



universität
wien

DISSERTATION / DOCTORAL THESIS

Titel der Dissertation /Title of the Doctoral Thesis

Die Pfeilschussverletzung des Ötzi:

War sie primäre Todesursache?

Der Versuch einer topographischen Rekonstruktion

verfasst von / submitted by

Mag.rer.nat. Thomas Bonfert, BSc MSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Doktor der Naturwissenschaften (Dr.rer.nat.)

Wien, 2017 / Vienna 2017

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

A 091 442

Dissertationsgebiet lt. Studienblatt /
field of study as it appears on the student record sheet:

Anthropologie

Betreut von / Supervisor:

Doz. Mag. Dr. Wolfgang Recheis

*“The difference between
the impossible and the possible
lies in a man’s determination.”*

Tommy LaSorda

Ich möchte Danke sagen...

Zu allererst möchte ich mich bei meiner Frau **Eva** bedanken, die sehr großes Verständnis für meine Pläne aufgebracht hat, mich akademisch (weiter) zu bilden. Seit dem Jahr 2004 bis heute hat sie nicht nur meine Pläne still geduldet, sondern sie auch aktiv unterstützt. Eva, ich danke Dir, dass Du in dieser Zeit immer für mich da warst, auch wenn ich oft nicht so viel Zeit hatte, um gemeinsame Aktivitäten zu forcieren.

Mein zweiter Herzens-Dank gebührt meinem Betreuer **PD Dr. Wolfgang Recheis**, der mir nach langer Suche nach einem Thema, das sich für mich gut "anfühlt", mit einem wirklich sehr interessanten Projekt half, meinen Plan, eine Dissertation zu verfassen, umzusetzen. Die Bearbeitung dieser Aufgabenstellung war für mich nicht nur eine große Herausforderung, es war mir auch eine große Ehre als Anthropologe, einmal auf den Spuren Ötzi's zu wandeln.

Ass. Prof. i. R. Dr. Karl-Heinz Künzel vom Anatomischen Institut der Universitätsklinik Innsbruck war mir eine große Hilfe bei der topographischen Feinbeschreibung der menschlichen Schulter. Seine große Expertise sowohl in der Anatomie im Allgemeinen sowie auch in den anatomischen Gegebenheiten des Ötzi waren mir bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit eine unverzichtbare Hilfe.

Bei **Prof. Dr. Wolfgang Birkfellner** und **Prof. Dr. Michael Figl** von der Medizinischen Universität Wien möchte ich mich bedanken, dass sie sich auf kurzem Wege bereit erklärt haben, mir für die vorliegende Dissertation mit Rat und Tat zur Seite zu stehen.

Dr. Stefano Longato MEd hat seine Expertise als Gerichtsmediziner kritisch in meine Arbeit einfließen lassen. Gerade bei einem forensischen Thema ist eine zweite Meinung mit dieser Expertise sehr wichtig.

Ohne die wohlwollende Hilfe einer radiologischen Abteilung in einem Krankenhaus wäre die Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Deshalb möchte ich bei dieser Gelegenheit **Oberarzt Dr. Bernd Nowatschka und sein Team** in der Administration an der radiologischen Abteilung des Landeskrankenhauses in Wiener Neustadt (NÖ) vor den Vorhang bitten. Sie haben auf meine Bitte hin in ihrer Datenbank nach geeigneten CT-Untersuchungen gesucht und sie mir anonymisiert auf Datenträgern zur weiteren Bearbeitung überlassen.

Meinem lieben Freund **Stefan Kittenberger** möchte ich nicht unerwähnt lassen. Er hat mir im Schnellverfahren die Grundzüge der Bearbeitung von 3D-Strukturen beigebracht. Danke für Deine Geduld und Deine Zeit.

Posthum möchte ich noch meinen aufrichtigen Dank an meine **Mutter** richten. Hat sie doch den Grundstein dafür gelegt, dass ich der werden konnte, der ich heute bin.

Abstract

The exact circumstances of the Iceman's death still remain a mystery and may be never solved in detail. Based on radiologic data (CT-volume datasets) it was examined, if a deadly injury by the arrowtip could be possible. On the CT-volume data of the iceman from 1994, three different CT-volume data from contrast enhanced examinations were registered by landmark based b-spline algorithm. In this way it was tested, if the large neurovascular structures of the left upper extremity from the tested CT-volumes are near the arrow-head projected in these deformed data sets. The depth of penetration of the arrow-head was measured and a virtual reposition of the left shoulder of the iceman was carried out to get new estimations about the direction where the deadly arrow came from.

Keywords: Otzi, Iceman, virtual reposition, arrow shot, cause of death

Zusammenfassung

Die genauen Umstände, unter denen der Eismann sein Ende fand, werden wahrscheinlich nie genau aufgeklärt werden können. Basierend auf radiologischen Daten (CT-Volumendatensätze), wurde geprüft, ob eine tödliche Verletzung des Eismannes durch die Pfeilspitze möglich war. Auf die CT-Daten des Ötzi, die 1994 in Innsbruck gewonnen wurden, sind mittels landmarkunterstützter B-Spline-Registrierung CT-Datensätze von Vergleichsindividuen auf die Ötzi-Topographie gebracht und untersucht worden, ob sich deren große neurovasculäre Strukturen der linken oberen Extremität in der Nähe der in diese Datensätze projizierten Pfeilspitze befinden. Die Eindringtiefe der Pfeilspitze wurde vermessen und eine virtuelle Reponierung der linken Schulter des Ötzi sollte weiteren Aufschluss über die Einschussrichtung des Pfeiles bringen.

Stichworte: Ötzi, Eismann, virtuelle Reponierung, Pfeilschuss, Todesursache

Motivation für diese Arbeit

Es gibt heute zahlreiche Geschichten, die von den Ereignissen vor rund 5.300 Jahren im Similaungebiet handeln. Vielen von diesen Geschichten gemeinsam ist die mutmaßliche Ursache des Todes eines etwa 50-jährigen Mannes, der schon bald nach seiner Auffindung den Spitznamen “Ötzi” erhielt.

Es kann heute niemand mit Sicherheit behaupten, wie sich die Ereignisse dereinst zuge- tragen haben, aber es ist dennoch möglich, die zur Verfügung stehende Technologie dafür zu nutzen, forensische Nachforschungen zur Todesursache anzustellen.

Da der Eismann aufgrund seiner Mumifizierung und speziellen Lagerung unter einem Gletscher in den letzten 5.000 Jahren einige Kraft- und sonstige Einwirkungen erdulden musste, sind heute zum Teil seine inneren Organe nicht mehr erkennbar und sein knöchernes Skelett ist teilweise stark deformiert. Der Vorgang der Bergung hinterließ dann ebenfalls deutliche Spuren...

Die Fragen, die mich bewegten, als ich mich des Themas annahm, waren, ob man mit heutigen Mitteln einen mittels Kontrastmittelgabe gewonnenen CT-Datensatz nicht vielleicht auf Ötzi-Format bringen könnte, um auf diese Weise Gefäße sichtbar zu machen und die Lage der Pfeilspitze zu ihnen zu untersuchen. In die umgekehrte Richtung ist das nicht so gut möglich, da das Brustbein des Ötzi direkt auf der Vorderseite seiner Wirbelkörper lagert und sich dazwischen so gut wie kein Gewebe befindet, das sich noch virtuell entfalten ließe.

Wenn das Procedere mit *einem* Datensatz funktionieren würde, dann könnte man ja auch andere Datensätze auf den Ötzi rechnen und daraus Erkenntnisse aufgrund der jeweiligen einzigartigen Anatomie der weiteren Vergleichs-Individuen gewinnen.

Das Markenzeichen des Eismannes ist die etwas unphysiologische Haltung seines linken Armes. Mit heutigen Softwaretools müsste es auch möglich sein, die linke Schulter virtuell zu “reponieren”. Ändert sich dadurch möglicherweise die angenommene Einschussrichtung oder die Wahrscheinlichkeit, mit der eine vitale Struktur durch die Pfeilspitze verletzt wurde?

Alles in allem interessierte mich aber die zentrale Frage:

“Kann die Verletzung durch den Pfeilschuss die primäre Todesursache gewesen sein?”

Inhaltsverzeichnis

Abstract	i
Zusammenfassung	i
Motivation	iii
1. Einleitung	1
1.1. Eine kurze Fundgeschichte	2
1.2. Röntgenstrahlung und Computertomographie	4
1.2.1. Entstehung von Röntgenstrahlung	4
1.2.2. Technik der Computertomographie	5
1.2.3. Konzept der “Hounsfield Units” [HU]	6
1.2.4. Segmentieren von CT-Datensätzen	8
1.3. Anatomisch-funktionelle Grundlagen	9
1.3.1. Körperachsen und Körperebenen	9
1.3.2. Die Anatomie des Schultergürtels	11
Schlüsselbein und Schulterblatt	12
Regio scapularis - Schulterblattgegend	16
1.3.3. Muskelschichten in der Schultergegend	17
Profunde dorsale Muskelschicht	17
Fossa supraspinata und infraspinata	17
Superfizielle dorsale Muskelschicht	20
1.3.4. Gelenke und Gelenkmechanik des Schultergürtels	21
Articulatio sterno-clavicularis	22
Ruhelage des Schlüsselbeins	23
Bewegungen im Schulterreckgelenk	23
Zusammenwirken von Schultergürtel und Schultergelenk	25
1.3.5. Brustkorb	27
Der knöcherne Thorax	27
Begrenzungen des Thorax	28
Funktion der Atmung	28
Ötzi’s Thorax	28
1.4. Gefäß- und Nervenversorgung im Schultergürtel	30
1.4.1. Versorgungswege der Regio scapularis	30
1.4.2. Verlauf und Versorgungsgebiet des Plexus brachialis	32
1.4.3. Verlauf der Arteria und Vena subclavia	33
1.5. Feinbau des Gefäßsystems	36
1.5.1. Histologie der Arterien und Venen	36
1.5.2. Arterien	38
Arterien vom elastischen Typ	38
Arterien vom muskulären Typ	39

Mischtypen	40
1.5.3. Venen	40
Venolen	41
Kleine und mittelgroße Venen	41
Große Venen	42
1.5.4. Periphere Leitungsbahnen	42
1.6. Verletzungen großer Gefäße	42
1.6.1. Klassifikation der Gefäßverletzungen	44
1.6.2. Klinische Zeichen einer Gefäßverletzung	46
1.6.3. Mögliche Komplikationen bei Verletzung der A. subclavia	46
1.6.4. Todesursachen bei Gefäßverletzungen	46
1.7. Gerichtsmedizinische Aspekte	46
1.7.1. Stichwunden	46
1.7.2. Stichkanal	49
1.7.3. Schusswunden	50
1.8. Virtuelle Anthropologie	50
1.8.1. Landmarks	51
Kriterien für die Auswahl von Landmarks	51
1.8.2. Procrustes Shape Distance	52
Centroid-Size	53
“Bookstein Shape-Coordinates” im 3D-Raum	54
1.8.3. Registrierung von Volumendatensätzen	55
Affine Registrierung	55
Non-Affine Registrierung	56
1.8.4. Landmark-Registrierung mit 3D-Slicer	57
1.8.5. Verifikation der Registrierung mittels Euklidischen Abstands	57
1.9. Papers zur Todesursache “Pfeilschussverletzung”	58
1.9.1. Paper “INSIGHT: Report of Radiological-Forensic Findings on the Iceman” von P. Gostner und E. Egarter Vigl (01/2002)	58
1.9.2. Paper “Radiologic proof for the Iceman’s cause of death (ca. 5.300 BP)” von P. Perntner, P. Gostner, E. Egarter Vigl und F. Rühli (12/2006)	60
2. Fragestellung	63
3. Material	65
3.1. Bildgebende Daten	65
3.1.1. CT-Daten des Ötzi	65
3.1.2. Vergleichs-CT-Datensätze	66
3.2. Werkzeuge	69
3.2.1. Verwendete Software	69
3.2.2. Verwendete Hardware	70

4. Methoden	71
4.1. Datensätze aus CT-Scans	71
4.2. Segmentierung der Daten in Amira	71
4.3. Registrierungsalgorithmen in 3D Slicer	72
4.4. Landmarkbasierte Registrierung in 3D Slicer	72
4.5. Darstellung von Gefäßen in der Ötzi-Anatomie	73
4.6. Virtuelle Reponierung der Schulter des Ötzi	74
4.7. Einschussrichtung des Pfeiles	74
5. Ergebnisse	75
5.1. Fragestellung 1: “Lässt sich ein rezenter CT-Datensatz mit Gefäßen auf den Ötzi-Brustkorb sinnvoll registrieren? Welche Registrierungsmethode ist hierfür am besten geeignet?”	75
5.2. Fragestellung 2: “Vermessung der Pfeilspitze im Ötzi.”	77
5.3. Fragestellung 3: “Wie sehen die Lagebeziehungen bei registrierten Daten- sätzen unterschiedlicher Individuen aus (Entfernung der Pfeilspitze zu vi- talen Strukturen)?”	80
5.3.1. Datensatz 46m auf Ötzi registriert	80
5.3.2. Datensatz 62m auf Ötzi registriert	82
5.3.3. Datensatz 86m auf Ötzi registriert	84
5.4. Fragestellung 4: “Lässt sich das linke Schulterblatt des Ötzi virtuell reponieren? Welchen Einfluss hat das auf die Schussrichtung?”	86
5.4.1. Lässt sich Ötzi’s linke Schulter virtuell reponieren?	87
5.4.2. Rekonstruktion der Einschussrichtung	88
5.5. Fragestellung 5: “Wie sieht die Lage der Pfeilspitze in diesem anatomischen Kontext aus? Hat dies Einfluss auf die Schussrichtung?”	92
6. Diskussion	95
6.1. Genauigkeit	95
6.2. Lage der Gefäße	96
6.3. Virtuelles Reponieren	98
6.4. Vermuteter Tathergang	99
6.5. Final Statement:	100
7. Ausblick	101
7.1. Ötzi’s Thorax-Rekonstruktion	101
Literaturverzeichnis	105
Appendix	113
A. Anhang	113

A.1. Auszug aus einem Schreiben der Ethikkommission an die Universitätsklinik Innsbruck	113
A.2. Lokalisation der Landmarks	114
Tabellenverzeichnis	117
Abbildungsverzeichnis	118

1. Einleitung

Die Entdeckung der Gletscherleiche im Jahr 1991 auf dem Similaun war auf den ersten Blick Routinearbeit für die Behörden. Was dieses Ereignis wirklich bedeutete, wurde den handelnden Personen aber erst nach und nach bewusst. Wer war dieser Mensch? Wo kam er her und wie ist er umgekommen?

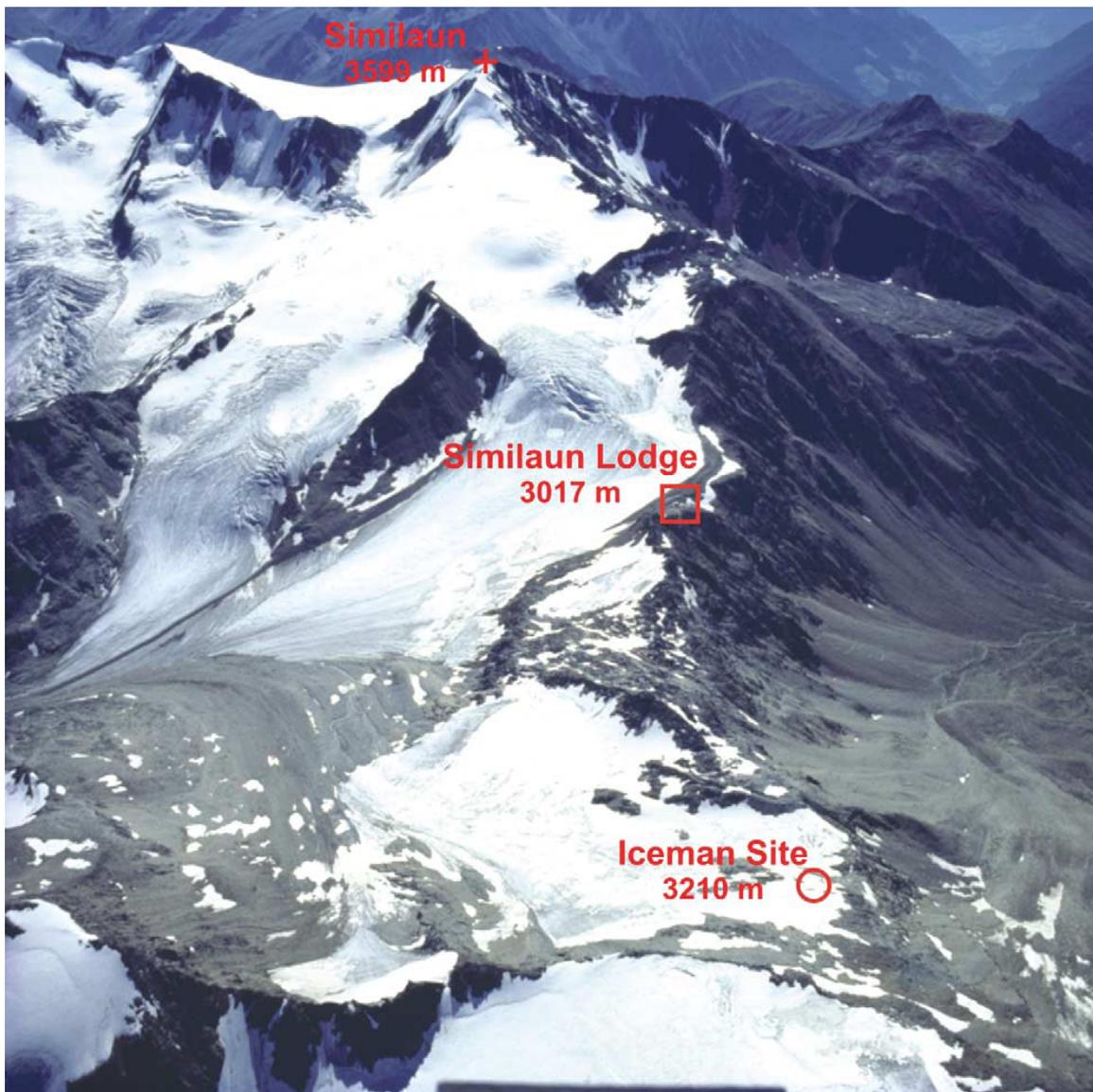


Abbildung 1: Ötzi's Fundort in den Tiroler Alpen. Dieses Foto wurde am 21. August 1989 von Gernot Patzelt vom Institut für Hochgebirgsforschung an der Universität Innsbruck aufgenommen. Zwei Jahre vor der Entdeckung des Eismannes. Aus [Kutschera and Müller \(2003\)](#)

1.1 Eine kurze Fundgeschichte

19. September 1991: Es war an einem Donnerstag, als das deutsche Ehepaar Erika und Helmut Simon aus Nürnberg auf dem Rückweg von der Finailspitze zur Similaunhütte war. Etwas abseits der markierten Route, beim Überqueren eines Schneefeldes in der Nähe des Hauslabjochs in 3.275 m Seehöhe, stießen die beiden auf eine Mulde, hangwärts von einem Felskamm begrenzt und mit Schmelzwasser gefüllt. Als sie dabei sind, links um dieses Wegehindernis auszuweichen, sehen sie um etwa 13 Uhr 30 "etwas Braunes" aus dem Eis herausragen. Sie realisieren sehr bald, dass sie eine halb von Eis bedeckte menschliche Leiche gefunden haben (siehe Abbildung 1 und 2) ([Rastbichler-Zissernig \(2006\)](#); [Recheis et al. \(1999\)](#)).

Dass es sich um einen Sensationsfund handeln sollte, vermutete zu diesem Zeitpunkt noch niemand, zumal in dieser Region schon öfters Leichenfunde passiert sind. Seien es gefallene Soldaten aus dem Ersten bzw. Zweiten Weltkrieg oder verunglückte Bergsteiger, die plötzlich wieder vom Eis freigegeben wurden ([Murphy et al., 2003](#)).



Abbildung 2: Ötzi bei der Auffindung durch die Familie Simon aus Nürnberg am 21. September 1991. Fotocredit Familie Simon. Aus [Rastbichler-Zissernig \(2006\)](#)

Gegen 14 Uhr 30, zurück auf der Similaunhütte, informierte das Ehepaar Simon den Hüttenwirt Markus Pirpamer über ihre Entdeckung. Dieser verständigte sofort die Gendarmerie Sölden (Österreich) und die Carabinieri in Schnals (Italien). Nach einem wegen Schlechtwetters abgebrochenen Bergungsversuch am 20.9.1991, wurde der mumifizierte und dadurch sehr gut erhaltene Leichnam schließlich von der Gendarmerie Innsbruck am darauffolgenden Montag, den 23.9.1991 um 14 Uhr 03 ins Tal zum Zwischenlandeplatz in Vent geflogen. Dort wurde der Fund eingesargt und per Leichentransport ins Institut für Gerichtliche Medizin an der Universitätsklinik Innsbruck verbracht (siehe Abbil-

dung 3). Erst im Sezierraum des Klinikums offenbarte sich die Einmaligkeit dieses Fundes (Rastbichler-Zissernig (2006)). In einer Radiocarbonuntersuchung wurde dann ein Alter von etwa 5.300 Jahren, also späte Neusteinzeit, festgestellt (Kutschera and Müller (2003)). Dieser Fund bekam in den verschiedenen Erdteilen unterschiedliche Bezeichnungen. So heißt die Gletschermumie in Österreich und Europa "Similaun-Mann" oder "Ötzi", in den USA und in anderen Teilen der Welt "Iceman" (Murphy et al. (2003)).



Abbildung 3: Ötzi nach der Einlieferung in die Abteilung für Gerichtliche Medizin an der Universitätsklinik Innsbruck am 23. September 1991. Aus Rastbichler-Zissernig (2006)

1.2 Röntgenstrahlung und Computertomographie

In der modernen Medizin ist eine Arbeit ohne bildgebende Verfahren heute nicht mehr möglich. Die Grundlage dieser Verfahren wurde im Jahre 1895 vom Physiker Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) entdeckt. Er nannte das entdeckte Phänomen vorerst X-Strahlung (engl.: x-rays), später wurde die ‐Röntgenstrahlung‐ - zumindest im deutschsprachigen Raum - nach ihrem Erfinder benannt. Im Jahre 1901 bekam Röntgen für seine Entdeckung den ersten Nobelpreis für Physik.

1.2.1 Entstehung von Röntgenstrahlung

Treffen Elektronen mit sehr hoher Geschwindigkeit auf ein ‐Target‐ auf - meist aus einer Wolframlegierung - schießen sie beim Auftreffen aufgrund ihrer hohen kinetischen Energie Elektronen aus ihrem Orbital. Bei der Rückkehr aus dem angeregten Zustand in den Grundzustand senden die Elektronen Energie aus. Neben großer Hitze entsteht dabei Photonenstrahlung, eben die sogenannte Röntgenstrahlung (siehe Abbildung 4). Sie wird auch als ‐Bremsstrahlung‐ bezeichnet. Je höher die kinetische Energie der auftreffenden Elektronen ist, desto höher ist die Energie der resultierenden Röntgenstrahlung und desto besser ist ihr Vermögen Materie zu durchdringen.

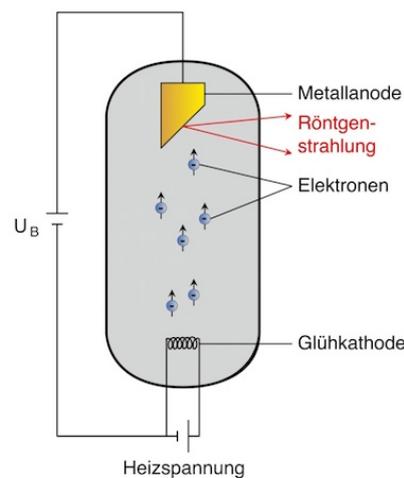


Abbildung 4: Funktionsprinzip einer Röntgenröhre. In einer Röhre werden im Vakuum Elektronen von einer Glühkathode auf eine Anode aus einer speziellen Legierung mit Hochspannung U_B beschleunigt. Die so ausgelöste ‐Bremsstrahlung‐ wird als Röntgenstrahlung bezeichnet. Aus Evers (2017)

Die Abschwächung der Röntgenstrahlen ist eine Funktion aus Kernladungszahl, Dichte und Dicke. Da menschliche Organe unterschiedliche Dicke und Dichte aufweisen, werden Röntgenstrahlen auf ihrem Weg durch den Körper unterschiedlich stark abgeschwächt und auf der Austrittsseite entweder auf Film oder mit Detektoren aufgezeichnet. Auf diese Weise können Mediziner durch Körper ‐hindurchsehen‐. Was zu Beginn im zweidimensionalen Raum als simples Röntgenbild funktionierte, wurde mit der Entwicklung moderner Computer auch im dreidimensionalen Raum mit CT-Scannern möglich. Aus den unterschiedli-

chen Schwächungsprofilen, die bei der Drehung einer Röntgenröhre entstehen, werden im Computer Schichtbilder errechnet, die zu dreidimensionalen Volumendarstellungen umgerechnet werden können. Durch Normierung der Schwächung der Strahlung gegen Wasser und Luft, wurde ein kalibriertes System geschaffen, das es grundsätzlich ermöglichen soll, Untersuchungen über Geräte- und Herstellergrößen vergleichbar zu machen (Evers, 2017).

1.2.2 Technik der Computertomographie

Das Wort Tomographie leitet sich aus den altgriechischen Worten $\tauομ\epsilon\acute{\iota}\nu$ = schneiden und $\gamma\rho\alpha\phi\epsilon\acute{\iota}\nu$ = schreiben ab. Es ist also im übertragenen Sinn ein "Schnittschreiber". Ein CT besteht aus einer fernbedienbaren, verstellbaren Liege, einer Bedien- und einer Auswerteeinheit, einem Rechner, unterschiedlichen Bildwiedergabeeinrichtungen, einem nachgeordneten Archivspeicher und der runden Öffnung, der Gantry, durch die die Patienten automatisiert auf dem beweglichen Tisch in den Strahlengang gebracht werden können. Rund um die Gantry sind die Röntgenröhre, das Laser-Lichtvisier, die Detektoren und ein Hochspannungsgenerator verbaut (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: Arbeitsplatz des CT-Scanners "Somatom Plus" Foto aus dem Jahr 1988 von der Internetpräsenz der Fa. Siemens. Siemens AG Erlangen (2017)

Anders als im konventionellen Röntgen, das mit einer stationären Röntgenröhre arbeitet, dreht sich im CT-Scanner eine Röntgenröhre rund um das Untersuchungsobjekt. Während einer CT-Untersuchung bewegt sich das zu untersuchende Objekt mittels des Vorschubes auf dem Liegetisch langsam durch die Gantry, während die Röntgenröhre auf ihrer Kreisbahn den Patienten von allen Seiten durchstrahlt. Durch die Größe des Vorschubes in mm wird die Schichtdicke des zu untersuchenden Körperabschnittes gewählt (Kalender, 2011).

Die aus der Röntgenröhre ausgesendeten Strahlen werden auf ihrem Weg durch den Körper, je nachdem, welche Gewebearten sie durchdringen müssen (Knochen, Weichteile oder Luft), mehr oder weniger geschwächt. Die Absorption der Strahlung ist eine Funktion aus Dichte, Atomzahl und Dicke. Hinter dem durchstrahlten Körper trifft der auf seinem Weg individuell geschwächte Strahl auf einen sogenannten Detektor. Im Detektor entsteht je nach der Intensität des auftreffenden Strahls ein elektrisches Signal, das vom Computer weiterverarbeitet wird (siehe Abbildung 6). Durch mathematische Operationen wie Radontransformation, gefilterte Rückprojektion bzw. iterative Rekonstruktion errechnet die Maschine dann aus den schichtweisen Schwächungsprofilen die 2-dimensionalen Schichtaufnahmen des Patienten. Durch die Rekonstruktionen in den drei Raumachsen werden schließlich die 3-dimensionalen Volumendatensätze zur weiterführenden Diagnostik generiert (Kalender, 2011).

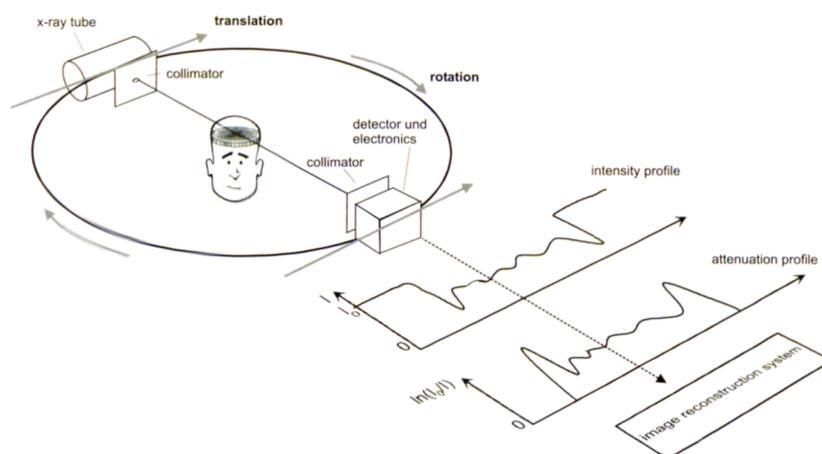


Abbildung 6: Schematisch dargestellte Arbeitsweise eines CT-Scanners. Aus Kalender (2011)

1.2.3 Konzept der “Hounsfield Units” [HU]

Ein Computertomograph misst die räumliche Verteilung des Schwächungskoeffizienten $\mu(x, y)$. Der Schwächungskoeffizient μ per se ist nicht sehr aussagekräftig, weil er stark von der verwendeten Energie (kV) der Röntgenstrahlung und von den verwendeten Filtern abhängt. Ein direkter Vergleich von Aufnahmen unterschiedlicher CT-Scanner wäre somit nur sehr schwer möglich bis unmöglich (Kalender, 2011).

Um diesem Problem zu begegnen, wurde ein sogenannter CT-Wert oder auch CT-Zahl eingeführt. Das ist der errechnete Schwächungskoeffizient μ des jeweiligen untersuchten Gewebes bezogen auf den Schwächungskoeffizienten von Wasser. Zu Ehren des Erfinders des CT wird dieser CT-Wert auch Hounsfield-Unit genannt.

Für ein beliebiges Gewebe T beträgt der CT-Wert demnach:

$$CT - Wert = \frac{(\mu_T - \mu_{Wasser})}{\mu_{Wasser} \cdot 1000} [HU]$$

Tabelle 1: Verschiedene CT-Werte in Körpergeweben.

Gewebeart	CT-Wert [HU]
Knochen	+1.000
Leber	40 bis 60
Blut	40
Muskel	10 bis 40
Niere	30
Cerebrospinalflüssigkeit	15
Wasser	0
weiße Hirnsubstanz	-20 bis -30
graue Hirnsubstanz	-37 bis -45
Fett	-50 bis -100
Luft	-1.000

Aus [CE Essentials \(2017\)](#).

(Aus [Kalender \(2011\)](#))

Nach dieser Skala hat also definitionsgemäß Wasser (μ_{Wasser}) und jedes Gewebe (μ_T) mit der Dichte von Wasser den CT-Wert 0 HU ($\mu_T = \mu_{Wasser}$). Die Luft hat per Definition den CT-Wert -1.000 HU. Diese beiden Werte bilden die Fixpunkte auf der Skala, da μ_{Luft} und μ_{Wasser} von der Energie der Röntgenstrahlen unabhängig sind und daher gute Bezugspunkte bilden. In der Tabelle 1 und in der Abbildung 7 sind die wichtigsten CT-Werte des menschlichen Körpers ersichtlich. Die Hounsfield Skala ist eine nach oben offene Skala. Für medizinische Anwendungen arbeiten die CT-Scanner in einem Bereich zwischen -1.024 HU und +3.071 HU. Dieses Intervall ergibt sich aus der Graustufendynamik von 12 Bit ($2^{12} = 4.096$) [Kalender \(2011\)](#).

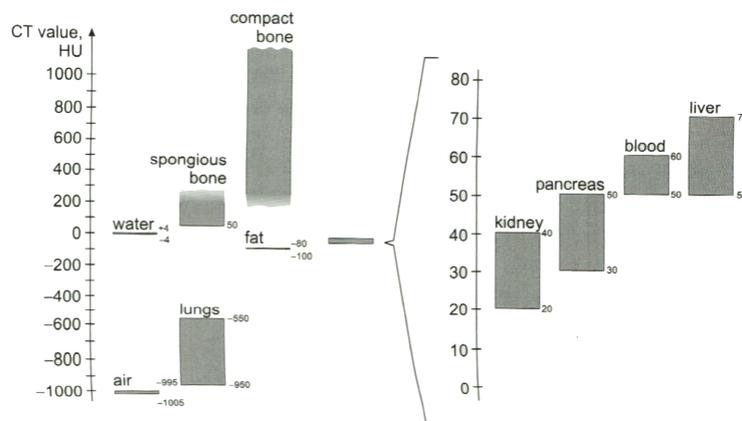


Abbildung 7: CT-Werte charakterisieren den linearen Schwächungskoeffizienten μ_T des betreffenden Gewebes bezogen auf den linearen Schwächungskoeffizienten μ_{Wasser} . Dadurch sind die CT-Werte der unterschiedlichen Gewebe sehr stabil und relativ unempfindlich gegenüber den unterschiedlichen Strahlungsenergien. (Aus [Kalender \(2011\)](#))

1.2.4 Segmentieren von CT-Datensätzen

Medizinische Schichtbildverfahren (CT, MRI, Ultraschall, PET, PET-CT,...) ermöglichen einem erfahrenen Radiologen aus zweidimensionalen Schichtaufnahmen vor dem geistigen Auge dreidimensionale Strukturen zu sehen. Chirurgen benötigen für ihre Arbeit oft eine dreidimensionale Ansicht von Körperregionen (virtuelles Erkunden eines OP-Gebietes vor einem schwierigen Eingriff oder Vermessung eines Implantates für einen Patienten,...). Die gewonnenen Strukturen werden “ad hoc” mit einer Oberflächendarstellung versehen und weiterbearbeitet (vermessen etc.). (Neri, 2008)

Beim händischen Segmentieren wird in einem Datenvolumen Schicht für Schicht jedes Voxel der zu betrachtenden Struktur in der Bearbeitungssoftware markiert. Dadurch entsteht aus den einzelnen zweidimensionalen Schichten ein dreidimensionales Gebilde über die Schichtgrenzen hinweg, das als Oberflächenmodell im stl-Format (stl = surface tessellation language) gespeichert und weiter verarbeitet wird. Mittels Triangulationsalgorithmen besteht die Möglichkeit, aus Volumensdatensätzen Oberflächendatensätze zu generieren. Eine gängige Methode ist derzeit der Marching Cube Algorithm (Birkfellner, 2010). In Abbildung 8 links ist die Markierung von 3 Geweben dargestellt: Leber, linke Niere und Wirbelsäule. In der Mitte ist ein 3D-Rendering einer Niere dargestellt. Rechts sieht man die 3D-Modelle von Ötzi’s linker Clavicula und Scapula als stl-Daten.

Die einzelnen ausgewählten Bereiche werden beim Segmentieren unterschiedlichen Einheiten zugeteilt, die zugleich festlegen, um welches Organ es sich dabei handelt. Dadurch bekommt man voneinander unabhängige dreidimensionale Strukturen, also z.B. Leber, Niere und Wirbelsäule getrennt. Befinden sich diese drei Strukturen in der selben Einheit, so sind sie gewissermaßen nur eine einzige Struktur. Die manuelle Segmentierungstechnik ist sehr zeitaufwändig und in ihrem Gelingen sehr stark durch die Fertigkeit des Bearbeiters im Umgang mit seiner Computermaus determiniert. (Neri, 2008; Birkfellner, 2010)

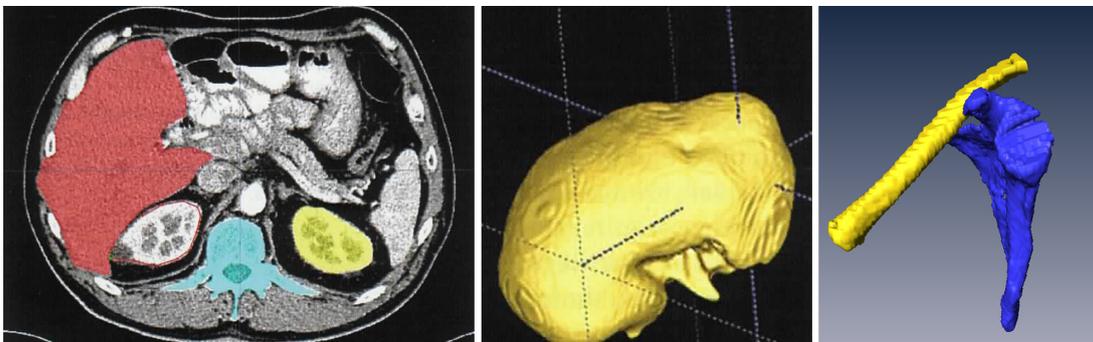


Abbildung 8: Manuelle Segmentierung - dargestellt auf einer einzelnen CT-Schicht.

Linkes Bild: Die Leber (rot), die linke Niere (gelb) und die Wirbelsäule (blau) wurden hier bereits markiert (“segmentiert”) und unterschiedlichen Einheiten zugewiesen.

Mittleres Bild: 3D-Rendering einer segmentierten Niere. (Aus Neri (2008))

Rechtes Bild: 3D-Rendering der linken Scapula und Clavicula des Eismannes.

Die weiteren Segmentierungsverfahren wie Segmentieren mit einem Schwellwertverfahren, kantenbasiertes Segmentieren, regionenbasiertes Segmentieren und automatisches Segmentieren werden im Rahmen dieser Arbeit weder besprochen noch angewendet.

Der **Partialvolumeneffekt** (=partial volume effect) ist ein Bildartefakt in der Computertomographie. Der Effekt entsteht, wenn ein Objekt nur von einem Teil der gewählten Schichtdicke dargestellt wird. Ursache dafür ist, dass eine Struktur nur zum Teil in eine Schicht hineinragt oder die Struktur kleiner als die gewählte Schichtdicke ist. Dadurch wird die Dichte der sichtbaren Strukturen gemittelt. Somit kann sich ein Knochen als Weichteil darstellen (und daher nicht mehr als Knochen im Bild erkennbar sein). Der Partialvolumeneffekt entsteht häufig bei großen rekonstruierten Schichtdicken.

1.3 Anatomisch-funktionelle Grundlagen

Der Bau und die Funktion des menschlichen Schultergürtels bedarf eines genaueren Blickes auf die Anatomie desselben. Die unnatürliche Stellung von Ötzi's linker Schulter erschwert den genauen Blick auf die "richtige" Stellung dieser Struktur, also die Stellung in ihrem physiologischen Zustand. Eine detaillierte Befassung mit den anatomischen Grundlagen ist hier also unerlässlich.

1.3.1 Körperachsen und Körperebenen

Anatomische Nomenklatur hat die Aufgabe, die Benennung, Systematisierung und Ordnung einzelner Körperstrukturen zu ermöglichen. Mit ihrer Hilfe können Knochen, Sehnen, Muskeln, Organe usw. eindeutig und lageunabhängig bezeichnet werden. Lageunabhängig deshalb, weil das Bezugssystem der anatomischen Begriffe der Körper selbst ist. Es ist also ein relatives Beschreibungssystem, in dem Begriffe wie "oben" und "unten" nicht vorkommen, da sich ein "oben" oder "unten" als absoluter Bezugsbeschreibungsterminus, je nach Lage eines Körperteils im Raum, nicht universell anwenden lässt. Die anatomische Nomenklatur ist hauptsächlich auf lateinischen Begriffen aufgebaut, die modular aus einer sehr viel geringeren Anzahl lateinischer Wortstämme zusammengesetzt sind. Heute gibt es ca. 6.000 "Nomina Anatomica" (Wilmanns and Schmitt, 2002).

Zur besseren Orientierung folgt an dieser Stelle eine kurze Übersicht zu den anatomischen Richtungsangaben, Ebenen und Achsen, die in der heutigen Anatomie gebräuchlich sind (siehe Abbildung 9 sowie Tabelle 2).

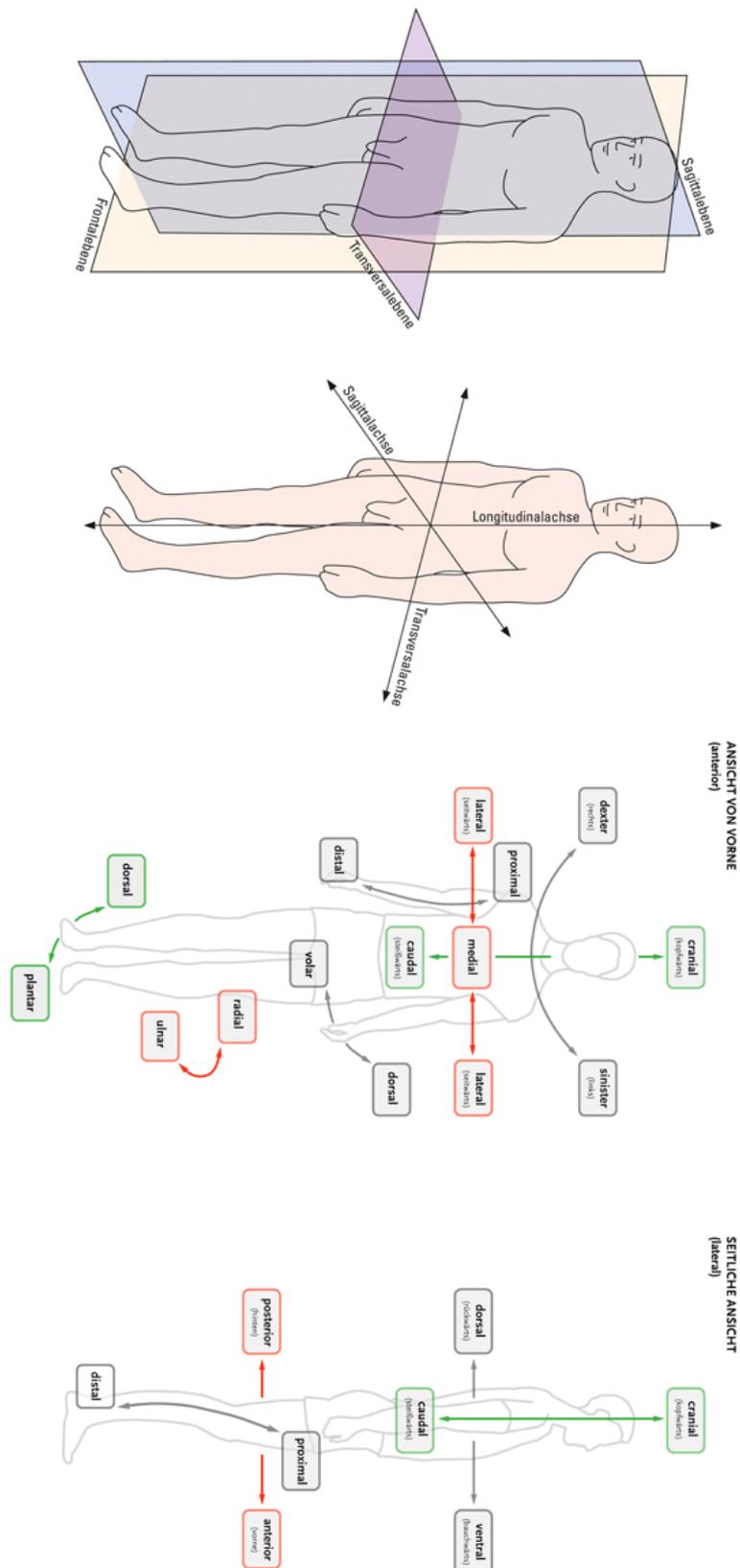


Abbildung 9: Illustration zu den in der Anatomie gebräuchlichen Ebenen und Achsen sowie Richtungsangaben. (Aus *Medi-Learn* (2017b) (Achsen) und *Springer Verlag* (2017) (Richtungen))

Tabelle 2: Die wichtigsten anatomischen Lagebezeichnungen im menschlichen Körper in Latein und Deutsch.

Lateinisch	Deutsche Übersetzung
anterior	(nach) vorne
posterior	(nach) hinten
inferior	(nach) unten
superior	(nach) oben
kranial	zum Schädel hin, kopfwärts, nach oben
kaudal	"schwanzwärts", steisswärts, nach unten
dorsal	rückenwärts, zum Rücken hin, hinten
ventral	bauchwärts, zum Bauch hin, vorne
medial	zur Mitte, zur Medianebene hin
lateral	von der Mitte weg, seitwärts
zentral	auf das Innere des Körpers zu, zur Körpermitte hin
peripher	auf den Rand des Körpers zu, nach außen
distal	vom Rumpf entfernt
proximal	zum Rumpf hin
median	innerhalb der Medianebene
profundus	tief liegend
superficialis	oberflächlich liegend
dexter	rechts
sinister	links
externus	außen gelegen
internus	innen gelegen

Aus [DocCheck-Lexikon \(2017\)](#).

1.3.2 Die Anatomie des Schultergürtels

Diese Arbeit beschäftigt sich im Wesentlichen mit der Schulterregion des Ötzi und seiner Pfeilschussverletzung, mit den betroffenen anatomischen Strukturen und der Frage, ob die Verletzung, die durch den Pfeilschuss hervorgerufen worden sind, auch unmittelbar tödlich gewesen sein können.

Zum besseren Verständnis der Zusammenhänge im Zuge dieser Arbeit wird zunächst mit der anatomischen Beschreibung der Schulter begonnen. Im Anschluss an die Beschreibung der Schulter wird noch der Verlauf der A. + V. subclavia anatomisch beleuchtet.

- ▷ Regio axillaris (Achselbereich), einschließlich Trigonum deltoideopectorale (Unterschlüsselbeingrube)
- ▷ Regio scapularis (Schulterblattgegend)
- ▷ Articulatio sternoclavicularis und Articulatio acromioclaviculare (Brust-Schlüsselbeingelenk und Schlüsselbein-Schultergelenk) und anschließend Articulatio humeri (Schultergelenk)
- ▷ Regio deltoidea (seitliche Schultergegend)

(Aus [Lanz and Wachsmuth \(1959\)](#))

Schlüsselbein und Schulterblatt

Das Schulterblatt, die Scapula, und das Schlüsselbein, die Clavicula, bilden die knöcherne Grundlage des Schultergürtels. Formgebend für den Schulterbereich des Menschen ist die Muskulatur, die vom Kopf, von der Wirbelsäule und vom Thorax zur Schulter zieht. Das Schulterblatt ist, als Gelenk gesehen, auf seinem subscapulären Gleitlager der wohl beweglichste Knochen im menschlichen Körper. Daraus folgt natürlich eine große Bewegungseinschränkung, sollte es zu Verletzungen in diesem Bereich kommen (Hafferl, 1957). In Abbildung 10 bis 12 ist die knöcherne Anatomie von Schlüsselbein und Schulterblatt dargestellt und beschrieben.

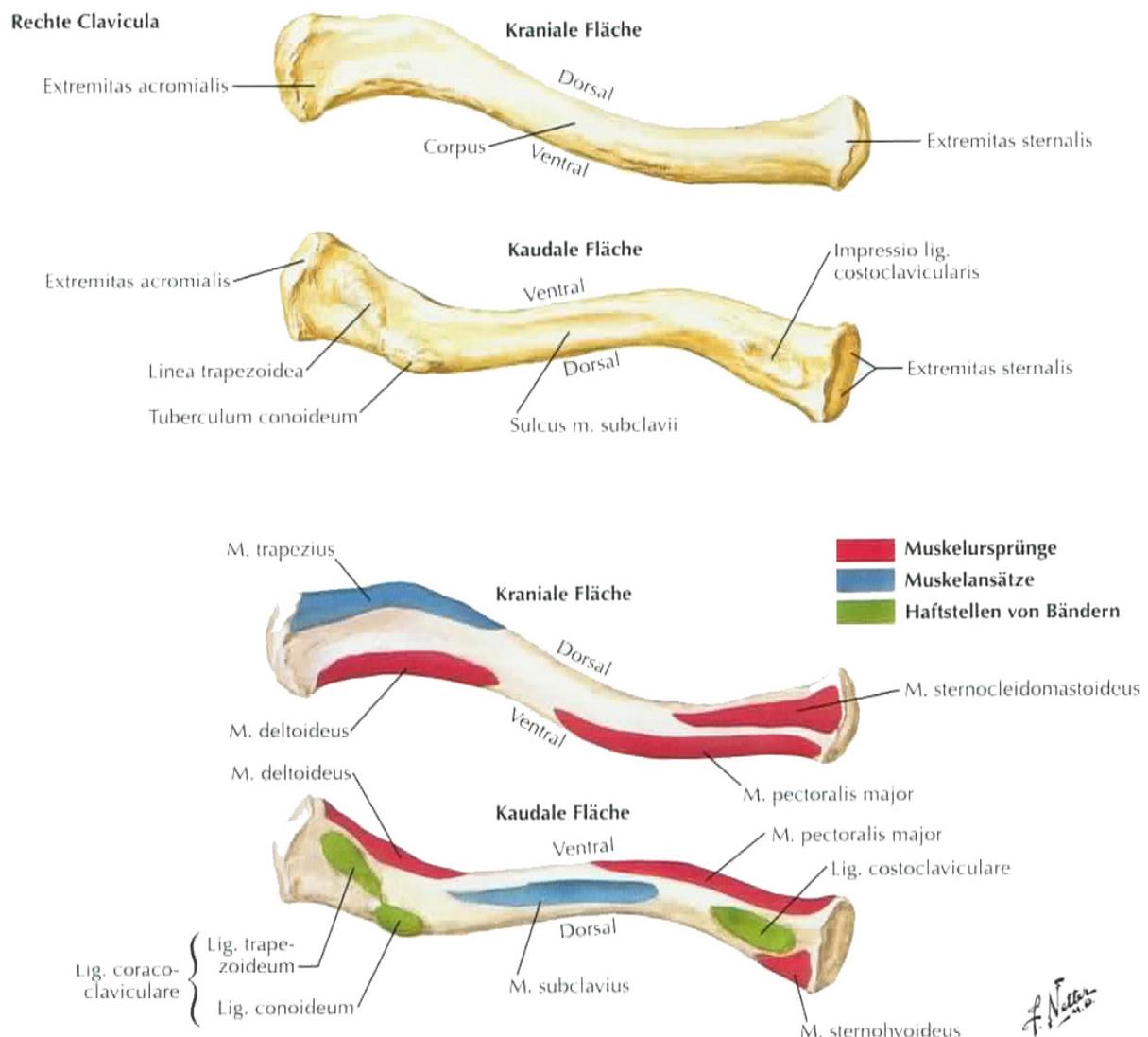


Abbildung 10: Anatomie des Schlüsselbeines (Clavicula) mit Bezeichnung der Strukturen. (Aus Netter (2015))

Schlüsselbein

Die Clavicula (Der Diminutiv von lat. “clavis” bzw. griechisch “κλεῖς, κλειδός” = Schlüssel) legt sich, leicht S-förmig gebogen, dem Thorax wie ein Fensterriegel (“Schlüssel”) an (siehe Abbildung 10). Bei mageren Menschen ist das Schlüsselbein unter der Haut zu erkennen.

