Tabelle 25: Gruppeneinteilung der Knocheneinstichhöhe

TukeyHSD-Test: n = 44; 1-2: $p < 2,2e-16$; 1-3: $p < 2,2e-16$; 2-3: $p = 7e-07$.

Gruppe 10	Gruppe 11	Gruppe 12
Steak	Knorpel I	Schere
	Tomaten	Zubereitung
	Pizza	Knorpel II
		Jagd
		Block
		Säge
		Sezier

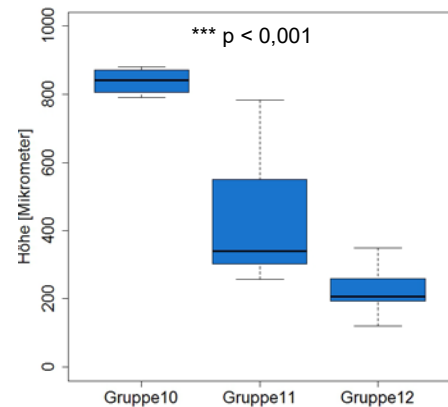


Abb. 48: KEH-Gruppen

Tabelle 26: Gruppeneinteilung der maximalen Einstichhöhe

TukeyHSD-Test: n = 44; 1-2: $p < 2,2e-16$; 1-3: $p = 5,3e-05$; 2-3: $p < 2,2e-16$.

Gruppe 13	Gruppe 14	Gruppe 1
Tomaten	Zubereitung	Schere
Steak	Säge	
Pizza	Knorpel I und II	
	Jagd	
	Block	
	Sezier	

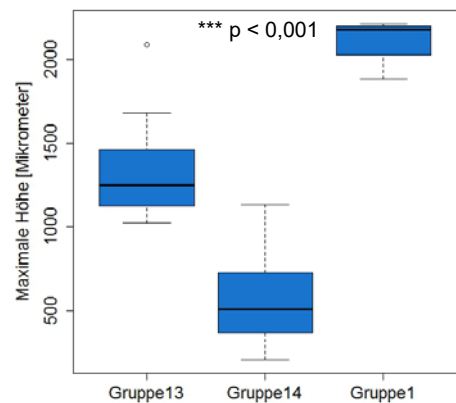


Abb. 49: MKEH-Gruppen

Tabelle 27: Gruppeneinteilung der Knocheneinstichbreite

TukeyHSD-Test: n = 44; 1-2: $p = 0,0000017$; 1-3: $p < 2,2e-16$; 2-3: $p = 0,0005119$.

Gruppe 15	Gruppe 16	Gruppe 17
Tomaten	Knorpel II	Zubereitung
Säge	Jagd	Schere
Steak		
Knorpel I		
Block		
Pizza		
Sezier		

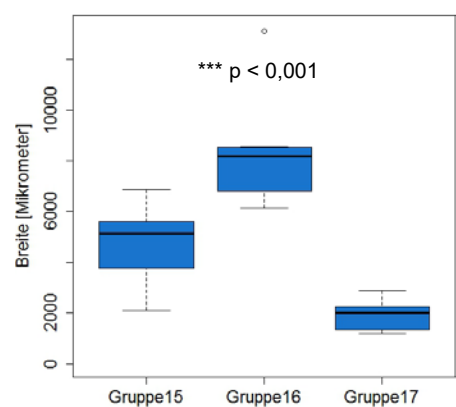


Abb. 50: KEB-Gruppen

Einstiche der Schere (Nr. 11, Gruppe 1) waren meist signifikant unterschiedlich von denen anderer Messer. Falls sich die Schere zusammen mit anderen Messern in einer erstellten Gruppe befand, dann vorwiegend mit dem Tomatenmesser (Nr. 10), welches zwei Messerspitzen besitzt. Gruppen 2, 3, 4 und 6 erschienen zweimal in ähnlicher Konstellation. Deswegen wurde eine der jeweiligen Gruppen als zweite Variante mit einem „b“ versehen. Dabei zeigte sich in allen vier Fällen ein Austausch mit dem Zubereitungsmesser (Nr. 6), welches entweder durch das Block- oder Knorpelmesser II (Nr. 7 bzw. 4) ersetzt wurde.

Bei sechs der acht verwendeten Maße befanden sich die Messer 8 und 9, 4 und 9 bzw. 4 und 8 in einer Gruppe. Fünfmal davon waren alle drei dieser Messer in derselben Messergruppe vertreten (MKEH, NWoben, ÖW, KEH und BW).

3.2 MAKROFOTOGRAFIE

Die Vermessung der Einstiche an den Rippenfragmenten gestaltete sich mit der Makrofotografie unter allen angewandten Methoden am schwierigsten. Die meisten Einstiche befanden sich lateral an den anterioren und posterioren Bereichen der Rippen. Da die Rippenfragmente zur Längenerfassung der Einstiche auf der dorsalen bzw. ventralen Fläche liegend fotografiert wurden, war die Knocheneinstichbreite in den meisten Fällen nicht messbar.

3.2.1 VERSUCHSMESSER

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Messer zeigten verschiedene Werte in Bezug auf die Klingendicke. Mit einem Mittelwert von 1,13 mm besaßen 75 % der Messer eine Spitzendicke zwischen 0,61 und 1,48 mm. Während die dünnste Spitze bei Messer 6 festgestellt wurde, zeigte Messer 11 die dickste Klingenspitze (Tabelle 28, 29).

Tabelle 28: Messercharakteristika der gezahnten Messer

Bei den gezahnten Messern wurden zusätzlich Zahnabmessungen an verschiedenen Stellen der Klinge in tpsDig2 vorgenommen und jeweils der Mittelwert festgehalten.

Messer	1	2	8	10	11
Radius der Klingenspitze	116,96°	87,91°	99,27°	45° und 54,16°	103,74°
Radius der Klinge	28,29°	65,85°	76,98°	2 Spitzen mit 22,33° und 25,63°	21,12°
Klingenspitzen- dicke [mm]	1,01	1,48	1,36	0,97	2,22
Klingendicke [mm]	1,34	1,50	3,52	1,04	2,22
Anzahl der Zähne/cm	3-4	9-10	2	2 Schneiden mit 5 und 1-2	6
Abstand der Zahn- spitzen [mm]	2,89	1,07	4,90	1,96 und 5,03 bzw. 2,38	1,53
Höhe der Zähne [mm]	1,51	0,74	2,23	0,97 und 1,49	1,33
Messergewicht [g]	52,8	77,9	79,0	44,7	97,2

Während Messer 11 den kleinsten **Klingenradius** besaß, wies Messer 8 den größten Radius auf. In Bezug auf den Radius der Klingenspitze zeigten sich bei Messer 1 und 12 die höchsten Werte. Messer 10 besaß an beiden Spitzen einen sehr geringen Klingenspitzenradius.

Innerhalb der **Zahngröße** zeigte sich eine hohe Variabilität. Die kleinsten und meisten Zähne pro Zentimeter besaß das Messer Nr. 2. Die höchsten Klingenzähne konnten bei Messer 8 festgestellt werden. Die breitesten, immer wiederkehrenden Zahnfolgen zeigten sich bei einer der Schneiden von Messer 10. Die Zähne wichen in ihrer Optik deutlich von allen anderen Zähnen ab. Während die anderen gezahnten Klingen einen deutlich parabelförmigen Verlauf

zwischen den Zahnsitzen aufzeigten, verliefen die Zähne bei dieser Schneide des Messers 10 zweizackig mit geraden Kanten.

Tabelle 29: Messercharakteristika der glatten Messer

Die Klingenbreite der Versuchsmesser wurde mit einem Messschieber an unterschiedlichen Stellen ausgemessen und die Mittelwerte in Reihe vier und fünf notiert. Die Bestimmung der Klingenwinkel erfolgte in tpsDig2 anhand der makroskopischen Fotoaufnahmen.

Messer	3	4	5	6	7	9	12
Radius der Klingenspitze	79,12°	106,31°	90,63°	78,36°	76,10°	94,10°	117,41°
Radius der Klinge	52,36°	69,57°	59,79°	45,12°	57,29°	52,83°	29,30°
Klingenspitzen- dicke [mm]	1,12	1,25	1,48	0,61	0,92	1,85	0,80
Klingendicke [mm]	3,54	3,50	3,89	0,83	1,64	3,48	1,95
Messergewicht [g]	63,8	197,5	170,0	48,9	159,4	158,5	71,0

Die **Klingendicke** blieb bei Messer 2 und 6 über die gesamte Klingenlänge konstant. Bei allen anderen Messern nahm die Dicke zu. Vor allem bei den Sektionsmessern und dem Sägemesser (Messer Nr. 3, 4, 5, 8) weitete sich die Klinge am Messerrücken deutlich aus. Die größte maximale Klingendicke wurde bei Messer 5 festgehalten (Abb. 51).

Signifikant unterschiedliche Klingendicken zeigten sowohl zwischen Messer 6 und den Messern 3, 4, 5 und 9 als auch zwischen Messer 5 und den Messern 1, 7 und 10 (Tabelle 30).

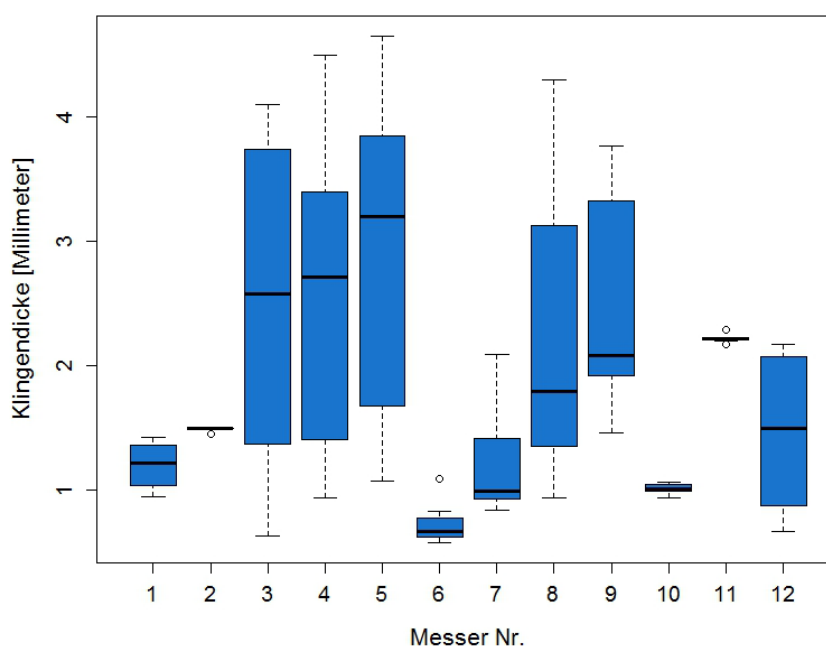


Abb. 51: Klingendicke

Boxplot der Klingendicken aller zwölf Messer. Zwischen den Messern zeigten sich signifikante Unterschiede (ANOVA: $n = 84$; $F = 4,815$; $df = 11$; $p = 1,6e-05$).

Tabelle 30: Vergleich der Klingendicke

Signifikante Ergebnisse des multiplen Vergleichs der Klingendicken mittels des Tukey's HSD-Tests.

Messerkombinationen	Differenz	p
Sezier – Zubereitung	2,120000000	0,0012211
Sezier – Tomaten	1,842857143	0,0090953
Zubereitung – Jagd	-1,810000000	0,0113671
Zubereitung – Knorpel II	-1,804285714	0,0118123
Zubereitung – Knorpel I	-1,770000000	0,0148391
Sezier – Steak	1,655714286	0,0307849
Sezier – Block	1,625714286	0,0369750

3.2.2 EINSTICHMERKMALE

Anhand der makroskopischen Fotoaufnahmen der Rippeneinstiche wurden deren Höhen und Längen vermessen (Abb. 52). Dabei lieferte jede Aufnahme viele verschiedene Höhenwerte. Die Mittelwerte der gemessenen Distanzen zeigten, dass die Einstiche an Rippe 2b und 10 durchschnittlich die längsten und gleichzeitig identisch lang waren (Tabelle 31). Rippe 2a und 8a wiesen dagegen die kürzesten Einstichlängen auf. Hinsichtlich der Knocheneinstichhöhe indizierten die Einstiche 1.2, 1.3, 3.1 und 11.3 vergleichbare Durchschnittswerte. Die Einstiche 2.1, 3.1, 9.2 und 11.3 wiesen alle eine maximale Höhe von ca. 1,5 mm auf.



Abb. 52: Messungen an makroskopischen Aufnahmen

Exemplarische Auswahl von 15 Makrofotos mit Kerbmarken, die in tpsDig2 [mm] vermessen wurden.

Tabelle 31: Einstichcharakteristika anhand der Makroaufnahmen

Die Makrofotografien der Einstiche wurden in tpsDig2 hinsichtlich der Länge, maximalen und minimalen Höhen sowie (wenn möglich) der Breite bearbeitet und die jeweiligen Durchschnittswerte bestimmt.

Einstich	KEL [mm]	KEH [mm]	MKEH [mm]	KEB [mm]
1.1	13,11	1,13	1,27	-
1.2	1,49	0,93	1,01	-
1.3	3,75	0,95	1,10	-
2.1	9,97	1,10	1,45	-
2.2	15,97	0,50	2,15	-
3.1	7,25	0,90	1,51	-
4.2	4,22	-	-	-
5.2	4,55	0,38	-	-
5.3	3,14	-	-	-
6.1	6,58	0,29	0,40	-
7.1	5,45	0,54	0,85	-
7.2	3,24	0,19	0,48	-
8.1	1,15	0,85	0,99	-
8.2	6,78	0,18	0,31	-
8.3	4,83	0,27	0,36	-
9.1	5,73	1,46	1,79	-
9.2	9,97	1,10	1,45	-
10.1	15,98	0,50	2,15	-
11.2	-	1,37	1,84	2,49
11.3	7,25	0,90	1,51	-
12.1	-	0,48	0,75	3,15

Die mittels μ CT und Amira erfassten Werte deuteten im Vergleich zu Makrofotografie und tpsDig2 auffällig **kleinere Durchschnittsdistancen sowie eine geringere Streuung** an. Dies zeigte sich vor allem bei den Messungen der Knocheneinstichhöhe (Abb. 53A). Innerhalb der Höhen unterschieden sich die Ergebnisse von Aufnahmen mittels μ CT und Makrofotografie auf dem 0,1%-Signifikanzniveau signifikant voneinander (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test: $n = 17$; $V = 7$; $p = 0,001002$). Die gemessenen Längen und maximalen Höhen indizierten dagegen keinerlei signifikante Unterschiede (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test: MKEH: $n = 15$; $V = 31,5$; $p = 0,1054$; Abb. 53B; KEL: $n = 16$; $V = 62$; $p = 0,3061$; Abb. 53C), sondern einen linearen Zusammenhang (Lineare Regressionsanalyse: KEL: $n = 16$; $R^2 = 0,2719$; $t = 2,711$; $p = 0,0154$; MKEH: $n = 15$; $R^2 = 0,2968$; $t = 2,707$; $p = 0,0170$). Die Regressionsgeraden wiesen jedoch lediglich eine Steigung von 0,58 bzw. 0,57 auf.

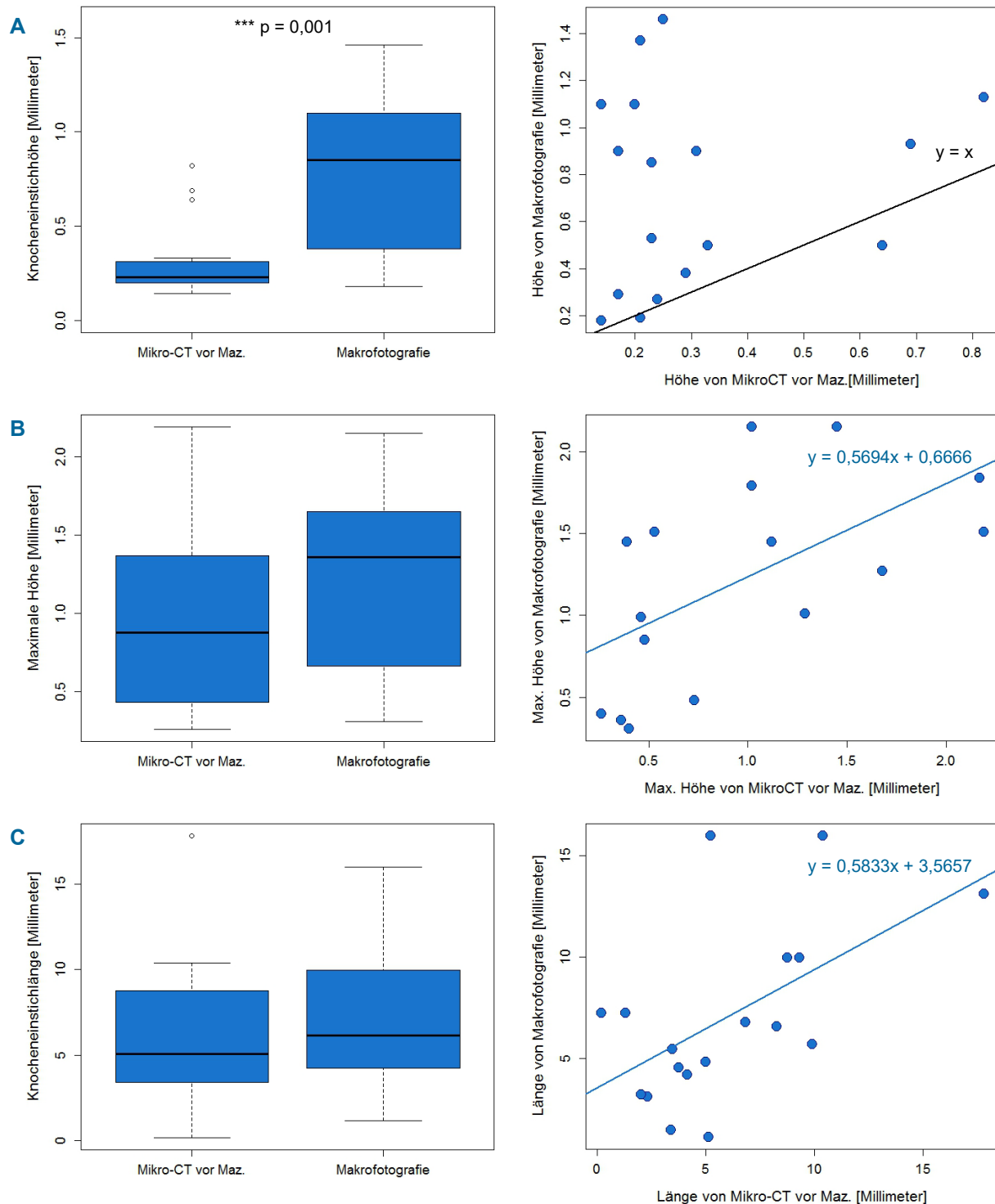


Abb. 53: Vergleich der Messwerte von Makrofotos und µCT-Scans vor Mazeration

Vergleich der gemessenen minimalen (A) und maximalen (B) Knocheneinstichhöhen sowie Knocheneinstichlängen (C) von µCT-Aufnahmen der Rippen vor Mazeration mit den Ergebnissen der Makrofotografie.

A Die Boxplots zeigen die beiden hochsignifikant unterschiedlichen Mediane der Einstichhöhen (n = 17). Die Höhenmessungen der beiden Methoden waren nicht korreliert (n = 17; $R^2 = -0,03872$; $t = 0,635$; $p = 0,53482$) und sind mit einer Ursprungsgeraden (Identität) abgebildet.

B Die Boxplots zeigen die beiden nicht signifikant unterschiedlichen Mediane der max. Höhen (n = 15).

C Die Boxplots zeigen die beiden nicht signifikant unterschiedlichen Mediane der Längen (n = 16).

3.3 RASTERELEKTRONENMIKROSKOP

Mittels der mit dem REM festgehaltenen Abbildungen der Rippenoberflächen wurden die Höhen und Breiten der Knocheneinstiche ausgemessen. Jede rasterelektronenmikroskopische Ansicht lieferte für die Ermittlung der jeweiligen Mittelwerte viele unterschiedliche Distanzwerte (Abb. 54). Die größte durchschnittliche Maximalhöhe wies das Messer 2 auf. Messer 11 besaß die geringste Knocheneinstichhöhe (Tabelle 32). Den breitesten mit dem REM festgehaltenen Einstich hinterließ Messer 5. Aufgrund der nicht veränderbaren Fokusperspektive konnte die Knocheneinstichbreite nicht bei allen Rippen vermessen werden. Die winzigen Einstiche an Rippe 4 und 9 erlaubten keinerlei Analysen.

Tabelle 32: Einstichcharakteristika anhand der REM-Aufnahmen

Die Darstellungen der Kerbmarken mittels REM wurden in tpsDig2 hinsichtlich der maximalen und minimalen Höhen sowie der Breite analysiert und die jeweiligen Durchschnittswerte für jedes Messer bestimmt.

Messer	MKEH [μm]	KEH [μm]	KEB [μm]
1	1.083,93	829,03	5.490,00
2	1.517,36	630,47	-
3	565,62	282,87	-
5	335,00	222,43	6.250,00
6	357,49	227,55	1.899,91
7	1.135,37	553,33	-
8	627,27	219,91	3.250,00
10	260,04	154,10	1.530,22
11	405,03	181,83	2.242,46
12	669,46	243,66	2.837,32

Die gemessenen Distanzen der Knocheneinstiche bei Verwendung des μCT s und des REMs zeigten vergleichbare Werte (Abb. 55). Sowohl die Höhen als auch die Breite der Einstiche unterschieden sich zwischen den Aufnahmen mittels μCT und REM nicht signifikant voneinander. In allen untersuchten Distanzen konnte dafür ein signifikanter linearer Zusammenhang auf dem 0,01%-Signifikanzniveau festgestellt werden (LRA: KEH: $n = 36$; $R^2 = 0,9712$; $t = 34,343$; $p < 2\text{e-}16$; MKEH: $n = 23$; $R^2 = 0,9627$; $t = 23,84$; $p < 2\text{e-}16$; KEB: $n = 12$; $R^2 = 0,8339$; $t = 7,497$; $p = 2,07\text{e-}05$). Bei der Einstichbreite differenzierten sich die Mediane der μCT - und REM-Methode am stärksten, in dem anhand der REM-Aufnahmen durchschnittlich breitere Einstiche vermessen wurden. Die Spannbreite fiel dagegen deutlich geringer aus als bei den μCT -Aufnahmen der nicht-mazerierten Rippen.

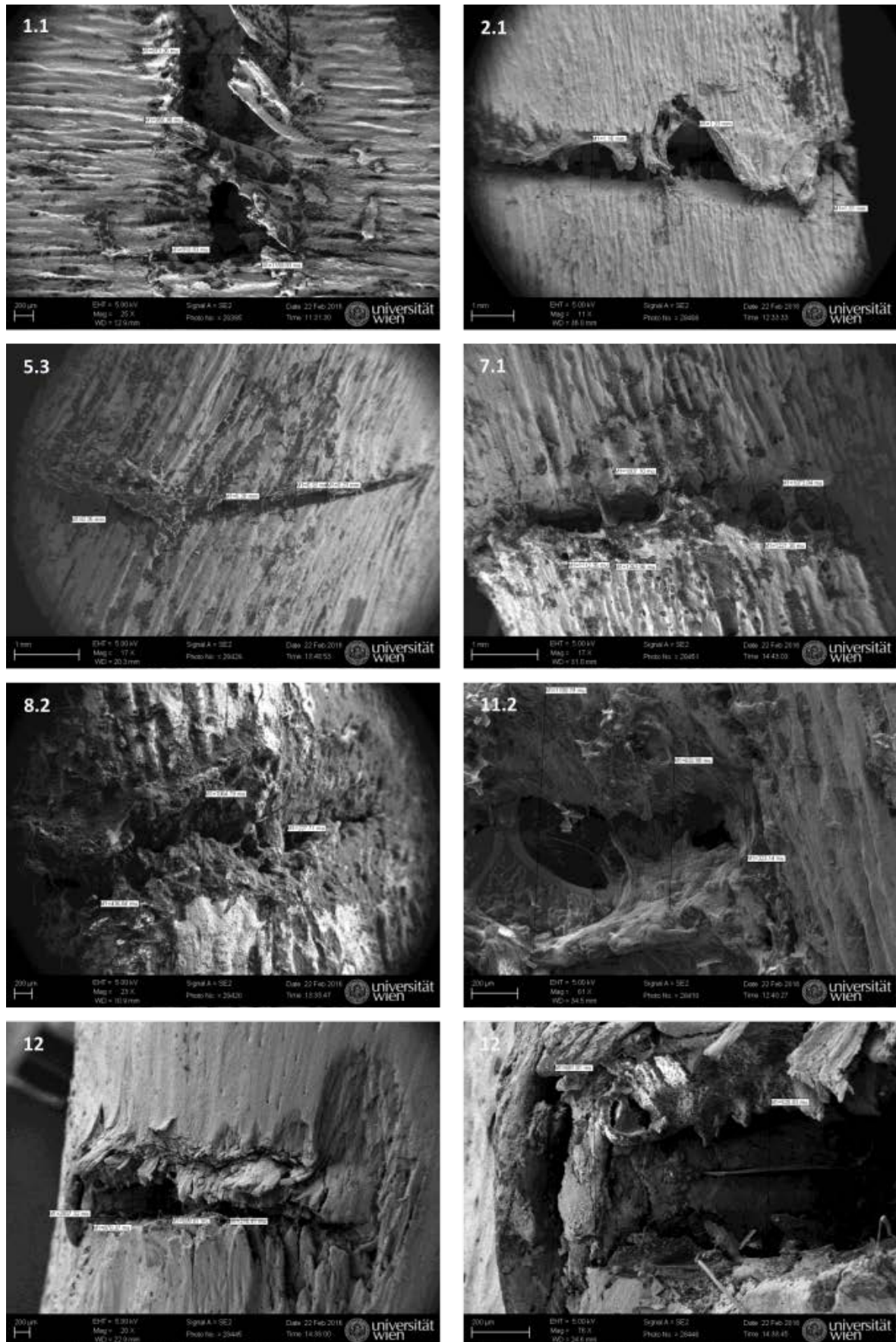


Abb. 54: Messungen an REM-Aufnahmen

Exemplarische Auswahl von 8 REM-Fotos mit Kerbmarken, die in tpsDig2 [µm] vermessen wurden.

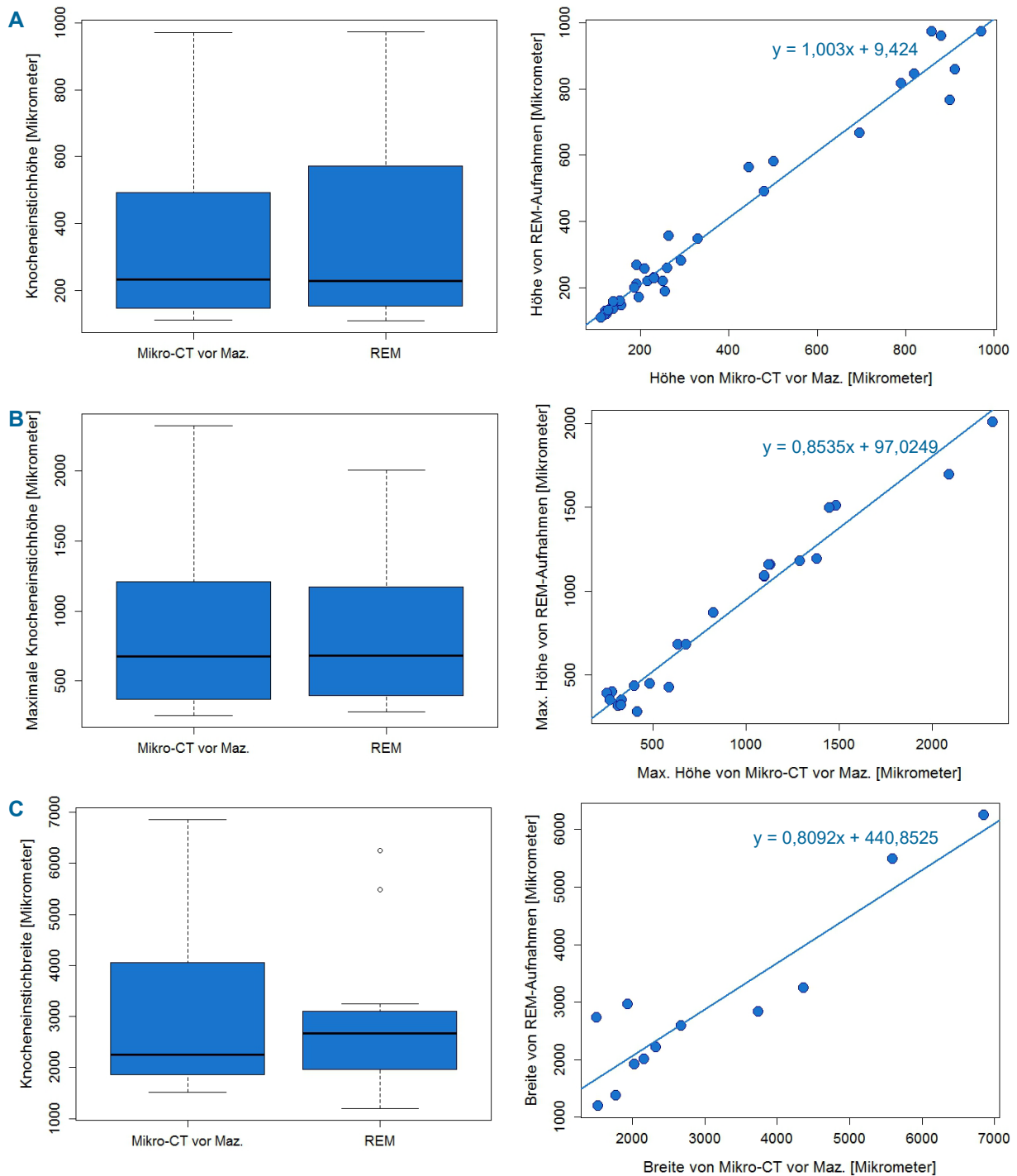


Abb. 55: Vergleich der Messwerte von REM-Aufnahmen und μ CT-Scans vor Mazeration

Vergleich der gemessenen minimalen (A) und maximalen (B) Knocheneinstichhöhen sowie Knocheneinstichbreiten (C) von μ CT-Aufnahmen der Rippen vor Mazeration mit den Ergebnissen der Raster-elektronenmikroskopie.

- A** Die Boxplots zeigen die beiden nicht signifikant unterschiedlichen Mediane der Einstichhöhen (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang- Test: $n = 36$; $V = 241$; $p = 0,1484$).
- B** Die Boxplots zeigen die beiden nicht signifikant unterschiedlichen Mediane der maximalen Einstichhöhen (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang- Test: $n = 23$; $V = 141$; $p = 0,9273$).
- C** Die Boxplots zeigen die beiden nicht signifikant unterschiedlichen Mediane der Einstichbreiten (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang- Test: $n = 12$; $V = 56$; $p = 0,1823$).

Energiedispersive Röntgenanalyse

Für die energiedispersive Röntgenanalyse wurden fünf Kerbmarken ausgesucht. Die Auswahl erfolgte nach folgenden Kriterien:

- Die Knocheneinstichhöhe musste mindestens 0,5 mm betragen.
- Der Kerbboden musste einsehbar sein
- Die Kerbe musste senkrecht zum Detektor stehen, sodass bei der Analyse nicht durch den Einstich „geschossen“ wurde und der Boden der Probekammer oder des Probetisches analysiert wurde.

In den fünf Kerbmarken, die alle diese Kriterien erfüllten und bei denen ein positiver Nachweis von Metallpartikeln am wahrscheinlichsten erschien, konnten zwar Elemente wie Kalzium, Phosphat, Kalium, Gold und Palladium nachgewiesen werden, jedoch wurden keine Metallpartikel gefunden. In jeder Analyse betrug der detektierte Sauerstoff etwa die Hälfte der vorgefundenen Gesamtmenge an Elementen (Abb. 56).

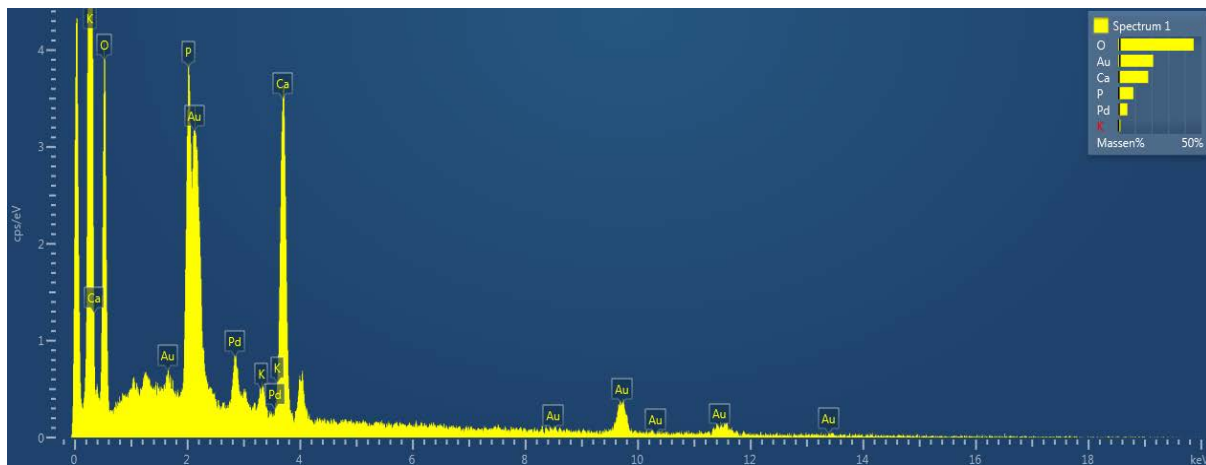


Abb. 56: Energiedispersive Röntgenanalyse

Spektrum der nachgewiesenen Elemente in dem Einstich der Rippe 2a. Die x-Achse gibt die Energie der Röntgenquanten in Kiloelektronenvolt an und ordnet somit jedem Peak ein Element zu. Die y-Achse zeigt die Signalintensität in Impulse pro Sekunde pro Elektronenvolt.

3.4 GESTALTANALYSE

3.4.1 VERSUCHSMESSER

Die *Centroid Sizes* der Messer betrugen zwischen 9,36 und 29,35 ($\bar{x} = 15,62$; $SD = 5,52$). Die Messer Nr. 4 und 6 besaßen die kleinste *Centroid Size*, das Messer 10 mit einem deutlichen Abstand von 8,20 CS die größte. Die zweitgrößte *Centroid Size* wurde bei Messer 2 festgestellt. Zweidrittel aller Messer wiesen eine *Centroid Size* zwischen 12,86 und 17,79 auf (Abb. 57A).

