

Aus der Klinik und Poliklinik
für Thorax-, Herz- und Thorakale Gefäßchirurgie
der Universität Würzburg
Direktor: Professor Dr. med. Rainer G. Leyh

**Detaillierte radio-morphologische Analyse
der Sternumanatomie
an einem chirurgischen Patientengut**

Inauguraldissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Medizinischen Fakultät
der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von
Lisa Mayer
aus Herrieden

Würzburg, August 2019



Referent: Prof. Dr. med. Thorsten Walles

Koreferent: Prof. Dr. med. Thorsten Bley

Dekan: Prof. Dr. med. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 28.05.2020

Die Promovendin ist Ärztin

All meinen Lieben.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis
Tabellenverzeichnis
Abkürzungsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
1.1 Anatomische Grundlagen.....	1
1.2 Arten der Sternotomie.....	5
1.2.1 Komplette mediane Sternotomie.....	5
1.2.2 Partielle mediane Sternotomie.....	6
1.3 Methoden des Sternumverschlusses nach Sternotomie.....	6
1.3.1 Drahtcerclagen.....	7
1.3.2 Bänder.....	9
1.3.3 Plattensysteme.....	10
1.3.4 Klammersysteme.....	11
1.4 Wissenschaftliche Fragestellung.....	12
2 Material und Methoden.....	14
2.1 Studiendesign.....	14
2.2 Patientenkohorte.....	14
2.3 Datenerhebung.....	14
2.4 Vermessung des Sternums.....	15
2.4.1 Länge L und Wölbung W.....	18
2.4.2 Breite B und Dicke D.....	19
2.4.3 Abstand der ICRs A.....	21
2.4.4 Höhe des ICRs H.....	21
2.4.5 Höhe des Rippenansatzes R.....	22
2.5 Auswertung und statistische Analyse.....	23
3 Ergebnisse.....	24
3.1 Patientenkohorte.....	24
3.2 Durchschnittliche Größenausdehnung des Sternums.....	26
3.2.1 Länge L und Wölbung W.....	28
3.2.2 Breite B.....	28
3.2.3 Dicke D.....	30
3.2.4 Abstand der ICRs A.....	32
3.2.5 Höhe des ICRs H.....	33
3.2.6 Höhe des Rippenansatzes R.....	35
3.3 Korrelationen der Sternummesswerte untereinander.....	36
3.4 Mögliche Einflussfaktoren auf die Größenausdehnung des Sternums..	37
3.4.1 Geschlecht.....	37
3.4.2 Körpergröße.....	40
3.4.3 Alter.....	41
3.4.4 Adipositas.....	41
3.4.5 COPD.....	42
3.5 Sternummesswerte von Patienten mit und ohne Wundheilungsstörung.....	43

4 Diskussion	46
4.1 Patientenkohorte	46
4.2 Messtechnik	47
4.3 Erhobene Sternummesswerte.....	48
4.4 Korrelationen der Sternummesswerte untereinander.....	56
4.5 Einflussfaktoren auf die Größenausdehnung des Sternums	57
4.5.1 Geschlecht.....	57
4.5.2 Körpergröße.....	58
4.5.3 Alter	60
4.5.4 Adipositas und COPD	60
4.6 Sternummesswerte von Patienten mit und ohne Wundheilungsstörung	60
5 Zusammenfassung	62
6 Literaturverzeichnis	64

Danksagung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anatomie des knöchernen Brustkorbs.	2
Abbildung 2: Anatomie des Sternums – Gliederung.	3
Abbildung 3: Anatomie des Sternums – Knochenansatzstellen und ICRs.	4
Abbildung 4: Eröffneter Thorax von ventral.	4
Abbildung 5: Sternotomie.	5
Abbildung 6: Drahtcerclagen für den Sternumverschluss.	8
Abbildung 7: Robicsek-Technik.	9
Abbildung 8: Bandsysteme für den Sternumverschluss.	10
Abbildung 9: Plattensystem für den Sternumverschluss.	11
Abbildung 10: Klammersysteme für den Sternumverschluss.	12
Abbildung 11: Vermessungsschema des Sternums.	17
Abbildung 12: Messungen im sagittalen CT-Bild.	18
Abbildung 13: Messungen im axialen CT-Bild.	19
Abbildung 14: Beispiele für Formen des Sternums im Querschnitt.	20
Abbildung 15: Messung des Werts A im koronaren CT-Bild.	21
Abbildung 16: Messung des Werts H im koronaren CT-Bild.	22
Abbildung 17: Messung des Werts R im koronaren CT-Bild.	22
Abbildung 18: Darstellung der Studienpopulation.	25
Abbildung 19: Histogramm zur Altersverteilung im eingeschlossenen Patientenkollektiv.	26
Abbildung 20: Breitenwerte B1 – B5.	29
Abbildung 21: Dickenwerte D1 – D5.	31
Abbildung 22: Berechnung der Werte A1 – A4.	32
Abbildung 23: Balkendiagramm der Werte A1 – A4.	33
Abbildung 24: Berechnung der Werte H1 – H5.	34
Abbildung 25: Balkendiagramm der Werte H1 – H5.	35
Abbildung 26: Berechnung der Werte R1 – R5.	35
Abbildung 27: Balkendiagramm der Werte R1 – R5.	36
Abbildung 28: Balkendiagramme der Sternummesswerte von weiblichen und männlichen Patienten.	39
Abbildung 29: Streudiagramme der Sternummesswerte von Patienten mit und ohne Wundheilungsstörung.	44
Abbildung 30: Balkendiagramme der Sternummesswerte von Patienten mit und ohne Wundheilungsstörung.	45
Abbildung 31: Messungen des Längenwerts L.	49
Abbildung 32: Anwendung der erhobenen Sternummesswerte zur medizinischen Dimensionierung einer Sternumklammer.	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über alle erhobenen Parameter.	15
Tabelle 2: Verteilung von Alter und Körpergröße zum OP-Zeitpunkt.	25
Tabelle 3: Durchschnittliche Sternummesswerte.	27
Tabelle 4: Mittelwerte der Breitenwerte B1 – B5 bzw. B2 – B5.	29
Tabelle 5: Messstellen der Werte B1 – B5.	30
Tabelle 6: Mittelwerte der Werte D1 – D5 bzw. D2 – D5.	31
Tabelle 7: Messstellen der Werte D1 – D5.	32
Tabelle 8: Werte A1 – A4.	33
Tabelle 9: Werte H1 – H5.	35
Tabelle 10: Werte R1 – R5.	36
Tabelle 11: Gegenüberstellung von Sternummesswerten aus verschiedenen Studien.	54

Abkürzungsverzeichnis

A

A. lat. arteria / dt. Arterie
Aa. lat. arteriae / dt. Arterien

B

BMI engl. body mass index
bzw. beziehungsweise

C

cm Zentimeter
COPD engl. chronic obstructive pulmonary disease /
dt. Chronisch obstruktive Lungenerkrankung
CT Computertomographie

D

d.h. das heißt

E

et al. lat. et alii / dt. und andere

I

ICR / ICRs Intercostalraum / Intercostalräume
IQR engl. interquartile range / dt. Interquartilsabstand

K

kg Kilogramm
KK Korrelationskoeffizient / Korrelationskoeffizienten

M

m Meter
Max Maximum
Min Minimum
mm Millimeter

O

OP / OPs Operation / Operationen

S

Stabw Standardabweichung

U

usw. und so weiter

V

V. lat. vena / dt. Vene
vgl. vergleiche
vs. lat. versus / dt. gegenüber

W

WHS Wundheilungsstörung / Wundheilungsstörungen

Z

z.B. zum Beispiel

1 Einleitung

Für alle thorax- und herzchirurgische Operationen muss das Innere des menschlichen Brustkorbs zugänglich gemacht werden. Ein sehr häufig angewandter Zugangsweg ist die sogenannte Sternotomie, bei welcher das Brustbein in der Mitte durchtrennt wird. Um die Integrität und Stabilität des Brustkorbs wiederherzustellen, muss das Sternum am Operationsende wieder adäquat verschlossen werden. Die Standardmethode hierfür besteht in der Verwendung von Drahtcerclagen, die die beiden Sternalhälften aneinander fixieren. Für spezielle Problemstellungen stehen dem Chirurgen auch andere Verschlussmethoden wie Bänder, Platten- oder Klammersysteme zur Verfügung.

Postoperativ wirken starke Kräfte auf die Sternotomiewunde ein, insbesondere bei kräftigen Brustkorbbewegungen wie beispielsweise beim Niesen oder Husten. Durch diese Zug- und Scherkräfte kann eine Instabilität der Sternotomiewunde mit nachfolgender Wundheilungsstörung entstehen. Diese Wundheilungsstörungen resultieren in erhöhten Morbiditäts- und Mortalitätsraten unter den Patienten und stellen eine Belastung für die Patienten und das Gesundheitssystem dar. Die Vermeidung von sternalen Wundheilungsstörungen ist somit ein wichtiges Ziel, dessen Erreichung auch durch die Entwicklung neuer, suffizienter Sternumverschlussysteme unterstützt werden kann. Die Entwicklung und Herstellung passgenauer Verschlussysteme macht ein detailliertes Wissen über die Größenausdehnung des Sternums unabdingbar. Die Informationen in der vorhandenen biomedizinischen Literatur sind für diesen Zweck bisher jedoch nicht ausreichend.

1.1 Anatomische Grundlagen

Die knöchernen Grundstrukturen des menschlichen Brustkorbs (*Thorax*) sind hinten (*dorsal*) die Brustwirbelsäule und vorne (*ventral*) das Brustbein (*Sternum*) (vgl. Abbildung 1). Zwischen diesen beiden knöchernen Strukturen spannen sich links und rechts die zwölf Rippenpaare auf.

Die Rippen bestehen jeweils hinten aus einem knöchernen Anteil (*Costa*), der ventral in den Rippenknorpel (*Cartilago costalis*) übergeht. Letzterer verbindet

die Rippe mit dem Sternum und ist durch Bandstrukturen am Sternum befestigt. In dieser Arbeit wird im Folgenden zur Vereinfachung immer von den „Rippenansätzen am Sternum“ die Rede sein, auch wenn genau genommen die Rippenknorpel am Sternum ansetzen.

Nur die ersten sieben Rippenpaare setzen mit ihrem Knorpel direkt am Sternum an. Die Rippenknorpel der 8. – 10. Rippe legen sich jeweils der nächsthöheren Rippe bzw. deren Rippenknorpel an und sind dadurch nur indirekt am Sternum fixiert. Die Unterränder der 7. – 10. Rippe bilden so gemeinsam den Rippenbogen (*Arcus costalis*). Die Rippenbögen beider Seiten vereinigen sich mittig mit dem Unterrand des Sternums und formen einen Winkel, den *Angulus infrasternalis*. Die 11. und 12. Rippe enden frei in der Bauchwand.

Die Räume zwischen den Rippen werden als Zwischenrippenräume (*Intercostalräume, ICRs*) bezeichnet. [1, 2]

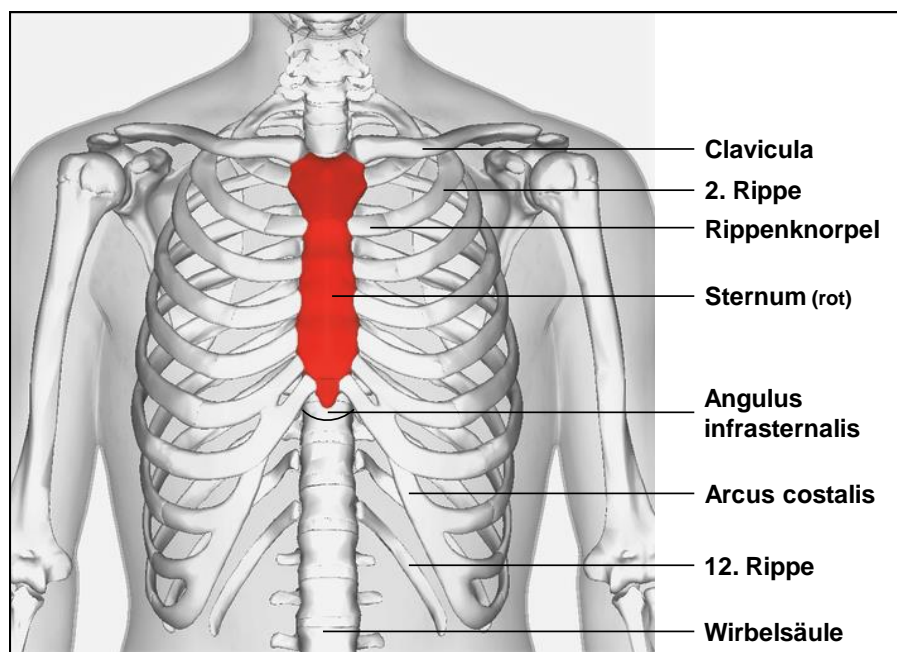


Abbildung 1: Anatomie des knöchernen Brustkorbs. Ansicht von ventral, Sternum rot hervorgehoben. [3]

Das Sternum ist ein flacher, schwertförmiger Knochen, der sich mittig auf der Vorderseite des Brustkorbs befindet (vgl. Abbildung 1). Es gliedert sich von oben (*kranial*) nach unten (*kaudal*) in drei miteinander verbundene Teile: das *Manubrium sterni*, das *Corpus sterni* und den *Processus xiphoideus* (*synonym: Xiphoid*) (vgl. Abbildung 2). Die drei Teile sind jeweils über Knorpelfugen

(*Synchondrosen*) miteinander verbunden, die im Laufe des Lebens verknöchern.
[1, 2, 4]