An der Extremitas sternalis sitzt es dem Sternum sattelförmig mit einer starken Verbreiterung im Sternoclaviculargelenk auf. Das Corpus claviculae entspricht von der Form her einem Röhrenknochen, entwickelt sich aber wie die meisten Schädelknochen als membranärer Knochen. Lediglich die beiden Enden besitzen Knorpelkerne.

Das Schlüsselbein flacht bis zum Schulterblatt hin ab. Die Extremitas acromialis artikuliert im Acromioclaviculargelenk (Schultereckgelenk) mit der Schulterhöhe (Acromion) über eine kleine ovale Gelenkfläche (Benninghoff, 2003). Dehiszenzen in diesem Gelenk (z.B. durch einen Bänderriss) wirken sich fatal auf die Stabilität des Schultergürtels aus. Das Schlüsselbein ist das erste Skelettelement, das verknöchert (etwa in der 7. Entwicklungswoche).

Schulterblatt

Das Schulterblatt sieht aus wie eine am Rand verstärkte dreieckige Knochenplatte (siehe Abbildung 11 und 12). Seitlich wird diese Platte begrenzt durch die Margo medialis, lateralis und superior. Die drei Ecken heißen Angulus superior, inferior und lateralis. Auf der Hinterseite des Schulterblattes erhebt sich die Spina scapulae, die Schulterblattgräte. Man kann sie in ganzer Länge palpieren (siehe Abbildung 17 auf Seite 20). Das laterale Ende der Schulterblattgräte wird durch eine platte Struktur, das Acromion, gebildet.

Das Schulterblatt selbst kann als **“Rahmenkonstruktion”** gesehen werden. Die kräftigen Randstrukturen laufen im gedrungenen Halsstück, dem Collum scapulae, zusammen, das die Gelenkspfanne (Fossa glenoidalis) für den Humeruskopf trägt. Die Belastung in diesem Gelenk überträgt sich demnach auf die starken Randstrukturen. Die Margo lateralis stellt den stärksten Teil des Rahmens dar. Die Fossa supra- und infraspinata ober- und unterhalb der Schulterblattgräte sind stark entlastete Zonen des Schulterblattes und bestehen lediglich aus einer hauchdünnen Knochenlamelle, die stellenweise auch fehlen kann. Medial des Collum scapulae befindet sich der Processus coracoideus, der Rabenschnabelfortsatz. Acromion und Coracoid sind durch das Ligamentum coracoacromiale (siehe Abbildung 13) verbunden und bilden so das Schulterdach. (Benninghoff, 2003)

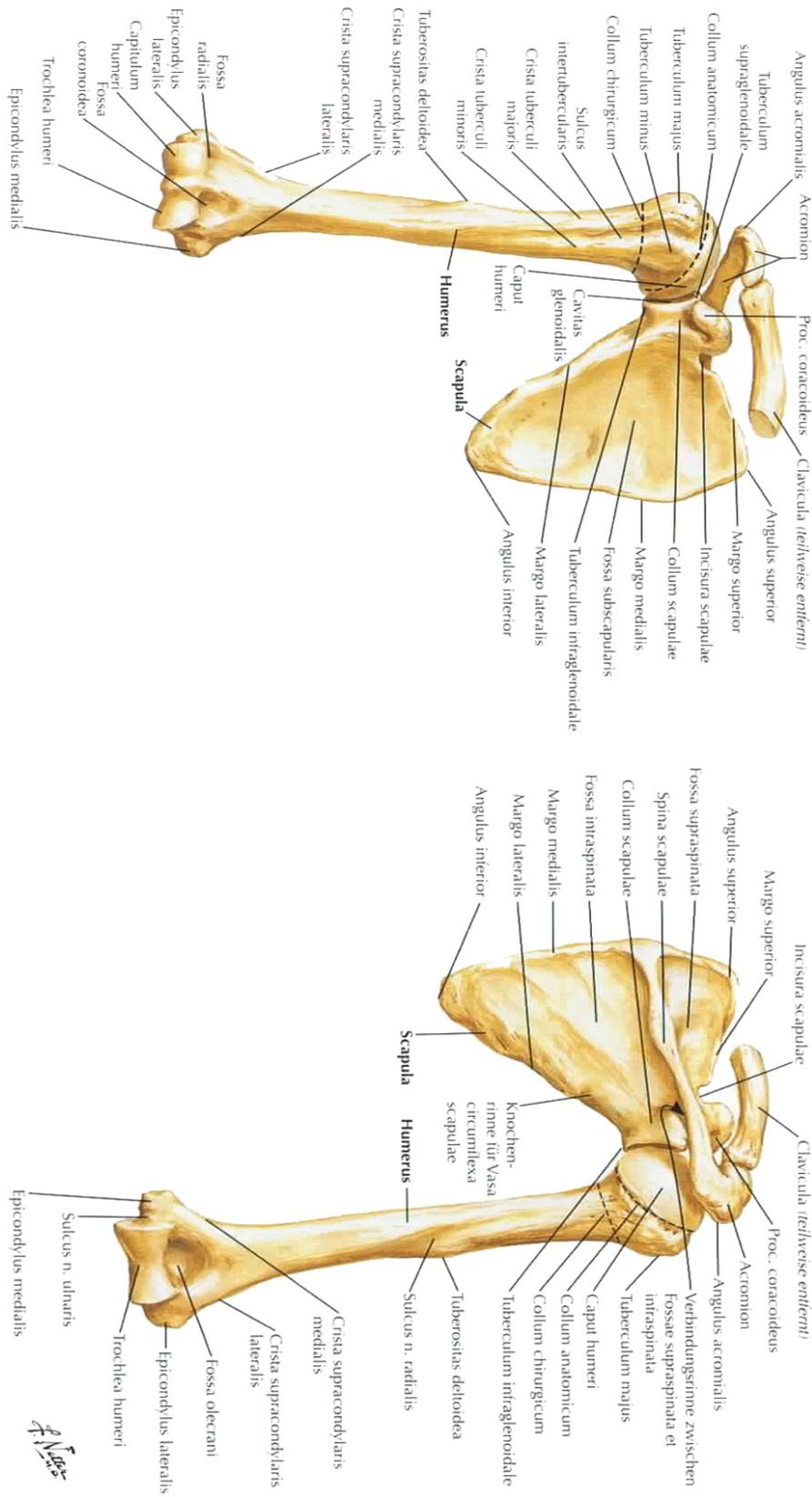


Abbildung 11: Anatomie des knöchernen Schulterblattes (Scapula) von anterior und posterior mit Bezeichnung der Strukturen. (Aus Netter (2015))

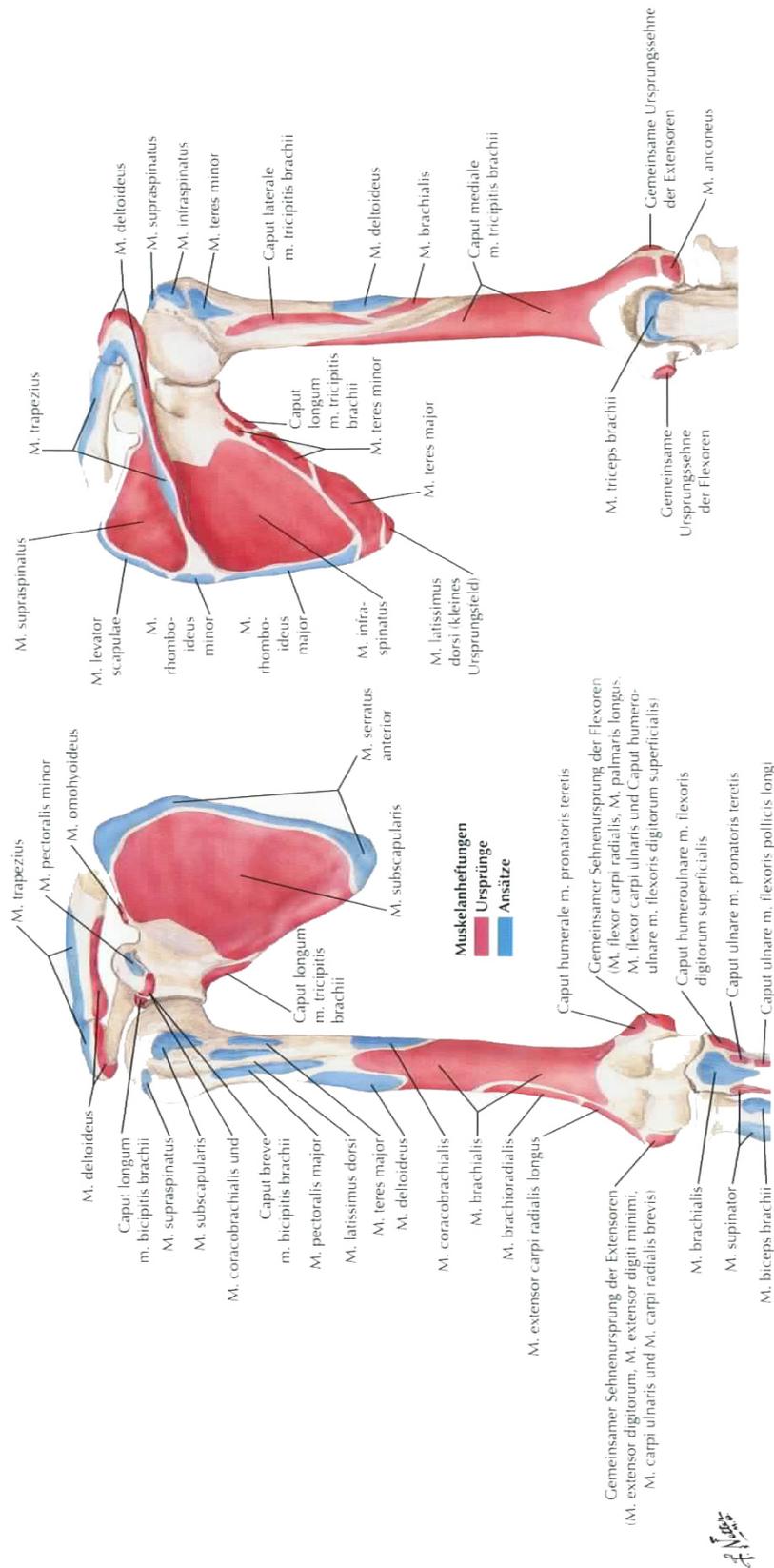


Abbildung 12: Anatomie des knöchernen Schulterblattes (Scapula) mit Muskelursprüngen und -ansatzstellen von anterior und posterior. (Aus Netter (2015))

Regio scapularis - Schulterblattgegend

Örtliche Begrenzung

Die Regio scapularis wird begrenzt durch das Schulterblatt und die ihm aufliegenden dorsalen Muskeln und bildet gleichzeitig die Dorsalwand der Achselpyramide. Die Gefäßversorgung umspannt allseitig den Knochen und endet schließlich auch dortselbst ([Lanz and Wachsmuth, 1959](#); [Rauber/Kopsch, 1998a,c](#)).

Aufbau

Fossa und M. subscapularis (Unterschulterblattgrube und gleichnamiger Muskel):

Der M. subscapularis liegt in der ventralen Konkavität der Scapula und ist - bedeckt durch das Schulterblatt - nur über die Achsel zugänglich. Dieser Muskel wirkt mit dem M. serratus anterior (seitlicher großer gefiederter Muskel) gemeinsam als Polster gegen den Brustkorb (siehe Abbildung 13) ([Lanz and Wachsmuth, 1959](#); [Rauber/Kopsch, 1998a,c](#); [Drake et al., 2009](#)).

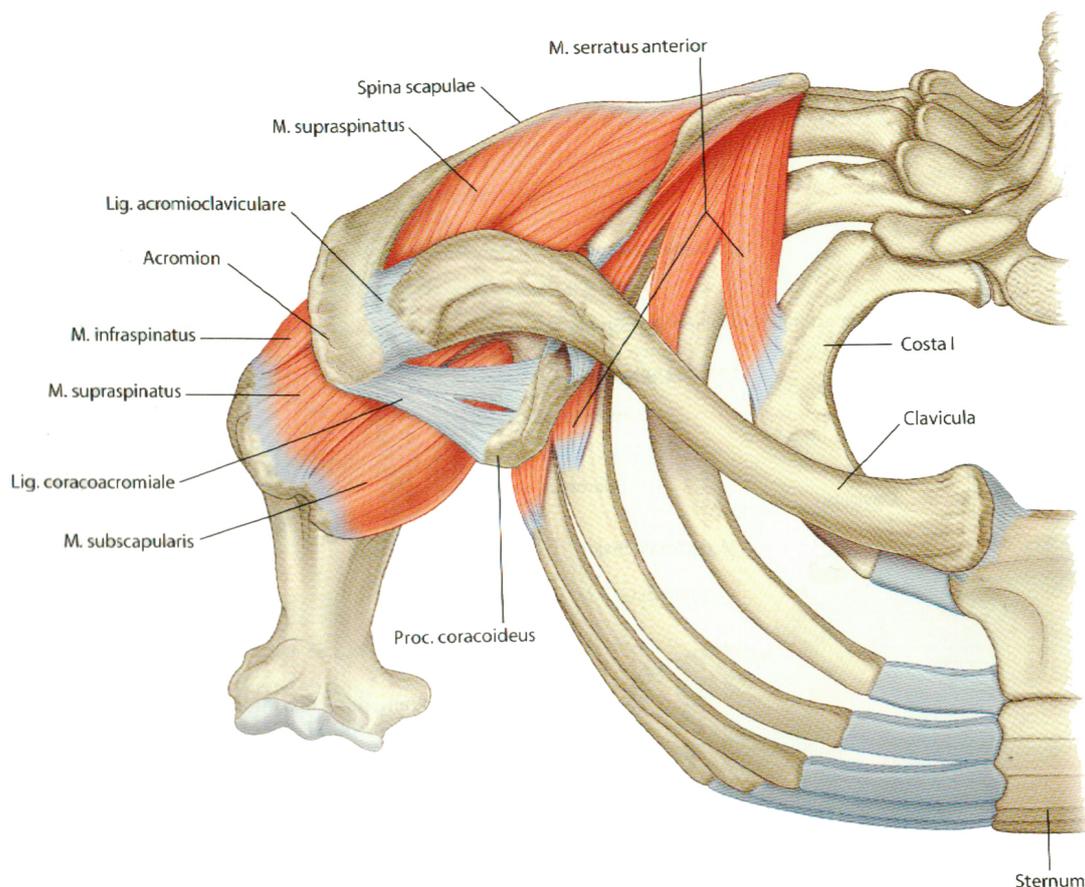


Abbildung 13: Blick von oben auf das Schultergelenk. Darstellung des M. serratus anterior als Auflage für den M. subscapularis im scapulothoracalen Gleitlagergelenk. (Aus [Drake et al. \(2009\)](#))

1.3.3 Muskelschichten in der Schultergegend

Profunde dorsale Muskelschicht

Auf der Rückseite der Scapula liegen die Muskeln in der Fossa supraspinata und der Fossa infraspinata in zwei Schichten. Die tiefe Schicht bilden von cranial nach caudal der M. supraspinatus, der M. infraspinatus und der M. teres minor (siehe Abbildung 14).

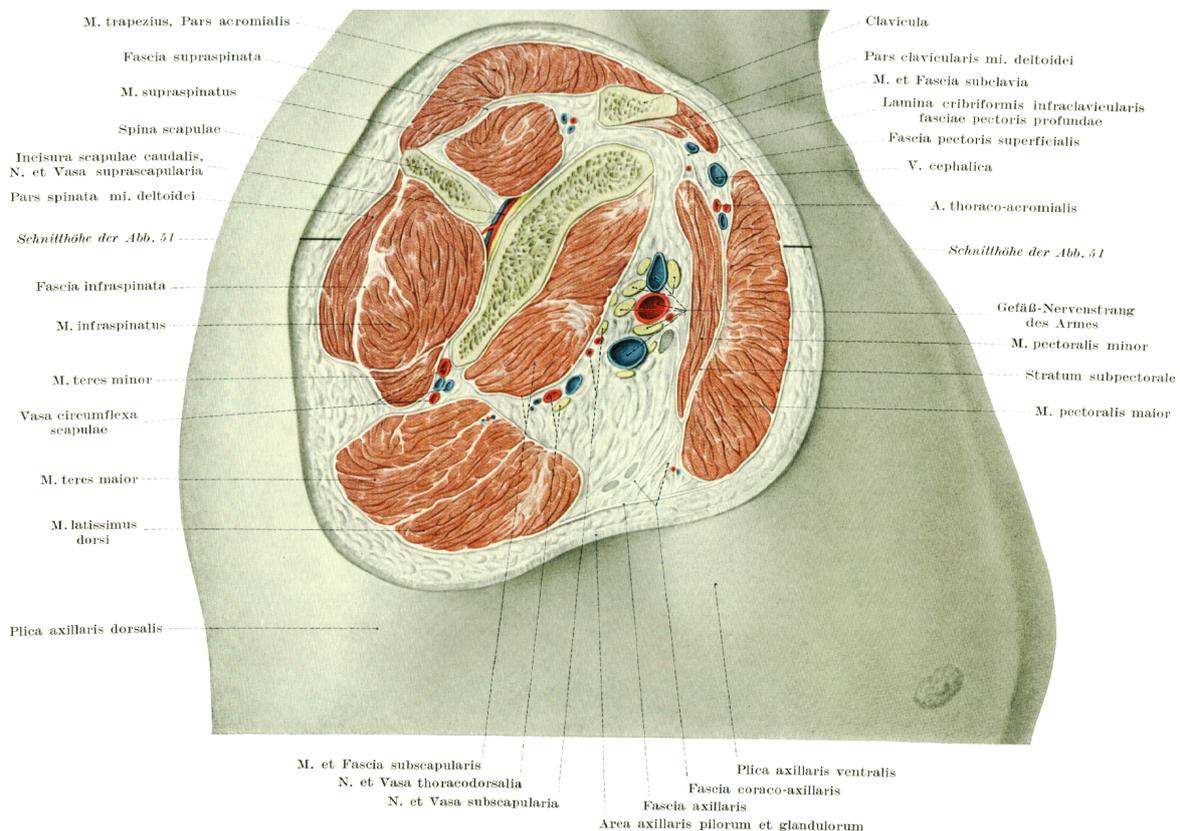


Abbildung 14: Seitlicher Blick von rechts auf die Regio scapularis. Auf der linken Seite des Schulterblattes sieht man die dorsalseitigen Strukturen, rechts sind die ventralen Strukturen zu erkennen. (Aus [Lanz and Wachsmuth \(1959\)](#))

Fossa supraspinata und infraspinata

Die Spina scapulae (die Schulterblattgräte) teilt die Scapula in zwei ungleiche Fossae (Gruben) die kleinere Fossa supraspinata und die größere Fossa infraspinata. Beide Fossae beherbergen die gleichnamigen Muskeln und werden von einer sehnig verstärkten Deckfaszie dorsalseitig bedeckt. Nur nach lateral lockern sich die Faszien auf, wo die Muskeln in ihre Sehnen übergehen. An der Caudalseite des M. infraspinatus gliedert sich der M. teres minor (kleiner runder Muskel) an und folgt ihm weitgehend in seinem Verlauf (siehe Abbildung 14 und 16).

Durch diese anatomischen Verhältnisse erklärt es sich, dass eine Verletzung (z. B. Fraktur) des Schulterblattes keinen superfiziellen, subcutanen Bluterguss bildet. Es sei denn, die Faszie zerreißt ebenfalls (siehe Abbildung 15) (Hafferl, 1957; Lanz and Wachsmuth, 1959; Rauber/Kopsch, 1998a,c).

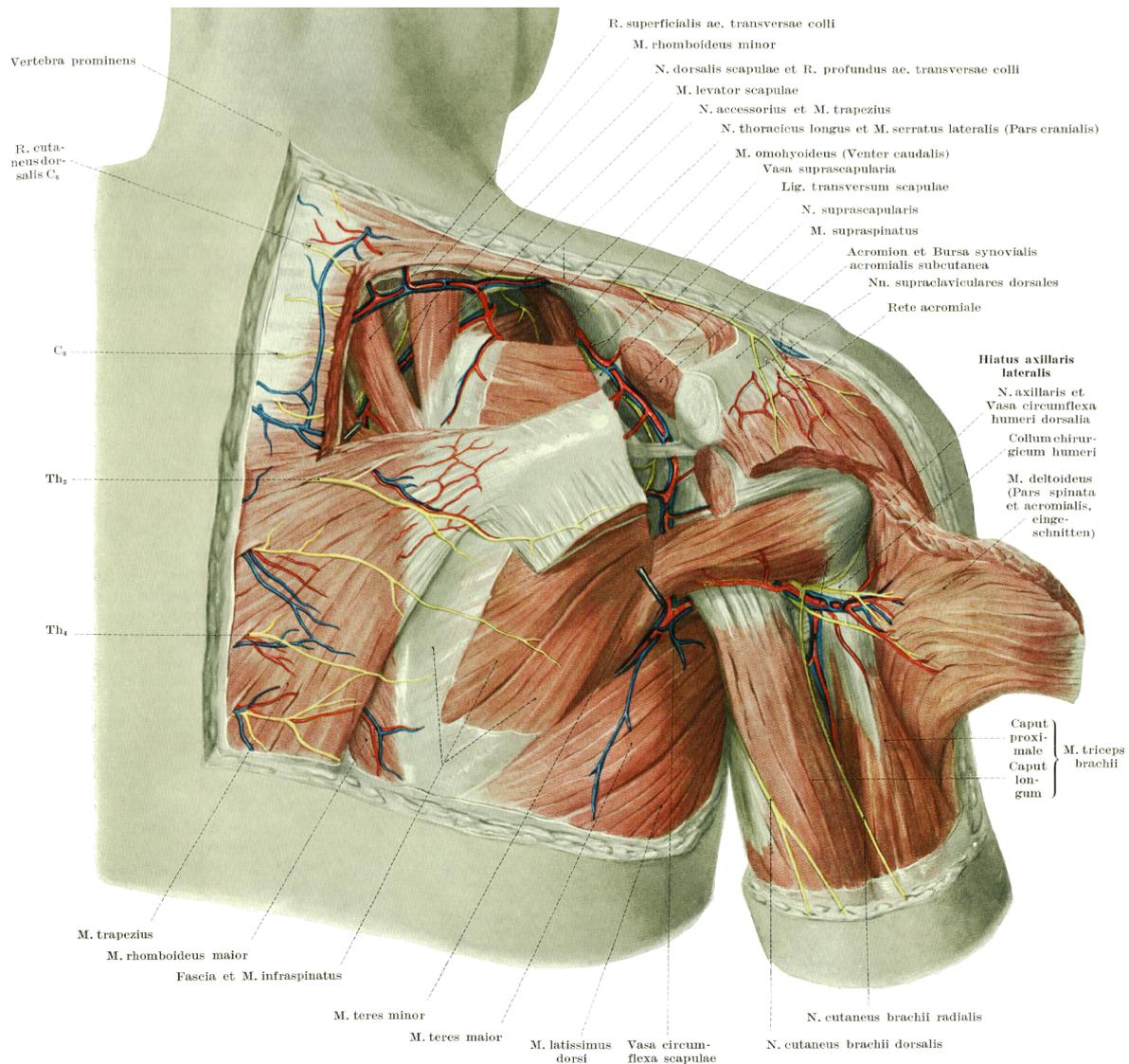


Abbildung 15: Dorsaler Blick auf die Regio scapularis. Darstellung des massiven Fasziematerials über der Spina scapulae. (Aus Lanz and Wachsmuth (1959))



Abbildung 16: Anatomischer Leibesschnitt etwa auf Höhe TH2. Darstellung der Lagebeziehung von (**Ms**) *M. subscapularis*, (**Gl**) Glenoid, (**Ch**) *Caput humeri*, (**As**) *A. subclavia* mit Abgang der (**At**) *A. thoracica interna* und (**Pb**) *Plexus brachialis*, (**Mi**) *M. infraspinatus* und (**Tm**) *M. teres minor*. (Aus [Künzel and Hörmann \(2017\)](#))

Superfizielle dorsale Muskelschicht

Die Muskeln der oberflächlichen Schicht überlagern die darunter liegenden nicht komplett. Den M. trapezius (Trapezmuskel) und den M. deltoideus (Deltamuskel) kann man funktionell als einen gemeinsamen Muskelzug ansehen, der den Rumpf mit dem Oberarm verbindet.

Die knöchernen Strukturen Clavicula (Schlüsselbein), Acromion (Schulterhöhe) und Spina scapulae (Schulterblattgräte) unterteilen diesen Faserzug. Ohne Zusammenhang mit diesem Muskelzug inserieren die cranialen Bündel des M. latissimus dorsi (großer Rückenmuskel). Zwischen diesen beiden Muskelzügen befindet sich eine Lücke, in der sich der caudale Teil des M. rhomboideus maior (großer rautenförmiger Muskel), die Faszie des M. infraspinatus und des M. teres minor sowie die cranialen Randbündel des M. teres maior unmittelbar unter der Haut befinden (siehe Abbildung 17) (Lanz and Wachsmuth, 1959; Rauber/Kopsch, 1998a,c).

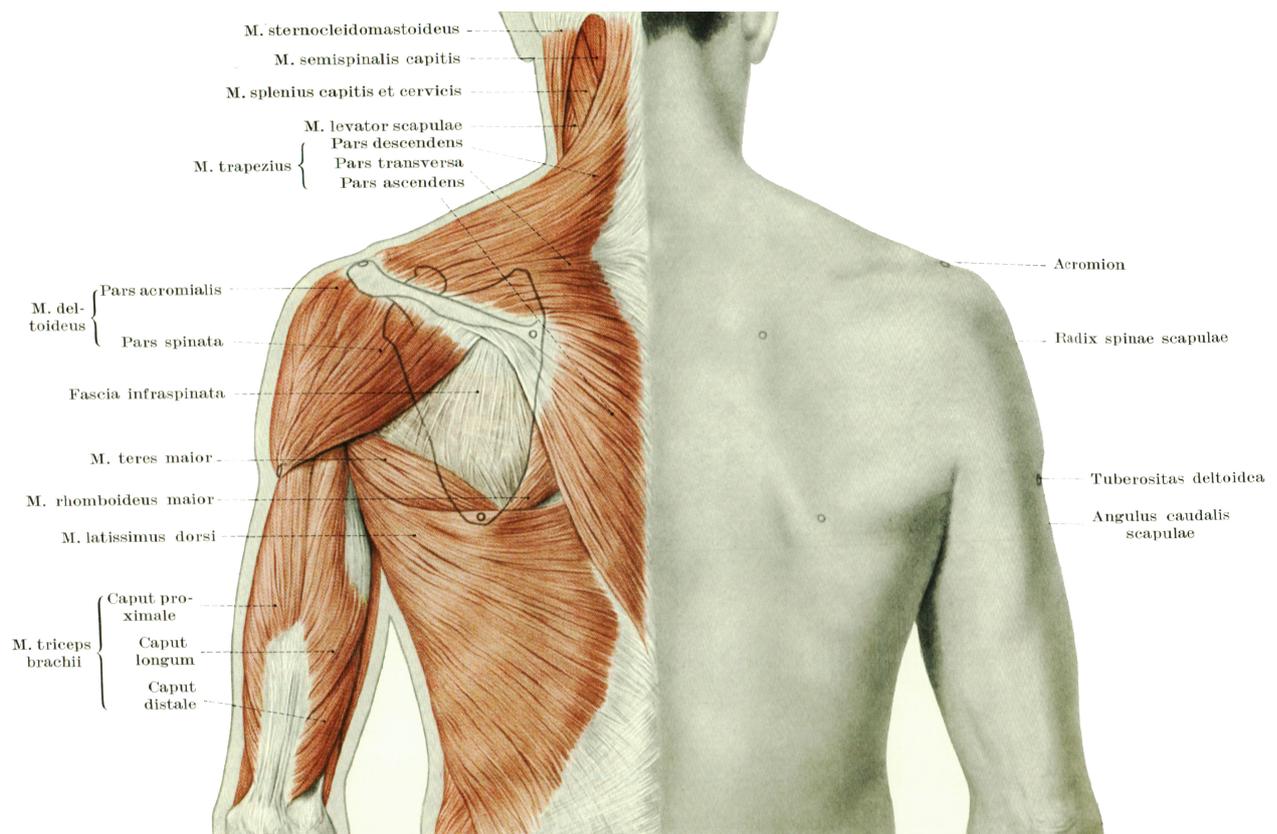


Abbildung 17: Dorsaler Blick auf die Regio scapularis. Darstellung der Überlagerung von superfizieller über profunder Schulterblattmuskulatur. (Aus Lanz and Wachsmuth (1959))

1.3.4 Gelenke und Gelenkmechanik des Schultergürtels

Das **Schultergelenk** ist das beweglichste Kugelgelenk des Körpers. Jedoch liegt hier, anders als beim Hüftgelenk, das Verhältnis der Gelenkflächen Kugel zu Pfanne bei 4:1. Aber gerade dieses Missverhältnis der beiden Flächen macht den ungeheuren Bewegungsumfang dieses Gelenks erst möglich. Damit sich dieses Gelenk ausreichend bewegen kann, ist auch die Gelenkkapsel weit und schlaff. Dieser "Sack" könnte ohne Probleme noch einen weiteren Oberarmkopf aufnehmen. Schutz erfährt dieses Gelenk durch einen starken Bandapparat und durch das knöcherne Schultergewölbe (Lanz and Wachsmuth, 1959; Rauber/Kopsch, 1998a,c) (siehe Abbildung 18).

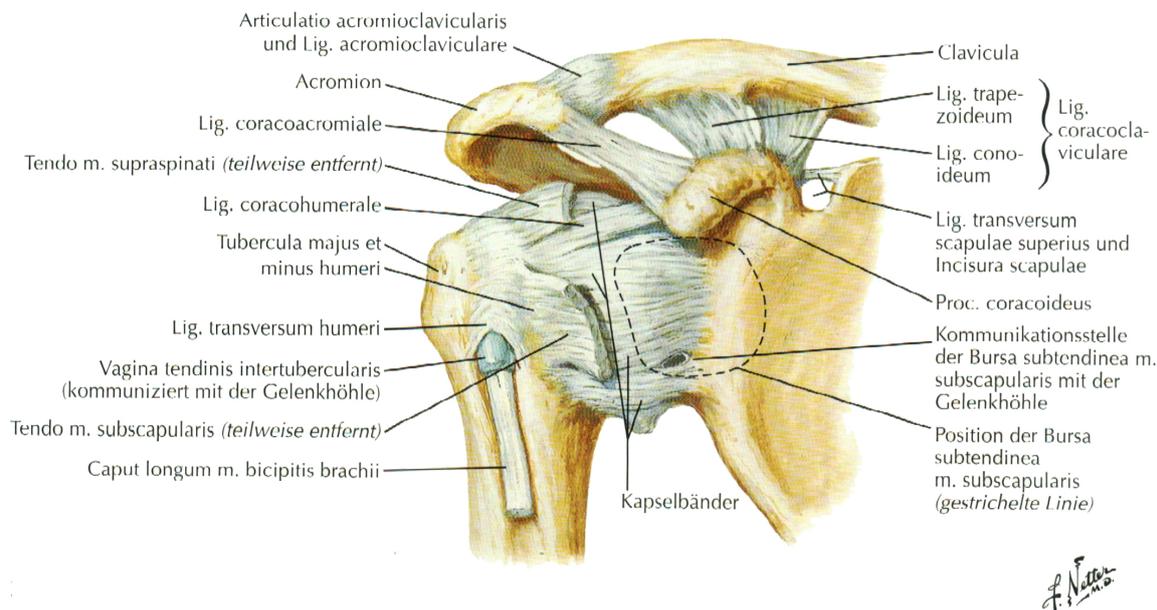


Abbildung 18: Darstellung des Schultergelenks mit seinem Kapsel- und Bandapparat. (Aus Netter (2015))

Die Neutralstellungen des Schultergelenks: Beim Schultergelenk werden zwei Neutralstellungen beschrieben. Eine Stellung geringster Muskelspannung und eine Stellung der geringsten Kapselspannung. Erstere erreicht man durch seitliche 90°ige Abduktion bei gleichzeitig um 90° horizontal gebeugtem Ellenbogengelenk. Zweitere Stellung wird bei mittlerer Rotation des Oberarmes in einer 60°-80°igen seitlichen Abduktion erreicht (Hafnerl, 1957; Lanz and Wachsmuth, 1959).

Bei Gelenkergüssen werden Gelenke normalerweise reflektorisch so eingestellt, dass alle Kapsel Fasern in etwa die gleiche Spannung haben. Patienten mit Gelenkergüssen tragen den Oberarm aber am Körper. Sie gleichen diese Abduktion des Oberarmes durch eine entsprechende Rotation des Schulterblattes aus (Lanz and Wachsmuth, 1959; Rauber/Kopsch, 1998a,c).

Das **Schulterblatt** kann man als die Befestigungsplatte oder Grundplatte des freien Armes sehen. Es ist mit den beiden Schlüsselbeingelenken beweglich verbunden und vergrößert die Bewegungsformen und die Reichweite des Armes erheblich (Lanz and Wachsmuth, 1959; Rauber/Kopsch, 1998a,c).

Schlüsselbein und Schulterblatt sind zweifach miteinander verbunden: Einerseits artikuliert das Schulterblatt mit dem Schlüsselbein in der Articulatio (Art.) acromioclavicularis mit dem Acromion (der Schulterhöhe) und andererseits ist der Processus (Proc.) coracoideus (der Rabenschnabelfortsatz) der Scapula syndesmotisch durch das Lig. coracoclaviculare aufgehängt (siehe Abbildung 18). Die durch den M. subscapularis gepolsterte Unterfläche des Schulterblattes gleitet in lockerem Verschiebegewebe auf dem M. serratus anterior auf dem Brustkorb (subscapuläre Gleitschicht) (siehe Abbildung 13). Die Bewegungen des Schulterblattes betreffen immer diese drei beschriebenen Gelenke, meist auch noch ein viertes, die Art. sternoclavicularis (das Brustbein-Schlüsselbeingelenk) (Lanz and Wachsmuth, 1959; Rauber/Kopsch, 1998a,c; Drake et al., 2009).

Articulatio sterno-clavicularis

Obwohl keine Kugel vorhanden ist, wird dieses Gelenk als ein Kugelgelenk bezeichnet, weil es in alle drei Raumrichtungen beweglich ist. Die Führung des Gelenkes liegt nicht in den Gelenkflächen sondern in der derben Kapsel mit ihrem Bandapparat (Lanz and Wachsmuth, 1959; Rauber/Kopsch, 1998a,c).

Aus seiner Ruhelage kann das Schlüsselbein stark nach ventral, dorsal und cranial bewegt werden. Fast keine Beweglichkeit ist caudalwärts vorhanden. Für das Vor- und zurückführen der Schulter schafft dieses Gelenk etwa je 30° (siehe Abbildung 19 und 20). Für das Heben etwa 50° und für das Senken etwa nur 5° (siehe Abbildung 19).

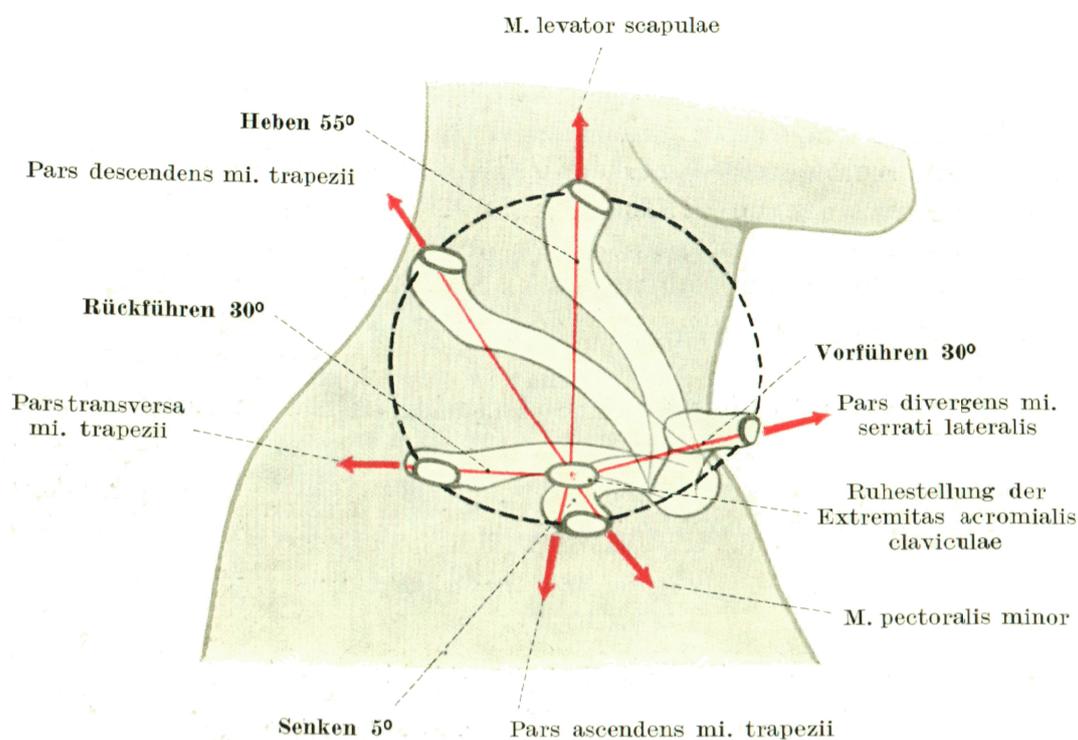


Abbildung 19: Bewegungsraum der Art. sternoclavicularis. (Aus Lanz and Wachsmuth (1959))

Ruhelage des Schlüsselbeins

In aufrechter Haltung mit herunterhängendem Arm liegt die Längsachse des Schlüsselbeines annähernd horizontal. Je nach Form des Brustkorbes und des muskulären Unterbaues des Schulterblattes weicht sie etwa um 30° aus der Frontalen nach dorsal ab (Lanz and Wachsmuth, 1959; Rauber/Kopsch, 1998a,c).

Bewegungen im Schultereckgelenk

Schwenkung des unteren Schulterblattwinkels: Das Schultergelenk kann in allen drei Raumrichtungen bewegt werden. Für Bewegungen des Armes über die Horizontale ist die Beweglichkeit des Schulterblattes um die Sagittal- und Transversalachse unerlässlich. Beim Anheben des Armes nach vorne schwingt der Angulus inferior scapulae (der untere Schulterblattwinkel) nach frontal. Um die Sagittalachse schwingt er nach lateral beim Seithochheben des Armes. Die größte Bewegungsbahn beschreibt das Schulterblatt bei einer Zwischenbewegung um beide Achsen (40° bis 60° sind möglich (siehe Abbildung 20).

Flügelbewegung des Schulterblattes: Das Schulterblatt dreht sich überdies im Schultereckgelenk um die Longitudinalachse bis zu einem Winkel von 50° (siehe Abbildung 20 und 21). Bei jeder Bewegung in der Art. sternoclavicularis stellt sich das Schulterblatt im Schultereckgelenk flächenhaft, der Brustkorbkrümmung folgend, ein. Man kann das Schulterblatt auch flügel förmig vom Brustkorb abheben (Scapula alata). Die limitierenden Faktoren für dieses Abheben sind Luftdruck, Muskeltonus und Spannung der Haut. Diese Bewegung um die Longitudinalachse ist so groß, dass man den Angulus inferior scapulae gut umfassen kann. Kinder können sogar an den abstehenden Schulterblattwinkeln getragen werden ("Engerltragen") (Hafferl, 1957; Lanz and Wachsmuth, 1959).

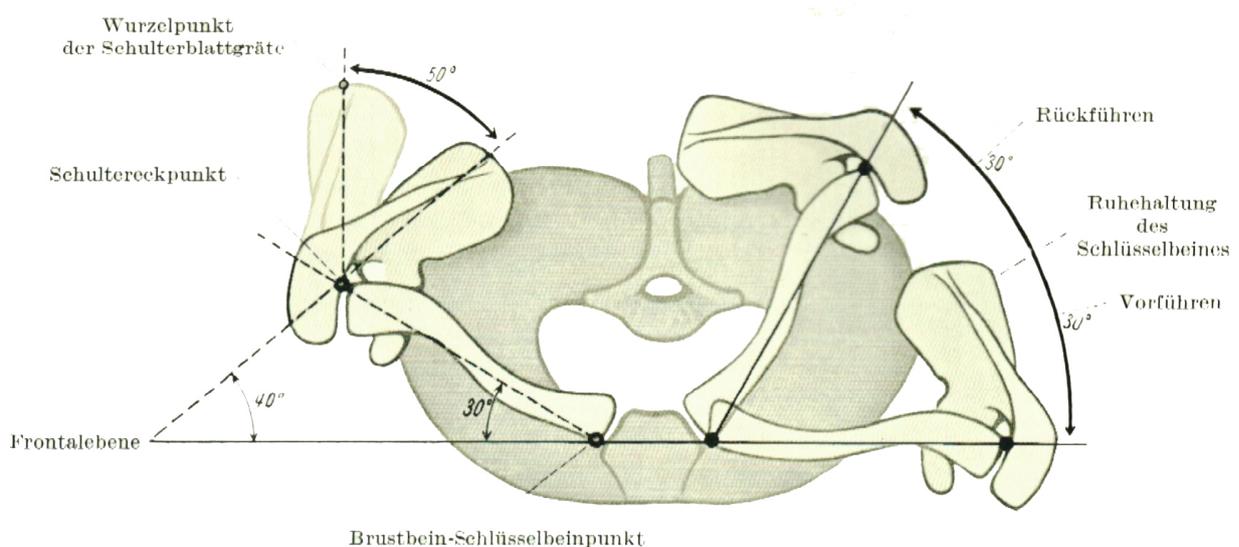


Abbildung 20: Flügelbewegung, Ruhehaltung und mittlere Auslenkung der Scapula in der Bewegungsbahn um die Longitudinalachse der Art. sternoclavicularis. (Aus Lanz and Wachsmuth (1959))

Je größer der Schulterblatt-Schlüsselbein-Winkel ist, desto mehr weist die Gelenkpfanne nach ventral, im umgekehrten Fall weist sie mehr dorsalwärts. Das Schulterblatt erweitert auf diese Weise den Kreiselbereich des Schultergelenks und unterstützt das Herumführen des horizontal gehaltenen Armes ventral- und dorsalwärts (Lanz and Wachsmuth, 1959; Rauber/Kopsch, 1998a,c).

Grundstellung des Schulterblattes beim Lebenden: Das Schulterblatt ist bei einem parallel zur Wirbelsäule herabhängendem Arm in ihrer Art. thoracoscapularis (dem Gleitlager) dorsal schräg eingestellt, d.h.: Der Margo medialis liegt bei herabhängendem adduziertem Arm parallel zur Wirbelsäule und die Scapularplatte bildet mit der Medianebene einen Winkel von 50° und zur coronalen 40 Grad. Mit der Clavicula bildet sie einen Winkel von 70° (siehe Abbildung 20). (Zudem ist die Rippenkrümmung zu berücksichtigen!) (Lanz and Wachsmuth, 1959; Rauber/Kopsch, 1998a,c) Der untere Winkel (Angulus inferior) des Schulterblatts (Scapula) liegt in Höhe der 7. Rippe und des 7. Zwischenrippenraumes (Intercostalraum).

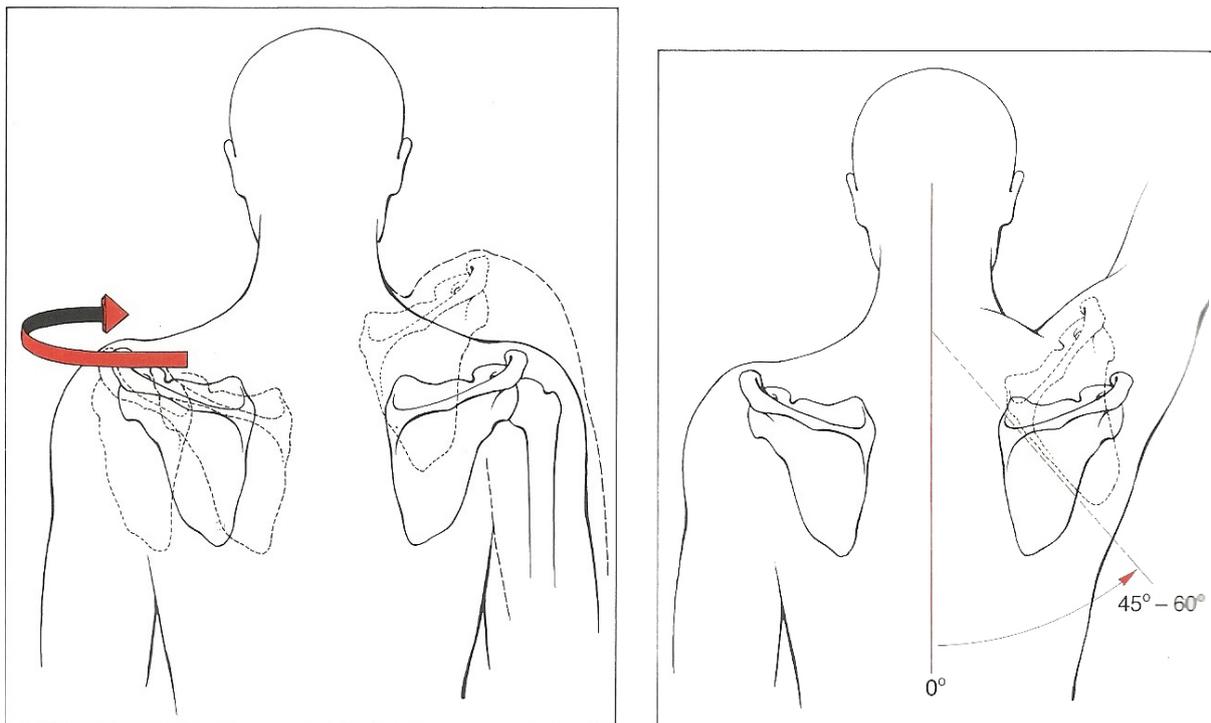


Abbildung 21: **Linke Abbildung:** Links: Die Schulter wird nach vorne geführt, das Schulterblatt gleitet auf dem Thorax von medial nach lateral. Rechts: Beim Heben und Senken der Schulter gleitet das Schulterblatt auf dem Thorax parallel zur Wirbelsäule. **Rechte Abbildung:** Bei maximaler Elevation des Armes in der Frontalebene (Abduktion) macht das Schulterblatt gegenüber der Vertikalen eine Rotation von etwa 45° bis 60° . (Aus Rauber/Kopsch (1998a))

Zusammenwirken von Schultergürtel und Schultergelenk

Bewegungsumfang im Schultergelenk allein: Der Bewegungsumfang wird in Abbildung 22a) auf einer Bahnkugel beschrieben, die der Erdkugel nachempfunden ist und deren Nullmeridian aus praktischen Gründen mit der Frontalebene zusammenfällt. Das Schultergelenk allein ermöglicht eine Abduktion (seitliches Anheben) des Armes bis annähernd 90° und eine Adduktion (an den Körper führen) des Armes bis -10° . Führt man den horizontal seitlich abduzierten Arm nach dorsal, zur Sagittalebene so fällt er steil von etwa 90° bis auf lediglich 37° ab. In der Bewegung nach ventral steigt der Arm zunächst auf bis zu 105° zwischen Längengrad $+30$ und $+50$, um dann bis zum Längengrad $+60$ langsam zu fallen. Ab diesem Punkt fällt der Arm dann nach ventral schnell ab. Bei 120° Länge an der Kugeloberfläche liegt er dem Brustkorb mit einer Elevation von etwa 16° an. In der Sagittalebene kann der Arm noch immer bis 60° angehoben werden (Lanz and Wachsmuth, 1959).

In allen übrigen Stellungen kann das Schultergelenk frei gekreiselt werden, jedoch in jeder Stellung verschieden stark. Bei beispielsweise einer Abduktion von 30° kann mehr nach innen (69°) als nach außen (40°) rotiert werden. Bis zu einer Abduktion von 60° verschiebt sich dieses Verhältnis zugunsten der Außenkreislung (51° zu 55°) (Lanz and Wachsmuth, 1959; Rauber/Kopsch, 1998a,c).

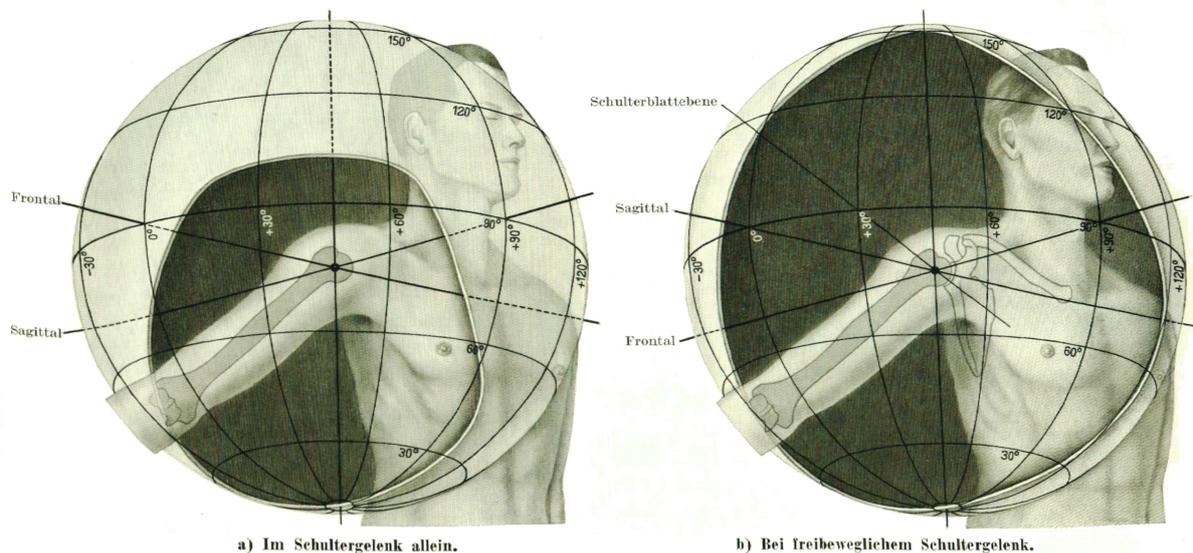


Abbildung 22: Kombinierte Bewegung von Schultergelenk und Schultergürtel - Bewegungsumfang des Oberarmes. **Darstellung a)** zeigt den Bewegungsumfang im Schultergelenk alleine, während in der **Darstellung b)** der Bewegungsumfang mit Beteiligung des gesamten Schultergürtels zu sehen ist. (Aus Lanz and Wachsmuth (1959))

Bewegungsumfang des Schultergelenks bei freiem Schultergürtel: Ist der Schultergürtel frei beweglich, so steigert dies den Bewegungsumfang des Armes beträchtlich. Diese Steigerung wird in Abbildung 22b) dargestellt. Im rechten Teil der Abbildung ist das Schultergelenk ebenfalls im Mittelpunkt der Kugel eingestellt, die Grundplatte, das Schulterblatt ist aber - im Gegensatz zu a), wo es fixiert war - physiologisch frei beweglich.