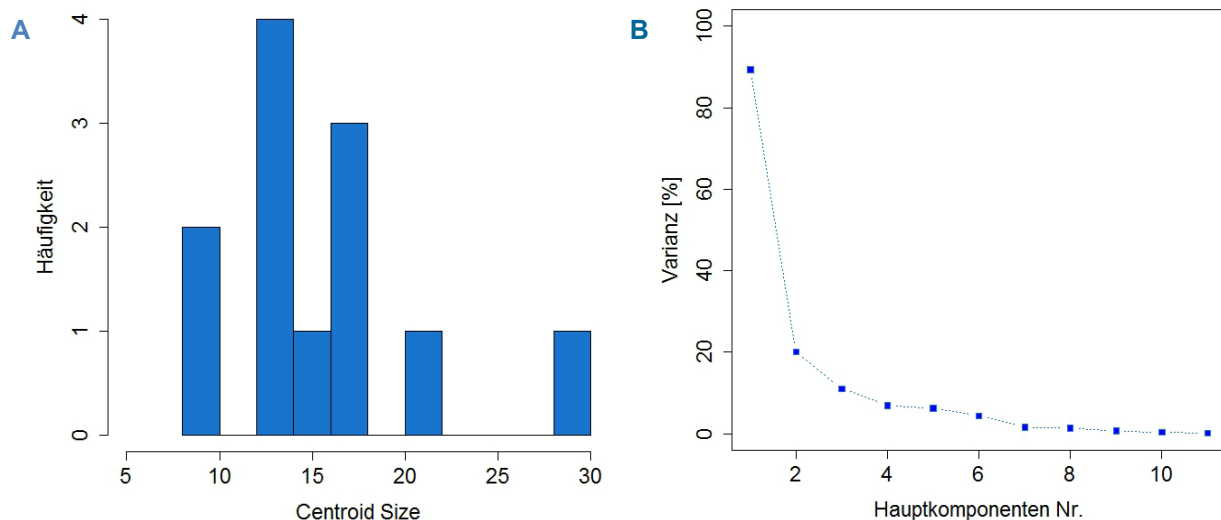


Abb. 57: Messergestalt

A Histogramm der *Centroid Sizes* zwischen 5 und 30 CS von allen zwölf Versuchsmessern.

B Screeplot mit den elf Hauptkomponenten der zwölf Messer in Bezug auf die Klingenmorphologie.

Die ersten drei Hauptkomponenten (PCs) der Durchschnittswerte jeder Klingenmorphologie erklärten 98,73 % der Variation zwischen den einzelnen Messern (Abb. 57B). Dabei erläuterte die **erste PC schon 92,67 % der Gesamtvarianz**. Diese Variation wurde durch die Länge der Messerklinge bis zu deren maximalen Breite repräsentiert. Die zweite PC beschrieb die Krümmung der Messerklinge und PC3 könnte die Position der Messerspitze ausgehend vom Messerrücken repräsentieren.

Die **prognostizierten Klingensformen** der jeweiligen Extremwerte von PC1 und PC2 sind in Abb. 58 dargestellt. Die Deformationsgitter illustrieren wie das Bild der Referenz-Konfiguration verzogen werden muss, um die jeweiligen Landmark-Konfigurationen zu erhalten. Den höchsten PC1-Wert besaß das Messer Nr. 7 mit einer ständig steigenden Klingebreite von der Messerspitze ausgehend. Den niedrigsten PC1-Wert wies das Messer 10 mit den zwei Messerspitzen und einer konstant breiten Klinge auf. Die stärkste Biegung der Messerschneide und somit der höchste PC2-Wert war bei Messer 2 festzustellen. Während Messer 1 und 10 die niedrigsten PC2-Werte verzeichneten.

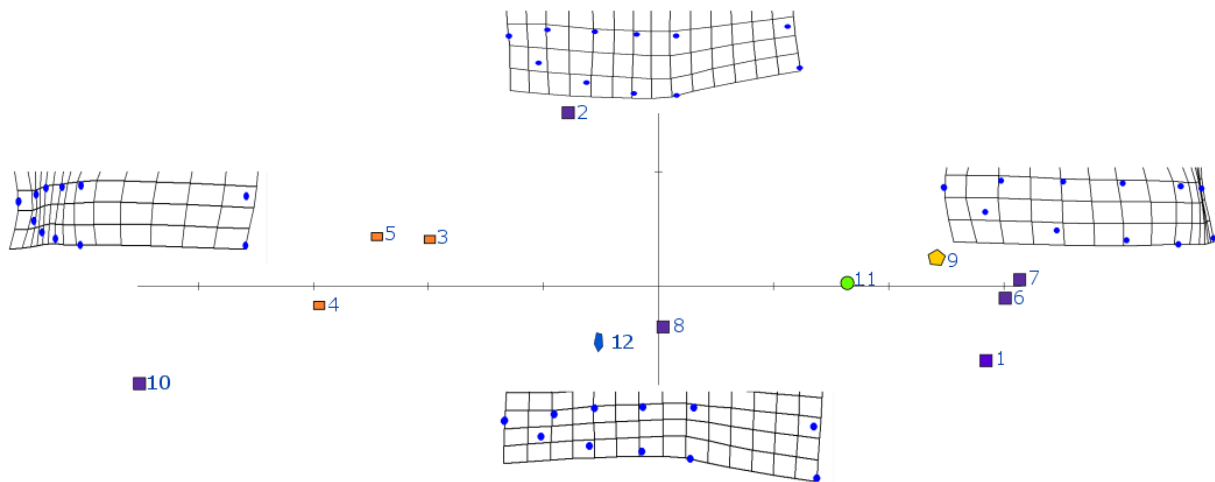


Abb. 58: Relative Warp der Messer

Verteilung der einzelnen Messer (■ = Haushaltsmesser, ⬠ = Jagdmesser, ◆ = Freizeitmesser, □ = Sektionsmesser, ● = Schere) anhand ihrer Mittelwerte von PC1 „Klingenlänge“ und PC2 „Klingenkrümmung“ mit den Thin-Plate Spline Visualisierungen der jeweiligen Extremwerte.

Aus Sicht der Messertypen gruppierten sich einzig die drei Sektionsmesser (Nr. 3-5) im *Relative Warp* zusammen. Die Haushalts- und Jagd- bzw. Freizeitmesser waren willkürlich verstreut. Der in Kapitel 2.1.2 beschriebene Unterschied zwischen dem Knorpelmesser I und II zeigte sich in der Grafik deutlich. Das Knorpelmesser II (Nr. 4) besitzt aufgrund der parallel verlaufenden Klingenkanten einen PC2-Wert von fast null. Die Messer 1, 6 und 7 dokumentierten einen hohen PC1-Wert. Während Messer 6 und 7 einen PC2-Wert um den Nullpunkt und somit eine sehr gerade Klingensform aufwiesen, besaß Messer 1 einen negativen PC2-Wert.

3.4.2 EINSTICHMERKMALE

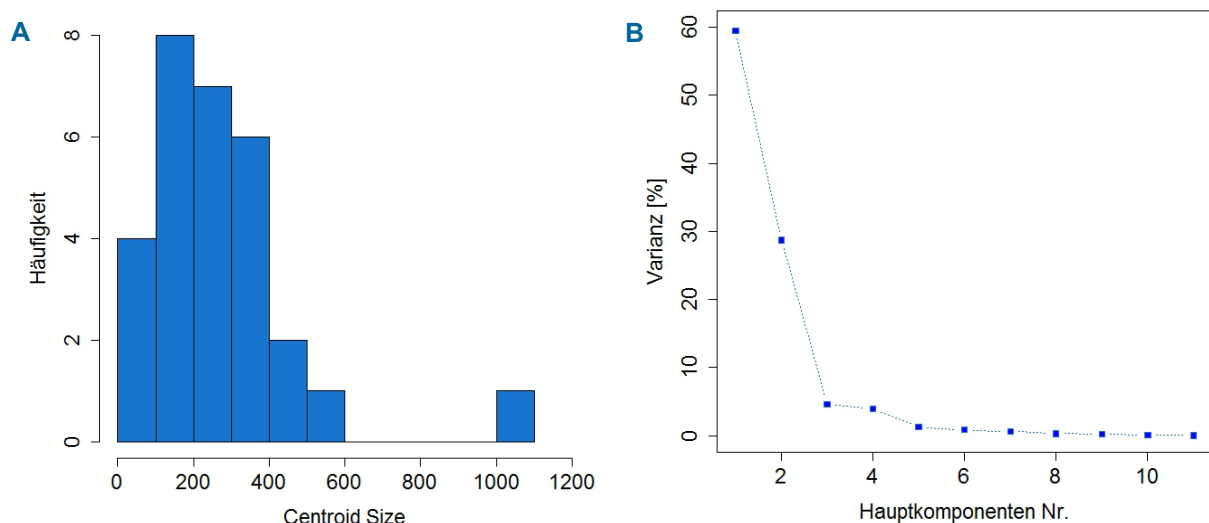


Abb. 59: Einstichgestalt

A Histogramm mit den Häufigkeiten der *Centroid Sizes* der 29 Einstiche von den ersten elf eingesetzten Versuchsmessern.

B Screeplot mit den elf Hauptkomponenten in Bezug auf die Einstichmorphologie.

Die *Centroid Size* der Knocheneinstiche beliefen sich auf 60,59 bis 1056,89 ($\bar{x} = 274,36$). Der erste Einstich in Rippe 1 hatte eindeutig die größte *Centroid Size* unter allen Rippeneinstichen. Etwa 72 % der Einstiche wiesen eine *Centroid Size* zwischen 126,37 und 386,36 auf (Abb. 59A).

Die ersten beiden PCs der durchschnittlichen Einstichmorphologie erklärten 88,21 % der Gesamtvarianz (Abb. 59B). Die **ersten vier PCs begründeten zusammen 96,69 % der Variation**. Während PC1 die Höhe der unmittelbaren Einstichöffnung im Verhältnis zum weiteren Verlauf der Einstichhöhe bzw. die Ausprägung des oberen Neigungswinkels darstellte, repräsentierte PC2 die Größe der Stichöffnung an der Knochenoberfläche. PC3 beschrieb die Wölbung des gesamten Einstichs und PC4 die Ausrichtung der Einstichöffnung bei gleichbleibender Lage des Einstichbodens (Abb. 60, 61).

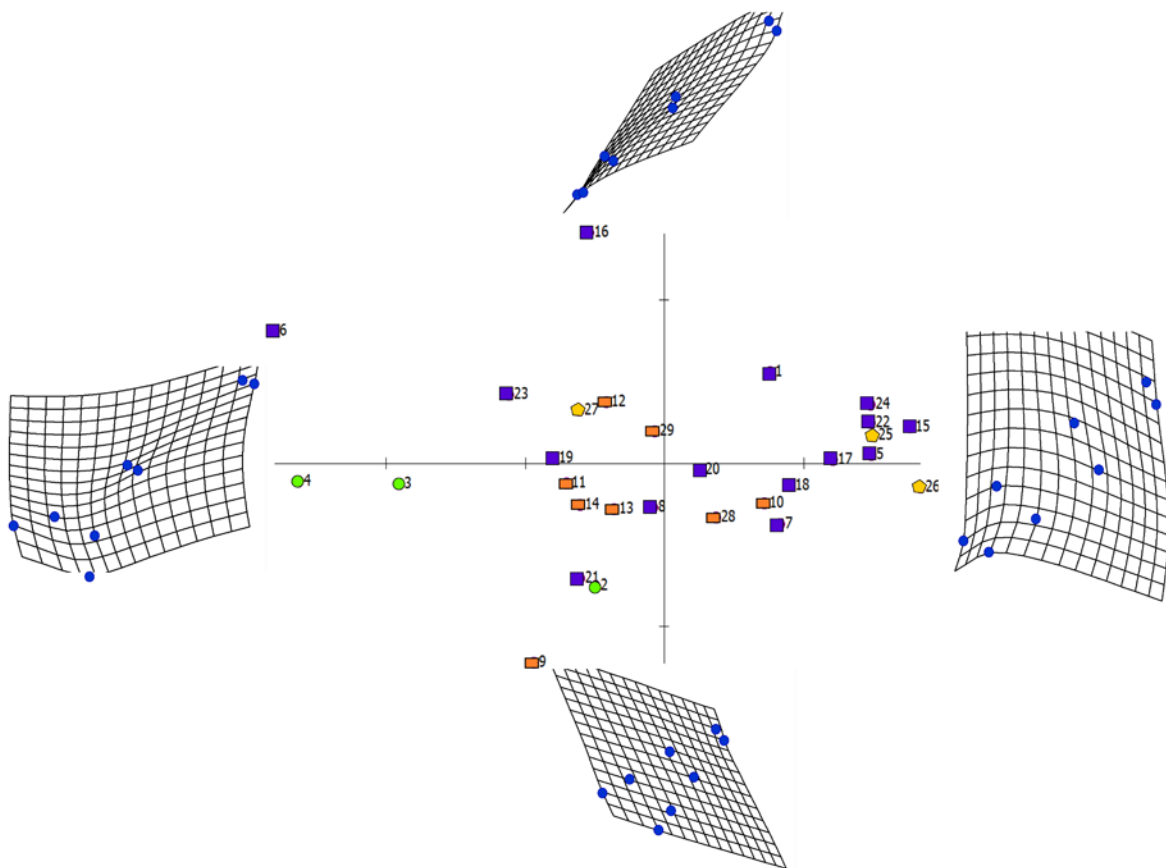


Abb. 60: Relative Warp der Einstiche mit PC2 und 3

Verteilung der einzelnen Einstiche von den verschiedenen Messertypen (■ = Haushaltsmesser, ◆ = Jagdmesser, □ = Sektionsmesser, ● = Schere) anhand der jeweiligen Mittelwerte in Bezug auf PC2 „Größe der Stichöffnung an der Knochenoberfläche“ und PC3 „Wölbung des Einstichs“. Die Thin-Plate Splines repräsentieren jeweils die beiden Einstichgestalten der Extremwerte.

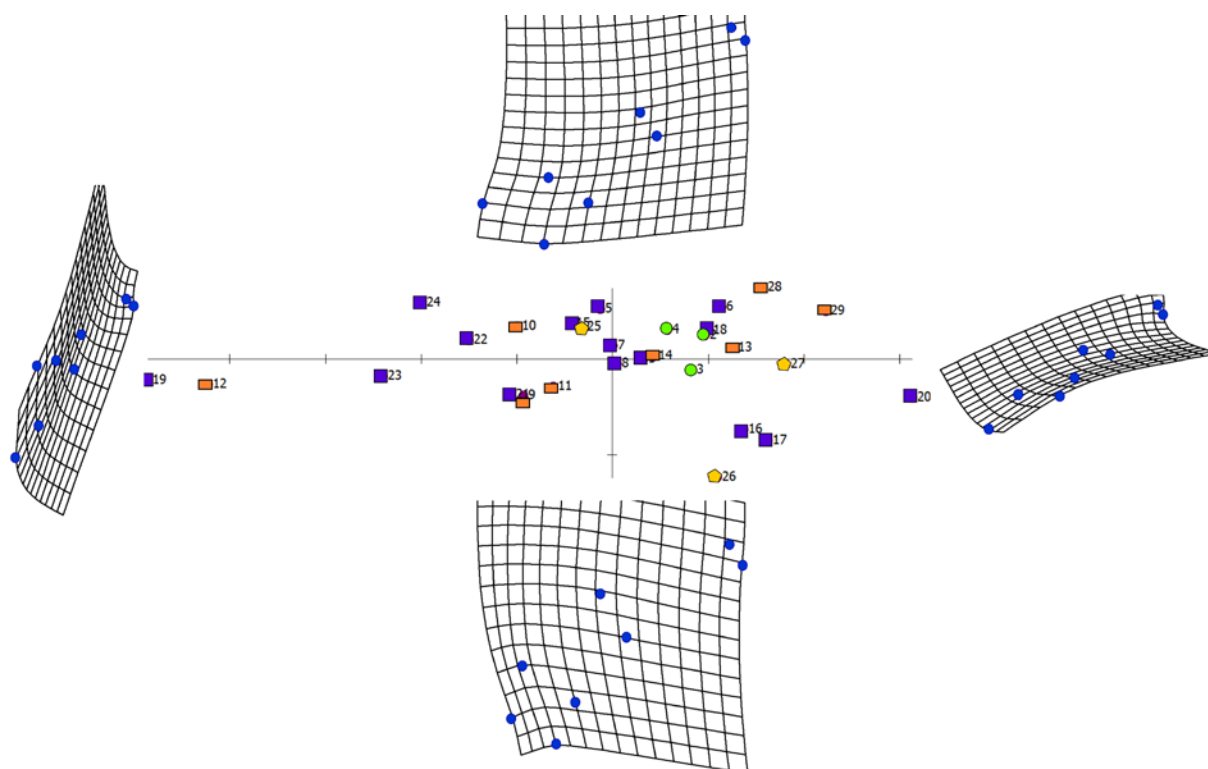


Abb. 61: Relative Warp der Einstiche mit PC1 und 4

Verteilung der einzelnen Einstiche von den verschiedenen Messertypen (■ = Haushaltsmesser, ◆ = Jagdmesser, □ = Sektionsmesser, ● = Schere) anhand der jeweiligen Mittelwerte in Bezug auf PC1 „Ausprägung des oberen Neigungswinkels“ und PC4 „Ausrichtung der Einstichöffnung“. Die Thin-Plate Splines repräsentieren jeweils die beiden Einstichgestalten der Extremwerte.

Hinsichtlich der *Centroid Size* waren die Einstiche der vier Messertypen – Schere, Jagd-, Haushalts-, Freizeit-, Sektionsmesser – auf dem 5 % Niveau nicht signifikant unterschiedlich (ANOVA: $n = 28$; $df = 3$; $F = 1,044$; $p = 0,391$). Es war lediglich eine Tendenz zu niedrigeren *Centroid Sizes* bei Einstichen der Schere im Vergleich zu dem Jagdmesser zu erkennen (Tabelle 33, Abb. 62).

Tabelle 33: Vergleich der Centroid Size

Ergebnisse des multiplen Vergleichs der *Centroid Size*-Mittelwerte der sechs möglichen Messerkombinationen mittels des Tukey's HSD-Tests. Mit steigendem Differenzwert nimmt der Signifikanzwert ab.

Messerkombinationen	Differenz	p
Jagdmesser – Schere	268,47426	0,3759465
Haushaltsmesser – Schere	170,74943	0,5480688
Jagdmesser – Sektionsmesser	154,66816	0,6691124
Sektionsmesser – Schere	113,80611	0,8355116
Jagdmesser – Haushaltsmesser	97,72484	0,8687139
Haushaltsmesser – Sektionsmesser	56,94332	0,9176141

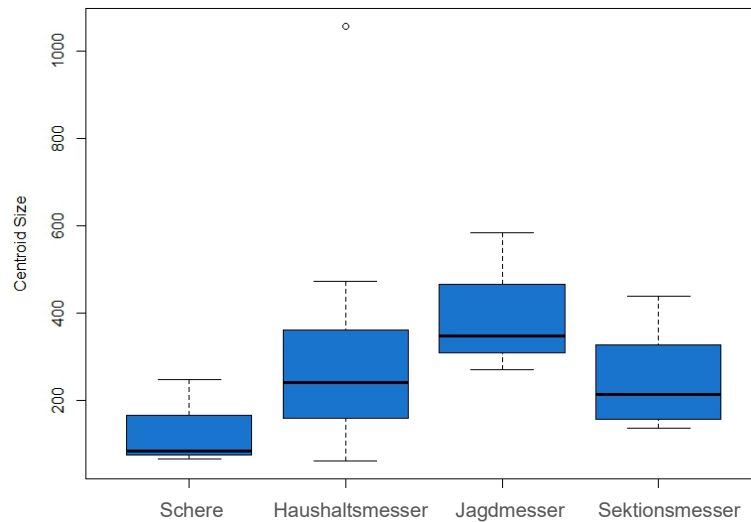


Abb. 62: Centroid Size der Einstiche von verschiedenen Messertypen vor Mazeration

Boxplot der Centroid Sizes von den Knocheneinstichen, die von den vier Messertypen Schere, Haushalts-, Jagd- und Sektionsmesser (n = 29) zugefügt wurden. Ein Outlier (1056,89 CS) stammte von einem Steakmessereinstich.

3.5 ZURÜCKVERFOLGUNG AUF KLINGENDICKE

3.5.1 KLINGENDICKE VS. EINSTICHHÖHE

Die in Kapitel 3.3.1 aufgelisteten Klingendicken zeigten sowohl unterschiedliche Zusammenhänge innerhalb der einzelnen Messer als auch innerhalb der einzelnen Messmethoden.

In Bezug auf die Vermessung der Einstichhöhe zeigte die maximale Höhe an der Knochenoberfläche eine insgesamt geringere Abweichung zur Klingendicke als die minimale Knocheneinstichhöhe. Tabelle 34 listet die Differenzen der beiden Höhenmaße von den μ CT-Aufnahmen vor der Mazeration im Vergleich zur Dicke der entsprechenden Messerklingen auf. Differenzwerte von kleiner 0,1 mm fanden sich nur bei Verwendung der maximalen Höhe (Werte in Tabelle fett hervorgehoben). Die geringste Differenz der minimalen Höhe betrug 0,172 mm bei Messer 1.

Tabelle 34: Gültigkeit der Messereinstichhöhe

Differenz 1 beschreibt die Abweichung der Klingendicke von dem berechneten Mittelwert der Knocheneinstichhöhe (KEH) für jedes Messer mittels μ CT-Aufnahmen. Differenz 2 beschreibt den Unterschied zwischen der Messerdicke und dem Mittelwert der maximalen Knocheneinstichhöhe (MKEH) per μ CT. Bis auf Messer Nr. 12 stammen die Durchschnittswerte alle von nicht-mazierten Rippen.

Messer Nr.	Klingendicke [mm]	KEH [mm]	Differenz 1 [mm]	MKEH [mm]	Differenz 2 [mm]
1	1,01	0,838	-0,172	1,225	+0,215
2	1,48	0,563	-0,917	1,536	+0,056
3	1,12	0,322	-0,798	0,588	-0,532
4	1,25	0,244	-1,006	0,849	-0,401
5	1,48	0,221	-1,259	0,441	-1,039
6	0,61	0,161	-0,449	0,241	-0,369
7	0,92	0,251	-0,669	0,844	-0,076
8	1,36	0,201	-1,159	0,404	-0,956
9	1,85	0,206	-1,644	0,731	-1,119
10	0,97	0,412	-0,558	1,176	+0,206
11	2,22	0,198	-2,022	2,114	-0,106
12	0,80	0,122	-0,678	0,688	-0,112
Mittelwert			-0,944		-0,353

Beim Vergleich der Klingendicke mit den per **Makrofotografie** und **REM** ermittelten maximalen Einstichhöhen wies die REM-Methode zwei Differenzwerte auf, die das Kriterium $< 0,1$ mm erfüllten, die Makrofotografie dagegen nur einen Wert (Tabelle 35). Nichtsdestotrotz zeigte die Durchschnittsdifferenz zwischen der maximalen Einstichhöhe von den Makroaufnahmen und der Klingendicke den kleinsten aller Mittelwerte. Während die einzelnen Differenzwerte unter

Verwendung der maximalen Einstichhöhe bei allen Methoden sowohl positive als auch negative Ergebnisse annahmen, lieferte die Klingendicke mittels minimaler Einstichhöhe ausschließlich negative Differenzwerte. Einheitlich größere Klingendicken wurden z. B. bei den ersten beiden Messern anhand der ermittelten maximalen Einstichhöhe per μ CT, REM und Makrofotografie prognostiziert.

Tabelle 35: Gültigkeit der makrofotografischen und REM-Messungen

Die Differenzen beschreiben die Abweichungen der Klingendicke von der durchschnittlichen maximalen Einstichhöhe per Makrofotografie bzw. Rasterelektronenmikroskopie.

Messer Nr.	Klingendicke [mm]	MKEH [mm] von Makro	Differenz 3 [mm]	MKEH [mm] von REM	Differenz 4 [mm]
1	1,01	1,13	+0,12	1,084	+0,074
2	1,48	1,80	+0,32	1,517	+0,037
3	1,12	1,51	+0,39	0,566	-0,554
4	1,25	-	-	-	-
5	1,48	0,38	-1,10	0,335	-1,145
6	0,61	0,40	-0,21	0,357	-0,253
7	0,92	0,67	-0,25	1,135	+0,215
8	1,36	0,55	-0,81	0,627	-0,733
9	1,85	1,62	-0,23	-	-
10	0,97	2,15	+1,18	0,260	-0,710
11	2,22	1,68	-0,54	0,405	-1,815
12	0,08	0,75	-0,05	0,669	-0,131
Mittelwert			-0,107		-0,502

Keine signifikanten Unterschiede und somit statistisch vergleichbare Mittelwerte zeigten sich zwischen der Klingendicke von Messer 1 und der Einstichhöhe mittels μ CT vor Mazeration, Makrofotografie sowie mittels REM (Mann-Whitney U-Test: $n = 14$; μ CT vor Maz.: $W = 28$; $p = 0,6529$; Makro: $W = 30$; $p = 0,4808$; REM: $W = 33$; $p = 0,2769$; Abb. 63A). Alle vier Messmethoden zeigten signifikant ähnliche Mittelwerte zwischen der jeweiligen Einstichhöhe und der Klingendicke von Messer 2 (Mann-Whitney U-Test: $n = 14$; μ CT vor Maz.: $W = 25$; $p = 0,9488$; μ CT nach Maz.: $W = 34$; $p = 0,2228$; Makro: $W = 12$; $p = 0,1087$; REM: $W = 18,5$; $p = 0,4408$; Abb. 63B).

Zwischen der Dicke von Messerklinge 3 und der ermittelten Einstichhöhe mithilfe von μ CT-Aufnahmen vor Mazeration wurden ebenfalls signifikant ähnliche Werte nachgewiesen (Mann-Whitney U-Test: $n = 14$; $W = 27,5$; $p = 0,7012$; Abb. 64A). Statistisch vergleichbare Mittelwerte zeigten sich zwischen der Klingendicke von Messer 4 und der Einstichhöhe mithilfe von makrofotografischen Aufnahmen (Mann-Whitney U-Test: $n = 14$; $W = 29$; $p = 0,5653$; Abb. 64B).

Die Klingendicke von Messer 7 und die Einstichhöhe der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen wiesen ebenso statistisch ähnliche Mittelwerte auf (Mann-Whitney U-Test: $n = 14$; $W = 27$; $p = 0,7494$; 65A). Zwischen der Klingendicke von Messer 10 und der Einstichhöhe zeigten sich sowohl bei der μ CT-Methode vor und nach Mazeration als auch bei der Makrofotografie signifikante vergleichbare Durchschnittswerte (Mann-Whitney U-Test: $n = 14$; μ CT vor Maz.: $W = 31$; $p = 0,4057$; μ CT nach Maz.: $W = 37$, $p = 0,1098$; Makro: $W = 28$; $p = 0,6544$; Abb. 65B).

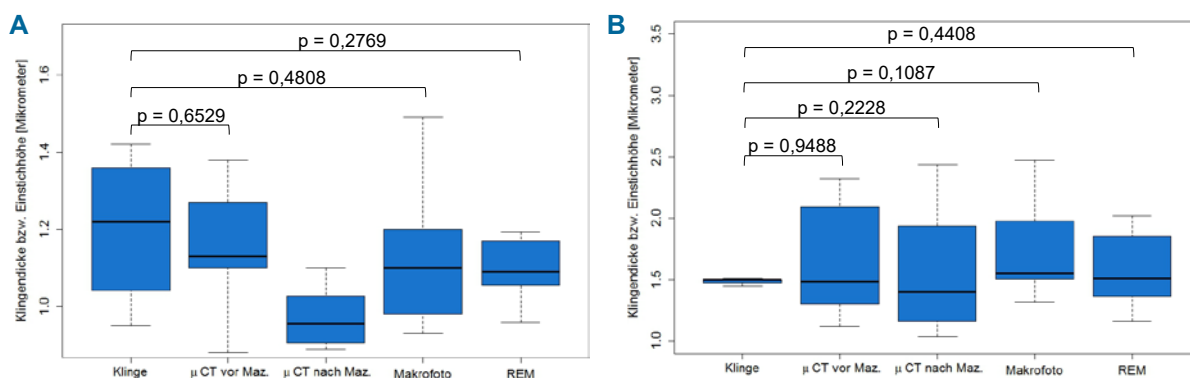


Abb. 63: Klingendicke des Messers Nr. 1 und 2 im Vergleich

- A** Der Boxplot legt die nicht signifikanten Unterschiede zwischen der Klingendicke von Messer 1 und der entsprechenden Einstichhöhe mittels μ CT vor Mazeration, Makrofotografie und REM dar (μ CT nach Maz.: Mann-Whitney U-Test: $n = 14$; $p = 0,01796$).
- B** Der Boxplot legt die nicht signifikanten Unterschiede zwischen der Klingendicke von Messer 2 und der entsprechenden Einstichhöhe aller vier Methoden dar (Mann-Whitney U-Test; $n = 14$).

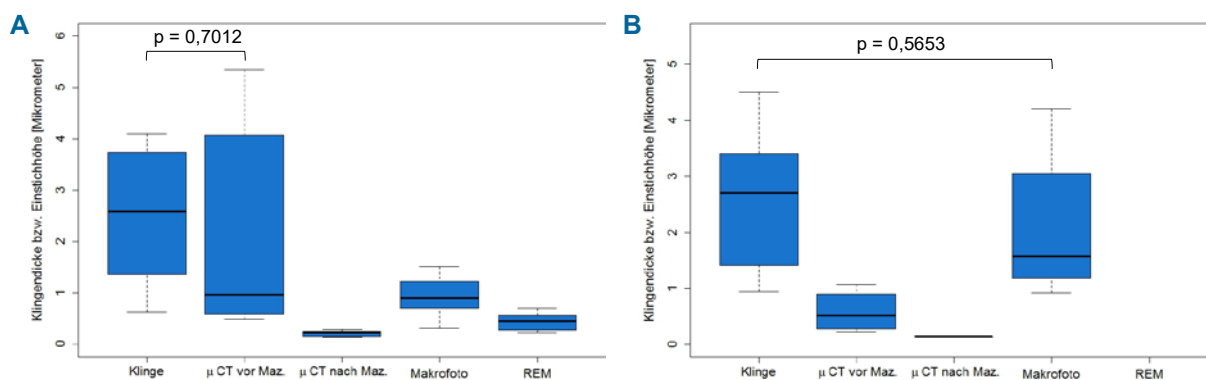


Abb. 64: Klingendicke des Messers Nr. 3 und 4 im Vergleich

- A** Der Boxplot legt die nicht signifikanten Unterschiede zwischen der Klingendicke von Messer 3 und der entsprechenden Einstichhöhe mittels μ CT vor Mazeration dar (Mann-Whitney U-Test; $n = 14$).
- B** Der Boxplot legt die nicht signifikanten Unterschiede zwischen der Klingendicke von Messer 4 und der entsprechenden Einstichhöhe mittels Makroaufnahmen dar (Mann-Whitney U-Test; $n = 14$).

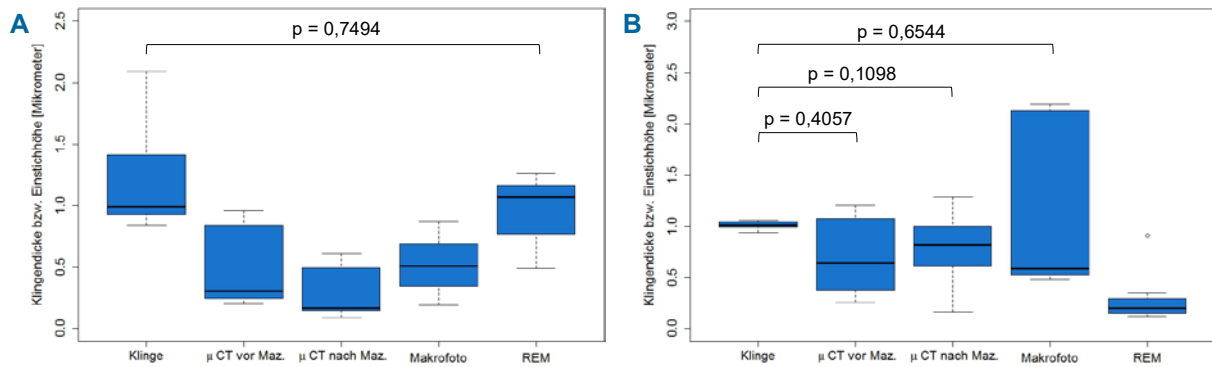


Abb. 65: Klingendicke des Messers Nr. 7 und 10 im Vergleich

A Der Boxplot legt die nicht signifikanten Unterschiede zwischen der Klingendicke von Messer 7 und dessen Einstichhöhe mittels REM-Aufnahmen dar (Mann-Whitney U-Test; $n = 14$).

B Der Boxplot legt die nicht signifikanten Unterschiede zwischen der Klingendicke von Messer 10 und dessen Einstichhöhe mittels μ CT vor und nach Mazeration sowie Makrofotografie dar (Mann-Whitney U-Test; $n = 14$).

Während die Klingendicke und die Einstichhöhe mittels μ CT vor Mazeration sowie mittels REM marginal korreliert waren (Pearson: μ CT vor Maz.: $t = 2,6752$, $df = 82$, $p = 0,00901$; $r = \mathbf{0,28333}$; REM: $t = -3,5252$; $df = 82$; $p = 0,0006956$; $r = \mathbf{0,36276}$), konnte zwischen der Klingendicke und den Einstichhöhen mittels μ CT nach Mazeration sowie mittels Makrofotografie keine signifikante Korrelation gefunden werden (Pearson: μ CT nach Maz.: $t = 0,99944$; $df = 82$; $p = 0,3205$; $r = \mathbf{0,1097031}$; Makro: $t = -0,027942$; $df = 82$; $p = 0,9778$; $r = \mathbf{0,0030857}$).

Hochsignifikante Korrelationen zwischen der ermittelten Einstichhöhe und der Klingendicke wurden bei den Messern 5 und 7 unter Verwendung des REMs sowie bei Messer 3 und 9 mittels μ CT vor Mazeration ermittelt (Tabelle 36).