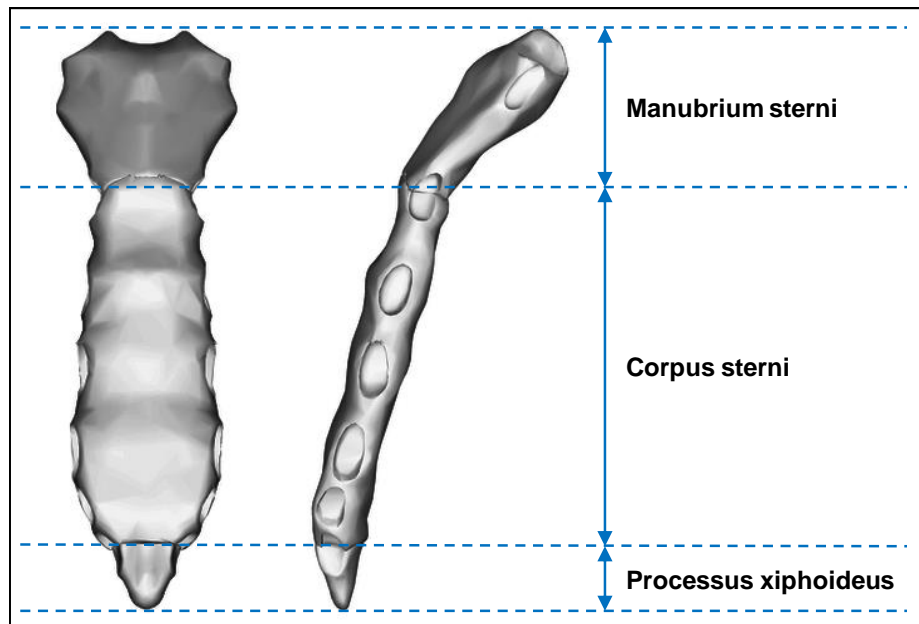


Abbildung 2: Anatomie des Sternums – Gliederung. Ansicht des Sternums von ventral [5] und von links [6].

Betrachtet man das Sternum von der Seite (*lateral*), so erkennt man, dass Manubrium sterni und Corpus sterni an ihrem Übergang nicht geradlinig zueinander verlaufen, sondern einen Winkel (*Angulus sterni*) bilden (vgl. Abbildung 3). Dadurch ist das Sternum insgesamt leicht nach ventral gewölbt.

Das Manubrium sterni ist kranial zur *Incisura jugularis* eingezogen, welche als Unterrand der Drosselgrube durch die Haut sehr gut sicht- und tastbar ist (vgl. Abbildung 3). Jeweils rechts und links davon setzt am Manubrium das rechte und linke Schlüsselbein (*Clavicula*) an, direkt unterhalb die 1. Rippe der jeweiligen Seite. Der Ansatz der 2. Rippe befindet sich im synchondrotischen Übergang von Manubrium zu Corpus sterni. Kaudal davon setzen das 3. – 7. Rippenpaar am lateralen Rand des Corpus sterni an. Das kaudal folgende Xiphoid ist sehr individuell ausgeprägt und kann beispielsweise perforiert oder gegabelt sein. [1, 2, 4]

Für die Blutversorgung des Sternums sorgen mehrere Seitenäste der *A. thoracica interna*, die beidseits ca. 1 cm lateral des Sternalrandes verläuft. [7, 8]

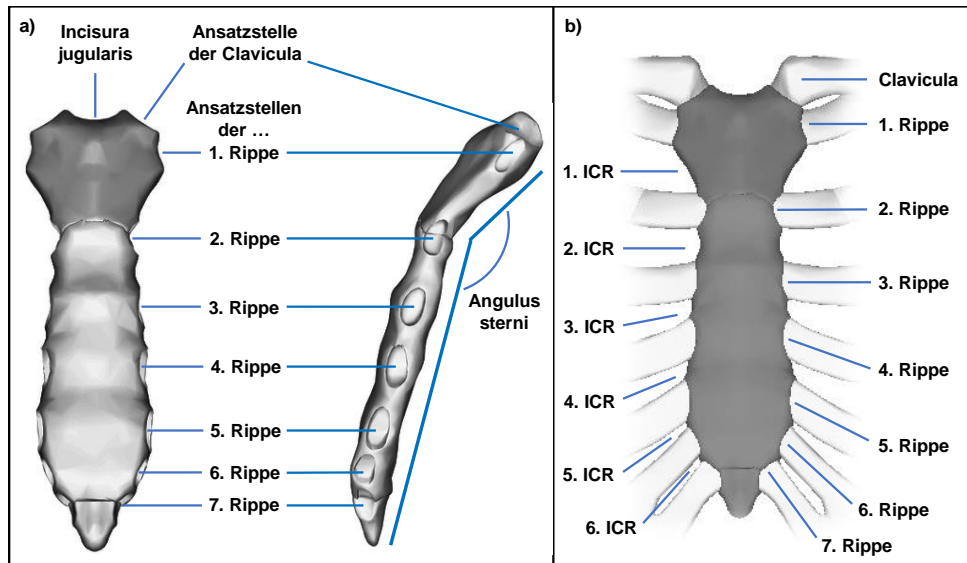


Abbildung 3: Anatomie des Sternums – Knochenansatzstellen und ICRs.
 a) Ansicht des Sternums von ventral [5] und von links [6].
 b) Ansicht des Sternums von ventral [3] mit ansetzenden Knochen und ICRs.

Innerhalb des Thorax befinden sich links und rechts die beiden Lungen in den Pleurahöhlen (vgl. Abbildung 4). Der dazwischenliegende Raum wird *Mediastinum* genannt. Es beherbergt das Herz, die Speiseröhre (*Oesophagus*), die Luftröhre (*Trachea*), den Thymus, kleine und große Blutgefäße, wie *Aorta thoracica* und *V. cava superior* und *inferior*, sowie zahlreiche Lymphgefäße und Nerven. Das Mediastinum geht kranial in den Hals über, kaudal wird es vom Zwerchfell begrenzt. [9, 10]

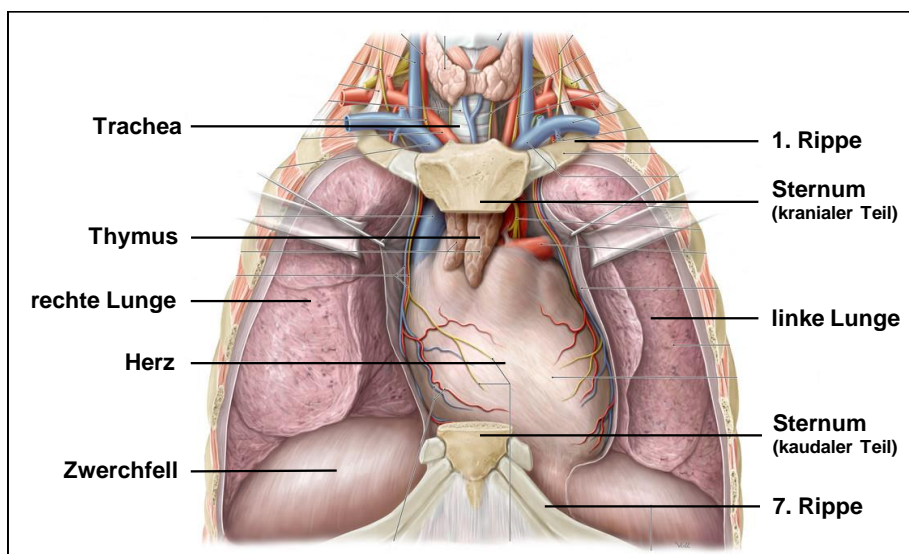


Abbildung 4: Eröffneter Thorax von ventral. Mittelteil des Sternums und ventrale Rippenanteile wurden entfernt. [11]

1.2 Arten der Sternotomie

Um die Organe und Strukturen im Inneren des Thorax operativ erreichen zu können, existieren zahlreiche operative Zugänge zur Eröffnung der Brustwand. Einer der wichtigsten Zugangswege ist die mediane longitudinale Sternotomie. [12, 13] Das Verfahren wird in den folgenden beiden Kapiteln erläutert.

1.2.1 **Komplette mediane Sternotomie**

Die komplette mediane Sternotomie ist eine häufige Zugangsmethode in der Thoraxchirurgie und die Standardzugangsmethode in der Herzchirurgie.

Hierfür wird nach der sterilen Abwaschung und Abdeckung im Operationssaal zunächst der Hautschnitt in der Körpermittellinie von der Incisura jugularis bis zum Xiphoid gesetzt. Das prästernale Gewebe wird in die Tiefe bis auf das Sternum eröffnet. Um bei der sich anschließenden Durchtrennung des Sternums Organe, Blutgefäße, Nerven und das umgebende Gewebe des Sternums zu schonen, müssen diese Strukturen sorgfältig präpariert werden. Nach erfolgter Präparation wird das Sternum in der Mittellinie auf ganzer Länge durchgesägt (vgl. Abbildung 5). Um den Zugang zum Thorax während der OP freizuhalten, wird ein Sternumretractor eingesetzt, der die Sternalhälften auseinanderhält. [12, 13]

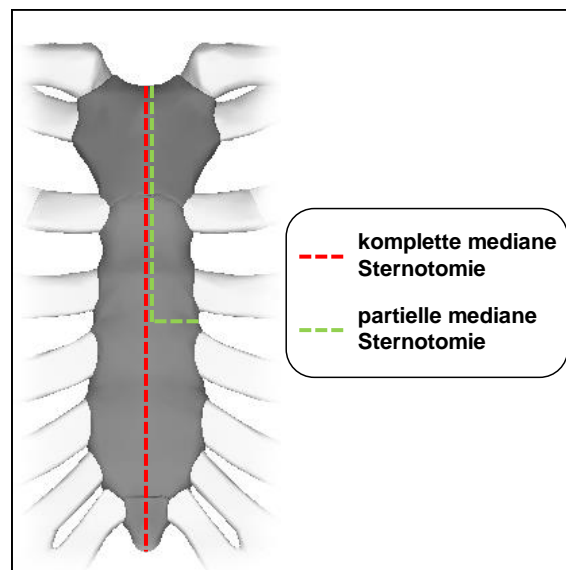


Abbildung 5: Sternotomie. Schnitfführung am Sternum bei kompletter medianer Sternotomie und partieller medianer Sternotomie mit Ausleitung im 3. ICR links. [3]

1.2.2 Partielle mediane Sternotomie

Als minimalinvasive Zugangsmethode kann bei ausreichender Übersichtlichkeit im Operationssitus alternativ eine partielle mediane Sternotomie durchgeführt werden. Der Hautschnitt für diesen Zugangsweg kann im Vergleich zur kompletten medianen Sternotomie kürzer gewählt werden. Das Sternum wird in der Mittellinie von der Incisura jugularis bis auf Höhe des 3., 4. oder 5. ICRs durchgesägt, wo der Schnitt nach rechts oder links in den ICR ausgeleitet wird. Durch diesen Schnitt in Form eines (je nach Seite spiegelverkehrten) ‚J‘ oder ‚L‘ wird der obere Teil des Sternums nur einseitig abgetrennt, während der untere Teil des Sternums intakt bleibt (vgl. Abbildung 5). [14, 15]

1.3 Methoden des Sternumverschlusses nach Sternotomie

Nach erfolgter Operation müssen die beiden Sternalhälften wieder suffizient miteinander verbunden werden, um die Thoraxstabilität wiederherzustellen. Diese ist wichtig für den Schutz der Organe und für eine suffiziente Atmung. Durch die Atembewegungen, vor allem beim Husten oder Niesen, und durch die Bewegung des Oberkörpers und der Arme wirken jedoch starke Kräfte auf die OP-Wunde ein, was besondere Anforderungen an die Belastbarkeit des Verschlusssystems der Sternotomie stellt. [12, 13, 16-18]

Beim Verschluss der Sternotomie muss daher ein adäquates Maß an Festigkeit erreicht werden. Zu locker angelegte Verschlusssysteme führen zu einer thorakalen Instabilität. Zu fest angebrachte Verschlusssysteme können zum Bruch des Osteosynthesematerials führen, Frakturen des Sternums hervorrufen und zudem die sternale Durchblutung im Wundgebiet vermindern. Weiterhin muss ein Überlappen der beiden Sternalhälften oder eine Verschiebung der Sternalhälften gegeneinander vermieden werden. [12, 13, 17]

All diese mit dem Sternumverschluss assoziierten Faktoren können bei Nichtbeachtung die Entwicklung sternaler Wundheilungsstörungen (WHS) begünstigen. [13, 17, 19]

Darüber hinaus existieren patientenbezogene und perioperative Risikofaktoren, die mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für die Entwicklung postoperativer ster-

naler WHS assoziiert sind. Patientenbezogene Faktoren sind z.B. ein höheres Patientenalter [13, 17, 20-22], das Vorliegen einer Adipositas [13, 17, 19, 21, 23-28] bzw. eines erhöhten Body-Mass-Index (BMI) [13, 20, 24, 25, 29-31], eine COPD- [13, 17, 20, 22, 24, 25] oder Diabetes-Erkrankung [13, 20, 21, 23-25, 27-31], das Vorliegen von osteoporotischem Knochen [17, 19] oder ein positiver Raucherstatus [17, 20, 23, 30]. Perioperative Risikofaktoren sind beispielsweise eine verlängerte OP-Dauer [20, 21, 23, 26, 29, 31] bzw. ein (verlängerter) Einsatz der Herz-Lungen-Maschine [22, 25, 29] und die Verwendung der Aa. thoracicae internaе als Bypassgraft [13, 20-22, 24, 30, 31], was die Durchblutung des Sternums vermindert.