Unter diesen Bedingungen kann der Oberarm seitlich und nach vorne gleich hoch bis etwa 120° angehoben werden. In der ventrolateralen Mittelstellung schafft der Arm eine Hebung bis zu 155° . Nach hinten fällt die Bahnkurve dann steil ab und ist bis auf etwa 10° ident mit der reinen Schultergelenksbewegung. Bei -100° dorsal und $+120^\circ$ ventral liegen die Endpunkte dieser Bewegung (Hafferl, 1957; Lanz and Wachsmuth, 1959).

Zusammenspiel von Schultergürtel und Schultergelenk: Ein physiologisch aktiv bewegtes Schultergelenk wird immer die gesamte Gelenkskette synchron bewegen. D.h., dass nicht ein Gelenk bis in seine Endposition geführt wird und anschließend das nächste Gelenk seinen vollen Bewegungsspielraum ausnutzt.

Es ist vielmehr so, dass z.B. bei der Abduktion des Armes auf 45° das Schulterblatt schon um 17° folgt, somit bewegt sich das Schultergelenk alleine nur 28° . Bei der Abduktion von 90° geht das Schulterblatt schon 36° mit und sogar bei der Abduktion von 135° sind noch immer nicht beide Gelenke endgradig bewegt. Erst das höchste Erheben des Armes führt beide Gelenke gleichmäßig in ihre Endstellung (siehe Abbildung 23).

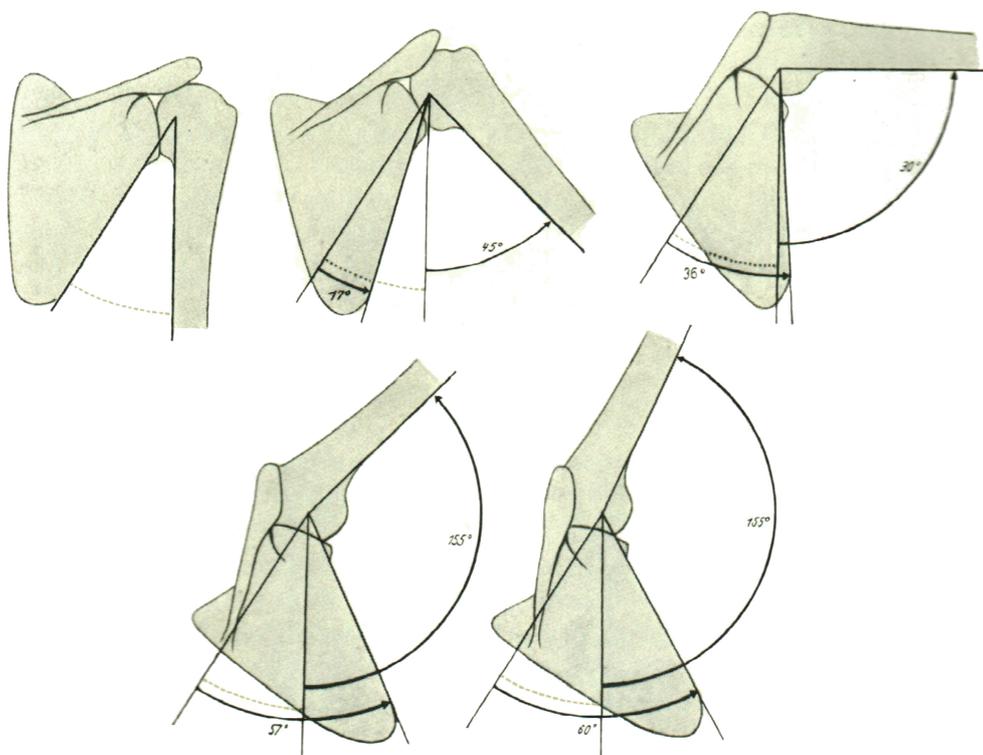


Abbildung 23: Mitbewegen des Schulterblattes beim Armheben im natürlichen Zusammenspiel mit dem Schultergürtel. (Aus Lanz and Wachsmuth (1959))

1.3.5 Brustkorb

Der knöcherne Thorax

Der knöcherne Thorax besteht aus den 12 rippentragenden Brustwirbeln, den zwölf paarig angelegten Rippen und dem Sternum. Zwischen den Rippen bleiben die Spatia intercostalia frei. Von der Form her sieht der Thorax aus wie ein abgestumpfter Kegel. Die Rippen bilden die "Reifen" wie bei einem Fass. Je weiter caudal die Rippen liegen, desto steiler verlaufen sie nach unten. Jede Rippe ist mit dem Brustbein knorpelig über die Cartilago costalis verbunden. Die erste bis siebente Rippe ist direkt mit dem Sternum verbunden, ab der achten bis zur zehnten Rippe verläuft die knorpelige Verbindung nicht direkt zum Sternum sondern zum nächsten Nachbar. Die elfte und die zwölfte Rippe hat keine Verbindung mehr zum Brustbein, weshalb sie auch "fliegende Rippen" genannt werden. Dorsal ist jede Rippe gelenkig gelagert. Über die Art. capitis costae (mit dem Wirbelkörper) und die Art. costotransversaria (mit dem Proc. transversus) kann sich jede Rippe über eine Achse bewegen die durch diese beiden Gelenke zieht (siehe Abbildung 24). (Hafferl, 1957)

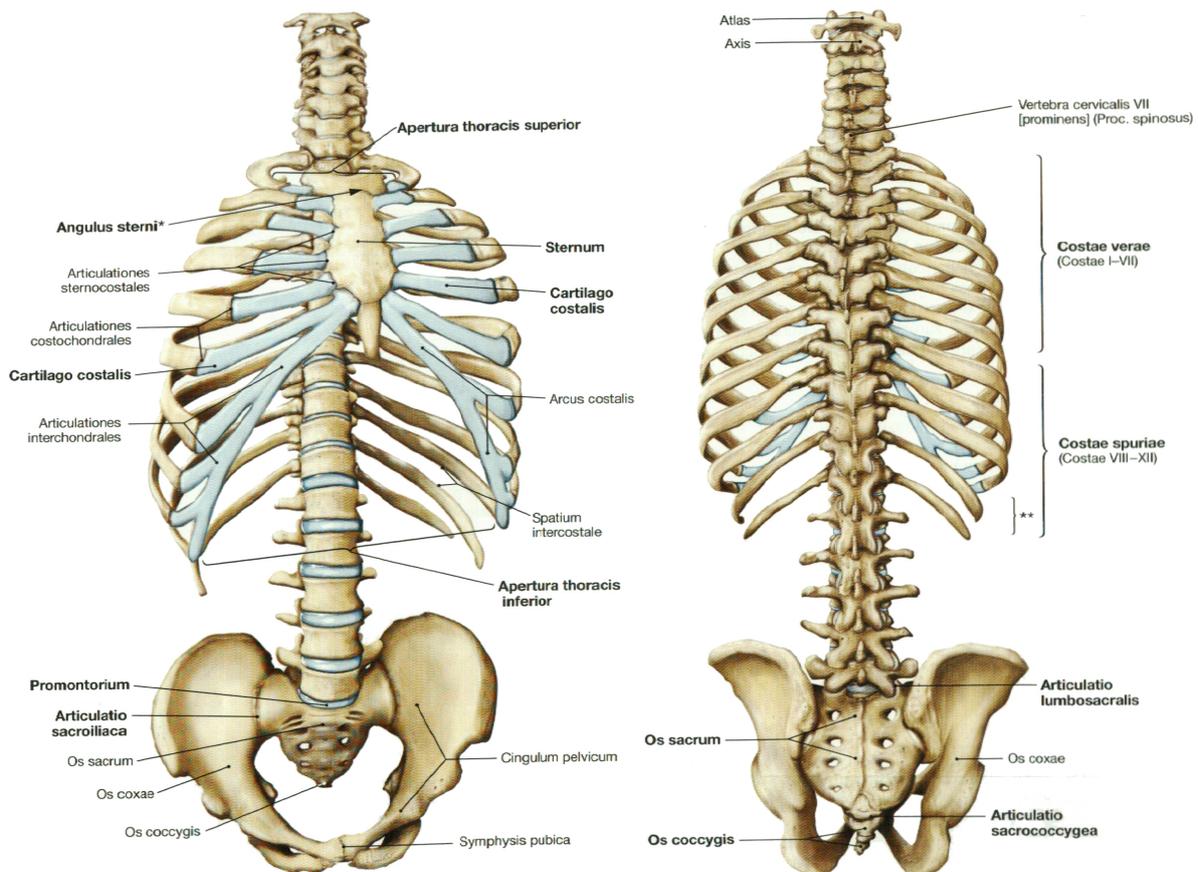


Abbildung 24: Knochen und Knorpel des Rumpfskelettes. (Aus Paulsen and Waschke (2011a))

Begrenzungen des Thorax

Als **untere Begrenzung des Thorax** wird eine Linie angegeben, die, beginnend vom Processus xiphoideus, dem Rippenbogen folgend, die Spitzen der drei letzten Rippen berührt und beim Processus spinosus der 12. Rippe endet (siehe Abbildung 24). Diese sogenannte **Apertura thoracis inferior** liegt unterhalb des Zwerchfells, das den unteren Abschluss des Cavum thoracis bildet (Hafferl, 1957).

Die **obere Begrenzung des Thorax** oder auch **Apertura thoracis superior** bilden am knöchernen Thorax der erste Brustwirbel, das erste Rippenpaar und die Incisura iugularis sterni (siehe Abbildung 24). Am Lebenden verläuft die obere Begrenzung des Brustkorbes etwas höher: Von der Incisura iugularis entlang der beiden Schlüsselbeine bis zur Art. acromioclavicularis und von dort horizontal zum Proc. spinosus des siebenten Halswirbels (Hafferl, 1957).

Funktion der Atmung

Darüberhinaus unterstützt der knöcherne Thorax die Atmungsfunktion. Zu diesem Zweck hat der Brustkorb eine große Fläche für Muskelansatzstellen, die die Atmung aktiv unterstützen (Mm. intercostales, Diaphragma und accessorische Atemhilfsmuskeln) (Troyer, 2005; Ward, 2005). Diese Muskeln heben in erster Linie den Brustkorb. Die Rippen folgen dieser auf sie einwirkenden Kraft entsprechend ihrer individuellen Winkelung, Form und Gelenkverbindungen. Dadurch werden der Umfang des Brustkorbs vergrößert, der intrathoracale Druck reduziert und in weiterer Folge eine passiv folgende Bewegung der Lunge ausgelöst, die die Einatmung ermöglicht. Die Ausatmung ist im Regelfall ein passiver Vorgang. Aber auch hier steht eine Hilfsmuskulatur zur Verfügung, die eine forcierte Ausatmung ermöglicht (Troyer, 2005; Ward, 2005; Bastir et al., 2013).

Zwischen Lunge und innerer Brustwand befinden sich zwei Lagen von von serösem Gewebe - die Pleura parietalis an der inneren Thoraxwand und die Pleura visceralis an der Oberfläche der Lunge - dazwischen befindet sich ein mit Flüssigkeit gefüllter Spalt. Durch diese anatomische Gegebenheit kann sich die Lunge bei den Atembewegungen gegen die Brustwand frei verschieben (Markov and Amasheh, 2014).

Ötzi's Thorax

Im Gegensatz zum physiologischen Thorax in Abbildung 24 ist der Thorax des Ötzi in anteroposteriorer Richtung abgeplattet. Das Brustbein hat sich in Richtung dorsal und rechts verlagert und liegt den Vorderseiten der Wirbelkörper auf, was eine Drehung der Rippen in den Costotransversal- und Costovertebralgelenken verursacht hat. Das dürfte von dem lange auf dem Brustkorb lastenden Gewicht des Eises verursacht worden sein. Diese Verdrehung läßt die Rippen in anterioposteriorer Sicht übertrieben lang erscheinen. In ihrer übrigen Erscheinung scheinen die Rippen aber wie die von einem rezenten Menschen geformt zu sein (Murphy et al., 2003). (Siehe Abbildung 25)

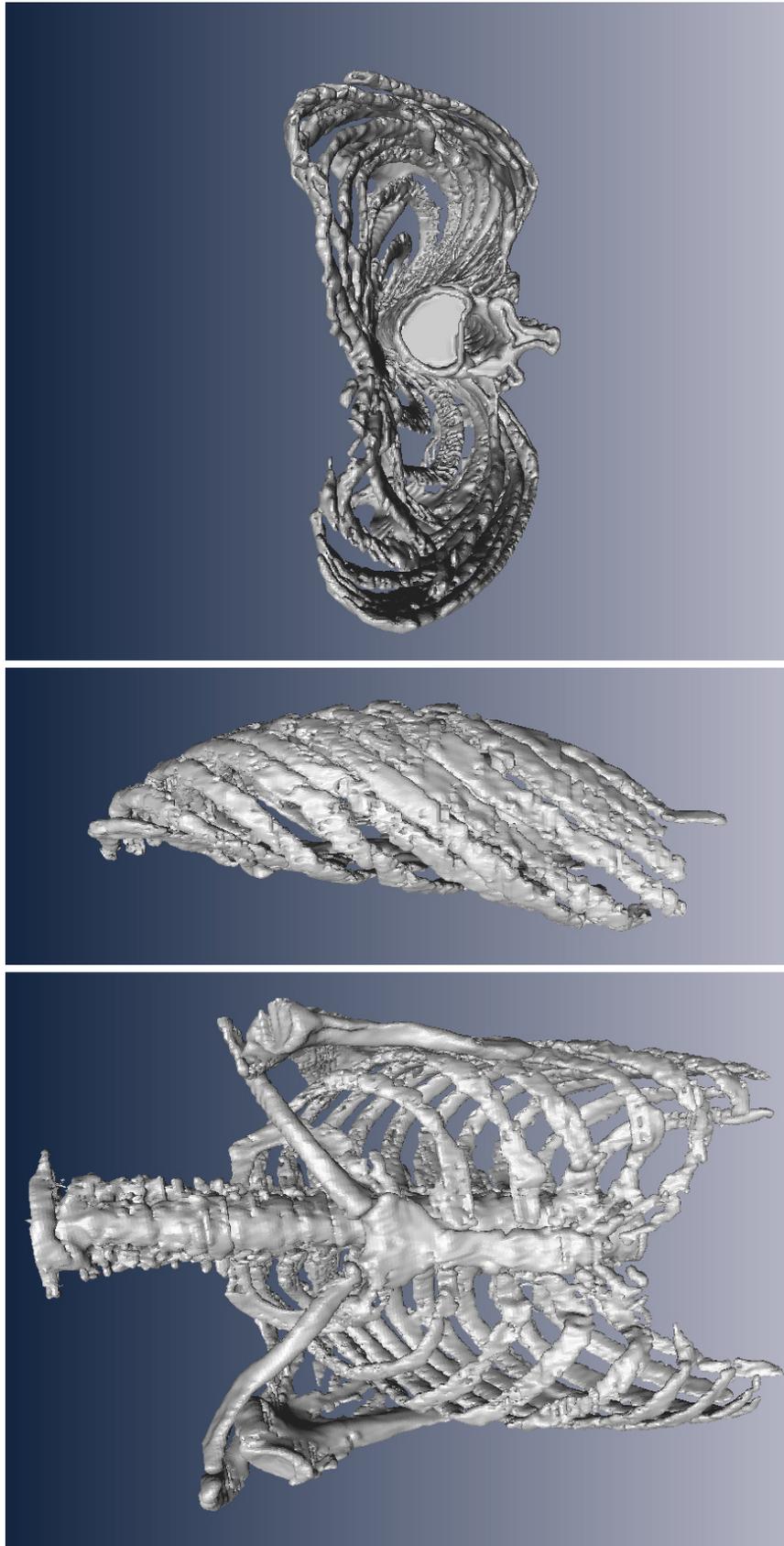


Abbildung 25: Ötzi's segmentierter Brustkorb samt Scapula, Clavicula und Wirbelsäule von frontal, ventral und seitlich. In der seitlichen Darstellung wurden die Schulterblätter, die Schlüsselbeine und die Wirbelsäule ausgeblendet. (Siehe auch Kapitel 7 "Ausblick" auf Seite 101)

(Die CT-Daten wurden von der Uni-Klinik Innsbruck zur Verfügung gestellt.)

1.4 Gefäß- und Nervenversorgung im Schultergürtel

1.4.1 Versorgungswege der Regio scapularis

Für die Versorgung der Regio scapularis gibt es vier Hauptwege (siehe Abbildung 26):

- ▷ **Die Incisura scapulae cranialis (oberer Einschnitt des Schulterblattes):** Die Margo superior scapulae (oberer Schulterblattrand) wird über die Incisura scapulae cranialis vom N. suprascapularis (ein kurzer dorsaler Abgang des Plexus brachialis) und die A. suprascapularis (kommt aus dem Truncus thyreocervicalis der A. subclavia) samt Begleitvenen versorgt. Das Versorgungsgebiet umfasst den M. supraspinatus und weiterführend den M. infraspinatus.
- ▷ **Hiatus axillaris medialis (mediale Achsellücke):** Durch die mediale Achsellücke erhält die Fossa infraspinata die Vasa circumflexa scapulae aus den Vasa subscapularia.
- ▷ **Hiatus axillaris lateralis (laterale Achsellücke):** Die Versorgungsstränge der lateralen Achsellücke führen als rückläufige Seitenäste der Vasa circumflexa humeri muskulär eigentlich nur zum M. deltoideus und zum M. ters minor. Letzterer wird zusätzlich über die Vasa circumflexa scapulae versorgt.
- ▷ **Margo medialis (zur Wirbelsäule zeigender Rand der Scapula):** Seitenäste des R. profundus der A. transversae colli bilden die Versorgungsäste der Fossa supra- und infraspinata samt Begleitvenen. Versorgt werden die Mm. rhomboidei, der M. levator scapulae und der M. trapezius.

Rete arteriosum scapulae (Arteriennetz der Scapula): Das Rete arteriosum scapulae wird durch die vier vorgenannten Versorgungswege gebildet (siehe Abbildung 26). Arterien und Nerven ziehen, sich mehrfach verästelnd, vom Rand der Scapula in die Mitte, wo die Arterien vor allem in der Fossa supra- und infraspinata vielfach anastomosieren. Dieses arterielle Versorgungsnetz bildet nach Unterbindung der A. axillaris einen ausreichenden Kollateralkreislauf aus (Lanz and Wachsmuth, 1959; Rauber/Kopsch, 1998a,c).

Versorgungsstraßen der superfiziellen Muskelschicht: Die oberflächlichen Muskeln und die dorsalen Schulterblattrandmuskeln werden von den Rändern des Schulterblattes her versorgt, ohne dass Gefäße oder Nerven mit dem Schulterblatt in Kontakt kommen.

Versorgungsstraßen der tiefen Muskelschicht: Die Versorgungswege der tiefen Muskelschicht verlaufen tief auf der Knochenhaut und nicht im dazwischenliegenden Fett-Bindegewebslager (Lanz and Wachsmuth, 1959; Rauber/Kopsch, 1998a,c).

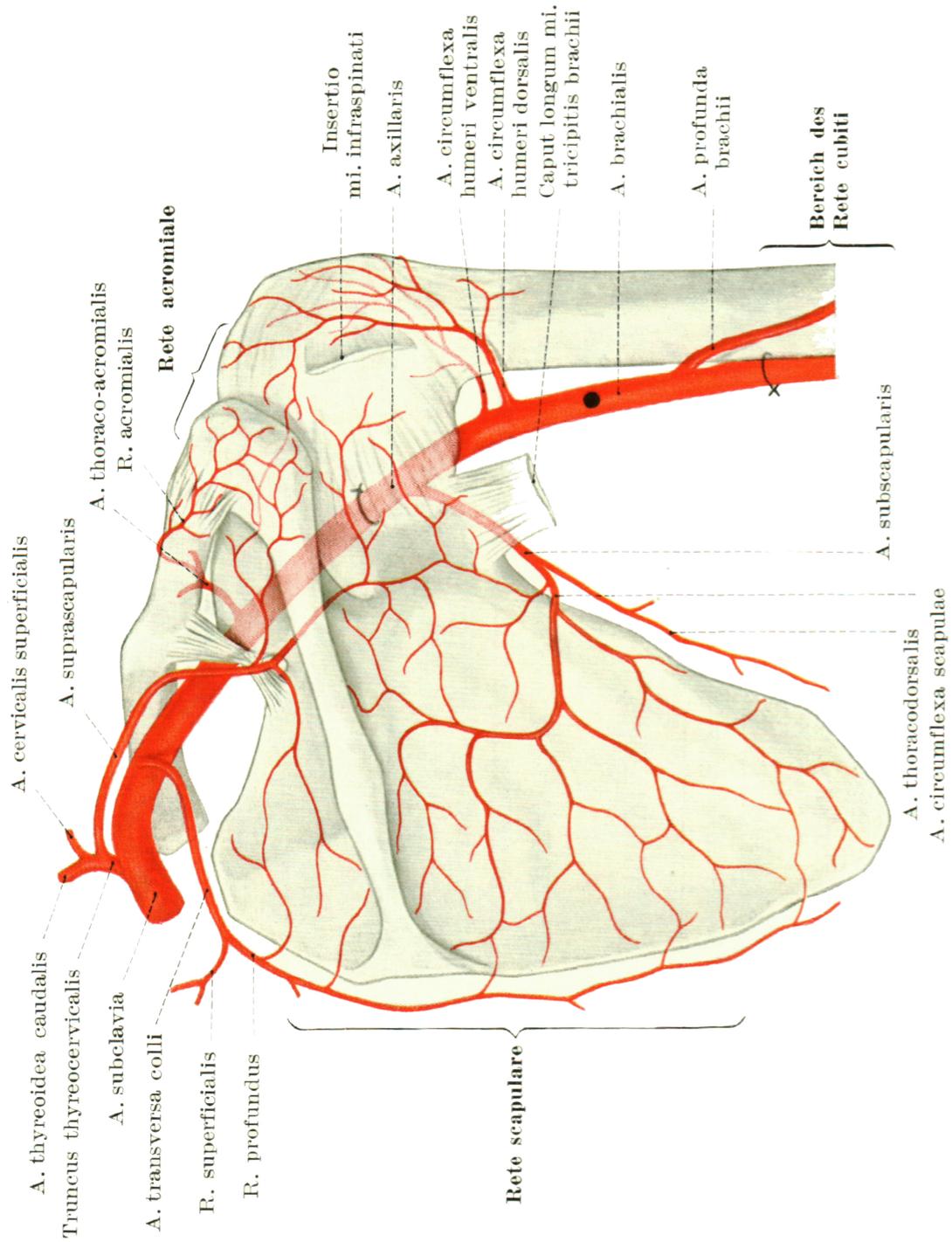


Abbildung 26: Das versorgende Arteriennetz des Schulterblattes. (Aus *Lanz and Wachsmuth (1959)*)

1.4.2 Verlauf und Versorgungsgebiet des Plexus brachialis

Der Plexus brachialis entsteht aus den Rr. ventrales der Nn. cervicales 5 bis 8. Die Wurzeln des Plexus treten durch die vordere Scalenuslücke (zw. M. scalenus anterior und medius) und hinter der A. subclavia hervor. Sie verlaufen cranial zur ersten Rippe zum Plexus brachialis zusammen. Seine Pars supraclavicularis kann bei mageren Menschen sogar getastet werden. Der Plexus brachialis versorgt alle Muskeln des Schultergürtels und des Armes - außer den M. trapezius. Er innerviert sensibel den Arm. Hals und Nacken werden vom Plexus cervicalis versorgt. Sympathische Fasern für die Steuerung der Schweißdrüsen sowie der glatten Muskulatur der Gefäß- und Hautmuskeln des Armes kommen ebenfalls aus dem Plexus brachialis (siehe Abbildung 27 und 29). (Lanz and Wachsmuth, 1959)

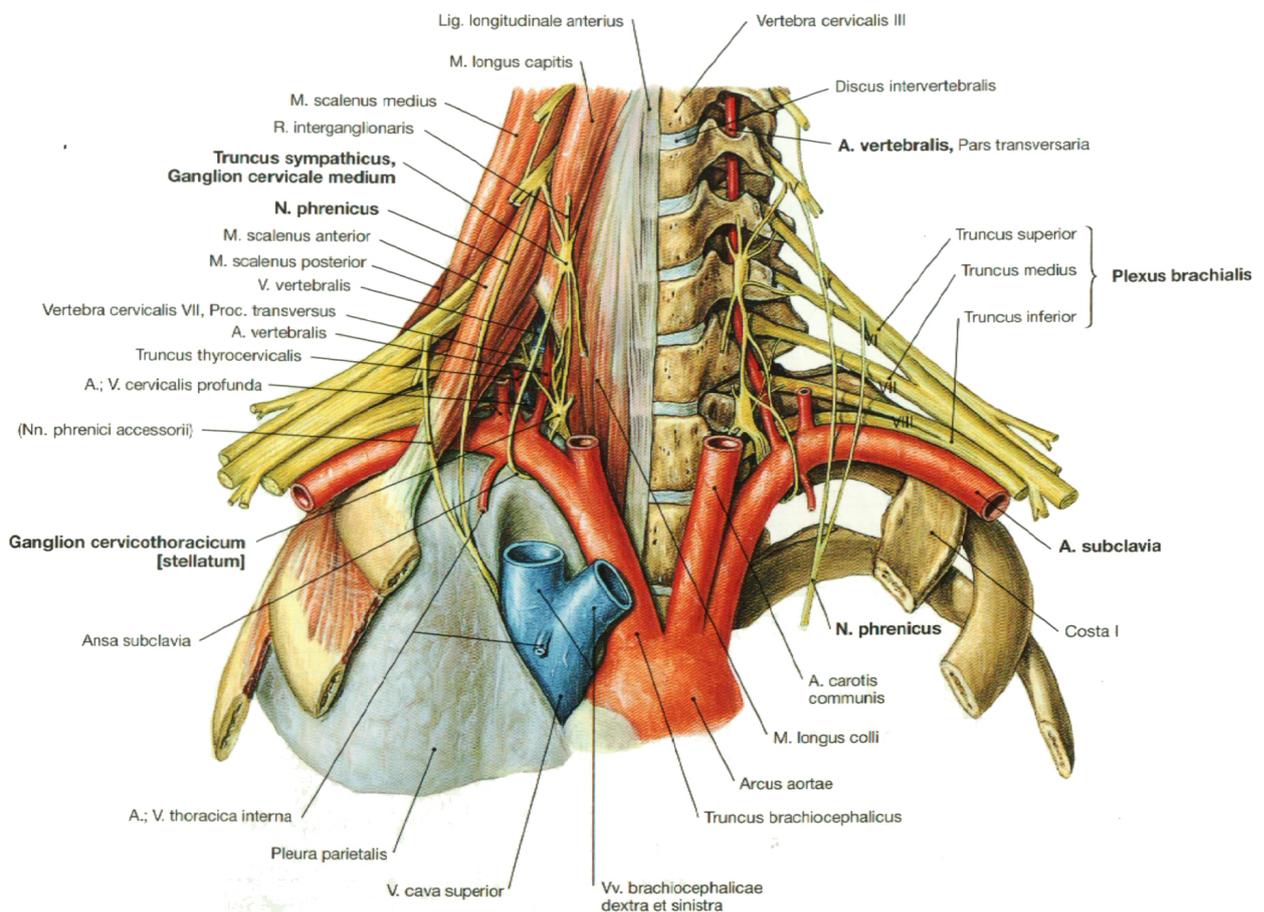


Abbildung 27: Gefäße und Nerven am Übergang vom Hals zum Thorax und zur oberen Extremität. (Aus Paulsen and Waschke (2011b))

1.4.3 Verlauf der Arteria und Vena subclavia

Die Arteria subclavia ist eine paarig vorhandene stammnahe Arterie, die oxygeniertes Blut für Kopf, Hals, Arm und Schulter führt (siehe Abbildung 26 und 28).

Die linke A. subclavia entspringt direkt aus dem Arcus aortae, dem Aortenbogen, die rechte gemeinsam mit der A. carotis communis aus dem Truncus brachiocephalicus (siehe Abbildung 27). Der linke und rechte Verlauf der A. subclavia ist aufgrund des unterschiedlichen Ursprungs bis zur Scalenuslücke unterschiedlich (siehe ebenfalls Abbildung 27). Die Scalenuslücke stellt für die Arteria subclavia eine Engstelle dar, in der es zu Beeinträchtigungen der Blutströmung kommen kann. Dies bezeichnet man als Scalenussyndrom (siehe Abbildung 29). (Benninghoff, 2004; Hafferl, 1957)

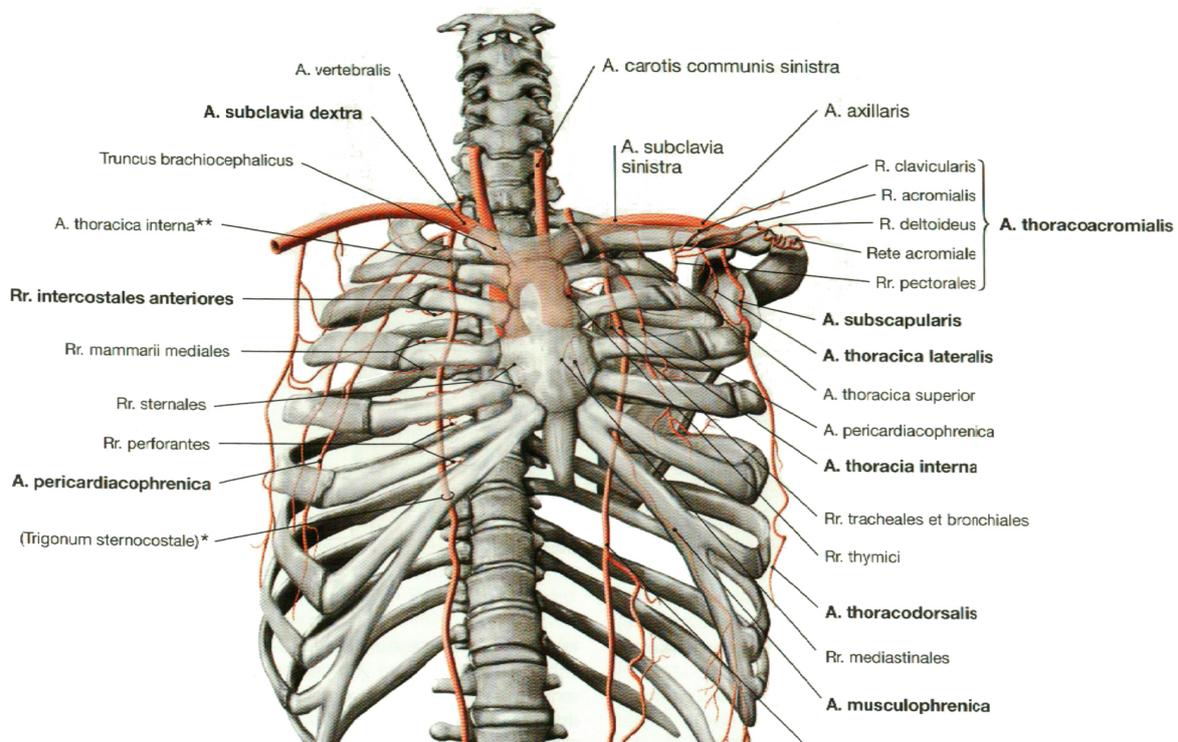


Abbildung 28: Verlauf der Arteria subclavia in Beziehung zum knöchernen Skelett. (Aus Paulsen and Waschke (2011a))

Die rechte A. subclavia zieht von ihrem Abgang aus dem Tr. brachiocephalicus in schwacher Steigung nach lateral zur ersten Rippe. Dabei liegt sie der Pleurakuppel auf und ist mit ihr leicht bindegewebig verbunden. Von ihrem Abgang bis zur Scalenuslücke - zwischen dem M. scalenus anterior und dem M. scalenus medius - ist die A. subclavia etwa 3 cm lang (Hafferl, 1957).

Die linke A. subclavia zieht von ihrem Abgang lateral und etwas profunder als die A. carotis communis in Richtung Hals und ändert, an der ersten Rippe angelangt, ihre Verlaufsrichtung nach lateral und tritt durch die hintere Scalenuslücke. Sie verläuft steiler als rechts und liegt der Pleurakuppe weiter dorsal an als rechts (Hafferl, 1957).

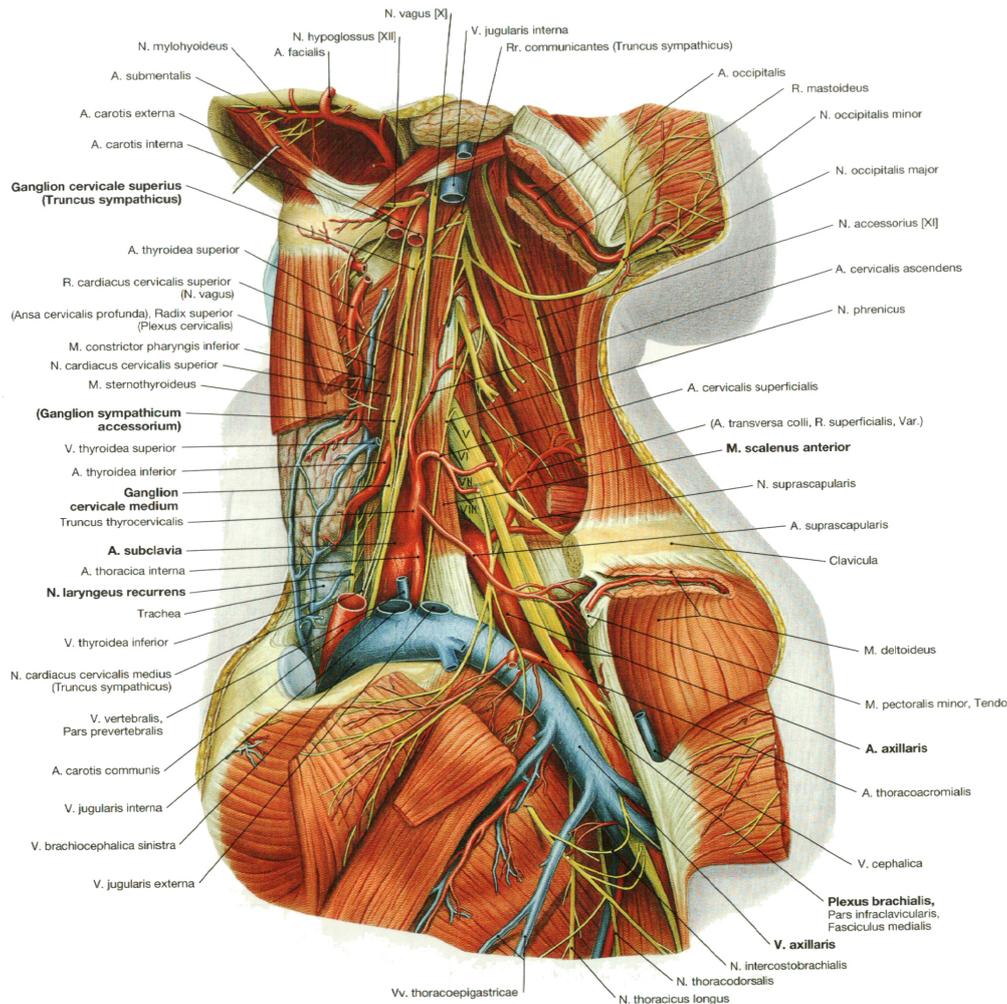


Abbildung 29: Verlauf der Arteria und Vena subclavia sowie des Plexus brachialis, links von lateral. (Aus [Paulsen and Waschke \(2011b\)](#))

Weiterer Verlauf: Beim Durchtritt durch die hintere Scalenuslücke liegt die A. subclavia auf der ersten Rippe dem Sulcus a. subclaviae auf. Craniodorsal liegt der Plexus brachialis, der die A. und V. subclavia auf ihrem Verlauf begleitet (siehe Abbildung 29). Getrennt durch die Sehne des M. scalenus anterior auf Höhe der Scalenuslücke nähert sich die V. subclavia der A. subclavia bald an. Ab dem lateralen Rand der ersten Rippe heißt die A. subclavia, begleitet von der gleichnamigen Vene, A. bzw. V. axillaris, die dann unter dem Schlüsselbein in die Achselhöhle ziehen. Die Arteria subclavia versorgt die obere Extremität, sowie Teile der Hals- und Thoraxregion mit arteriellem Blut (siehe Abbildung 27 und 29). ([Hafferl, 1957](#))

Abgänge vom Ursprung bis zur Scalenuslücke - Versorgung der Halsregion:

- ▷ A. thoracica interna
- ▷ A. vertebralis
- ▷ Truncus thyrocervicalis
- ▷ Truncus costocervicalis

(Aus [Medi-Learn \(2017a\)](#))**Abgänge zur Versorgung der Schulterregion bis zur Achselhöhle:**

- ▷ A. thoracica superior
- ▷ A. thoracoacromialis
- ▷ A. thoracica lateralis
- ▷ A. thoracodorsalis
- ▷ A. circumflexa humeri anterior
- ▷ A. circumflexa humeri posterior

(Aus [Medi-Learn \(2017a\)](#))

Vena axillaris und Vena subclavia: Die V. axillaris sammelt die Begleitvenen der Äste der A. axillaris und verläuft an deren medialer Seite. Die V. axillaris ist mit der Fascia clavipectoralis fest verbunden, was ein Kollabieren dieser großen Vene unmöglich macht. Ab dem Erreichen der ersten Rippe heißt die V. axillaris dann V. subclavia bis sie - vor dem M. scalenus anterior vorbeiziehend - auf die von cranial kommende V. iugularis interna trifft und sich mit ihr im Venenwinkel zur V. brachiocephalica vereint. Die V. subclavia ist dort, wo sie über die erste Rippe zieht, mittels Bindegewebe mit ihren Nachbarstrukturen fest verbunden, was dabei hilft, die Vene bei dem großen Sog des Herzens offenzuhalten. Ein Heben des Schlüsselbeines dilatiert die Vene, ein Senken komprimiert sie (siehe Abbildung 30). ([Benninghoff, 2004](#); [Nüllen et al., 2014](#))

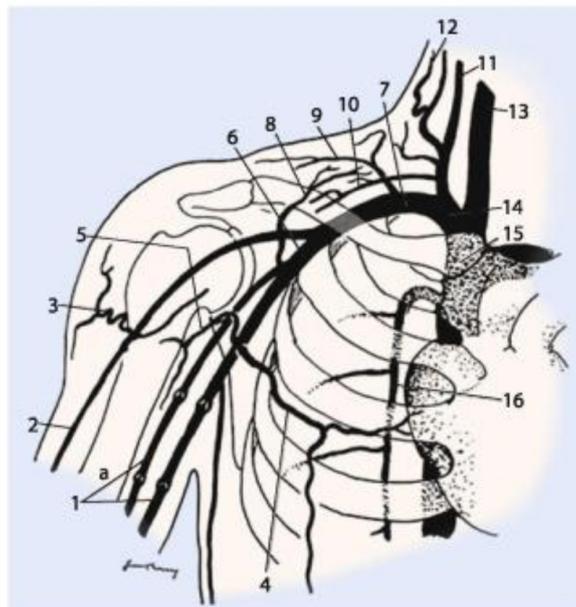


Abbildung 30: Venen des Schultergürtels und Oberarmes samt ihrer Kollateralen. **1)** V. basilica, **1a)** V. brachialis, **2)** V. cephalica, **3)** V. circumflexa humeri, **4)** V. thoracalis ventralis, **5)** V. circumflexa scapulae, **6)** V. axillaris, **7)** V. subclavia, **8)** V. transversa scapulae, **9)** V. transversa colli, **10)** V. suprascapularis, **11)** V. iugularis externa, **12)** V. cervicalis superficialis, **13)** V. iugularis interna, **14)** V. brachiocephalica dextra, **15)** V. cava superior, **16)** V. azygos. (Aus [Rieger and Schoop \(1998\)](#); [Nüllen et al. \(2014\)](#))

1.5 Feinbau des Gefäßsystems

Die dickwandigen **Arterien** führen vom Herzen weg und verzweigen sich immer mehr, wobei sie immer enger werden. Sie sind das Hochdruckgefäßsystem des Körpers und führen das nähr- und sauerstoffreiche Blut bis in die Kapillaren, die ein untereinander anastomosierendes Netzwerk bilden und das sie umgebende Gewebe versorgen.

Venen sammeln das nähr- und sauerstoffarme Blut aus den Kapillaren, fließen zu immer weniger Gefäßen zusammen und nehmen in ihrem Verlauf an Durchmesser zu. Ihre Gefäßwände sind im Vergleich zu den Arterien dünn - sie bilden das Niederdruckgefäßsystem (siehe Abbildung 31).

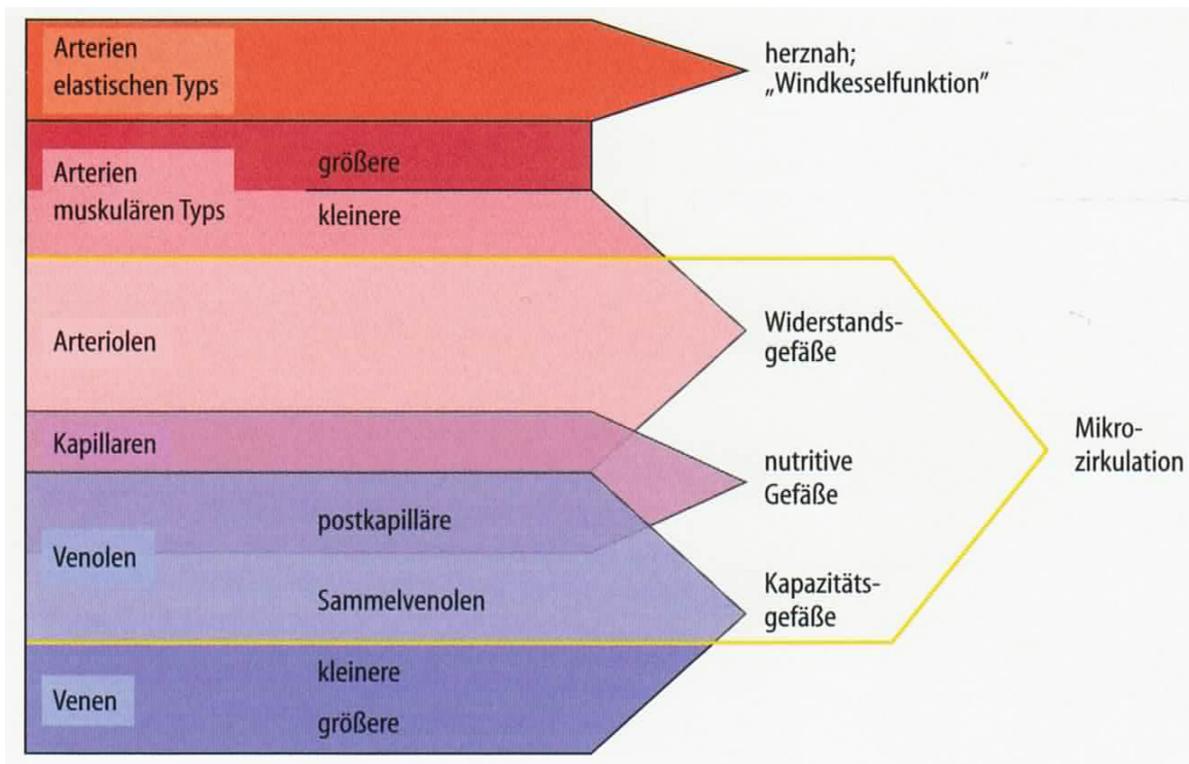


Abbildung 31: Überblick über die unterschiedlichen Gefäßtypen des Körpers gruppiert nach funktionellen Gesichtspunkten. (Aus *Junqueira (2005)*)

1.5.1 Histologie der Arterien und Venen

Alle Gefäße, mit Ausnahme der dünnwandigsten wie Venolen und Arteriolen, haben grundsätzlich denselben systematischen Aufbau. Der Aufbau variiert funktionsbedingt, je nachdem ob es sich um eine Vene oder Arterie handelt und ob der Durchmesser größer oder kleiner ist oder ob es sich um ein herznahes oder herzfernes Gefäß handelt. (*Junqueira, 2005*)

In der Regel haben alle Gefäße folgenden Wandaufbau (siehe auch Abbildung 32):

- ▷ Eine **Tunica intima** bzw. **Endothel** aus einem einschichtigen Plattenepithel (bildet die Grenzschicht zum Blut).
- ▷ Das **Stratum subendotheliale** enthält lockeres Bindegewebe mit Fibroblasten, Abwehrzellen und u.U. auch in Gefäßrichtung ausgerichtete glatte Muskelzellen.
- ▷ Die **Membrana elastica interna** besteht aus elastischen Fasern, die zu einer gefensterten Schicht verdichtet sind. Sie ist besonders bei Arterien vom muskulären Typ sehr ausgeprägt. Im histologischen Schnitt erscheint sie wegen der Schrumpfung der Arterie beim Präparieren gewellt.
- ▷ Die **Tunica media** besteht aus hauptsächlich zirkulär angeordneten glatten Muskelzellen. In eine Proteoglycanmatrix eingelagert finden sich dazwischen elastische sowie kollagene Fasern.
- ▷ In großen Arterien gibt es auch eine **Tunica elastica externa**, die die Grenze zur Tunica adventitia bildet.
- ▷ Die **Tunica adventitia** besteht aus lockerem Bindegewebe mit vielen elastischen Fasern. Das lockere Bindegewebe der Tunica geht direkt in das bindegewebige Stroma des Organs über.

(Aus [Junqueira \(2005\)](#))

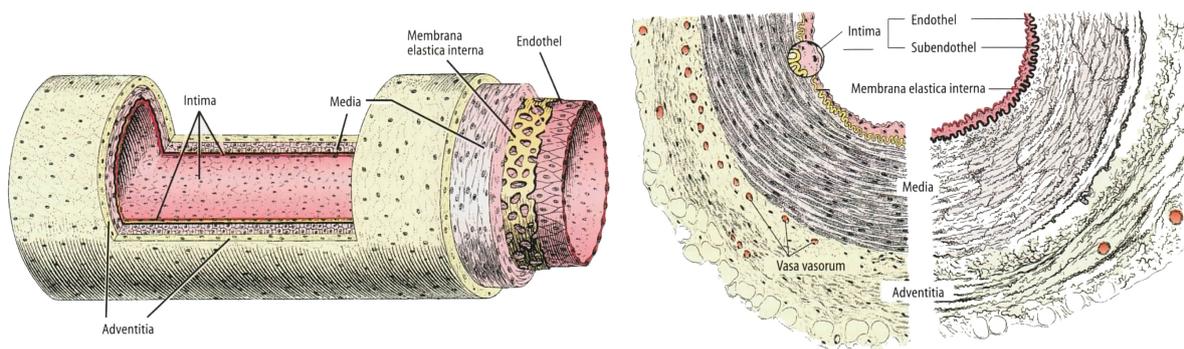


Abbildung 32: Darstellung der unterschiedlichen Gefäßschichten in einer Zeichnung eines Gewebeschnittes. (Aus [Junqueira \(2005\)](#))

Vasa vasorum sind die Versorgungsgefäße der großen Gefäße. Ihre Wandstärke ist schon zu groß (2 mm bei der Aorta bzw. 1,5 mm bei den Hohlvenen), um sie durch Diffusion mit ausreichend Nährstoffen und Sauerstoff zu versorgen. Die Vasa vasorum bilden in der Adventitia, insbesondere bei den Venen, ein dichtes Kapillarnetz. ([Junqueira, 2005](#))

1.5.2 Arterien

Es gibt drei unterschiedliche Arten von Arterien:

- ▷ **Arterien vom elastischen Typ:** Große, herznahe Arterien mit einem hohen Anteil an elastischen Fasern in der Media.
- ▷ **Arterien vom muskulären Typ:** Das sind die organversorgenden großen Arterien sowie mittelgroße und kleine Arterien.
- ▷ Die **Arteriolen**

(Aus [Junqueira \(2005\)](#))

Arterien vom elastischen Typ

Zu diesem Typ gehören die Aorta und ihre Hauptäste. Ihre Intima ist normalerweise dicker als bei den Arterien vom muskulären Typ, was auf das mächtigere Stratum subendotheliale zurückzuführen ist. Die retikulären Fasern liegen großteils in Richtung des Gefäßverlaufes. Die Membrana elastica interna kann oft nicht identifiziert werden, weil die elastischen Lamellen der Media sehr ähnlich aussehen. Die Media besteht schichtenweise aus ihren gefensterten elastischen Lamellen und zumeist zirkulär angeordneten glatten Muskelzellen (siehe Abbildung 33). Beim Erwachsenen hat eine Aorta etwa 70 solcher Schichten. Die nur schwach entwickelte Adventitia enthält die Vasa vasorum, Nerven und kollagene Fasern. ([Junqueira, 2005](#))

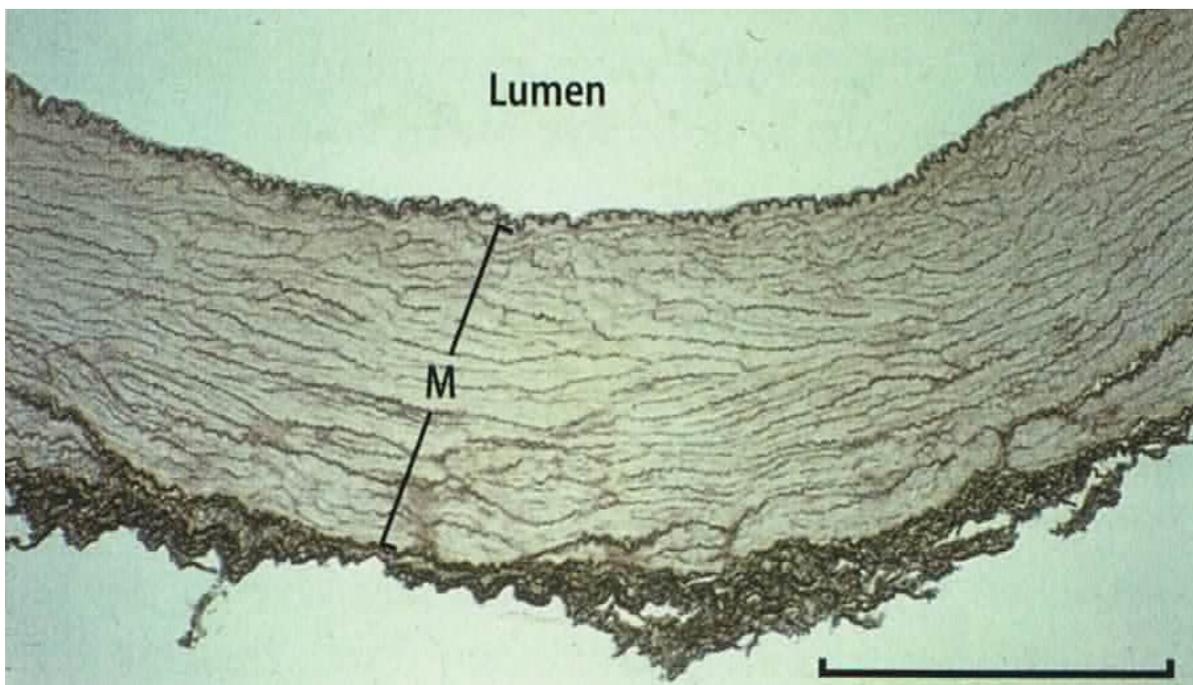


Abbildung 33: Arterie vom elastischen Typ - Gewebeschnitt einer menschlichen A. subclavia. Mit "M" ist die Tunica media markiert, die durch die gleichmäßige Verteilung der dunkel angefärbten elastischen Lamellen charakterisiert ist. Dazwischen liegen Fibroblasten und glatte Muskelzellen, die durch die Elastikafärbung in diesem Präparat nicht erkennbar sind. Die Adventitia fehlt großteils. Balken = 1 mm (Aus [Junqueira \(2005\)](#))

Die Funktion der Arterien vom elastischen Typ entspricht einer sogenannten **“Windkessel-Funktion”**. Ihre Aufgabe ist es, den stoßweise vom Herzen produzierten Blutstrom in einen, zwar noch immer pulsierenden, aber kontinuierlichen Blutstrom umzuformen. Die glatten Muskelzellen, die an den elastischen Fasern der Media inserieren, regulieren weniger aktiv die Dehnungsweite als die passive Dehnungsfähigkeit dieser “Windkesselgefäße”. (Junqueira, 2005)

Arterien vom muskulären Typ

Die Arterien vom muskulären Typ zeigen den dreischichtigen Wandbau am deutlichsten. Die Media ist am stärksten ausgeprägt und besteht aus bis zu 40 Schichten glatter Myozyten und elastischer Lamellen und Fasern (siehe Abbildung 34). Die elastischen Bestandteile treten mit abnehmendem Kaliber des Gefäßes zurück. Weiters findet man in der Media retikuläre Fasern und vereinzelt Fibroblasten.