Tabelle 36: Korrelation mit Klingendicke

Auflistung der signifikanten Pearson-Korrelationen zwischen den Klingendicken der Versuchsmesser und den vermessenen Einstichhöhen mittels der vier verschiedenen Messmethoden ($n = 84$); aufsteigend nach dem p-Wert.

	t	df	p	r
Messer 7 – REM	-6,5343	5	0,001256	-0,9461348
Messer 9 – μ CT vor Maz.	5,6131	5	0,002483	0,9289989
Messer 5 – REM	-5,0731	5	0,003857	-0,9150540
Messer 3 – μ CT vor Maz.	4,4114	5	0,006948	0,8919564
Messer 5 – μ CT nach Maz.	3,6487	5	0,01477	0,8526281
Messer 6 – μ CT vor Maz.	3,2187	5	0,0235	0,8212654
Messer 8 – μ CT vor Maz.	3,1217	5	0,0262	0,8129557
Messer 7 – μ CT nach Maz.	2,9819	5	0,0307	0,8000425
Messer 9 – μ CT nach Maz.	2,7147	5	0,0420	0,7718735

3.5.2 KLINGENWINKEL VS. EINSTICHWINKEL

Die ermittelten Einstichwinkel zeigten mit Ausnahme des Öffnungswinkels keine signifikanten Unterschiede zu den **Klingenspitzenwinkeln** der verwendeten Messer (Mann-Whitney U-Test: n = 96; ÖW: V = 1176; p = 1,631e-09; NWunten: V = 553; p = 0,7196; NWoben: V = 739; p = 0,1214; BW: V = 457; p = 0,1791). Vor allem der untere Neigungswinkel wies signifikant ähnliche Werte wie die Messerspitze auf (Abb. 66).

Der mittlere **Winkel der gesamten Klinge** war zu jedem der vier Einstichwinkel hochsignifikant unterschiedlich (Mann-Whitney U-Test: n = 96; ÖW: V = 1146; p = 1,046e-08; NWunten: V = 14; p = 3,927e-09; NWoben: V = 140; p = 4,329e-06; BW: V = 1; p = 1,738e-09; Abb. 66).

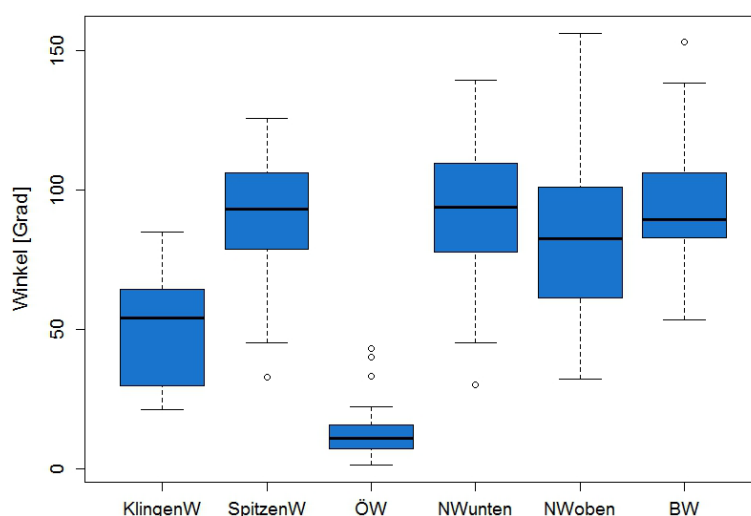


Abb. 66: Boxplot Klingenwinkel und Einstichwinkel aller Messer

Der Boxplot legt die nicht signifikanten Unterschiede zwischen den Klingenspitzenwinkeln der Messer und den unteren bzw. oberen Neigungs- sowie Bodenwinkeln dar (Mann-Whitney U-Test: n = 96; NWunten: V = 553; p = 0,7196; NWoben: V = 739; p = 0,1214; BW: V = 457; p = 0,1791).

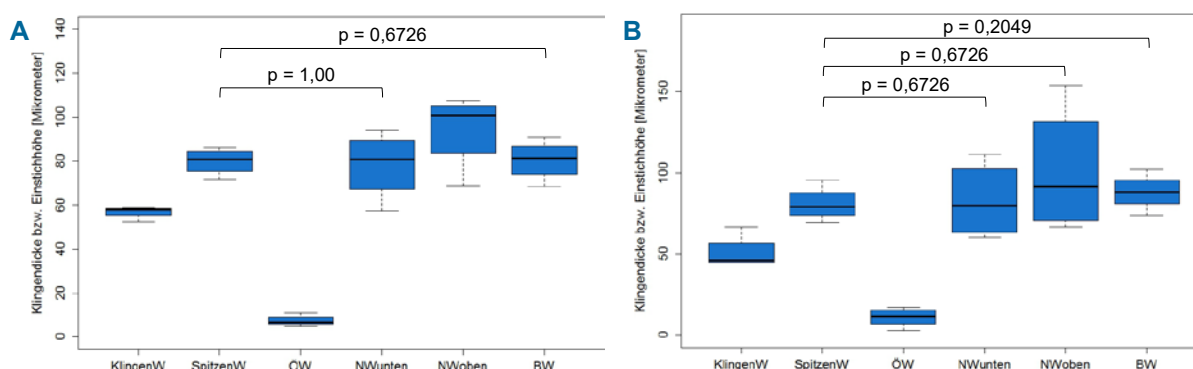


Abb. 67: Klingenwinkel des Messers Nr. 3 und 6 im Vergleich

A Der Boxplot legt die nicht signifikanten Unterschiede zwischen dem Klingenspitzenwinkel des Messers 3 und dem unteren Neigungs- bzw. Bodenwinkel dar (Mann-Whitney U-Test; n = 16).

B Der Boxplot legt die nicht signifikanten Unterschiede zwischen dem Klingenspitzenwinkel des Messers 6 und dem Bodenwinkel, unteren bzw. oberen Neigungswinkel dar (Mann-Whitney U-Test: n = 16).

Signifikante Gemeinsamkeiten wurden zwischen dem Winkel der Messerspitze 3 und dem Bodenwinkel bzw. unteren Neigungswinkel festgestellt (Mann-Whitney U-Test: $n = 16$; NWunten: $W = 32$; $p = 1$; BW: $W = 28$; $p = 0,6726$; Abb. 67A), ebenso wie zwischen dem Klingenspitzenwinkel 6 und dem Bodenwinkel, unteren bzw. oberen Neigungswinkel (Mann-Whitney U-Test: $n = 16$; NWunten: $W = 36$; $p = 0,6726$; NWoben: $W = 28$; $p = 0,6726$; BW: $W = 28$; $p = 0,6726$; Abb. 67B).

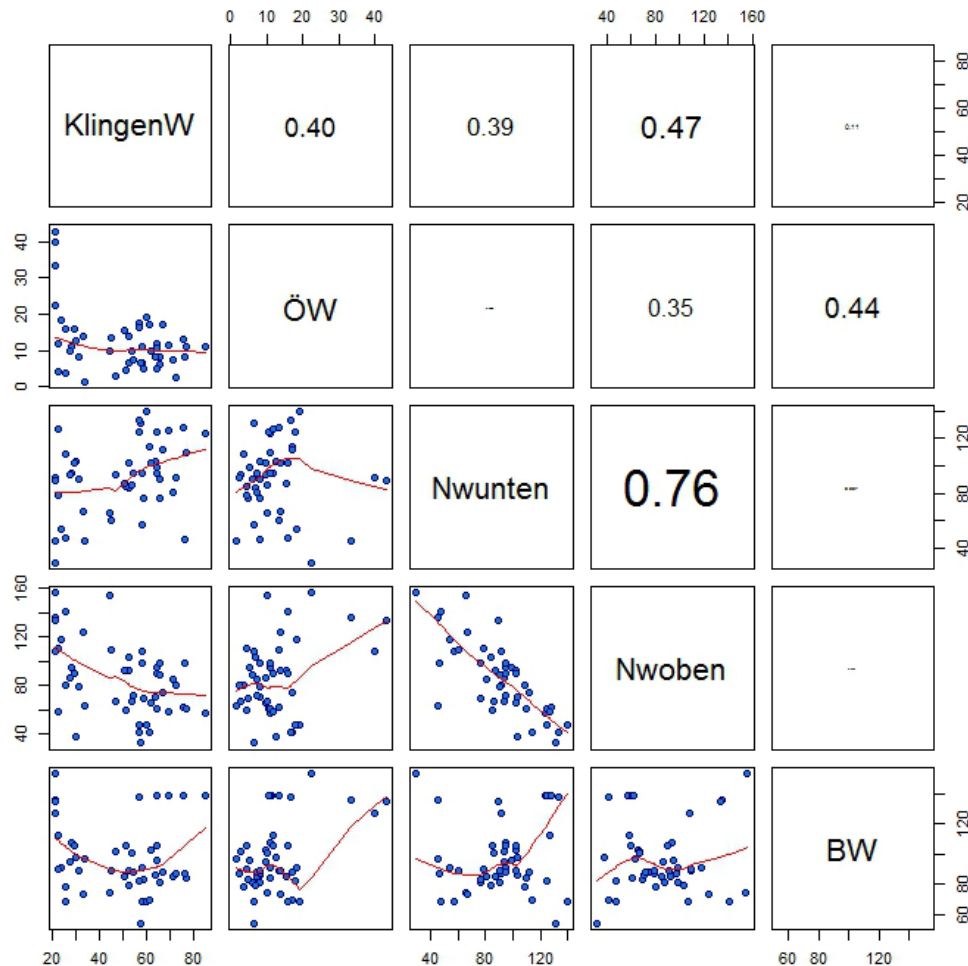


Abb. 68: Klingenspitzenwinkel und Einstichwinkel im Vergleich

Pairplot-Matrix mit den Öffnungs-, unteren bzw. oberen Neigungswinkeln (je 48 Werte) und den Klingenspitzenwinkeln der zwölf Messer. Die Schriftgröße der Korrelationskoeffizienten spiegelt den absoluten Wert der jeweiligen Korrelation wider.

Zwischen den unteren bzw. oberen Neigungswinkeln sowie den Öffnungswinkeln der Einstiche und den **Klingenspitzenwinkeln** konnten keine signifikanten Korrelationen festgestellt werden. Lediglich der Bodenwinkel und der Winkel der Klingenspitze korrelierten signifikant miteinander (Pearson: $n = 96$; $t = 2,7419$; $df = 46$; $p = 0,008674$; $r = 0,3747973$).

Mit dem **Winkel der gesamten Messerklinge** korrelierten dagegen alle Einstichwinkel mit Ausnahme des Bodenwinkels (Pearson: $n = 96$; ÖW: $t = -2,9276$; $df = 46$; $p = 0,005296$, $r = -0,3963016$; NWunten: $t = 2,8789$; $df = 46$; $p = 0,006038$, $r = 0,390723$; NWoben: $t = -3,6193$; $df = 46$; $p = 0,007325$; $r = -0,4708011$; Abb. 68).

Tabelle 37: Korrelation mit Klingenwinkeln

Auflistung der signifikanten Pearson-Korrelationen zwischen den Klingenwinkeln der Versuchsmesser und den vier ermittelten Winkeln der Rippeneinstiche (n = 48); aufsteigend nach dem p-Wert.

	t	df	p	r
Messer 7 – NWunten	10,948	6	3,449e-05	0,9758707
Messer 1 – BW	10,953	6	1,171e-05	0,9720420
Messer 2 – BW	-8,4715	6	0,0001479	-0,9606483
Messer 1 – NWunten	8,7847	6	4,992e-05	0,9575150
Messer 12 – NWunten	-7,0143	6	0,0004188	-0,9440902
Messer 7 – NWoben	-6,9682	6	0,0004341	-0,9434097
Messer 5 – ÖW	-6,8061	6	0,000493	-0,9409190
Messer 5 – NWunten	-4,2524	6	0,005366	-0,8665209
Messer 6 – NWunten	3,89	6	0,008077	0,8462108
Messer 10 – BW	-3,6625	6	0,01055	-0,8312323
Messer 10 – NWoben	3,2231	6	0,01807	0,7961723
Messer 10 – NWunten	-3,1656	6	0,01943	-0,7908816
Messer 1 – ÖW	2,9769	6	0,02061	0,7474553
Messer 10 – ÖW	2,5082	6	0,04602	0,7154236

Hochsignifikante Korrelationen zwischen den ermittelten unteren Neigungswinkeln und den **Klingenwinkeln** wurden bei Messer 1, 5, 6, 7 und 12 festgestellt (Tabelle 37). Bei Messer 7 korrelierte der Klingenwinkel gleichzeitig auch hochsignifikant mit dem oberen Neigungswinkel. Der Bodenwinkel korrelierte hochsignifikant bei Messer 1 und 2 sowie der Öffnungswinkel bei Messer 5 mit den Klingenwinkeln der entsprechenden Messer.

Die **Klingenspitzenwinkel** von Messer 1, 3, 9 und 10 zeigten eine hochsignifikante Korrelation zu den jeweiligen unteren Neigungswinkeln der Einstiche (Tabelle 38). Der obere Neigungswinkel korrelierte hochsignifikant mit dem Winkel der Klingenspitzen von Messer 2 und 10. Während der Klingenspitzenwinkel mit dem Bodenwinkel der Einstiche von Messer 1, 3, 6, 7, 8, 10 und 11 hochsignifikant korrelierte, wies der Öffnungswinkel nur bei Einstichen durch Messer 3 eine hochsignifikante Korrelation zu dessen Klingenspitze auf.

Tabelle 38: Korrelation mit Klingenspitzenwinkeln

Auflistung der signifikanten Pearson-Korrelationen zwischen den Klingenspitzenwinkeln der Versuchsmesser und den vier ermittelten Winkeln der Rippeneinstiche (n = 48); aufsteigend nach dem p-Wert.

	t	df	p	r
Messer 10 – NWoben	22,311	6	5,303e-07	0,9940272
Messer 10 – NWunten	-19,13	6	1,320e-06	-0,9919014
Messer 9 – NWunten	14,593	6	6,499e-06	0,9862021
Messer 1 – NWunten	14,233	6	2,008e-06	0,9831573
Messer 6 – BW	12,419	6	1,665e-05	0,9810974
Messer 7 – BW	8,5705	6	0,0001386	0,9615011
Messer 8 – BW	-8,2609	6	0,0001702	-0,9587405
Messer 10 – BW	-7,0642	6	0,0004030	-0,9448127
Messer 1 – BW	7,4043	6	0,0001489	0,9416865
Messer 3 – NWunten	-6,1809	6	0,0008248	-0,9296588
Messer 2 – NWoben	4,4834	6	0,004177	0,8775663
Messer 3 – BW	-4,4801	6	0,004192	-0,8774177
Messer 3 – ÖW	-4,1965	6	0,005708	-0,8636424
Messer 6 – NWoben	-4,0791	6	0,006509	-0,8573044
Messer 11 – BW	3,7476	6	0,009536	0,8370591
Messer 8 – ÖW	3,6684	6	0,01047	0,8316429
Messer 1 – NWoben	3,1549	6	0,01604	0,7662226

4 DISKUSSION

Die vorliegende Arbeit untersuchte mechanische Knochentraumata durch scharfe Gewalt an Rippen. Diese Traumata können durch Kompressions- oder Scherkräfte entstehen, welche dynamisch auf einen umschriebenen Bereich einwirken (Lynn & Fairgrieve 2009a). Tiefe Stichverletzungen hinterlassen dabei Werkzeugspuren an Knorpel und Knochen. Während Burd & Kirk (1942) behaupten, dass weder zwei verschiedene Werkzeuge noch ein und dasselbe Instrument bei mehreren Einstichen identische Werkzeugspuren hinterlassen, definieren Capuani et al. (2014) einzigartige Klassenmerkmale in Knochenverletzungen durch scharfe Gewalt. Die gegenständliche Studie untersucht die morphologischen Auswirkungen von unterschiedlichen Messern auf Schweinerippen. Rippen sind neben dem Brustbein und dem Schulterblatt die am häufigsten verletzten Knochen bei tief reichenden Stich-/Schnittwunden (Grassberger et al. 2009).

Neben der Klingendicke und Schärfe des Messers sind viele mechanische Parameter während dem Zusteichen von großer Bedeutung. Für reproduzierbare Ergebnisse wurden in gegenständlicher Studie so viele Parameter wie möglich einheitlich festgesetzt. Hierzu zählen die Knochenstruktur, die Ausrichtung der Messerklinge, die Auftreffgeschwindigkeit des Messers in die Schweinerippen und somit auch die Krafteinwirkung auf den Knochen.

Sticht ein Messer mit moderater Krafteinwirkung in einen großflächigen Knochen, sodass die Klingenspitze nur bis zur Spongiosa vordringt und in Scans der vollständige Umriss der Spitze im Einstich abgebildet wird, lassen sich dessen Größe und Form relativ gut rekonstruieren (Thali et al. 2003, Gaudio et al. 2014). Tritt die Messerspitze jedoch am anderen Ende des Knochens wieder aus, kann höchstens auf die Klingendicke geschlossen werden. Trifft das Messer zwischen zwei Rippen, enthalten die Knocheneinstiche lediglich Informationen über die Klingenschneide und/oder den -rücken. Da der Zwischenrippenraum aus elastischer Muskulatur besteht, kann er als flexibel angesehen werden. Ohne eine konstante, bekannte Breite des Intercostalraums, können keine Rückschlüsse auf die Klingbreite gezogen werden (Grassberger 2015). Ist die Einstichtiefe zu gering, wird lediglich Weichgewebe (Haut und Muskel) verletzt.

Inwieweit Hinweise auf das verwendete Messer trotzdem möglich sind, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit überprüft. In diesem Zusammenhang wurde der Einsatz ausgewählter Untersuchungsmethoden analysiert. Hierzu wurden die Einstichproportionen in den Rippen anhand von verschiedenen Variablen (Distanzen und Winkeln) sowohl zwischen den jeweils verwendeten Messern als auch zu den eingesetzten Untersuchungsmethoden verglichen.

4.1 VERWENDUNG EINES FALLBEILS

Nicht-axiale Kräfte und Drehmomente sind insbesondere mit mechanischen Methoden wie einem Fallbeil nur schwer bis gar nicht zu simulieren. Da es sich bei einem Messerangriff in der Regel um eine zufällige Abfolge von Bewegungsabläufen und Krafteinwirkungen handelt, kann eine Manipulation (z.B. Drehbewegungen) des Messers während dem Zustechen nur sehr schwer nachgestellt werden. Während beim Menschen der Impuls und die Energie des Zustechens aus mehreren wirkenden Massen zusammengesetzt sind, bewegt sich bei einem Fallbeil pro Versuch immer nur eine einheitliche Masse (Chadwick et al. 1999, Ferllini 2012). In Bezug auf reale Fälle wäre somit händisches Zustechen aussagekräftiger als ein streng kontrolliertes Experiment ohne potenzielle Nebeneffekte.

Krafteinwirkung

Ein Messer nimmt in der Guillotine – ähnlich einem per Hand ausgeführten Messerstich – zu Beginn des Falls schnell an **Geschwindigkeit** zu, wird mit der Höchstgeschwindigkeit aber genauso schnell wieder abgebremst. Bei freiwilligen Testpersonen in der Studie von Chadwick et al. (1999) zeigen sich dagegen zwei Peaks in dem erstellten Axialkraft-Zeit-Profil (Abb. 69). Dies könnte auf den zeitversetzten Stillstand zwischen Messer und agierendem Arm zurückzuführen sein. Die Eindringkraft des Messers variiert zusätzlich beträchtlich in ihrer Stärke, je nachdem wie groß der **Widerstand** durch das Weichgewebe und die Kleidung ist, welche Art von Messer gewählt wird und was für eine Statur der Angreifer bzw. das Opfer besitzt (Gilchrist et al. 2008).

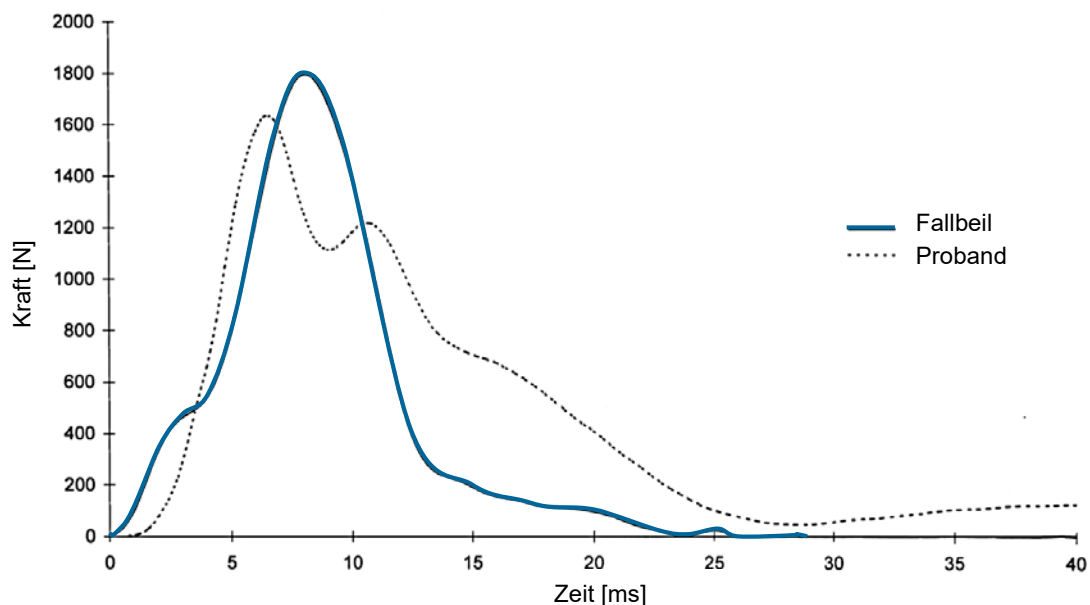


Abb. 69: Axialkraft-Zeit-Profil eines Messerstiches

Vergleich zwischen der Axialkraft durch ein Fallbeil und einen Menschen (Proband) beim Zustechen im Verlauf von 40 Millisekunden (verändert nach Chadwick et al. 1999).

Modifizierte Versuchsmesser

Für die Verwendung eines Fallbeils spricht der Erhalt von reproduzierbaren Ergebnissen. Mit dem Verzicht auf mechanische Methoden beim Zusteichen gehen auch Nachteile einher. So werden z.B. mit Messern, in deren Heft ein **Kraftmessumformer** eingebaut wird und mit denen händisch auf die Proben eingestochen wird, nur Kräfte in Richtung des Stiches von dem Messgerät aufgezeichnet. Alle anderen Kräfte, die in eine leicht abweichende Richtung wirken bzw. Drehbewegungen, werden nicht dokumentiert.

Horsfall et al. (2005) bewiesen, dass mit einem **Fingerschutz** vor der Klinge die auf das Objekt einwirkende Energie um etwa 5 J gesteigert werden kann im Vergleich zu einem Griff ohne Schutz, da durch den Fingerschutz die Gesamtenergie erhöht wird, die in das Zusteichen eingebracht werden kann. Dies ist vor allem durch den besseren Halt der Hand am Griff und dem vorhandenen Widerstand, gegen den Kraft ausgeübt werden kann, zu erklären. Diese Beobachtung bestätigt die Annahme, dass die Impulsübertragung während einem Messerstich seriell stattfindet. Zuerst erfolgt eine Kraftübertragung durch den Griff und danach hauptsächlich durch den Fingerschutz. Halten die Probanden das Heft einige Zentimeter von dem Fingerschutz entfernt fest, erhöht sich der Zeitraum, in dem die Aufprallenergie auf das Ziel übertragen wird, im Vergleich zu einem engen Kontakt zwischen Hand und Fingerschutz von Beginn an. Der Grund hierfür liegt in der zusätzlichen Zeit, die für das Rutschen der Hand bis zum Fingerschutz benötigt wird.

Im Gegensatz zur Position des Fingerschutzes relativ zum Griff haben die Größe und Form des Griffes keinen Einfluss auf die Energieintensität. Die größten Schwankungen innerhalb der Messerstiche sind jedoch auf die **persönlichen Leistungen** der einzelnen Teilnehmer zurückzuführen.

4.2 AUSWERTUNG MITTELS MORPHOMETRISCHER SOFTWARE

Im Hinblick auf die morphometrische Auswertung wurde die Eignung der Software-Programme Amira, tps und Morpheus – die sonst z.B. bei der Segmentierung und dem geometrisch morphometrischen Vergleich von Schädeln Anwendung finden – auf ihre Anwendbarkeit bei der Analyse von experimentell zugefügten Rippenverletzungen und Messerklingen getestet.

Amira

Neben Distanz- und Winkelmessungen erlaubt Amira das **Volumen des Einstichs** für den Bereich zu bestimmen, der in die Rippe eingedrungen ist. Eine morphometrische Analyse anhand von Landmarks und Kurven entlang der Einstichkonturen war in Amira aufgrund der stark variierenden Gestalt der Einstiche nicht möglich (s. Kapitel 4.7).

Die Option *Orthoslices* ermöglicht einen **Blick in das Innere der Knochen**. Während kleine Stichverletzungen, die vorwiegend die *Substantia compacta* durchstachen, im Querschnitt V-förmige Stichmarken hinterließen, stellen sich großflächige Verletzungen am Knochen langgestreckt und U-förmig dar.

Tps und Morpheus

Mithilfe der kostenlosen Softwareprogramme tps und Morpheus gestalteten **Relative Warps** eigneten sich ideal zur morphologischen Beschreibung und Einordnung der Versuchsmesser und Rippeneinstiche. Die beobachtete Clusterbildung der drei Sektionsmesser könnte jedoch bei einer größeren Auswahl dieses Messertyps gegenstandslos werden. Innerhalb der Haushaltsmesser konnten bei den Messern 1, 6 und 7 ebenfalls ähnliche Hauptkomponentenwerte und somit eine Gruppierung festgestellt werden. Die anderen drei Haushaltsmesser lagen jedoch im *Relative Warp* deutlich außerhalb dieses hypothetischen Clusters. Die ersten Hauptkomponenten der Einstichmorphologie charakterisieren die Größe und Ausrichtung der Einstichöffnung sowie die Wölbung des vollständigen Einstichs im Knochen. Für eine eindeutige Zuordnung des Tatmessers reichen die jetzigen Kenntnisse jedoch noch nicht aus. Auch anhand der **Centroid Size** der Einstiche konnte keinerlei Aussage über das verwendete Tatwerkzeug getroffen werden.

Bisher stammen die relevanten Ergebnisse aus metrischen Analysen von Amira. Dies ist vor allem der fehlenden Korrelation zwischen der Einstichgestalt und der Klingendicke geschuldet. Ein signifikanter Zusammenhang konnte zwar zwischen der Einstichgestalt und dem Winkel der Klingenspitze festgestellt werden, doch gelang es nicht eine generelle Anleitung zu formulieren, mit der bei jeder beliebigen Stichwunde auf den vorderen Klingenwinkel des Tatmessers geschlossen werden kann.

Von den beiden Programmen tps und Morpheus ist erstgenanntes das morphometrisch entscheidende, da mit diesem Programm *Relative Warps* und **Deformationsgitter** angefertigt

werden sowie die Gestaltvariablen mit den Messparametern verglichen werden können. Für die Erstellung von Semilandmarks und die Durchführung einer *Superimposition* mit den gesammelten Daten ist Morpheus jedoch unerlässlich.

Bei der **Ausmessung von Distanzen** anhand von Bildmaterial in tps-Dig2 ist die Präzision immer von der Einstellung des Messwerkzeugs abhängig. Liegt das verwendete Winkellineal oder der Maßstab im Foto nicht auf exakt derselben Höhe und im gleichen Winkel wie der auszumessende Einstich, muss mit Abweichungen gerechnet werden. Auch wenn bei der Makrofotografie der Maßstab mittels einer flexiblen Vorrichtung bei jeder Aufnahme in die Abbildungsebene gebracht wurde, könnten bei dieser Methode die stärksten Abweichungen zur tatsächlichen Größe aufgetreten sein. Die μ CT- und REM-Aufnahmen waren dagegen unbeeinflusst vom subjektiven Augenmaß.

Deskriptive Statistik

Die deskriptive Statistik zeigte, vier entscheidende Ergebnisse:

1. Die Einstichgestalt ist von der Position und Größe der Auftrefffläche an der Rippe abhängig (s. Kapitel 4.7).
2. Beim Vergleich der Einstiche vor und nach der Mazeration mittels μ CT und der Software Amira zeigten sich geringe, aber signifikante Abweichungen bei der Einstichhöhe (s. Kapitel 4.5)
3. Die Einstichhöhe korreliert bei der Hälfte der Messer signifikant mit der Klingendicke des jeweiligen Tatmessers (s. Kapitel 4.3.1)
4. Im Vergleich der drei verwendeten bildgebenden Verfahren (μ CT, Makrofotografie und REM) weichen nur die Messwerte der minimalen Knocheneinstichhöhe, die mittels der makrofotografischen Aufnahmen festgehalten wurden, von den Höhenwerten der anderen beiden Verfahren ab.

Bei diesem signifikanten Unterschied könnte vermutet werden, dass dieser auf die Rippenbrüche nach Mazeration zurückzuführen ist. Denn aufgrund der Rippenbrüche mussten die einzelnen Rippenfragmente für die fotografischen Aufnahmen manuell zusammengefügt werden. Wären die signifikanten Unterschiede auf die Rippenbrüche und das manuelle Zusammenhalten der Rippenfragmente zurückzuführen, hätte dies jedoch höchstwahrscheinlich auch Auswirkungen auf die maximale Knocheneinstichhöhe gehabt. Zwischen den Verfahren unterschieden sich die maximalen Höhenwerte allerdings nicht signifikant.

Auf die Vermessung von Einstichen an Bruchstellen wurde außerdem einheitlich bei allen drei Methoden nach der Mazeration verzichtet, wenn die Messparameter nicht präzise bestimmt werden konnten.

4.3 MÖGLICHKEIT DER ZUORDNUNG EINER TATWAFFE

Scheren als Tatwaffe

Für eine große Bandbreite der Einstichmorphologie wurden zwölf unterschiedlich konfigurierte Tatwerkzeuge verwendet. Darunter befand sich auch eine Schere. Wird eine Schere als Tatwerkzeug benutzt, werden in den häufigsten Fällen deren Fingeröffnungen wie für den alltäglichen Gebrauch vorgesehen genutzt. Im Falle eines „Underarm“-Angriffes werden die Finger in gleicher Weise in den Fingeröffnungen positioniert wie beim Papierschneiden. Im Falle eines „Overarm“-Angriffes befindet sich nicht der Zeigefinger in unmittelbarer Nähe zu den beiden Klingen, sondern der kleine Finger der zustechenden Hand. Dabei ist die Schere nur vereinzelt ganz geschlossen. Bei übereinanderliegenden Klingen verursachen diese nur einen einzigen Stichkanal und hinterlassen meist eine S-förmige Einstichwunde. Vorwiegend stehen die Klingen jedoch auseinander und bilden zwei Einstiche, die je nach Öffnungsstand der Schere vollständig getrennt voneinander auftreten oder erst im subkutanen Fettgewebe und der Haut zusammenlaufen (Riviello 2010, Grassberger 2015).

In vorliegender Studie wurde nur mit einer Scherenhälfte zugestochen. Die Klinge der geöffneten Schere hinterließ eine nahezu quadratische bis L-förmige Einstichform im Knochen. Hinsichtlich der maximalen Einstichhöhe, den Öffnungs- und oberen Neigungswinkeln zeigte die Schere im Vergleich zu allen anderen Messern signifikant unterschiedliche Messwerte und erlaubte somit einen Rückschluss auf den Scherenstich (s. Kapitel 3.1.3 und 4.3.3). Die verwendete Schere hinterließ typischerweise Einstiche mit einer signifikant großen maximalen Höhe und gleichzeitig einer sehr kleinen Länge und Breite. In Bezug auf die Winkelparameter besaß der Schereneinstich einen signifikant großen Öffnungswinkel und oberen Neigungswinkel, während der durchschnittliche Bodenwinkel verhältnismäßig klein war. Diese Annahmen gründen allerdings auf Einstichcharakteristika von nur einer einzigen Schere. Es wäre denkbar, dass andere Haushaltsscheren eine abweichende Morphologie aufzeigen.

Aufgrund der polymorphen Verletzungsmuster fällt eine Definition von individuellen diagnostischen Merkmalen der anderen Messer bzw. Messertypen schwer. Das Spektrum an analysierten Mustern reichte von winzigen Penetrationsmarken im kortikalen Knochen bis hin zu einer fast vollständigen Zweiteilung der Rippe.

Bestimmtheitsmaß

Das korrigierte Bestimmtheitsmaß (R^2) nimmt sowohl beim Vergleich der gemessenen Distanzen **zwischen μ CT und REM** (0,83-0,97) als auch bei den gemessenen Distanzen bzw. Winkeln **vor und nach Mazeration** (0,98-0,99) einen sehr hohen Wert an. Somit kann in diesen Korrelationen über 83 % der Messwerte durch das angegebene lineare Modell erklärt werden. Dies hilft bei der Identifizierung des Tatmessers, wenn nur mazerierte Knochen vorhanden

sind. Mithilfe von Formel 4 kann mit 99-prozentiger Genauigkeit von den an μ CT-Aufnahmen ausgemessenen Distanzen der mazerierten Rippen auf das jeweilige Maß bei einer nicht-mazerierten Rippe geschlossen werden. Formel 5 liefert zu 98 % den entsprechenden Winkel der nicht-mazerierten Rippe. Dazu wird der an einer mazerierten Rippe gemessene Wert in der jeweiligen Formel für x eingesetzt und y (für den Wert vor der Mazeration) berechnet. Diese Formeln erlauben vor allem im Hinblick auf die MKEH bzw. Klingendicke eine **genauere Angabe über das potenzielle Tatwerkzeug**.

$$y = 0,9967x + 67,1098 \quad (4)$$

$$y = 0,9896x + 0,4226 \quad (5)$$

Deutlich geringere R^2 -Werte wurden dagegen beim Vergleich der Höhen und Längen zwischen μ CT und Makrofotografie (0,03-0,30), beim Vergleich zwischen den Neigungswinkeln und der maximalen Einstichhöhe (0,09-0,14), beim Vergleich zwischen dem Öffnungswinkel und den Distanzen (0,07-0,09) sowie beim Vergleich der gesamten Distanzen und Winkeln (0,09-0,34) mit dem μ CT vor Mazeration festgestellt. Mindestens 65 % der Messwerte konnten demnach nicht mit dem jeweiligen Regressionsmodell erklärt werden.

4.3.1 GRÖÖE UND GESTALT DES MESSERS

Insgesamt müssen bei der Interpretation der Daten die hohen **Standardabweichungen** berücksichtigt werden (s. SD in Tabellen 62-84 im Anhang). Die große Spanne an Werten für die Einstichhöhe kann in der Klingendicke nicht im selben Maße wiedergefunden werden. Während die Messerklingen mit einer angedeutet flammenförmigen Einstichform (Nr. 3, 4, 5 und 8; Abb. 70) die **variabelsten Klingendicken** aufweisen, zeigten die Einstiche von Messer 2 und 9 die mit Abstand größten Standardabweichungen in der maximalen Einstichhöhe bei den nicht-mazerierten Rippen ($SD_2 = 403,11$ mm; $SD_9 = 404,53$ mm) und von Messer 11 bei den mazerierten Rippen ($SD_{11} = 850,75$ mm).