Sternale WHS können in Form von sternaler Dehiszenz oder oberflächlichen und tiefen Wundinfektionen auftreten. Sie gehen mit erhöhter Morbidität und Mortalität unter den Patienten, verlängerter Krankenhausaufenthaltsdauer, multiplen Revisions-Operationen und damit auch erhöhten Kosten für das Gesundheitssystem einher. [13, 16, 19, 20, 24-26, 28, 29, 32, 33]

Zur Wiederherstellung der Thoraxstabilität nach Sternotomie und zur Vermeidung von postoperativen sternalen WHS stehen unterschiedliche Sternumverschlussstechniken zur Verfügung, die nachfolgend vorgestellt werden. Welche Methode oder Kombination von Methoden zum Einsatz kommt, ist abhängig von den Präferenzen des Operateurs und von den individuellen Gegebenheiten jedes einzelnen Patienten [12, 16, 19].

1.3.1 Drahtcerclagen

Die Standardverschlussmethode nach medianer Sternotomie besteht in der Verwendung von Drähten aus Chirurgenstahl, die in unterschiedlicher Technik und Anzahl um die beiden Sternalhälften geführt und festgezogen werden, um diese aneinander zu fixieren.

Die Drähte werden entweder durch den Knochen der beiden Sternalhälften gestochen (transsternal, vgl. Abbildung 6a) oder um das Sternum (peristernal, vgl. Abbildung 6b) oder die Rippen herum (pericostal, vgl. Abbildung 6d) angelegt.

Dabei können die Drähte als einfache Schlinge (vgl. Abbildung 6a und b) durch bzw. um das Sternum oder die Rippen herumgeführt werden. Werden die Drähte zu stark festgezogen oder liegt beim Patienten eine verminderte Knochenqualität vor (wie z.B. bei der Osteoporose), so besteht die Gefahr, dass die Drähte den Knochen aufgrund ihres geringen Querschnitts wie eine Säge in Fragmente zerschneiden, was wiederum zu einer thorakalen Instabilität führt. Daher können die Drähte auch in X-Form überkreuzt als Achter-Touren (vgl. Abbildung 6c und d) angelegt werden. Daneben ist die Verwendung von doppelten Drähten möglich. Von den letzteren beiden Methoden verspricht man sich eine bessere Kraftverteilung am Knochen und ein geringeres Risiko für das Einschneiden der Drähte. Die Enden der Drähte werden auf der Vorderseite des Sternums miteinander verdreht und dadurch festgezogen. Nach dem Kürzen der Drahtenden werden sie auf der Sternumvorderseite flach zum Liegen gebracht, um keine Hautirritationen hervorzurufen.

Verwendet werden etwa vier bis zehn Drähte, wobei häufig verschiedene Techniken und Materialien miteinander kombiniert werden. Bei ausschließlicher Verwendung von Drähten empfiehlt eine Faustregel das Einbringen von einer Drahtcerclage pro 10 – 12 kg Körpergewicht des Patienten. [12, 13, 16, 17, 19]

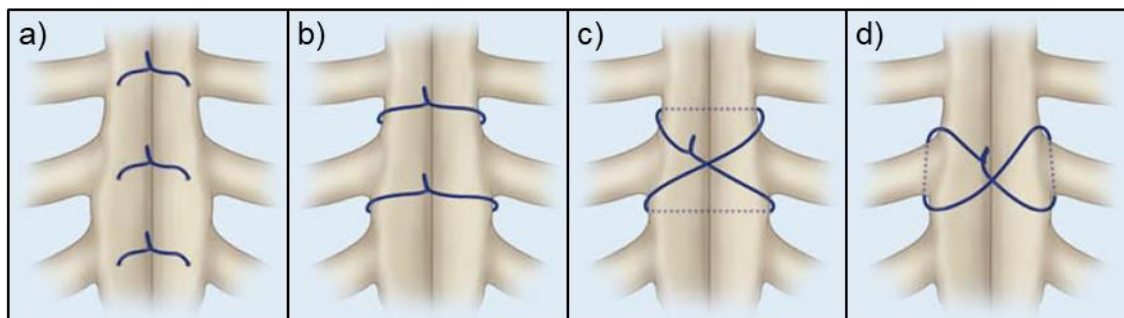


Abbildung 6: Drahtcerclagen für den Sternumverschluss. [34]

a) Einfach transsternal.

b) Einfach peristernal.

c) Achter-Tour peristernal.

d) Achter-Tour pericostal.

(Bilder mit freundlicher Genehmigung durch Prof. Dr. med. Christoph Schimmer, Universitätsklinikum Würzburg)

Eine weitere Sternumverschluss-technik, die sich der Verwendung von Drähten bedient, ist die „Robicsek-Technik“ (vgl. Abbildung 7). Hierfür werden an den lateralen Sternalrändern Drähte in longitudinaler Richtung beginnend bei der

1. Rippe bis zum Xiphoid abwechselnd vor und hinter den Rippenknorpeln entlanggeführt, vergleichbar mit der Technik beim Weben. Beim Xiphoid angekommen kehrt sich die Richtung um und die Drähte werden analog wieder nach kranial geführt, nur dass die Drähte nun auf der entgegengesetzten (Vorder- oder Rück-) Seite der Rippen verlaufen. Kranial der 1. Rippe werden die Enden verdreht. Zusätzlich werden anschließend, wie zuvor beschrieben, einfache peristernale Drähte durch die ICRs angebracht. Mithilfe der Robicsek-Technik entsteht so parasternal eine Verstärkung, die das Einschneiden der peristernalen Drähte in das Sternum verhindert. Diese Technik wird vor allem für den Sternumverschluss bei Risikopatienten oder beim Auftreten sternaler WHS angewandt. [16, 19, 35]

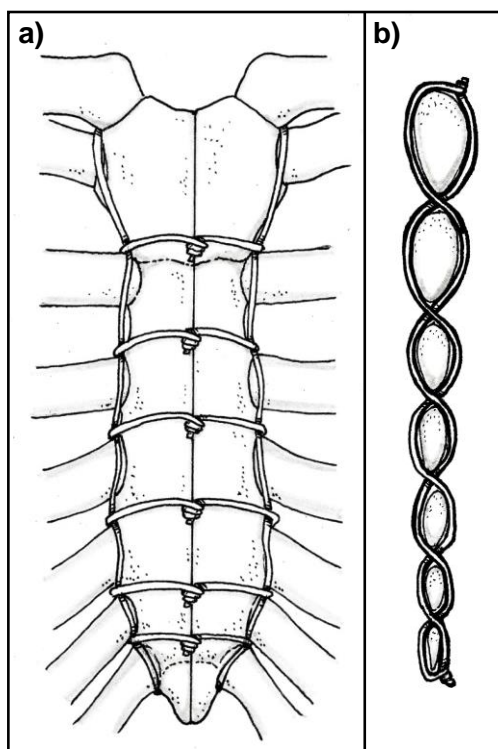


Abbildung 7: Robicsek-Technik.

a) Blick von ventral.

b) Webtechnik von der Seite betrachtet, Rippen im Querschnitt.

(Bilder mit freundlicher Genehmigung durch Albert Ertl)

1.3.2 Bänder

Eine Abwandlung der Verschlusstechnik mittels peristernalen Drahtcerclagen stellt die Verwendung von Bändern dar.

Diese können aus chirurgischem Stahl oder verschiedenen Kunststoffen gefertigt sein und werden, ähnlich wie die Drahtcerclagen, als einfache Schlaufe im ICR um das Sternum gelegt. Durch ihren, im Vergleich zu Drähten, breiteren Querschnitt, weisen sie eine größere Auflagefläche und daher eine bessere Kraftverteilung am Knochen auf. Das Risiko des Einschneidens soll dadurch verringert werden. [16, 17, 36]

Beispiele für diese Sternotomie-Verschlussysteme sind das Sternal ZIPFIX® System (Kunststoff; Synthes GmbH, Oberdorf, Schweiz; vgl. Abbildung 8a), das Sterna-Band™ (Stahl; Cardio Medical GmbH, Langenhagen, Deutschland; vgl. Abbildung 8b) und das SuperCable® Sternotomy Closure System (Kunststoff; Kinamed Incorporated, Camarillo, Kalifornien, USA).

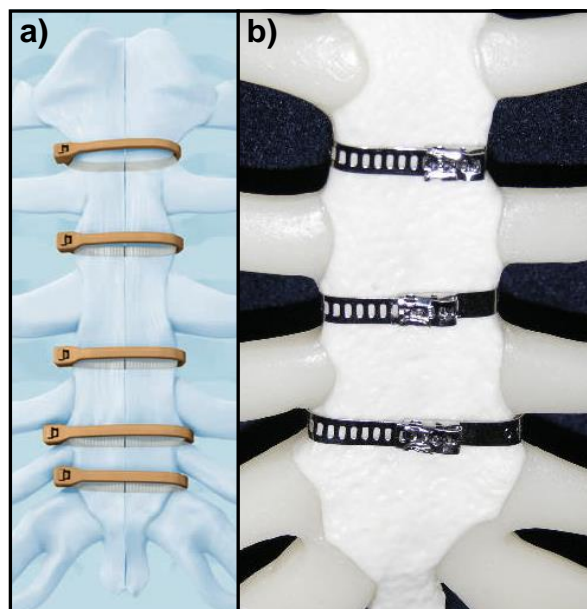


Abbildung 8: Bandsysteme für den Sternumverschluss.

a) ZIPFIX.

b) Sterna-Band.

(Bilder mit freundlicher Genehmigung durch die Firmen DePuySynthes Germany und Cardio Medical GmbH)

1.3.3 Plattensysteme

Mithilfe von Plattensystemen können die beiden Hälften des Sternums starr miteinander verschraubt werden. Sie bieten ein höheres Maß an Stabilität für die Osteosynthese. Plattensysteme stellen jedoch eine aufwendigere und teurere Sternumverschlussmethode dar, weshalb sie vor allem als primäre Verschluss-

methode bei Hochrisikopatienten für eine WHS oder als sekundäre Verschlussmethode beispielsweise nach einer WHS zur Anwendung kommen. [16]

Sie sind unter anderem in linearer, runder oder X-Form verfügbar. Als Beispiele seien hier das Titanium Sternal Fixation System (Synthes USA Products, West Chester, Pennsylvania, USA; vgl. Abbildung 9) und das SternaLock® Blu Primary Closure System (Biomet Microfixation, Jacksonville, Florida, USA) genannt.

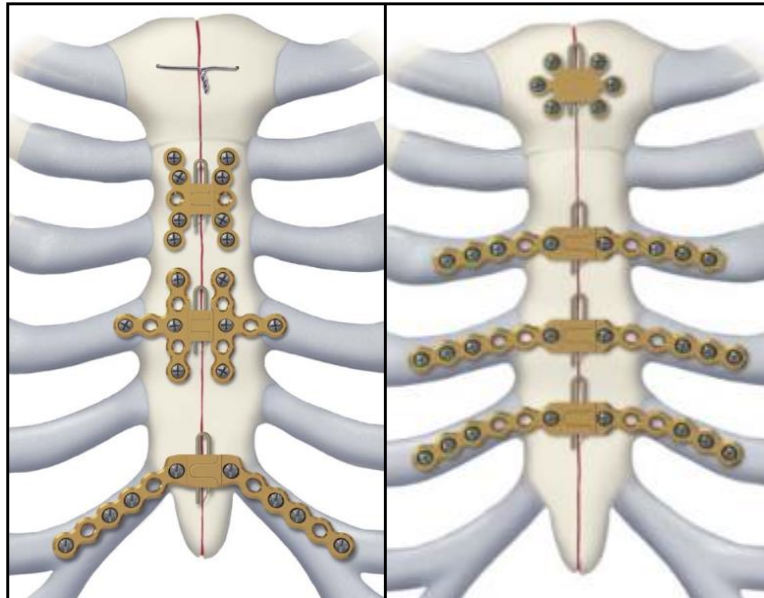


Abbildung 9: Plattensystem für den Sternumverschluss. Titanium Sternal Fixation System.

(Bilder mit freundlicher Genehmigung durch die Firma DePuySynthes Germany)

1.3.4 Klammersysteme

Klammersysteme umfassen das Sternum in den ICRs C-förmig von ventral und legen sich dem Sternum mit ihren Schenkeln seitlich und dorsal an (peristernaler Verlauf). Dabei können die Klammern das Sternum in einem einzelnen ICR stabilisieren (vgl. Abbildung 10b und c) oder die Sternalhälften über mehrere ICRs miteinander verbinden (vgl. Abbildung 10a und b). Beispiele für derartige Klammersysteme sind das StraTos Sternumverschlussssystem (MedXpert, Eschbach, Deutschland; vgl. Abbildung 10a), Sternal Talon® (KLS Martin LP, Jacksonville, Florida, USA; vgl. Abbildung 10b) oder Flexigrip (Praesidia, Bologna, Italien; vgl. Abbildung 10c).