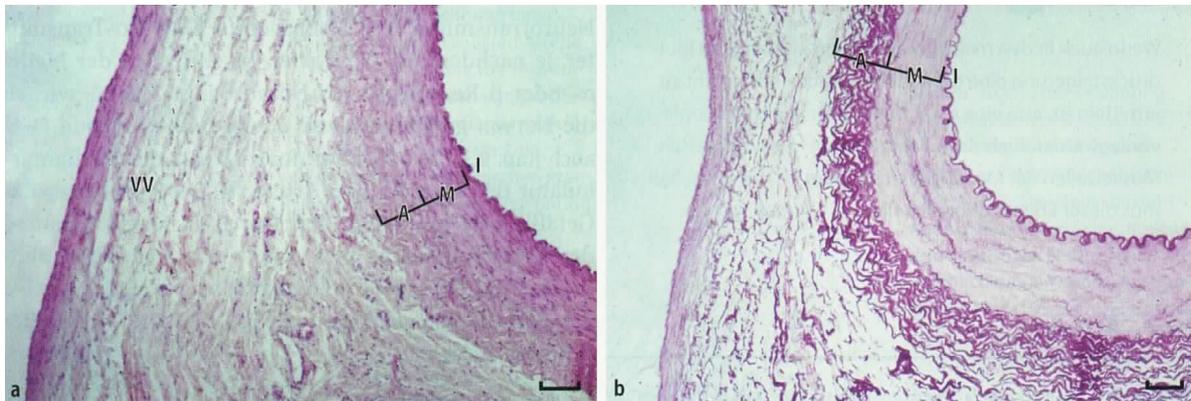


Abbildung 34: Arterie vom muskulären Typ - Gewebeschnitt einer A. femoralis eines Pavians. **a)** A. und V. femoralis in HE-Färbung. **Rechts** die Arterie zeigt dreischichtigen Aufbau. Adventitia (A) und Media (M) sind etwa gleich dick. Von der Intima (I) erkennt man nur die Endothelzellen. **Links:** V. femoralis mit vergleichsweise dünnem Wandbau. Keine Dreischichtung erkennbar. Die “VV” markieren die zahlreichen Vasa vasorum in der Adventitia der Venen. **b)** In der Elastikafärbung ist die Gliederung der Arterienwand besonders gut sichtbar. In der Venenwand ist lediglich in der Adventitia und Intima elastisches Material erkennbar. Balken a/b = 100 µm (Aus Junqueira (2005))

Die Media ist gegenüber der Intima und der Adventitia durch eine deutliche Lamina elastica interna bzw. externa abgrenzbar. Kleinere Arterien des muskulären Typs zeichnen sich durch das Fehlen der Vasa vasorum und des Stratum subendotheliale der Tunica intima aus. (Junqueira, 2005)

Die großen Arterien des muskulären Typs steuern durch Kontraktion und Relaxation der glatten Muskulatur in der Media den Blutzufluss zu den Organen. Es genügen bereits geringgradige Veränderungen des Gefäßlumens, um deutliche Veränderungen des Blutflusses zu den Organen zu bewirken. (Junqueira, 2005)

Auf eine Ausführung zu den **Arteriolen** wird verzichtet, da sie für die vorliegende Arbeit irrelevant sind.

Mischtypen

Die A. subclavia ändert sich bis hin zur A. axillaris in ihrem Wandbau kontinuierlich von einer Arterie des elastischen Typs zu einer Arterie des muskulären Typs. (Junqueira, 2005)

Bei den Mischtypen handelt es sich meist um einen Übergang der Tunica media, bei dem die Innenzone der Media dem muskulären Typ und die Außenzone der Media dem elastischen Typ entspricht. Aber es kommen auch unregelmäßige Vermischungen der Bauarten vor. Gemäß Darstellung im "Benninghoff", 16. Auflage, Band 2 aus dem Jahr 2004, dürfte der Übergang der A. subclavia in etwa beim Durchtritt durch die Scalenuslücke liegen (siehe Abbildung 35).

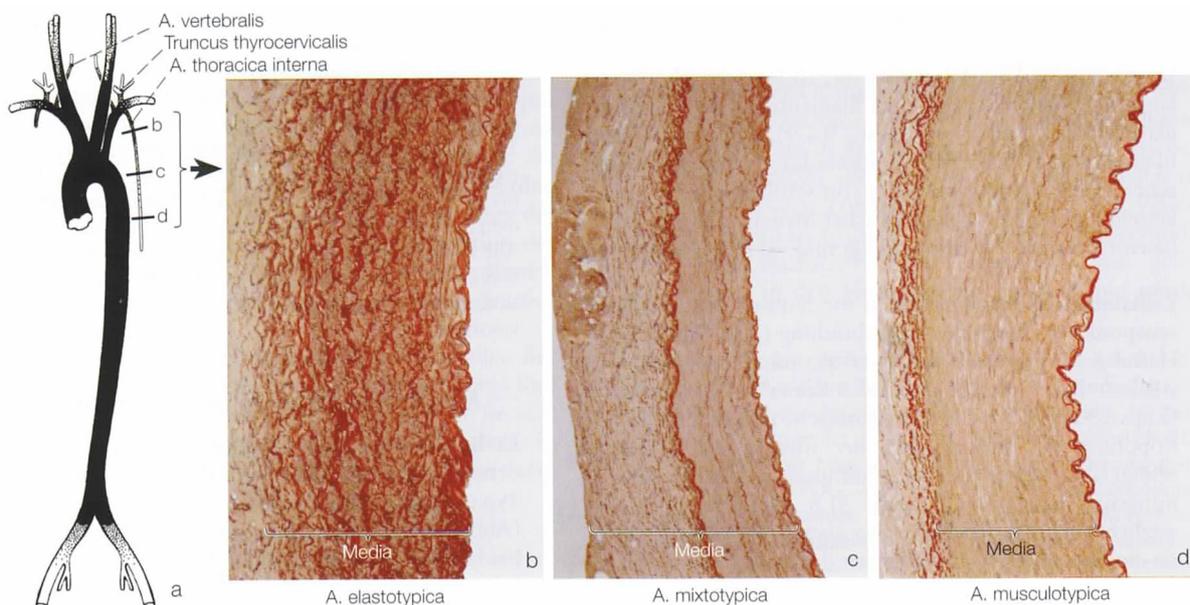


Abbildung 35: Übergangsform von einer Arterie des elastischen Typs zu einer Arterie des muskulären Typs - Gewebeschnitt einer menschlichen A. thoracica interna. **a)** Übersicht über die Arterien vom elastischen Typ (schwarz). **b)** Proximaler Abschnitt (elastischer Typ). **c)** Mittlerer Abschnitt (Mischtyp). **d)** Distaler Abschnitt (muskulärer Typ). Resorcin-Fuchsin-Färbung. Vergr. 200-fach. (Aus Benninghoff (2004))

1.5.3 Venen

In den Venen fließt das Blut aus dem Kapillargebiet zum Herzen zurück. Ein postkapilärer Druck von 15 mmHg reicht wegen ihre großen Gesamtquerschnittes aus, um dies zu bewerkstelligen. Die Gefäße des venösen Systems werden auch als **Kapazitätsgefäße** bezeichnet, weil sie etwa 80% des im Körper vorhandenen Blutvolumens fassen. (Junqueira, 2005)

Es gibt drei unterschiedliche Arten von Venen:

- ▷ Venolen
- ▷ Kleine und mittelgroße Venen
- ▷ Große Venen

(Aus [Junqueira \(2005\)](#))

Venolen

Gehen unmittelbar aus den Kapillaren hervor. Werden hier nicht näher behandelt.

Kleine und mittelgroße Venen

Haben ein Lumen von 0,5 bis 9 mm. Es findet sich in der Intima bereits ein dünnes Stratum subendotheliale. Die glatten Myozyten in der Media sind im Vergleich zu den Arterien nicht so deutlich konzentrisch orientiert und in ihrer Anzahl geringer. Der Rückstrom des Blutes aus dem Herzen wird in diesen Venen durch Venenklappen unterstützt (siehe Abbildung 36). ([Junqueira, 2005](#))



Abbildung 36: Querschnitt durch die Klappe einer Vene aus dem Funiculus spermaticus. Die Klappe ist auf beiden Seiten mit Endothel bedeckt und enthält dazwischen kaum subendotheliales Bindegewebe. Typisch für Venen der unteren Körperpartie ist eine relativ dicke Media mit glatten Muskelfasern (Pfeil und Pfeilspitzen). Der leere Pfeil kennzeichnet ein Vas vasorum. Färbung: HE, Balken = 100 μm (Aus [Junqueira \(2005\)](#))

Große Venen

Große Venen haben eine ausgeprägte Intima und eine schmale Media mit wenigen Schichten von glatten Muskelzellen und reichlich kollagenen Fasern. Die Anzahl und Ausrichtung der glatten Myozyten in den großen und mittleren Venen ist sehr stark vom hydrostatischen Druck abhängig. In den Sinus im Schädel finden sich bei negativem hydrostatischen Druck in den Venen kaum glatte Muskelzellen. In der Media einer Unterschenkelvene aber sehr wohl. Die Dicke der Media großer Venen kann hier mit der Dicke der Media von mittelgroßen Arterien mithalten, wenngleich der strikte dreischichtige Wandbau wie bei den Arterien nicht erreicht wird. Die glatte Muskulatur ist bei den großen Venen auch längs ausgerichtet anstatt wie bei den Arterien zirkulär. Man findet glatte Längsmuskelfasern auch in der Adventitia (siehe Abbildung 37). (Junqueira, 2005)

Die Kontraktion der Mediamuskulatur dient in den Venen nicht zur Steuerung des Blutdurchflusses wie bei den Arterien, sie dient vielmehr der Regulierung der Dehnbarkeit der Venenwand durch Tonisierung der Mediamuskeln. (Junqueira, 2005)

1.5.4 Periphere Leitungsbahnen

Die peripheren Leitungsbahnen bestehen aus Nerven und Blutgefäßen und bilden die Verbindung zwischen den zentralen Gefäß- und Nervenstrukturen bis zu den Zielorganen. Sie sind in Bündeln (Arterie, Vene und Nerv) organisiert, die oft von einer gemeinsamen Gefäß-Nerven-Scheide, der sogenannten **Vagina vasorum**, umgeben sind. Diese umgebende Bindegewebsscheide steht mit dem sie umgebenden Bindegewebe verschieblich in Verbindung. Die so entstehenden **“Kabelstränge”** oder auch **“Gefäß-Nerven-Straßen”** sind durch Einlagerung z.B. in Faszienrisse, Knochenkanäle, einem umgebenden Fettkörper o.ä. gegen mechanische Einwirkungen aus der Umwelt geschützt. (Rauber/Kopsch, 1998b)

1.6 Verletzungen großer Gefäße

Bei einer Verletzung von großen Gefäßen kann es zur Selbsttamponade der verletzten Stelle kommen. Querdurchtrennte Arterien des muskulären Typs haben die Fähigkeit, sich an der Stelle der Durchtrennung einzustülpen. Die geschieht aufgrund der unterschiedlichen Elastizität der Arterienwandbestandteile, die sich in unterschiedlichem Ausmaß retrahieren. Am stärksten zieht sich die Intima bzw. Lamina elastica interna zurück. Durch die Verbindung mit der Lamina elastica externa werden die übrigen Schichten ebenfalls in Richtung des offenen Lumens gezogen (siehe Abbildung 38). Dieser Invaginationsvorgang kann durch die Unterstützung der glatten Muskulatur verstärkt werden. Die Elastizität der Arterienwandschichten bleibt sogar post mortem erhalten, sodass es auch möglich ist, eine falsch positive Invagination zu diagnostizieren. Der Erscheinungsbild der Einstülpungsstelle ist direkt abhängig vom Einstülpungsvorgang selbst sowie vom Winkel, in dem das Messer zur Verlaufsachse des Gefäßes geführt wurde. (Benninghoff, 1930; Mayersbach, 1956; Lang and Nordwing, 1966; Benninghoff, 2004)



Abbildung 37: Schnitt durch die Wand einer menschlichen *V. cava inferior*. Auffallend sind die hier längs getroffenen Muskelfasern subendothelial in der Intima. Darunter befindet sich ein breiter Streifen grünlich gefärbten kollagenen Bindegewebes mit elastischen Anteilen. In der mächtigen Media finden sich viele längsverlaufende (hier quer getroffene) glatte Muskelfasern. Die Pfeile zeigen auf große Vasa vasorum im Außenbereich der Media. Färbung: Resorcin-Fuchsin / Azolarmin-Naphtholgrün, Balken = 100 μ m (Aus [Junqueira \(2005\)](#))

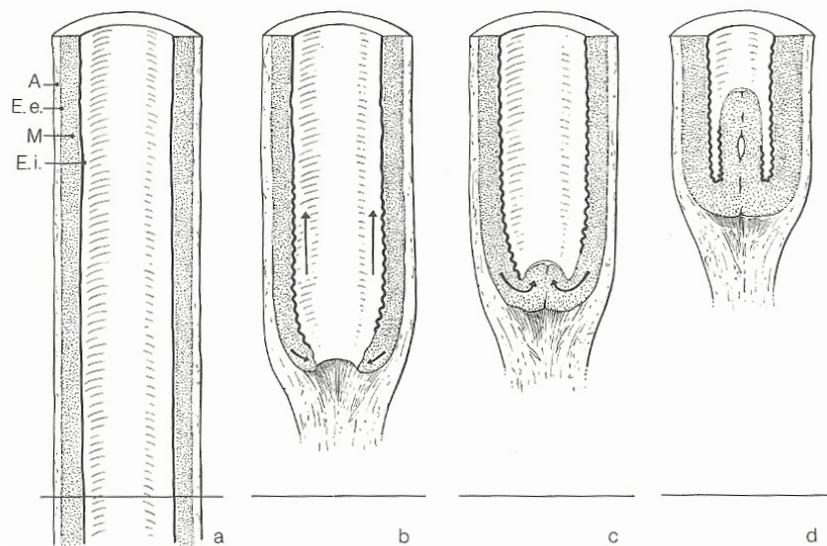


Abbildung 38: Selbsttamponade durch Invagination bei einer Arterie vom muskulären Typ kann zu spontaner Hämostase (Blutstillung) führen. **a)** Der Strich markiert die Stelle, an der die Arterie durchtrennt wurde. **b)** Beginnende Retraktion und Kontraktion des Schnittendes. Pfeile zeigen in Schrumpfrichtung der Lamina elastica interna. **c)** Ein Pfropf bestehend aus Gefäßmuskulatur liegt bereits in der Öffnung des Gefäßes. **d)** Das Invaginat wird durch die Kontraktion der umgebenden Mediamuskulatur im Lumen gehalten und das Gefäß dadurch fest verschlossen. (Aus [Benninghoff \(2004\)](#))

1.6.1 Klassifikation der Gefäßverletzungen

Es gibt scharfe und stumpfe Gefäßverletzungen, die durch direkte oder indirekte Gewaltwirkung entstehen. In der vorliegenden Arbeit sind nur die scharfen Gefäßverletzungen von Interesse, da es eine äußerliche Wunde gibt und die Wandschichten der Gefäße möglicherweise von außen nach innen durchtrennt werden. ([Jauch et al., 2013](#))

Die Einteilung der scharfen Gefäßverletzungen erfolgt in drei Schweregrade (siehe Abbildung 40):

- ▷ **Grad I:** Partielle Durchtrennung der Gefäßwand. Wenn Nerven mit verletzt wurden, können sensible und/oder motorische Ausfälle mit der Verletzung einhergehen. Die Ausbildung eines Aneurysma spurium (siehe Abbildung 39) ist möglich.
- ▷ **Grad II:** Alle drei Gefäßschichten werden bis ins Lumen durchtrennt, das Gefäß selbst bleibt aber als ein Teil bestehen. Blutungen nach außen oder ins Gewebe sind die Folge. Neuronale Schädigungen bei Nervenverletzungen sind möglich.
- ▷ **Grad III:** Das Gefäß wird vollständig durchtrennt. Die klinischen Symptome entsprechen einer Grad II-Läsion. Bei diesem Verletzungsgrad kann es zu einer spontanen Blutstillung durch Selbsttamponade der Arterie kommen. Damit einher geht eine maximale Aktivierung der Thrombogenese durch Freisetzung von Gerinnungsfaktoren aus der verletzen Arterienwand (siehe Abbildung 38 und 40).

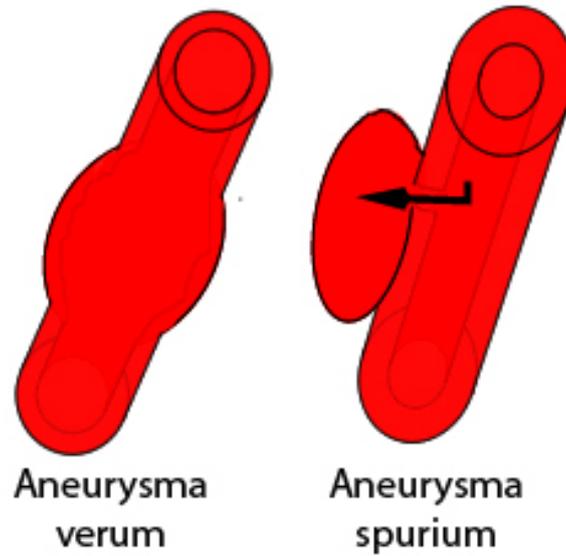
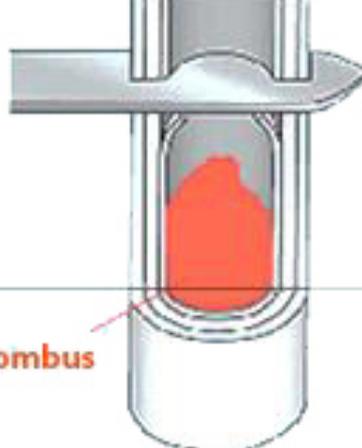


Abbildung 39: Aneurysma verum und Aneurysma spurium. Ein Aneurysma spurium entsteht im Gegensatz zum Aneurysma verum durch den Blutaustritt aus der Gefäßläsion in die perivaskuläre Umgebung unter Ausbildung eines Hämatoms. (Aus [Endspurt-Klinik \(2013\)](#))

(Aus [Jauch et al. \(2013\)](#))

		Äußere Blutung	Periphere Ischämie
I		(Ø)	(Ø)
II		+++	Ø-(+)
III		+++ (Ø)	+++

Thrombus

Abbildung 40: Einteilung von scharfen Gefäßverletzungen. (Aus [Jauch et al. \(2013\)](#))

1.6.2 Klinische Zeichen einer Gefäßverletzung

Je nach Art des Gefäßes und je nach Größe der Läsion zeigt sich das klinische Bild durch eine leichte Sickerblutung indirekt in das Gewebe oder eine massiv spritzende Blutung direkt nach außen. Ischämiezeichen an der betreffenden Extremität sind möglich. Bei großem Blutverlust aus dem systemischen Kreislauf (Hypovolämie) können Schockzeichen (hoher Puls und niedriger Blutdruck) entstehen. (Jauch et al., 2013)

1.6.3 Mögliche Komplikationen bei Verletzung der A. subclavia

Als Komplikationen bei einer Schuss- oder Stichverletzung der A. subclavia können Schock durch Blutverlust (hämorrhagischer Schock), eine Verletzung des Plexus brachialis und nachfolgende Lähmung seines Innervationsgebietes. Mortalitätsraten von 10% bis 35% sind beschrieben. (Myers et al., 1990; Pate et al., 1993; Wall et al., 1996; Feliciano, 1997; Pillai et al., 1997; Demetriades et al., 1999; Lakhotia et al., 2012)

1.6.4 Todesursachen bei Gefäßverletzungen

In erster Linie sind die Todesursachen bei Stichverletzungen **äußere und innere Verblutung**. Weitere mögliche Todesursachen sind **Luftembolie**, **perforierende Verletzungen lebenswichtiger Organe** (Herzbeutelamponade), **Ersticken durch Blutaspiration** sowie Behinderung der Atmung durch beidseitigen **Pneumothorax** oder einseitigen **Spannungspneumothorax**. (Hochmeister, 2007; Ludwig et al., 2010)

1.7 Gerichtsmedizinische Aspekte

1.7.1 Stichwunden

Wenn Stichwerkzeuge schräg oder gerade in den Körper eindringen verursachen sie Stichwunden. Die meisten Stichwunden werden mit Messern oder sich spitz verjüngenden Gegenständen beigebracht (Gabel, Schere, Schraubenzieher etc.). Eine Stichwunde durch ein Messer sieht mandelförmig aus und die Wundränder sind glatt. Lediglich das Heft des Messers kann an der Wunde Quetschungen oder Schürfungen hervorrufen, wenn die Klinge weit genug hineingestochen wurde (siehe Abbildung 41).

Bei Stichwunden gibt es in der Regel eine **Einstichöffnung**, einen **Stichkanal** und eine **Ausstichöffnung**, wenn das Stichwerkzeug lange genug war, um den Körper vollständig zu durchdringen. Werden Stiche durch platte Knochen geführt (z.B. Scapula), dann sind die Position von Messerrücken und -schneide deutlich erkennbar (siehe Abbildung 42).

Bei einem Stich mit einem spitzen, runden oder konischen Gegenstand entsteht normalerweise eine schlitzförmige Wunde, die in der Haut entlang der sogenannten Langer'schen Hautspaltlinien entsteht (siehe Abbildung 43 und 44). Ihre Form und ihr Verlauf sind durch die Spaltbarkeitsrichtung der Haut determiniert. (Hochmeister, 2007; Dettmeyer et al., 2013; Wegener et al., 2014)

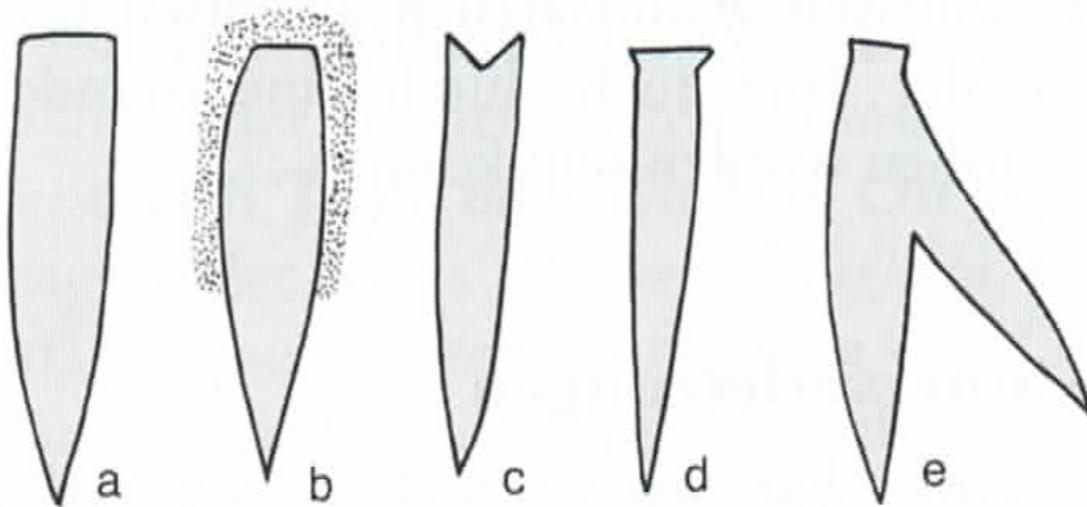


Abbildung 41: Muster von Stichwunden an der Einstichstelle: **a)** Stumpfe Form des Wundwinkels am Messerrücken, spitze Kontur an der Schneide des Messers. **b)** Abdruckverletzungen vom Heft des Messers in Form von Quetschungen oder Schürfungen. **c,d)** Kantige bzw. pfeilspitzenförmige Abformung der scharfen Rückenkante des Messers. Am spitz zulaufenden Wundwinkel befand sich eine Schneide. **e)** Schwalbenschwanzartige Wunde an der Seite der Schneide bei einer Drehung des Messers zwischen Ein- und Ausstich. (Aus Hochmeister (2007))

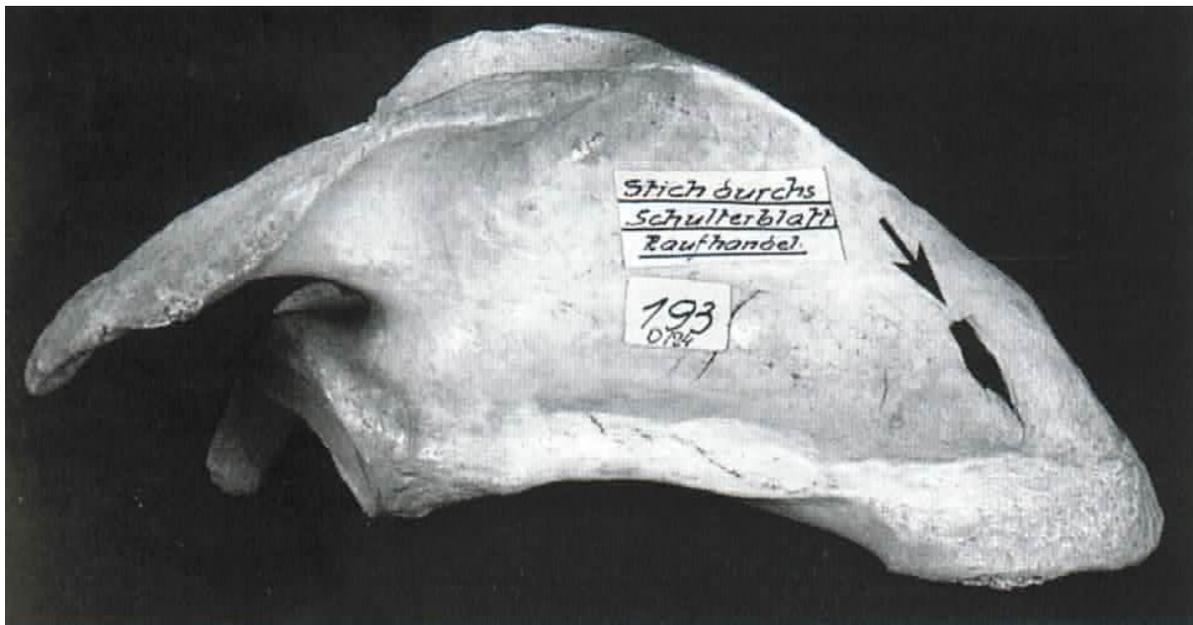


Abbildung 42: Muster einer Stichwunde im Schulterblatt. Die Position von Messerrücken (Pfeil) und Schneide des Stichwerkzeuges sind deutlich zu erkennen (Exponat aus dem Museum des Departments für Gerichtliche Medizin Wien). (Aus Hochmeister (2007))

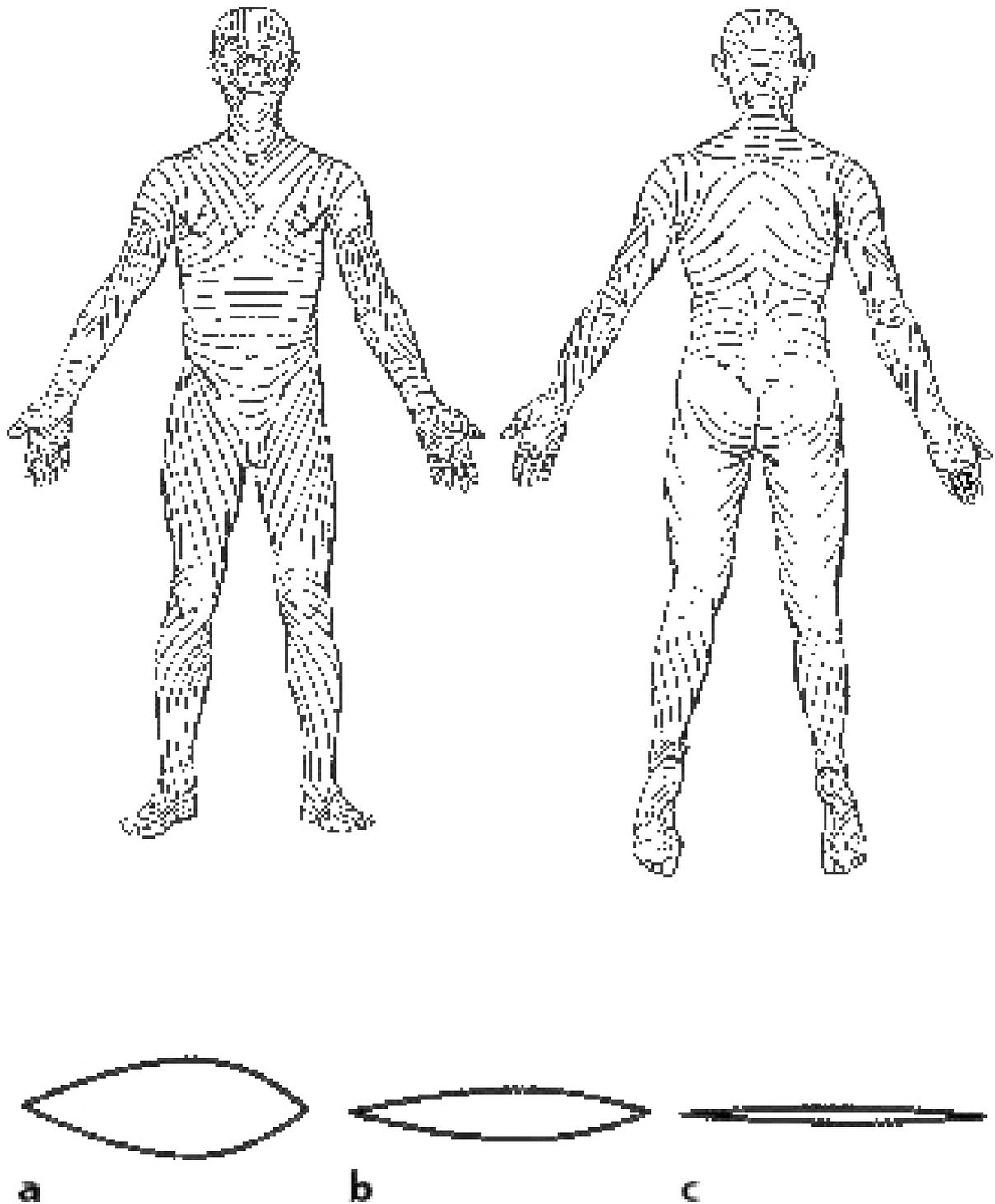


Abbildung 43: Verlauf der elastischen Fasern in der Haut, sog. Langer'sche Hautspaltlinien. Mit dem gleichen Stichwerkzeug beigebrachte Stichwunden, die mehr oder weniger klaffen, je nachdem, ob die Stichverletzung parallel **c)** oder quer **a)** zum Verlauf der elastischen Fasern liegt. (Aus [Wegener et al. \(2014\)](#))

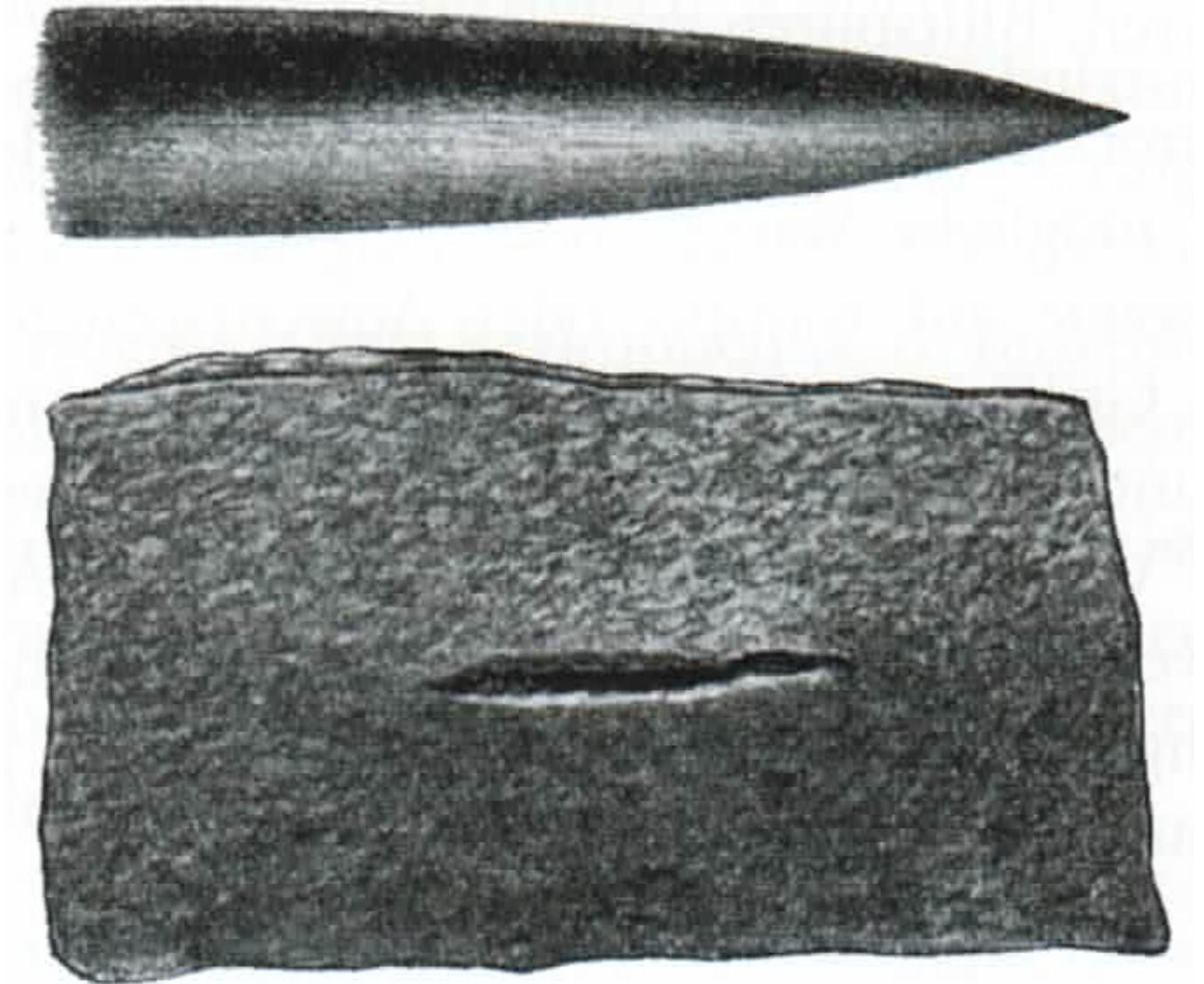


Abbildung 44: Schlitzförmige Wunde in der Spaltbarkeitsrichtung der Haut. Verursacht durch eine spitze Eisenstange. (Aus Hofmann (1927))

1.7.2 Stichkanal

Der **Stichkanal** lässt keinen sicheren Rückschluss auf die Klingenslänge zu. Durch die Elastizität des Gewebes kann die Einstichstelle kleiner sein als die Klinge. Wenn beim Stich eine Schnittbewegung dazukommt, ist die Einstichstelle größer als die Klinge. Auch bezüglich der Tiefe des Stichkanals kann es zu Fehleinschätzungen kommen. Durch die Verschieblichkeit von Gewebeschichten, dem sogenannten “**Kulisseneffekt**”, kann der Stichkanal plötzlich kürzer erscheinen, als er in Wirklichkeit ist, weil sich ein Muskel verschoben hat und mit seiner nicht penetrierten Stelle den Stichkanal versperrt. Stichverletzungen treten meist gemeinsam mit Schnittverletzungen auf. Beide tragen das hohe Risiko in sich, große Gefäße zu verletzen, was wiederum zum Tod durch Verbluten führen kann. (Hochmeister, 2007; Dettmeyer et al., 2013; Wegener et al., 2014)

1.7.3 Schusswunden

Der besseren Übersicht wegen werden hier nur Fakten beschrieben, die auch bei einer Schussverletzung durch Pfeil und Bogen relevant sind. Schussverletzungen durch Feuerwaffen sind für die vorliegende Arbeit irrelevant.

Bei Schussverletzungen sollten aus dem gegebenen Verletzungsmuster und dem Spurenbild Rückschlüsse auf die Art der Waffe und das Geschöß sowie Entfernung des Schützen und Schusswinkel gezogen werden können. (Hochmeister, 2007)

Penetrierende Gefäßtraumata sind zu 80% bis 90% bei arteriellen Gefäßen zu finden und treten stets mit einer Läsion der Venen der Umgebung auf. (Hupp and Allenberg, 1997)

Schussverletzungen haben im Vergleich zu Stichverletzungen eine schlechtere Prognose, weil durch die größere Energie beim Aufprall des Geschößes mittransportierte Verunreinigungen wie Erde, Blut und/oder Keime tief in die Wunde mittransportiert werden und anatomische Strukturen direkt zerstört und als Schrapnell mit in die Wunde beschleunigt werden können (z.B. Knochensplitter). (Hochmeister, 2007; Wegener et al., 2014)

Ein im Ziel auftreffender Pfeil wird an der Spitze gebremst, während der restliche Pfeil nach dem Trägheitsgesetz immer noch nach vorne drängt. Die Folge ist eine Durchbiegung des Schaftes, was eine Schüttelbewegung über den gesamten Pfeil folgen lässt. Die scharfe Spitze des Pfeiles setzt diese Bewegung in Schneide- und Stichbewegungen um, was im Ziel für zusätzlichen Gewebeschaden sorgt. Eine Drehbewegung aus dem Flug wird ebenso an das umgebende Gewebe übertragen. (Beiter, 1989)

In der Normalen auf den Schusskanal entsteht beim Eindringen des Geschößes eine Druckwelle (Gewebspulsation) mit gewebsschädigender Wirkung. Wobei hohe Geschößgeschwindigkeiten (>900 m/s) größere Gewebeschäden hervorrufen als niedrige (<300 m/s). (Hochmeister, 2007; Kneubuehl et al., 2008; Dettmeyer et al., 2014)

Heute in Verwendung befindliche Compound-Bögen schaffen eine Abschussgeschwindigkeit von 91,4 m/s. Es gibt Armbrüste, die Pfeile mit 121,9 m/s oder mehr abschießen. (Funk, 2010)

1.8 Virtuelle Anthropologie

Die frühen Anthropologen hatten nur die Möglichkeit ihre Funde an Ort und Stelle zu betrachten und auch nur ihre Außenseite, wenn sie sie nicht zerstören wollten. Eine Betrachtung aus der Ferne war nur mehr in Form von (zweidimensionalen) Zeichnungen oder später auch Fotografien bzw. im dreidimensionalen Raum als Oberflächenabtastung auch mittels Einsatz von Microscribe[®] möglich. Durch die moderne Computertechnologie, die seit den 1990er Jahren eingesetzt wird, ist es plötzlich möglich geworden, in einen Körper hineinzusehen, ohne ihn eröffnen und damit gleichzeitig destruktiv auf ihn einwirken zu müssen (Weber (2014)). Es lassen sich heute durch Röntgen-, Ultraschall-, CT- oder MR-Aufnahmen zwei- oder dreidimensionale Bilder vom Inneren eines Organismus oder auch von Objekten wissenschaftlichen Interesses erstellen und auf mannigfaltige Art be- und

verarbeiten. So ist es heute theoretisch jedem Menschen ganz leicht möglich, einen CT-Datensatz so nachzubearbeiten, dass z. B. ein Skelett als 3D-Datensatz exportiert und auf einem 3D-Drucker als Modell “ausgedruckt” wird. Die Virtuelle Anthropologie ermöglicht dem interessierten Laien in Kombination mit dem Internet, an aktuellen neuen Erkenntnissen der Forschung teilzuhaben, indem dreidimensionale Modelle mit entsprechenden Werkzeugen (Viewern) elektronisch publiziert und rezipiert werden können (Weber et al., 2011).

1.8.1 Landmarks

Punkte, die die geometrische Information beinhalten, sind die sogenannten “Landmarks” bzw. “Semi-Landmarks”. **Landmarks** sind Punkte, die auf eindeutig definierten anatomischen Strukturen liegen und bei allen in der Studie verwendeten Individuen als ein und derselbe Punkt identifizierbar sind (z.B. die Spitze des Dens axis oder der vordere Ansatz der Flosse bei den Fischen). Landmarks werden aufgrund dieser Eigenschaft auch als “**homologe Punkte**” bezeichnet. Gerade diese sind aber bei Individuen oder Teilen davon oft nur spärlich vorhanden und man würde viel Information nicht in die Untersuchung mit einfließen lassen, ließe man die Form des untersuchten Objektes selbst außer Acht.

Die Kennzeichnung von Strukturen mit sog. **Semi-Landmarks** zwischen zwei Landmarks ergibt in der Regel eine Kurvenform. Diese Semi-Landmarks befinden sich normalerweise nicht auf anatomisch definierten Orten. Trifft man die Entscheidung, Semi-Landmarks einzusetzen, dann muss man auch darüber nachdenken, wie man diese Semi-Landmarks mathematisch zusammenfasst. Da sie ja nicht auf definierten Punkten liegen, ist ihre örtliche Definition per se nicht aussagekräftig und oft auch nur in einer Gruppierung als Kurvenform beurteilbar (Bookstein, 1986, 1996; Slice, 2007; Zelditch et al., 2012).

Kriterien für die Auswahl von Landmarks

Im Idealfall sind Landmarks

- ▷ homologe anatomische Strukturen,
- ▷ ausreichend und
- ▷ verlässlich vorhanden.

(Aus Zelditch et al. (2012))

Heute werden in der Morphometrie sechs unterschiedliche Typen von Landmarks unterschieden (Bookstein, 2003; Bookstein et al., 2004; Bookstein, 1997) (siehe Tabelle 3).

Landmarks dürfen ihre Position relativ zueinander nicht wechseln und müssen (bei 2D-Landmarks) sich in der selben Ebene befinden. Problematisch wird es, wenn 2D-Landmarks nicht koplanar sind. Diese Situation ergibt sich, wenn dreidimensionale Strukturen für eine Reihenuntersuchung zweidimensional abgebildet werden (z.B. Foto). Eine leichte Veränderung der Abbildungsebene, wenn das Objekt etwa nur leicht verkippt dargestellt wird, wird das Resultat beeinflussen. Hier empfiehlt sich die Verwendung von dreidimensionalen Daten oder zumindest eine stark standardisierte Datengewinnung (Zelditch et al., 2012).

Tabelle 3: Unterschiedliche Typen von Landmarks.

Typ 1	Landmark	Biologisch homologe Landmarks. Sie werden an definierten Gewebegrenzen gesetzt oder an Punkten, wo sich mehrere anatomische Strukturen treffen (z.B. Pupille).
Typ 2	Semilandmark	Maxima von Kurven oder Morphologien (z.B. maximale Krümmung eines Zahnrandes).
Typ 3	Semilandmark	Wird aufgrund unterschiedlicher Informationen von Kurven gewonnen (z.B. an deren Schnittpunkt).
Typ 4	Semilandmark	Semilandmarks auf Kurven von Strukturen wie z.B. entlang der Mundform auf einem Foto.
Typ 5	Semilandmark	Semilandmarks auf Oberflächen.
Typ 6	Semilandmark	Konstruierte Landmarks.

Typ 5 und 6 beziehen sich auf dreidimensionale Daten.

Nach [Bookstein et al. \(2004\)](#).

1.8.2 Procrustes Shape Distance

“Shape variable - any geometric measure of an object that is invariant to the location, scale and orientation of the object.” (Aus [Slice \(2007\)](#))

Procrustes shape distance: Die Gestalt (shape) eines Objekts kann durch Operatoren bearbeitet werden, die sich bei ihrer Anwendung neutral zur Gestalt, der “shape”, verhalten. Es sind dies: Translation (Verschieben), Rotation (Drehung) und Skalierung (Vergrößerung bzw. Verkleinerung). In [Abbildung 45](#) werden diese drei Operatoren auf ein Dreieck angewendet, um eine Transformation auf die “shape-coordinates” umzusetzen. Dabei bleibt die Form des Dreiecks unverändert.

Zuerst wurde das Dreieck verschoben, um Landmark A in den 0-Punkt zu bringen A(0,0) (siehe [Abbildung 45\(A\)](#)). Anschließend wurde es so rotiert, dass die Strecke A-B auf der X-Achse zu liegen kommt (siehe [Abbildung 45\(B\)](#)). In der [Abbildung 45\(C\)](#) wird das Dreieck verkleinert (skaliert), um Landmark B auf die Länge “1” zu bekommen (B(1,0)). Diese drei Operatoren braucht man, um die Koordinaten von Landmark C zu errechnen. A_x , A_y , B_x , B_y , C_x und C_y sind die ursprünglichen Koordinaten. SC_x und SC_y sind die “**Bookstein-shape-coordinates**” von Landmark C im neuen Koordinatensystem, also C(x,y).

Die Koordinaten des Landmark C werden berechnet nach folgender Formel:

$$SC_x = \frac{(B_x - A_x)(C_x - A_x) + (B_y - A_y)(C_y - A_y)}{(B_x - A_x)^2 + (B_y - A_y)^2}$$

$$SC_y = \frac{(B_x - A_x)(C_y - A_y) - (B_y - A_y)(C_x - A_x)}{(B_x - A_x)^2 + (B_y - A_y)^2}$$

(Aus [Zelditch et al. \(2012\)](#))

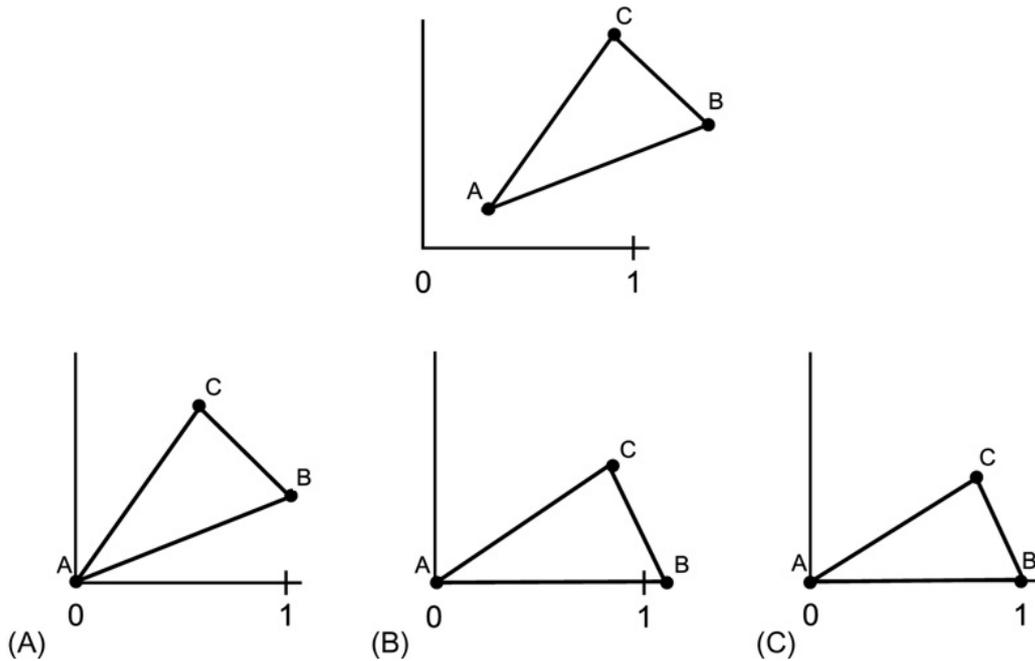


Abbildung 45: Operatoren, die die Gestalt nicht verändern (A) Translation, (B) Rotation und (C) Skalieren. (Aus [Zelditch et al. \(2012\)](#))

Centroid-Size

“Size measure - any positive, real-valued measure of an object that scales as a positive power of the geometric scale of the form.” (Aus [Slice \(2007\)](#))

Bisher wurde nur die Informationsdimension der Gestalt behandelt. Die Information der Größe ging dabei verloren. Eine Veränderung der Größe bedingt keine Veränderung der Gestalt ([Bookstein, 2003](#)). Dargestellt ist dies in [Abbildung 46](#). Vom Mittelpunkt der Struktur aus kann jede Landmark-Koordinate im Verhältnis ihrer ursprünglichen Entfernung von der Mitte weg oder zu ihr hin bewegt werden, ohne die Proportionen der Gestalt der Struktur zu verändern.