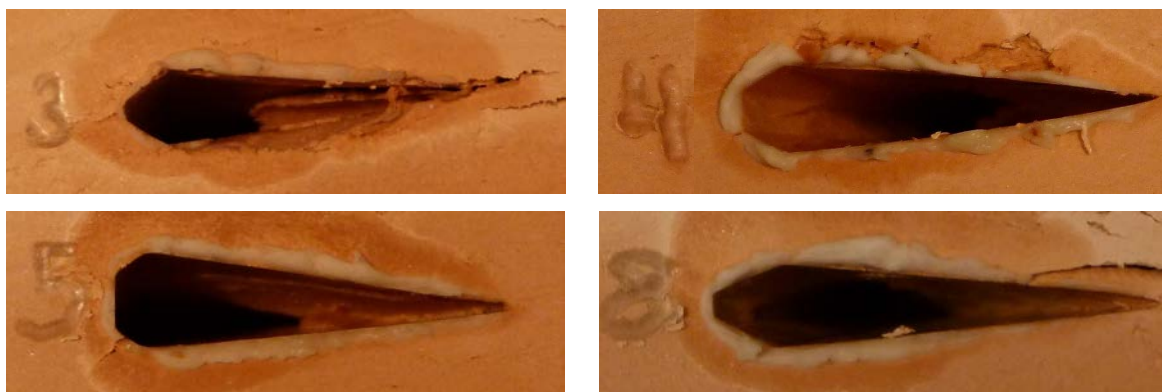


Abb. 70: Klingenquerschnitte der Sektionsmesser und des Sägemessers

Die drei Sektionsmesser (3, 4, 5) und das Sägemesser (8) hinterließen in der Modelliermasse eine angedeutet flammenförmige Einstichform. Diese Flammenform variierte leicht zwischen den Messern.

Aufgrund der großen Streuung der metrischen Daten müssen die berechneten Mittelwerte mit Bedacht interpretiert werden. Symes und Chapman (2010) warnen allgemein vor der Verwendung von metrischen Analysen bei Mechanismen, die noch nicht grundlegend verstanden sind.

Klingenflexibilität

Für einen Rückschluss auf die Flexibilität der Messerklinge waren alle Messparameter ungeeignet. Obwohl die Messer 4, 5, 9 und 11 im Vergleich zu der flexiblen Klinge von Messer 10 mit einer signifikant massiveren und härteren Klinge ausgestattet sind, spiegelt kein Messparameter diese materiellen Unterschiede eindeutig wider.

Klingendicke

Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, besteht kein Zusammenhang zwischen der inneren, minimalen und äußeren, maximalen **Einstichhöhe**. Dies könnte auf die teilweise stark variierende Klingendicke eines einzigen Messers zurückzuführen sein. Insbesondere die Messer 3, 4, 5, 8 und 9 weisen – aufgrund ihres dicken Messerrückens und stark ausgeprägten Schlicfs an der Schneide – deutliche Unterschiede in der Klingendicke bei konstanter Klingenlänge auf (Abb. 70). Bei den anderen Messern spitzt sich die Klinge in Richtung Schneide nur minimal zu oder bleibt wie bei Messer 2 und 11 konstant dick (Abb. 15B). Die Vermutung, dass Messer mit starkem Schliff bzw. steil verlaufenden Klingen vom Messerrücken zur Schneide hin einen Einstich hinterlassen, dessen maximale Einstichhöhe im Vergleich zur minimalen Höhe signifikant größer ist als bei den restlichen Messern, konnte jedoch nicht bestätigt werden. Auch der **Öffnungswinkel** war bei den Messern 3, 4, 5, 8 und 9 nicht größer als bei den anderen Messern. Demnach sind diese Messparameter nicht geeignet, um auf den Querschnitt der Klinge zu schließen.

Über die Einstichhöhe – speziell die **maximale Knocheneinstichhöhe** (MKEH) – ließen sich Rückschlüsse auf die Klingendicke der Messer ziehen. Während bei μ CT-Aufnahmen der Messparameter KEH die Dicke der Messerklinge im Schnitt um 0,944 mm unterschätzt wird, bei Verwendung des Maßes MKEH die Klingendicke durchschnittlich um nur 0,353 mm zu gering eingeschätzt. Beim Rückschluss auf die Dicke der Messerklinge sollte deswegen auf die maximale Einstichhöhe zurückgegriffen werden und mit einer **mittleren Abweichung von $\pm 0,4$ mm** gerechnet werden. Unter Verwendung der minimalen Knocheneinstichhöhe wird die Klingendicke stets unterschätzt. Die größten Abweichungen zwischen der mittleren Klingendicke und der durchschnittlichen Einstichhöhe zeigen sich bei der Schere mit -2,02 mm.

Aufgrund der geschilderten Schrumpfung der meisten Einstiche durch Mazeration, liefern die μ CT-Scans der, von Weichgewebe umgebenen (frischen), Rippen die genauesten und aussagekräftigsten Ergebnisse in Bezug auf die Klingendicke. Mittels den Formeln 4 und 5 kann trotz mazerierter Knochen eine recht genaue Klingendicke prognostiziert werden (Kapitel 4.5).

Klingenbreite

Nach Mazeration ist die Breite des ursprünglichen **Intercostalraums** nicht mehr bestimmbar. Somit kann auch bei Penetration von zwei Rippen mit dem Rücken und der Schneide eines Messers nicht auf dessen Klingenbreite geschlossen werden. In den verwendeten Schweine-rippen dieser Studie betrug der mittlere Intercostalraum 1,82 cm ($\pm 0,51$ cm; Abb. 71). Über die Klingenbreite kann bei bereits mazerierten bzw. skelettierten Rippen nur spekuliert werden, da in diesen Fällen weder die genaue Distanz des variablen Rippenzwischenraums noch die Eindringtiefe des Messers bekannt ist.

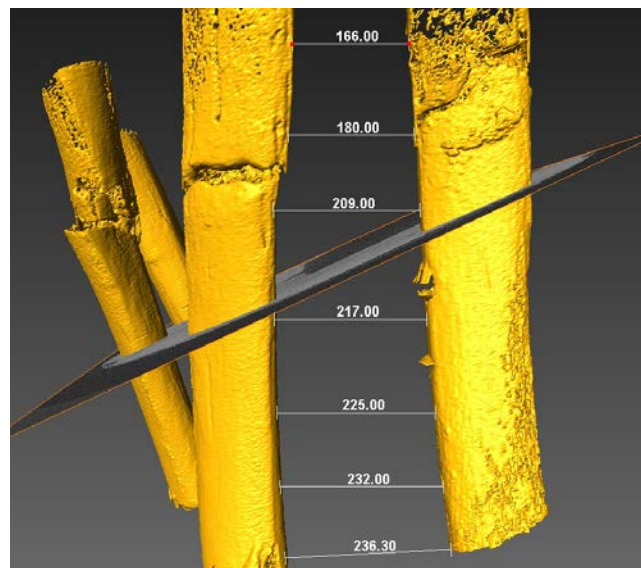


Abb. 71: Intercostalraum

Vermessung [mm] des Intercostalraums der Rippen 3 und 4 im Softwareprogramm Amira. Der Rippenzwischenraum konnte nur anhand der μ CT-Rekonstruktionen vor der Mazeration bestimmt werden. Das Weichgewebe ist auf dem horizontal verlaufenden Orthoslice in hellgrau zu erkennen.

Das große Küchenmesser (Nr. 7) penetrierte mit einem Einstich deutlich zwei Rippen. Dies ist auf die große Klingenbreite von bis zu 4,32 cm zurückzuführen mit der die Überbrückung des Zwischenrippenraums problemlos möglich ist. Werden von einem Messer gleichzeitig zwei Rippen verletzt, erhöht sich der Druck auf die Klinge im Vergleich zu Messerstichen, die nur auf eine Rippe treffen. Die Einstiche von Messer 7 wiesen im Vergleich zu Messer 3, 4, 10 und 11 signifikant größere untere Neigungswinkel auf. Ob durch den zusätzlichen Widerstand die Klinge im Vergleich zu den anderen Stichen weniger weit in die Rippen (und die untergelegten Styroporboxen) eindrang, kann jedoch anhand der Rippen nicht mehr überprüft werden.

Tauglichkeit der Einstichwinkel als Maß für die Einstich- und Klingendimensionen

Ein leichter Zusammenhang zwischen der **maximalen Höhe** und dem Öffnungswinkel von ein und demselben Einstich konnte festgestellt werden. Je größer der Öffnungswinkel eines Einstichs ist, desto breiter der Einstich. Dies ist vor allem bei V-förmigen Einstichen zu beobachten, wenn die Einstichhöhe sukzessive zur Knochenoberfläche zunimmt. Das Fehlen

eines signifikanten Zusammenhangs zwischen dem Öffnungswinkel und der **minimalen Einstichhöhe**, könnte auf die Lage der Höhenmessung zurückzuführen sein. Denn der Öffnungswinkel ist durch den Verlauf entlang der Einstichkanten definiert und erreicht erst an der Knochenoberfläche – an der die maximale Höhe gemessen wurde – seine tatsächliche Größe. Am Einstichboden, an dem die minimale Höhe des Einstichs vermessen wurde, kann dagegen nichts über den Öffnungswinkel ausgesagt werden. Der nur marginale Einfluss der **Klingendicke** auf den Öffnungswinkel war dagegen unerwartet, da die Klingendicke einen signifikanten Einfluss auf die maximale Einstichhöhe zeigte.

Von den vier getesteten Winkelparametern ist der Öffnungswinkel für die Einschätzung der **Klingenwinkel** am inadäquatesten. Der Grund dieses Effektes könnte möglicherweise auf die variable Lage der Messerstiche am Knochen zurückzuführen sein. Die Neigungs- und Bodenwinkel sind dagegen von der Position und Länge eines Stichs in der Rippe unbeeinflusst. So beschreiben vor allem die Neigungswinkel im Mittel den Klingenwinkel des Tatmessers sehr genau. Dabei handelt es sich in manchen Fällen um den oberen und in anderen um den unteren Neigungswinkel. Welcher dieser beiden Winkel wann der entscheidende ist und den Klingenwinkel am präzisesten widerspiegelt, kann aufgrund vorliegender Studienergebnisse nicht abschließend beantwortet werden.

Die unteren und oberen Neigungswinkel der Einstichmarken sind größtenteils auf den **Auftreffwinkel** des Messers zurückzuführen. Trifft das Messer im 90° Winkel auf die Schweine Rippen auf, sollten die beiden Winkel annähernd gleich groß sein. In vorliegender Studie können die Messer in zwei Richtungen ausschwenken. Eine leichte Schräglage des Messers beim Herabgleiten der beweglichen Fallbeilkonstruktion und beim Hineinstechen in den Knochen führt zu einem kleineren Winkel, in dessen Richtung die Messerspitze zeigt. Entsprechend vergrößert sich der gegenüberliegende Winkel proportional zu diesem.

Der untere Neigungswinkel zeigte laut des Goodall's F-Tests einen Bezug zur **Klingengestalt**. Bei diesem scheinbar signifikanten Zusammenhang könnte es sich um einen Fehler 1. Art handeln. Betrachtet man den angeblich linearen Zusammenhang grafisch (Abb. 72), fällt auf, dass die Gestaltvariable nur bei ausgesuchten Messern (2, 7 und 8) von den jeweiligen Mittelwerten der unteren Neigungswinkel abgeleitet werden kann. Besonders Messer 5 und 11 weichen deutlich von der linearen Regressionsgerade ab.

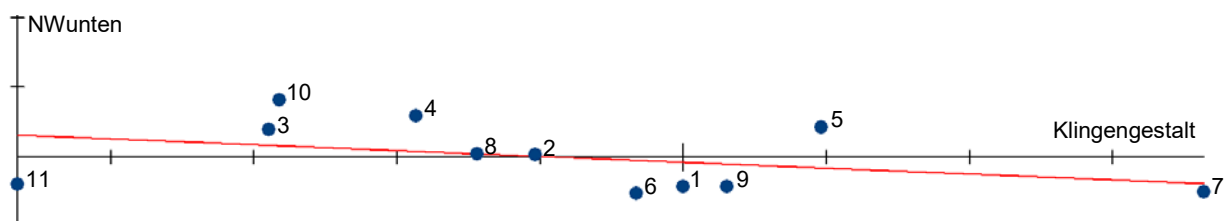


Abb. 72: Gestaltvariable der Messerklinge in Bezug auf den NWunten

In der Grafik mit linearer Regressionsgeraden wird jedes Messer durch einen Punkt repräsentiert.

Hauptkomponentenanalyse

Mittels der Hauptkomponentenanalyse konnte aufgrund des größten PC1-Wertes bei Messer Nr. 7 auf eine Klinge geschlossen werden, die erst kurz vor dem Griff die maximale Breite erreicht. Das Messer Nr. 10 hat dagegen schon nach dem Zusammenlaufen der beiden Messerspitzen die maximale Klingenbreite erlangt und somit den kleinsten PC1-Wert. Diese Messercharakteristika spiegeln sich jedoch nicht in den Kerbmarken wieder.

4.3.2 TYPUS DES MESSERS

Eine eindeutige Trennung von bestimmten Messertypen oder -gruppen anhand ihrer **Hauptkomponenten-Werte**, wie im Fall der Schraubenzieher-Studie von Kieser et al. (2008), war in vorliegender Arbeit nicht durchführbar. In den *Relative Warps* der Einstiche (Abb. 60, 61) überlagerten sich alle vier Messerrubriken in ihrer Morphologie. Auch die neu gebildeten Gruppen (Tabelle 15-22) zeigten keine einheitliche Einteilung der Versuchsmesser.

Die Klingen der Sektionsmesser und der Schere zeigten Auffälligkeiten in Bezug auf deren **Querschnittsgestalt**. Die für die Sektionsmesser (Nr. 3, 4, 5) typische Flammenform konnte jedoch auch beim Sägemesser (Nr. 8) festgestellt werden. Während Messer Nr. 8 wie die beiden Knorpelmesser (Nr. 3, 4) ein spitzes Trapez als Klingenrücken aufwiesen, zeigte das Seziermesser (Nr. 5) ein deutlich flacheres Trapez am Klingenrücken (vgl. Abb. 70). Die Jagd- und Freizeitmesser (Nr. 9, 12) waren in ihrem dreieckigen Querschnitt mit den anderen Haushaltsmessern – mit Ausnahme von Messer 2 und 10 – zu vergleichen. Dabei zeigten die Messer 1, 9 und 12 aufgrund des dickeren Klingenrückens ein stärker ausgeprägtes und weniger langgestrecktes Dreieck im Vergleich zu den anderen Klingen. Messer 2 und 10 wiesen rechtwinklige Vierecke in ihren Klingenquerschnitten auf.

Gezahnte Messerklingen – besonders das Steakmesser – hinterließen im μ CT deutlich erkennbare **Einrisse und Knochenchips** am Einstichboden. Dieses Phänomen war jedoch nicht bei allen Einstichen von gezahnten Messern festzustellen, sodass keine Generalisierung möglich war.

4.3.3 ANZAHL DER MESSER

Bei Messerangriffen stellt sich oft die Frage, ob ein einziges Werkzeug alle Verletzungen erzeugt haben kann oder ob mehrere Tatwerkzeuge und somit ggf. auch mehrere Tatverdächtige beteiligt waren. Im gerichtlichen Verfahren ist es entscheidend zu wissen von wem letztlich der tödliche Messerstich ausging, wenn zwei Angreifer involviert waren.

Da die vorliegende Studie zeigt, wie unterschiedlich die Einstiche von ein und demselben Messer bei gleicher Krafteinwirkung aussehen können, lässt sich diese Frage auf Basis der vorliegenden Ergebnisse nicht beantworten. Die morphologische Variabilität ist zu hoch als

dass eine Einschätzung zur Anzahl der verwendeten Messer möglich wäre. Selbst wenn sowohl mit einem Küchenmesser als auch mit einer Schere zugestochen wurde, könnte anhand der maximalen Einstichhöhe, den Neigungs- und Öffnungswinkeln auf diesen Sachverhalt nur gemutmaßt werden. Dabei hängt die Aussagekraft auch von der Gestalt der im Einzelfall in Frage kommenden Tatwerkzeuge ab.

4.4 μ CT VERSUS MAKROFOTOGRAFIE VERSUS REM

Vorteile des μ CTs

Während mit dem REM und der Makrofotografie lediglich oberflächliche Muster analysiert werden können, liefert das μ CT sowohl ein **dreidimensionales Gesamtbild** als auch schnittweise Einblicke ins Innere der Struktur aus allen erdenklichen Perspektiven.

Das Ausmessen der Öffnungs-, Boden- und unteren bzw. oberen Neigungswinkel an den Rippeineinstichen war ausschließlich mittels der μ CT-Methode anhand der **Orthoslices** durchführbar. Sowohl die REM-Bilder als auch die Makrofotografien erlaubten keine verlässliche Bestimmung der Winkelparameter. Ebenfalls schwierig gestaltete sich die Vermessung der Einstichlänge anhand der REM-Aufnahmen bzw. der Einstichbreite anhand der Makroaufnahmen. Somit lassen sich nur mit dem μ CT alle definierten Einstichparameter erfassen. Innere Knochenrisse können ebenso nur mittels μ CT-Aufnahmen entdeckt und analysiert werden. Knochenrisse könnten gegebenenfalls Hinweise auf die einwirkende Kraft geben. Eine Korrelation zwischen dem Vorhandensein von Knochenrissen und der Einstichtiefe konnte Waltenberger (2015) jedoch nicht bestätigen. In der vorliegenden Studie war eine Analyse der Risse aufgrund der Komplexität nicht vorgesehen.

Im μ CT können aufgrund der hohen räumlichen Auflösung und der **isotropen Voxel-Abstände** problemlos Veränderungen im Knochenvolumen und in der Knochenmikroarchitektur gemessen werden. Topografische bzw. mikroskopisch kleine Einzelheiten können sowohl mit dem μ CT als auch mit dem REM für das bloße Auge sichtbar gemacht werden. Außerdem besitzen sie eine scharfe Fokussierung in allen Tiefen.

Rutty et al. (2013) und Thali et al. (2003) führen als weiteren Vorteil der μ CT-Methode die **Nicht-Destruktivität** auf. So kann eine zu untersuchende Leichenprobe nach dem zerstörungsfreien Scan wieder dem Leichnam zugefügt werden. Die Untersuchung der Rippeineinstiche per REM und Makrofotografie setzen dagegen eine Mazeration der Rippen voraus. Durch diese Mazeration gingen nicht nur Informationen über die Einstiche im Weichgewebe verloren, sondern auch der Zusammenhalt gebrochener Rippen. Nach Mazeration war eine adäquate Vermessung von Einstichen im Bereich der Bruchstellen nicht mehr ausführbar. Dies ist als großer Nachteil all jener Methoden zu werten, die kein Weichgewebe tolerieren.

Hinsichtlich der Größenveränderung einiger Einstiche in ihrer Höhe und Breite durch die Mazeration, zeigten die μ CT-Scans mit den von Weichgewebe umgebenen Rippen die genauesten und aussagekräftigsten Ergebnisse im Hinblick auf die Klingendicke.

Nachteile des μ CTs

Während mit dem μ CT noch die zu bearbeitende **Oberfläche gesucht und rekonstruiert** werden muss, liefert das REM direkt ein Bild der Objektoberfläche. Das REM-generierte Bild

zeigt eine einheitliche Oberfläche und besteht nicht aus vielen Millionen Dreiecken, wie es bei μ CT-Rekonstruktionen der Fall ist. Bei μ CT-Aufnahmen wird außerdem ein *partial volume averaging* angewandt, da jeder Voxel nur in einem Grauwert eingefärbt werden kann, auch wenn sich innerhalb des Voxels mehrere Materialien mit verschiedenen Dichten befinden (Abb. 73). Dieser Grauwert entspricht in der Regel keinem einzigen vorhandenem Material, sondern einem Mittelwert, der von der relativen Position und Orientierung des Voxels hinsichtlich der Materialgrenze und des Voxelgitters bedingt ist (Weber & Bookstein 2011). Dementsprechend sind die Übergänge von Luft zu Knochen nur auf einen Voxel genau feststellbar und die Messgenauigkeit von der Voxelgröße abhängig. Um die Volumen-Daten trotzdem möglichst genau auszumessen, werden u. a. Verfahren zur Bestimmung des *half-maximum height values* (HMHV) angewandt. Beim HMHV handelt es sich um den arithmetischen Mittelwert vom Dichtewert der beiden Grenzmaterialien (Weber & Bookstein 2011).

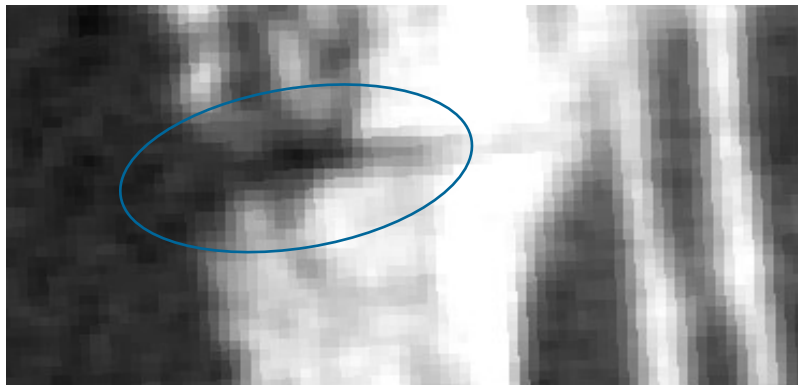


Abb. 73: Partial volume averaging

Eine μ CT-Aufnahme eines Einstichs (innerhalb der Markierung) im kortikalen Knochen mit deutlichem *partial volume averaging* an den Grenzen zwischen den Materialien Knochen und Luft.

Zudem beanspruchen die μ CT-Scans und deren Rekonstruktionen relativ **viel Speicherplatz**. Eine einzige TIF-Datei von einer Rippe war in gegenständlicher Arbeit z. B. etwa 1 GB groß. Zusätzlich sind die Softwareprogramme wie Amira als **teuer** einzustufen und benötigen eine hohe Rechenleistung des PC-Prozessors, um reibungslos und in angemessener Zeit die gewünschten Rekonstruktionen auszuführen.

Der **Zeitaufwand** bei Verwendung des μ CTs ist allerdings hoch. Für den Scanvorgang im μ CT müssen die Proben optimal um ein Schaumstoffobjekt o. Ä. angeordnet werden und zweieinhalb Stunden starr im Scanner verharren. Bevor schließlich eine Analyse mit einem Softwareprogramm wie Amira möglich ist, muss eine Rekonstruktion angefertigt werden. Dafür erlauben die frei rotierenden 3D-Rekonstruktionen der Rippen in Amira oder anderen DICOM-Viewern nach dem Scanvorgang nicht nur eine schnellere Bearbeitung im Vergleich zum REM, sondern auch eine intensivere Analyse. Diese impliziert eine direkte Vermessung der Einstiche und Digitalisierung von Landmarks in jeder gewünschten Position.

Vorteile der Makrofotografie

Keinerlei Größenbeschränkung hinsichtlich der Probe liegt lediglich bei der Makrofotografie vor. In der Probekammer des REMs hingegen ist der Abstand zwischen Probetisch und Linse stark eingeschränkt. Außerdem wirkt sich die ausgasende Eigenschaft der Rippen negativ auf die Probengröße aus. Auch im μ CT ist (vor allem bei starker Vergrößerung) die Probenanzahl und -größe limitiert. Entgegen den Ausführungen von Waltenberger (2015), der nur einen Einstich pro μ CT-Aufnahme gescannt hat, konnten in vorliegender Arbeit pro Scanvorgang allerdings bis zu 6 Rippen bzw. 12 Rippenfrakturen ohne Informationsverlust erfasst werden.

Die segmentierten 3D-Rekonstruktionen in Amira führen zu einer meist ungewollten Glättung der Knochenoberfläche. Um diesen Effekt nicht noch weiter zu verstärken wurde in vorliegender Arbeit beim Segmentieren der Rippen auf die Option „Smoothing“ verzichtet. Nichtsdestotrotz zeigten die makroskopischen Aufnahmen eine **natürlichere und eindeutiger Abbildung** kleiner Unebenheiten im Gegensatz zu den auf Vermutung gegründeten μ CT-Rekonstruktionen (Abb. 74). Muster, die mit einem Mikroskop oder dem REM deutlich zu sehen sind, können mit dem μ CT „verschwinden“ (Abb. 75, 76).

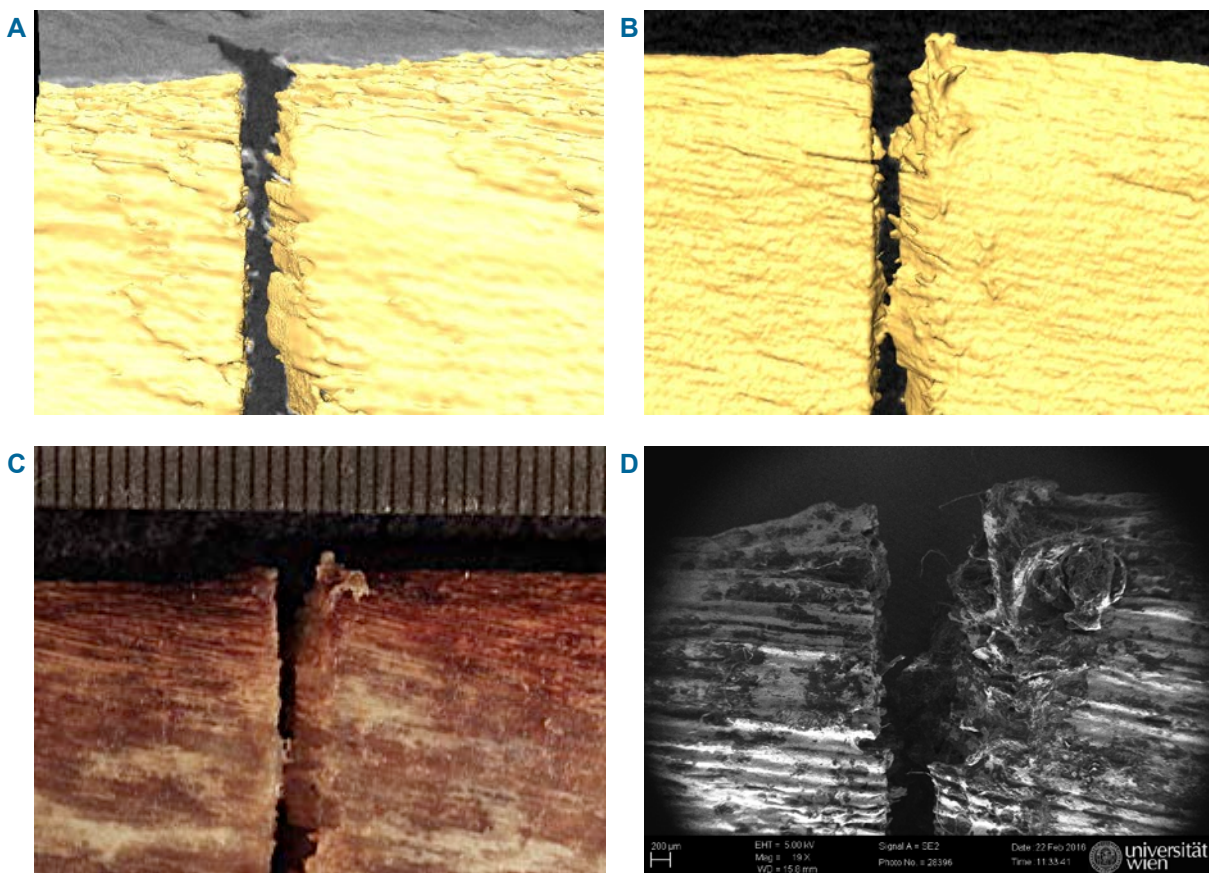


Abb. 74: Bildlicher Vergleich der verschiedenen Methoden

Aufnahmen von den vier verwendeten Methoden: μ CT (40 μ m) vor Mazeration (A), μ CT (40 μ m) nach Mazeration (B), Makrofotografie (C) und REM (D) mit mazerierter Rippe. In allen Abbildungen ist Einstich 1a.1 zu erkennen.

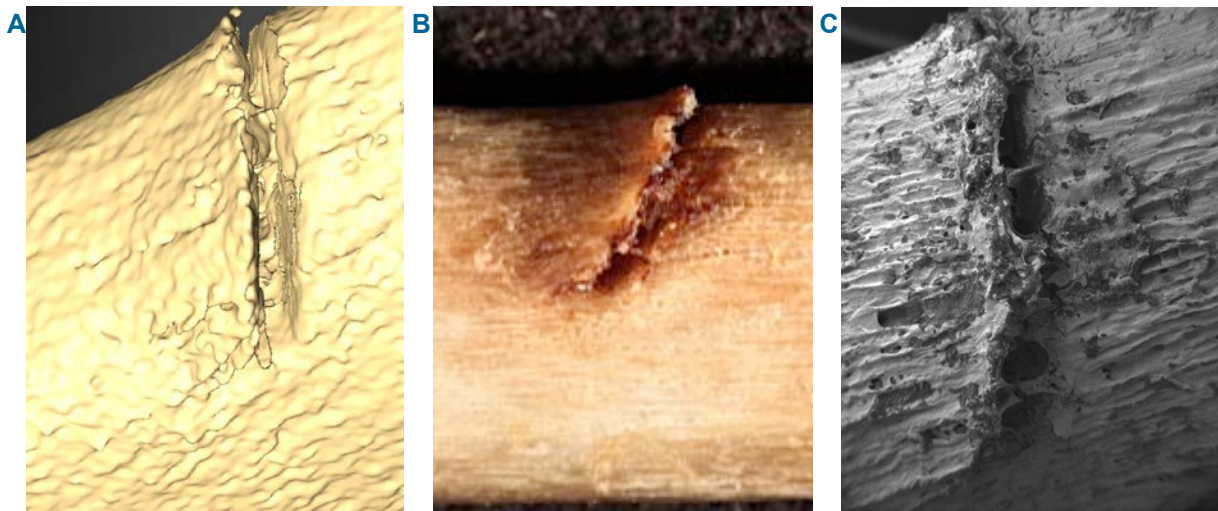


Abb. 75: Vergleich des Einstichs 7.1

Die Knochenmorphologie unterscheidet sich in den drei Abbildungsmethoden hinsichtlich der sichtbaren Strukturen. Mikro-CT-Rekonstruktionen (A) neigen dazu die Oberfläche glatter abzubilden als sie tatsächlich ist und somit Muster am Knochen bzw. an den Einstichwänden „verschwinden“ zu lassen, die per Makrofotografie (B) oder REM (C) zu sehen sind.

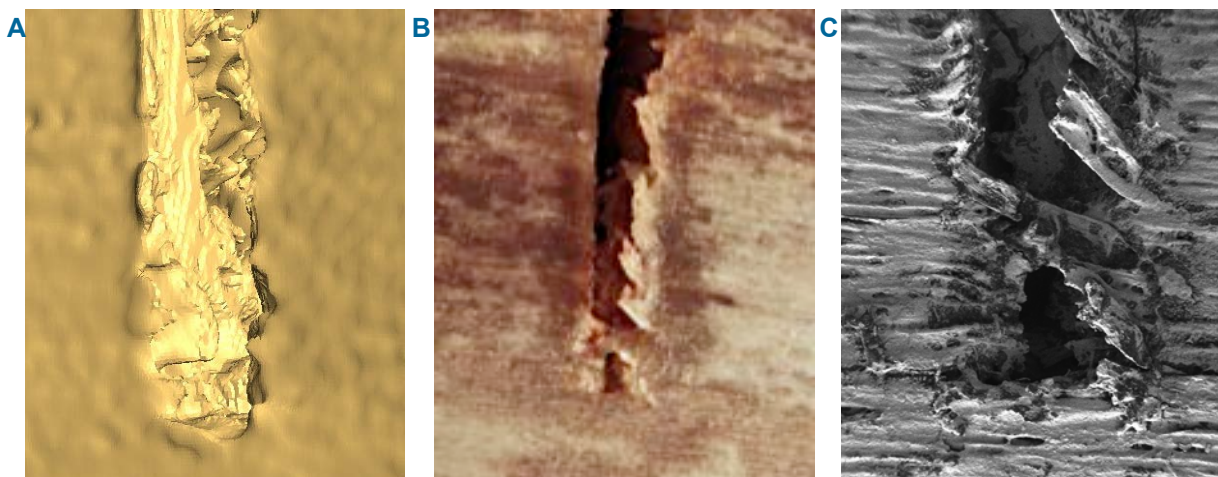


Abb. 76: Vergleich eines Ausschnitts des Einstichs 1a.1

Die Knochenstruktur kann bei μ CT-Rekonstruktionen (A) durch das Glätten der Oberfläche verloren gehen, die mit den Abbildungsmethoden Makrofotografie (B) und REM (C) zu sehen sind.

Nachteile der Makrofotografie

Lediglich oberflächliche und mit dem bloßen Auge erkennbare Strukturen können mit der Makrofotografie festgehalten werden. Die Schärfentiefe ist, obwohl abhängig von der gewählten Blende, prinzipiell nicht mit der des μ CTs oder REMs zu vergleichen.

Bei Verwendung eines Stativs kann die Perspektive auf die Einstiche nur bedingt verändert werden. Die Rippenfragmente müssten z.B. an einer drehbaren Feststellklemme befestigt werden, um Bilder aus mehreren Blickwinkeln zu erhalten.

Vorteile des Rasterelektronenmikroskops

Mit dem hochauflösenden REM können theoretisch deutlich **feinere Muster** – wie z.B. irreguläre Riefen von ca. 1 μm , die auf ein bestimmtes gezahntes Messer schließen lassen könnten (Saville et al. 2007) – begutachtet werden. In vorliegender Studie konnten jedoch – wie bei Kooi & Fairgrieve (2013) – auch unter hoher Auflösung im REM keine charakteristischen Muster von gezahnten Messern in den Einstichen entdeckt werden. Dies liegt womöglich an der Besputterung der Knochenoberfläche.

Nachteile des Rasterelektronenmikroskops

Eine stärkere Vergrößerung bringt für die Ausmessung der Einstiche keine Vorteile. Im Gegenteil, bei zu starkem Zoom ist selbst die Knocheneinstichhöhe nicht mehr vollständig auf der REM-Abbildung zu sehen und kann auf diese Weise nicht ausgemessen werden (Abb. 77A). Bei zu langen Einstichen können diese aufgrund der limitierten Höhe der Probekammer nicht in ihrer gesamten Länge im Fokus der REM-Aufnahme abgebildet werden (Abb. 77B).