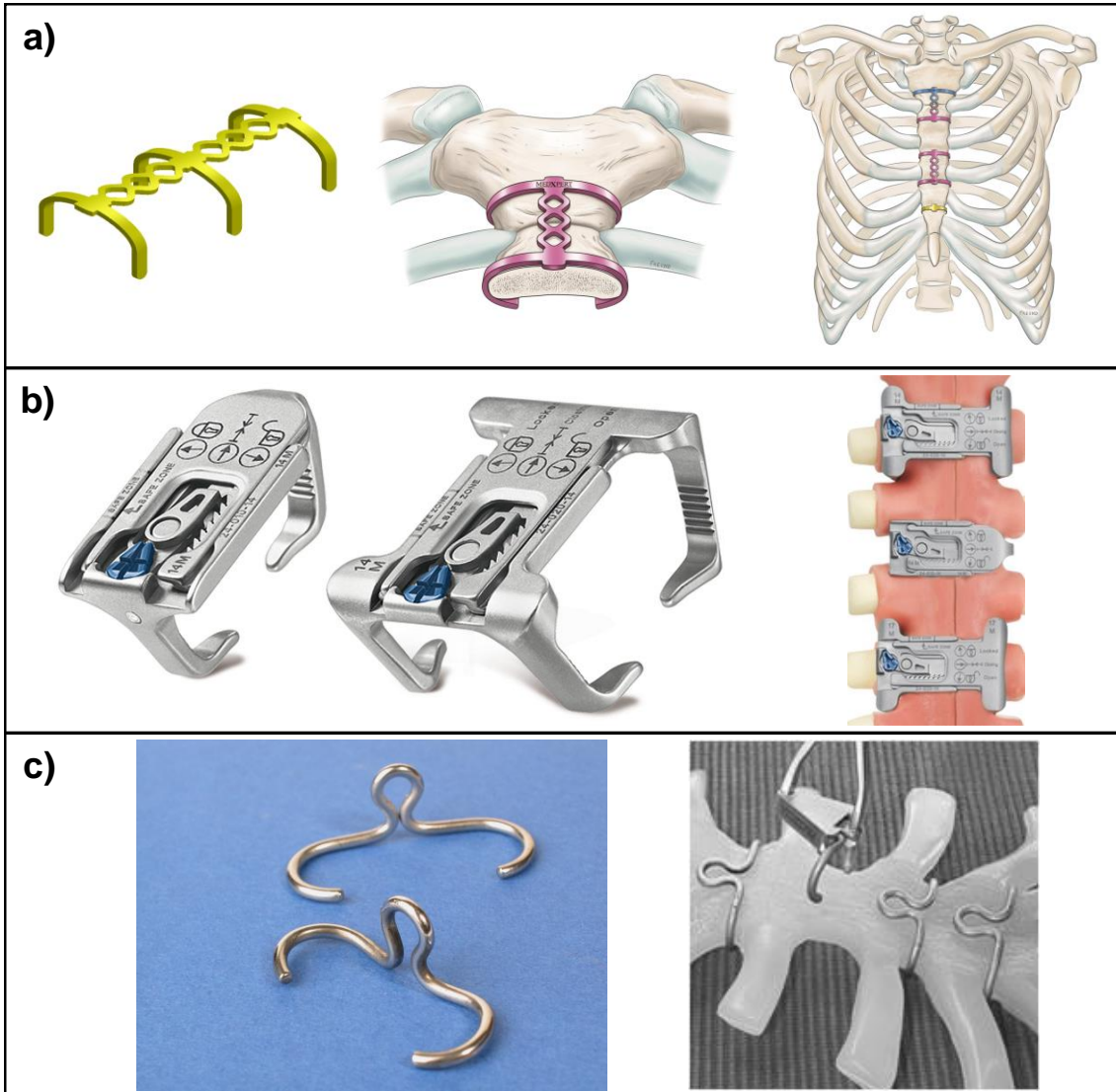


Abbildung 10: Klammersysteme für den Sternumverschluss.

a) StraTos.

b) Sternal Talon.

c) Flexigrip.

(Bilder mit freundlicher Genehmigung durch die Firmen MedXpert, KLS Martin Group und Praesidia)

1.4 Wissenschaftliche Fragestellung

Die Vermeidung der Entstehung von postoperativen sternalen WHS ist ein wichtiges Ziel in der Thorax- und Herzchirurgie, das auch durch die Entwicklung und Herstellung suffizienter Sternumverschlussysteme unterstützt werden kann. Klammersysteme, die mehrere Intercostalräume gleichzeitig versorgen, bieten für den Sternumverschluss den theoretischen Vorteil, dass sie longitudinale Scherkräfte der Sternalhälften besser abfangen. Die verfügbare biomedizinische

Literatur liefert jedoch keine ausreichenden Informationen über die Größen-
dimensionierung des menschlichen Sternums, an denen sich die Entwicklung
solch komplexer Sternumverschlussysteme orientieren kann.

Die vorliegende Arbeit untersucht daher die Größenausdehnung des Sternums
und der angrenzenden Rippen und Intercostalräume an Patienten, die sich einem
chirurgischen Eingriff mit Sternotomie unterzogen haben. Die erhobenen Daten
können die Grundlage für die Entwicklung neuer Implantate für den Sternum-
verschluss oder die Herstellung standardisierter Sternummodelle darstellen.
Weiterhin liefern die gewonnenen Messwerte Informationen zur Generierung
neuer biomechanischer Hypothesen für die Entstehung postoperativer sternaler
Wundheilungsstörungen und tragen zur Erweiterung des allgemeinen Wissens
über die Anatomie des menschlichen Körpers bei.

2 Material und Methoden

2.1 Studiendesign

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine retrospektive Single-Center-Kohortenanalyse durchgeführt.

2.2 Patientenkohorte

In dieser Studie wurden routinemäßig durchgeführte präoperative computertomographische (CT) Aufnahmen des Thorax von Patienten ausgewertet, bei denen nachfolgend eine Sternotomie vorgenommen wurde. Erfasst wurden alle Patientenfälle mit offenchirurgischer Aortenklappenersatz-OP im Jahr 2015 am Universitätsklinikum Würzburg. Einschlusskriterien für diese Studie waren die Durchführung des Aortenklappenersatzes über eine komplette oder partielle mediane Sternotomie und das Vorhandensein der präoperativen CT-Thorax-Aufnahme, die bis zum OP-Tag höchstens fünf Jahre alt sein durfte und das Sternum in seiner vollen Ausdehnung darstellen musste.

2.3 Datenerhebung

Die Daten wurden retrospektiv aus den elektronisch archivierten Patientenakten entnommen, wobei Operationsberichte und -dokumente, Anästhesieunterlagen, Arztbriefe, Laborblätter, unterschiedliche Untersuchungsbefunde (z.B. Echographie, Koronarangiographie) und CT-Aufnahmen und deren Befunde berücksichtigt wurden. Dadurch konnten neben den Messwerten des Brustbeins auch Begleiterkrankungen und Risikofaktoren für eine Wundheilungsstörung (WHS) sowie Daten zum peri- und postoperativen Verlauf erhoben werden.

Die Patientendaten wurden mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogrammes Microsoft Excel® 2010 und der Excel-Version 1902 des Pakets Microsoft Office 365 ProPlus erfasst.

Alle dokumentierten Parameter sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht über alle erhobenen Parameter. Die Parameter in kursiver Schrift wurden in der Datenauswertung letztendlich nicht verwendet.

Kategorie	Erhobener Parameter
Personenbezogene Daten	Demografische Daten <i>Geschlecht, Alter zum OP-Zeitpunkt, Geburtsdatum</i>
	Körpereigenschaften <i>Körpergröße, BMI, Körpergewicht</i>
Vorliegen von Erkrankungen	Stoffwechsel <i>Diabetes</i>
	Lunge <i>COPD, Asthma</i>
	Herz/ Kreislauf <i>Herzinsuffizienz, KHK, (N)STEMI in der Anamnese, pAVK-Erkrankung, Arterielle Hypertonie</i>
	Niere <i>Chronische Nierenkrankheit, Akutes Nierenversagen</i>
	Schilddrüse <i>Hypo-/ Hyperthyreose</i>
	weitere <i>Osteoporose, Malignomkrankung, Immunsuppression, Alkoholabusus, Katecholaminbedarf</i>
Laborwerte	Stoffwechselparameter <i>HbA_{1c}</i>
	Nierenfunktionsparameter <i>Serum-Kreatinin, Serum-Harnstoff, GFR (CKD-EPI und MDRD)</i>
	Entzündungsparameter <i>Leukozytenzahl im Blut, CRP-Wert</i>
	Blutfettwerte <i>Gesamt-Cholesterin, Triglyceride, HDL- und LDL-Wert</i>
	Schilddrüsenfunktionsparameter <i>TSH-Wert, fT3- und fT4-Wert</i>
Funktionelle Parameter	Herz <i>NYHA-Stadium, LVEF-Wert, EuroSCORE-Wert</i>
CT-Daten	CT-Eckdaten <i>Aufnahmedatum, Aufnahmetechnik, Schichtdicke</i>
	Sternummesswerte <i>Länge L, Wölbung W, Breite B1 – B5, Dicke D1 – D5, Abstand der ICRs A1 – A4 (rechts und links), Höhe der ICRs H1 – H5 (rechts und links), Höhe des Rippenansatzes R1 – R5 (rechts und links)</i>
OP-bezogene Daten und Informationen	OP-Eckdaten <i>OP-Datum, OP-Dauer, cross-clamp-Zeit, Dringlichkeit der OP (elektiv/ dringlich/ Notfall)</i>
	OP-Techniken und Prozeduren <i>Art der Sternotomie (komplett/ partiell), Anlage von Bypässen der Koronargefäße unter Verwendung der rechten oder linken A. thoracica interna, Verwendung lokaler Antibiose vor dem Verschluss des Sternums (Gentamycinschwamm/ Vancomycin), Anlage einer intraaortalen Ballonpumpe, Anzahl verabreichter Blutprodukte (EKs/ TKs/ FFP), Gabe gerinnungsfördernder Substanzen</i>
Postoperativer Verlauf	Komplikationen <i>Sternale Wundheilungsstörung, Nachblutung mit Re-Sternotomie</i>
	Aufenthaltszeiten <i>Verlegungsdatum von Intensivstation, Intensiv-Aufenthaltsdauer, Entlassdatum von der Herz-Thorax-Chirurgischen (HTC) Station, Aufenthaltsdauer in der HTC</i>

2.4 Vermessung des Sternums

Herangezogen wurden präoperative CT-Thorax-Aufnahmen, die ab dem Tag der OP maximal fünf Jahre alt sein durften. Zudem musste das komplette Sternum zu sehen sein. Verwendet wurden Aufnahmen mit der Bezeichnung „Lungenfenster“ (bevorzugt), „Thorax“ und „Aorta“. Die Schichtdicke betrug je nach Verfügbarkeit 1 mm (30,1 % der verwendeten Aufnahmen) oder 3 mm (67,5 %), in

Einzelfällen 5 mm (2,4 %). Für die jeweils fehlenden Ebenen wurden rekonstruierte Bilder herangezogen. Um bessere Kontraste für die Betrachtung der knöchernen Strukturen zu erlangen, wurden die Bilder im Knochenfenster dargestellt. Zur Darstellung der CT-Aufnahmen und Vermessung wurde als Software das MERLIN Diagnostik Workcenter, Version 5.3.150501, (Phönics-PACS GmbH, Freiburg, Deutschland) verwendet. Die Messwerte wurden mit einer Genauigkeit von 0,01 mm erhoben und nach den statistischen Analysen auf eine Nachkommastelle gerundet. Alle Messungen wurden von einer einzelnen Person (der Verfasserin dieser Arbeit) vorgenommen.

Insgesamt wurden von jedem Patienten 40 Messwerte des Sternums erhoben. Abbildung 11 zeigt ein Übersichtsschema über alle gemessenen Sternumparmeter. Die Vorgehensweise bei der Vermessung wird in den folgenden Kapiteln ausführlicher erläutert.

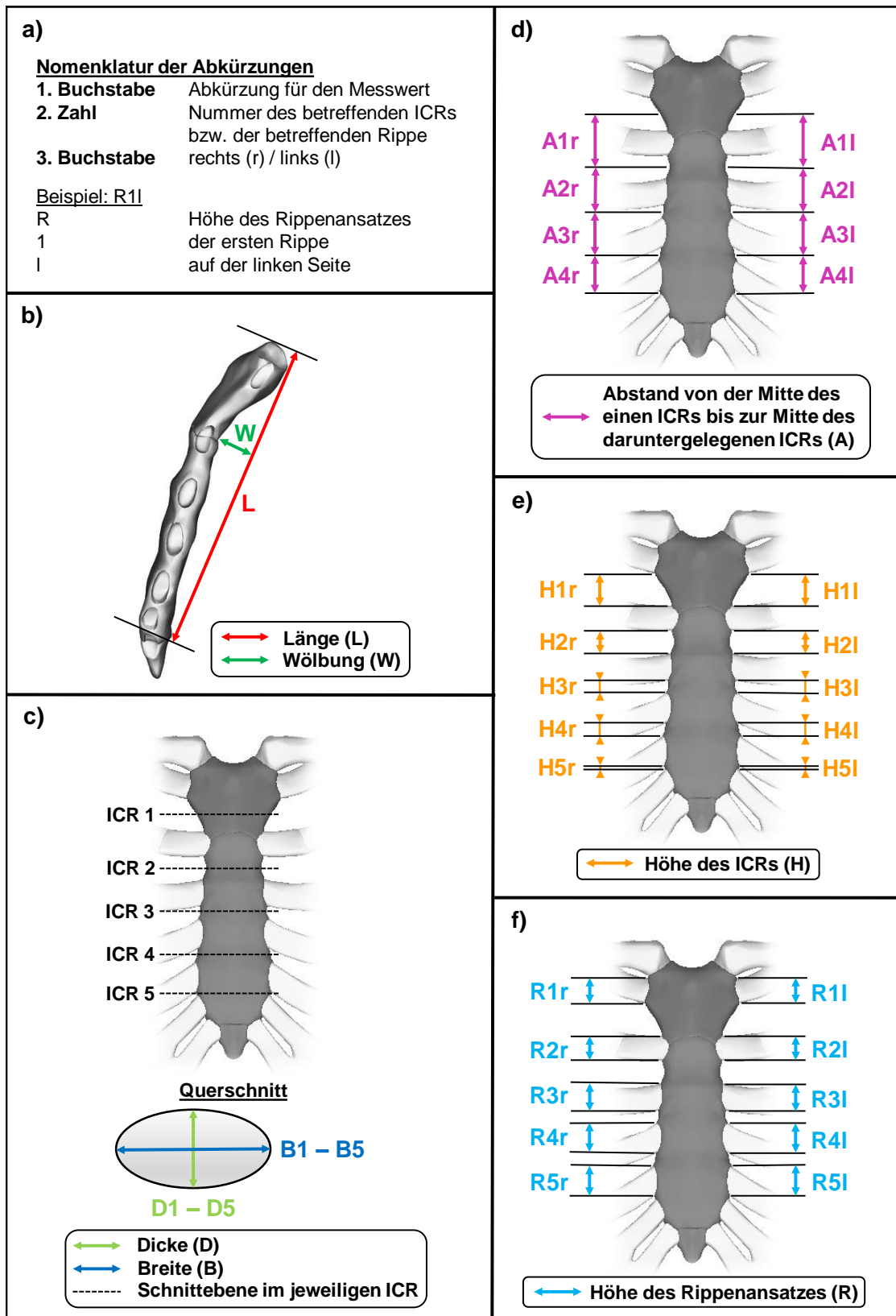


Abbildung 11: Vermessungsschema des Sternums.

a) Nomenklatur der verwendeten Abkürzungen für die Messwerte.

b) Ansicht des Sternums von links [6].

c), d), e) und f) Ansicht des Sternums von ventral [3].