Die “centroid-size” ist die eine Messgröße, die **mathematisch** von der Gestalt unabhängig ist. Präziser ausgedrückt steht sie - per Definition - rechtwinkelig zur Gestalt (“shape”). In der Biologie wird sie dennoch oft mit der Gestalt korreliert, da größere Organismen oft anders aussehen, wie kleinere ([Zelditch et al., 2012](#)).

Die Centroid-Size wird errechnet aus der Quadratwurzel aus der Summe der quadrierten Abstände (“squared distances”) der einzelnen Landmarks vom Schwerpunkt (“centroid”). Um die “centroid-size” zu berechnen, muss man also zuerst den Schwerpunkt bestimmen. Der Schwerpunkt liegt im arithmetischen Mittel aller X- und Y-Koordinaten der Landmarks der zu untersuchenden Struktur. Danach berechnet man das Abstandsquadrat (“squared distance”) jedes einzelnen Landmarks vom Schwerpunkt nach der Formel $(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2$. Das Ergebnis ist ein Maß von Größe bezogen auf die Fläche. Die Quadratwurzel aus diesem Wert ergibt den entsprechenden linearen Wert ([Zelditch et al., 2012](#)).

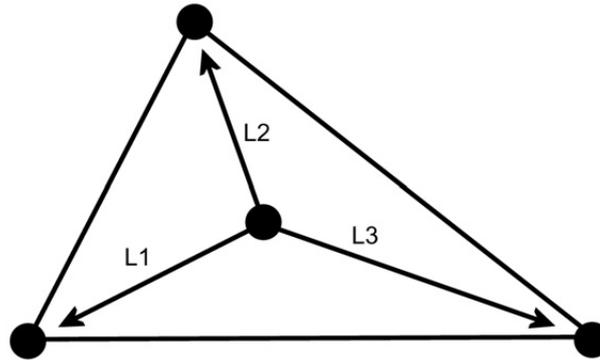


Abbildung 46: Centroid-Size als Größeninformation aus der Veränderung der Position jeder Landmark-Koordinate vom Mittelpunkt aus gesehen. (Aus [Zelditch et al. \(2012\)](#))

Größe wird unabhängig von der Gestalt gemessen und ist ebenso unabhängig von der Geometrie einer Struktur. Die Dimension der Größe ist im Normalfall auch unkorreliert von den Koordinaten der Landmarks und den Abständen zwischen den Semi-Landmarks, außer Größe und Geometrie verändern sich gemeinsam wie im Fall von Allometrie ([Mitteroecker et al., 2007](#)), dem “Vorausseilen bzw. Zurückbleiben des Wachstums von Gliedmaßen etc. gegenüber dem Wachstum des übrigen Organismus” ([Langenscheidt, 2017](#)).

“Bookstein Shape-Coordinates” im 3D-Raum

Die Berechnung der Shape-Coordinates in 3D erfordert eine Erweiterung des 2D-Algorithmus. Sie ist um einiges komplexer, da die Struktur um die X-, Y- und Z-Achse rotieren kann (siehe [Abbildung 47](#) und [48](#)). Die Berechnung der freien Koordinaten setzt eine Drehung (im Uhrzeigersinn) um die drei Raumachsen im Ausmaß der Winkel ϕ , ω und θ voraus. Hier die zugehörigen Rotationsmatrizen:

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \omega & 0 & \sin \omega \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \omega & 0 & \cos \omega \end{bmatrix}$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Abbildung 47: Rotationsmatrizen für 3D-shape-coordinates. R_x , R_y und R_z sind die errechneten Shape-Coordinates im 3D-Raum. (Aus [Dryden and Mardia \(1998\)](#); [Claude \(2008\)](#); [Zelditch et al. \(2012\)](#))

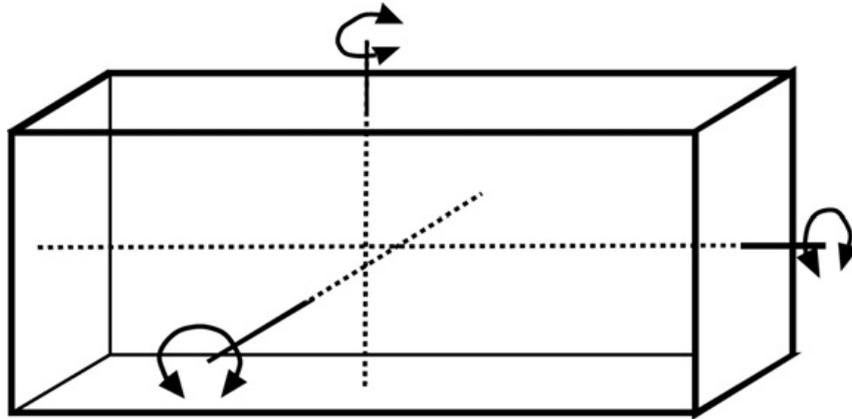


Abbildung 48: Centroid-Size als Größeninformation aus der Veränderung der Position jeder Landmark-Koordinate vom Mittelpunkt aus gesehen. (Aus [Zelditch et al. \(2012\)](#))

1.8.3 Registrierung von Volumendatensätzen

In klinischen und naturwissenschaftlichen Problemstellungen ist es oftmals notwendig, 2 oder mehr Bilder (Fotos, Röntgen etc.) bzw. Volumendatensätze (CT, MRI, etc.) zu vergleichen und somit zu registrieren. Die dabei verwendeten Methoden zur Registrierung werden klar unterschieden in “starre” oder “affine” und “elastische” bzw. “non-affine” ([Holden, 2008](#)).

Affine Registrierung

In der Geometrie wird als affine (=“verbunden mit”) Transformation eine Funktion bezeichnet, die zwischen affinen Räumen Punkte, Geraden und Ebenen erhält. Parallele Linien bleiben auch nach der Transformation parallel. Eine affine Transformation erhält nicht notwendigerweise die Winkel zwischen Geraden oder die Abstände zwischen Punkten, aber sie erhält die Verhältnisse der Abstände von Punkten, die auf einer Geraden liegen.

Beispiele von affiner Transformation sind Translation, Rotation, Skalierung, Verschiebung (=shear) in beliebiger Anzahl und Kombination untereinander.

Bei diesen Methoden wird jeweils ein “beweglicher” Datensatz auf einen ortsbezogenen “feststehenden” Datensatz mittels Algorithmus “draufbewegt”. Für die Annäherung dieser meist von ein und demselben Patienten stammenden Datensätze werden in der klinischen Routine grauwertbasierte Algorithmen verwendet, die auf bestmögliche Korrelation der beiden Histogramme achten.

Nachteil dieser Methode ist, dass Veränderungen in der Anatomie durch Atembewegungen, Darmperistaltik oder auch unterschiedliche Füllstände von Hohlräumen nicht oder nur mangelhaft ausgeglichen werden können oder, dass, wie im vorliegenden Fall, das zu untersuchende Individuum durch seine einzigartige Lagerung in seiner Gesamtheit sehr stark verzerrt ist.

Non-Affine Registrierung

Eine bessere Annäherung bietet da schon die “elastische” Registrierung ([Lester and Arridge, 1999](#)). Hier wird unterschieden nach physisch-orientierten und rein abstrakt mathematischen ([Holden, 2008](#); [Lester and Arridge, 1999](#)) oder auch fluid-dynamischen Methoden ([Christensen et al., 1996](#)).

Physisch-orientierte Algorithmen wie z.B. lineare elastische Transformationen ([Lester and Arridge, 1999](#)) sowie fluid-dynamische Transformationen ([Christensen et al., 1996](#)) können in vielen Anwendungsbereichen große Genauigkeit erzielen. Mathematische Modelle nutzen “radial basis functions” (=RBF) ([Buhmann, 2000](#)) und B-Spline basis functions ([Unser et al., 1991](#); [Unser, 1999](#)), um die Anzahl der DOF (=degrees of freedom) zu reduzieren. RBF und B-Spline sind heute sehr effiziente und gut eingeführte Methoden, die überdies über sehr große Genauigkeit verfügen ([Shusharina and Sharp, 2012](#)).

Die B-spline-Methode leitet sich von dünnen Holzplatten her, die z.B. für das Bauen eines Schiffsrumpfes verwendet werden. Wenn auf so eine Platte eine Kraft ausgeübt wird, verändert sie ihr Aussehen. Das Aussehen dieser Platte hängt somit direkt von der Anzahl der Wendepunkte ab, an denen sich ihre Form verändert. Ein wesentlicher Unterschied in der Deformation besteht darin, ob die Enden dieser Platte fixiert sind oder sich frei bewegen können. Das selbe passiert im Algorithmus: Große, geglättete lokale Verformungen haben große Auswirkungen auf entfernte Teile der Bildgebung.

Aber obwohl elastische Registrierung der starren Registrierung überlegen ist, ist sie dennoch nicht perfekt. Die Ungenauigkeiten ergeben sich in der klinischen Praxis dadurch, dass globale Strukturen mit ausreichend Kontrast die kleinen lokalen Details mit geringem Kontrast “überstrahlen” und den Algorithmus dadurch ungenau machen. Dadurch sind anatomisch relevante Details am Ende der Registrierung oftmals schlecht zugeordnet ([Shusharina and Sharp, 2012](#)). Um diese Defizite in der Ausrichtung zu kompensieren, ist zusätzliche Information nötig, die in Form von punktuellen Landmarks gewonnen werden kann, um korrespondierende Bildinhalte für die Registrierung besonders hervorzuheben ([Zitová and Flusser, 2003](#)). Punktlandmarks können von einem Experten sehr gut definiert werden und sind gut geeignet für die lokale Anpassung des Vektorfeldes bei einer Registrierung ([Shusharina and Sharp, 2012](#)). Die Beschreibung des Vektors der Deformation wird im sogenannten “deformation field” oder “displacement field” festgeschrieben ([Birkfellner, 2010](#); [Shusharina and Sharp, 2012](#)).

Um eine Balance zwischen Deformation und Übereinstimmung zu finden, gibt es verschiedene mathematische Funktionen, die abhängig vom jeweiligen Algorithmus in Balance gehalten werden. Eine Belohnungs-Funktion (merit-function) ist die “sum of squared differences”, die den Abstand der Landmarks und der Intensität der Voxel überprüft. Eine Kosten-Funktion (cost-function) überprüft dabei, wie stark die lokale Verzerrung ist, um den Abstand der Landmarks zu verringern. Dabei werden sozusagen “Strafpunkte” vergeben und somit der Grad der Verzerrung begrenzt ([Kybic and Unser, 2003](#)).

1.8.4 Landmark-Registrierung mit 3D-Slicer

In 3D-Slicer gibt es folgende Landmark-Registrierungsmethoden, die in der vorliegenden Arbeit auf ihre Tauglichkeit hin getestet werden, Vergleichsdatensätze von rezenten Probanden auf den Ötzi-Datensatz zu registrieren:

“**Rigid Registration**” 6 Parameter: Dieser Algorithmus berücksichtigt lediglich 6 DOF.

“**Similarity Registration**” 7 Parameter: Hier werden die 6 DOF + globale Skalierung angewendet.

“**Affine Registration**” 12 Parameter: 6 DOF, Skalierung + lineare Verzerrung.

“**Thin Plate Registration**” Arbeitet nach der B-spline-Methode und managed sehr gut hohe lokale Deformationen, allerdings zum Preis, dass entfernte Bildelemente unter dieser Verformung leiden.

1.8.5 Verifikation der Registrierung mittels Euklidischen Abstands

Um die Genauigkeit der Registrierungsmethode festzustellen, wird nach dem Abarbeiten des Algorithmus überprüft wie gut sich die Landmarks im Durchschnitt aneinander ange nähert haben. Beim großen Verzerrungsgrad der Eismumie ist fraglich, ob die für klinische Forschung programmierten Algorithmen überhaupt in diesem großen Ausmaß bei brauchbarem Ergebnis verzerren können.

Formel des euklidischen Abstandes:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

(Aus [MathWorld–A Wolfram Web Resource](#). (2017))

1.9 Papers zur Todesursache “Pfeilschussverletzung”

Der, vermutlich aus dem Vinschgau oder Ötztal stammende “Iceman” oder, auf österreichisch, liebevoll “Ötzi” genannte archäologische Mumien-Fund (Hoogewerff et al., 2001), wurde bis heute mehrfach naturwissenschaftlichen Untersuchungen unterzogen. Man suchte u.a. Antworten auf Fragen nach seiner Herkunft (Hoogewerff et al., 2001), seiner letzten Reiseroute (Oeggli et al., 2007; Müller, 2003), seinen Ernährungsgewohnheiten (Dickson et al., 2000; Rollo et al., 2002), seiner Körpergröße und Konstitution (Ruff et al., 2006) oder auch Krankheiten (Aspöck et al., 1995; Seiler et al., 2013), seiner mitochondrialen DNA (Rollo et al., 2006; Ermini et al., 2008; Olivieri et al., 2010) und nicht zuletzt auch nach seiner Todesursache (Nerlich et al., 2003; Pernter et al., 2007; Gostner et al., 2011).

Mit der Entdeckung der Pfeilspitze in “Ötzi’s” linker Schulter (Gostner and Egarter-Vigl, 2002) wurden Theorien einer Erfrierung, eines natürlichen Todes, eines Todes durch Erschöpfung oder Erkrankung von der Möglichkeit eines Fremdverschuldens abgelöst (desaster-theory) (Ambach et al., 1991, 1992).

Im Folgenden sind einige Erkenntnisse zu Ötzis Ableben im Zusammenhang mit der Pfeilspitze angeführt:

1.9.1 Paper “INSIGHT: Report of Radiological-Forensic Findings on the Iceman” von P. Gostner und E. Egarter Vigl (01/2002)

Im Rahmen einer Untersuchung im Jahre 2002 in Bozen, wurden u.a. im Zuge einer Röntgenuntersuchung vier Bilder des Thorax des Eismannes angefertigt. Es wurde attestiert, dass es keine frischen, unverheilten Frakturen gab. Lediglich gut verheilte Frakturen an der 7. und 8. linken Rippe. Schließlich entdeckte man am Oberrand der zweiten Rippe einen pfeilähnlichen Schatten (siehe Abbildung 49).

Basierend auf nachfolgenden CT-Untersuchungen wurde nach Form und Dichte als Fremdkörper eine steinerne Pfeilspitze erkannt. Ihre Dichte lag bei 2.200 HU, während die Dichte der knöchernen Strukturen des Ötzi bei 1.400 HU lag. Bei weiterführenden CT-Untersuchungen dieses Areals fand man heraus, dass die gefundene Struktur 27 mm lang und 18 mm breit war. Die Pfeilspitze ist zwischen der zweiten Rippe links und dem Schulterblatt positioniert und nur ca. 16 mm von der Pleura parietalis entfernt. Von hinten gesehen deutet sie von links unten nach rechts oben.

Man vermutet, dass die Pfeilspitze genau im Zuge des Verlaufes der großen Gefäße der Achselhöhle liegt. Das umliegende Gewebe auf der linken Seite war auch dichter als das Gewebe an der entsprechenden Stelle der rechten Seite. Daraus leiteten die Untersucher ab, dass hier möglicherweise ein Hämatom vorliegen könnte, das durch den Einschuss entstanden ist. Radiologisch kann eine begleitende Entzündung des Areals nicht ausgeschlossen werden. Eine mögliche Eintrittswunde wurde ebenfalls gefunden: Direkt unter der Spina Scapulae, der Schulterblattgräte, befindet sich ein kleiner Hautdefekt mit an der



Abbildung 49: Bei Röntgenuntersuchungen am Bozener Allgemeinen Krankenhaus entdeckten P. Gostner und E. Egarter Vigl die Pfeilspitze in Ötzi's linker Schulter. Eine Welt Sensation. (Aus [Gostner and Egarter-Vigl \(2002\)](#))

Unterseite nach innen gewölbten Wundrändern. Die Umgebung dieses Defekts hat einen dunklen, leicht rötlich-braunen Grund (siehe rote Markierung in Abbildung 50). Ein weiterer kleiner Hautdefekt wurde in unmittelbarer Nähe gefunden, der sich aber nicht als mögliche Eintrittsöffnung herausgestellt hat. Dieser Defekt könnte durch Absplitterung des Pfeiles entstanden sein. Durch die Widerhaken an der Pfeilspitze könne man davon ausgehen, dass sich ihre Lage beim Versuch, den Pfeil herauszuziehen nicht wesentlich verändert haben dürfte.

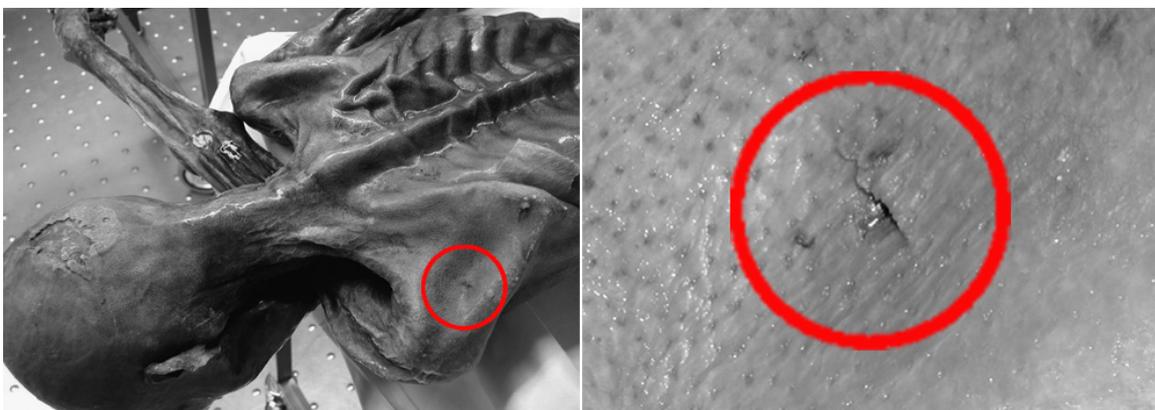


Abbildung 50: Die Lage der Eintrittswunde an der linken Schulter. (Aus [Gostner and Egarter-Vigl \(2002\)](#))

Aufgrund der Lage der Pfeilspitze wurde die Vermutung geäußert, dass der Schütze eine Position von links unten hinter dem Ötzi gehabt haben muss, um den tödlichen Schuss abgeben zu können.

Über den Auffindungsort des Ötzi und die Lage der Fundstücke ist man der Meinung, dass der völlig entkräftete Mann hinter einem Felsblock im Zustand der völligen Erschöpfung zusammensank.

1.9.2 Paper “Radiologic proof for the Iceman’s cause of death (ca. 5.300 BP)” von P. Perntner, P. Gostner, E. Egarter Vigl und F. Rühli (12/2006)

Das Team um Frau Prof. Perntner kam zu dem Schluss, dass Ötzi aufgrund der intrathorakalen Verletzung durch die Pfeilspitze verstorben sei. Dieser Befund wurde mittels Multi Slice CT (MSCT)-Untersuchung mit einem Siemens Sensation 16 CT-Scanner erhoben.

In der linken Regio Subclavia wurde eine tubuläre Struktur mit -40 HU entdeckt, von der vermutet wird, dass es sich um die A. subclavia handelt. Das umgebende Weichteilgewebe weist eine geringere Dichte mit -240 HU auf. Die Gefäßwand ist bis auf eine 13 mm lange Stelle, an der sie verletzt ist, glatt und unauffällig. Auch ein 3 mm langes Pseudoaneurysma ist sichtbar. Die Pfeilspitze (+1.840 HU) liegt in 6,5 mm dorso-cranialer Entfernung (siehe Abbildung 51). Man schließt daraus, dass die Pfeilspitze die A. subclavia lazeriert (aufgerissen) hat. Durch das Herausziehen des Pfeilschaftes wurde die Pfeilspitze ein Stück zurückgezogen bevor die Widerhaken der Spitze ein weiteres Herausziehen verhindert haben. Man vermutet, dass sich dabei der Schaft von der Pfeilspitze gelöst hat.

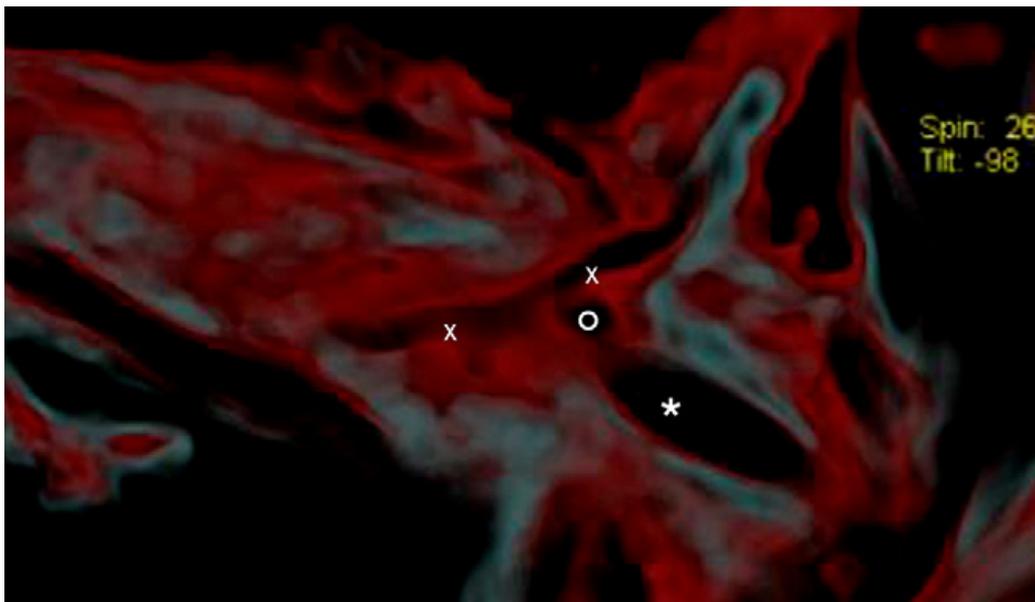


Abbildung 51: Die dorsale Wand der linken A. subclavia zeigt eine Laceration (x-x). Die Pfeilspitze (*) befindet sich in situ. (CT-Bild in multiplanarer Rekonstruktion.) (Aus Perntner et al. (2007))

Im umliegenden Weichteilgewebe findet man neben Gaseinschlüssen auch mehrfach teilweise confluyente Verdichtungen mit -80 HU, von denen man annimmt, dass es sich um ein Hämatom handeln könnte. Diese Verdichtungen dehnen sich in dorso-caudaler Richtung sowohl zwischen Rippen und Scapula als auch in den angenommenen Schusskanal hinein aus (siehe Abbildung 52). Das würde anzeigen, dass der Mann aus dem Eis perimortal in einer halbaufrechten Stellung verharrte, ähnlich der, in der er aufgefunden wurde.

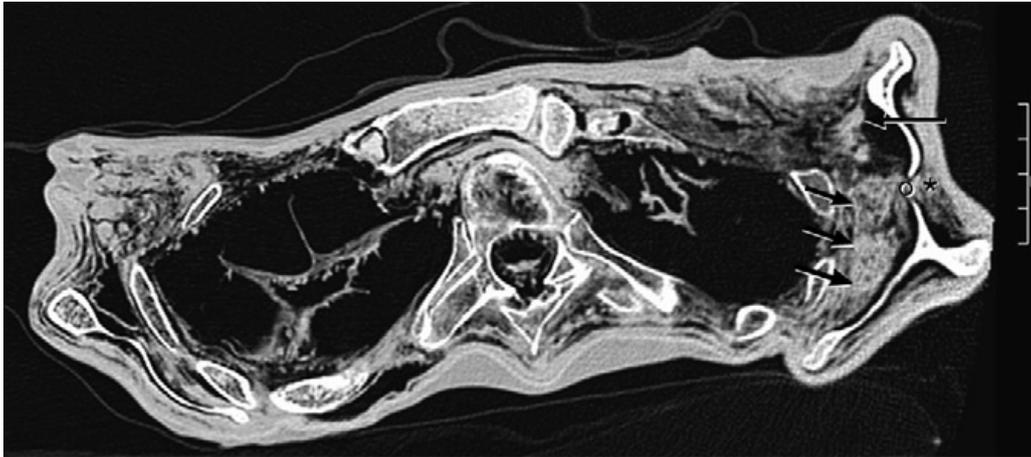


Abbildung 52: Das axiale CT-Bild zeigt das thoracale Hämatom, das sich von der linken Regio subscapularis (Pfeile) durch die Scapula (°) in den Schusskanal (*) ausdehnt. (CT-Bild in multiplanarer Rekonstruktion.) (Aus [Pernter et al. \(2007\)](#))

Die etwas ventraler liegende V. subclavia konnte eindeutig identifiziert werden. Somit wurde das weiter dorsal liegende lazerierte Gefäß als die A. subclavia identifiziert. An der linken V. subclavia konnten keine Verletzungen festgestellt werden. Ebenso nicht an der rechten A. et V. subclavia. Auch wurden rechts keine Hämatome im korrespondierenden Bereich diagnostiziert.

2. Fragestellung

In der vorliegenden Arbeit werden folgende Forschungsfragen behandelt:

Fragestellung 1:

“Lässt sich ein rezenter CT-Datensatz mit Gefäßen auf den Ötzi-Brustkorb sinnvoll registrieren? Welche Registrierungsmethode ist hierfür am besten geeignet?”

(Siehe Kapitel 5.1 auf Seite 75.)

Fragestellung 2:

“Vermessung der Lage der Pfeilspitze im Ötzi.”

(Siehe Kapitel 5.2 auf Seite 77.)

Fragestellung 3:

“Wie sehen die Lagebeziehungen bei gemappten Datensätzen unterschiedlicher Individuen aus (Entfernung der Pfeilspitze zu vitalen Strukturen)?”

(Siehe Kapitel 5.3 auf Seite 80.)

Fragestellung 4:

“Lässt sich das linke Schulterblatt des Ötzi virtuell reponieren? Welchen Einfluss hat das auf die Schussrichtung?”

(Siehe Kapitel 5.4 auf Seite 86.)

Fragestellung 5:

“Wie sieht die Lage der Pfeilspitze in diesem anatomischen Kontext aus?”

(Siehe Kapitel 5.5 auf Seite 92.)

3. Material

Für die Bearbeitung der Forschungsfragen waren mehrere unterschiedliche Datenquellen notwendig. Diese Daten bestanden entweder direkt aus Volums-Daten bildgebender Verfahren oder aus Bearbeitungen derselben.

3.1 Bildgebende Daten

Als bildgebende Daten standen der CT-Datensatz des Eismannes und Vergleichs-CT-Datensätze von Patienten aus diagnostischen Untersuchungen zur Verfügung.

3.1.1 CT-Daten des Ötzi

Um so einen kostbaren Fund wie den Ötzi auch von innen untersuchen zu können, bedient sich die moderne Anthropologie bildgebender Verfahren, wie sie auch in der Medizin angewendet werden. In der vorliegenden Arbeit wird zur Analyse des Ötzi ein CT-Datensatz verwendet, der aus Teilvolumina zusammengesetzt ist, die am 14. April und am 3. Mai 1994 an der Universitätsklinik Innsbruck hergestellt wurden (siehe Tabelle 4 und Abbildung 53). (Murphy et al., 2003)

Der Datensatz: Die Voxelsize beträgt 0,98 mm x 0,98 mm mit einer Schichtdicke von 1,99723 mm mit einer Matrix von 512 x 512 in 362 Schichten mit einem Grauwertbereich von -1.024 bis 2.926. Aufnahme in Rückenlage.

Chronologic Record of Imaging Examinations			
Date	Imaging Method	No. of Images Acquired	Anatomy Studied
September 25, 1991	CT, 4 mm thick	40	Head
	CT, 1 mm thick	47	Head
	CT, 5 mm thick	21	Maxilla, mandible
	CT, 5 mm thick	8	Mandible
	CT, 5 mm thick	26	Neck
	CT, 8 mm thick with 2D and 3D reconstructions	108	Chest, abdomen, pelvis, proximal thigh
September 26, 1991	CT, 5 mm thick with 3D reconstructions	38	Head
	CT, 4 mm thick	54	Midfemora to distal tibiae
	CT, 2 mm thick	44	Ankles
May 25, 1993	Conventional radiography	9	Skull, spine, chest, pelvis, knees, ankles
April 14, 1994	Portable computed radiography	23	Skull, spine, chest, abdomen, extremities, hands, feet
May 3, 1994	Spiral CT, 1 mm thick with 2D and 3D reconstructions	222	Head, neck
	Spiral CT, 5 mm thick with 2D reconstructions	178	Neck, chest, abdomen, pelvis
	Spiral CT, 5 mm thick with 2D reconstructions	196	Pelvis to midfemora
	Spiral CT, 5 mm thick with 2D and 3D reconstructions	298	Acetabulae to feet
March 3, 2001	Spiral CT, 4 mm thick with 2D reconstructions	134	Skull, maxilla, mandible
	Spiral CT, 4 mm thick with 3D reconstructions	104	Chest
	Spiral CT, 2 mm thick	164	Abdomen, pelvis, hips
	Spiral CT, 2 mm thick with 2D reconstructions	368	Midfemora to distal tibiae
	Spiral CT, 1 mm thick with 2D reconstructions	137	Ankles, feet
June 27, 2001	Digital radiography	6	Ribs

Note.—The iceman was imaged on seven separate occasions with a combination of CT and radiography. In all, the examinations generated approximately 2,190 CT and 38 radiographic source images. Many more images were derived from the spiral CT data sets. These images are not tabulated, but they include many two- and three-dimensional reconstructions, postprocessed images for measurement in Hounsfield units, and images optimized to emphasize certain anatomic features. 3D = three-dimensional, 2D = two-dimensional.

Tabelle 4: Aufstellung der bildgebenden Untersuchungen des Eismannes im Zeitraum vom 25. September 1991 bis zum 27. Juni 2001. (Aus Murphy et al. (2003))

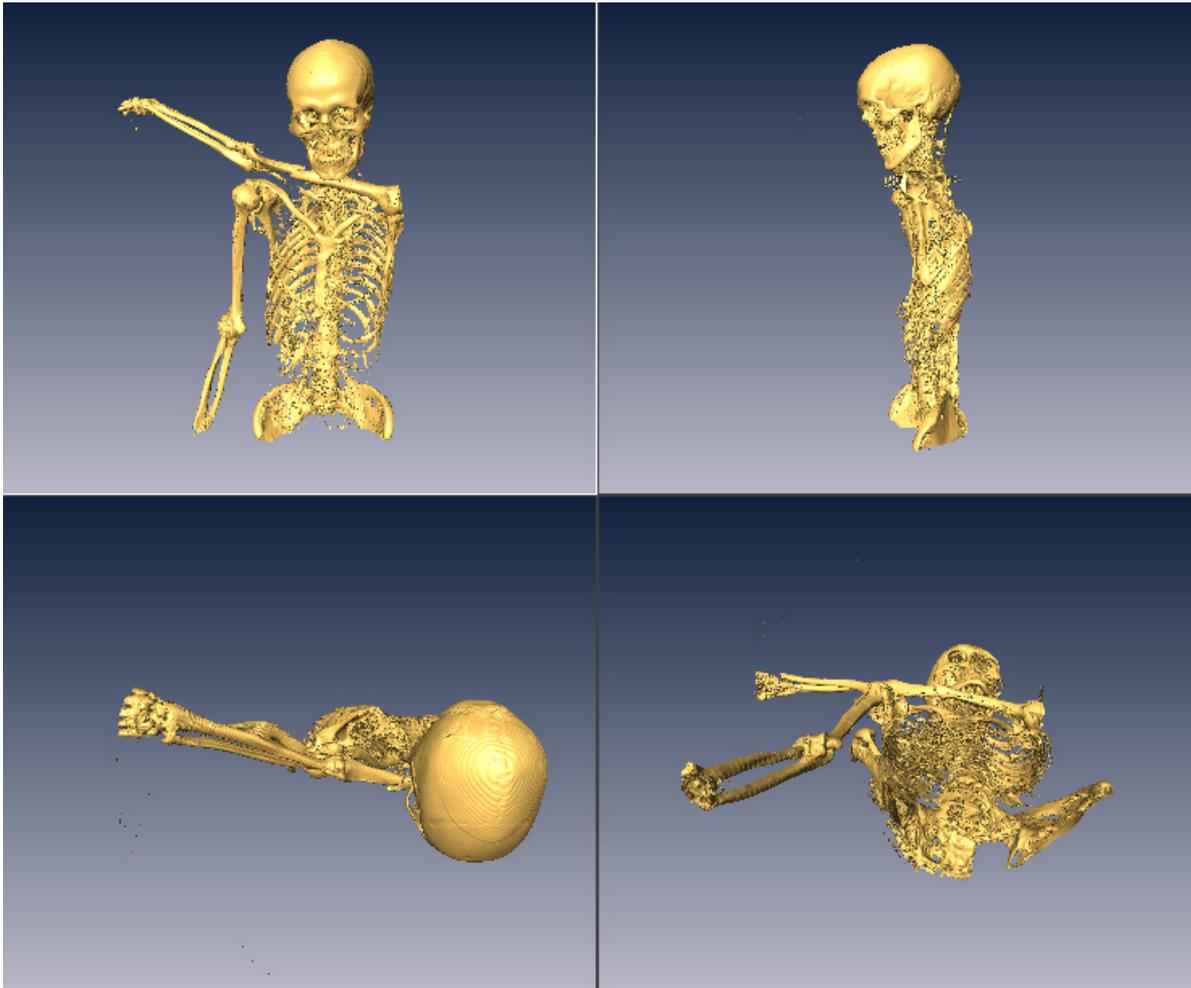


Abbildung 53: Die Abbildung zeigt den Eismann in einer Aufnahme aus dem Jahr 1994. (Ansichten von links oben nach rechts unten: anterior, lateral, cranial und caudal.) (Datensatz zur Verfügung gestellt von der Uni-Klinik Innsbruck.)

3.1.2 Vergleichs-CT-Datensätze

Sämtliche CT-Datensätze aus dem Landeskrankenhaus Wiener Neustadt und aus der Klinik Innsbruck wurden von lebenden Personen zu diagnostischen Zwecken gewonnen und liegen anonymisiert vor. Eine Befassung der Ethikkommission mit dieser Causa ist nicht erforderlich, da es sich um nachfolgende statistische Auswertungen einer Untersuchung - unabhängig vom Krankheitsbild des Patienten - handelt (siehe Erläuterung im Anhang Kapitel A.1 auf Seite 113).

Der Datensatz von einem Thorax-CT "46m" stammt von einem heute 46-jährigen Mann und liegt im DICOM-Format vor. Die Voxelsize beträgt 0,634766 mm x 0,634766 mm mit 3 mm Schichtdicke. Die Größe der Matrix ist 512 x 512 in 121 Schichten mit einem Grauwertbereich von -1.024 bis 3.064 (siehe Abbildung 54). Aufnahme unter Kontrastmittelgabe in Rückenlage.



Abbildung 54: Vergleichsdatensatz "46m".

(Die CT-Daten wurden vom Landeskrankenhaus Wiener Neustadt zur Verfügung gestellt.)

Der Datensatz von einem Thorax-CT "62m" stammt von einem heute 62-jährigen Mann und liegt im DICOM-Format vor. Die Voxelsize beträgt 0,634766 mm x 0,634766 mm mit 3 mm Schichtdicke. Die Größe der Matrix ist 512 x 512 in 121 Schichten mit einem Grauwertbereich von -1.024 bis 3.046 (siehe Abbildung 55). Aufnahme unter Kontrastmittelgabe in Rückenlage.

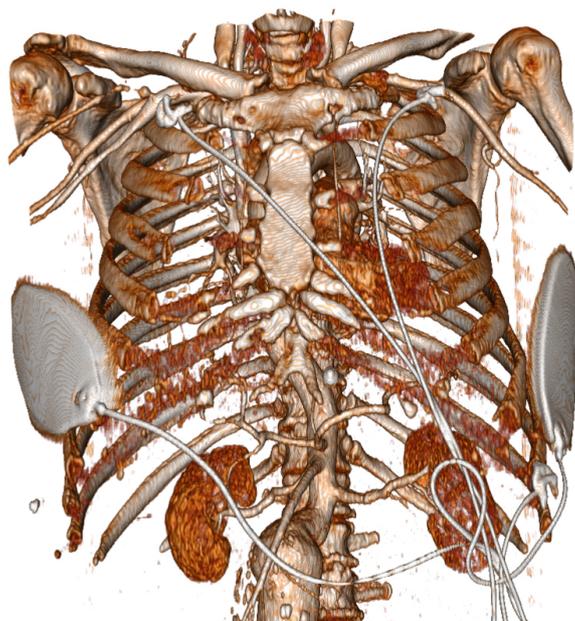


Abbildung 55: Vergleichsdatensatz "62m".

(Die CT-Daten wurden vom Landeskrankenhaus Wiener Neustadt zur Verfügung gestellt.)

Der Datensatz von einem Thorax-CT “86m” stammt von einem heute 86-jährigen Mann und liegt im DICOM-Format vor. Die Voxelsize beträgt 0,654297 mm x 0,654297 mm mit 3 mm Schichtdicke. Die Größe der Matrix ist 512 x 512 in 98 Schichten mit einem Grauwertbereich von -1.024 bis 3.071 (siehe Abbildung 56). Aufnahme unter Kontrastmittelgabe in Rückenlage.

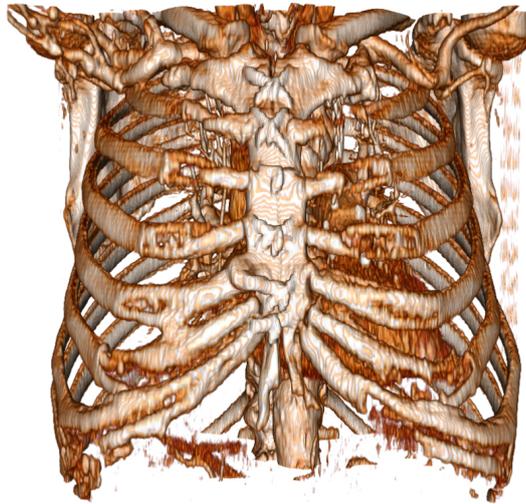


Abbildung 56: Vergleichsdatsatz “86m”.

(Die CT-Daten wurden vom Landeskrankenhaus Wiener Neustadt zur Verfügung gestellt.)

Der Datensatz von einem Thorax-CT “50m” stammt von einem heute 50-jährigen Mann und liegt im DICOM-Format vor. Die Voxelsize beträgt 0,98 mm x 0,98 mm mit 2 mm Schichtdicke. Die Größe der Matrix ist 512 x 512 in 367 Schichten mit einem Grauwertbereich von -1.024 bis 2.926 (siehe Abbildung 57). Aufnahme ohne Kontrastmittelgabe in Bauchlage.

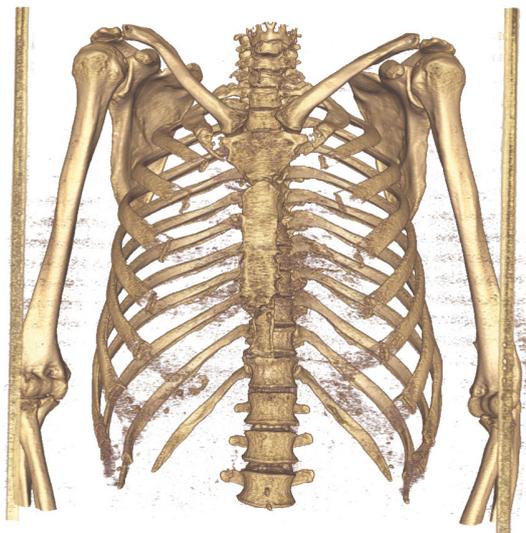


Abbildung 57: Vergleichsdatsatz “50m”.

(Die CT-Daten wurden von der Klinik Innsbruck zur Verfügung gestellt.)

3.2 Werkzeuge

Für die Erstellung dieser Arbeit waren zahlreiche Programme notwendig, um die Bearbeitung der Daten und die graphische Aufbereitung des Materials zu bewältigen. Da die Arbeit sehr “mobil” an unterschiedlichen Orten entstanden ist, war es auch notwendig mit mehreren Rechnern in unterschiedlicher Ausstattung zu arbeiten. Die Zusammenarbeit mit dem Betreuer und das Datenmanagement zwischen den einzelnen Rechnern wurden mittels Dropbox über die Cloud gelöst.

3.2.1 Verwendete Software

An der Klinik in Innsbruck:

Amira Version 5.4.3 (Build db8a7-ral-stable-upcoming-db8a7)

With licenses for Amira DICOM Reader 5.4

Amira Mesh Option 5.4

Amira Skeleton Option 5.4

© 1995-2012 Konrad-Zuse-Zentrum Berlin (ZIB), © 1999-2012 VSG - All rights reserved.

<http://www.visageimaging.com/>

Auf PC und Notebook:

3D Slicer Version 4.4.0 r23774

© 2015 - Open Source License

<https://www.slicer.org/>

Adobe® Photoshop® CS5 Extended Version 12.0 x64

© 1990-2010 Adobe Systems, Inc. - All rights reserved.

<http://www.adobe.com/>

Autodesk® Netfabb® Standard 2017.2 64-Bit Edition Build: 1344 Release: 2017.2

© 2016 Autodesk, Inc. - Alle Rechte vorbehalten.

<http://www.autodesk.com/products/netfabb/overview>

Autodesk® Meshmixer Version 11.0.544 © 2015 Autodesk, Inc. - All rights reserved.

<http://meshmixer.com/>

JabRef Version 2.11.1

© 2003-2015 - GNU General Public License

<http://www.jabref.org>

Microsoft® Windows™ Version 7 Service Pack 1 (auf Stand-PC)

© 2009 Microsoft Corporation - Alle Rechte vorbehalten.

<http://www.microsoft.com/>

TeXworks Version 0.4.6 (official) [r.c29723a, 03.04.2015 20:05]

© 2007-2015 Jonathan Kew, Stefan Löffler, Charlie Sharpsteen - GNU Gen. Publ. License

<http://www.tug.org/texworks/>

Auf MacBook Pro:**3D Slicer** Version 4.6.0 r25441

© 2015 - Open Source License

<https://www.slicer.org/>**Autodesk® Meshmixer** Version 11.0.544 © 2015 Autodesk, Inc. - All rights reserved.<http://meshmixer.com/>**Apple® OS Sierra** Version 10.12.3

© und ™ 1983-2017 Apple Inc. - All rights reserved.

<http://www.apple.com/>**JabRef** Version 3.8.2

© 2003-2015 - GNU General Public License

<http://www.jabref.org>**TeXworks** Version 0.6.1 (travis-ci) [r.3614278, 01.05.2016 10:43]

© 2007-2016 Jonathan Kew, Stefan Löffler, Charlie Sharpsteen - GNU Gen. Publ. License

<http://www.tug.org/texworks/>

3.2.2 Verwendete Hardware

3D Maus:

Space Mouse Enterprise

<http://www.3dconnexion.de/>**Stand-PC:****Ankermann-PC****Prozessor** 3,2 GHz Intel® Core™ i5-4460**Speicher** 16 GB 1.600 MHz DDR3**Grafikkarte** NVIDIA GeForce GT 730 4.096 MB DDR3 128bit PCI-E x16 DVI HDMI**Internetanbindung** LAN**Windows™-Notebook:****hp EliteBook 8540w** Mobile Workstation**Prozessor** 1,73 GHz Intel® Core™ i7 Q740**Speicher** 16 GB**Grafikkarte** NVIDIA Quadro FX 1800M 1 GB DDR3/GDDR5 128-bit**Internetanbindung** SIM-Karte, WLAN, LAN**Apple™-Notebook:****MacBook Pro** (Retina, 15", Mid 2015)**Prozessor** 2,5 GHz Intel Core i7**Speicher** 16 GB 1.600 MHz DDR3**Grafikkarte** AMD Radeon R9 M370X 2.048 MB / Intel Iris Pro 1.536 MB**Internetanbindung** WLAN

Die vorliegende Arbeit wurde in **L^AT_EX** geschrieben.

4. Methoden

Die Grundlage der Arbeit bilden einerseits CT-Volumendatensätze aus Routine-Untersuchungen und zum anderen dreidimensionale Gebilde als sog. stl-Dateien, die durch Segmentierung aus diesen Datensätzen gewonnen wurden.

4.1 Datensätze aus CT-Scans

Das Datenvolumen des Ötzi wurde mit einem Spiral-CT-Gerät der Firma Siemens, einem Somatom Plus 40, erstellt (siehe auch Abbildung 5 auf Seite 5). Die Temperatur im Untersuchungsraum wurde in einem Bereich von 8° bis 10°C gehalten, um ein Auftauen des Untersuchungsobjektes zu verlangsamen (Murphy et al., 2003). Irreparable Schäden an der Oberfläche und im Inneren des Ötzi hätten sonst die Folge sein können.

Die CT-Daten aus dem Landeskrankenhaus Wiener Neustadt stammen von einem Siemens Somatom Sensation 16 Spiral-CT mit Kontrastmittelspritze der Fa. Ulrich.

Der CT-Datensatz “50m” wurde mit einem Siemens Somatom Definition AS CT-Scanner angefertigt.

4.2 Segmentierung der Daten in Amira

Durch Segmentierung der CT-Daten wurde das knöcherne Skelett des Eismannes in stl-Daten umgewandelt (siehe Abbildung 58). Damit stehen diese Strukturen für weitere Bearbeitungen in einem 3D-Workflow zur Verfügung.

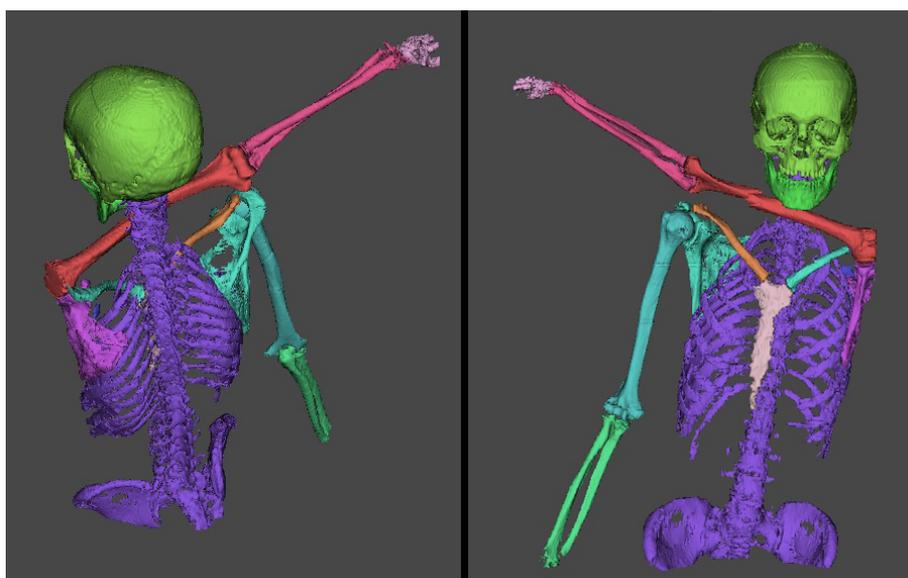


Abbildung 58: Skelett des Eismannes segmentiert aus den CT-Daten in 3D Slicer. Der besseren Übersicht wegen wurden die einzelnen stl-Files eingefärbt.

4.3 Registrierungsalgorithmen in 3D Slicer

Für diese Bearbeitung wird getestet, ob ein CT-Volumen einer heute lebenden Person sinnvoll auf das CT-Volumen des Ötzi gemappt werden kann. Mittels affiner und non-affiner Landmark-basierter Registrierungsverfahren wird ein Test-Vergleichsdatensatz auf den Datensatz des Eismannes registriert. Die beste Registrierungsverfahren wird mittels mittlerer euklidischer Abstandsbestimmung bestimmt (siehe Seite 57).

Anschließend werden zwei weitere Datensätze mit Hilfe der ausgewählten Registrierungsverfahren auf den Eismann gerechnet und schließlich der Gefäßverlauf in den bearbeiteten Vergleichsdatensätzen untersucht, um festzustellen, ob die Pfeilspitze sich in der Nähe großer Gefäßstrukturen befindet.

4.4 Landmarkbasierte Registrierung in 3D Slicer

Wegen des hohen Verzerrungsgrades des Eismannskelettes wurden 82 Landmarks definiert, um über das gesamte Volumen eine ausreichende Anpassung des Vektorfeldes für den jeweiligen Registrierungs-Algorithmus zu gewährleisten (Shusharina and Sharp, 2012).

Das Hauptaugenmerk wurde dabei auf die Form des Thorax und die Lokalisation der Wirbelsäule, des Brustbeines und der einzelnen Rippen gelegt. Die Schulterblätter wurden nicht mit Landmarks versehen, weil hier einerseits die Ausgleichsbewegung des B-Spline-Algorithmus stattfindet und andererseits das linke Schulterblatt des Ötzi aufgrund der unphysiologischen Stellung für eine landmarkbasierte Registrierung auf eine Schulter in physiologischer Stellung nicht geeignet ist. Ein diesbezüglicher Versuch, die Schulterblätter ebenfalls mit Landmarks zu bestücken, um sie auch auf die Ötzi-Topographie zu registrieren, verlief erfolglos, weil andere Strukturen dabei wieder ihre bereits gute Passung verloren (siehe Seite 56 und 57).