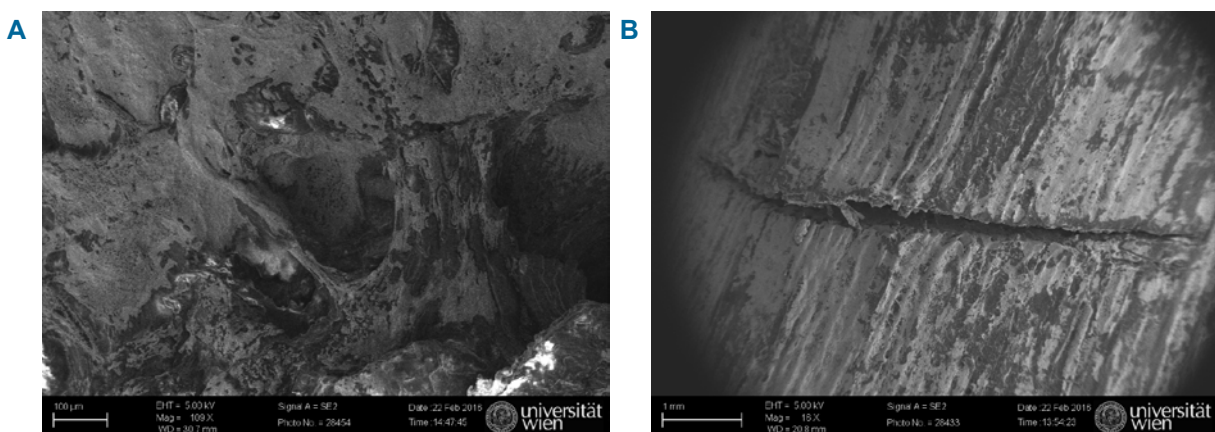


Abb. 77: Zoom im REM

- A** Mit einer zu starken Vergrößerung (> 100X) des Einstichs 7.1 kann keiner der Messparameter bestimmt werden.
- B** Der maximal mögliche Abstand zwischen Rippe und Kamera ist für lange Einstiche nicht groß genug, um den Einstich vollständig im Fokus abzubilden. Hier exemplarisch an Einstich 5.1 zu sehen.

Ein deutlicher Nachteil der REM-Methode stellt die **nicht veränderbare Neigung** der Probe im benutzten Rasterelektronenmikroskop dar. Die Kamera lässt sich in der Probekammer zwar in allen drei Achsenrichtungen verschieben, der senkrechte Aufnahmewinkel bleibt hingegen immer der Gleiche. Während die μCT -Rekonstruktion in Amira virtuell beliebig drehbar ist, muss das Versuchsobjekt im REM erst neu positioniert werden, um eine Ansicht aus einer ganz neuen Winkelperspektive zu erhalten.

Zeitintensiv ist sowohl die Verwendung des μCT s als auch des REMs. Für die Aufnahmen im REM müssen die Proben zuvor mazeriert, zerkleinert und beschichtet werden. Die Druckanpassung in der vakuumierten Probekammer vor und nach jeder Beladung des REMs mit den bearbeiteten Rippenfragmenten nimmt in der Regel jeweils ca. 10 min. in Anspruch.

Scans vom μ CT weisen im Optimalfall keine Artefakte auf, wohingegen REM-Aufnahmen trotz professioneller Handhabung häufig **Artefakte** an kleinen, schmalen Strukturen wie Einstichmarken zeigen. Diese Strukturen sind während dem Sputtervorgang nur schwer zu erreichen und erhalten deswegen nicht die erforderliche Goldbeschichtung. Auf REM-Bildern „glänzen“ diese Bereiche stark und erschweren die Kontrasteinstellungen (Abb. 78).

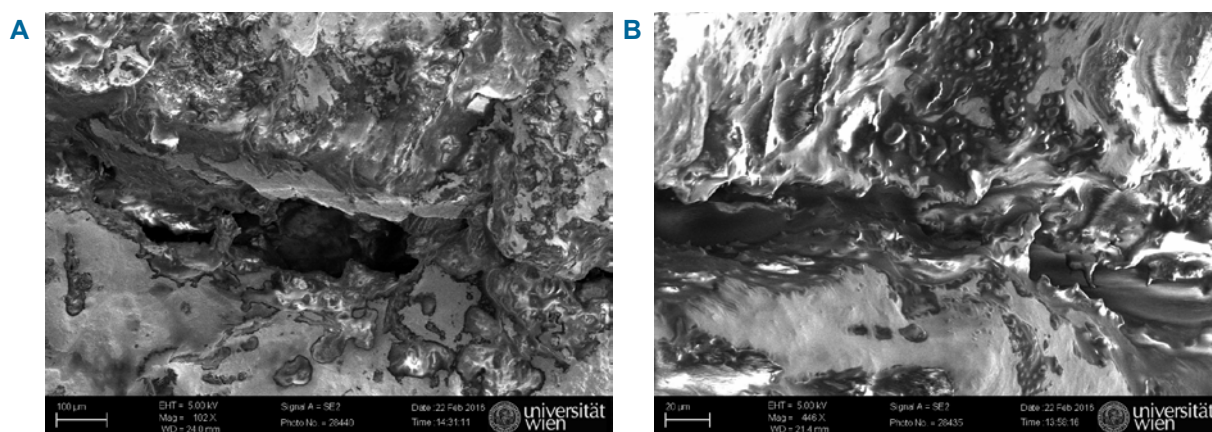


Abb. 78: Artefakte bei REM-Bildern

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen häufig Artefakte an engen, für den Sputter schwer zu erreichende Stellen. Sie sind als stark reflektierende Bereiche und scheinbar zerfließende Strukturen erkennbar.

Tabelle 39 fasst die Unterschiede der drei verwendeten Methoden zusammen und verdeutlicht, dass das REM nur wenige praktische und methodische Vorteile gegenüber der traditionellen Makrofotografie bietet. Das μ CT schneidet am besten ab.

Tabelle 39: μ CT vs. Makrofotografie vs. REM

	μ CT	Makrofotografie	REM
Kosten	sehr hoch	sehr gering	mittel
Zeitaufwand	hoch	gering	mittel
Zugriff bzw. Anwendbarkeit	noch recht selten; beschränkt	immer; leicht	in wiss. Instituten: häufig; recht leicht
Vorkenntnisse und Erfahrung	Voraussetzung	kaum nötig	Voraussetzung
Zuverlässigkeit	mittel	mittel	mittel
Effektivität	hoch	mittel	mittel
Daten	Volumen	Oberfläche	Oberfläche
Vorteil	interne Merkmale sichtbar; keine Mazierung nötig	naturgemäß	hohe Schärfentiefe bei Livebildern
Nachteil	geglättete Oberflächen; teure Software & schnelle PCs nötig	keine internen Strukturen sichtbar geringe Schärfentiefe	eingeschränkte Perspektive

4.5 FLEISCHHALTIGE VERSUS MAZERIERTE KNOCHEN

In gegenständlicher Arbeit wurden fleischhaltige (von Muskelfleisch und einer Fettschicht umgebene) Schweinerippen unter das im Fallbeil befestigte Messer gelegt. Entfleischte bzw. mazerierte Knochen können einerseits durch die angewandte Mazerierungsmethode zusätzliche Spuren aufweisen und spiegeln andererseits nicht die natürlichen Gegebenheiten einer frischen Stichverletzung in situ wider.

Nachteile von entfleischten Knochen

Artefakte können entstehen, wenn beispielsweise Käfer zur Mazeration eingesetzt werden (Hefti et al. 1980, Hounsone 1988, Laurie & Hill 1951) oder das Fleisch mit einem metallenen Werkzeug – wie z.B. einem Skalpell – abgeschabt wird. Wenn Metallpartikel wie im Fall der vorliegenden Studie analysiert werden sollen, ist das Lösen des Weichgewebes vom Knochen mittels Chemikalien ebenfalls keine Option. Bleichmittel, welche immer wieder zur Mazeration Verwendung finden, zerstören u.a. kleine Metallpartikel von Karbonstahl (Hounsone 1988, Vermeij et al. 2012). Aus diesen Gründen wurde in gegenständlicher Studie die sogenannte Mikrowellenmethode von King & Birch (2015) eingesetzt. Diese Präparation war nötig, da nur mit mazerierten Knochen eine Analyse der Einstiche per REM und Makrofotografie möglich ist.

In Bezug auf die Mazerierung zeigte die Mikrowellenmethode keine Vorteile im Vergleich zum 24 stündigen warmen Wasserbad. Im Gegenteil bestätigte die vorliegende Studie die Annahme, dass sich durch das kurzzeitige Aufkochen des Wassers in der Mikrowelle die kortikale Oberflächenmorphologie und strukturelle Integrität des Knochens stärker beeinträchtigt werden als in einem warmen, aber nicht siedenden Wasserbad (Steadman et al. 2006).

Auswirkungen der Mazeration auf die Knocheneinstiche

Neben präzise definierten Einstichen fanden sich nachdem Mazerieren auch Knochenschuppen und **Absplitterungen fragiler Knochenchips** (Abb. 79, 80A). Während sich bereits große Einstiche – wie z.B. Einstich 1.1 – nach Mazerierung noch weiter vergrößern, liegen kleine Einstichmarken mit einer MKEH von unter 160 μm ($= 0,16 \text{ mm}$) – wie bei Einstich 4.1 – danach wie verschmolzen vor. Auch Gaudio et al. (2014) hielten eine zunehmende Fehlerrate bei Messungen von Verletzungsdimensionen $< 3 \text{ mm}$ fest.

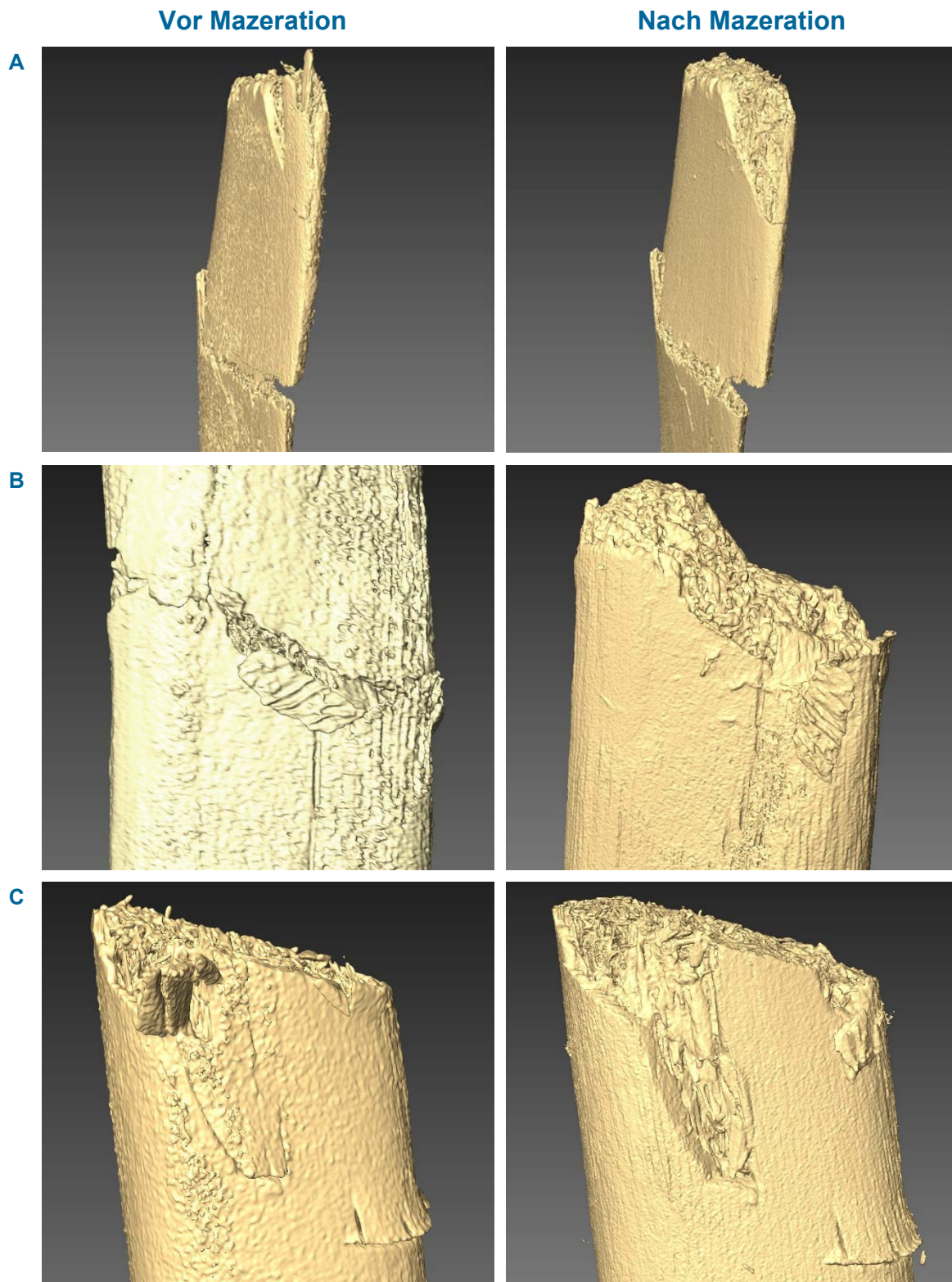


Abb. 79: Veränderung von Knochenchips nach Mazeration

Nach der Mazeration konnten Absplitterungen fragiler Knochenchips beobachtet werden. Während sich ein Knochenchip bei Rippe 3 (B) auf einer Seite löste und somit nach Mazerierung in veränderter Position vorlag, brach bei den Rippen 2b (A) und 5 (C) ein Stück des Knochens komplett ab. Dabei befindet sich der Abbruch an Rippe 2b oberhalb des Einstichs und an Rippe 5 entlang des Einstichs 5.1.

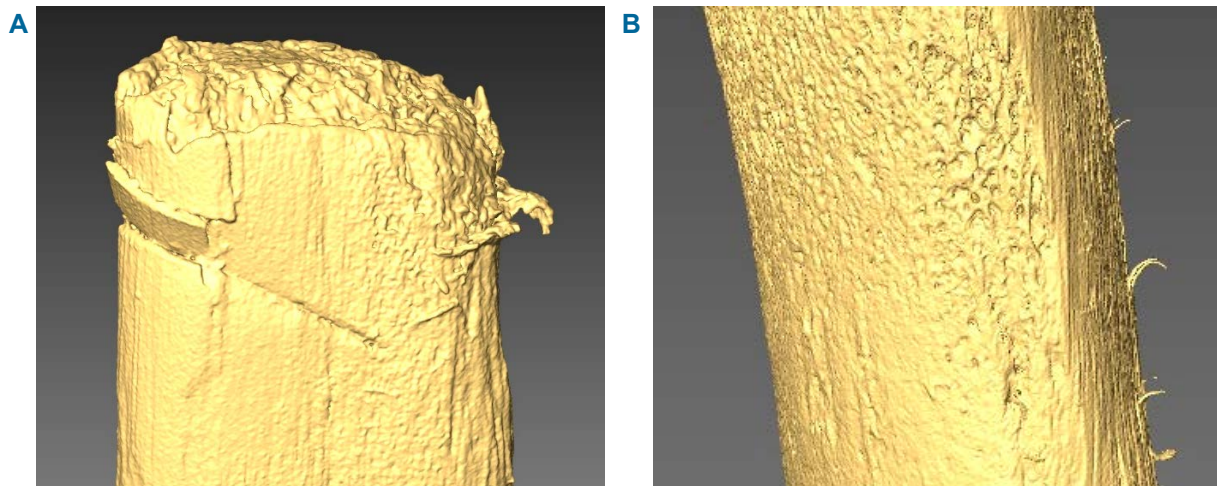


Abb. 80: Knochenauffaserung nach Mazeration

An der Oberfläche der Rippen 6 (A) und 11.2 (B) lösen sich einzelne Knochenfasern (jeweils auf der rechten Bildseite zu sehen). Während sich die Knochenfasern bei Rippe 6 durch die Trennung zum anliegenden Rippenfragment gebildet haben, gehen die Fasern bei Rippe 11.2 auf eine insgesamt rauere Knochenoberfläche nach der Mazeration zurück.

Der durchschnittliche **Schrumpfungsfaktor durch Mazeration** beträgt für die Knocheneinstichhöhe und -breite – trotz vereinzelter Vergrößerung von Einstichen – ca. 8,6 %. Innerhalb der vermessenen Höhen konnten jedoch zwischen den einzelnen Einstichen beim Vergleich vor und nach Mazeration eine Schrumpfung von ca. 16,1 % und eine Vergrößerung von ca. 15,6 % verzeichnet werden. Allgemein sollte bei Höhenmessungen an mazerierten Knochen eine Abweichung berücksichtigt werden, die bis zu 16 % in beide Richtungen betragen kann. Sowohl für die Einstichlänge als auch für die unterschiedlichen Winkelparameter konnte keine Schrumpfung oder Vergrößerung festgestellt werden.

Der signifikante Unterschied zwischen den Einstichhöhen vor und nach Mazeration der Rippen könnte durch ein **Zusammenziehen der Knochenfasern** in Längsrichtung durch die Wärme- einwirkung erklärt werden. Diese Hypothese steht jedoch nicht im Einklang mit der Schrumpfung der Knocheneinstichbreite.

Lynn & Fairgrieve (2009b) beobachteten, dass sich bei mazerierten Knochen Risse schneller ausbreiten. Diese Risse durchqueren die Havers Kanäle und andere Knochenstrukturen bis der Knochen zweigeteilt ist oder die Energie auf andere Weise verbraucht wurde. Die ebenfalls von Lynn & Fairgrieve (2009b) festgehaltene Beobachtung, dass Eintrittsflächen bei mazerierten Knochen im Vergleich zu Knochen mit Fleisch **rauer** sind, konnte in vorliegender Studie bestätigt werden (Abb. 80B).

Die gegenständliche Arbeit zeigte außerdem, dass sich nach Mazerierung der Knochen die Vermessung der Rippeneinstiche deutlich schwieriger gestaltet als zuvor. Zum einen da der Zusammenhalt der einzelnen Rippenfragmente verloren ging und zum anderen aufgrund der **fehlenden Weichteilumgebung**, mit welcher die Bewegungsrichtung des Stiches im Weich- gewebe verfolgt werden konnte.

Einfluss der Haut bei experimentellen Stichwunden

Nicht nur die Muskulatur und das subkutane Fettgewebe, sondern auch das größte Organ des menschlichen Körpers – die Haut – kann Einfluss auf die Einstiche im Knochen nehmen. Die Haut ist wie ein biologischer Verbundstoff, der größtenteils aus Wasser und einem faserigen Netzwerk besteht. Dieses Netzwerk beinhaltet wiederum ein Geflecht aus Kollagen und Elastin in einer Grundsubstanz aus Proteoglykane.

Die **Spannung der Haut** und die benötigte Energie um diese zu durchstechen, beeinflussen einen Messerstich. Bei einer schlaffen Haut benötigt das Messer ungefähr doppelt so viel Kraft zum Durchdringen im Gegensatz zu einer straff gespannten Haut, wie sie z.B. über den Rippen vorliegt (Knight 1975).

Näher betrachtet reagiert die Haut aufgrund ihrer Viskoelastizität zweiphasig auf mechanische Kraft. Als erstes wirkt eine viskose Komponente, die für die Zerstreuung der Energie verantwortlich ist. Als zweites ist eine elastische Antwort zu beobachten, indem die Energie gespeichert wird (Kieser et al. 2008).

Die physikalischen Eigenschaften der Haut sind von deren **Alter** und **topografischer Lage** am Körper abhängig. Ebenso nehmen auch **Körpergewicht**, **Geschlecht** und der **Gesundheitszustand** einer Person Einfluss auf die Hauteigenschaften. Dies erschwert zusätzlich das Nachstellen der Gegebenheiten während eines Messerstiches wie sie *in vivo* vorliegen (Doran et al. 2004, Gilchrist et al. 2008). O'Callaghan et al. (1999) zeigten, dass im Vergleich zum Durchdringen des Unterhautfettgewebes oder der Muskulatur deutlich mehr Kraft für die Haut aufgebracht werden muss (Abb. 81).

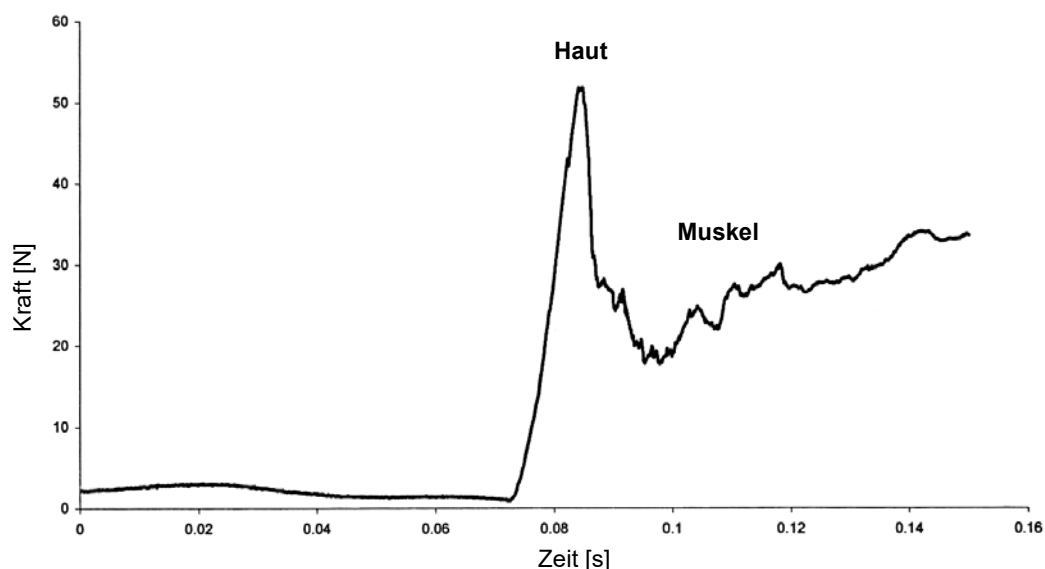


Abb. 81: Kraftverteilung eines Messerstiches

Für das Durchdringen der Haut, des Unterhautfettgewebes und der Muskulatur sind jeweils unterschiedliche Kräfte von Nöten (verändert nach O'Callaghan et al. 1999).

Die **Bekleidung** kann ebenfalls Einfluss auf einen Messereinstich haben. Daroux et al. (2010) konnten bereits Unterschiede durch häufigeres Tragen und Waschen der Kleidungsstücke in den Einstichen feststellen. Nolan und Kollegen (2013) fanden heraus, dass sich beim Durchstechen eines T-Shirts oder Baumwollhemds die benötigte Kraft um 5-10 N erhöhen kann. Die größte Abbremsung (29,01-63,97 N) wurde mit einem Kapuzenpullover erreicht. Dabei sind die entscheidenden Faktoren eines Kleidungsstücks die Dichte des Gewebes, deren Dicke und die Festigkeit des Garns. Je mehr Gewebeschichten ein Kleidungsstück hat, desto mehr Kraft wird zum Zerstechen benötigt. Die Anzahl an Schichten ist jedoch nicht proportional zur benötigten Kraft. Dafür nimmt die Anzahl der Textilfasern in Stichwunden mit der Schärfe des Messers ab. Die Größe des Schnitts im durchtrennten Kleidungsstück ist nicht identisch mit der Länge der durchstochenen Haut (Cowper et al. 2015).

Vorteile von mazerierten Knochen

Auch wenn das Vorhandensein der Schwarte auf den ersten Blick wirklichkeitsgetreuer erscheint, ist die **dicke Fett- und Bindegewebsschicht** beim Schwein nicht mit der eines durchschnittlichen Menschen im Bereich des Brustkorbs zu vergleichen. Die menschliche Weichteildicke (Haut, subkutanes Fettgewebe und Muskulatur) ist erheblicher Variation unterworfen und kann Größen von wenigen Millimetern bis mehreren Zentimetern annehmen (Grassberger 2016a). Bei Schweinen beträgt die Weichteildicke in Höhe der Rippen mehrere Zentimeter (Gross et al. 1995). Dementsprechend wird in vorliegender Studie auf einen Teil der Fett- sowie der Hautschicht verzichtet.

Auf das Weichgewebe sollte trotzdem nicht gänzlich verzichtet werden. Ferllini (2012) wandte wohl eine der besten – aber auch aufwendigsten – Methoden an. Er nahm erst vorsichtig die Epidermis ab, entfernte danach das überschüssige, nicht mit der menschlichen Fettschichtdicke übereinstimmende Fettgewebe und nähte zum Schluss die Epidermis mit einer einbalsamierten Schnur wieder auf das restliche Muskel- und Fettgewebe.

Zahlreiche Autoren (Bartelink 2001, Gibelli 2012, Pechníková 2012, Thali et al. 2003, Thompson & Inglis 2009, Vermeij 2012) sind aus diversen Gründen abgeneigt Versuche mit von Weichgewebe umgebenen Knochen durchzuführen. Vier Hauptgründe dafür sind:

1. Aufwändigere Versuchsvorbereitung und Untersuchung der Proben
2. Beschwerlicherer Transport und unangenehmere Aufbewahrung des mit der Zeit verwesenden Gewebes
3. Mangel an Erfahrung bei der Mazerierung von Knochen
4. Anderwärtige Prioritäten im Hinblick auf die Versuchsdurchführung und -auswertung

4.6 RÖNTGENMIKROANALYSE

Jedes Werkzeug, das auf einen Knochen einwirkt, kann Mikrospuren in der Knochenmatrix hinterlassen, die mit dem REM-EDX theoretisch nachweisbar sind (Gibelli et al. 2012, Pechníková 2012, Vermeij 2012). Laut Gibelli et al. (2012) sind bei stumpfer Gewalt im Gegensatz zu der hier angewandten scharfen Gewalt deutlich mehr Metallreste auf der Knochenoberfläche zu erwarten. Innerhalb der scharfen Gewalt hinterlassen Sägen in der Regel eine größere Menge an Metallpartikel als Messer. Ein weiterer Unterschied stellt die Lage der Metallreste dar. Während sie sich beim Einsatz von Sägen gewöhnlich an den Kanten und Wänden der Knochenverletzung ablagern, bleiben sie bei Messern und Scheren vielmehr am Boden des Einstiches haften (Gibelli et al. 2012).

Mikrospuren in vorliegender Studie

Offenbar aus Mangel an detektierbaren Elementen in den mazerierten Rippeneinstichen brachte die REM-EDX in gegenständlicher Studie keine zusätzlichen Informationen über die materielle Zusammensetzung der Messerklingen. Im Zuge der EDX-Analyse konnten lediglich knochentypische Elemente wie Kalzium, Phosphat und Kalium sowie Gold und Palladium vom Sputtervorgang nachgewiesen werden. Metallelemente gelangten nicht zum Nachweis. Sauerstoff war mit ca. 50 % der detektierten Gesamtmenge an Elementen am häufigsten vertreten. Dies ist auf das Ausgasen der luftgefüllten Zwischenräume in der Spongiosa der Rippen zurückzuführen.

Mikrospuren in bisherigen Studien

Pechníková et al. (2012) detektierten auf den Knochenoberflächen einzelne **Partikel**, **Schmiere** oder **puderähnliche Ablagerungen** von stumpfen Metallwerkzeugen. Selbst wenn solche Spuren in bzw. auf Knochen gefunden werden können, sind sie nur verwertbar, wenn sie auch auf ein besonderes Material hinweisen, das nicht bei der Mehrheit von Werkzeugen anzutreffen ist (wie z.B. Nickel, Titan oder Mangan). Auch Vermeij et al. (2012) geben zu bedenken, dass sich alleine durch die elementare Zusammensetzung nur sehr schwer zwischen den verschiedenen Arten von Stahl unterscheiden lasse.

Ein wesentlicher Unterschied der Studien von Pechníková et al. (2012) und Gibelli et al. (2012) zu der vorliegenden Arbeit, stellt die Verwendung von **mazerierten Rippen** dar. Während in gegenständlicher Arbeit getestet wurde, ob Metallpartikel auch auf Rippen gefunden werden können, die erst nach dem Zufügen der Messerstiche mazeriert wurden, verwendeten Pechníková et al. (2012) und Gibelli et al. (2012) bereits mazerierte Knochen. Bei einem (menschlichen) Knochenfund mit Schnitt-/Stichverletzungen erfolgte die Entfernung bzw. Verwesung der Weichteile allgemein erst nach der Messerattacke. Wenn der Weichteilverlust

unter natürlichen Bedingungen mit der einer Mazeration vergleichbar ist, könnten – nach vorliegenden Ergebnissen – in vivo nie Metallelemente in Knochenverletzungen nachgewiesen werden. Folglich wären die **in vitro EDX-Studien an isolierten Knochen wertlos**.

Gründe für negativen Metallnachweis

Warum der Metallnachweis in gegenständlicher Arbeit negativ ausfiel, kann drei Gründe haben. **Erstens:** In den Knocheneinstichen waren aufgrund der Abriebfestigkeit der Klingen von Anfang an keine Rückstände der Messer vorhanden. **Zweitens:** Die Mikrospuren wurden durch den Vorgang der Weichgewebsentfernung vernichtet. **Drittens:** Die Konzentration der Metallelemente war geringer als die Nachweisgrenze des EDX.

Die Anzahl an Metallpartikel in einer Verletzung hängt vermutlich u. a. von der Grobheit der Klinge und dem Einstichwinkel ab. Je gröber bzw. rauer die Klinge gewetzt wurde, desto mehr Partikel lassen sich im Knocheneinstich finden. Die präzisesten Ergebnisse liefert womöglich die **Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma** (ICP-MS). Die ICP-MS ist eine vielseitige und hoch sensitive Analysenmethode mit der auch Spurenelemente detektiert werden können. Dafür wird das zu analysierende Material in einem Plasma ionisiert. Dieses Plasma wird durch einen hochfrequenten Strom in ionisiertem Argon induziert. Aufgrund der hohen Ionendichte und Temperatur von ca. 5500 °C im Plasma lassen sich außerdem verschiedenste Probetypen und -matrizen einsetzen. Im Massenspektrometer erfolgt dann die Trennung nach der Ionenmasse. Die meisten Mikrospuren sind jedoch zu klein, um sie zu beeinflussen und mit dieser Technikmethode analysieren zu können (Ammann 2007, Bai et al. 2007, Schmidt & Gebel 1999, Vermeij et al. 2012).

Der **Abbruch eines kompletten Stückes der Klinge** im Knochen durch einen Messerstich ist selten. Auch mit der Kraft von 45 J in vorliegender Studie verbog lediglich die Messerspitze des billigen Klappmessers. Die Übertragung von Fasern oder organischen Materialien, die zuvor an der Messerklinge hafteten und dann im Knocheneinstich zurückgelassen werden, erscheint dagegen plausibler, wurde aber in vorliegender Studie nicht untersucht.

Es bleibt darüber hinaus zu beachten, dass in gegenständlicher Studie zwischen dem Zufügen der Stichwunden und der REM-EDX-Analyse 123 Tage lagen. In dieser Zwischenzeit wurden die Rippen nicht nur mazeriert, sondern auch in Blumensteckschaum computertomographisch gescannt und makroskopisch fotografiert.

4.7 LIMITATIONEN

Vier wesentliche Einschränkungen müssen in vorliegender Studie beachtet werden:

1. Einsatz von Schweinerippen
2. Verwendung einer Fallvorrichtung
3. Lange Wartezeiten zwischen der Schlachtung des Schweins, dem Zufügen der Stichwunden und der Analyse der Einstiche
4. Unterschiedliche bzw. nicht reproduzierbare Auftreffposition der Messer in die Rippen

Die erste Einschränkung betrifft das Versuchsmodell. Die Messereinstiche sind nicht an menschlichen Rippen untersucht worden, auf welche die Ergebnisse schließlich projiziert werden, sondern an Schweinerippen. Ein deutlicher und bei Stichwunden wichtiger Unterschied zwischen menschlichen und Schweinerippen ist die Dicke des kortikalen Knochens. Waltenberger (2015) wies nach, dass Schweine im Gegensatz zum Menschen einen dickeren kortikalen Knochen besitzen. Im Vergleich zu menschlichen Rippen fällt deswegen die Einstichtiefe bei gleichbleibender Krafteinwirkung an Schweinerippen geringer aus.

Zudem waren schon vor den Versuchen vereinzelt Rippen gebrochen. Dies könnte auf die Schlachtung oder eine Übermästung der Schweine zurückzuführen sein. Seit den 1950er Jahren werden Schweine auf Wunsch des Verbrauchers mit zusätzlich etablierten Rippenpaaren gezüchtet. Während das Wildschwein auch heute in der Regel noch 12 Rippenpaare wie der Mensch besitzt, verfügt das moderne Hausschwein über bis zu 17 Rippenpaare. Dies hat ebenfalls Auswirkungen auf die einzelnen Rippen der Schweine, die nicht nur in der Küche landen, sondern auch auf Experimentiertischen von Wissenschaftlern (Drösser 2005, Schulze Brock & Schulze Brock 2015). Zwei mit dem Fallbeil zugefügte Einstiche befanden sich in unmittelbarer Nähe der Brüche und konnten nach Mazeration der Rippen nicht mehr analysiert werden.

Die Rippen 1b und 12 mit Einstichen vom Steak- und Klappmesser wurden sofort nach dem Fallbeil-Experiment als Testrippen mazeriert, sodass lediglich die Einstichmorphologie nach erfolgter Mazeration festgehalten werden konnte. Dementsprechend war auch kein Vergleich vor und nach dem Mazerieren bei Verwendung des Messers 12 ausführbar. Anhand der beiden Einstiche in Rippe 1a konnte ein Vorher-Nachher-Vergleich mit dem Steakmesser erfolgen.

Zwar stammten 17 der 19 analysierten Rippen vom gleichen Schwein, doch wurden dadurch auch alle Rippen – sowohl *Costae verae* und *C. spuriae* als auch *C. fluctuantes* – bei der Analyse mit eingeschlossen. Kieser et al. (2013) verwendeten dagegen nur die fünften Rippen. Diesbezüglich stellt sich die Frage, ob unterschiedliche Rippen eines Schweines oder die gleiche Rippennummer von verschiedenen Schweinen eine stärkere Uniformität indizieren.

Zweitens werden mit der Verwendung eines Fallbeils einige Variablen, die in realen Messerangriffen die Stichwundmorphologie beeinflussen, normiert oder nicht berücksichtigt. Dies stellt in Anbetracht der Reproduzierbarkeit der Resultate einen Vorteil dar, ist jedoch für die Extrapolierbarkeit auf reale Fälle ein Nachteil.