2.4.1 Länge L und Wölbung W

Im sagittalen Bild (vgl. Abbildung 12a) wurde in der Körpermitte (*medial*) die Länge L des Sternums vom Oberrand des Manubrium sterni im Bereich der Incisura jugularis bis zum Unterrand des Corpus sterni gemessen (vgl. Abbildung 12c). Der Processus xiphoideus wurde aufgrund seiner sehr individuellen Ausprägung bei der Längenmessung nicht berücksichtigt.

Als zweites Maß wurde in diesem Bild die maximale Wölbung W des Sternums als Lot zum Längensvektor erhoben (vgl. Abbildung 12c).

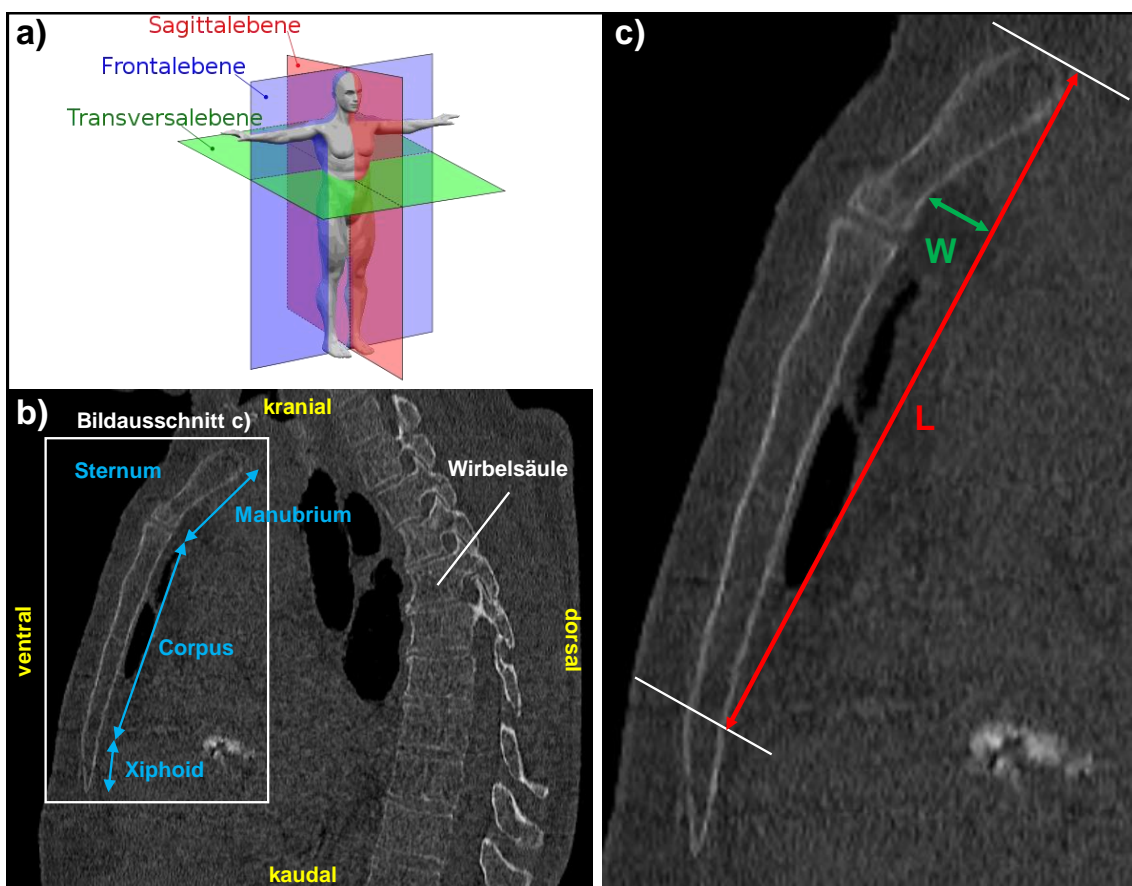


Abbildung 12: Messungen im sagittalen CT-Bild.

a) Schnittebenen durch den menschlichen Körper. Hier Schnitt in der Sagittalebene (rot). [37]

b) Sagittales CT-Bild des Thorax in der Körpermitte (Medianebene), Ansicht von links.

c) Vergrößerter Bildausschnitt aus Abbildung 12b mit sagittaler Ansicht des Sternums von links und Messvektoren für Länge L (rot) und Wölbung W (dunkelgrün) des Sternums.

(Bildquellen b und c: Universitätsklinikum Würzburg)

2.4.2 Breite B und Dicke D

In den axialen Schichten, die einem Schnitt in der Transversalebene entsprechen (vgl. Abbildung 13a), wurden sowohl die maximale Breite B als auch die maximale Dicke D des Sternums auf mittlerer Höhe (kranio-kaudal) des 1. – 5. ICRs bestimmt (vgl. Abbildung 13c).

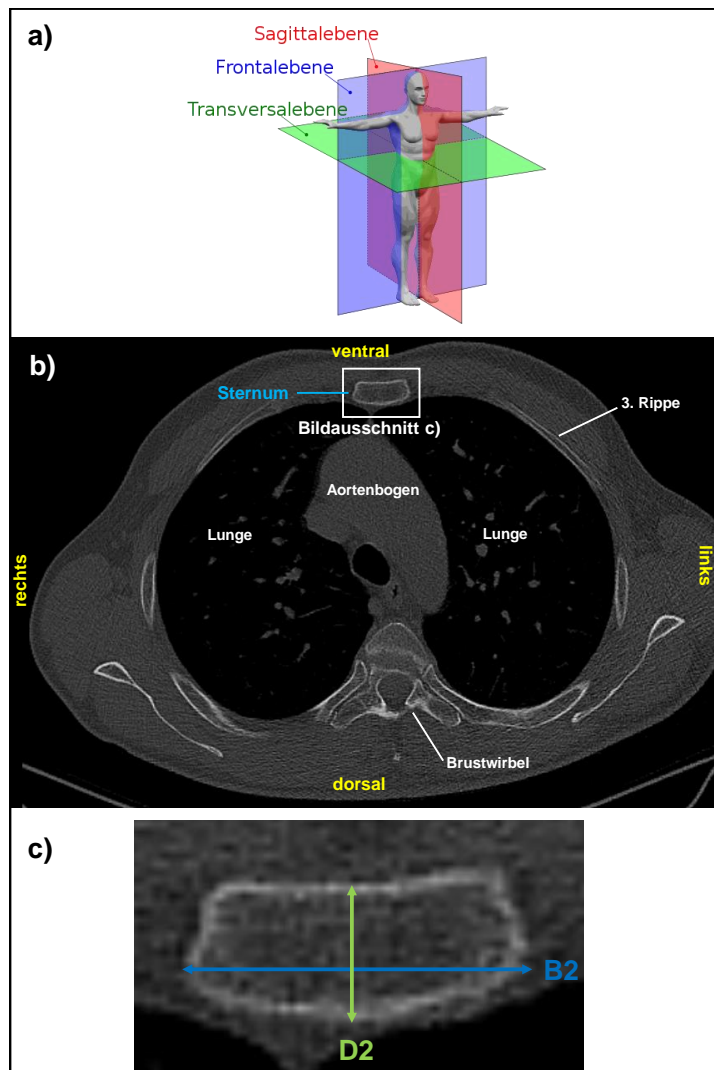


Abbildung 13: Messungen im axialen CT-Bild.

a) Schnittebenen durch den menschlichen Körper. Hier Schnitt in der Transversalebene (grün). [37]

b) Axiales CT-Bild des Thorax auf Höhe des 2. ICRs, Ansicht von kaudal.

c) Vergrößerter Bildausschnitt aus Abbildung 13b mit Ansicht des Sternumquerschnitts und Messvektoren für die Breite B2 (dunkelblau) und die Dicke D2 (hellgrün).

(Bildquellen b und c: Universitätsklinikum Würzburg)

Zusätzlich wurde dokumentiert, an welcher Stelle des Sternums die maximale Breite und die maximale Dicke vorgefunden wurden. Das Sternum zeigte im

Querschnitt je nach Patient und ICR unterschiedliche Formen, die in Abbildung 14 beispielhaft dargestellt sind. Je nach Form wurde die Messstelle individuell angepasst.

Bei den Breitenmessungen wurde zwischen einer mittigen (vgl. z.B. Abbildung 14a), einer dorsalen (vgl. z.B. Abbildung 14d) und einer ventralen (vgl. z.B. Abbildung 14e) Messung unterschieden. Der ventrale Messvektor lag dabei zwischen der Sternummitte und dem ventralen Sternalrand. Ebenso lag der dorsale Messvektor zwischen der Sternummitte und dem dorsalen Sternalrand. Der Messvektor wurde immer parallel zu einem gedachten Vektor durch die Sternummitte angelegt und je nach dem Ort der größten Breitenausprägung des Sternums auf der jeweiligen Höhe platziert.

Bei den Dickenmessungen wurde eine mediale (vgl. z.B. Abbildung 14a) von einer *paramedianen* (d.h. lateral der Körpermitte) Messung (vgl. z.B. Abbildung 14g) unterschieden. Dabei lag der paramediane Vektor zwischen der Sternummitte und dem lateralen Sternalrand. Der Messvektor wurde parallel zu einem gedachten Vektor durch die Sternummitte angelegt und je nach dem Ort der größten Dickenausdehnung an der jeweiligen Stelle platziert.

Als Beispiel für die individuellen Formausprägungen des Sternums ist in Abbildung 13c zu sehen, dass der Querschnitt in diesem Fall annähernd trapezförmig und leicht nach dorsal gebogen ist. Die Messungen wurden bei den dort vorliegenden Gegebenheiten für die Breite dorsal und für die Dicke medial vorgenommen.

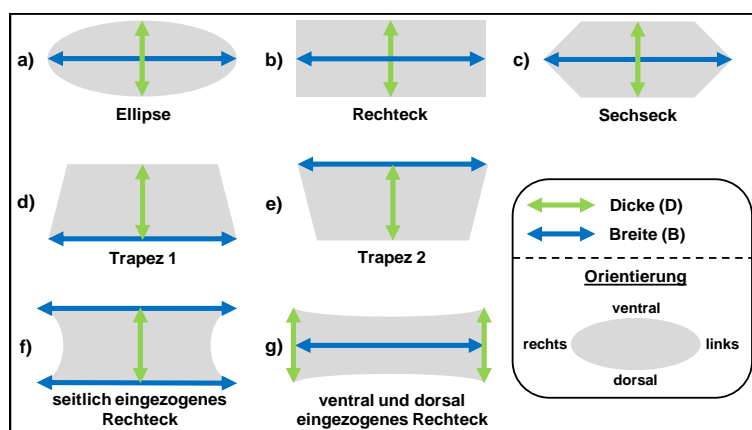


Abbildung 14: Beispiele für Formen des Sternums im Querschnitt.

2.4.3 Abstand der ICRs A

In der koronaren Ansicht, die einem Schnitt in der Frontalebene (vgl. Abbildung 15a) entspricht, wurden die Abstände der ICRs A gemessen. Die Messpunkte lagen auf mittlerer Höhe (kranio-kaudal) zwischen dem Ansatz der oberen und unteren Rippe im jeweiligen ICR (vgl. Abbildung 15c). Der Vektor verband somit immer einen ICR mit dem direkt darunterliegenden.