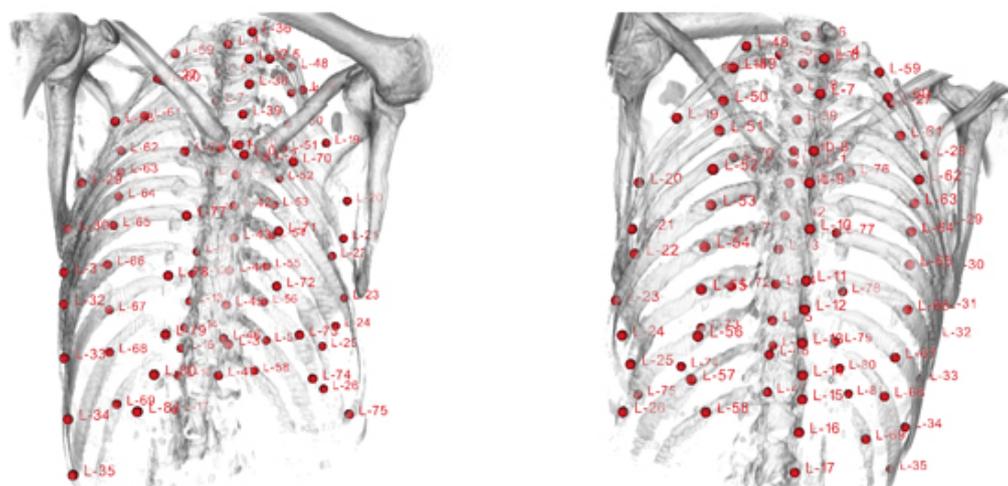


Abbildung 59: Landmarks für die Registrierungstasks im anatomischen Kontext auf dem Ötzi-Datensatz von anterior und posterior.

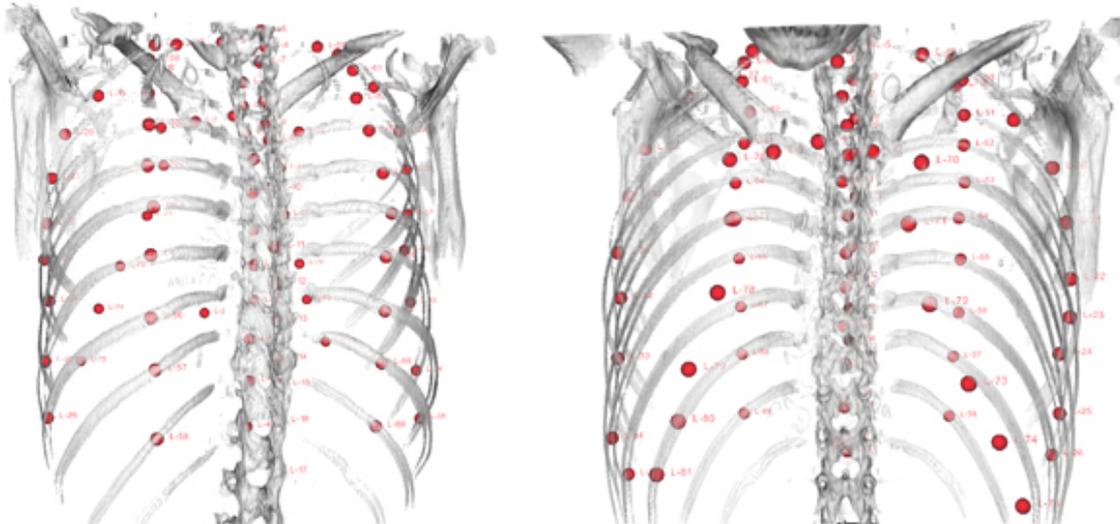


Abbildung 60: Landmarks für die Registrierungstasks im anatomischen Kontext auf dem Vergleichs-Datensatz "46m" von anterior und posterior.

In der vorliegenden Arbeit werden Landmarks vom Typ 1 und Typ 2 verwendet - d.h. Landmarks des Typ 1 befinden sich an definierten Gewebegrenzen oder an Orten, an denen sich zwei oder mehr anatomische Strukturen treffen. Landmarks des Typ 2 sind Landmarks, die Maxima von Kurven oder Morphologien (z.B. Scheitelpunkt der Krümmung einer Rippe) markieren. (Siehe Abbildung 59 und 60 sowie Anhang Kapitel A.2 auf Seite 114.)

Durch das Bestreben des Registrierungsalgorithmus, die Abstände zwischen den entsprechenden Landmark-Paaren zu minimieren, lässt sich ein Maß für die Qualität der Passung der beiden Volumina ableiten. Je geringer der durchschnittliche euklidische Abstand der Landmarks im 3D-Raum ist, desto besser sind die beiden Volumina aufeinander gerechnet worden.

4.5 Darstellung von Gefäßen in der Ötzi-Anatomie

In der Bearbeitung zu dieser Fragestellung werden die Datensätze von drei verschiedenen Individuen herangezogen (46m, 62m und 86m). Die 82 Landmarks aus der Evaluierung des Algorithmus werden auf alle drei Datensätze aufgebracht und mit dem best geeigneten Algorithmus auf den Eismann-Datensatz registriert.

Durch die Verformung (landmarkgeleitete Schrumpfung und Deformation) der Vergleichsdatensätze mittels B-Spline-Algorithmus auf "Ötzigeometrie" bzw. "Ötzipopographie" ist es möglich, aus den Kontrastmittel-CTs der Vergleichsindividuen den Verlauf von Gefäßen und die Lage von Organen - quasi im Eismann - abzulesen. Indem das stl-Modell der Pfeilspitze, das durch Segmentierung aus dem Ötzi-Datensatz gewonnen wurde, in die aus den Vergleichsdatensätzen produzierte Volumendarstellung importiert wird, lässt sich eine räumliche Zuordnung der Pfeilspitze zu den neurovasculären Strukturen der oberen Extremität im Ötzi interpolieren.

Dadurch wird die räumliche Beziehung der Pfeilspitze aus dem Eismann zu den virtuell ins Eismannformat gebrachten vitalen Strukturen der Vergleichsindividuen verdeutlicht, wodurch Rückschlüsse auf die unmittelbare Vitalgefährdung durch den Pfeilschuss gezogen werden können.

Für Messungen in den CTs wurden die Datensätze auf isotrope Voxel mit einer Seitenlänge von 1 mm umgerechnet.

4.6 Virtuelle Reponierung der Schulter des Ötzi

In Autodesk® Netfabb®, einer Bearbeitungssoftware für 3D-Modelle, wird versucht, die linke Schulter des Eismannes “in Normalstellung” zu reponieren. Dazu werden die durch Segmentierung gewonnenen stl-files im 3D-Raum verschoben.

Für die virtuelle Reponierung der linken Schulter wird die Schulter der rechten Seite vorerst nach links gespiegelt und auf die Lagebeziehungen der rechten Seite auf dem Thorax fein eingestellt. Nach Feinjustierung dieser anatomischen “Vorlage” werden die linke Scapula, die linke Clavicula und der linke Humerus mit den gespiegelten Strukturen der rechten Seite händisch in Deckung gebracht. Abschließend werden die gespiegelten Vorlagen wieder ausgeblendet und die linke Schulter bleibt reponiert sichtbar.

Die Pfeilspitze selbst hat der besseren Übersicht wegen einen virtuellen Schaft bekommen: In einer gedachten Linie von der Spitze durch den Schwerpunkt des Geschoßes wurde in der Software Netfabb ein langer, dünner Zylinder konstruiert, der den Pfeilschaft verdeutlichen soll.

4.7 Einschussrichtung des Pfeiles

Durch die neue Position des Schulterblattes könnte sich auch eine neue hypothetische Einschussrichtung des Pfeiles ergeben. Für die Rekonstruktion des Einschusswinkels werden einerseits die Ergebnisse aus den Registrierungsbearbeitungen herangenommen und andererseits wird versucht, das reponierte Schulterblatt mit einem Foto des Eismannes mittels einer 3D-Montage in Bezug zu bringen, um sowohl die Einschussrichtung als auch das durch den Pfeil verursachte Loch in der Scapula zu finden.

5. Ergebnisse

Für die Erarbeitung der Forschungsfragen wurde zuerst die am besten geeignete Registrierungs-Methode für diese Arbeit evaluiert. Anschließend wurden unterschiedliche Datensätze mit dieser Registrierungsmethode auf den Ötzi-Datensatz registriert und letztendlich wurde anhand der Ergebnisse auf die Plausibilität der Hypothese, dass die Pfeilspitze die unmittelbare Todesursache gewesen sein soll, überprüft. Außerdem wird die Dicke des M. subscapularis an der Stelle der Lokalisation der Pfeilspitze und die Eindringtiefe selbiger untersucht. Eine virtuelle Reponierung der Schulter soll Aufschluss über eine mögliche Schussbahn des Pfeiles bringen.

5.1 Fragestellung 1: “Lässt sich ein rezenter CT-Datensatz mit Gefäßen auf den Ötzi-Brustkorb sinnvoll registrieren? Welche Registrierungsmethode ist hierfür am besten geeignet?”

Für die Evaluierung des besten Registrierungsverfahrens wurde der Datensatz 46m mittels in Tabelle 5 angeführter Algorithmen auf den Eismann-Datensatz gerechnet, um die Registrierungsmethode mit der besten Anpassung beider Datensätze herauszufinden.

Die statistische Auswertung der unterschiedlichen Registrierungsmethoden (inklusive der händischen Vorregistrierung) ist in der Tabelle 5 ersichtlich, ein bildlicher Vergleich zwischen den einzelnen Registrierungsmethoden in Abbildung 61 zu sehen.

Tabelle 5: Statistische Auswertung der unterschiedlichen Registrierungsmethoden. Gemessen wird jeweils der Abstand von den entsprechenden Landmarks im Vergleichsdatsatz zu den homologen Landmarks im Ötzi-Datensatz. [Einheit = mm]

Reg.-Methode	Minimum	Maximum	Mittelwert	Varianz	Standardabw.
MANUELL	9,216	105,416	40,903	707,127	26,592
RIGID	9,557	77,064	34,939	253,133	15,910
SIMILARITY	7,429	61,074	28,555	136,540	11,685
AFFINE	2,950	43,656	18,890	89,760	9,474
THIN PLATE (=B-SPLINE)	0,457	11,283	3,210	4,537	2,130

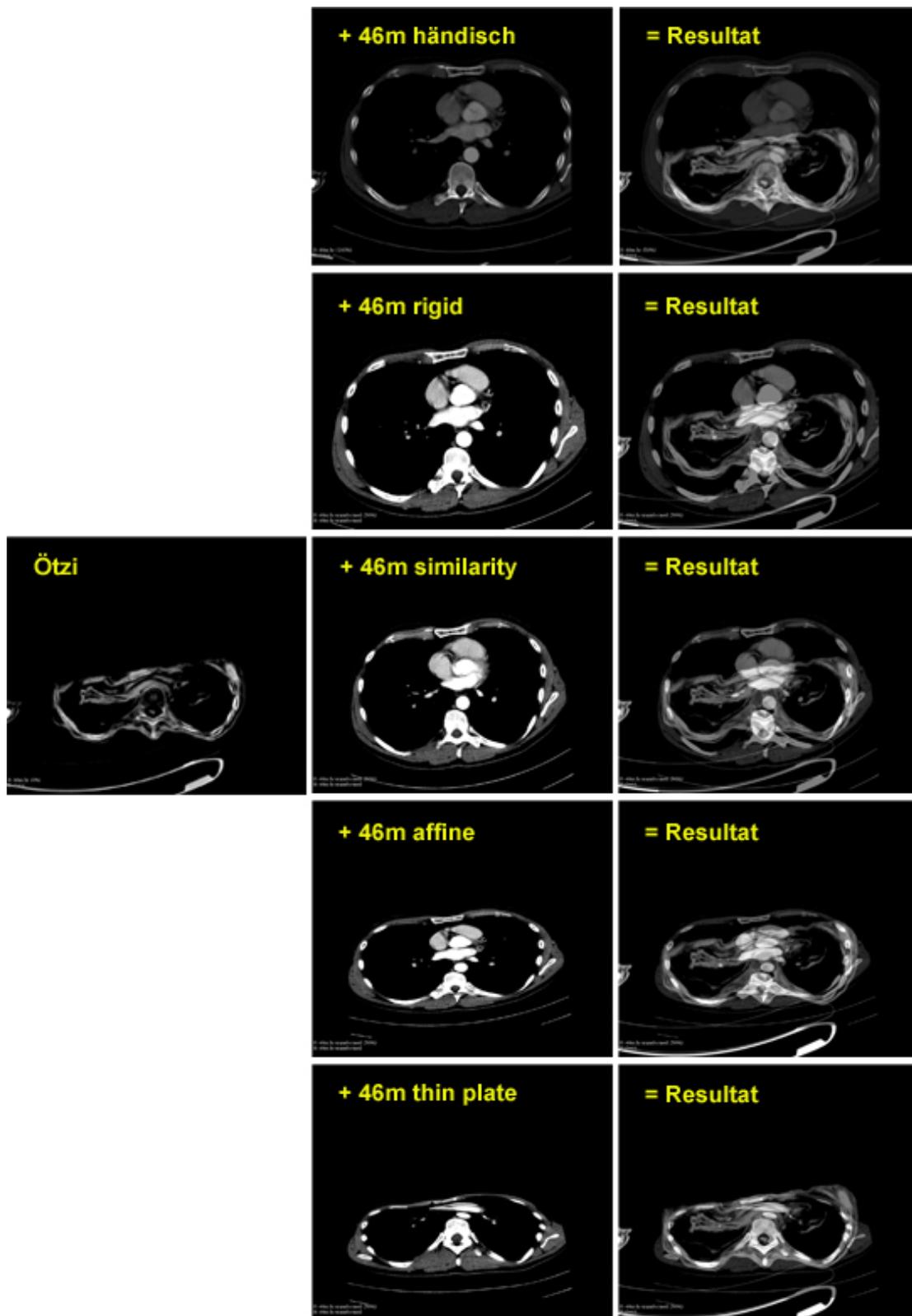


Abbildung 61: Bildliche Darstellung der einzelnen zu evaluierenden Registrierungstasks. **Linke Spalte:** Ötzi. **Mittlere Spalte:** Vergleichsdatensatz 46m nach Anwendung des im Bild näher bezeichneten Registrierungsalgorithmus. **Rechte Spalte:** Ötzi und registrierter 46m-Vergleichs-Datensatz superimponiert.

5.2 Fragestellung 2: “Vermessung der Pfeilspitze im Ötzi.”

Bei einer Vermessung der subscapulären Eindringtiefe der Pfeilspitze im Ötzi-Datensatz wurden folgende Werte erhoben (siehe Abbildung 62):

Distanz $a = 51$ mm

Die Distanz a beschreibt in Flugrichtung der Pfeilspitze die Entfernung von der ventralen Oberfläche der Scapula auf Höhe der Spina scapulae bis zur vordersten Ausdehnung der Pfeilspitze.

Distanz $b = 18$ mm

Distanz b zeigt die Entfernung einer Normalen von der Mitte der Pfeilspitze bis zur ventralen Oberfläche der Incisura scapulae.

Distanz $c = 25$ mm

Die Distanz c misst die Entfernung einer Normalen von der Mitte der Pfeilspitze bis zur ventralen Oberfläche des Collum scapulae dorsal der Cavitas glenoidalis.

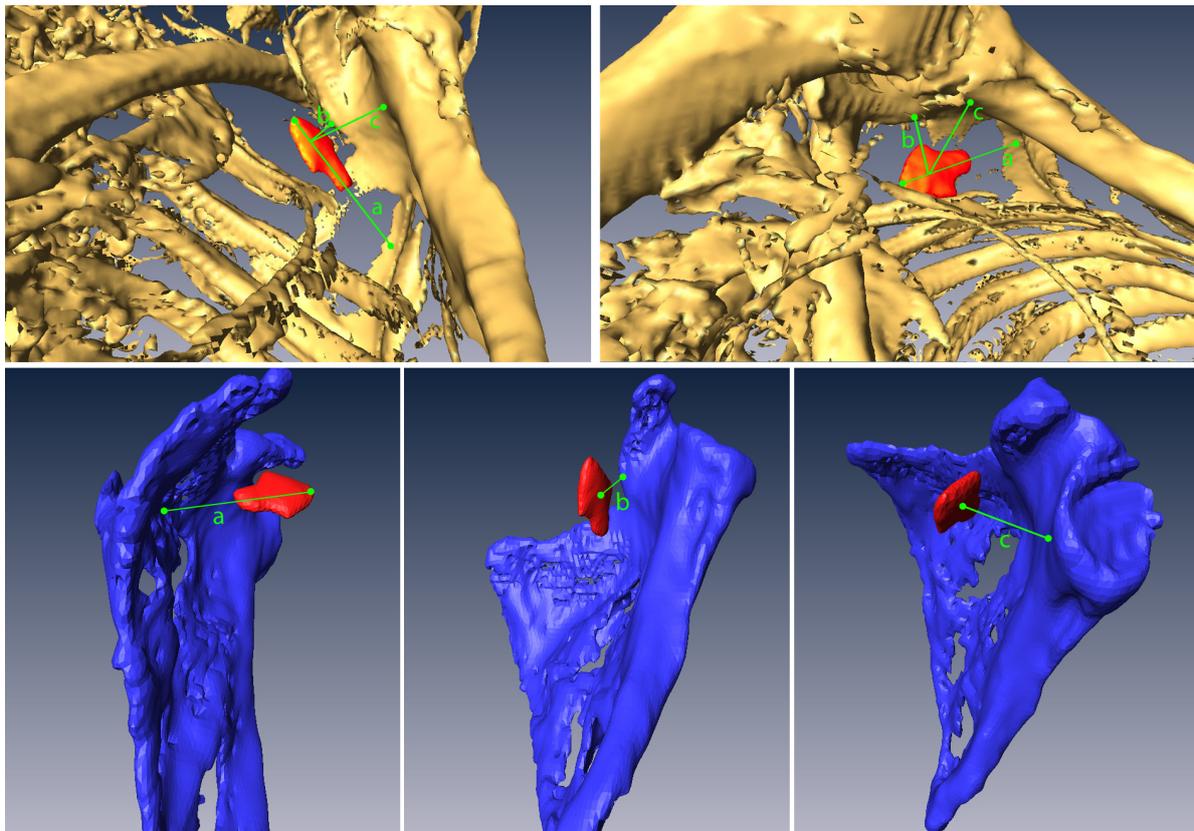


Abbildung 62: Vermessung der Distanz der Pfeilspitze von der Scapula im Ötzi-Datensatz. Zwei unterschiedliche Blickwinkel zur besseren Lokalisierung der Eindringdistanzen der Pfeilspitze. **Oben:** Pfeilspitze im Kontext zum gesamten Ötzi-Skelett. **Unten:** Zur besseren Übersichtlichkeit: Pfeilspitze ausschließlich im Kontext zur linken (nicht reponierten) Scapula. Die Distanzen a , b und c sind im Text erklärt.

Die Dicke des M. subscapularis (siehe Abbildung 63, Distanz "d") beträgt auf Höhe der Spina scapulae in deren gedachter Verlängerung in den Subscapulärraum beim Individuum 46m 30,8 mm, beim Individuum 62m 28,2 mm und beim Individuum 86m 24,5 mm. Im Durchschnitt beträgt die Dicke des M. subscapularis dieser drei Individuen an dieser Stelle 27,8 mm.

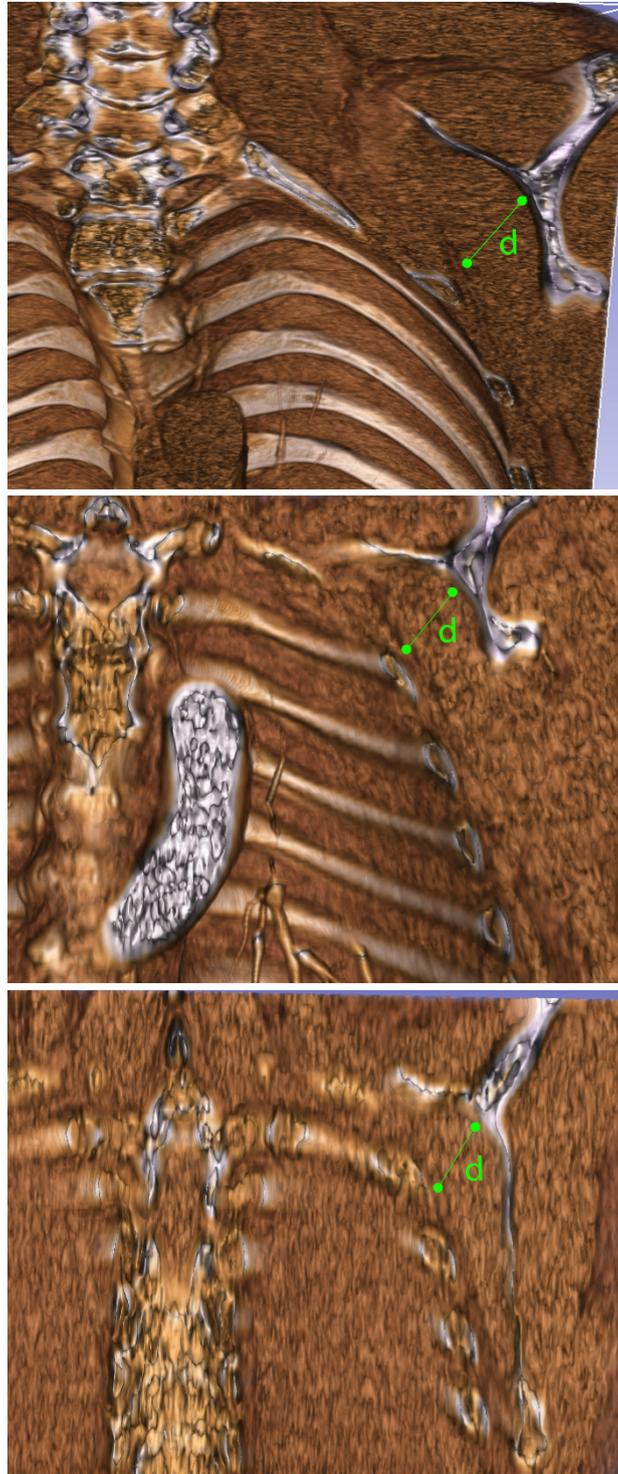


Abbildung 63: Vermessung der Dicke des M. subscapularis. **Oben:** Datensatz 46m. **Mitte:** Datensatz 62m. **Unten:** Datensatz 86m. Die Distanz "d" bezeichnet die Normale von der Innenseite der Scapula in Höhe der Spina bis zur Grenze des M. subscapularis.

Die Entfernung der Pfeilspitze auf Höhe der Spina scapulae in deren gedachter Verlängerung in den Subscapulärraum beträgt beim Ötzi bei nicht reponiertem Schulterblatt 25,2 mm (siehe Abbildung 64, Distanz "e").

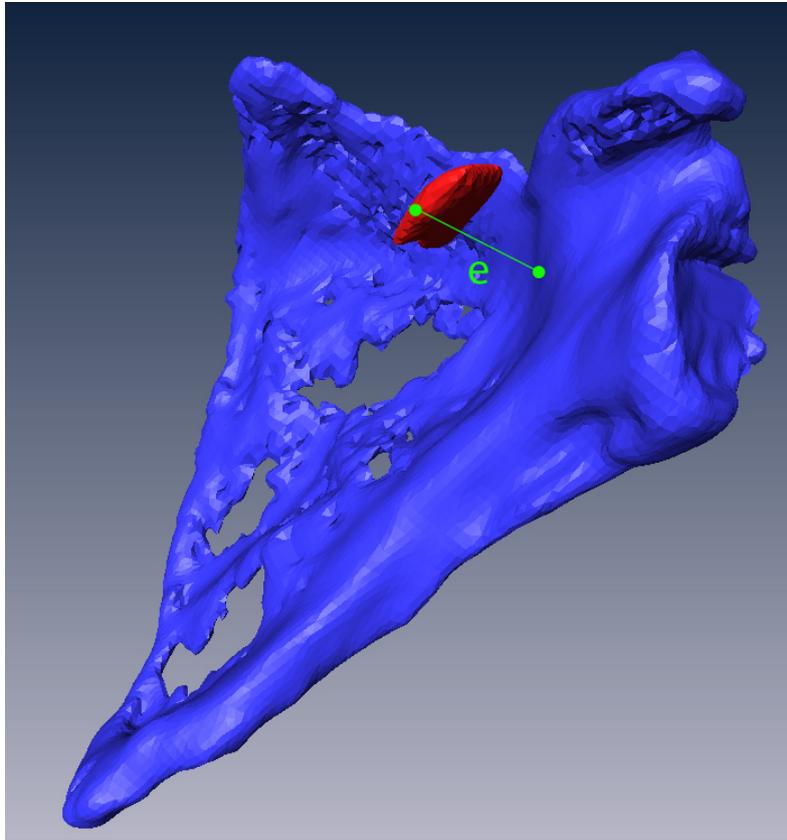


Abbildung 64: Vermessung des Abstandes "e" der Pfeilspitze in der gedachten Verlängerung von der Spina scapulae.

5.3 Fragestellung 3: “Wie sehen die Lagebeziehungen bei registrierten Datensätzen unterschiedlicher Individuen aus (Entfernung der Pfeilspitze zu vitalen Strukturen)?”

In der Bearbeitung zu dieser Fragestellung wurden die Datensätze von drei verschiedenen Individuen herangezogen (46m, 62m und 86m). Die 82 Landmarks aus der Evaluierung des Algorithmus aus Fragestellung 1 wurden auf alle drei Datensätze aufgebracht und mit dem Thin-Plate-Algorithmus des 3D-Slicer (=B-Spline-Algorithmus) auf den Eismann-Datensatz registriert.

5.3.1 Datensatz 46m auf Ötzi registriert

Wie in Abbildung 65 zu sehen ist, ist eine unmittelbare örtliche Nähe in der Lagebeziehung zwischen der Pfeilspitze (in Rot) und A. sowie V. subclavia zu sehen.

Tabelle 6: Statistische Auswertung der B-Spline Registrieremethode mit Datensatz 46m auf Ötzi (Auszug aus Tabelle 5). Gemessen wird jeweils der Abstand von den entsprechenden Landmarks im Vergleichsdatsatz 46m zu den homologen Landmarks im Ötzi-Datensatz. [Einheit = mm]

Reg.-Methode	Minimum	Maximum	Mittelwert	Varianz	Standardabw.
46m (B-Spline)	0,457	11,283	3,210	4,537	2,130

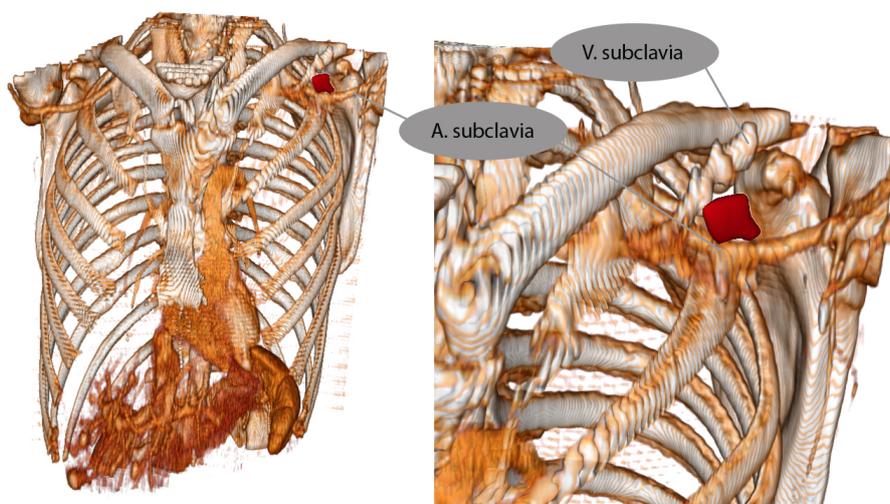


Abbildung 65: Registrierter Datensatz 46m auf Ötzi-Geometrie. **Links:** 46m in der Übersicht. **Rechts:** Lage der Pfeilspitze (in Rot) groß.

Abbildung 66 zeigt die anatomische Übereinstimmung des Morphings von Vergleichsdatensatz 46m auf Ötzi. In der Tabelle 6 ist die errechnete Abweichung angeführt.

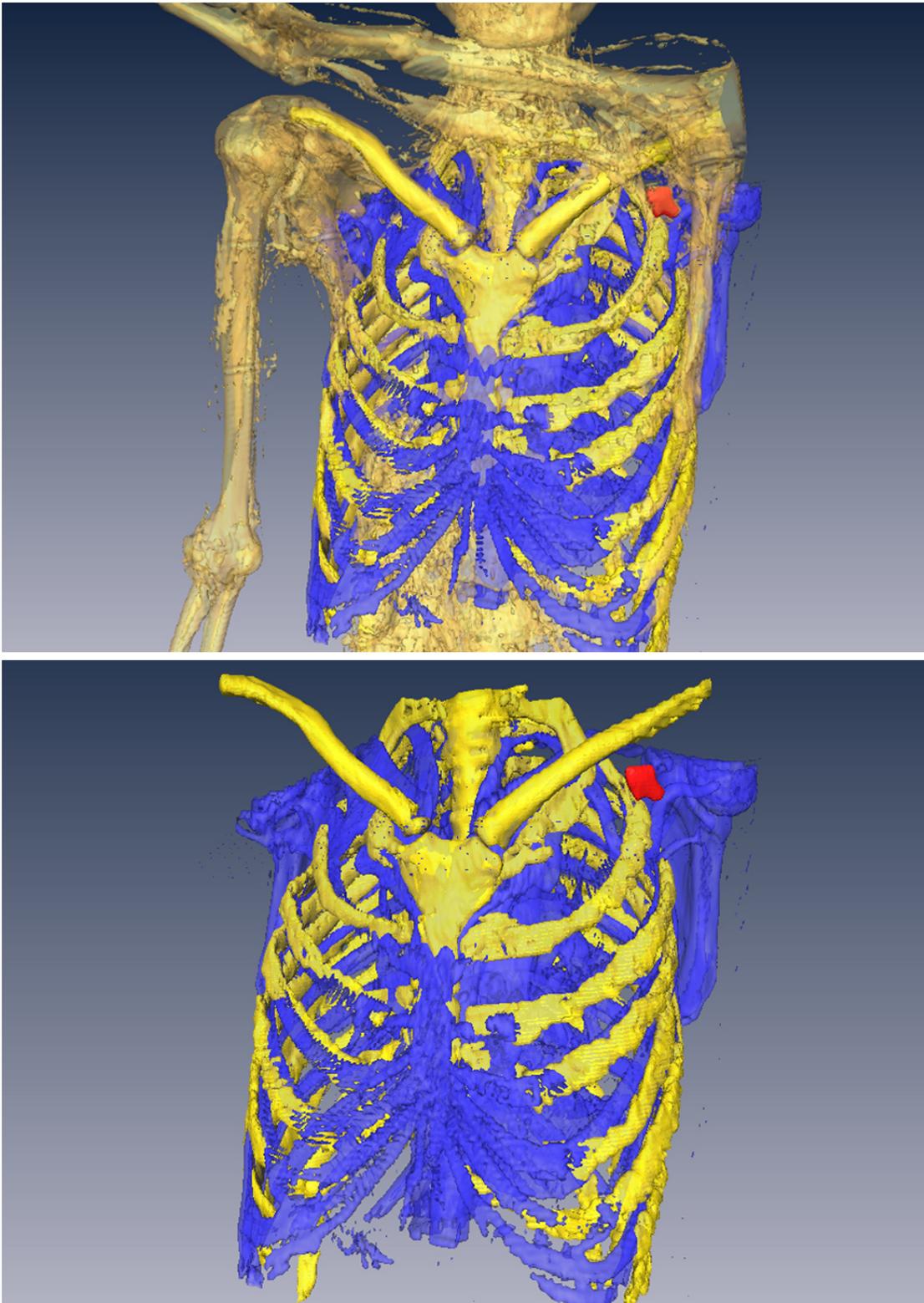


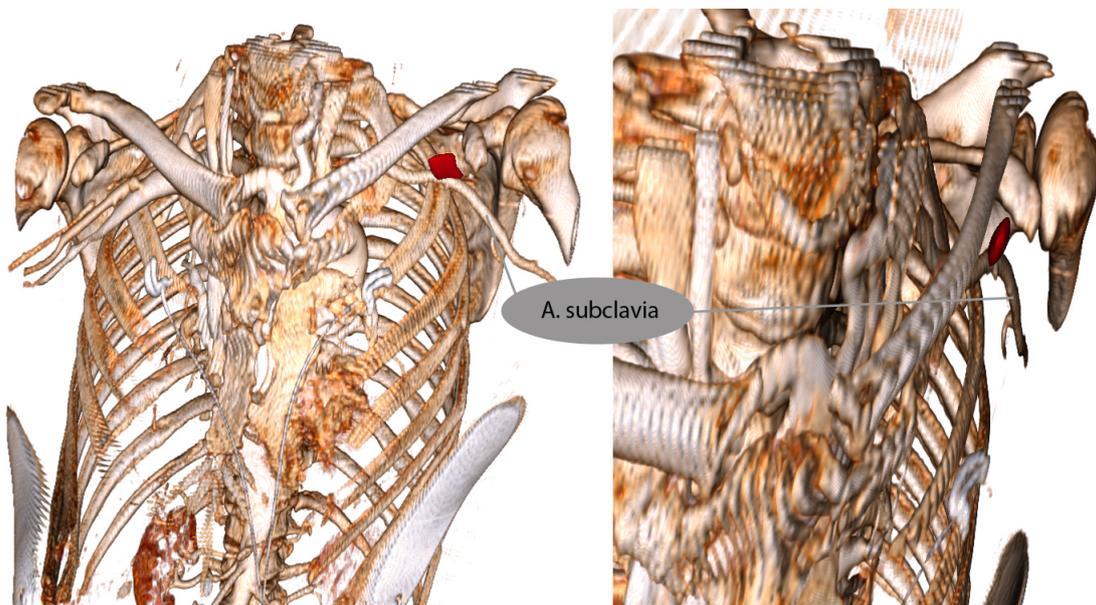
Abbildung 66: Visual Prospection von Datensatz 46m gemorph auf Ötzigeometrie. **Oben:** 46m mit Ötzi komplett. **Unten:** 46m in Korrelation zu den knöchernen Bestandteilen des Ötzi.

5.3.2 Datensatz 62m auf Ötzi registriert

Wie in Abbildung 67 zu sehen ist, ist eine noch deutlichere örtliche Nähe zur A. subclavia zu erkennen. Die V. subclavia ist in dieser Darstellung auf der linken Seite nicht zu sehen, da die Applikation des Kontrastmittels auf der rechten Seite erfolgte.

Tabelle 7: Statistische Auswertung der B-Spline Registrierungs- methode mit Datensatz 62m auf Ötzi. Gemessen wird jeweils der Abstand von den entsprechenden Landmarks im Vergleichsdatensatz 62m zu den homologen Landmarks im Ötzi-Datensatz. [Einheit = mm]

Reg.-Methode	Minimum	Maximum	Mittelwert	Varianz	Standardabw.
62m (B-Spline)	0,059	12,974	3,074	6,266	2,503



*Abbildung 67: Registrierter Datensatz 62m auf Ötzi-geometrie. **Links:** 62m in der Übersicht. **Rechts:** Axialer Blick von vorne auf die Pfeilspitze (in Rot).*

Abbildung 68 zeigt die anatomische Übereinstimmung des Morphings von Vergleichsdatensatz 62m auf Ötzi. In der Tabelle 7 ist die errechnete Abweichung angeführt.

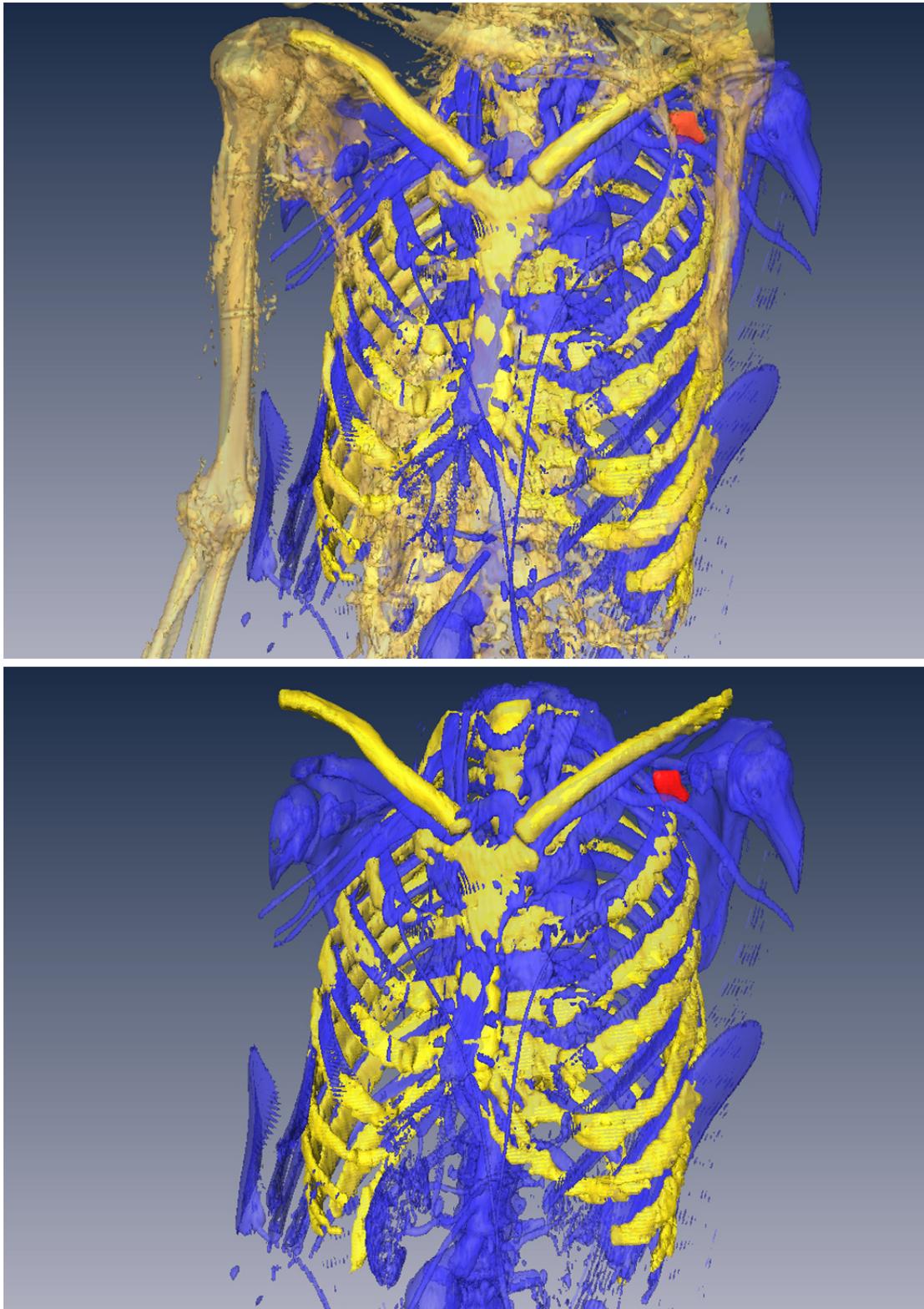


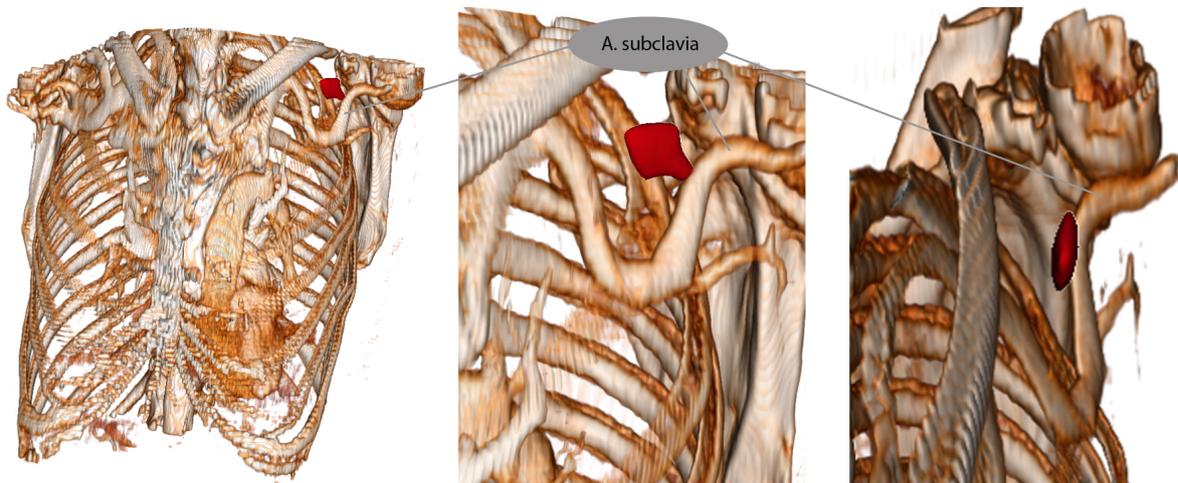
Abbildung 68: Visual Prospection von Datensatz 62m gemorpht auf Ötzi geometrie. **Oben:** 62m mit Ötzi komplett. **Unten:** 62m in Korrelation zu den knöchernen Bestandteilen des Ötzi.

5.3.3 Datensatz 86m auf Ötzi registriert

In Abbildung 69 ist eine Varietät im Verlauf der A. subclavia zu erkennen. Die V. subclavia ist in dieser Darstellung ebenfalls auf der linken Seite nicht zu sehen, da die Applikation des Kontrastmittels auf der rechten Seite erfolgte. Die Ansicht von vorne lässt vermuten, dass eine Verletzung der A. subclavia durch den außergewöhnlichen Verlauf nicht möglich wäre. Ein axialer Blick auf die Pfeilspitze verdeutlicht aber, dass ein Schuss mit Kontakt zu dieser Arterie aber dennoch sehr wahrscheinlich gewesen wäre.

Tabelle 8: Statistische Auswertung der B-Spline Registrierungs- methode mit Datensatz 86m auf Ötzi. Gemessen wird jeweils der Abstand von den entsprechenden Landmarks im Vergleichsdatensatz 86m zu den homologen Landmarks im Ötzi-Datensatz. [Einheit = mm]

Reg.-Methode	Minimum	Maximum	Mittelwert	Varianz	Standardabw.
86m (B-Spline)	0,228	14,418	4,081	9,926	3,151



*Abbildung 69: Registrierter Datensatz 86m auf Ötzi-Geometrie. **Links:** 86m in der Übersicht von vorne. **Mitte:** Großer Blick von vorne auf die Pfeilspitze. **Rechts:** Axialer Blick von vorne auf die Pfeilspitze (in Rot).*

Abbildung 70 zeigt die anatomische Übereinstimmung des Morphings von Vergleichsdatensatz 86m auf Ötzi. In der Tabelle 8 ist die errechnete Abweichung angeführt.

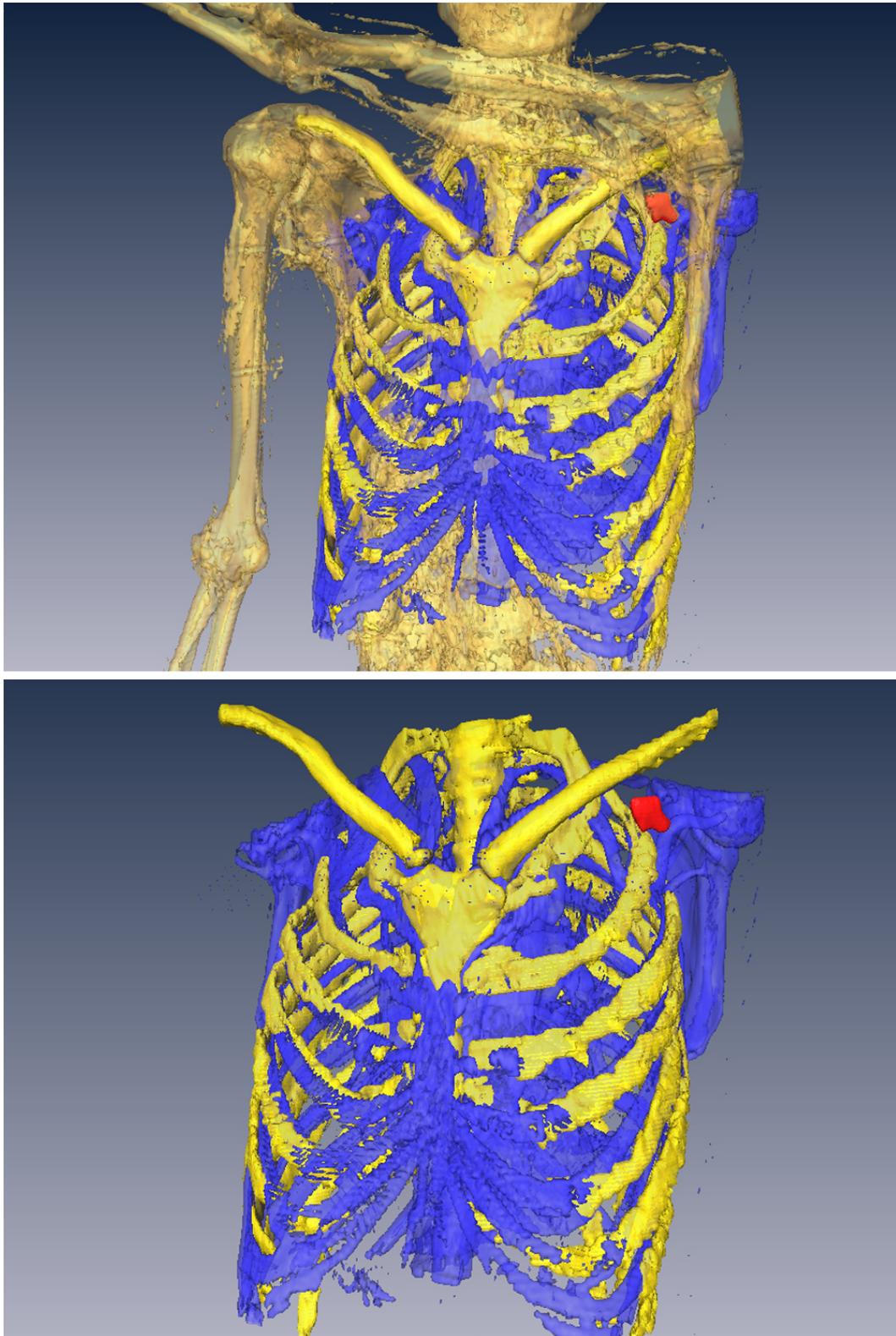


Abbildung 70: Visual Prospection von Datensatz 86m gemorphht auf Ötzigeometrie. **Oben:** 86m mit Ötzi komplett. **Unten:** 86m in Korrelation zu den knöchernen Bestandteilen des Ötzi.

5.4 Fragestellung 4: “Lässt sich das linke Schulterblatt des Ötzi virtuell reponieren? Welchen Einfluss hat das auf die Schussrichtung?”

Die unphysiologische Stellung der linken Schulter des Ötzi (siehe Abbildung 71) ist nicht nur sein Markenzeichen, es macht auch die Untersuchung der näheren Umstände der Pfeilschussverletzung sehr schwierig. Der Versuch, die Schulter virtuell zu reponieren, sollte weiteren Aufschluss über die perimortale Situation bringen.

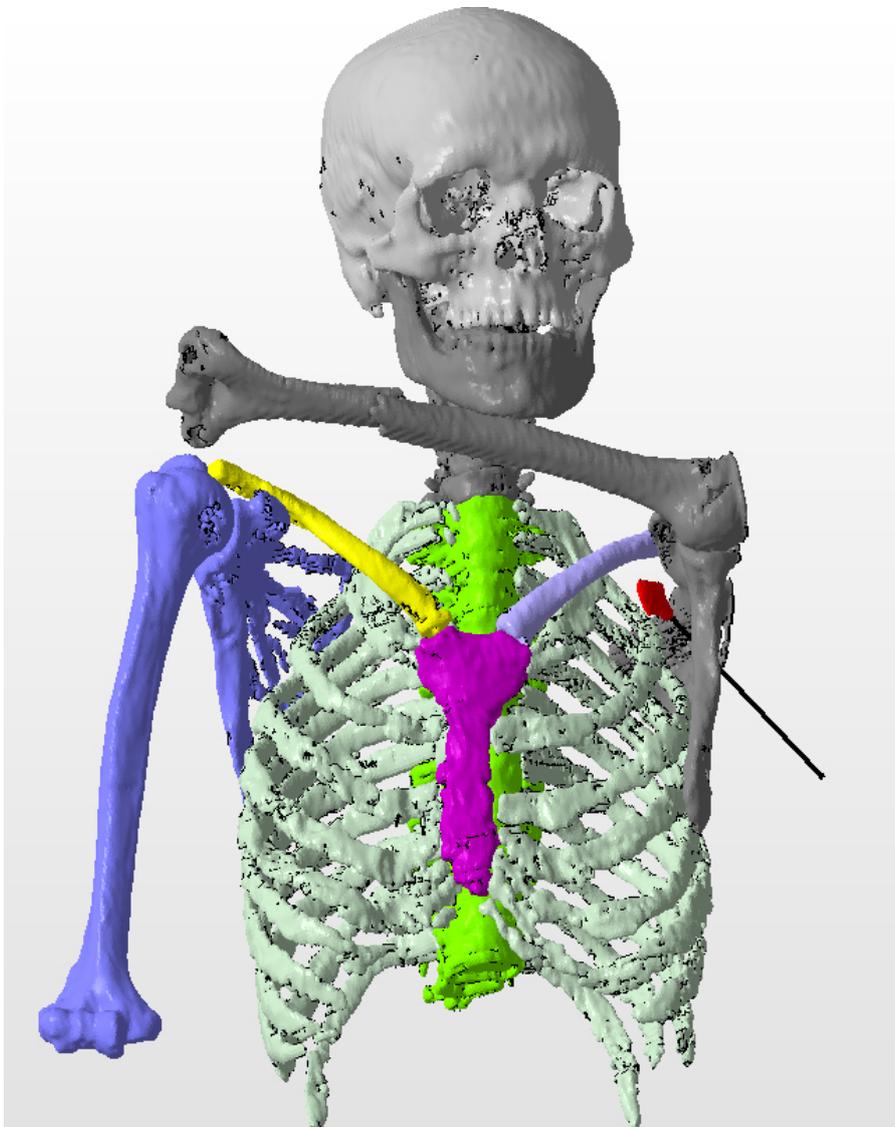


Abbildung 71: Ötzi's Schulter vor der virtuellen Reponierung. Der Pfeil mit angedeutetem Schaft in seiner Originalposition.