Die Stichverletzungen wurden mit gleichbleibender Krafteinwirkung von 45 J zugefügt. Bei abweichender Kraftintensität könnten andersartige Eigenschaften als die hier festgestellten entstehen. Darüber hinaus war die wirkende Kraft in gegenständlicher Studie aufgrund der nicht berücksichtigten Reibung zwischen den senkrechten Leitstangen und der herabgleitenden Fallbeilkonstruktion möglicherweise leicht geringer als die intendierten 45 J. Durch das Einfetten der langen Rohrdoppelnippel und dem vorhandenen Abstand zwischen den Stangen und des herabgleitenden Fallbeils wurde versucht, die Reibung beim Herabfallen der Messerhalterung zu minimieren.

Drittens konnten die Experimente aus organisatorischen Gründen nicht sofort nach dem Schlachten durchgeführt werden. Nach dem Zufügen der Stichverletzungen verging wiederum eine längere Zeit bis mit den Analysen begonnen werden konnte. In der Zwischenzeit wurden die Proben eingefroren und vor dem Scannen wieder langsam aufgetaut. Nach dem Auftauen enthielten die Probenbeutel Schmelzwasser aus dem Weichgewebe der Schweinerippen. Eine sofortige Untersuchung der frisch beigebrachten Stichwunden wäre vorteilhafter gewesen. Die Eigenschaften des Gewebes könnten sich mit der Zeit durch Dehydratation, Zersetzungsprozesse oder Extension von Muskel- und Fettzellen bei Frosteinwirkung verändert haben. Dehydratation von Knochengewebe führt z.B. zu einer engeren Verteilung der Kollagenmoleküle. Dagegen vergrößert sich der Abstand zwischen der Mineralphase und dem Kollagen bei Hydratation, was zu einer geringeren Sprödigkeit des Knochens beiträgt (Bradley et al. 2014).

Viertens führte die unterschiedliche Position des Auftreffens der Klingen in die Rippen zu verschiedenen großen Einstichen. Die in Kapitel 3.1.1 aufgelisteten Ausreißer innerhalb des aggregierten Datensatzes der Einstiche (Tabelle 14) entstanden nicht durch eine ungenaue oder fehlerhafte Messung, sondern durch die Variabilität der Einstichgrößen. Aus diesem Grund wurden alle Messungen berücksichtigt und keine Ausreißer von der Analyse ausgeschlossen. Vor allem die Länge der Einstiche ist hochvariable und richtet sich nach der exakten Auftreffstelle des Messers in die Schweinerippen. Je marginaler sich der Einstich an der Rippe befindet, desto kleiner ist entsprechend seine Länge. Eine noch geringere Aussagekraft als die Einstichlänge zeigte die Einstichbreite, da diese vorwiegend auf der Dicke der Rippe beruhte, welche wiederum von der Auftreffposition des Messers abhängig war. Rippen sind lateral und anterior deutlich flacher als dorsal.

In der vorliegenden Studie wurden erstmals Landmarks und Kurven entlang einer Kerbmarke digitalisiert sowie Rippeneinstiche segmentiert (Abb. 82). Die polymorphen Einstiche erlaubten aber – selbst innerhalb desselben Messers – keine geometrisch morphometrischen Analysen. Die segmentierten Einstiche und erstellten Kurven konnten in Amira als obj-Datei gespeichert und in das Softwarepaket *EVAN-Toolbox* (<http://evan-society.org>) importiert werden. Ein adäquater Vergleich mit anderen Rippeneinstichen war aufgrund der stark variierenden Einstichgestalt jedoch nicht möglich. Die EVAN-Toolbox ermöglicht in der Regel Form- und Gestaltanalysen von morphologisch ähnlichen Objekten mit einer komplexen Geometrie (Evan-Society 2010). Das Softwarepaket kann nur von EVAN-Society Mitgliedern genutzt werden und wurde in gegenständlicher Studie von der Wiener Arbeitsgruppe „Virtuelle Anthropologie“ zur Verfügung gestellt.

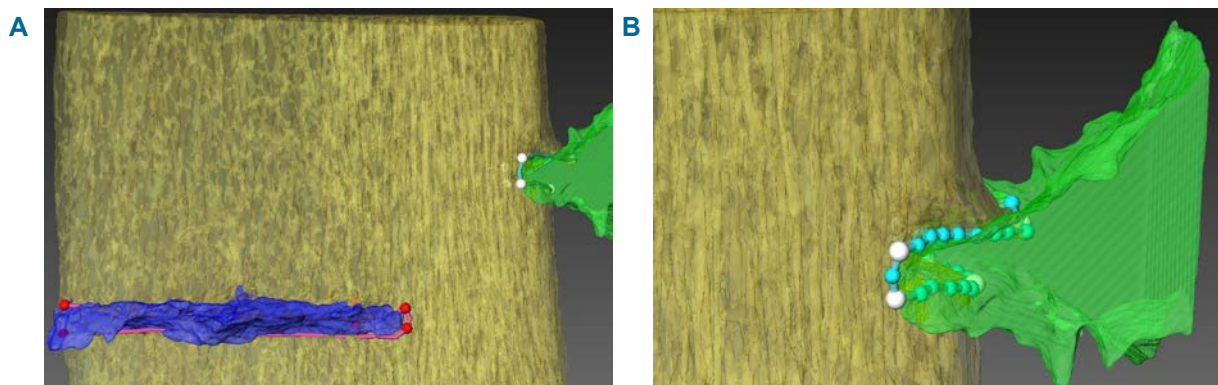


Abb. 82: Einstichkontur

- A** Rippe 1a mit den beiden segmentierten Einstichen (blau und grün), Landmarks an definierten Stellen der Rippeneinstiche (rot und weiß) sowie den beiden Kurven entlang der Einstichkonturen (rosa und türkis).
- B** Exemplarische Auswahl des segmentierten Einstichs 2 an Rippe 1a mit einer Kurve aus vielen Semilandmarks (türkis) entlang der Kerbmarke.

4.8 ZUKÜNFTIGE STUDIEN

Probengröße

Wie in den meisten experimentellen Trauma-Studien, ist auch in vorliegender die Probengröße ziemlich klein. Obwohl von jedem Messer für jeden Messparameter und jede Methode in der Regel jeweils 4 Messwerte dokumentiert wurden (≈ 1.000 Messwerte), sind insgesamt nur 29 Einstiche untersucht worden. Um aussagekräftigere statistische Ergebnisse zu erhalten, sind **mehr Einstiche pro Messer** nötig.

In Folgestudien sollten mindestens fünf Stiche pro Messer angefertigt werden, von denen jeweils drei Messungen pro Messparameter durchgeführt werden, damit die bisherigen Ergebnisse gestützt und die festgestellten Tendenzen bekräftigt oder relativiert werden können. Hierbei wäre eine **einheitliche Länge der Einstiche** für die Auswertung am geeignetsten, auch wenn dies nur eine Perspektive der Messerstiche beleuchten würde.

Versuchsmodell

In zukünftigen Studien sollte ebenfalls darauf geachtet werden, dass die vom Metzger erhaltenen Rippen keinerlei Frakturen aufweisen. Folgestudien könnten andere Knochen verwenden, die ebenfalls häufig Stichverletzungen erleiden, wie z.B. **Schlüssel-** oder **Brustbeine**.

Bisher galten Schweineknöchen u. a. aufgrund der Makrostruktur und des Knochenaufbaus bzw. -umbaus als sehr humanoid. Diesbezüglich wäre der Einsatz von **Minischweinen** überlegenswert. Zwar besitzen sie eine kleinere Statur als ein ausgewachsener Mensch, dafür ist ihre Fettschicht dünner, sodass eine intakte Epidermis verwendet werden könnte. In der Orthopädie und in biomedizinischen Studien wird das Minnesota Miniaturschwein bereits standardisiert als Tiermodell verwendet (Heino et al. 2012). Einschränkungen zeigen sich bei der Wachstumsrate von Minischweinen, die im Vergleich zum Hausschwein und Menschen langsamer verläuft. Allgemein ist die Knochenmineraldichte von jungen geschlachteten Schweinen (die beim Metzger zwischen vier Monaten und einem Jahr alt sind) mit der von einem 8- bis 10-jährigen Kind zu vergleichen, aber nicht mit der eines erwachsenen Menschen (Kalkwarf et al. 2007, Waltenberger 2015).

Ganz auf das Schwein zu verzichten und ein **neues, noch menschenähnlicheres Tiermodell** mit u.a. vergleichbaren kortikalen Knochendicken und Durchmessern der Havers-Kanäle zu etablieren, wäre ebenso erstrebenswert. Schließlich bleibt die Möglichkeit der vielerorts ethisch problematischen Versuche an **menschlichen Knochen**.

Mazerationsmethode

Die Rippen sollten in zukünftigen Studien bei Anwendung der beschriebenen Mikrowellenmethode nach dem Entfernen des Weichgewebes noch in warmem (aber nicht siedendem),

destillierten Wasser einweichen, um möglichst viele Fettreste von den Knochen zu lösen. In vorliegender Studie waren die Rippenfragmente nach der Trocknung auf Haushaltstüchern weiterhin fettig, sodass die Beschriftungen der einzelnen Rippen mit der Zeit verwischten und nachgezeichnet werden mussten, um eine Zuordnung langfristig zu gewährleisten.

Messmethode

Weiterhin könnten andere bzw. zusätzliche Messmethoden angewandt werden. So stellten Capuani et al. (2013) die **Epifluoreszenzmikroskopie** vor, bei der das Probeobjekt durch das Objektiv beleuchtet wird und die Fluoreszenz auf derselben Seite nachgewiesen wird, von der aus die Anregung erfolgte (Greulich & Kilian 1998). Das Epifluoreszenzmikroskop arbeitet gleichermaßen nicht-destruktiv und mit einer hohen Auflösung (1 μm) in 3D. Außerdem ist es einfach in seiner Bedienung und deutlich billiger als das μCT . Capuani et al. (2014) behaupteten mittels epifluoreszenzmikroskopischen Aufnahmen von Stichverletzungen an unvollständig mazerierten, menschlichen Rippen und Schlüsselbeinen einzigartige Klassenmerkmale identifizieren zu können. Anhand der Orientierung von Rissen, Knochenschuppen und seitlich zurückgedrängtem Knochengewebe ermittelten sie die Spitze und das Ende einer Verletzung, um Hinweise auf die Position des Angreifers zu erhalten. Dabei verwendeten Capuani und ihre Kollegen (2014) jedoch lediglich ein gezahntes und ein nicht-gezahntes Messer.

Gaudio et al. (2014) schlagen als weitere Messmethode die **Kegelstrahl-Computertomographie** (Cone beam computed tomography) mit Verwendung einer DICOM Datenbetrachtungs-Software vor. Die Anwendung dieses CTs ist kostengünstiger als das μCT und eine Verkleinerung der Probe ist ebenfalls nicht nötig. Gaudio et al. (2014) stellten fest, dass morphologische Analysen deutlich zuverlässiger sind im Vergleich zu metrischen Analysen, auf die sich vorliegende Studie konzentrierte.

Morphometrische Software

Neben dem in der vorliegenden Studie durchgeführten Vergleich der Einstichvolumina könnten die segmentierten Kerbmarken auch zur Vermessung der Einstichhöhe Verwendung finden (Abb. 83B). Inwieweit die Messwerte der segmentierten Einstiche mit denen der segmentierten Knochen übereinstimmen, sollen Folgestudien herausfinden. Die gegenständliche Arbeit wirft die Vermutung auf, dass die Höhenwerte von segmentierten Einstichen zu einer Überschätzung der Klingendicke neigen, da luftgefüllte Hohlräume in den Knochen leicht mitsegmentiert werden, die nicht zur tatsächlichen Verletzung durch die Messerklinge gehören.

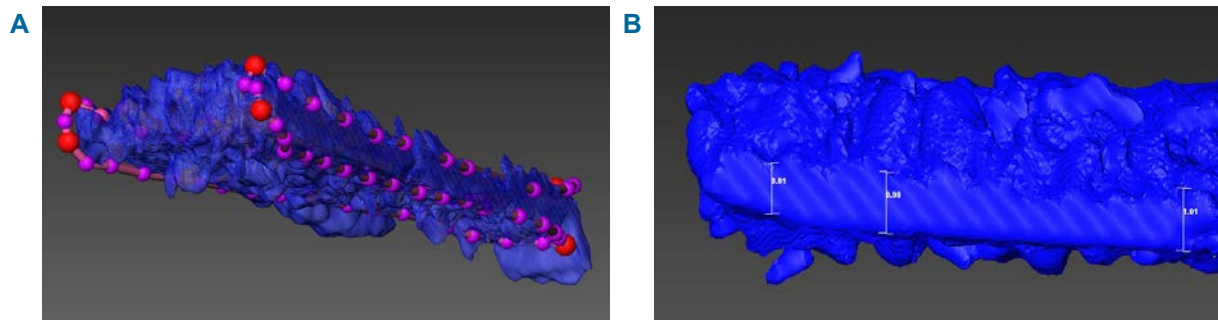


Abb. 83: Analyse der segmentierten Rippeneinstiche

- A** Isolierte Betrachtung der segmentierten Kerbmarke 1a.1 mit Landmarks (rot), Semilandmarks (rosa) und einer Kurve um die Einstichkontur.
- B** Die Vermessung der Einstichhöhe wäre auch an der segmentierten Kerbmarke selbst möglich, so wie hier exemplarisch an Einstich 1a.1 dargestellt. In der vorliegenden Studie flossen jedoch nur an Knochen genommene Messwerte in die Analyse mit ein.

Ob Landmarks und Kurven entlang den Rippenverletzungen auch ohne Bearbeitung in der EVAN-Toolbox zur Beschreibung der „Tatwaffen“ beitragen können, sollen zukünftige Studien zeigen. Dazu müsste eine Software gefunden werden, mit der die segmentierten Rippeneinstiche bzw. digitalisierten Landmarks und Kurven (Abb. 83A) morphometrisch ausgewertet werden können, auch wenn die Einstiche morphologisch hoch variable sind.

4.9 RESÜMEE

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Messereinstiche in Schweinerippen nur bedingt mit der Klingengestalt des Tatmessers korrelieren. Ob ein vorgelegtes Werkzeug tatsächlich die Verletzungen verursacht haben könnte und somit als Tatwerkzeug in Betracht kommt, kann aufgrund der diversen Einflussfaktoren nicht sicher beantwortet werden.

Hilfreiche Hinweise auf die Gestalt der Klinge – groß oder klein, spitz- oder stumpfwinklig – können anhand der hier vorgestellten Messparameter nur vage formuliert werden. Lediglich ein gezahntes Messer (das Steakmesser) hinterließ eine einseitige Rille am Kerbboden, die auf einen Wellenschliff der Klinge hinwies. Anhand der mittels Amira vermessenen maximalen Einstichhöhe kann mit einer Abweichung von max. $\pm 0,35$ mm auf die Messerklingendicke geschlossen und die Verletzungen den Messern zugeordnet werden. Bei neuerlicher Analyse nach Mazeration ergab sich eine durchschnittliche Verkleinerung der Knocheneinstichhöhe und -breite von bis zu 8,6 %.

Die Methoden der virtuellen Anthropologie können bei der Analyse von Knocheneinstichen einen wichtigen Beitrag zur Bestimmung der „Tatwaffen“ liefern. Trotz hohem Aufwand und hoher Kosten liefert die μ CT-Methode bei der Ausmessung der Einstiche die effektivsten Ergebnisse. Nur mit ihr konnten auch alle definierten Winkel der Einstichwände erfasst werden. Eine Kombination aus den hier vorgestellten Methoden könnte die erfolgsversprechendsten Ergebnisse liefern, um zumindest eine Einschränkung über das Tatwerkzeug zu ermöglichen oder gezielt bestimmte Messer als Tatwaffe auszuschließen. So könnte die volumenbasierte μ CT-Methode in Kombination mit der kostengünstigen, oberflächenbasierten Makrofotografie eingesetzt werden. Allerdings zeigen die variierenden Verletzungsmuster (u.a. im Sinne einer hohen Standardabweichung) und der Mangel an einheitlichen Merkmalen, dass eine Überinterpretation der Knochenläsionen möglich wäre und zu falschen Einschätzungen führen kann.

Die tps-Programme liefern zwar konkrete Charakterisierungen über die Klingen- und Einstichgestalt, jedoch können bisher noch keine unterschiedlichen Messertypen anhand ihrer Klingengemorphologie klassifiziert werden. Hierzu gleichen sich die Einstichprofile der verwendeten Klingen zu sehr und unterscheiden sich gleichzeitig zu stark innerhalb desselben Messers.

Der Einsatz des REM-EDX scheint nur unter Laborbedingungen, wenn die Einstiche bereits mazerierten Knochen zugefügt werden, erfolgsversprechend zu sein und Aufschluss über die Elementenzusammensetzung der Tatwaffe zu geben.

Wie Brogdon 1998 ausführte, können bewährte Methoden aus anderen Fachbereichen in die Forensik überführt werden und zur Aufklärung von Straftaten beitragen. Die vorliegende Studie beweist, dass vor allem die Mikrocomputertomographie ein vorteilhaftes Verfahren und Amira bzw. tps wichtige Softwareprogramme für die Analyse von Stichwunden sein können.

5 LITERATURVERZEICHNIS

- Alunni-Perret V**, Muller-Bolla M, Laugier J, Lupi-Pégurier L, Bertrand M, Staccini P, Bolla M, Quatrehomme G (2005) Scanning electron microscopy analysis of experimental bone hacking trauma. *Journal of forensic sciences* 50(4):796–801.
- Ammann AA** (2007) Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP MS): a versatile tool. *Journal of mass spectrometry* 42(4):419–427.
- Bai R**, Wan L, Li H, Zhang Z, Ma Z (2007) Identify the injury implements by SEM/EDX and ICP-AES. *Forensic science international* 166(1):8–13.
- Bartelink EJ**, Wiersema JM, Demaree RS (2001) Quantitative analysis of sharp-force trauma: an application of scanning electron microscopy in forensic anthropology. *Journal of forensic sciences* 46(6):1288–1293.
- Benker G** (1978) Alte Bestecke: Ein Beitrag zur Geschichte der Tischkultur. Callwey, München.
- Böhm E** (1970) Untersuchungen an experimentellen Stromverletzungen mit Elektronenstrahlen. *Z Rechtsmed* 67(5):293–308.
- Böker F** (2005) Multivariate Verfahren: Kapitel 4-Hauptkomponentenanalyse. Skript zur Vorlesung, Universität Göttingen. <http://www.statistik.wiso.uni-goettingen.de/veranstaltungen/Multivariate/Daten/mvsec4.pdf>. Zugriffen am 25.11.2015
- Bookstein FL** (1991) Morphometric tools for landmark data: Geometry and biology. Cambridge Univ. Press, Cambridge u.a.
- Bosch K** (1993) Über Stich- und Schnittverletzungen durch Messer mit geformten Schneiden. *Deutsche Zeitschrift für gerichtliche Medizin*(54):273–285.
- Boyde A** (1972) Scanning electron microscope studies of bone. The biochemistry and physiology of bone 1:259–310.
- Bradley AL**, Swain MV, Neil Waddell J, Das R, Athens J, Kieser JA (2014) A comparison between rib fracture patterns in peri- and post-mortem compressive injury in a piglet model. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 33:67–75.
- Bratzke H**, Schneider V, Dietz W (1982) Röntgenuntersuchungen bei gerichtlichen Leichenöffnungen. *RöFo-Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren* 136(04):463–472.
- Brüche E**, Busch H (eds) (1937) Beiträge zur Elektronenoptik: Vorträge von der Physikertagung 1936 sowie ergänzende Beiträge. Barth, Leipzig.
- Burd DQ**, Kirk PL (1942) Tool Marks. Factors Involved in Their Comparison and Use as Evidence. *Journal of Criminal Law and Criminology* (1931-1951) 32(6):679.

- Capuani C**, Rouquette J, Payré B, Moscovici J, Delisle MB, Telmon N, Guilbeau-Frugier C (2013) Deciphering the elusive nature of sharp bone trauma using epifluorescence macroscopy: a comparison study multiplexing classical imaging approaches. *Int. J. Legal Med.* 127(1):169–176.
- Capuani C**, Telmon N, Moscovici J, Molinier F, Aymeric A, Delisle M, Rougé D, Guilbeau-Frugier C (2014) Modeling and determination of directionality of the kerf in epifluorescence sharp bone trauma analysis. *International journal of legal medicine* 128(6):1059–1066.
- Carr DJ**, Wainwright A (2011) Variability of simulants used in recreating stab events. *Forensic science international* 210(1-3):42–46.
- Cassidy MT**, Curtis M (2005) Victims of Penetrating and Incised Wounds. In: Gilchrist MD (ed) IUTAM Symposium on Impact Biomechanics: From Fundamental Insights to Applications, vol 124. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, pp 405–414.
- Chadwick EK**, Nicol AC, Lane JV, Gray TG (1999) Biomechanics of knife stab attacks. *Forensic science international* 105(1):35–44.
- Cowper EJ**, Carr DJ, Horsfall I, Fergusson SM (2015) The effect of fabric and stabbing variables on severance appearance. *Forensic science international* 249:214–224.
- Dockner M** (2015) Scanparameter des Mikro-CTs. Persönliches Gespräch am 18.11.2015, Wien.
- Dommann M** (2003) Durchsicht, Einsicht, Vorsicht: Eine Geschichte der Röntgenstrahlen, 1896-1963. *Interferenzen*, vol 5. Chronos, Zürich.
- Doran CF**, McCormack, B. A. O., Macey A (2004) A Simplified Model to Determine the Contribution of Strain Energy in the Failure Process of Thin Biological Membranes during Cutting. *Strain* 40(4):173–179.
- Drösser C** (2005) Stimmt's?: Das System Schwein. http://www.zeit.de/2005/11/Stimmt_s_P. Zugegriffen am 11.01.2016.
- Elliott JC**, Dover SD (1982) X-ray microtomography. *Journal of microscopy* 126(Pt 2):211–213.
- Eurostat** (2015) Statistiken zur Kriminalität. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Crime_statistics/de. Zugegriffen am 22.11.2015
- Evan-Society** (2010) Setting landmarks in science. <http://evan-society.org>. Zugegriffen am 16.10.2015
- Feldkamp LA**, Goldstein SA, Parfitt AM, Jasion G, Kleerekoper M (1989) The direct examination of three-dimensional bone architecture in vitro by computed tomography. *J Bone Miner Res* 4(1):3–11.
- Ferlini R** (2012) Macroscopic and microscopic analysis of knife stab wounds on fleshed and clothed ribs. *Journal of forensic sciences* 57(3):683–690.

- Gaudio D**, Di Giancamillo M, Gibelli D, Galassi A, Cerutti E, Cattaneo C (2014) Does cone beam CT actually ameliorate stab wound analysis in bone? *International journal of legal medicine* 128(1):151–159.
- Gersdorff Hv** (1517) *Feldtbüch der wundtartzney*. Schott, Straßburg.
- Gibelli D**, Mazzarelli D, Porta D, Rizzi A, Cattaneo C (2012) Detection of metal residues on bone using SEM-EDS--part II: Sharp force injury. *Forensic science international* 223(1-3):91–96.
- Gilchrist MD**, Keenan S, Curtis M, Cassidy M, Byrne G, Destrade M (2008) Measuring knife stab penetration into skin simulant using a novel biaxial tension device. *Forensic science international* 177(1):52–65.
- Goff ML** (1991) Comparison of insect species associated with decomposing remains recovered inside dwellings and outdoors on the island of Oahu, Hawaii. *Journal of forensic sciences* 36(3):748–753.
- Grassberger M** (2015) Scheren als Tatwaffe. Persönliche Mitteilung am 23.10.2015, Wien.
- Grassberger M** (2016a) Weichteildicke. Persönliche Mitteilung am 30.03.2016, Wien.
- Grassberger M** (2016b) Stichwunden des Herzens und Halses. Persönliche Mitteilung am 05.04.2016, Wien.
- Grassberger M** (2016c) Neue Verfahren in der Rechtsmedizin. Persönliches Gespräch am 04.05.2016, Wien.
- Grassberger M**, Frank C (2004) Initial study of arthropod succession on pig carrion in a central European urban habitat. *Journal of medical entomology* 41(3):511–523.
- Grassberger M**, Schmid H, Koenig A (2009) *Todesermittlung: Befundaufnahme & Spurensicherung : ein praktischer Leitfaden für Polizei, Juristen und Ärzte*. Springer, Wien, New York.
- Greulich W**, Kilian U (eds) (1998) *Lexikon der Physik: In sechs Bänden*. Spektrum Akad. Verl, Heidelberg.
- Grieshofer F** (2003) *Messerscharf: Reflexionen über einen Alltagsgegenstand*; [Österreichisches Museum für Volkskunde, 31. August 2003 bis 31. Jänner 2004]. Kataloge des Österreichischen Museums für Volkskunde in Wien, vol 83. Österr. Museum für Volkskunde, Wien.
- Gross J**, Farinelli W, Sadow P, Anderson R, Bruns R (1995) On the mechanism of skin wound "contraction": a granulation tissue "knockout" with a normal phenotype. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 92(13):5982–5986.
- Hainsworth SV**, Delaney RJ, Ruttly GN (2008) How sharp is sharp? Towards quantification of the sharpness and penetration ability of kitchen knives used in stabbings. *Int. J. Legal Med.* 122(4):281–291.

- Harsányi L** (1993) Differential Diagnosis of Human and Animal Bone. In: Grupe G, Garland AN (eds) *Histology of Ancient Human Bone: Methods and Diagnosis*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 79–94.
- Hefti E**, Trechsel U, Rüfenacht H, Fleisch H (1980) Use of dermestid beetles for cleaning bones. *Calcified tissue international* 31(1):45–47
- Heino TJ**, Alm JJ, Moritz N, Aro HT (2012) Comparison of the osteogenic capacity of minipig and human bone marrow-derived mesenchymal stem cells. *Journal of Orthopaedic Research* 30(7):1019–1025.
- Hochmeister M**, Stimpfl T, Grassberger M (2007) *Forensische Medizin für Studium und Praxis: Mit 10 Tabellen*. Maudrich, Wien.
- Horsfall I**, Prosser PD, Watson CH, Champion SM (1999) An assessment of human performance in stabbing. *Forensic science international* 102(2-3):79–89.
- Horsfall I**, Watson C, Champion S, Prosser P, Ringrose T (2005) The effect of knife handle shape on stabbing performance. *Applied ergonomics* 36(4):505–511.
- Hounscome MV** (1988) Methods of bone preparation. In: Horie CV, Murphy RG (eds) *Conservation of natural history specimens: Vertebrates: proceedings of the short course at Manchester University*. University of Manchester, Dept. of Environmental Biology and the Manchester Museum, Manchester, UK, pp 19–26.
- Jones S**, Nokes L, Leadbeatter S (1994) The mechanics of stab wounding. *Forensic science international* 67(1):59–63.
- Kalkwarf HJ**, Zemel BS, Gilsanz V, Lappe JM, Horlick M, Oberfield S, Mahboubi S, Fan B, Frederick MM, Winer K, Shepherd JA (2007) The bone mineral density in childhood study: bone mineral content and density according to age, sex, and race. *J Clin Endocrinol Metab* 92(6):2087–2099.
- Keil P** (1983) Schwerpunkt '83: Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgen-Computer-Tomographie. *Physikalische Blätter* 39(1):2–8.
- Kemp SE**, Carr DJ, Kieser J, Niven BE, Taylor MC (2009) Forensic evidence in apparel fabrics due to stab events. *Forensic science international* 191(1-3):86–96.
- Kieser J**, Bernal V, Gonzalez P, Birch W, Turmaine M, Ichim I (2008) Analysis of experimental cranial skin wounding from screwdriver trauma. *Int. J. Legal Med.* 122(3):179–187.
- Kieser JA**, Weller S, Swain MV, Neil Waddell J, Das R (2013) Compressive rib fracture: perimortem and post-mortem trauma patterns in a pig model. *Legal medicine (Tokyo, Japan)* 15(4):193–201.
- King C**, Birch W (2015) Assessment of maceration techniques used to remove soft tissue from bone in cut mark analysis. *Journal of forensic sciences* 60(1):124–135.
- Knight B** (1975) The dynamics of stab wounds. *Forensic Sci* 6(3):249–255.

- Knight B** (1996) Forensic pathology, 2nd ed. Arnold; Oxford University Press, London, New York.
- Kooi RJ, Fairgrieve SI** (2013) SEM and stereomicroscopic analysis of cut marks in fresh and burned bone. *Journal of forensic sciences* 58(2):452–458.
- Laurie EMO, Hill JE** (1951) Use of dermestid beetles for cleaning mammalian skeletons. *The museums journal* 51(8):206–207
- Lynn KS, Fairgrieve SI** (2009a) Macroscopic analysis of axe and hatchet trauma in fleshed and defleshed mammalian long bones. *Journal of forensic sciences* 54(4):786–792.
- Lynn KS, Fairgrieve SI** (2009b) Microscopic indicators of axe and hatchet trauma in fleshed and defleshed mammalian long bones. *Journal of forensic sciences* 54(4):793–797.
- Madea B** (ed) (2015) Rechtsmedizin: Befunderhebung, Rekonstruktion, Begutachtung, 3. Aufl. SpringerLink: Bücher. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- McVicar MJ, Graves WJ** (1997) The Forensic Comparison of Soils by Automated Scanning Electron Microscopy. *Canadian Society of Forensic Science Journal* 30(4):241–261.
- Melki JAD, Martin CCS, Zerbini T** (2011) Scanning electron microscopy as an auxiliary method in the study of exhumed bones. *Forensic science international* 206(1-3):e67-70.
- Miller SA, Jones MD** (1996) Kinematics of four methods of stabbing: a preliminary study. *Forensic science international* 82(2):183–190.
- Mitteröcker P, Gunz P** (2014) Einführung in die multivariate Statistik für Anthropologen, Übung vom 23.06.-27.06.2014, Wien.
- Neubauer S** (2005) The endocranium of *Australopithecus africanus* MLD 37/38: New insights using Virtual Anthropology. Diplomarbeit, Universität Wien.
- Neubauer S, Gunz P** (2014) Virtuellen Anthropologie I: Meßdatenerfassung und Analyse, Übung vom 17.11.-20.11.2014, Wien.
- Oatley CW** (1982) The early history of the scanning electron microscope. *Journal of Applied Physics* 53(2).
- O'Callaghan PT, Jones MD, James DS, Leadbeatter S, Holt CA, Nokes LD** (1999) Dynamics of stab wounds: force required for penetration of various cadaveric human tissues. *Forensic science international* 104(2-3):173–178.
- Ohshima T** (2005) Diagnostic value of "superficial" stab wounds in forensic practice. *Journal of clinical forensic medicine* 12(1):32–35.
- Parmar K, Hainsworth SV, Ruttly GN** (2012) Quantification of forces required for stabbing with screwdrivers and other blunter instruments. *Int. J. Legal Med.* 126(1):43–53.
- Payne JA** (1965) A summer carrion study of the baby pig, *Sus Scrofa* Linnaeus. *Ecology*. 46(5):592-602.

- Pechníková M**, Porta D, Mazzarelli D, Rizzi A, Drozdová E, Gibelli D, Cattaneo C (2012) Detection of metal residues on bone using SEM-EDS. Part I: Blunt force injury. *Forensic science international* 223(1-3):87–90.
- Pfeiffer F** (2010) Hochauflösende Nano-Computertomographie. *Mediziner am Klinikum der Technischen Universität München. Faszination Forschung - Das Wissenschaftsmagazin* (7):34–35.
- Pollak S** (2007) Medical criminalistics. *Forensic science international* 165(2-3):144–149.
- Reball S** (1977) 40 Jahre Rasterelektronenmikroskop 1937--1977. *Biomedizinische Technik. Biomedical engineering* 22(12):317.
- Rhee PM**, Foy H, Kaufmann C, Areola C, Boyle E, Maier RV, Jurkovich G (1998) Penetrating cardiac injuries: a population-based study. *J Trauma* 45(2):366–370.
- Ritz K** (ed) (2009) *Criminal and environmental soil forensics*. Springer, Berlin.
- Rohlf FJ** (2005a) tpsDig2 (Version 2.17): Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook, New York.
- Rohlf FJ** (2005b) tpsUtil (Version 1.60): Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook, New York.
- Rohlf FJ** (2005c) tpsRelw (Version 1.54): Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook, New York.
- Rohlf FJ** (2005d) tpsRegr (Version 1.41): Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook, New York.
- Rutty GN**, Brough A, Biggs, M J P, Robinson C, Lawes, S D A, Hainsworth SV (2013) The role of micro-computed tomography in forensic investigations. *Forensic science international* 225(1-3):60–66.
- Saville PA**, Hainsworth SV, Rutty GN (2007) Cutting crime: the analysis of the "uniqueness" of saw marks on bone. *Int. J. Legal Med.* 121(5):349–357.
- Saverio Romolo F**, Margot P (2001) Identification of gunshot residue: A critical review. *Forensic science international* 119(2):195–211.
- Schmidt KH**, Gebel A (1999) ICP-MS: Was ist ICP-MS? <http://www.icp-ms.de/wasist.html>. Zugriffen am 22.04.2016
- Schmidt G**, Kallieris D (1982) Use of radiographs in the forensic autopsy. *Forensic science international* 19(3):263–270.
- Schneider V** (1972) Über die Untersuchung von Haaren mit dem Rasterelektronenmikroskop (Studies on hair using the scanning electron microscope). *Z Rechtsmed* 71(2):94–103

- Schneider V**, Woweries J, Grumme T (1979) Das "Schüttel-Trauma" des Säuglings (Trauma inflicted on a baby by shaking (author's transl)). *MMW Munch Med Wochenschr* 121(5):171–176.
- Schotsmans EM**, Fletcher JN, Denton J, Janaway RC, Wilson AS (2014) Long-term effects of hydrated lime and quicklime on the decay of human remains using pig cadavers as human body analogues: Field experiments. *Forensic science international* 238:141.e1-141.e13.
- Schultz JJ** (2008) Sequential monitoring of burials containing small pig cadavers using ground penetrating radar. *Journal of forensic sciences* 53(2):279–287.
- Schulze Brock J**, Schulze Brock H (2015) Schweine. <http://www.schweine-im-netz.de/museum.htm>. Zugegriffen am 11.01.2016.
- Slice DE** (2007) Geometric Morphometrics. *Annu. Rev. Anthropol.* 36(1):261–281.
- Slice DE** (ed) (2005) Modern morphometrics in physical anthropology. *Developments in primatology: progress and prospects*. Kluwer Academic / Plenum Publ, New York NY u.a.
- Slice DE** (2015) Geometric Morphometrics, Vorlesung vom 09.03.-01.07.2015, Wien.
- Slice DE**, Bookstein FL, Marcus LF, Rohlf FJ (1998) A Glossary for Geometric Morphometrics. <http://life.bio.sunysb.edu/morph/glossary/gloss1.html>. Zugegriffen am 11.03.2015
- Steadman DW**, DiAntonio LL, Wilson JJ, Sheridan KE, Tammariello SP (2006) The effects of chemical and heat maceration techniques on the recovery of nuclear and mitochondrial DNA from bone. *Journal of forensic sciences* 51(1):11–17.
- Stein KM**, Grünberg K (2009) Forensische Radiologie. *Der Radiologe* 49(1):73-86.
- Symes SA**, Chapman EN (2010) Knife and saw toolmark analysis in bone: A manual designed for the examination of criminal mutilation and dismemberment. Mercyhurst College, Erie, PA.
- Thali MJ**, Dirnhofer R (2004) Forensic radiology in German-speaking area. *Forensic science international* 144(2-3):233–242.
- Thali MJ**, Taubenreuther U, Karolczak M, Braun M, Brueschweiler W, Kalender WA, Dirnhofer R (2003) Forensic microradiology: micro-computed tomography (Micro-CT) and analysis of patterned injuries inside of bone. *Journal of forensic sciences* 48(6):1336–1342.
- Thompson, T J U**, Inglis J (2009) Differentiation of serrated and non-serrated blades from stab marks in bone. *Int. J. Legal Med.* 123(2):129–135.
- U.S. Department of Justice** (2014) uniform crime reports: violent crime. <https://www.fbi.gov/about-us/cjis/ucr/crime-in-the-u.s/2014/crime-in-the-u.s.-2014/offenses-known-to-law-enforcement/violent-crime>. Zugegriffen am 13.10.2015.
- United Nations Office on Drugs and Crime** (2015) Crime and criminal justice statistics. <https://unodc.org/unodc/en/data-and-analysis/statistics/crime.html>. Zugegriffen am 14.10.2015.