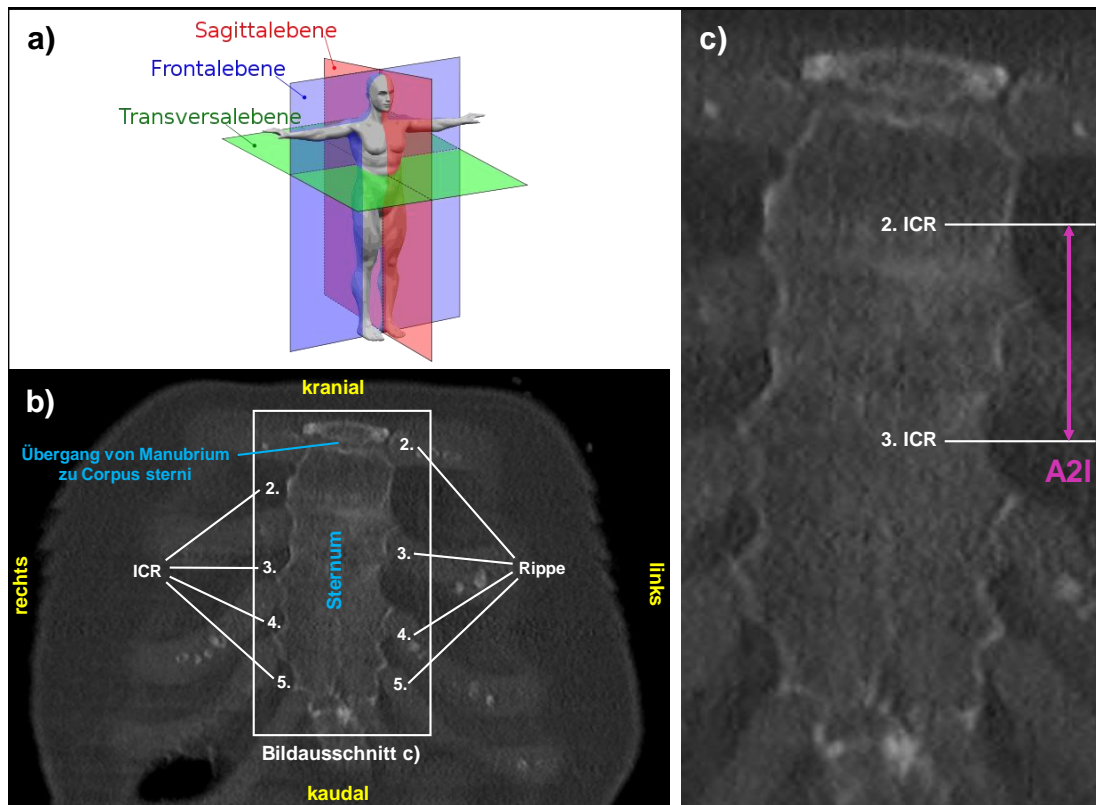


Abbildung 15: Messung des Werts A im koronaren CT-Bild.

a) Schnittebenen durch den menschlichen Körper. Hier Schnitt in der Frontalebene (blau). [37]

b) Koronares CT-Bild des Thorax mit Schnitt durch das Sternum, Sicht von ventral.

c) Vergrößerter Bildausschnitt aus Abbildung 15b mit Ansicht des Sternums von ventral und Messvektor für den Wert A2I (violett) inklusive Hilfslinien (weiß) zur Markierung der Mitte des jeweiligen ICRs.

(Bildquellen b und c: Universitätsklinikum Würzburg)

2.4.4 Höhe des ICRs H

Weiterhin wurde im koronaren Bild jeweils die Höhe (kranio-kaudal) des 1. – 5. ICRs auf der rechten und linken Seite parasternal vermessen (vgl. Abbildung 16). Gemessen wurde der Abstand zwischen den Begrenzungen des jeweils darüber- und darunterliegenden Rippenansatzes.



Abbildung 16: Messung des Werts H im koronaren CT-Bild. Vergrößerter Bildausschnitt aus Abbildung 15b mit Ansicht des Sternums von ventral und Messvektor für den Wert $H2I$ (orange) inklusive Hilfslinien (weiß) zur Markierung der Begrenzungen des jeweiligen Rippenansatzes.

(Bildquelle: Universitätsklinikum Würzburg)

2.4.5 Höhe des Rippenansatzes R

Analog zur Höhe des jeweiligen ICRs wurde auch die Höhe des 1. – 5. Rippenansatzes am Sternum auf der rechten und linken Seite in der Koronarebene gemessen (vgl. Abbildung 17).

Die Messpunkte stellten jeweils die obere und untere Begrenzung des Rippenansatzes der jeweiligen Rippe dar.

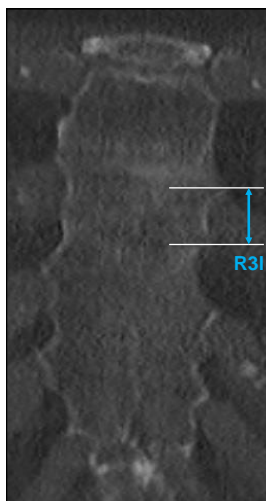


Abbildung 17: Messung des Werts R im koronaren CT-Bild. Vergrößerter Bildausschnitt aus Abbildung 15b mit Ansicht des Sternums von ventral und Messvektor für den Wert $R3I$ (hellblau) inklusive Hilfslinien (weiß) zur Markierung der Begrenzungen des jeweiligen Rippenansatzes.

(Bildquelle: Universitätsklinikum Würzburg)

2.5 Auswertung und statistische Analyse

Alle statistischen Berechnungen wurden mithilfe des Programms IBM® SPSS® Statistics Version 25 durchgeführt. Darunter fiel die Berechnung von Mittelwert, Median, Standardabweichung (Stabw), Minimum (Min), Maximum (Max), Perzentilen, Interquartilsabstand (IQR) und die Erstellung von Häufigkeitstabellen. Die Signifikanztests auf Normalverteilung der Daten wurden mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests vorgenommen. Signifikanztests bei verbundenen Stichproben wurden bei normalverteilten Daten mit dem T-Test für verbundene Stichproben, bei nicht normalverteilten Daten mit dem Wilcoxon-Test durchgeführt. Signifikanztests bei unabhängigen Stichproben wurden für metrische normalverteilte Daten mit dem T-Test für unabhängige Stichproben, für metrische nicht normalverteilte Daten mit dem Mann-Whitney-U-Test und für kategoriale Variablen mit dem exakten Test nach Fisher durchgeführt. Tests auf Korrelation wurden mit dem Korrelationstest nach Spearman durchgeführt.

Bei allen verwendeten Tests wurde ein Signifikanzniveau von 5 % angenommen, d.h. die Nullhypothese wurde bei einem p-Wert $\leq 0,05$ verworfen und die Alternativhypothese angenommen.

Alle dargestellten Diagramme wurden mit den bereits genannten Versionen der Programme SPSS und Excel erstellt.

3 Ergebnisse

3.1 Patientenkohorte

Im Jahr 2015 wurden in der Abteilung für Herz-Thorax-Chirurgie des Universitätsklinikums Würzburg bei 120 Patienten Sternotomien durchgeführt, von deren Thorax im Vorfeld eine CT-Aufnahme angefertigt worden war (vgl. Abbildung 18). Von diesen Patienten wurden 18 ausgeschlossen, da der intraoperative Zugangsweg zum Thorax nicht in einer alleinigen medianen kompletten oder partiellen Sternotomie bestand. Bei 14 weiteren Patienten lagen (durch frühere Sternotomie, multiple Sternumfrakturen nach kardiopulmonaler Reanimation oder Thoraxfehlbildung) veränderte anatomische Gegebenheiten des Thorax vor, weshalb auch sie von der Studie ausgeschlossen wurden. Bei fünf der ausgeschlossenen Patienten war kein ausreichend langer postoperativer Follow-Up-Zeitraum dokumentiert, sodass bezüglich der möglichen Entwicklung einer sternalen WHS keine Aussage getroffen werden konnte.

Letztendlich konnten 83 Patienten in die vorliegende Studie eingeschlossen werden. Hiervon erlitten fünf Patienten postoperativ eine sternale WHS. Die restlichen 78 Patienten erholten sich ohne sternale Komplikationen von ihrer OP.

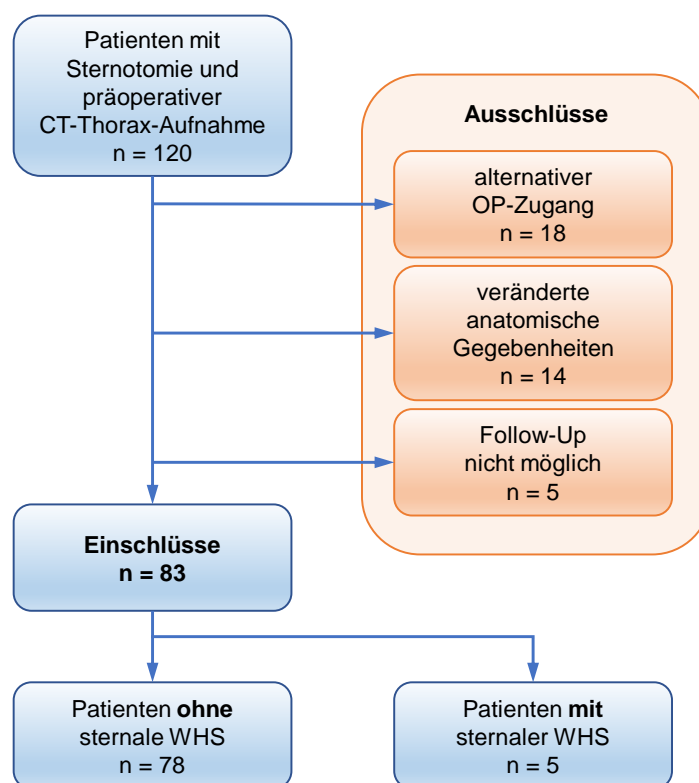


Abbildung 18: Darstellung der Studienpopulation.

Insgesamt waren von den 83 eingeschlossenen Patienten 49,4 % männlich und 50,6 % weiblich.

Tabelle 2 zeigt die Verteilung von Alter und Körpergröße im Patientengut.

Tabelle 2: Verteilung von Alter und Körpergröße zum OP-Zeitpunkt.

	Mittelwert	Median	Stabw	Min	Max	IQR
Alter (Jahre)	72,6	76,0	9,9	30,0	85,0	9,0
Körpergröße (cm)	166,8	167,0	9,1	150,0	185,0	14,0

In die vorliegende Studie wurden ausschließlich Patienten aus einem herzthoraxchirurgischen Patientengut eingeschlossen, sodass in diesem Patientenkollektiv vor allem Patienten höheren Alters vertreten sind. Der Altersgipfel liegt um das 77. Lebensjahr, während nur acht Patienten unter 60 Jahre alt waren. Um diesen Umstand zu verdeutlichen, ist die Altersverteilung zusätzlich in Abbildung 19 veranschaulicht.

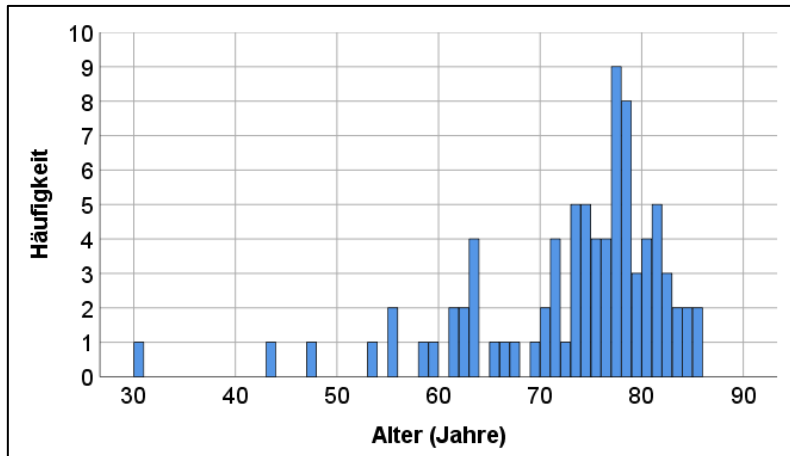


Abbildung 19: Histogramm zur Altersverteilung im eingeschlossenen Patientenkollektiv.

3.2 Durchschnittliche Größenausdehnung des Sternums

Eine Übersicht über die statistischen Daten aller in den CT-Bildern gemessenen Sternumparameter ist in Tabelle 3 dargestellt.

Sofern nicht anders deklariert, waren Messwerte von allen 83 Patienten vorhanden. Die Anzahl der fehlenden Werte ist in der Spalte „fehlend“ angegeben (bei den Werten B und D). Die Anzahl der mit Betrag „null“ angenommenen Werte ist in der Spalte „Min“ in Klammern angegeben (bei den Werten H und A).

Zusätzlich ist für jeden Messwert angegeben, ob eine Normalverteilung der Daten vorlag oder nicht. Bei normalverteilten Daten sollte aus statistischer Sicht der Mittelwert berücksichtigt werden, bei nicht normalverteilten Daten der Median. Zur Vereinfachung und Übersichtlichkeit bei der Darstellung der Daten wurden in dieser Arbeit die Mittelwerte herangezogen.

Tabelle 3: Durchschnittliche Sternummesswerte.