5.4.1 Lässt sich Ötzi's linke Schulter virtuell reponieren?

Um die mögliche Bewegung der Pfeilspitze im Fleisch im Laufe der mehr als 5.000 vergangenen Jahre ein wenig nachvollziehen zu können, wird die Pfeilspitze samt virtuellem Schaft beim Reponieren mitgeführt. Zuerst wird eine Kopie des stl-Files von Pfeilspitze und Schaft an das Schulterblatt gekoppelt, um die Bewegung bis zur reponierten Position der Scapula mitzumachen. In einem zweiten Schritt wird eine weitere Pfeilspitzenkopie an das Schlüsselbein gekoppelt, um einen Hinweis auf die Bewegungsdynamik der Pfeilspitze bezogen auf die Clavicula zu erhalten.

Das Ergebnis sind drei verschiedene Pfeilpositionen (siehe Abbildung 72), die einerseits die Bewegung der Schulter (Scapula und Clavicula) bei der Reponierung mit dokumentieren, und andererseits die mögliche Bewegung der Pfeilspitze im subskapulären Gleitlager veranschaulichen sollen. In reponierter Stellung wird das Einschussloch in der Scapula aufgesucht (Gostner and Egarter-Vigl, 2002; Pernter et al., 2007).

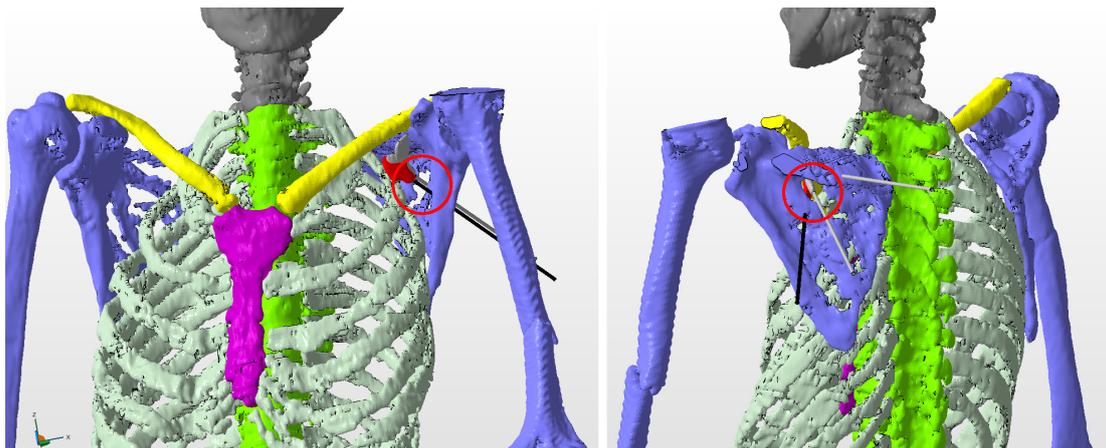


Abbildung 72: Ötzi's Schulter nach der virtuellen Reponierung mit den drei Pfeilpositionen. Der rote Kreis markiert das Einschussloch in der Scapula. **Links:** Ansicht von anterior. **Rechts:** Ansicht von posterior.

5.4.2 Rekonstruktion der Einschussrichtung

Auf der Verbindungslinie zwischen den drei in Abbildung 72 gezeigten Pfeilschaftpositionen lag der Kandidat für das Einschussloch in der Scapula. Das Loch, das auch im CT-Datensatz des Ötzi zu sehen ist und im Zusammenhang mit einem Hämatom beschrieben wird (Pernter et al., 2007) (Siehe Abbildung 73 roter Kreis). Im stl-File sieht diese Stelle aus wie ein großes Loch, das aber in Wirklichkeit keines sein muss. Dieses “Fehlen” von knöchernem Material ergab sich beim Segmentieren höchstwahrscheinlich aus dem Partialvolumeneffekt (siehe Seite 9) bei der Erstellung des Scans ob der Dünne dieser Struktur. Diese Lamelle ist beim lebenden Menschen schon sehr dünn und kann stellenweise auch fehlen (siehe Seite 13).

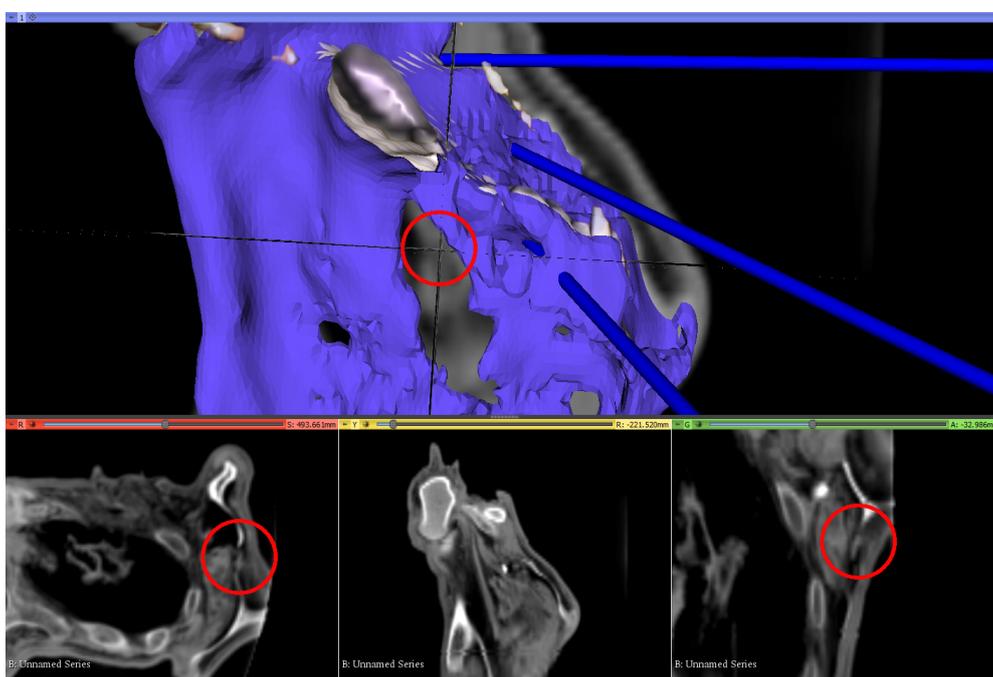


Abbildung 73: Einschussloch im Eismann-CT-Datensatz und im nicht reponierten stl-File sichtbar (tatsächliche Position des Einschussloches im Datensatz). **Oben:** Das nicht reponierte stl-File überlagert den CT-Scan des Eismannes. Im roten Kreis ist die Position des Knochendefektes markiert. **Unten:** Analoge Positionen im CT-Scan. Gut sichtbar in der axialen und der coronalen Schicht.

Im reponierten Schulterblatt liegt diese Einschuss-Stelle dann so, dass ein flacherer Einschusswinkel für den Todesschuss möglich wäre (siehe Abbildung 74).

Die drei Richtungen des Pfeiles bedeuten: Die unterste Position ist die originale Position im Datensatz. Die mittlere Position ergibt sich bei der Reponierung aufgrund der Bewegung der Pfeilspitze gemeinsam mit der Clavicula und die oberste Position ist die Position der Pfeilspitze, wenn sie den Weg der Scapula mit beschreiben würde.

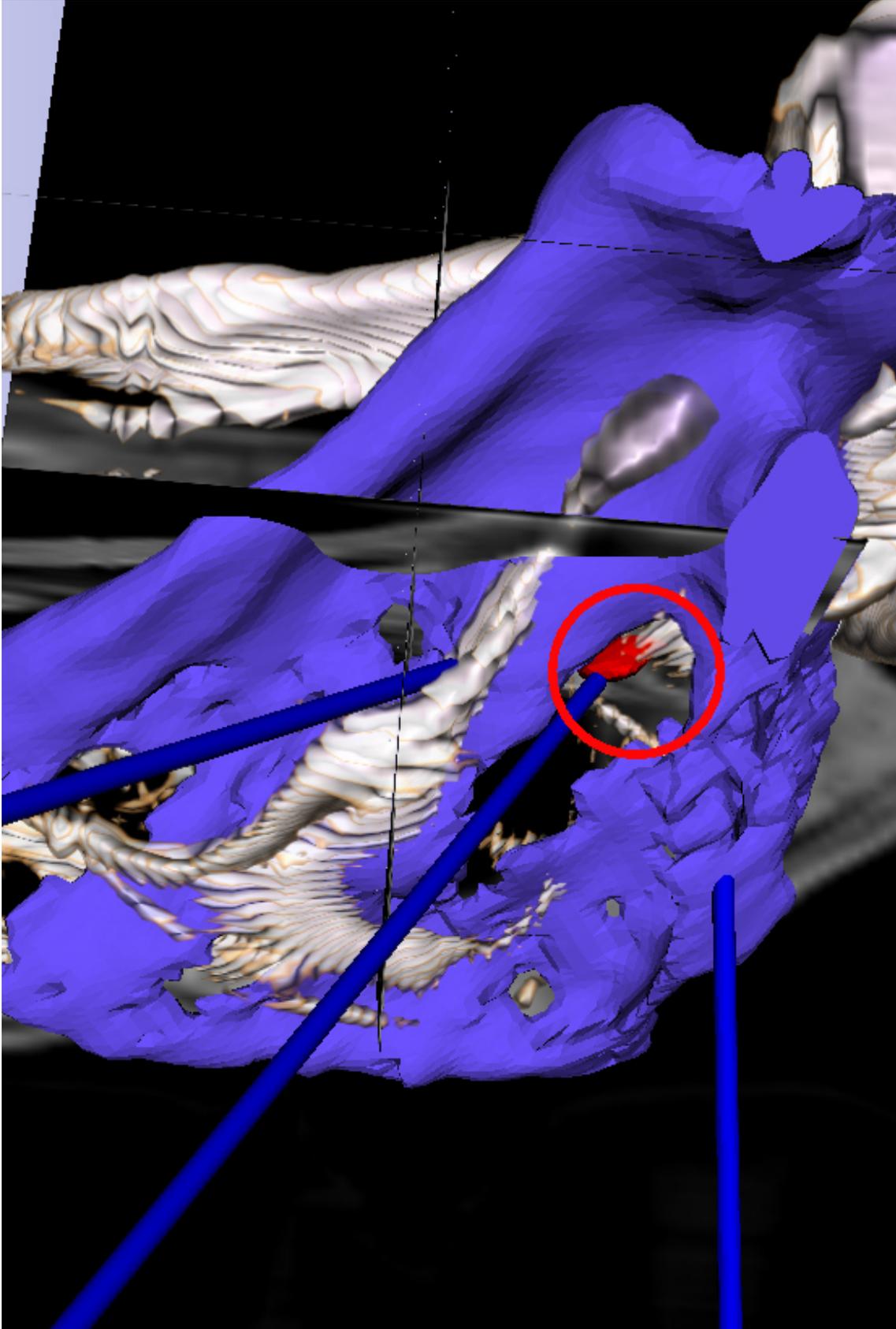


Abbildung 74: Einschussloch im reponierten stl-File. Das reponierte stl-File überlagert den CT-Scan des Eismannes (angenommene Position des Einschussloches aufgrund des beschriebenen Knochendefektes (Pernter et al., 2007) im reponierten Zustand). Im roten Kreis ist die Position des Knochendefektes markiert.

Auf eine Montage eines Skeletts aus dem Datensatz 50m, das in eine stehende Position gebracht wurde, wird die Ötzi-Anatomie superimponiert. In dieser Visualisierung würde der mittlere Pfeil (grün) einen Einschuss von leicht aufwärtsgerichteter bis annähernd horizontaler Schussabgabe erwarten lassen (siehe Abbildung 75).

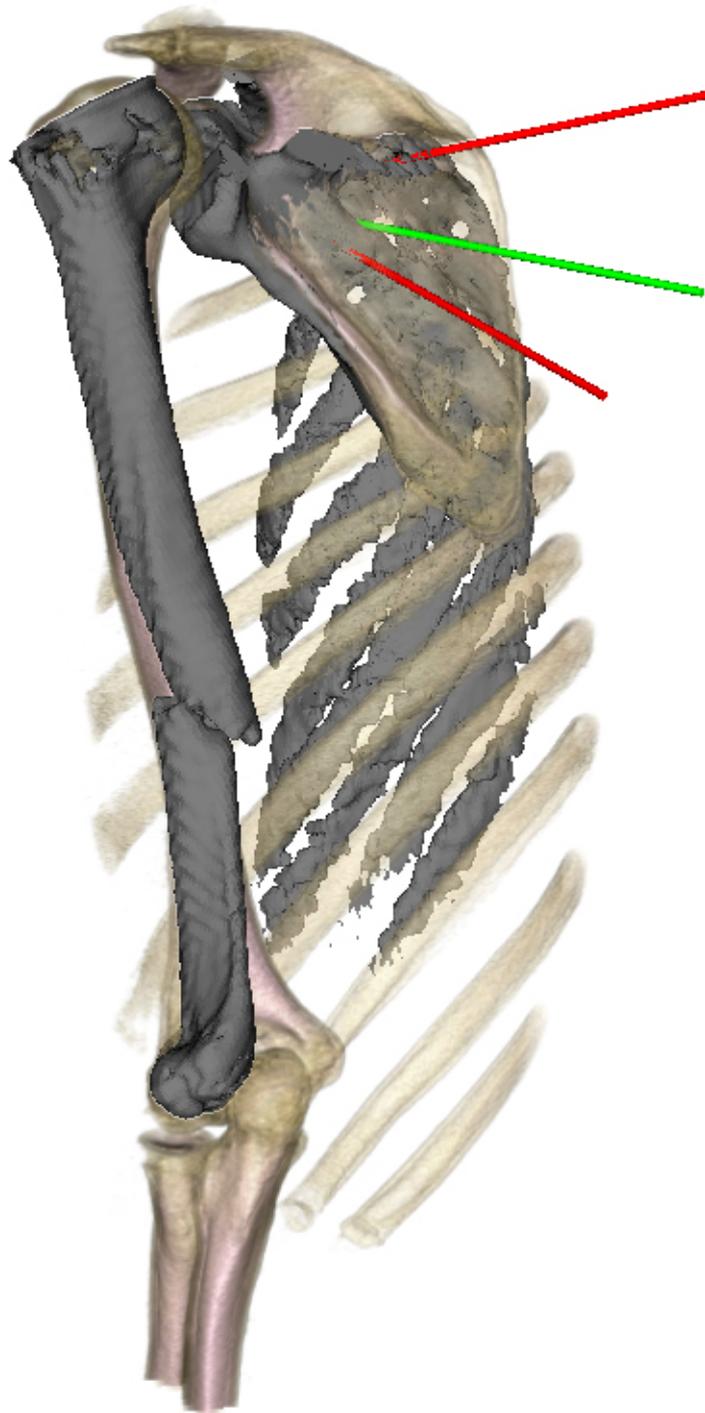


Abbildung 75: Einschusswinkel bei stehendem Menschen - Simulation. Bei einem Menschen in Grundstellung (Datensatz 50m) könnte der Schütze leicht bergauf bis annähernd horizontal geschossen haben.

Auf das Foto des Ötzi gemappt (aus [Gostner and Egarter-Vigl \(2002\)](#)), lässt sich eine weitere Variante des Einschusskanals rekonstruieren (siehe Abbildung 76). Der rote Pfeilschaft repräsentiert die aktuelle Lage der Pfeilspitze in der Mumie. Der grüne Pfeilschaft zeigt die Verbindung zwischen Hautdefekt des vermuteten Einschussloches ([Gostner and Egarter-Vigl, 2002](#)) und Pfeilspitze im Eismann.

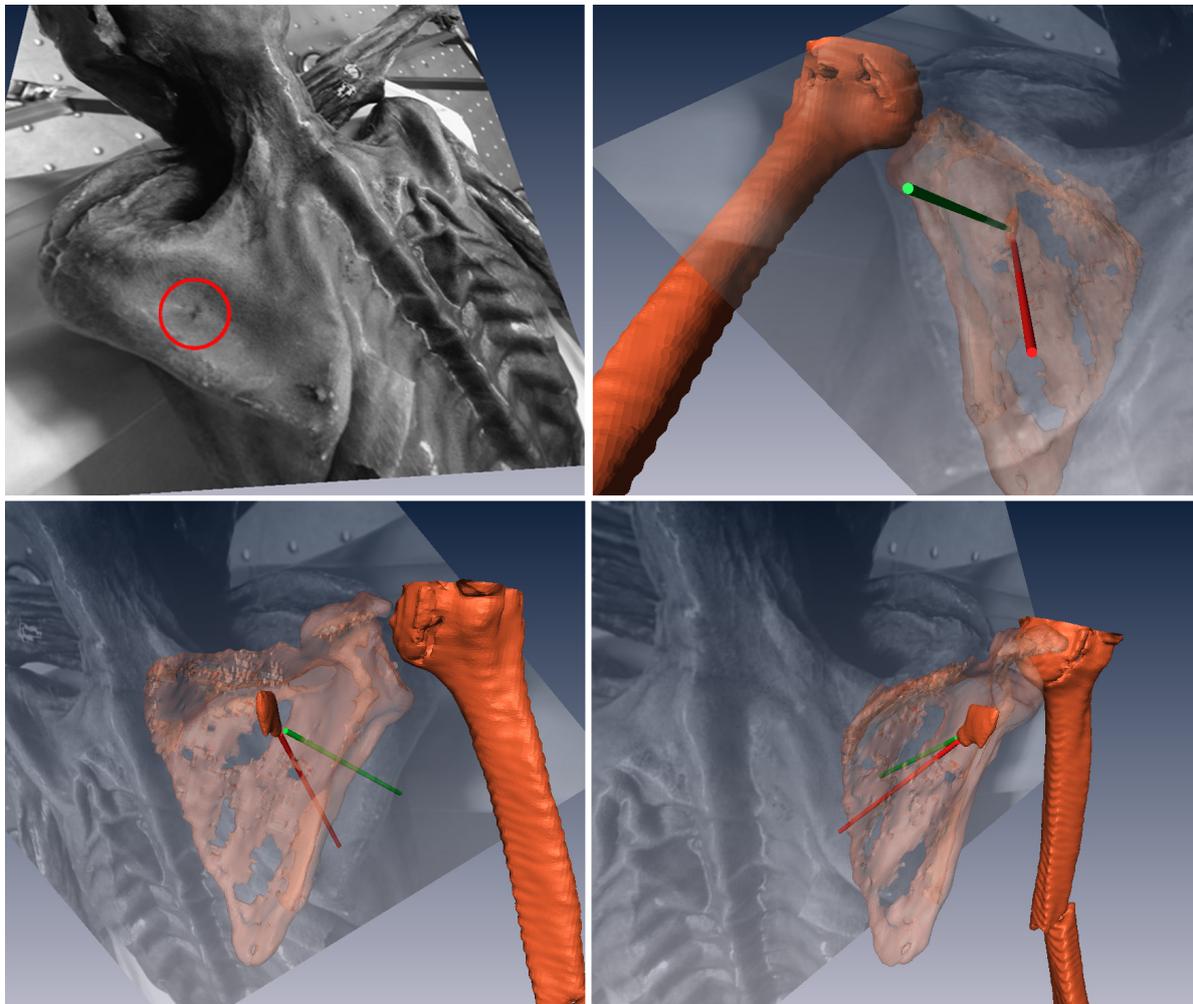


Abbildung 76: Bei der Überlagerung von *stl*-Daten der reponierten Scapula mit dem Foto aus [Gostner and Egarter-Vigl \(2002\)](#) lässt sich eine mögliche causale Verbindung zwischen dem als Einschussloch angenommenen Hautdefekt (rote Kreismarkierung) und dem angenommenen Einschussloch im Schulterblatt ([Gostner and Egarter-Vigl, 2002](#)) erkennen. In der oberen Reihe ist der Blick auf die Rückseite des Ötzi gerichtet, die untere Reihe zeigt eine ventrale Sicht auf die beiden Pfeilschäfte.

5.5 Fragestellung 5: “Wie sieht die Lage der Pfeilspitze in diesem anatomischen Kontext aus? Hat dies Einfluss auf die Schussrichtung?”

Wenn man sich den Ötzi aufrecht stehend vorstellt, dann hätte sich die Lage der Pfeilspitze durch die Drehung des Schulterblattes bei der Reponierung lediglich in eine flachere Einschussposition verortet (siehe Abbildung 75). Auf die Position der Pfeilspitze selbst hätte diese Bewegung kaum Einfluss gehabt. Sie bliebe mit sehr großer Wahrscheinlichkeit in unmittelbarer Nähe der großen neurovasculären Strukturen der linken oberen Extremität liegen. Die veränderte Geschoss-Situation wird durch die Abbildungen 77, 78 sowie 79 illustriert.

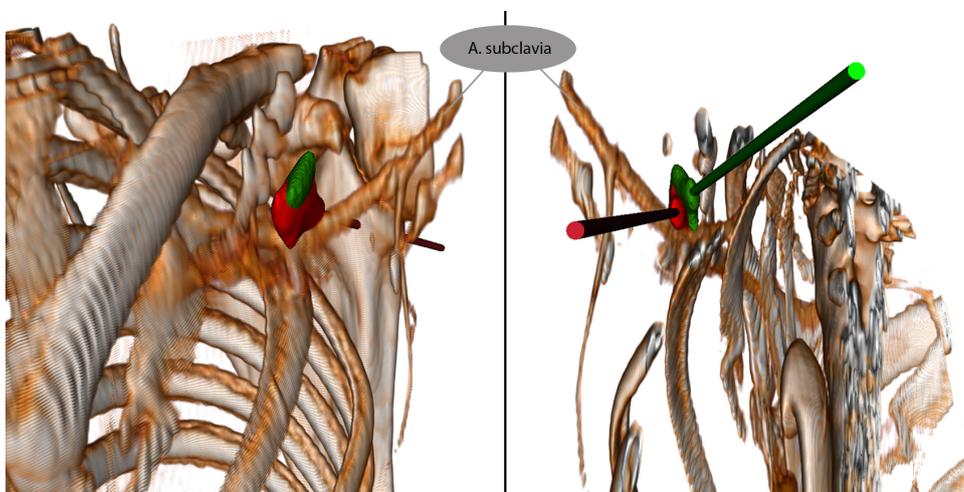


Abbildung 77: Neuer, flacherer Einschusswinkel im Vergleichsdatensatz 46m. Die Spitze des Pfeiles hat ihre Position kaum verändert. Der rote Pfeil zeigt die alte Einschussrichtung, der grüne Pfeil die neue.

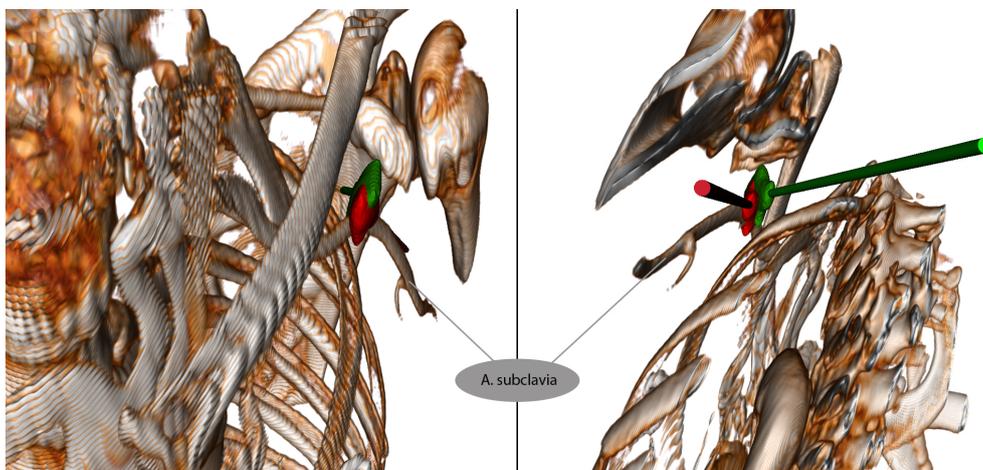


Abbildung 78: Neuer, flacherer Einschusswinkel im Vergleichsdatensatz 62m. Die Spitze des Pfeiles hat ihre Position kaum verändert. Der rote Pfeil zeigt die alte Einschussrichtung, der grüne Pfeil die neue.

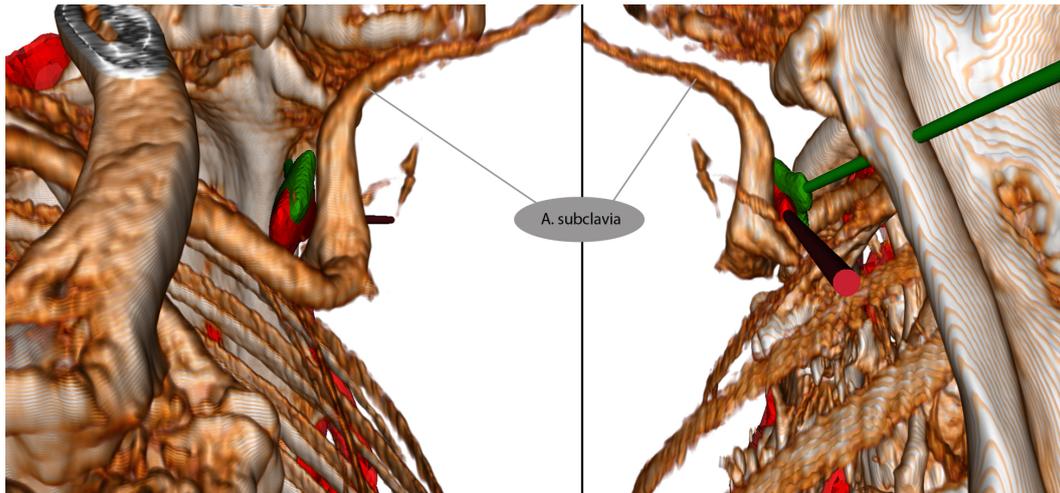


Abbildung 79: Neuer, flacherer Einschusswinkel im Vergleichsdatensatz 86m. Die Spitze des Pfeiles hat ihre Position kaum verändert. Der rote Pfeil zeigt die alte Einschussrichtung, der grüne Pfeil die neue.

Wenn man im Szenario mit der Fotomontage das Einschussloch in der Scapula in die direkte Linie zwischen Pfeilspitze und Hautverletzung bringt (leichte Anteversion der Scapula), wäre ebenfalls ein Einschuss aus flacherem Winkel möglich (siehe Abbildungen 80, 81 und vgl. Abbildung 20ff.).

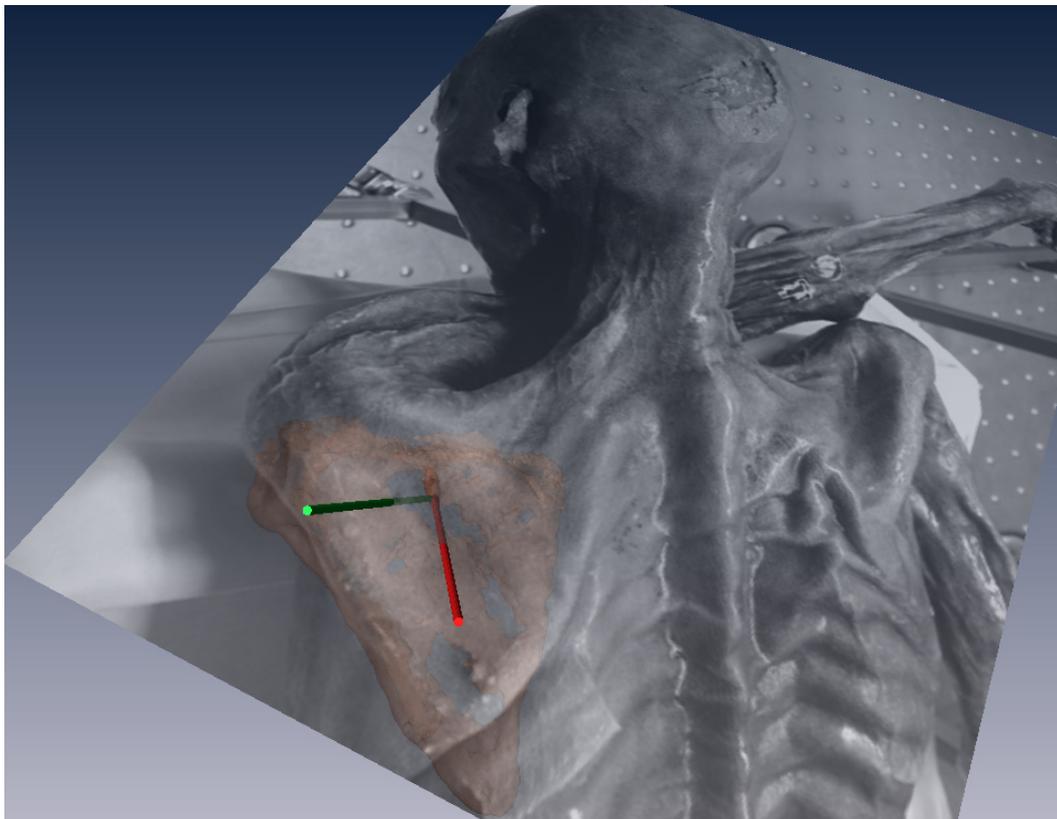


Abbildung 80: Flacherer Einschusswinkel auch in der Fotomontage - Ansicht von dorsal. Der grüne Schaft zeigt die Verbindung zwischen Hautdefekt und Pfeilspitze, der rote Schaft die derzeitige Richtung der Pfeilspitze.

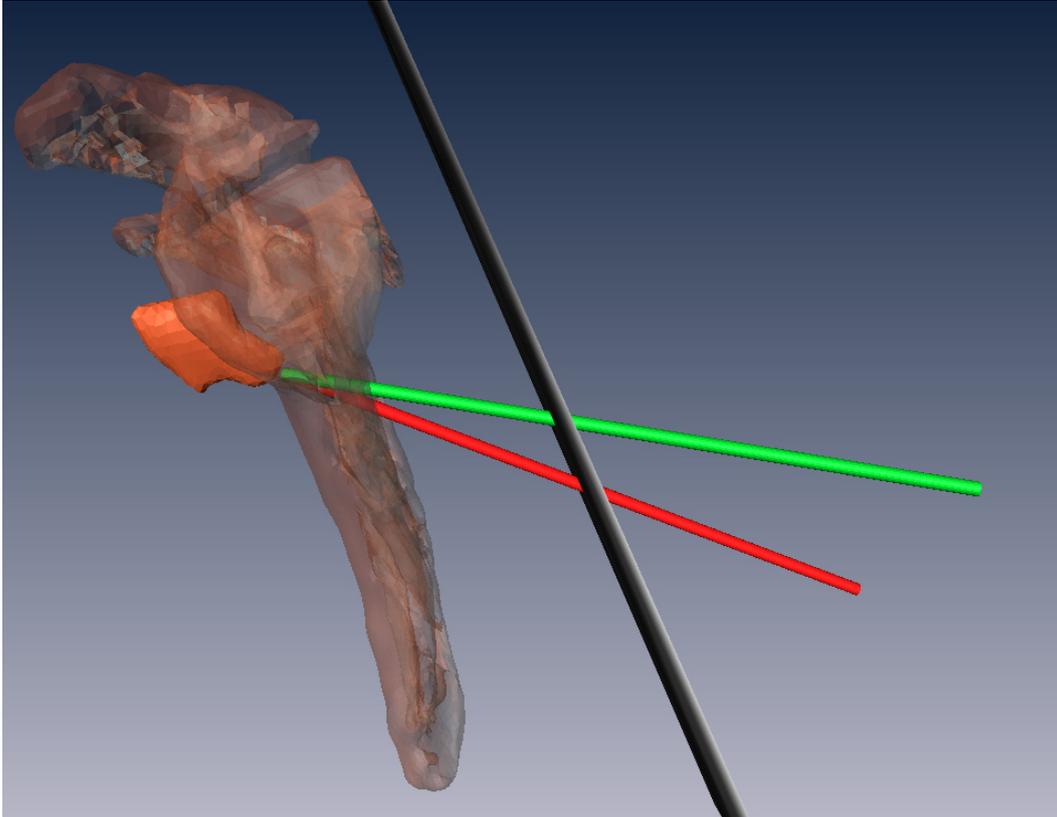


Abbildung 81: Flacherer Einschusswinkel auch in der Fotomontage - Ansicht von lateral. Der grüne Schaft zeigt die Verbindung zwischen Hautdefekt und Pfeilspitze, der rote Schaft die derzeitige Richtung der Pfeilspitze.

Unabhängig voneinander ist beiden methodischen Zugängen, nämlich dem Reponieren der Scapula und Mitbewegen der Pfeilspitze und der leichten Anteversion der reponierten Scapula, dass sich eine Verflachung des Einschusswinkels ergibt.

6. Diskussion

In der vorliegenden Arbeit ging es darum, die vorliegenden Forschungsfragen schlüssig und unvoreingenommen, lediglich basierend auf radiologischen Daten (CT-Volumendatensätzen), auszuarbeiten und im Sinne einer potentiellen Stellungnahme in radiologischer Hinsicht inklusive Bildver- und -nachbearbeitung realistisch darzustellen. Die CT-Daten wurden 1994 in Innsbruck erzeugt, ein Zugriff auf die neuesten Scans aus den Jahren 2001, 2005 und 2013 im LKH Bozen war - trotz schriftlicher Anfrage des Dissertationsbetreuers Dr. Recheis in Bozen - während des Entstehens dieser Arbeit zu unser beider großem Bedauern nicht möglich. Eine Verbesserung der Ausgangs-Datenqualität wäre zu erwarten gewesen. Es sei hier explizit darauf hingewiesen, dass keinerlei Intention für einen Interessenskonflikt mit Südtirol besteht. Eine Kooperation wäre hier äußerst wünschenswert gewesen.

6.1 Genauigkeit

Ein statistischer Atlas im Sinne der GPA wurde im Zuge dieser Ausarbeitung nicht entwickelt, da das Verhältnis von aufgewendeter Zeit zum erwarteten Ergebnis in keiner Relation stehen würde. Eine Verbesserung der Genauigkeit des Ergebnisses auf 1 bis 2 mm statt der derzeit errechneten 2 bis 3 mm würde die Position der Pfeilspitze vielleicht um eine Nuance verschieben, aber am gefundenen Ergebnis per se keine grundsätzliche Änderung herbeiführen.

Die Lage der Pfeilspitze im Ötzi kann, wenn man die gemappten Datensätze zur vasculären Darstellung zu Grunde legt, als primär vitalgefährdend bezeichnet werden. In unserem Falle liegt sie in einem Abstand von 0,6 bis 7,2 mm bis zu den großen neurovasculären Strukturen der linken oberen Extremität. Selbst nach der virtuellen Reponierung der Schulter und Rekonstruktion der neu angenommenen Einschussrichtung, bleibt die Pfeilspitze in einer potentiell vitalgefährdenden Position liegen.

Ebenso beim Datensatz 86m, der eine Anomalie im Verlauf der linken A. subclavia zeigt, hätte sich die Pfeilspitze auf ihrer Bahn durch den Körper in deren unmittelbarer Nähe befunden. Die Wahrscheinlichkeit für eine Gefäßverletzung wäre auch in diesem Falle groß gewesen (siehe Abbildung 79 auf Seite 93).

Die Möglichkeit einer primär tödlichen Verletzung durch den Pfeil ist in diesem Szenario als sehr hoch einzustufen, da in jedem der drei Versuche in der Fragestellung 2 die Pfeilspitze in unmittelbarer Nähe der großen neurovasculären Strukturen der linken oberen Extremität zum Liegen kam. Wenn nicht schon beim Einschuss die großen Gefäße und/oder der Plexus brachialis verletzt wurden (siehe Kapitel 1.7.3 auf Seite 50), so ist es spätestens durch das Herausziehen des Pfeilschaftes und der dadurch einwirkenden mechanischen Gewalt auf das umliegende Gewebe sehr wahrscheinlich zu einer Verletzung dieser Strukturen (siehe Kapitel 1.4.2 auf Seite 32), gekommen.

6.2 Lage der Gefäße

Das Registrieren von CT-Datensätzen von Vergleichsindividuen auf den CT-Datensatz des Ötzi hat das erwartete Ergebnis gebracht und Blutgefäße der Vergleichsindividuen (siehe Erläuterung zur Ethik im Anhang Kapitel A.1 auf Seite 113) sichtbar gemacht. Der weitere Nutzen dieser Technik ist darin zu sehen, dass die Vergleichsanatomie, auf Ötzi-Topographie gebracht, virtuell mit der projizierten Position der Pfeilspitze aus dem Ötzi versehen werden kann und somit über die vitalgefährdende Lage des Pfeilschusses befunden werden kann. Die A. und V. subclavia stehen in dieser Ausarbeitung stellvertretend für “neurovasculäre Strukturen der oberen Extremität”. Die Nerven sind in einem CT nicht darstellbar. Zur besseren Illustration ist auf Seite 19 in der Abbildung 16 ein anatomischer Schnitt auf etwa Höhe TH2 abgebildet.

Die linke V. subclavia konnte aufgrund des Ortes der Kontrastmittelapplikation nur im Datensatz 46m dargestellt werden (siehe Abbildung 82). In diesem Datensatz kamen die Pfeilspitzen in einer Entfernung von 9,76 mm (Distanz P-V: Von der Mitte der Pfeilspitze bis zur Mitte des Gefäßes) von der V. subclavia entfernt zum Liegen.

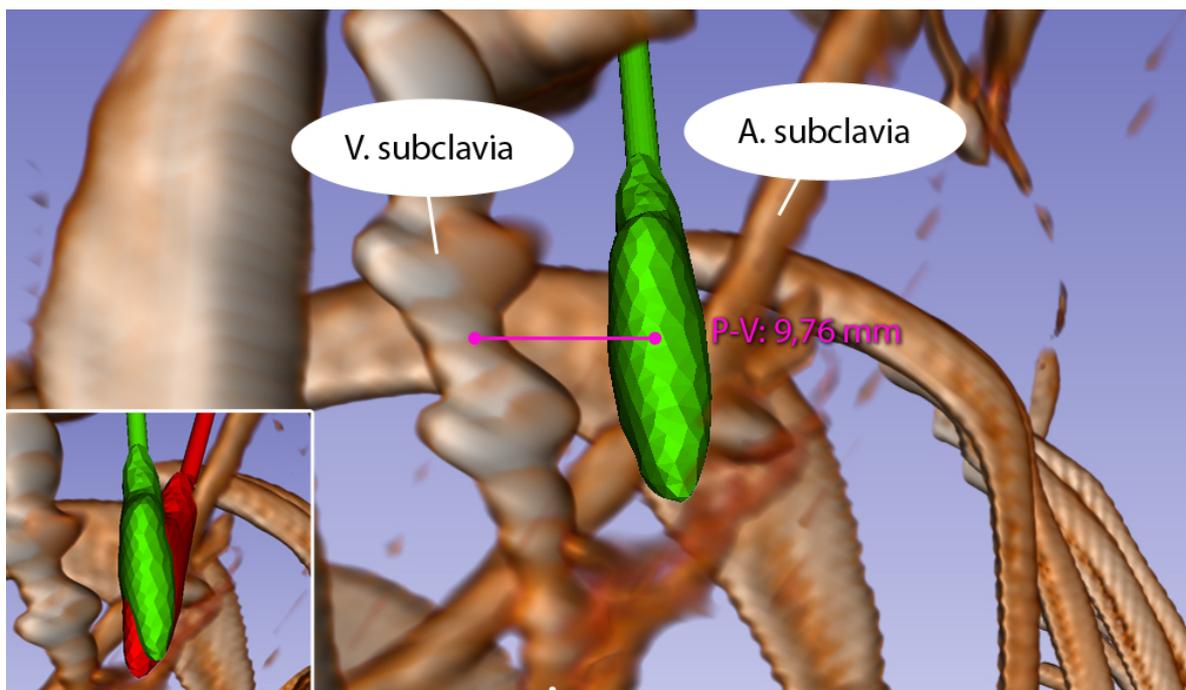


Abbildung 82: Pfeilspitze in der Nähe der V. subclavia in 46m. Die Distanz (P-V) von der Mitte der Pfeilspitze bis zur Mitte der V. subclavia beträgt gemessene 9,76 mm. Das kleine Fenster links unten zeigt beide Pfeilspitzen in der selben Lokalisation. (Der rote Pfeil zeigt die alte aktuelle Lage des Pfeiles, der grüne Pfeil zeigt die neu angenommene Einschussrichtung.)

In den Beispielen 46m und 62m hatte sowohl der rote (Originallage des Pfeiles) wie auch der grüne Pfeil (angenommene Einschussrichtung nach Reponierung der Schulter) unmittelbaren Kontakt mit der linken A. subclavia (siehe Abbildung 83).

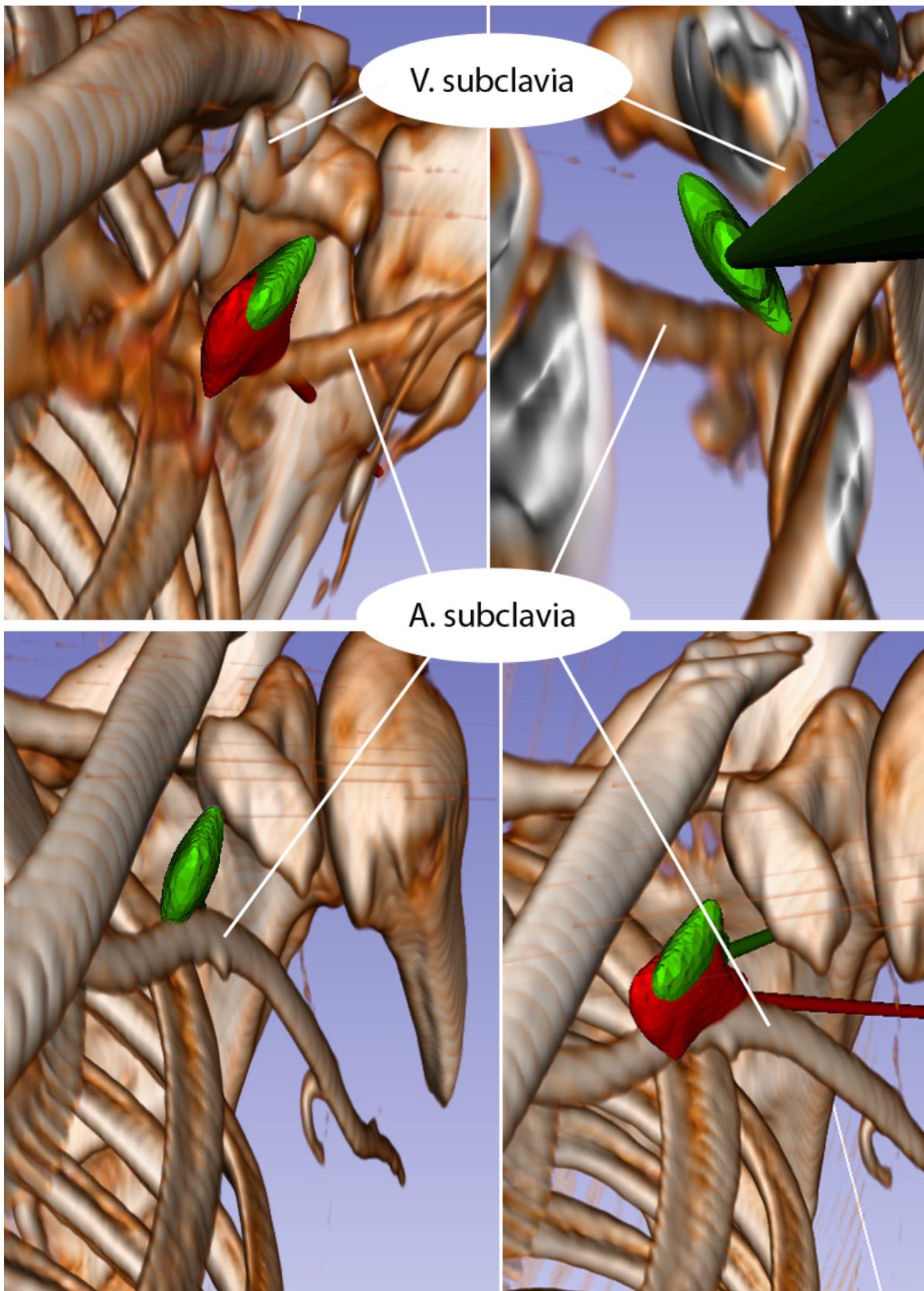


Abbildung 83: Treffer der A. subclavia in 46m (oben) und 62m (unten). Der rote Pfeil zeigt die alte aktuelle Lage des Pfeiles, der grüne Pfeil zeigt die neu angenommene Einschussrichtung.

Selbst der Umstand, dass das Individuum 86m eine anatomische Anomalie der A. subclavia aufweist, wäre in diesem Fall kein ausreichender Schutz gewesen, da die Eintrittsrichtung des Pfeiles die A. subclavia sehr wahrscheinlich in beiden Fällen (alt und neu) verletzt hätte (siehe Abbildung 84). In der originalen Lage berührt die Pfeilspitze die A. subclavia. In der neu angenommenen Lage liegt sie in einem Abstand von 7,14 mm (Distanz P-A: Mitte Pfeilspitze bis Mitte Gefäß) von der A. subclavia entfernt.

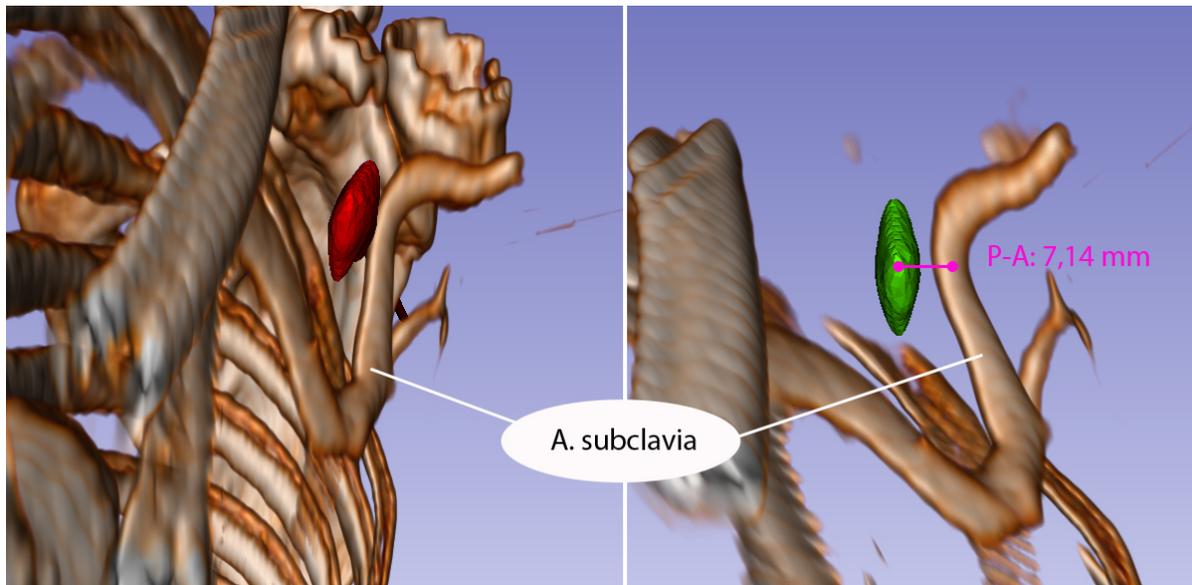


Abbildung 84: Pfeilspitze in der Nähe der A. subclavia in 86m. Die Distanz (P-A) von der Mitte der Pfeilspitze bis zur Mitte der V. subclavia beträgt gemessene 7,14 mm. (Der rote Pfeil zeigt die alte aktuelle Lage des Pfeiles, der grüne Pfeil zeigt die neu angenommene Einschussrichtung.)

Die “Steckschusshypothese” erscheint aus Sicht dieser Ausarbeitung als eher unwahrscheinlich, da die unmittelbare Nähe der Pfeilspitze zu den neurovasculären Strukturen in den registrierten Volumina einfach gegeben ist. Es ist auch zu bedenken, dass die Maße in Abbildung 63 auf Seite 78 aus den Vergleichsdatensätzen und somit aus einem “feuchten” Präparat gewonnen wurden, während die Zahlen aus Abbildung 64 vom mumifizierten Corpus des Ötzi stammen.

6.3 Virtuelles Reponieren

Die virtuelle Reponierung des Schulterblattes des Eismannes bringt weitere Erkenntnisse über eine mögliche Position des Schützen und dadurch auch weitere Erkenntnisse über neue mögliche Todesszenarien. Auch konnte dadurch der Einschusswinkel neu gedeutet werden.

Die Verbindung zwischen dem Einschussloch in der Haut und dem Einschussloch in der Scapula in Abbildung 76 stimmt in dieser Stellung des Schulterblattes nicht exakt (siehe “Kulisseneffekt” auf Seite 49). Wenn man bedenkt, dass der Eismann in seiner schützenden Grube gesessen ist und möglicherweise stark erschöpft seine Verletzungen versorgt

hat, während der Bogenschütze den lebensbedrohlichen Schuss abgegeben hat, so kann man annehmen, dass das Schulterblatt sich in einer Anteversion befunden haben könnte. Durch die kongruente Einstellung von Hautdefekt, Einschussloch im Schulterblatt und Lokalisation der Pfeilspitze konnte die Einschussrichtung letztendlich schlüssig rekonstruiert werden (siehe Abbildung 80 auf Seite 93 und Abbildung 81 auf Seite 94).

6.4 Vermuteter Tathergang

Ötzi könnte das Opfer einer Kampfhandlung in einem Stammeskrieg gewesen sein. Bei aperen Bedingungen im Spätfrühling bzw. Frühsommer (Dickson et al., 2000) flüchtet der Eismann sich in eine Vertiefung, in der er Schutz sucht. Von Kampfhandlungen im Vorfeld verletzt, behandelt er seine Wunden und nimmt Nahrung zu sich (Rollo et al., 2002; Oeggl et al., 2007). Ötzi hat eine Verletzung an seinem rechten Orbitalrand (Recheis et al., 2011). Das Vorhandensein von Vivianit am Fundort und in seinem Gesicht ist ein möglicher Hinweis auf eine starke Blutung (Thali et al., 2011) (siehe auch Abbildung 85).



Abbildung 85: Zusätzliche Verletzungen des Ötzi. **Links** ist die Kerbe (blauer Pfeil) am rechten Orbitalrand des Ötzi zu sehen (5mm tief und 2mm breit). Vermutlich durch eine Axt oder ein Messer durch einen starken Hieb verursacht. **Mitte:** Der gelbe Pfeil markiert die Hautverletzung über der Knochenfraktur. **Rechts** sind Vivianitkristalle zu erkennen (blaue Punkte). ((Recheis et al., 2011))

Als Ötzi also in die Senke kommt und seinen Rucksack, Werkzeuge, Bogen etc. ablegt, kauert er sich völlig erschöpft nieder. Möglicherweise möchte er seine Wunden versorgen oder er ist von vorhergehenden Kampfhandlungen schon so benommen, dass er nur Kräfte sammeln und vielleicht etwas Nahrung zu sich nehmen möchte. Plötzlich erscheint sein Verfolger oder auch mehrere und er bekommt den Schuss ab, der ihm letztendlich sein Leben kosten wird. Der Schütze eilt noch schnell herbei, zieht den Schaft aus der Wunde und zieht weiter. Der Eismann fällt nach einiger Zeit völlig entkräftet vorne über und bleibt liegen. Spuren eines Pfeilschaftes wurden in der Mumie nicht gefunden. Das kostbare Bronzebeil bleibt vermutlich aus Zeitmangel ob der angenommenen Massen-Auseinandersetzung liegen...