- Universität Wien** (o. J.) Zeiss Supra 55 VP. <https://nanozentrum.univie.ac.at/home/zeiss-supra-55-vp/>. Zugegriffen am 16.11.2015.
- Verhoff** MA, Kreutz K, Ramsthaler F, Schiwy-Bochat K (2006) Forensische Anthropologie und Osteologie-Übersicht und Definitionen. Deutsches Ärzteblatt : Ausgabe A, Praxis-Ausgabe, niedergelassene Ärzte 103(12):782.
- Vermeij** EJ, Zoon PD, Chang, S B C G, Keereweert I, Pieterman R, Gerretsen, R R R (2012) Analysis of microtraces in invasive traumas using SEM/EDS. Forensic science international 214(1-3):96–104.
- Vienna Micro-CT Lab** (o. J.) VISCOM X8060 NDT – 2D/3D-X-ray inspection: Technical Data. <http://www.micro-ct.at/en/facts/technische-daten>. Zugegriffen am 21.02.2016.
- Waltenberger** L (2015) Identification of cut marks after heat alteration. Master Thesis, Bournemouth University.
- Weber** G (2014) Virtuelle Anthropologie: 3D Anwendungen und Software, Übung am 11.12. 2014, Wien.
- Weber** GW, Benazzi S, Kullmer O (2014) Mikro-CT-Anwendungen in der biologischen Anthropologie. Journal für Mineralstoffwechsel & Muskuloskelettale Erkrankungen 21(2):68-68f.
- Weber** GW, Bookstein FL (2011) Virtual anthropology: A guide to a new interdisciplinary field. Springer, Wien u.a.
- Weber** W, Milz U (1974) Auftreffgeschwindigkeiten manueller Stichversuche. Beitrag zur Aufklärung der "äusseren Stichdynamik". Zeitschrift für Rechtsmedizin. Journal of legal medicine 74(4):267–271.
- Wüllenweber** R, Schneider V, Grumme T (1977) Computertomographische Untersuchungen bei Schädel-Schuss-Verletzungen. Zeitschrift für Rechtsmedizin. Journal of legal medicine 80(3):227–246.
- Zhi-Jin** Z, Jia-Zhen Z (1991) Study on the microstructures of skull fracture. Forensic science international 50(1):1–14.

6 ANHANG

6.1 ABBILDUNGEN ANHANG

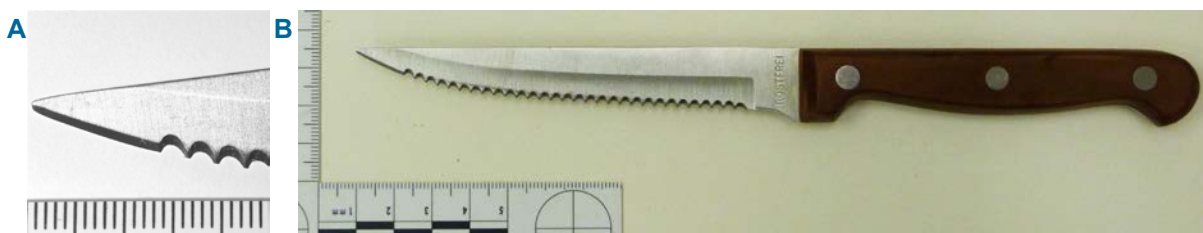


Abb. 84: Steakmesser (Messer Nr. 1)

Makroaufnahmen von der Klingenspitze und dem vollständig zu sehenden Messer 1. Das Fotomakrografische Winkellineal zeigt eine 1mm Teilung.



Abb. 85: Pizzamesser (Messer Nr. 2)

Makroaufnahmen von der Klingenspitze und dem vollständig zu sehenden Messer 2. Das Fotomakrografische Winkellineal zeigt eine 1mm Teilung.



Abb. 86: Seziermesser (Messer Nr. 3)

Makroaufnahmen von der Klingenspitze und dem vollständig zu sehenden Messer 3. Das Fotomakrografische Winkellineal zeigt eine 1mm Teilung.



Abb. 87: Knorpelmesser I (Messer Nr. 4)

Makroaufnahmen von der Klingenspitze und dem vollständig zu sehenden Messer 1. Das Fotomakrografische Winkellineal zeigt eine 1mm Teilung.



Abb. 88: Knorpelmesser II (Messer Nr. 5)

Makroaufnahmen von der Klingenspitze und dem vollständig zu sehenden Messer 5. Das Fotomakrografische Winkellineal zeigt eine 1mm Teilung.



Abb. 89: Zubereitungsmesser (Messer Nr. 6)

Makroaufnahmen von der Klingenspitze und dem vollständig zu sehenden Messer 6. Das Fotomakrografische Winkellineal zeigt eine 1mm Teilung.



Abb. 90: Blockmesser (Messer Nr. 7)

Makroaufnahmen von der Klingenspitze und dem vollständig zu sehenden Messer 7. Das Fotomakrografische Winkellineal zeigt eine 1mm Teilung.



Abb. 91: Grobes Sägemesser (Messer Nr. 8)

Makroaufnahmen von der Klingenspitze und dem vollständig zu sehenden Messer 8. Das Fotomakrografische Winkellineal zeigt eine 1mm Teilung.



Abb. 92: Jagdmesser (Messer Nr. 9)

Makroaufnahmen von der Klingenspitze und dem vollständig zu sehenden Messer 9. Das Fotomakrografische Winkellineal zeigt eine 1mm Teilung.



Abb. 93: Tomatenmesser (Messer Nr. 10)

Makroaufnahmen von der Klingenspitze und dem vollständig zu sehenden Messer 10. Das Fotomakrografische Winkellineal zeigt eine 1mm Teilung.



Abb. 94: Schere (Messer Nr. 11)

Makroaufnahmen von der Klingenspitze und dem vollständig zu sehenden Messer 11. Das Fotomakrografische Winkellineal zeigt eine 1mm Teilung.



Abb. 95: Klappmesser (Messer Nr. 12)

Makroaufnahmen von der Klingenspitze und dem vollständig zu sehenden Messer 12. Das Fotomakrografische Winkellineal zeigt eine 1mm Teilung.

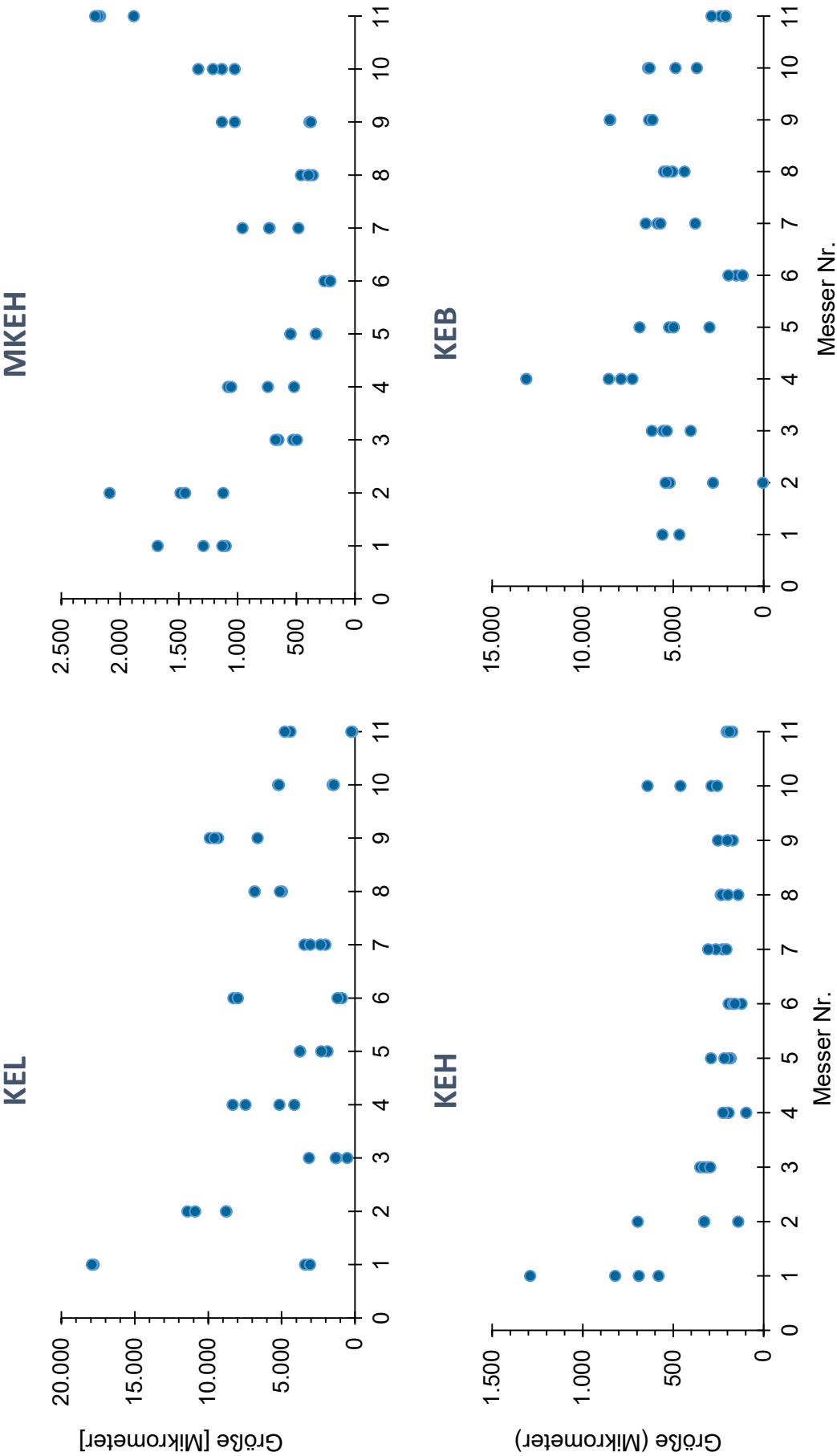


Abb. 96: Distanzmessungen μ CT mit nicht-mazerierten Rippen

Von jedem Messer wurden für jeden Messparameter (Knocheneinstichlänge [KEL], -höhe [KEH], -breite [KEB] sowie maximale Knocheneinstichhöhe [MKEH]) vier CT-Messwerte von nicht-mazerierten Rippen zufällig ausgewählt und für die Berechnung des Mittelwerts verwendet.

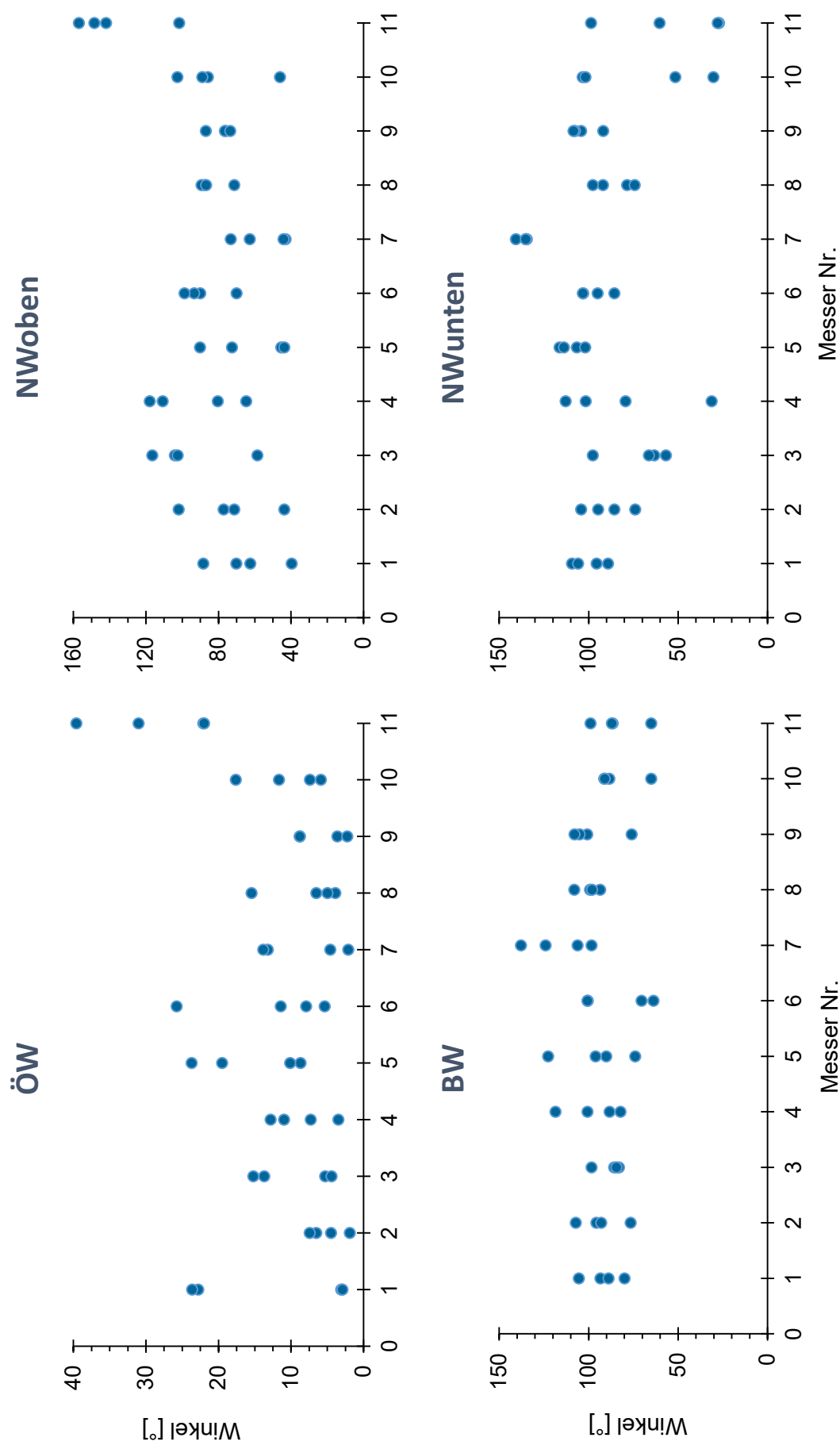


Abb. 97: Winkelmessungen μ CT mit nicht-mazerierten Rippen
Von jedem Messer wurden für jeden Messparameter (Öffnungswinkel [ÖW], Bodenwinkel [BW], oberer [NWoben] und unterer Neigungswinkel [NWunten]) vier CT-Messwerte von nicht-mazerierten Rippen zufällig ausgewählt und für die Berechnung des Mittelwerts verwendet.

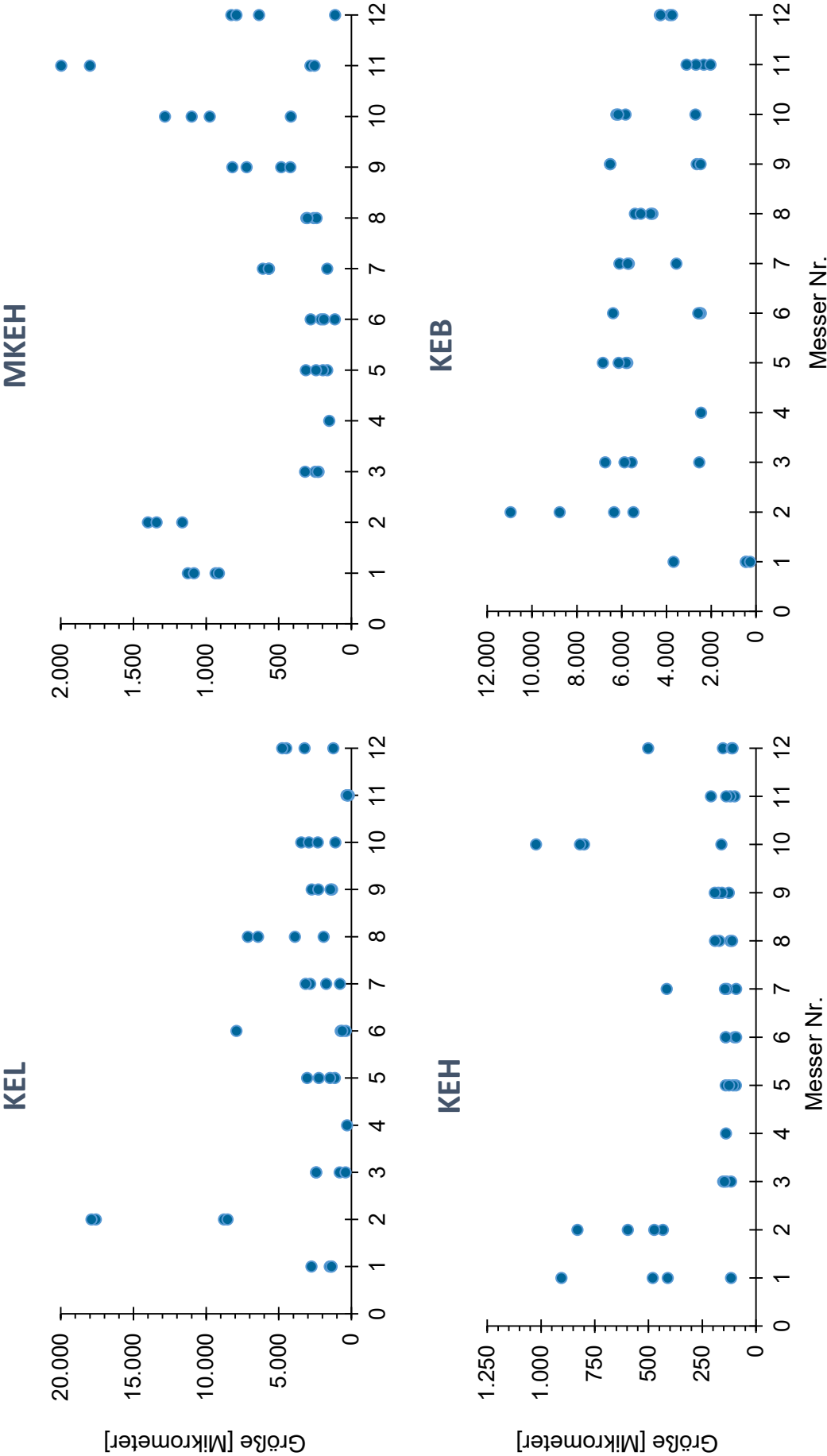


Abb. 98: : Distanzmessungen μ CT mit mazerierten Rippen

Von jedem Messer wurden für jeden Messparameter (Knocheneinstichlänge [KEL], -höhe [KEH], -breite [KEB] sowie maximale Knocheneinstichhöhe [MKEH]) vier CT-Messwerte von mazerierten Rippen zufällig ausgewählt und für die Berechnung des Mittelwerts verwendet.

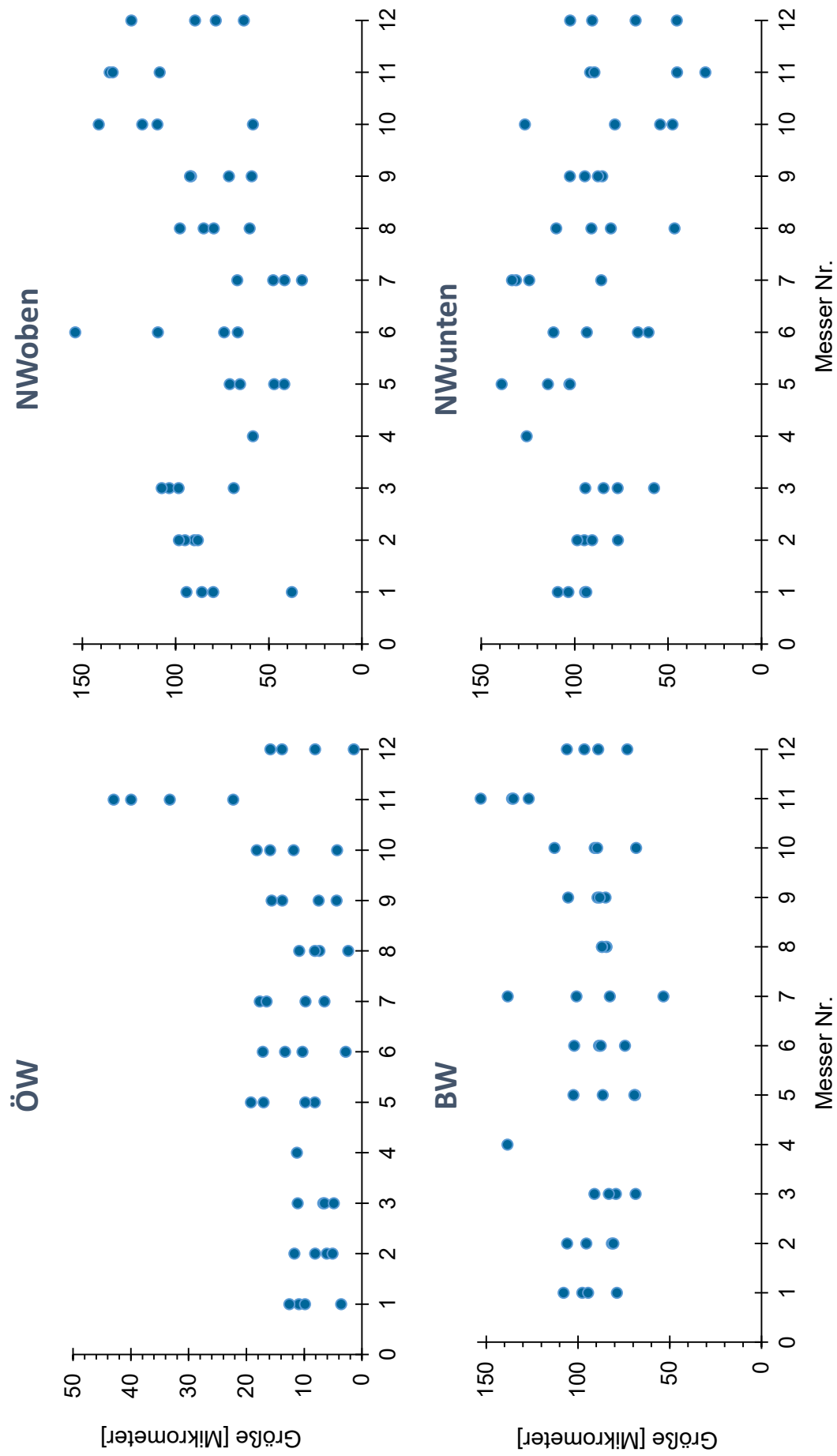


Abb. 99: Winkelmessungen μ CT mit mazerierten Rippen
Von jedem Messer wurden für jeden Messparameter (Öffnungswinkel [ÖW], Bodenwinkel [BW], oberer [NWoben] und unterer Neigungswinkel [NWunten]) vier CT-Messwerte von mazerierten Rippen zufällig ausgewählt und für die Berechnung des Mittelwerts verwendet.

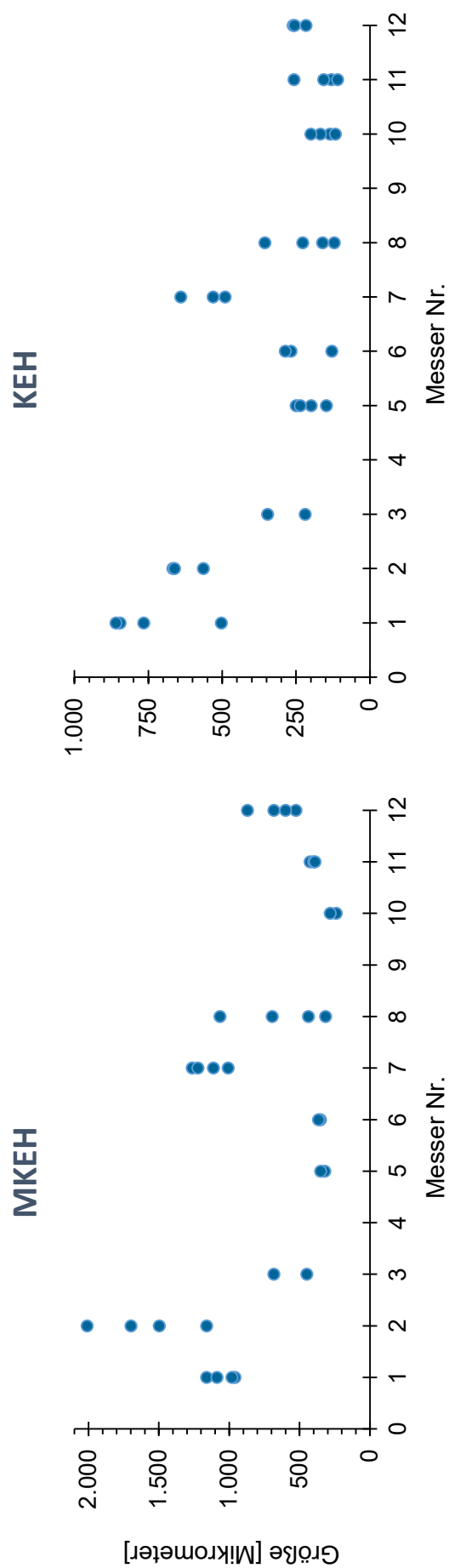


Abb. 100: Höhenmessungen REM

Von jedem Messer wurden für die beiden Messparameter KnochenEinstichhöhe [KEH] sowie maximale KnochenEinstichhöhe [MKEH] vier REM-Messwerte von mazerierten Rippen zufällig ausgewählt und für die Berechnung des Mittelwerts verwendet.

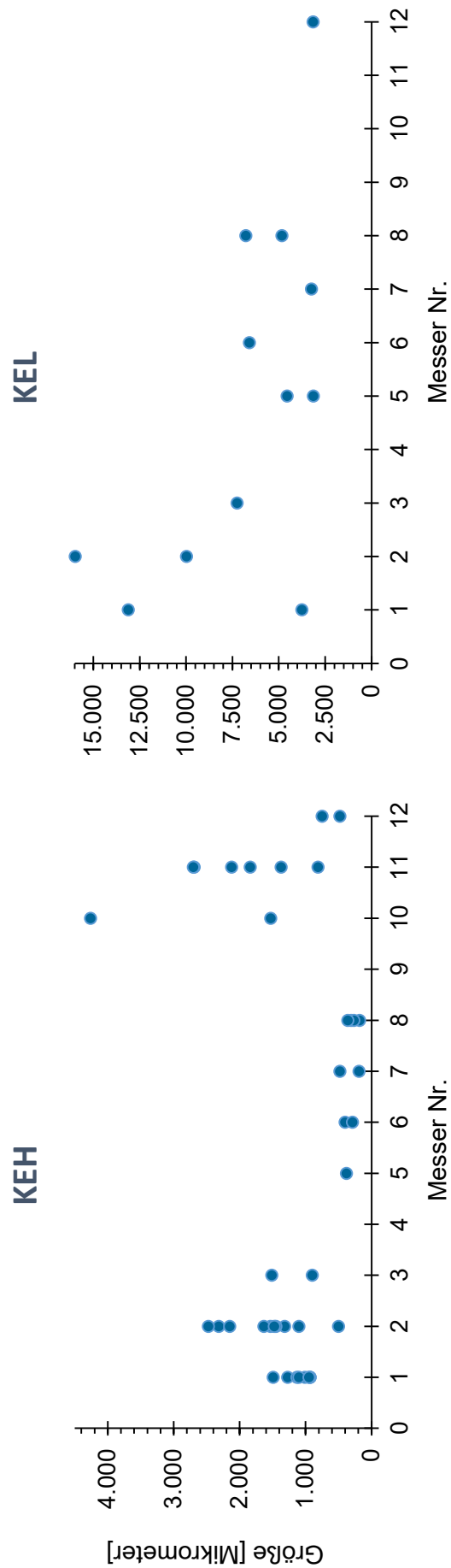


Abb. 101: Distanzmessungen Makrofotografie

Von jedem Messer wurden für die beiden Messparameter Knochen-einstichhöhe [KEH] und -länge [KEL] vier Makro-Messwerte von mazerierten Rippen zufällig ausgewählt und für die Berechnung des Mittelwerts verwendet.

6.2 TABELLEN ANHANG

Tabelle 40: Normalverteilung der Kerbmarken-Distanzen und -Winkel

Die Normalverteilung wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test überprüft (n = 44).