	Mittelwert (mm)	Median (mm)	Stabw (mm)	Min (mm)	Max (mm)	Normal- verteilung	fehlend
L	149,9	149,3	18,4	106,1	201,4	ja	0
W	12,5	12,3	3,9	3,8	22,6	ja	0
B1	43,3	43,9	7,1	29,3	57,8	ja	0
B2	27,9	27,5	4,2	20,3	40,6	nein	0
B3	30,4	30,4	4,4	20,5	41,9	ja	0
B4	34,0	34,4	5,8	21,7	51,5	ja	0
B5	32,2	32,2	6,7	21,1	53,1	ja	19
D1	14,1	14,0	2,9	9,6	24,1	nein	0
D2	12,0	11,5	2,1	8,9	20,7	nein	0
D3	11,0	10,7	1,6	7,6	17,1	nein	0
D4	11,8	11,6	1,8	9,0	17,4	nein	0
D5	12,8	12,8	1,9	9,3	16,9	ja	19
A1r	26,0	25,6	4,1	15,6	35,2	ja	0
A2r	25,8	25,7	3,9	18,1	37,3	ja	0
A3r	21,6	21,1	3,4	14,2	32,6	ja	0
A4r	17,7	18,0	3,6	0,0 (1)	29,0	nein	0
A1l	26,4	26,1	3,9	16,4	36,7	ja	0
A2l	25,7	25,2	4,2	11,6	37,6	ja	0
A3l	22,0	21,2	3,7	15,1	32,8	ja	0
A4l	17,2	16,8	3,5	0,0 (1)	26,2	nein	0
H1r	5,9	6,1	4,2	0,0 (16)	14,3	nein	0
H2r	13,1	13,0	3,9	5,7	26,5	nein	0
H3r	10,7	10,6	3,6	3,8	19,7	ja	0
H4r	7,4	7,3	3,2	0,0 (3)	17,0	ja	0
H5r	4,5	4,5	3,2	0,0 (17)	11,3	nein	0
H1l	6,6	6,7	4,4	0,0 (12)	20,6	nein	0
H2l	13,7	13,0	4,1	1,7	22,9	ja	0
H3l	10,6	10,7	3,4	4,2	18,9	ja	0
H4l	7,0	6,7	3,5	0,0 (4)	17,4	ja	0
H5l	4,0	4,3	2,9	0,0 (18)	11,4	nein	0
R1r	21,8	21,4	3,7	14,8	31,3	ja	0
R2r	14,8	14,4	2,6	10,4	23,8	nein	0
R3r	12,9	12,7	1,9	9,8	20,2	nein	0
R4r	11,9	11,7	2,2	6,3	17,7	nein	0
R5r	11,4	11,2	2,4	5,8	16,7	ja	0
R1l	22,4	21,5	4,0	15,2	34,9	nein	0
R2l	15,0	15,0	2,1	10,8	24,2	nein	0
R3l	12,7	12,8	1,8	8,4	18,7	ja	0
R4l	12,0	11,7	2,3	8,4	20,1	nein	0
R5l	10,9	10,6	2,3	6,4	16,7	ja	0

Aus den gemessenen Werten aus Tabelle 3 wurden zusätzlich weitere Werte berechnet. Diese sind in den jeweils zugehörigen Kapiteln zu finden.

3.2.1 Länge L und Wölbung W

Die durchschnittlichen Messwerte für die Länge L und die Wölbung W des Sternums sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Die Wölbung des Sternums ist für gewöhnlich nach ventral gerichtet. Bei einem Patienten zeigte sich jedoch ein nach dorsal gewölbtes Sternum. Der Wert W wurde in diesem Fall als negativer Wert in der Datentabelle vermerkt. Um durch diesen unrealistisch kleinen Wert die statistischen Daten jedoch nicht zu verfälschen, wurde dieser Wert W bei allen Berechnungen ausgeschlossen. Alle weiteren Messwerte des betreffenden Patienten wurden in die statistische Analyse einbezogen.

3.2.2 Breite B

Messungen der Breite B konnten für die Werte B1 – B4 bei allen 83 Patienten vorgenommen werden. Da aufgrund der oftmals geringen Höhenausdehnung des 5. ICRs nicht immer ein axiales CT-Schnittbild ohne Rippenansatz zu finden war, waren sinnvolle Messungen für den Wert B5 nur bei 64 Patienten möglich.

Den größten Messwert, bezogen auf die ersten fünf ICRs, zeigte der Wert B1, welcher sich am Manubrium sterni befindet. Nach kaudal zum 2. ICR (Wert B2) hin, der sich bereits am Corpus sterni unterhalb des 2. Rippenansatzes befindet, fiel die Breite des Sternums dann sprunghaft ab. Dort fand sich der geringste Breitenmesswert. Nach kaudal nahm die Breite bis zum Wert B4 wieder zu. Auf Höhe des 5. ICRs (Wert B5) wurde das Sternum dann wieder etwas schmaler. Insgesamt lässt sich die Breitenausdehnung des Sternums als wellenförmig mit einem Maximalwert am Manubrium sterni (Wert B1) und einer Taille im 2. ICR (Wert B2) beschreiben.

Die Breitenmesswerte B1 – B5 sind in Tabelle 3 dargestellt und werden in Abbildung 20 veranschaulicht.

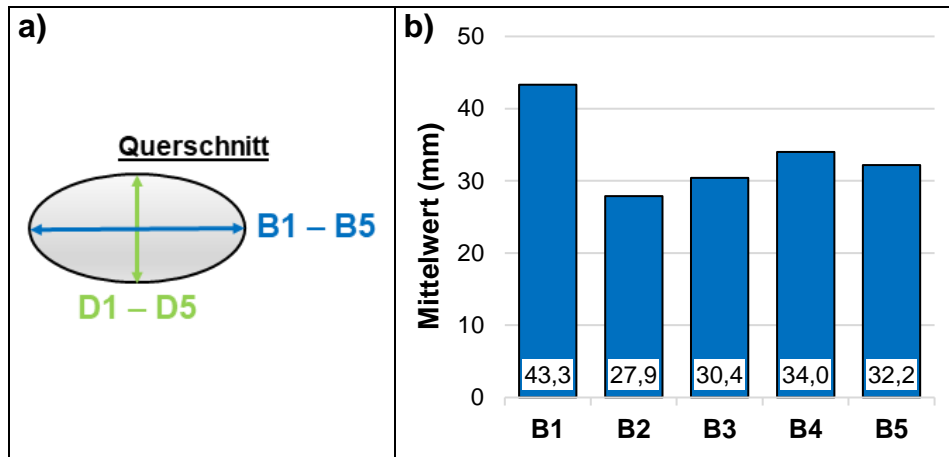


Abbildung 20: Breitenwerte B1 – B5.

a) Messung der Breitenwerte B1 – B5 am Querschnittsbild des Sternums.

b) Balkendiagramm der Werte B1 – B5.

Um Berechnungen mit den Messwerten des Sternums zu erleichtern und so z.B. auch die Herstellung von Implantaten zu unterstützen, wurde ein Durchschnittswert für die Werte B1 – B5 berechnet. Hierfür wurde zunächst für jeden einzelnen Patienten ein Mittelwert aus den jeweiligen Werten B1 – B5 errechnet. Aus diesen Mittelwerten wurde dann ein gemeinsamer Mittelwert für alle Patienten berechnet. Der Mittelwert ist in Tabelle 4 angegeben.

Weiterhin wurde ein zweiter Breiten-Durchschnittswert errechnet, der nur die Werte B2 – B5, welche alle am Corpus sterni liegen, umfasste. Er wurde in gleicher Weise wie der Mittelwert der Werte B1 – B5 berechnet und ist ebenfalls in Tabelle 4 dargestellt. Der Wert B1 am Manubrium sterni schien, verglichen mit den Messwerten B2 – B5, deutlich größer zu sein und wurde bei dieser Betrachtung daher nicht miteinbezogen.

In einer statistischen Analyse zeigte sich ebenso, dass der Wert B1 signifikant größer war als der Mittelwert der Werte B2 – B5.

Tabelle 4: Mittelwerte der Breitenwerte B1 – B5 bzw. B2 – B5.

	Mittelwert (mm)	Stabw (mm)
Mittelwert B1 – B5	33,6	4,2
Mittelwert B2 – B5	31,0	4,3

Tabelle 5 zeigt die Verteilung der Messstellen der Breitenmessungen B1 – B5. Die häufigste Messstelle ist jeweils unterstrichen.

Tabelle 5: Messstellen der Werte B1 – B5.

	Messstelle (%)		
	dorsal	mittig	ventral
B1	<u>98,8</u>	1,2	–
B2	6,0	<u>83,1</u>	10,8
B3	2,4	<u>57,8</u>	39,8
B4	8,4	24,1	<u>67,5</u>
B5	<u>37,5</u>	31,1	31,1

3.2.3 Dicke D

Analog zu den Breitenmessungen konnten die Messungen der Dickenwerte D1 – D4 bei allen 83 Patienten durchgeführt werden. Aufgrund der oftmals geringen Höhenausdehnung des 5. ICRs und eines daher fehlenden axialen CT-Schnittbilds ohne Rippenansatz liegen für den Wert D5 nur 64 Messungen vor. Auch bei den Dickenmessungen wies der Wert D1 am Manubrium sterni den größten Wert auf. Die Dicke nahm nach kaudal bis zum Wert D3 ab, um dann bis zum Wert D5 wieder zuzunehmen.

Die Dickenausdehnung des Sternums vom 1. bis zum 5. ICR (Werte D1 – D5) lässt sich somit als sanduhrförmig mit einer Taille im 3. ICR (Wert D3) beschreiben.

Die Dickenmesswerte D1 – D5 sind in Tabelle 3 dargestellt und werden in Abbildung 21 veranschaulicht.

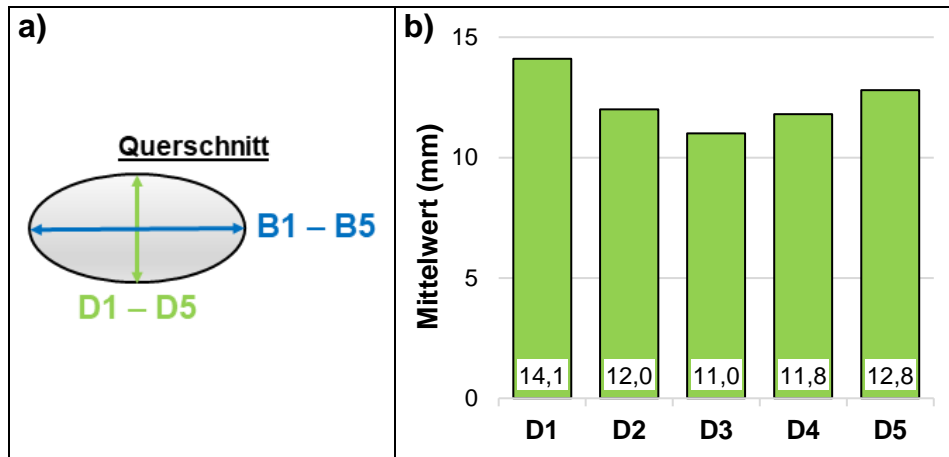


Abbildung 21: Dickenwerte D1 – D5.

a) Messung der Dickenwerte D1 – D5 am Querschnittsbild des Sternum.

b) Balkendiagramm der Werte D1 – D5.

Auch für die Dicke des Sternum wurde zur Vereinfachung ein durchschnittlicher Dickenwert für die Messwerte D1 – D5 errechnet. Hierfür wurde für jeden einzelnen Patienten ein Mittelwert für die Werte D1 – D5 errechnet. Aus diesen Mittelwerten wurde dann ein gemeinsamer Mittelwert für alle Patienten berechnet. Der Mittelwert ist Tabelle 6 zu entnehmen.

In einer zweiten Berechnung wurde auch hier der am Manubrium sterni gelegene Wert D1 nicht miteinbezogen und ein zweiter Mittelwert ausschließlich für die am Corpus sterni liegenden Werte D2 – D5 gebildet (vgl. Tabelle 6).

Die statistische Analyse ergab, dass der Wert D1 am Manubrium sterni signifikant größer war als der Mittelwert der Werte D2 – D5 am Corpus sterni.

Tabelle 6: Mittelwerte der Werte D1 – D5 bzw. D2 – D5.

	Mittelwert (mm)	Stabw (mm)
Mittelwert D1 – D5	12,3	1,6
Mittelwert D2 – D5	11,9	1,5

Die Häufigkeiten der Messstellen der Werte D1 – D5 sind in Tabelle 7 zu sehen. Die häufigste Messstelle ist jeweils unterstrichen.

Tabelle 7: Messstellen der Werte D1 – D5.

	Messstelle (%)	
	medial	paramedian
D1	<u>88,0</u>	12,0
D2	<u>66,3</u>	33,7
D3	33,7	<u>66,3</u>
D4	4,8	<u>95,2</u>
D5	9,4	<u>90,6</u>

3.2.4 Abstand der ICRs A

Der Messwert des Abstands der ICRs A musste in zwei Fällen mit 0 mm angenommen werden, da die Werte nicht messbar klein waren. Dies betraf jeweils einen der Messwerte A4r und A4l. Die Anzahl der mit „null“ angenommenen Werte ist in Tabelle 3 in der Spalte „Min“ in Klammern zu sehen.

Um zunächst den Umgang mit den Werten der rechten und linken Seite zu vereinfachen, wurde aus den zusammengehörigen Parametern ein gemeinsamer Mittelwert berechnet. So wurde z.B. aus den Werten A1r und A1l der Wert A1 berechnet (vgl. Abbildung 22).