Bald darauf bricht eine Schlechtwetterfront über die Berge herein, Ötzi wird zugeschneit und für die nächsten 5.300 Jahre im Eis eingeschlossen.

6.5 Final Statement:

Die vorliegende Arbeit habe ich aus wissenschaftlichem Interesse an der Thematik und neben meiner Vollzeitbeschäftigung beim Österreichischen Rundfunk in meinem Home-Office geschrieben. Aufgrund meiner erworbenen Kompetenzen aus Anthropologie, Radiologietechnologie sowie dem dazugehörigen technischen Masterstudiengang MedTech an der FH Wiener Neustadt war es mir möglich, fächerübergreifend und interdisziplinär zu arbeiten.

Die heutigen Möglichkeiten, die Breitbandinternet und Heimcomputer bieten, erlauben eine Arbeitsweise, die vor 20 Jahren noch undenkbar war. Im Entstehungsweg meiner Arbeit hatte ich viele Telefon- und Videokonferenzen mit meinem Betreuer Dr. Wolfgang Recheis und Prof. Karl-Heinz Künzel. Ebenso war es von zu Hause aus ohne Probleme möglich, eine Expertise aus Madrid von Dr. Markus Bastir einzuholen. Ich hatte auf diese Weise die Möglichkeit, online den Stand meiner Arbeit mit der wissenschaftlichen Community, die mich begleitete, zu teilen.

Der Begriff des “Life-Long-Learning” sollte nicht nur ein politisches Schlagwort bei Sonntagsreden sein, es sollte vielmehr die reale Möglichkeit für Interessierte geben, die komplette Palette der Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten neben einer Berufsausübung zu absolvieren. Das schliesst für mich persönlich auch die Möglichkeit eines späten und berufsbegleitenden Doktoratsstudiums mit ein. Dazu sehe ich sowohl Bildungseinrichtungen wie auch die Politik aufgefordert.

Der Fachjargon der einzelnen Wissensbereiche sollte keine Barriere für eine interdisziplinäre Herangehensweise an Forschungsfragen darstellen!

7. Ausblick

Kann man den Brustkorb des Ötzi so reponieren, dass Vergleichsdatensätze ohne große Verzerrung auf die Ötzi-Topographie registriert werden können?

7.1 Ötzi's Thorax-Rekonstruktion

Für die realistischere Darstellung von Ötzi's Thorax wurde von der Forschungsgruppe um Markus Bastir in Madrid mittels Generalized Procrustes Analysis (GPA) der Thorax jenes Individuums ausgewählt, dem die 5. Rippe am besten gleicht. Dieser **Modellthorax** (siehe Abbildung 89) war dann schlussendlich die Vorlage zur manuellen Rekonstruktion von Ötzi's Brustkorb. Das ausgewählte Brustkorb-Modell war größer als der Thorax des Eismannes. Deshalb wurde der gesamte Brustkorb so lange skaliert, bis die Länge der beiden 5. linken Rippen einander entsprach. Mittels ARTEC-Software wurden dann alle anderen einzelnen Rippen des Ötzi händisch an die Position der jeweiligen Rippe dieses Modellthorax gebracht.

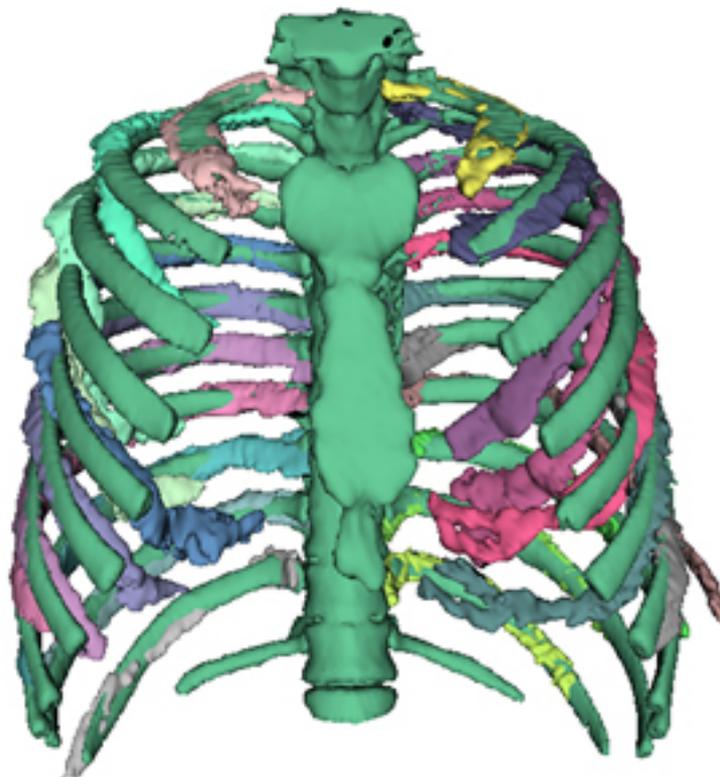


Abbildung 86: Händische Überlagerung des Eismann-Thorax von frontal. Auffällige anatomische Varietät ist das Fehlen des 12. Rippenpaares. (Zur Verfügung gestellt von Daniel García-Martínez / Forschungsgruppe Markus Bastir, Madrid, Spanien)

Obwohl die Rippen des unteren und oberen Thoraxanteiles sehr gut auf das hypothetische Modell passen, so weichen sie im mittleren Teil davon ab. Der Grund für diese schlechte Passung dürfte ihrer speziellen Taphonomie geschuldet sein. Ebenso ist der distale Rippenanteil im unteren Bereich des Thorax aufgrund eben dieses Umstandes weniger passend als der proximale Anteil, der sehr gut passt. Es wäre noch zusätzliche Arbeit zur Entzerrung der sternalen (distalen) Anteile der Rippen nötig, wie besonders von Rippe 2 bis 6 auf der rechten Thoraxseite auffällt (siehe Abbildung 86). Als Besonderheit ist noch das Fehlen des 12. Rippenpaares als anatomische Varietät zu erwähnen.

Weitere Arbeit zur vollständigen Rekonstruktion des deformierten Eismann-Thorax ist nötig. Dennoch ist die bereits gewonnene grobe Rekonstruktion schon um einiges realistischer als der Thorax in seinem Originalzustand (siehe Abbildung 87 und 88).

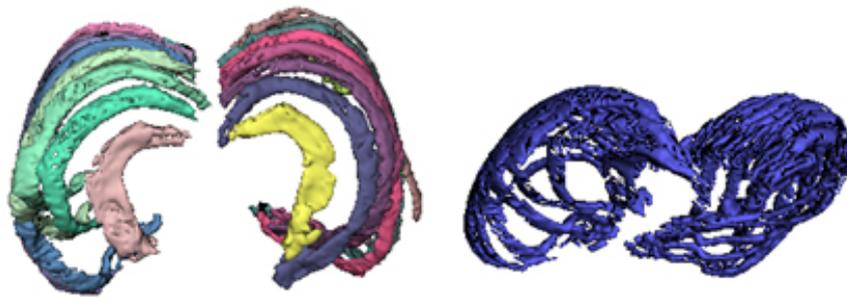


Abbildung 87: Links: Händische Rekonstruktion des Eismann-Thorax in getrennter Darstellung von cranial. Rechts: Originaler Thorax von Ötzi. (Zur Verfügung gestellt von Daniel García-Martínez / Forschungsgruppe Markus Bastir, Madrid, Spanien)

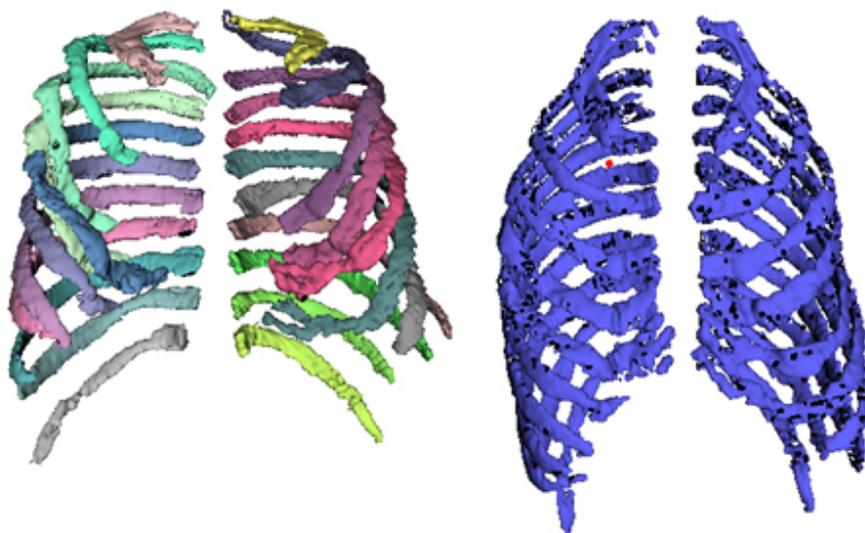


Abbildung 88: Links: Händische Rekonstruktion des Eismann-Thorax in getrennter Darstellung von frontal. Rechts: Originaler Thorax von Ötzi. (Zur Verfügung gestellt von Daniel García-Martínez / Forschungsgruppe Markus Bastir, Madrid, Spanien)

Eine Rekonstruktion des Ötzi-Thorax scheint grundsätzlich möglich, ist aber ohne zusätzliche Bearbeitung einzelner Rippen nicht zufriedenstellend möglich. Für die weiteren Bearbeitungsschritte wird daher die Vorlage (siehe Abbildung 89) zum Modellieren der Rekonstruktion (=Modellthorax) verwendet.

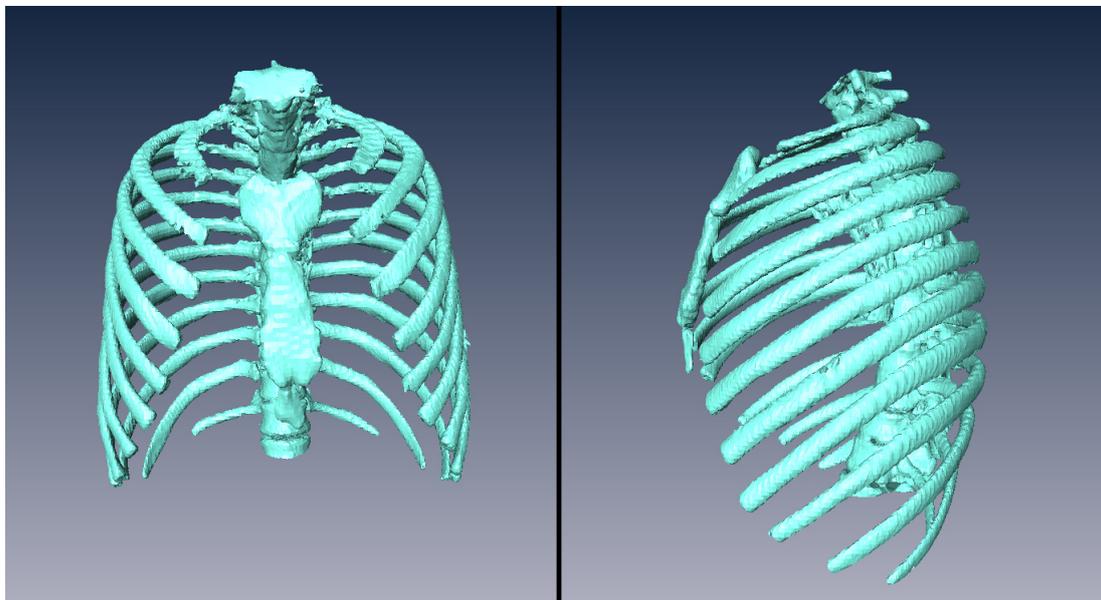


Abbildung 89: Vorlage für die Rekonstruktion des Eismann-Thorax. (Zur Verfügung gestellt von Daniel García-Martínez / Forschungsgruppe Markus Bastir, Madrid, Spanien)

Literaturverzeichnis

- Ambach, E., W. Tribitsch, and R. Henn (1991), Fatal accidents on glaciers: forensic, criminological and glaciological conclusions. *Journal of Forensic Sciences* **36**, 1469–1473.
- Ambach, W., E. Ambach, W. Tribitsch, R. Henn, and H. Unterdorfer (1992), Corpses released from glacier ice: glaciological and forensic aspects. *Journal of Wilderness Medicine* **3**, 372–376.
- Aspöck, H., H. Auer, and O. Pichler (1995), The Mummy from the Hauslabjoch. A Medical Parasitology Perspective. *Alpe Adria Microbiology Journal* **2**.
- Bastir, M., D. G. Martínez, W. Recheis, A. Barash, M. Coquerelle, L. Rios, Á. Peña-Melián, F. G. Río, and P. O'Higgins (2013), Differential growth and development of the upper and lower human thorax. *PLoS ONE* **8**(9), e75128. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075128>, doi:10.1371/journal.pone.0075128.
- Beiter, W. (1989), Der Weg ins Zentrum. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen im Bogensport. DVD.
- Benninghoff, A. (1930), *"Blutgefäße und Herzäus "Handbuch der mikroskopischen Anatomie des Menschen*, vol. 6. Springer Berlin.
- Benninghoff, A. (2003), *Anatomie 1*. Urban & Fischer/Elsevier, 16th edn.
- Benninghoff, A. (2004), *Anatomie 2*. Urban & Fischer/Elsevier, 16th edn.
- Birkfellner, W. (2010), *Applied Medical Image Processing: A Basic Course*. CRC Press. URL: <https://www.amazon.com/Applied-Medical-Image-Processing-Course/dp/1439824444?SubscriptionId=0JYN1NVW651KCA56C102&tag=techkie-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=1439824444>.
- Bookstein, F. (1996), Morphometrics. *Math Horizons*, 1 February 1996, Vol.3(3), pp.28-31 .
- Bookstein, F. L. (1986), Size and shape spaces for landmark data in two dimensions. *Statist. Sci.* **1**, no. 2 (1986), 181-222 .
- Bookstein, F. L. (1997), Landmark methods for forms without landmarks: morphometrics of group differences in outline shape. *Medical Image Analysis*, 1997, Vol.1(3), pp.225-243 .
- Bookstein, F. L. (2003), *Morphometric Tools for Landmark Data: Geometry and Biology*. CAMBRIDGE UNIV PR.
- Bookstein, F. L., D. E. Slice, P. Gunz, and P. Mitteroecker (2004), Anthropology takes control of morphometrics. *Coll. anthropologicum*, 2004, Vol.28 Suppl 2, pp.121-32 .

- Buhmann, M. D. (2000), Radial basis functions. *Acta Numerica* **9**, 1–38.
- CE Essentials (2017), CE Essentials - Online Radiography Continuing Education for Radiologic X-ray Technologist. Online. URL: <https://www.ceessentials.net/article33.html#PhantomsandRequiredTestToolsforSpiralScanners>.
- Christensen, G., R. Rabbitt, and M. Miller (1996), Deformable templates using large deformation kinematics. *IEEE Transactions on Image Processing* **5**(10), 1435–1447. URL: <https://doi.org/10.1109/83.536892>, doi:10.1109/83.536892.
- Claude, J. (2008), *Morphometrics with R*. Springer. URL: http://www.ebook.de/de/product/7357492/julien_claude_morphometrics_with_r.html.
- Demetriades, D., S. Chahwan, and H. Gomez (1999), Penetrating injuries to the subclavian an axillary vessels. *J Am Coll Surg* **188**, 290–295.
- Dettmeyer, R., H. F. Schütz, and M. Verhoff (2014), *Rechtsmedizin*. Springer-Verlag GmbH. URL: http://www.ebook.de/de/product/22581555/reinhard_dettmeyer_harald_f_schuetz_marcel_verhoff_rechtsmedizin.html.
- Dettmeyer, R. B., M. A. Verhoff, and H. F. Schütz (2013), *Forensic Medicine*. Springer-Verlag GmbH. URL: http://www.ebook.de/de/product/20650038/reinhard_b_dettmeyer_marcel_a_verhoff_harald_f_schuetz_forensic_medicine.html.
- Dickson, J. H., K. Oeggl, T. G. Holden, L. L. Handley, T. C. O'Connell, and T. Preston (2000), The omnivorous Tyrolean Iceman: colon contents (meat, cereals, pollen, moss and whipworm) and stable isotope analyses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **355**(1404), 1843–1849. URL: <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2000.0739>, doi:10.1098/rstb.2000.0739.
- DocCheck-Lexikon (2017), Anatomische Richtungs- und Lagebezeichnungen. Online. URL: http://flexikon.doccheck.com/de/Anatomische_Richtungs-_und_Lagebezeichnungen.
- Drake, R. L., A. W. Vogl, and A. W. M. Mitchell (2009), *Gray's Atlas der Anatomie: Deutsche Bearbeitung von Lars Brauer (German Edition)*. Elsevier GmbH.
- Dryden, I. L. and K. V. Mardia (1998), *Statistical Shape Analysis*. Wiley.
- Endspurt-Klinik, T. (2013), *Endspurt Klinik Skript 01 Innere und Chirurgie, Herz-Kreislauf-System, Gefäße*. Thieme Georg Verlag.
- Ermini, L., C. Olivieri, E. Rizzi, G. Corti, R. Bonnal, P. Soares, S. Luciani, I. Marota, G. D. Bellis, M. B. Richards, and F. Rollo (2008), Complete Mitochondrial Genome Sequence of the Tyrolean Iceman. *Current Biology* **18**(21), 1687–1693. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2008.09.028>, doi:10.1016/j.cub.2008.09.028.

- Evers, M. (2017), Physikunterricht-online.de. Online. URL: <http://physikunterricht-online.de/jahrgang-12/roentgenstrahlung/>.
- Feliciano, D. (1997), Trauma to the aorta and major vessels. *Chest Surg Clin North Am* **7**, 305–323.
- Funk, C. (2010), The bow and arrow war days on the yukon-kuskokwim delta of alaska. *Ethnohistory* **57**(4), 523–569. URL: <https://doi.org/10.1215/2F00141801-2010-036>, doi:10.1215/00141801-2010-036.
- Gostner, P. and E. Egarter-Vigl (2002), INSIGHT: Report of Radiological-Forensic Findings on the Iceman. *Journal of Archaeological Science* **29**(3), 323–326. URL: <http://dx.doi.org/10.1006/jasc.2002.0824>, doi:10.1006/jasc.2002.0824.
- Gostner, P., P. Pernter, G. Bonatti, A. Graefen, and A. R. Zink (2011), New radiological insights into the life and death of the Tyrolean Iceman. *Journal of Archaeological Science* **38**(12), 3425–3431. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2011.08.003>, doi:10.1016/j.jas.2011.08.003.
- Hafferl, A. (1957), *Lehrbuch der Topographischen Anatomie, 2. Aufl.* Springer, Heidelberg.
- Hochmeister, M. (2007), *Forensische Medizin für Studium und Praxis: mit 10 Tabellen.* Maudrich, Wien.
- Hofmann, E. R. (1927), *Lehrbuch der gerichtlichen Medizin.* Urban & Schwarzenberg.
- Holden, M. (2008), A review of geometric transformations for nonrigid body registration. *IEEE Transactions on Medical Imaging* **27**(1), 111–128. URL: <https://doi.org/10.1109/tmi.2007.904691>, doi:10.1109/tmi.2007.904691.
- Hoogewerff, J., W. Papesch, M. Kralik, M. Berner, P. Vroon, H. Miesbauer, O. Gaber, K.-H. Künzel, and J. Kleinjans (2001), The Last Domicile of the Iceman from Hauslabjoch: A Geochemical Approach Using Sr, C and O Isotopes and Trace Element Signatures. *Journal of Archaeological Science* **28**(9), 983–989. URL: <http://dx.doi.org/10.1006/jasc.2001.0659>, doi:10.1006/jasc.2001.0659.
- Hupp, T. and J. Allenberg (1997), *Traumatische Gefäßverletzungen. In: Traumatologische Praxis in einem Band.* Schattauer Verlag.
- Jauch, K.-W., J. N. Hoffmann, K.-G. Kanz, and W. Mutschler (eds.) (2013), *Chirurgie Basisweiterbildung.* Springer Berlin Heidelberg. URL: http://www.ebook.de/de/product/20512324/chirurgie_basisweiterbildung.html.
- Junqueira, L. (2005), *Histologie - mit 17 Tabellen.* Springer, Heidelberg, 6th edn.
- Kalender, W. A. (2011), *Computed Tomography.* Publicis Publishing, 3rd edn.
- Kneubuehl, B. P., R. M. Coupland, M. A. Rothschild, and M. Thali (2008), *Wundballistik - Grundlagen und Anwendungen.* Springer-Verlag GmbH.

- Künzel, K.-H. and R. Hörmann (2017), Präparat von Ass. Prof. i.R. Karl-Heinz Künzel und Romed Hörmann aus einem Forschungsprojekt der Sektion für klinisch funktionelle Anatomie des Department für Anatomie, Histologie und Embryologie der Medizinischen Universität Innsbruck. Vorstand Univ. Prof. Dr. med. univ. Erich Brenner MME.
- Kutschera, W. and W. Müller (2003), “Isotope language” of the Alpine Iceman investigated with AMS and MS. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **204**, 705–719. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/s0168-583x\(03\)00491-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0168-583x(03)00491-9), doi:10.1016/s0168-583x(03)00491-9.
- Kybic, J. and M. Unser (2003), Fast parametric elastic image registration. *IEEE Transactions on Image Processing* **12**(11), 1427–1442. URL: <https://doi.org/10.1109/tip.2003.813139>, doi:10.1109/tip.2003.813139.
- Lakhotia, S., S. Prakash, D. K. Singh, A. Kumar, and D. Panigrahi (2012), Penetrating Injury of Ascending Aorta With Arrow In Situ. *Ann Thorac Surg* **93**, e85–87.
- Lang, J. and A. Nordwing (1966), Über die Membrana elastica interna von Arterien des muskulären Typs. *Z. Zellforsch.* **1**(73), 313–325.
- Langenscheidt (2017), Langenscheidt’s Wörterbuch. Online, Abgerufen am 7.4.2017 um 21 Uhr 14. URL: <https://de.langenscheidt.com/englisch-deutsch/allometry>.
- Lanz, T. and W. Wachsmuth (1959), *Praktische Anatomie*, vol. Band Eins / Dritter Teil. Springer Verlag Berlin-Göttingen-Heidelberg, 2nd edn.
- Lester, H. and S. R. Arridge (1999), A survey of hierarchical non-linear medical image registration. *Pattern Recognition* **32**(1), 129–149. URL: [https://doi.org/10.1016/s0031-3203\(98\)00095-8](https://doi.org/10.1016/s0031-3203(98)00095-8), doi:10.1016/s0031-3203(98)00095-8.
- Ludwig, M., J. Rieger, and V. Ruppert (2010), *Gefäßmedizin in Klinik und Praxis: Leitlinienorientierte Angiologie, Gefäßchirurgie und interventionelle Radiologie*. Thieme.
- Markov, A. G. and S. Amasheh (2014), Tight junction physiology of pleural mesothelium. *Frontiers in Physiology* **5**. URL: <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00221>, doi:10.3389/fphys.2014.00221.
- MathWorld—A Wolfram Web Resource. (2017), Euclidean metric. URL: <http://mathworld.wolfram.com/EuclideanMetric.html>.
- Mayersbach, H. (1956), Der Wandbau der Gefäßübergangsstrecken zwischen Arterien des elastischen und rein muskulösen Typs. *Anat. Anz.* **1**(102), 333–360.
- Medi-Learn (2017a), Online-Lernplattform für Mediziner - Abgänge der A. subclavia. Online, 22:26. URL: http://www.medi-learn.de/seiten/errata/pdf/Ana4_Seite_50.pdf.

- Medi-Learn (2017b), Online-Lernplattform für Mediziner - Körperachsen und -ebenen in der Anatomie. 10:56h. URL: http://www.medi-learn.de/examen/bildarchiv/2013/detail.php?auflage=_5&bilder=&skr=Anatomie5&akt=158.
- Mitteroecker, P., F. Bookstein, and N. MacLead (2007), The conceptual and statistical relationship between modularity and morphological integration. *Systematic Biology*, 2007, Vol. 56(5), pp.818-836 .
- Müller, W. (2003), Origin and Migration of the Alpine Iceman. *Science* **302**(5646), 862–866. URL: <http://dx.doi.org/10.1126/science.1089837>, doi:10.1126/science.1089837.
- Murphy, W. A., D. zur Nedden, P. Gostner, R. Knapp, W. Recheis, and H. Seidler (2003), The Iceman: Discovery and Imaging 1. *Radiology* **226**(3), 614–629. URL: <http://dx.doi.org/10.1148/radiol.2263020338>, doi:10.1148/radiol.2263020338.
- Myers, S., T. Harward, and D. Maher (1990), Complex upper extremity vascular trauma in an urban population. *J Vasc Surg* **12**, 305–309.
- Neri, E. (2008), *Image Processing in Radiology: Current Applications*. Springer, Berlin New York.
- Nerlich, A. G., B. Bachmeier, A. Zink, S. Thalhammer, and E. Egarter-Vigl (2003), Ötzi had a wound on his right hand. *The Lancet* **362**, 334.
- Netter, F. H. (2015), *Atlas der Anatomie: Deutsche Übersetzung von Christian M. Hammer (German Edition)*. Urban & Fischer.
- Nüllen, H., T. Noppeney, and C. Diehm (eds.) (2014), *VTE - Venöse Thromboembolien*. Springer-Verlag GmbH. URL: http://www.ebook.de/de/product/19151751/vte_venoese_thrombo_embolien.html.
- Oeggl, K., W. Kofler, A. Schmidl, J. H. Dickson, E. Egarter-Vigl, and O. Gaber (2007), The reconstruction of the last itinerary of “Ötzi”, the Neolithic Iceman, by pollen analyses from sequentially sampled gut extracts. *Quaternary Science Reviews* **26**(7-8), 853–861. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.12.007>, doi:10.1016/j.quascirev.2006.12.007.
- Olivieri, C., L. Ermini, E. Rizzi, G. Corti, R. Bonnal, S. Luciani, I. Marota, G. D. Bellis, and F. Rollo (2010), Characterization of Nucleotide Misincorporation Patterns in the Iceman’s Mitochondrial DNA. *PLoS ONE* **5**(1), e8629. URL: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0008629>, doi:10.1371/journal.pone.0008629.
- Pate, J. W., F. H. Cole, W. A. Walker, and T. C. Fabian (1993), Penetrating Injuries of the Aortic Arch and Its Branches. *Ann Thorac Surg* **55**, 586–592.
- Paulsen, F. and J. Waschke (2011a), *Sobotta, Atlas der Anatomie des Menschen Band 1: Allgemeine Anatomie und Bewegungsapparat (German Edition)*. Urban & Fischer.

- Paulsen, F. and J. Waschke (2011b), *Sobotta, Atlas der Anatomie des Menschen Band 3: Kopf, Hals und Neuroanatomie (German Edition)*. Urban & Fischer.
- Pernter, P., P. Gostner, E. Egarter-Vigl, and F. J. Rühli (2007), Radiologic proof for the Iceman's cause of death (ca. 5.300 BP). *Journal of Archaeological Science* **34**(11), 1784–1786. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2006.12.019>, doi:10.1016/j.jas.2006.12.019.
- Pillai, L., F. Luchette, K. Romano, and J. Ricotta (1997), Upper-extremity arterial injury. *Am Surg* **63**, 224–227.
- Rastbichler-Zissernig, E. (2006), *Der Mann im Eis - Die Fundgeschichte*. innsbruck university press (IUP).
- Rauber/Kopsch (1998a), *Anatomie des Menschen Bd I Bewegungsapparat, S 259 - 373, 2.Aufl.*. Thieme, Stuttgart.
- Rauber/Kopsch (1998b), *Anatomie des Menschen Bd II Innere Organe, 2.Aufl.*. Thieme, Stuttgart.
- Rauber/Kopsch (1998c), *Anatomie des Menschen Bd IV Topographie des Organsystems - Systematik der peripheren Leitungsbahnen, S 376 - 383, 2.Aufl.*. Thieme, Stuttgart.
- Recheis, W., G. W. Weber, K. Schäfer, R. Knapp, H. Seidler, and D. zur Nedden (1999), Virtual reality and anthropology. *European Journal of Radiology* **31**, 88–96.
- Recheis, W., H. G. Wirich, M. Verius, R. Huttary, R. Tessadri, T. D. Zordo, H. Strobl, and K.-H. Künzel (2011), New aspects of the Iceman's facial injury patterns may suggest a different scenario of his death. In: W. Recheis (ed.), *Poster @ Oetzi-Kongress from October 20th-22nd, 2011*.
- Rieger, H. and W. Schoop (eds.) (1998), *Klinische Angiologie*. Springer Berlin Heidelberg. URL: <https://doi.org/10.1007%2F978-3-662-08104-4>, doi:10.1007/978-3-662-08104-4.
- Rollo, F., L. Ermini, S. Luciani, I. Marota, C. Olivieri, and D. Luiselli (2006), Fine characterization of the Iceman's mtDNA haplogroup. *American Journal of Physical Anthropology* **130**(4), 557–564. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/ajpa.20384>, doi:10.1002/ajpa.20384.
- Rollo, F., M. Ubaldi, L. Ermini, and I. Marota (2002), Ötzi's last meals: DNA analysis of the intestinal content of the Neolithic glacier mummy from the Alps. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **99**(20), 12594–12599. URL: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.192184599>, doi:10.1073/pnas.192184599.
- Ruff, C. B., B. M. Holt, V. Sládek, M. Berner, W. A. Murphy, D. zur Nedden, H. Seidler, and W. Recheis (2006), Body size, body proportions, and mobility in the Tyrolean "Iceman". *Journal of Human Evolution* **51**(1), 91–101. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhevol.2006.02.001>, doi:10.1016/j.jhevol.2006.02.001.

- Seiler, R., A. Spielman, A. Zink, and F. Rühli (2013), Oral pathologies of the neolithic iceman, c. 3,300 bc. *European Journal of Oral Sciences* **121**(3pt1), 137–141. URL: <https://doi.org/10.1111%2Feos.12037>, doi:10.1111/eos.12037.
- Shusharina, N. and G. Sharp (2012), Analytic regularization for landmark-based image registration. *Phys Med Biol* **57**(6), 1477–98.
- Siemens AG Erlangen (2017), Somatom Plus - Foto aus dem Jahr 1988. Online. URL: https://www.siemens.com/history/de/aktuelles/1031_griechenland.htm.
- Slice, D. E. (2007), Geometric morphometrics. *Annual Review of Anthropology* **36**(1), 261–281. URL: <https://doi.org/10.1146%2Fannurev.anthro.34.081804.120613>, doi:10.1146/annurev.anthro.34.081804.120613.
- Springer Verlag (2017), Illustration zu anatomischen Richtungsangaben in der Anatomie. Online, 10:48h. URL: <http://specialc.npage.de/der-bewegungsapparat.html>http://www.springer-berlin.de/mediaObject/springer/live/sensomotorik/lexikon/grafik_koerperansicht_bezei/original/grafik_koerperansicht_bezei.png.
- Thali, M. J., B. Lux, S. Lösch, F. W. Rösing, J. Hürlimann, P. Feer, R. Dirnhofer, U. Königsdorfer, and U. Zollinger (2011), “Brienzi” – The blue Vivianite man of Switzerland: Time since death estimation of an adipocere body. *Forensic Science International* **211**(1-3), 34–40. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.04.009>, doi:10.1016/j.forsciint.2011.04.009.
- Troyer, A. D. (2005), Respiratory action of the intercostal muscles. *Physiological Reviews* **85**(2), 717–756. URL: <https://doi.org/10.1152%2Fphysrev.00007.2004>, doi:10.1152/physrev.00007.2004.
- Unser, M. (1999), Splines: a perfect fit for signal and image processing. *IEEE Signal Processing Magazine* **16**(6), 22–38. URL: <https://doi.org/10.1109/79.799930>, doi:10.1109/79.799930.
- Unser, M., A. Aldroubi, and M. Eden (1991), Fast b-spline transforms for continuous image representation and interpolation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **13**(3), 277–285. URL: <https://doi.org/10.1109/34.75515>, doi:10.1109/34.75515.
- Wall, M., T. Granchi, K. Liscum, and K. Mattox (1996), Penetrating thoracic vascular injuries. *Surg Clin North Am* **76**, 749–761.
- Ward, J. (2005), Physiology of breathing i. *Surgery (Oxford)* **23**(11), 419–424. URL: <https://doi.org/10.1383%2Fsurg.2005.23.11.419>, doi:10.1383/surg.2005.23.11.419.
- Weber, G. W. (2014), Virtual Anthropology. *American Journal of Physical Anthropology* **156**, 22–42. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/ajpa.22658>, doi:10.1002/ajpa.22658.

- Weber, G. W., F. L. Bookstein, and D. S. Strait (2011), Virtual anthropology meets biomechanics. *Journal of Biomechanics*, 17 May 2011, Vol.44(8), pp.1429-1432 .
- Wegener, R., M. Tsokos, H. Bratzke, M. Oehmichen, S. Pollak, H. Maxeiner, W. Keil, M. Kettner, P. Schmidt, E. Lignitz, A. Thierauf-Emberger, S. Banaschak, T. Bajanski, G. Geserick, R. Lessig, V. Henn, C. T. Buschmann, C. Kleber, H.-D. Wehner, and B. Madea (2014), *Traumatologie und gewaltsamer Tod*. Springer Berlin Heidelberg. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-662-43500-7_4.
- Wilmanns, J. C. and G. Schmitt (2002), *Die Medizin und ihre Sprache. Lehrbuch der medizinischen Fachsprache nach Organsystemen..* Ecomed.
- Zelditch, M. L., D. L. Swiderski, and H. D. Sheets (2012), Geometric Morphometrics for Biologists. In: *Geometric Morphometrics for Biologists*, pp. 1–20, Elsevier BV. URL: <https://doi.org/10.1016%2Fb978-0-12-386903-6.00001-0>, doi:10.1016/b978-0-12-386903-6.00001-0.
- Zitová, B. and J. Flusser (2003), Image registration methods: a survey. *Image and Vision Computing* **21**(11), 977–1000. URL: [https://doi.org/10.1016/s0262-8856\(03\)00137-9](https://doi.org/10.1016/s0262-8856(03)00137-9), doi:10.1016/s0262-8856(03)00137-9.

A. Anhang

A.1 Auszug aus einem Schreiben der Ethikkommission an die Universitätsklinik Innsbruck

Die Ethikkommission hat aufgrund der Regelungen des § 46 DSGVO keine Zustimmung gefordert.

Konkret besagt § 46 Abs 1 Z 2 2. DSGVO 2000, dass Daten, die für andere Zwecke zulässigerweise erhoben wurden, für wissenschaftliche Zwecke und Statistik verwendet werden können. Das Datenschutzgesetz geht grundsätzlich davon aus, dass die Verwendung von Daten zustimmungspflichtig durch den Betroffenen ist, die besagte Bestimmung ist eine Ausnahme hierzu. Entscheidend im konkreten Zusammenhang ist, dass für das Forschungsprojekt keine neuen Daten erhoben bzw. generiert wurden, sondern ausschließlich auf - eben für andere Zwecke zulässigerweise erhobene - Daten zurückgegriffen wurde (retrospektiv). Die Behandlung bzw. Bildgebung wurde aufgrund klinischer Kriterien immer bezogen auf den Einzelfall abgestimmt und wurde durch das spätere Projekt in keiner Weise beeinflusst.

§ 46 Abs 5 letzter Satz DSGVO 2000 legt ergänzend fest, dass der Personenbezug gänzlich zu löschen ist, wenn dies für die weitere wissenschaftliche Auswertung nicht mehr notwendig ist - dies bedeutet eine Anonymisierung. Dieser Bestimmung wurde insofern entsprochen, dass die Bilder bzw. Daten bereits vor der wissenschaftlichen Verwendung anonymisiert wurden (natürlich nur für das Projekt und nicht in der Krankengeschichte selbst). Die davor stehenden Bestimmungen des § 46 Abs 5 DSGVO 2000 würden - nur der Vollständigkeit halber - bei wissenschaftlicher Notwendigkeit auch einen vorübergehenden indirekten Personenbezug zulassen (= Pseudonymisierung); diese Notwendigkeit lag im konkreten Fall nicht vor.

Ergänzend sei noch ausgeführt, dass auch aus den og. Bestimmungen abgeleitet werden kann, dass für retrospektive Datenanalysen eine Befassung der Ethikkommission von Gesetzes wegen her nicht notwendig ist.

A.2 Lokalisation der Landmarks

Lokalisation der Landmarks

Teil 1:

Landmark Nr.	Typ	Lokalisierung
Landmark 0	Typ 1	Angulus sterni
Landmark 1	Typ 1	Art. sternoclavicularis dext.
Landmark 2	Typ 1	Art. sternoclavicularis sin.
Landmark 3	Typ 1	Synchondrosis xiphisternalis
Landmark 4	Typ 1	Art. costovertebralis TH1 dext.
Landmark 5	Typ 1	Art. costovertebralis TH1 sin.
Landmark 6	Typ 1	Proc. spinosus TH1 (Posteriores Ende des Processus)
Landmark 7	Typ 1	Proc. spinosus TH2 (Posteriores Ende des Processus)
Landmark 8	Typ 1	Proc. spinosus TH3 (Posteriores Ende des Processus)
Landmark 9	Typ 1	Proc. spinosus TH4 (Posteriores Ende des Processus)
Landmark 10	Typ 1	Proc. spinosus TH5 (Posteriores Ende des Processus)
Landmark 11	Typ 1	Proc. spinosus TH6 (Posteriores Ende des Processus)
Landmark 12	Typ 1	Proc. spinosus TH7 (Posteriores Ende des Processus)
Landmark 13	Typ 1	Proc. spinosus TH8 (Posteriores Ende des Processus)
Landmark 14	Typ 1	Proc. spinosus TH9 (Posteriores Ende des Processus)
Landmark 15	Typ 1	Proc. spinosus TH10 (Posteriores Ende des Processus)
Landmark 16	Typ 1	Proc. spinosus TH11 (Posteriores Ende des Processus)
Landmark 17	Typ 1	Proc. spinosus TH12 (Posteriores Ende des Processus)
Landmark 18	Typ 2	Costa 1 sin. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 19	Typ 2	Costa 2 sin. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 20	Typ 2	Costa 3 sin. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 21	Typ 2	Costa 4 sin. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 22	Typ 2	Costa 5 sin. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 23	Typ 2	Costa 6 sin. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 24	Typ 2	Costa 7 sin. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 25	Typ 2	Costa 8 sin. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 26	Typ 2	Costa 9 sin. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)

Lokalisation der Landmarks**Teil 2:**

Landmark Nr.	Typ	Lokalisierung
Landmark 27	Typ 2	Costa 1 dext. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 28	Typ 2	Costa 2 dext. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 29	Typ 2	Costa 3 dext. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 30	Typ 2	Costa 4 dext. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 31	Typ 2	Costa 5 dext. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 32	Typ 2	Costa 6 dext. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 33	Typ 2	Costa 7 dext. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 34	Typ 2	Costa 8 dext. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 35	Typ 2	Costa 9 dext. lat. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 36	Typ 1	Corpus vertebrae TH1 (Mitte des Corpus)
Landmark 37	Typ 1	Corpus vertebrae TH2 (Mitte des Corpus)
Landmark 38	Typ 1	Corpus vertebrae TH3 (Mitte des Corpus)
Landmark 39	Typ 1	Corpus vertebrae TH4 (Mitte des Corpus)
Landmark 40	Typ 1	Corpus vertebrae TH5 (Mitte des Corpus)
Landmark 41	Typ 1	Corpus vertebrae TH6 (Mitte des Corpus)
Landmark 42	Typ 1	Corpus vertebrae TH7 (Mitte des Corpus)
Landmark 43	Typ 1	Corpus vertebrae TH8 (Mitte des Corpus)
Landmark 44	Typ 1	Corpus vertebrae TH9 (Mitte des Corpus)
Landmark 45	Typ 1	Corpus vertebrae TH10 (Mitte des Corpus)
Landmark 46	Typ 1	Corpus vertebrae TH11 (Mitte des Corpus)
Landmark 47	Typ 1	Corpus vertebrae TH12 (Mitte des Corpus)
Landmark 48	Typ 2	Costa 1 sin. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 49	Typ 2	Costa 2 sin. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 50	Typ 2	Costa 3 sin. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 51	Typ 2	Costa 4 sin. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 52	Typ 2	Costa 5 sin. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 53	Typ 2	Costa 6 sin. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 54	Typ 2	Costa 7 sin. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 55	Typ 2	Costa 8 sin. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 56	Typ 2	Costa 9 sin. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 57	Typ 2	Costa 10 sin. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 58	Typ 2	Costa 11 sin. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)

Lokalisation der Landmarks**Teil 3:**

Landmark Nr.	Typ	Lokalisierung
Landmark 59	Typ 2	Costa 1 dext. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 60	Typ 2	Costa 2 dext. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 61	Typ 2	Costa 3 dext. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 62	Typ 2	Costa 4 dext. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 63	Typ 2	Costa 5 dext. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 64	Typ 2	Costa 6 dext. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 65	Typ 2	Costa 7 dext. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 66	Typ 2	Costa 8 dext. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 67	Typ 2	Costa 9 dext. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 68	Typ 2	Costa 10 dext. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 69	Typ 2	Costa 11 dext. post. (Scheitelpunkt der Krümmung)
Landmark 70	Typ 1	Costa 1 sin. ant. (Übergang Knochen - Knorpel)
Landmark 71	Typ 1	Costa 2 sin. ant. (Übergang Knochen - Knorpel)
Landmark 72	Typ 1	Costa 3 sin. ant. (Übergang Knochen - Knorpel)
Landmark 73	Typ 1	Costa 4 sin. ant. (Übergang Knochen - Knorpel)
Landmark 74	Typ 1	Costa 5 sin. ant. (Übergang Knochen - Knorpel)
Landmark 75	Typ 1	Costa 6 sin. ant. (Übergang Knochen - Knorpel)
Landmark 76	Typ 1	Costa 1 dext. ant. (Übergang Knochen - Knorpel)
Landmark 77	Typ 1	Costa 2 dext. ant. (Übergang Knochen - Knorpel)
Landmark 78	Typ 1	Costa 3 dext. ant. (Übergang Knochen - Knorpel)
Landmark 79	Typ 1	Costa 4 dext. ant. (Übergang Knochen - Knorpel)
Landmark 80	Typ 1	Costa 5 dext. ant. (Übergang Knochen - Knorpel)
Landmark 81	Typ 1	Costa 6 dext. ant. (Übergang Knochen - Knorpel)

Tabellenverzeichnis

1.	Verschiedene CT-Werte in Körpergeweben	7
2.	Anatomische Lagebezeichnungen im menschlichen Körper	11
3.	Unterschiedliche Typen von Landmarks	52
4.	Aufstellung der bildgebenden Untersuchungen des Eismannes	65
5.	Statistische Auswertung der unterschiedlichen Registrierungsmethoden . . .	75
6.	Statistische Auswertung der B-Spline Registrierungsmethode mit Datensatz 46m auf Ötzi	80
7.	Statistische Auswertung der B-Spline Registrierungsmethode mit Datensatz 62m auf Ötzi	82
8.	Statistische Auswertung der B-Spline Registrierungsmethode mit Datensatz 86m auf Ötzi	84

Abbildungsverzeichnis

1.	Ötzi's Fundort in den Tiroler Alpen	1
2.	Ötzi bei der Auffindung durch Familie Simon	2
3.	Ötzi nach der Einlieferung in die Universitätsklinik Innsbruck	3
4.	Funktionsprinzip einer Röntgenröhre	4
5.	CT-Scanner Siemens Somatom Plus	5
6.	Arbeitsweise eines CT-Scanners	6
7.	Die Hounsfield Skala - CT-Werte	7
8.	Manuelle Segmentierung - dargestellt auf einer einzelnen CT-Schicht	8
9.	Illustration zu den anatomischen Ebenen und Achsen sowie Richtungsangaben	10
10.	Anatomie des Schlüsselbeines	12
11.	Anatomie des knöchernen Schulterblattes von anterior und posterior	14
12.	Anatomie des knöchernen Schulterblattes mit Muskelursprüngen und Muskelansatzstellen von anterior und posterior	15
13.	Blick von oben auf das Schultergelenk	16
14.	Regio scapularis - seitlicher Blick von rechts	17
15.	Dorsaler Blick auf die Regio scapularis	18
16.	Anatomischer Leibesschnitt etwa auf Höhe TH2	19
17.	Dorsaler Blick auf die Regio scapularis	20
18.	Darstellung des Schultergelenks mit seinem Kapsel- und Bandapparat	21
19.	Bewegungsraum des Sternoclaviculargelenks	22
20.	Bewegung des Schulterblattes um seine Longitudinalachse	23
21.	Bewegung des Schulterblattes - Heben und Senken, Anteversion	24
22.	Kombinierte Bewegung von Schultergelenk und Schultergürtel	25
23.	Mitbewegen des Schulterblattes bei unterschiedlichen Armstellungen	26
24.	Knochen und Knorpel des Rumpfskelettes	27
25.	Abbildung des segmentierten Brustkorbs von Ötzi	29
26.	Rete arteriosum scapulae	31
27.	Gefäße und Nerven am Übergang vom Hals zum Thorax und zur oberen Extremität	32
28.	Verlauf der A. subclavia in Beziehung zum knöchernen Skelett	33

29.	Verlauf der A. + V. subclavia sowie des Pl. brachialis, links von lateral . . .	34
30.	Venen des Schultergürtels und Oberarmes	35
31.	Überblick über die unterschiedlichen Gefäßtypen des Körpers	36
32.	Darstellung der unterschiedlichen Gefäßschichten	37
33.	Arterie vom elastischen Typ - Gewebeschnitt einer A. subclavia	38
34.	Arterie vom muskulären Typ - Gewebeschnitt einer A. femoralis	39
35.	Übergangsform von einer Arterie des elastischen Typs zu einer Arterie des muskulären Typs - Gewebeschnitt einer A. thoracica interna	40
36.	Querschnitt durch die Klappe einer Vene	41
37.	Schnitt durch die Wand einer menschlichen V. cava inferior	43
38.	Selbsttamponade einer Arterie vom muskulären Typ durch Invagination . .	44
39.	Aneurysma verum und Aneurysma spurium	45
40.	Einteilung von scharfen Gefäßverletzungen	45
41.	Muster von Stichwunden	47
42.	Muster einer Stichwunde im Schulterblatt	47
43.	Verlauf der sog. Langerschen Hautspaltlinien	48
44.	Schlitzförmige Wunde in der Spaltbarkeitsrichtung der Haut	49
45.	Operatoren, die die Gestalt nicht verändern	53
46.	Graphische Darstellung der Centroid-Size	54
47.	Rotationsmatrizen für 3D-shape-coordinates	54
48.	Graphische Darstellung der Centroid-Size	55
49.	Die Entdeckung der Pfeilspitze	59
50.	Die Lage der Eintrittswunde	59
51.	Vermutete Pfeilschussverletzung an der linken A. subclavia	60
52.	Vermutliches Hämatom in der Umgebung der Schusswunde	61
53.	Die Abbildung zeigt den Eismann in einer Aufnahme aus dem Jahr 1994 .	66
54.	Vergleichsdatensatz "46m"	67
55.	Vergleichsdatensatz "62m"	67
56.	Vergleichsdatensatz "86m"	68
57.	Vergleichsdatensatz "50m"	68
58.	Skelett des Eismannes segmentiert	71

59.	Landmarks für die Registrierungstasks im anatomischen Kontext auf dem Ötzi-Datensatz von anterior und posterior	72
60.	Landmarks für die Registrierungstasks im anatomischen Kontext auf dem Vergleichs-Datensatz von anterior und posterior	73
61.	Bildliche Darstellung der einzelnen zu evaluierenden Registrierungstasks . .	76
62.	Vermessung der Distanz der Pfeilspitze von der Scapula im Ötzidatensatz .	77
63.	Vermessung der Dicke des M. subscapularis	78
64.	Vermessung des Abstandes der Pfeilspitze in der gedachten Verlängerung von der Spina scapulae	79
65.	Registrierter Datensatz 46m auf Ötzigeometrie	80
66.	Visual Propection von Datensatz 46m gemorpht auf Ötzigeometrie	81
67.	Registrierter Datensatz 62m auf Ötzigeometrie	82
68.	Visual Propection von Datensatz 62m gemorpht auf Ötzigeometrie	83
69.	Registrierter Datensatz 86m auf Ötzigeometrie	84
70.	Visual Propection von Datensatz 86m gemorpht auf Ötzigeometrie	85
71.	Ötzi's Schulter vor der virtuellen Reponierung	86
72.	Ötzi's Schulter nach der virtuellen Reponierung mit den drei Pfeilpositionen	87
73.	Einschussloch im Eismann-CT-Datensatz und im nicht reponierten stl-File sichtbar	88
74.	Einschussloch im reponierten stl-File	89
75.	Einschusswinkel bei stehendem Menschen - Simulation	90
76.	Weitere Möglichkeit des Einschusswinkels	91
77.	Neuer, flacherer Einschusswinkel im Vergleichsdatsatz 46m	92
78.	Neuer, flacherer Einschusswinkel im Vergleichsdatsatz 62m	92
79.	Neuer, flacherer Einschusswinkel im Vergleichsdatsatz 86m	93
80.	Flacherer Einschusswinkel auch in der Fotomontage - Ansicht von dorsal .	93
81.	Flacherer Einschusswinkel auch in der Fotomontage - Ansicht von dorsal .	94
82.	Pfeilspitze in der Nähe der V. subclavia in 46m	96
83.	Treffer der A. subclavia in 46m und 62m	97
84.	Pfeilspitze in der Nähe der A. subclavia in 86m	98
85.	Zusätzliche Verletzungen des Ötzi	99
86.	Händische Überlagerung des Eismann-Thorax von frontal	101

87. Händische Rekonstruktion des Eismann-Thorax in getrennter Darstellung
von cranial 102
88. Händische Rekonstruktion des Eismann-Thorax in getrennter Darstellung
von frontal 102
89. Vorlage für die Rekonstruktion des Eismann-Thorax 103