Messparameter	W	p	normalverteilt
Knocheneinstichlänge	0,89529	0,0007824	nein
Maximale Schulterlänge	0,88108	0,0002998	nein
Knocheneinstichhöhe	0,68286	1,816e-08	nein
Maximale Knocheneinstichhöhe	0,90144	0,001205	nein
Knocheneinstichbreite	0,9555	0,1018	ja
Öffnungswinkel	0,87711	0,0002316	nein
Unterer Neigungswinkel	0,9262	0,007718	nein
Oberer Neigungswinkel	0,94908	0,05085	ja
Bodenwinkel	0,97465	0,4362	ja

Tabelle 41: KEL vor Mazeration, Tukey multiple comparisons of means

Vor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA (n = 44; df = 10; F = 4,056; p = 0,00109).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Steak – Knorpel I	8982,5375	0,0127619
Pizza – Knorpel I	8397,1350	0,0248702
Steak – Schere	8147,1375	0,0327737
Steak – Block	7830,2900	0,0460852
Tomaten – Schere	950,4600	0,9999972
Steak – Pizza	585,4025	1,0000000

Tabelle 42: MSL vor Mazeration, Tukey multiple comparisons of means

Vor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA (n = 44; df = 10; F = 4,829; p = 0,000274).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Pizza – Knorpel I	10570,4125	0,0038029
Schere – Pizza	-9811,7325	0,0090149
Steak – Knorpel I	9543,6300	0,0121405
Pizza – Block	9523,2200	0,0124165
Pizza – Sezier	9287,6975	0,0160625
Tomaten – Pizza	-8882,7450	0,0247791
Steak – Schere	8784,9500	0,0274618
Steak – Bock	8496,4375	0,0370160
Steak – Sezier	8260,9150	0,0469679
Steak – Pizza	-1026,7825	0,9999966
Tomate – Schere	928,9875	0,9999987

Tabelle 43: KEH vor Mazeration, Tukey multiple comparisons of means

Vor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA ($n = 44$; $df = 10$; $F = 8,725$; $p = 8,85e-07$).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Zubereitungs – Steak	-684,2300	0,0000013
Steak – Knorpel II	665,4500	0,0000022
Steak – Schere	653,2350	0,0000032
Steak – Säge	643,8400	0,0000043
Steak – Jagd	639,3975	0,0000049
Steak – Sezier	624,4225	0,0000078
Steak – Block	593,8550	0,0000197
Steak – Knorpel I	523,4975	0,0001694
Steak – Pizza	471,6400	0,0008179
Tomaten – Steak	-433,4800	0,0025491
Zubereitungs – Jagd	-44,8325	0,9999916
Schere – Knorpel II	12,2150	1,0000000

Tabelle 44: MKEH vor Mazeration, Tukey multiple comparisons of means

Vor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA ($n = 44$; $df = 10$; $F = 24,4$; $p = 1,91e-12$).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Schere – Block	1389,2950	0,0000000
Schere – Jagd	1383,0100	0,0000000
Schere – Knorpel I	1525,8650	0,0000000
Schere – Sezier	1672,7925	0,0000000
Schere – Säge	1710,0575	0,0000000
Zubereitungs – Schere	-1887,9525	0,0000000
Zubereitungs – Pizza	-1310,1900	0,0000001
Schere – Knorpel II	1264,6425	0,0000003
Säge – Pizza	-1132,2950	0,0000026
Pizza – Sezier	1095,0300	0,0000049
Zubereitungs – Steak	-1074,3650	0,0000071
Zubereitungs – Tomaten	-949,9200	0,0000653
Pizza – Knorpel I	948,1025	0,0000675
Tomaten – Schere	-938,0325	0,0000808
Steak – Säge	896,4700	0,0001697
Steak – Sezier	859,2050	0,0003294
Steak – Schere	-813,5875	0,0007381
Pizza – Block	811,5325	0,0007653
Pizza – Jagd	805,2475	0,0008547

Fortsetzung Tabelle 44

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Tomaten – Säge	772,0250	0,0015275
Tomaten – Sezier	734,7600	0,0029058
Steak – Knorpel I	712,2775	0,0042607
Pizza – Knorpel II	686,8800	0,0065276
Zubereitungs – Knorpel II	-623,3100	0,0183633
Tomaten – Knorpel I	587,8325	0,0318600
Schere – Pizza	577,7625	0,0371001
Steak – Block	575,7075	0,0382617
Knorpel II – Jagd	118,3675	0,9995640
Jagd – Block	6,2850	1,0000000

Tabelle 45: KEB vor Mazeration, Tukey multiple comparisons of means

Vor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA ($n = 44$; $df = 10$; $F = 8,575$; $p = 1,64\text{e-}06$).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Zubereitungs – Knorpel II	-7748,8900	0,0000010
Schere – Knorpel II	-6840,2950	0,0000106
Zubereitungs – Jagd	-5912,3825	0,0001284
Pizza – Knorpel II	-5833,0275	0,0001590
Schere – Jagd	-5003,7875	0,0014680
Sezier – Knorpel II	-4189,2450	0,0119724
Säge – Knorpel II	-4139,4350	0,0135428
Zubereitungs – Block	-4014,7375	0,0183737
Pizza – Jagd	-3996,5200	0,0192026
Knorpel II – Knorpel I	3920,3525	0,0230631
Tomaten – Knorpel II	-3888,2375	0,0248989
Zubereitungs – Tomaten	-3860,6525	0,0265834
Zubereitungs – Knorpel I	-3828,5375	0,0286776
Knorpel II – Block	3734,1525	0,0357478
Zubereitungs – Säge	-3609,4550	0,0475376
Steak – Knorpel II	-4075,9500	0,0878502
Säge – Block	-405,2825	0,9999986
Tomaten – Sezier	301,0075	0,9999999

Tabelle 46: ÖW vor Mazeration, Tukey multiple comparisons of meansVor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA ($n = 44$; $df = 10$; $F = 3,733$; $p = 0,002$).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Schere – Pizza	23,5900	0,0009481
Schere – Jagd	22,8200	0,0014954
Schere – Säge	20,9675	0,0043924
Schere – Block	20,2425	0,0066338
Schere – Knorpel II	20,0375	0,0074454
Schere – Knorpel I	19,0225	0,0130719
Schere – Tomaten	18,0350	0,0222478
Säge – Pizza	2,6225	0,9999671
Zubereitungs – Tomaten	1,9650	0,9999978

Tabelle 47: NWoben vor Mazeration, Tukey multiple comparisons of meansVor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA ($n = 44$; $df = 10$; $F = 4,776$; $p = 0,000299$).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Schere – Block	81,4800	0,0000976
Schere – Sezier	74,2850	0,0004197
Steak – Schere	-72,0875	0,0006531
Schere – Pizza	63,7025	0,0034273
Schere – Jagd	58,9975	0,0084177
Tomaten – Schere	-56,3325	0,0138003
Schere – Säge	53,4875	0,0230564
Zubereitungs – Schere	-49,2325	0,0480160
Steak – Pizza	-8,3850	0,9999365
Knorpel II – Knorpel I	-1,9200	1,0000000

Tabelle 48: NWunten, Tukey multiple comparisons of meansVor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA ($n = 44$; $df = 10$; $F = 4,665$; $p = 0,000364$).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Schere – Block	-82,8950	0,0001165
Knorpel I – Block	-65,3500	0,0035309
Tomaten – Block	-64,6125	0,0040561
Schere – Sezier	-56,1625	0,0188512
Knorpel II – Block	-55,0450	0,0228919
Zubereitungs – Pizza	7,0875	0,9999897
Tomaten – Knorpel I	0,7375	1,0000000

Tabelle 49: BW vor Mazeration, Tukey multiple comparisons of meansVor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA ($n = 44$; $df = 10$; $F = 1,743$; $p = 0,112$).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Zubereitungs – Block	-32,8000	0,0872628
Tomaten – Block	-32,6925	0,0893083
Schere – Block	-32,2575	0,0980099
Pizza – Jagd	-4,2725	0,9999975
Zubereitungs – Tomaten	-0,1075	1,0000000

Tabelle 50: KEL nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of meansVor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA ($n = 48$; $df = 11$; $F = 10,41$; $p = 3,31\text{e-}08$).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Knorpel II – Pizza	-12897,2875	0,0000000
Schere – Pizza	-12934,6025	0,0000000
Knorpel I – Pizza	-11677,3175	0,0000002
Pizza – Steak	11447,6625	0,0000003
Sezier – Pizza	-11214,2025	0,0000005
Jagd – Pizza	-11249,4625	0,0000005
Block – Pizza	-11069,1625	0,0000007
Zubereitungs – Pizza	-10780,2050	0,0000012
Tomaten – Pizza	-10741,9275	0,0000013
Klapp – Pizza	-9769,6700	0,0000091
Säge – Pizza	-8359,3925	0,0001540
Sezier – Knorpel I	463,1150	1,0000000
Tomaten – Zubereitungs	38,2775	1,0000000

Tabelle 51: MSL nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of meansVor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA ($n = 48$; $df = 11$; $F = 11,92$; $p = 5,74\text{e-}09$).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Knorpel I – Pizza	-12158,9250	0,0000000
Knorpel II – Pizza	-13762,2625	0,0000000
Schere – Pizza	-13743,6150	0,0000000
Pizza – Steak	11762,2000	0,0000001
Jagd – Pizza	-11808,7200	0,0000001
Sezier – Pizza	-11452,5575	0,0000002
Zubereitungs – Pizza	-11453,4325	0,0000002
Block – Pizza	-11343,8950	0,0000002

Fortsetzung Tabelle 51

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Tomaten – Pizza	-10686,7525	0,0000009
Klapp – Pizza	-10310,1975	0,0000020
Säge – Pizza	-8975,1200	0,0000305
Jagd – Steak	-46,5200	1,0000000
Zubereitungs – Sezier	-0,8750	1,0000000

Tabelle 52: KEH nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of means

Vor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA ($n = 48$; $df = 11$; $F = 5,85$; $p = 2.41\text{e-}05$).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Tomaten – Sezier	583,6125	0,0010949
Tomaten – Zubereitungs	582,0750	0,0011370
Tomaten – Knorpel I	562,5125	0,0018320
Tomaten – Knorpel II	560,6325	0,0019174
Tomaten – Schere	558,8700	0,0020010
Tomaten – Säge	552,7750	0,0023182
Tomaten – Block	503,5625	0,0074187
Tomaten – Klapp	481,5225	0,0122721
Sezier – Pizza	-466,1775	0,0172851
Zubereitungs – Pizza	-464,6400	0,0178816
Knorpel I – Pizza	-445,0775	0,0273488
Knorpel II – Pizza	-443,1975	0,0284689
Schere – Pizza	-441,4350	0,0295571
Säge – Pizza	-435,3400	0,0336214
Jagd – Pizza	-419,8550	0,0463387
Schere – Säge	-6,0950	1,0000000
Zubereitungs – Sezier	1,5375	1,0000000

Tabelle 53: MKEH nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of meansVor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA ($n = 48$; $df = 11$; $F = 6,158$; $p = 1,42e-05$).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Knorpel II – Pizza	-1432,4225	0,0001397
Zubereitungs – Pizza	-1387,2250	0,0002370
Sezier – Pizza	-1355,8800	0,0003414
Knorpel I – Pizza	-1329,8425	0,0004618
Säge – Pizza	-1307,3325	0,0005990
Block – Pizza	-1107,7625	0,0056549
Klapp – Pizza	-994,5925	0,0187021
Jagd – Pizza	-975,0225	0,0228131
Schere – Knorpel II	929,7050	0,0357433
Klapp – Jagd	-19,5700	1,0000000
Säge – Zubereitungs	79,8925	1,0000000

Tabelle 54: KEB nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of meansVor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA ($n = 48$; $df = 11$; $F = 6,015$; $p = 1,81e-05$).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Pizza – Steak	6675,5225	0,0000119
Knorpel II – Pizza	-5435,8150	0,0004265
Schere – Pizza	-5352,8275	0,0005401
Sezier – Steak	4920,4150	0,0018204
Zubereitungs – Pizza	-4399,9700	0,0074728
Block – Steak	4052,2625	0,0183447
Tomaten – Steak	4019,6200	0,0199111
Knorpel I – Steak	3959,9000	0,0231037
Klapp – Pizza	-3848,7275	0,0303426
Säge – Steak	3759,3200	0,0376160
Sezier – Knorpel II	3680,7075	0,0452841
Tomaten – Block	-32,6425	1,0000000
Tomaten – Knorpel I	59,7200	1,0000000

Tabelle 55: ÖW nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of means

Vor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA ($n = 48$; $df = 11$; $F = 7,859$; $p = 9,95e-07$).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Schere – Säge	27,4325	0,0000006
Schere – Knorpel I	27,3250	0,0000007
Schere – Pizza	26,8675	0,0000010
Schere – Steak	25,3700	0,0000032
Schere – Klapp	24,8050	0,0000050
Schere – Jagd	24,2775	0,0000077
Schere – Zubereitungs	23,7125	0,0000122
Schere – Knorpel II	23,3650	0,0000162
Schere – Tomaten	22,0400	0,0000478
Schere – Block	21,9925	0,0000496
Schere – Sezier	21,0600	0,0001059
Tomaten – Sezier	0,9800	1,0000000
Jagd – Klapp	0,5275	1,0000000

Tabelle 56: NWunten nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of means

Vor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA ($n = 48$; $df = 11$; $F = 3,273$; $p = 0,00346$).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Schere – Knorpel II	-61,6650	0,0102971
Schere – Block	54,6675	0,0347634
Säge – Knorpel I	3,7025	1,0000000
Klapp – Tomaten	-0,2975	1,0000000

Tabelle 57: NWoben nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of means

Vor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA ($n = 48$; $df = 11$; $F = 4,863$; $p = 0,000142$).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Schere – Jagd	86,3600	0,0001385
Schere – Sezier	77,1325	0,0008202
Schere – Knorpel II	74,9750	0,0012350
Schere – Block	59,8125	0,0190897
Schere – Steak	59,0475	0,0217187
Tomaten – Block	54,7800	0,0436073
Jagd – Block	-1,9475	1,0000000
Knorpel I – Pizza	1,7075	1,0000000

Tabelle 58: BW nach Mazeration, Tukey multiple comparisons of means

Vor dem Tukey HSD-Test erfolgte eine ANOVA (n = 48; df = 11; F = 6,725; p = 5,64e-06).

Messer-Paarungen	Differenz der Mittelwerte [μm]	p
Knorpel II– Knorpel I	57,8625	0,0002438
Schere – Knorpel I	57,2700	0,0002876
Sezier – Knorpel II	-56,6425	0,0003425
Schere – Sezier	56,0500	0,0004038
Säge – Knorpel II	-52,6500	0,0010307
Schere – Säge	52,0575	0,0012117
Zubereitungs – Knorpel II	-50,2150	0,0019962
Schere – Zubereitungs	49,6225	0,0023407
Tomaten – Knorpel II	-48,0350	0,0035732
Schere – Pizza	47,4925	0,0041235
Schere – Tomaten	47,4425	0,0041782
Klapp – Knorpel II	-47,2000	0,0044533
Knorpel II – Pizza	46,9000	0,0048179
Klapp – Schere	-46,6075	0,0052009
Jagd – Knorpel II	-46,4250	0,0054545
Schere – Jagd	45,8325	0,0063624
Block – Knorpel II	-44,6225	0,0086858
Schere –Block	44,0300	0,0100995
Knorpel II – Steak	43,7125	0,0109443
Schere – Steak	43,1200	0,0127029
Säge – Zubereitungs	2,4350	1,0000000
Tomaten – Pizza	-0,5425	1,0000000

Tabelle 59: Korrelation mit Distanzen

Auflistung aller Pearson-Korrelationen zw. den ermittelten Distnazen der Kerbmarken vor Mazeration.

	t	df	p	r
KEL – MSL	17,285	42	< 2,2e-16	0,9363471
KEL – KEH	1,7571	42	0,08619	0,2616776
MKEH – KEH	1,7561	42	0,08636	0,261538
MSL – KEH	1,675	42	0,1014	0,2502371
MKEH – MSL	1,4921	42	0,1431	0,2243727
MKEH – KEB	-1,0805	40	0,2864	-0,1683982
KEL – KEB	1,0422	40	0,3036	0,1625954
MSL – KEB	1,012	40	0,3176	0,1579949
KEL – MKEH	0,91337	42	0,3663	0,1395571
KEH – KEB	0,44772	40	0,6568	0,07061418

Tabelle 60: Korrelation mit Winkeln und Distanzen

Auflistung aller Pearson-Korrelationen zwischen den ermittelten Winkeln und Distanzen der Kerbmarken vor Mazeration.

	t	df	p	r
NWoben – MKEH	2,8454	42	0,006829	0,4020142
ÖW – KEL	-2,282	42	0,02762	-0,3321327
NWunten – MKEH	-2,2797	42	0,02777	-0,3318275
ÖW – MKEH	2,1968	42	0,03371	-0,3208513
ÖW – KEB	-2,063	40	0,04565	0,3101039
BW – KEB	1,9281	40	0,06096	0,2916085
NWoben – KEH	-1,501	42	0,1408	-0,2256356
BW – MKEH	-0,87619	42	0,3859	-0,1339801
ÖW – KEH	0,65145	42	0,5183	0,1000167
NWoben – KEB	-0,52805	40	0,6004	-0,08320255
NWoben – KEL	-0,42807	42	0,6708	-0,06590842
NWoben – MSL	-0,30797	42	0,7596	-0,04746686
BW – KEL	-0,25491	42	0,8000	-0,03930259
NWunten – KEL	0,25139	42	0,8027	0,03876076
NWunten – MSL	0,13877	42	0,8903	0,02140732
NWunten – KEB	-0,099081	40	0,9216	-0,01566418
BW – MSL	0,084271	42	0,9332	0,01300227
NWunten – KEH	0,039507	42	0,9687	0,006095979

Tabelle 61: Korrelation mit Winkeln

Auflistung aller Pearson-Korrelationen zw. den ermittelten Winkeln der Kerbmarken vor Mazeration.

	t	df	p	r
NWoben – NWunten	-4,7798	42	2,169e-05	-0,5935595
NWunten – BW	3,0397	42	0,004065	0,4246516
NWoben – ÖW	2,4035	42	0,02073	0,347726
NWoben – BW	-1,887	42	0,06608	-0,2795667
NWunten – ÖW	-1,5951	42	0,1182	-0,2389949
ÖW – BW	-0,74899	42	0,4580	-0,1148072

Tabelle 62: Deskriptive Statistik Messer 1 vor Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, Boden-, unterer und oberer Neigungswinkel vor der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	4	4	16	10	2	4	4	4	4
min	3.064,15	4.470,00	114,00	1.100,00	4.652,37	2,92	39,70	89,16	79,89
max	17.924,70	18.640,00	1.290,00	1.805,40	5.593,70	23,62	88,34	109,30	105,46
Mittelwert	10.544,71	11.457,95	805,99	1.410,54	5.123,03	13,11	65,16	99,98	91,89
Median	10.595,00	11.360,90	805,00	1.335,00	5.123,03	12,95	66,31	100,73	91,10
SD	8.450,88	7.989,20	307,36	271,55	665,62	11,66	20,15	9,27	10,64
Varianz	71.417.399,20	63.827.369,50	94.468,31	73.737,93	8.896.162,49	136,06	406,11	85,91	113,33

Tabelle 63: Deskriptive Statistik Messer 2 vor Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel vor der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	6	8	13	5	4	4	4	4	4
min	5.767,50	6.574,40	116,00	1.123,08	46,40	1,90	74,00	43,70	76,50
max	11.412,10	19.182,21	872,27	2.325,24	5.418,13	7,44	104,20	101,99	107,24
Mittelwert	8.694,12	10.878,41	495,47	1.693,71	3.365,96	5,09	89,63	73,55	93,11
Median	8.765,25	10.684,38	446,23	1.484,57	3.999,65	5,50	90,16	74,25	94,35
SD	2.252,10	3.901,09	263,89	496,50	2.510,10	2,45	12,89	23,93	12,68
Varianz	5.071.964,37	15.218.490,60	69.637,69	246.511,80	6.300.597,22	6,01	166,10	572,66	160,78

Tabelle 64: Deskriptive Statistik Messer 3 vor Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel vor der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	9	11	6	12	14	6	6	6	6
min	399,20	557,00	250,80	450,44	2.519,15	4,41	58,50	12,12	52,99
max	5.778,62	8.029,41	350,00	962,92	8.369,12	18,24	140,40	97,70	103,66
Mittelwert	2.098,21	2.933,55	302,83	579,98	4.781,28	11,69	98,05	59,66	84,70
Median	1.313,11	2.333,84	302,58	520,35	4.844,19	13,50	103,25	62,53	85,08
SD	1.693,01	2.246,15	35,63	146,18	1.658,38	5,58	30,83	27,48	17,64
Varianz	2.866.280,26	5.045.201,16	1.269,84	21.368,64	2.750.215,16	31,13	950,33	755,37	311,26

Tabelle 65: Deskriptive Statistik Messer 4 vor Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel vor der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	4	4	2	2	4	4	4	4	4
min	1.179,20	5.123,07	519,44	1.053,74	7.254,90	3,47	64,75	31,30	82,13
max	8.340,55	8.893,86	742,37	1.080,23	13.113,49	12,80	117,83	112,91	118,50
Mittelwert	6.272,85	6.939,60	630,91	1.066,99	9.198,98	8,64	93,44	81,33	97,39
Median	6.306,56	6.870,74	630,91	1.066,99	8.213,77	9,14	95,60	90,55	94,46
SD	1.956,57	1.679,65	157,64	18,73	2.663,13	4,13	25,10	36,14	16,04
Varianz	3.828.184,52	2.821.225,58	24.849,56	350,81	7.092.266,02	17,09	629,91	1.306,29	257,20

Tabelle 66: Deskriptive Statistik Messer 5 vor Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel vor der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	5	5	13	6	3	4	4	4	4
min	1.592,25	1.918,17	137,79	328,95	4.970,29	8,7	43,70	101,93	73,99
max	3.747,68	4.184,61	291,92	550,19	6.855,77	23,71	90,2	116,2	122,64
Mittelwert	2.648,74	2.941,26	217,01	418,15	5.681,29	15,51	62,96	109,64	95,71
Median	2.294,91	2.300,00	191,47	375,057	5217,8	14,81	58,98	110,21	93,1
SD	1.030,55	1.140,94	52,26	106,93	1.024,63	7,27	22,46	6,56	20,23
Varianz	1.062.024,35	1.301.748,38	2.730,84	11.434,91	1.049.869,61	52,86	504,54	43,05	409,45

Tabelle 67: Deskriptive Statistik Messer 6 vor Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel vor der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	4	4	6	5	4	4	4	4	4
min	890,50	1.312,14	121,63	209,36	1.171,18	5,37	70,00	85,66	63,73
max	8.272,76	8.273,00	192,82	270,18	1.940,00	25,75	98,69	103,22	100,70
Mittelwert	4.587,70	4.732,38	157,39	234,55	1.450,10	12,61	88,02	96,72	83,83
Median	4.593,77	4.672,20	160,29	220,90	1.344,60	9,65	91,69	99,00	85,45
SD	4.094,88	3.933,47	24,48	28,40	363,37	9,10	12,53	8,34	19,55
Varianz	16.768.068,06	15.472.146,98	599,28	806,45	132.034,60	82,88	157,08	69,51	382,36

Tabelle 68: Deskriptive Statistik Messer 7 vor Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel vor der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	5	5	5	2	5	4	4	4	4
min	1.969,40	2.264,30	200,00	726,44	2.263,20	2,10	43,00	134,56	98,44
max	3.457,90	3.527,30	306,94	958,78	6.515,51	13,84	73,23	140,70	137,80
Mittelwert	2.565,42	2.822,07	240,91	842,61	3.624,50	8,43	55,77	136,37	116,63
Median	2.340,62	2.505,45	226,72	842,61	2.868,00	8,89	53,43	135,11	115,14
SD	658,00	617,24	44,65	164,29	1.706,53	5,97	14,77	2,90	17,74
Varianz	432.968,06	380.987,45	1.993,26	26.991,63	2.912.252,96	35,61	218,16	8,40	314,58

Tabelle 69: Deskriptive Statistik Messer 8 vor Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel vor der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	3	3	8	6	3	4	4	4	4
min	4.981,70	5.110,80	124,08	313,67	4.370,10	3,90	71,29	74,21	93,58
max	6.837,57	7.429,38	263,88	459,14	5.501,30	15,45	89,40	97,64	108,00
Mittelwert	5.642,99	6.132,29	197,50	377,51	4.972,27	7,71	83,76	85,59	99,73
Median	5.109,72	5.856,70	213,75	377,03	5.045,40	5,74	87,18	85,25	98,68
SD	1.036,51	1.183,60	51,73	51,93	569,13	5,27	8,38	11,05	6,03
Varianz	1.074.358,76	1.400.916,66	2.676,08	2.697,02	323.911,66	27,78	70,27	122,00	36,33

Tabelle 70: Deskriptive Statistik Messer 9 vor Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel vor der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	3	3	5	3	4	5	5	5	5
min	6.636,54	6.968,14	151,34	376,52	6.142,16	2,23	73,49	91,78	75,00
max	9.897,00	10.972,55	530,40	990,41	8.504,49	14,40	87,02	108,52	107,84
Mittelwert	8.618,71	9.119,77	194,75	585,07	7.362,48	7,56	77,90	101,34	92,91
Median	9.322,60	9.418,61	197,26	388,26	7.401,63	8,79	76,50	104,20	100,80
SD	1.740,47	2.018,86	38,42	351,09	1.301,48	4,85	5,25	7,67	16,13
Varianz	3.029.250,24	4.075.807,82	1.476,42	123.264,93	1.693.838,92	23,48	27,56	58,90	260,32

Tabelle 71: Deskriptive Statistik Messer 10 vor Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel vor der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	5	3	5	3	3	4	4	4	4
min	1.371,80	1.790,30	120,00	1.024,29	3.696,28	5,90	46,10	30,30	65,00
max	5.230,79	5.708,95	751,33	1.334,69	6.386,41	17,60	102,70	103,40	91,30
Mittelwert	2.274,23	3.426,42	340,12	1.164,07	4.982,00	10,64	80,92	71,76	83,94
Median	1.532,47	2.780,00	287,82	1.133,24	4.863,30	9,53	87,43	76,67	89,73
SD	1.660,66	2.037,73	194,74	157,48	1.348,99	5,24	24,33	36,63	12,69
Varianz	2.757.800,24	4.152.354,47	37.925,43	24.799,92	1.819.770,31	27,48	592,13	1.341,56	161,14

Tabelle 72: Deskriptive Statistik Messer 11 vor Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel vor der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	5	5	11	4	9	6	6	6	6
min	175,01	176,00	162,20	1.884,67	1.781,40	22,00	68,70	27,10	65,00
max	4.772,39	5.500,00	205,02	2.187,49	2.881,20	39,60	156,90	129,50	117,60
Mittelwert	2.958,06	3.178,40	184,34	2.113,59	2.165,16	28,18	122,10	71,53	92,15
Median	4.400,00	4.773,00	184,40	2.178,84	2.087,53	27,05	128,45	73,05	92,40
SD	2.525,61	2.722,61	12,97	153,57	336,73	7,06	33,52	40,78	17,43
Varianz	6.378.694,77	7.412.605,30	168,33	23.584,02	113.384,70	49,81	1.123,66	1.662,96	303,93

Tabelle 73: Deskriptive Statistik Messer 1 nach Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel nach der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	4	4	4	4	4	4	4	4	4
min	1.361	1.429	116,34	912,79	263,78	3,61	37,53	93,70	78,69
max	2.754,36	3.615,72	904,84	1.125,11	3.685,38	12,56	94,14	109,06	107,83
Mittelwert	1.747,38	2.287,08	598,31	1.014,26	1.210,29	9,24	74,34	100,11	94,67
Median	1.437,11	2.051,64	445,05	1.009,58	446,01	10,38	82,86	98,84	96,08
SD	673,84	1.048,21	267,76	105,97	1652,2959	3,90912299	25,236562	7,39353425	12,077668
Varianz	454.065,68	1.098.741,36	71.696,65	11.230,38	2.730.081,75	15,28	636,88	54,66	145,87

Tabelle 74: Deskriptive Statistik Messer 2 nach Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel nach der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	4	4	9	5	4	4	4	4	4
min	8517,55	8828,59	252,659	1162,029	5.475,44	5,09	88,03	76,88	80,75
max	17.889,77	18.221,08	1037,78	2438,692	10956,70	11,69	98,15	98,56	105,86
Mittelwert	13.195,04	14.049,28	632,791111	1500,9822	7.885,82	7,74	92,79	90,24	90,89
Median	13.186,41	14.573,73	596,362	1340,025	7.555,56	7,08	92,48	92,77	88,47
SD	5.253,52	4.859,44	283,498013	534,779356	2.477,46	2,92	4,62	9,48	12,05
Varianz	27.599,468,67	23.614,185,17	80371,1235	285988,959	6.137.802,40	8,52	21,34	89,82	145,28

Tabelle 75: Deskriptive Statistik Messer 3 nach Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel nach der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	4	4	4	4	4	4	4	4	4
min	406,43	688,53	115,94	226,42	2.530,77	4,85	68,80	57,42	68,60
max	2.439,97	3.427,56	153,13	317,94	6730	11,10	107,46	94,22	90,97
Mittelwert	1.517,72	1.890,36	138,02	255,88	5.170,19	7,28	94,49	78,27	80,52
Median	1.612,24	1.722,67	141,50	239,58	5.710,00	6,59	100,86	80,73	81,25
SD	1.063,19	1.268,35	16,17	42,41	1.828,80	2,68	17,53	15,59	9,30
Varianz	1.130.371,75	1.608.723,63	261,58	1.798,79	3.344.513,37	7,17	307,40	243,08	86,50

Tabelle 76: Deskriptive Statistik Messer 4 nach Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel nach der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	1	1	1	1	1	1	1	1	1
min	-	-	-	-	-	-	-	-	-
max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mittelwert	297,75	287,02	139,90	153,30	2.450,00	11,24	58,42	125,73	138,38
Median	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Varianz	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 77: Deskriptive Statistik Messer 5 nach Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel nach der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	4	4	8	9	4	4	4	4	4
min	1146,35	1.628	62,261	166,823	5.744	8,14	41,62	102,47	68,81
max	3055,718	4102,364	159,921	312,724	6.840,44	19,20	70,92	139,13	102,49
Mittelwert	1.980,83	2.596,73	110,68225	238,198889	6.130,71	13,54	56,26	114,68	81,74
Median	1.860,63	2.328,25	113,228	243,759	5.969,41	13,42	56,25	108,55	77,82
SD	853,57	1.056,93	32,6748458	44,7691142	503,54	5,40	14,09	17,21	16,09
Varianz	728.577,63	1.117.092,66	1067,64555	2004,27358	253.548,05	29,14	198,64	296,34	258,94

Tabelle 78: Deskriptive Statistik Messer 6 nach Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel nach der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	4	4	4	4	4	4	4	4	4
min	391,102	471,369	91,727	114,874	2469,364	2,82	66,68	60,38	74
max	7.907,19	8.390,19	140,656	280,846	6.383	17,15	153,82	111,28	102,07
Mittelwert	2.414,83	2.595,85	118,46	198,50	3.485,84	10,89	100,95	82,82	88,16
Median	680,52	760,92	120,72	199,14	2.545,41	11,80	91,64	79,81	88,09
SD	3.664,38	3.865,77	25,90	68,27	1.932,09	6,07	39,90	23,84	11,30
Varianz	13.427.670,43	14.944.145,15	670,81	4.661,25	3.732.961,49	36,90	1.591,63	568,30	127,66

Tabelle 79: Deskriptive Statistik Messer 7 nach Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel nach der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	4	4	4	4	4	4	4	4	4
min	782,16	928,999	92,218	415,52	3.550	6,50	32,16	85,78	53,44
max	3.158,07	3.583,64	144,70	609,27	6.100,54	17,70	66,84	133,50	138,22
Mittelwert	2.125,88	2.705,39	134,56	540,36	5.262,55	12,61	118,73	47,04	93,76
Median	2.281,64	3.154,45	140,07	568,34	5.699,75	13,13	127,83	44,57	91,68
SD	1.085,00	1.219,10	30,97	85,44	1.157,31	5,36	22,31	14,66	35,48
Varianz	1.177.234,90	1.486.196,60	959,36	7.299,74	1.339.363,33	28,77	497,79	214,85	1.258,81

Tabelle 80: Deskriptive Statistik Messer 8 nach Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel nach der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	4	4	10	4	4	4	4	4	4
min	1.902,58	2.401,65	111,03	240,00	4620,00	2,35	60,21	46,54	84,45
max	7130,00	7270,00	190,00	310,00	5410,00	10,87	97,65	109,82	86,93
Mittelwert	4.835,65	5.074,16	151,10	278,39	4.969,61	7,17	81,98	80,56	85,73
Median	5.155,00	5.312,50	145,00	281,78	4.924,23	7,74	85,78	82,19	85,77
SD	2.402,92	2.276,64	27,90	33,89	373,76	3,55	26,55	15,56	1,35
Varianz	5.774.047,60	5.183.084,25	778,54	1.148,20	139.697,61	12,61	704,81	242,15	1,81

Tabelle 81: Deskriptive Statistik Messer 9 nach Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel nach der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	4	4	8	4	4	4	4	4	4
min	1.328,70	1.704,35	127,09	420,00	2473,00	4,37	59,15	85,19	85,01
max	2.741,37	2.929,27	210,25	818,52	6.523,91	15,64	92,23	102,60	105,34
Mittelwert	1.945,58	2.240,56	170,65	610,70	4.537,68	10,33	92,48	78,62	91,95
Median	1.856,12	2.164,31	173,16	602,14	4.576,90	10,65	91,07	81,54	88,74
SD	679,58	529,92	25,99	189,99	2.287,93	5,28	7,85	16,22	9,11
Varianz	461.824,06	280.811,79	675,23	36.096,48	5.234.643,75	27,91	61,55	263,18	83,00

Tabelle 82: Deskriptive Statistik Messer 10 nach Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel nach der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	4	4	4	4	4	4	4	4	4
min	1.107,80	2.878,48	160,68	417,51	2.700,91	4,30	58,54	54,26	68,23
max	3.455,84	3.995,86	1.023,44	1.283,16	6.235,93	18,22	141,16	126,61	112,76
Mittelwert	2.453,11	3.362,53	700,53	943,82	5.229,91	12,56	76,73	106,85	90,34
Median	2.624,40	3.287,89	809,00	1.037,30	5.991,40	13,87	66,38	113,85	90,19
SD	1.010,42	528,02	373,91	373,03	1.695,56	6,11	35,82	34,84	18,19
Varianz	1.020.943,62	278.807,85	139.806,93	139.147,72	2.874.917,89	37,29	1.282,86	1.214,05	330,83

Tabelle 83: Deskriptive Statistik Messer 11 nach Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheneinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel nach der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	4	4	9	6	5	4	4	4	4
min	180,98	182,00	99,44	253,47	2.032,09	22,27	108,46	29,96	126,84
max	340,19	434,87	210,00	1.996,82	3.284,62	39,94	155,99	91,67	153,08
Mittelwert	260,43	305,67	147,04	870,27	2.683,31	34,61	64,06	133,40	137,79
Median	260,28	302,90	133,29	444,81	2.675,49	36,59	67,32	134,57	135,61
SD	65,02	108,06	42.2682164	807,551028	521,27333	9,17	31,22	19,46	11,01
Varianz	4.227,97	11.676,14	1786,60212	652.138,662	271.725,884	84,16	974,91	378,78	121,19

Tabelle 84: Deskriptive Statistik Messer 12 nach Mazeration

Statistische Auswertung der Knocheinstichlänge, -höhe und -breite, maximale Schulterlänge und maximale Einstichhöhe sowie Öffnungs-, unterer Neigungs- und oberer Neigungs-, Bodenwinkel nach der Mazeration. n = Anzahl, min = Minimum, max = Maximum, SD = Standardabweichung.

	KEL	MSL	KEH	MKEH	KEB	ÖW	NWoben	NWunten	BW
n	4	4	4	4	7	4	4	4	4
min	1.249,77	1.470,31	108,32	501,21	3.746,74	1,41	63,40	45,26	73,14
max	4.761,03	4.832,73	153,26	826,03	4.367,22	15,87	123,70	102,45	105,99
Mittelwert	3.425,37	3.739,08	121,74	688,40	4.090,20	9,80	76,43	88,76	91,18
Median	3.845,34	4.326,65	112,70	713,18	4.254,04	10,96	79,01	83,97	92,79
SD	1.598,37	1.566,39	21,12	149,81	269,33	6,49	25,40	25,63	13,89
Varianz	2.554.780,86	2.453.569,61	445,94	22.442,81	72.538,99	42,09	645,14	656,98	193,01

Tabelle 85: Klingendicke

Dicke [Millimeter] der 12 Messerklingen an sieben verschiedenen Stellen. Bei einer waagrecht Messung befindet sich der Messschieber parallel zur Klinge und bei einer senkrechten Messung im 90° Winkel. Die senkrechten Messungen wurden sowohl direkt an der Messerspitze als auch 1/2, 1, 2 und 5 cm von der Spitze entfernt Richtung Heft vorgenommen.

Position	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 6	Nr. 7	Nr. 8	Nr. 9	Nr. 10	Nr. 11	Nr. 12
Spitze waage- recht	0,95	1,50	0,63	0,94	1,11	0,58	0,84	0,95	1,46	0,94	2,17	0,76
Spitze senkrecht	0,98	1,45	1,23	1,11	1,07	0,61	0,90	0,94	1,84	0,98	2,29	0,67
Klinge waagrecht	1,22	1,50	3,89	2,81	3,52	0,67	0,99	1,79	2,00	1,06	2,23	2,04
Klinge senk- recht (0,5 cm)	1,10	1,50	1,51	1,71	2,25	0,64	0,95	1,76	2,08	1,00	2,20	0,98
Klinge senk- recht (1,0 cm)	1,30	1,50	2,58	2,71	3,20	0,72	1,18	2,66	3,00	1,06	2,21	1,50
Klinge senk- recht (2,0 cm)	1,42	1,50	3,59	3,99	4,18	0,83	1,65	3,60	3,66	1,03	2,22	2,10
Klinge senk- recht (5,0 cm)	1,42	1,50	4,10	4,50	4,65	1,09	2,09	4,30	3,77	1,01	2,22	2,17
Mittelwert Spitze	1,01	1,48	1,12	1,25	1,48	0,61	0,92	1,36	1,85	0,97	2,22	0,80
Mittelwert Klinge	1,34	1,50	3,54	3,50	3,89	0,83	1,64	3,52	3,48	1,04	2,22	1,95
Mittelwert insgesamt	1,199	1,493	2,504	2,539	2,854	0,734	1,229	2,286	2,544	1,011	2,220	1,460

Tabelle 86: Verwendung von spitzen Waffen in den USA 2014

Auswahl von Bundesstaaten, in denen Messern und schneidende Instrumente (SI) im Jahr 2014 in diversen Straftaten Anwendung fanden (U.S. Department of Justice 2014).

Bundesstaat	Morde insgesamt	Morde mit Messern oder SI	Schwere Körperverletzungen insgesamt	Schwere Körperverletzungen mit Messern oder SI	Überfälle insgesamt	Überfälle mit Messern oder SI	Bevölkerung
California	1.697	256	91.654	14.853	48.599	4.548	38.766.160
District of Columbia	105	17	4.125	1.246	3.497	291	658.893
Florida	-	-	61.404	11.010	21.576	1.458	19.829.171
Hawaii	5	0	336	36	80	7	162.229
Massachusetts	131	34	17.282	4.116	5.933	1.173	6.277.316
New York	613	139	45.003	11.783	23.948	2.274	19.356.133
Rhode Island	25	7	1.397	377	528	76	1.055.173
Texas	1.141	145	61.945	13.125	29.606	2.219	25.761.410
USA	11.961	1.567	660.852	124086	293.206	23.187	283.867.298