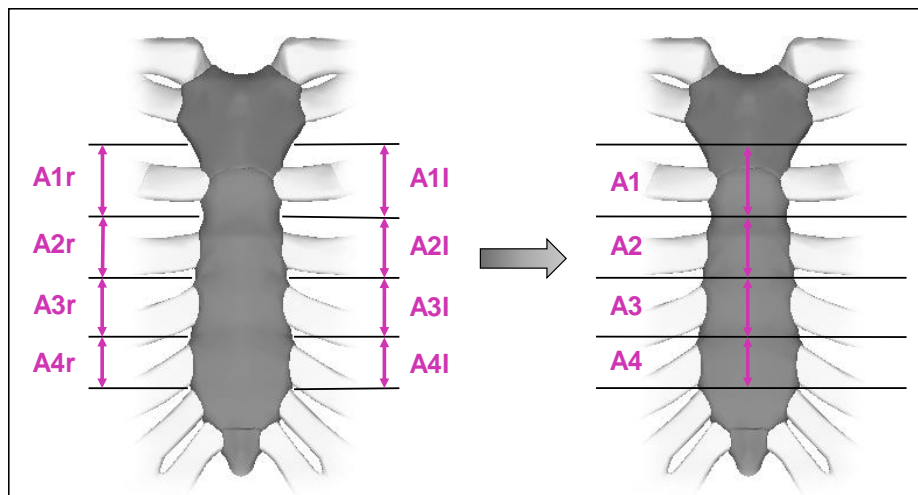


Abbildung 22: Berechnung der Werte A1 – A4. [3]

Hierfür wurde zunächst für jeden Patienten ein Mittelwert aus den jeweiligen Werten desselben ICRs gebildet (z.B. Mittelwert aus A1r und A1l). In einem weiteren Schritt wurde dann ein neuer Mittelwert für alle Patienten gebildet.

Eine vorherige statistische Analyse hatte ergeben, dass sich die Werte der rechten und linken Seite für A1r und A1l, A2r und A2l sowie A3r und A3l nicht signifikant unterschieden. Ein statistisch signifikanter Unterschied zeigte sich jedoch bei den Werten A4r und A4l (17,7 mm vs. 17,2 mm). Der Unterschied betrug jedoch nur 0,5 mm. Daher und zur Vereinheitlichung der Daten, wurde auch aus diesen Werten in gleicher Weise ein gemeinsamer Mittelwert A4 berechnet.

Wie in Abbildung 23 zu sehen ist, stellt der Wert A1 den größten Abstand zwischen zwei ICRs dar. Nach kaudal verringert sich der Abstand der ICRs immer weiter. Die Messwerte A1 – A4 der jeweiligen rechten und linken Seite sind in Tabelle 3 dargestellt, die gemeinsamen Werte A1 – A4 sind in Tabelle 8 zu sehen.

	Mittelwert (mm)	Stabw (mm)
A1	26,2	3,7
A2	25,7	3,9
A3	21,8	3,4
A4	17,5	3,2

Tabelle 8: Werte A1 – A4.

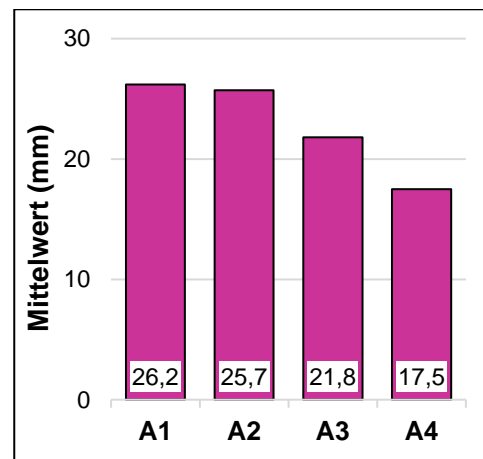


Abbildung 23: Balkendiagramm der Werte A1 – A4.

3.2.5 Höhe des ICRs H

Messungen der Höhe des ICRs H waren bei den Werten H1, H4 und H5 nicht bei allen Patienten möglich, da der ICR in einigen Fällen nicht messbar klein oder gar nicht vorhanden war, weil die Rippenknorpel direkt aneinander anlagen. Der Messwert wurde in diesen Fällen mit 0 mm in der Datentabelle vermerkt und auch so in die statistische Analyse einbezogen. In Tabelle 3 ist die Anzahl dieser Werte in der Spalte „Min“ in Klammern angegeben.

Wie bereits für den Wert A im vorherigen Kapitel beschrieben, wurden auch für den Wert H zur Vereinfachung gemeinsame Mittelwerte aus den jeweiligen Mess-

werten der rechten und linken Seite berechnet. Aus den Werten H1r und H1l entstand so beispielsweise der Wert H1 (vgl. Abbildung 24).

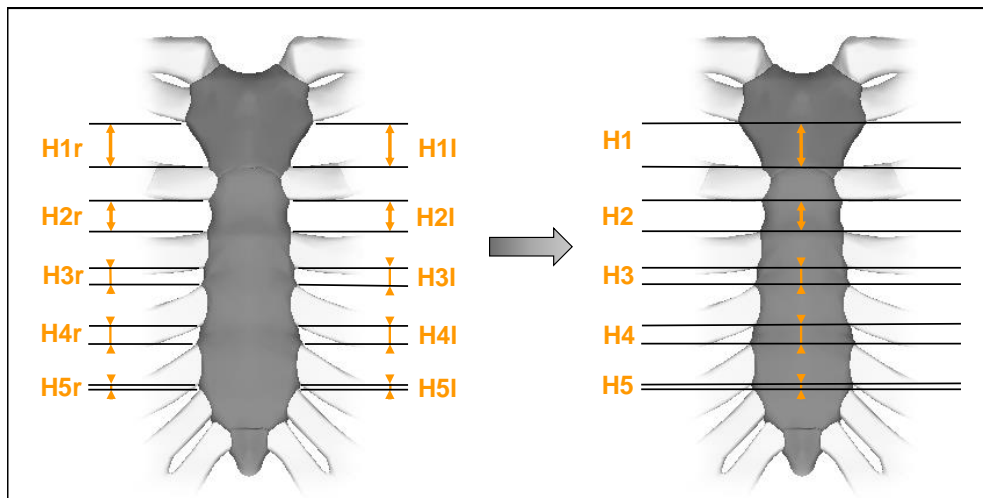


Abbildung 24: Berechnung der Werte H1 – H5. [3]

In gleicher Weise wie für den Wert A, wurde zuerst pro Patient ein Mittelwert aus den zusammengehörigen Werten der linken und rechten Seite gebildet (z.B. Mittelwert aus H1r und H1l). Anschließend wurde ein Mittelwert für alle Patienten errechnet.

Auch für den Wert H wurde eine statistische Analyse durchgeführt, die untersuchte, ob sich die zusammengehörigen Werte der linken und rechten Seite signifikant unterschieden. Dies war nicht der Fall.

Abbildung 25 veranschaulicht, dass die Höhe des ICRs H vom 1. (Wert H1) zum 2. ICR (Wert H2) sprunghaft ansteigt und dort ihren Maximalwert erreicht. Nach kaudal hin nimmt die Höhe des ICRs dann sukzessive ab, bis sie beim Wert H5 ihren Minimalwert erreicht. Die Messwerte H1 – H5 der jeweiligen rechten und linken Seite sind in Tabelle 3 dargestellt, die gemeinsamen Werte H1 – H5 sind in Tabelle 9 zu sehen.

	Mittelwert (mm)	Stabw (mm)
H1	6,2	3,8
H2	13,4	3,7
H3	10,7	3,2
H4	7,2	2,9
H5	4,2	2,7

Tabelle 9: Werte H1 – H5.

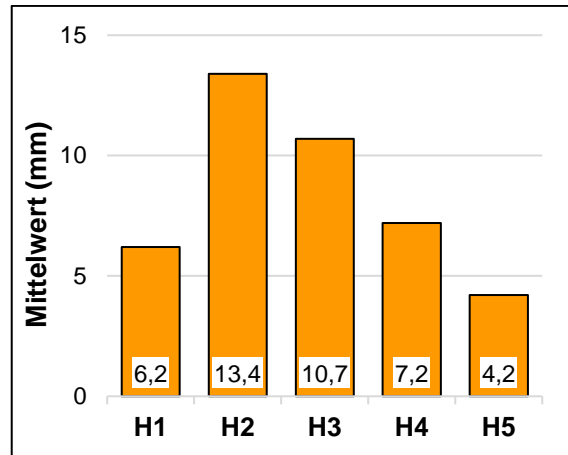


Abbildung 25: Balkendiagramm der Werte H1 – H5.

3.2.6 Höhe des Rippenansatzes R

Wie schon für die Werte A und H, wurden auch für die Höhe des Rippenansatzes R kombinierte Mittelwerte für die zusammengehörigen Werte der rechten und linken Seite berechnet. Aus R1r und R1l entstand so beispielsweise der Wert R1 (vgl. Abbildung 26).

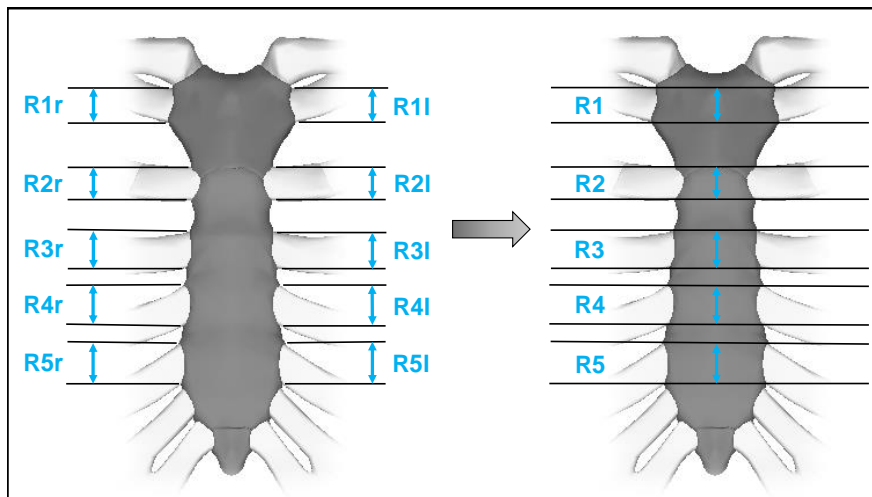


Abbildung 26: Berechnung der Werte R1 – R5. [3]

Hierfür wurde ebenfalls für jeden Patienten ein Mittelwert aus den zusammengehörigen Werten der jeweiligen Seite gebildet (z.B. aus R1r und R1l). Anschließend wurde ein gemeinsamer Mittelwert für alle Patienten berechnet.

Die statistische Analyse zeigte in diesem Fall keine signifikanten Unterschiede zwischen den zusammengehörigen Werten R der rechten und linken Seite.

Abbildung 27 verdeutlicht, dass die 1. Rippe den breitesten Ansatzpunkt am Sternum bildet (Wert R1). Nach kaudal nimmt die Breite der Rippenansatzpunkte am Sternum immer weiter ab.

Die Messwerte R1 – R5 für die jeweilige rechte bzw. linke Seite sind in Tabelle 3 zu finden. Tabelle 10 zeigt die kombinierten Werte R1 – R5.

	Mittelwert (mm)	Stabw (mm)
R1	22,1	3,5
R2	14,9	2,0
R3	12,8	1,6
R4	11,9	2,1
R5	11,1	2,1

Tabelle 10: Werte R1 – R5.

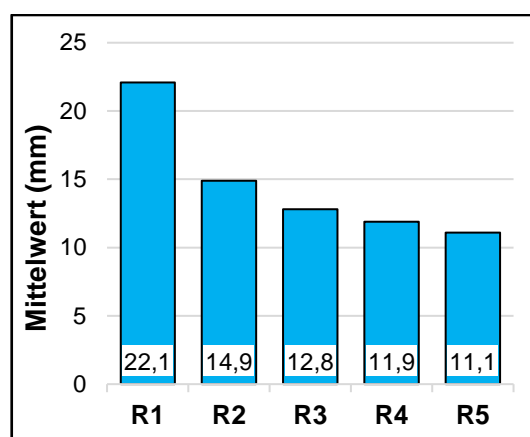


Abbildung 27: Balkendiagramm der Werte R1 – R5.

3.3 Korrelationen der Sternummesswerte untereinander

Im folgenden Kapitel wird das Vorhandensein von Zusammenhängen der Sternummesswerte zueinander untersucht, da dies für die Konfiguration verschiedener Implantate von Interesse ist.

Zunächst wurde die Korrelation zwischen dem jeweiligen Breiten- und Dickenmesswert eines ICRs untersucht (z.B. B1 und D1, B2 und D2 usw.). Es fand sich jedoch kein Zusammenhang zwischen Dicke und Breite des Sternums (Korrelationskoeffizienten KK -0,078 – 0,196).

Für die Korrelation zwischen der Länge des Sternums L und den einzelnen Breitenmesswerten (korreliert wurden jeweils L und B1, L und B2 usw.) fanden sich zwischen L und B1 – B4 schwach positive Zusammenhänge (KK 0,282 – 0,431). Für die Korrelation zwischen L und B5 fiel ein etwas deutlicherer Zusammenhang auf (KK 0,554).

Ebenso wurde jeweils der Längenwert L mit den Dickenmesswerten D1 – D5 korreliert. Während sich zwischen den Werten L und D1 und zwischen den Werten L und D5 ein schwach positiver Zusammenhang zeigte (KK 0,347 bzw. 0,247), konnte für die Werte L und D2 – D4 kein Zusammenhang festgestellt werden (KK 0,091 – 0,192).

Während also davon ausgegangen werden kann, dass zwischen der Breite und der Dicke des Sternums kein bedeutsamer Zusammenhang besteht, so kann für einen Zusammenhang zwischen Länge und Breite bzw. zwischen Länge und Dicke keine allgemeingültige Aussage getroffen werden. Die in dieser Studie gefundenen Korrelationen waren je nach untersuchtem Messwert nicht bedeutsam oder schwach bis deutlich positiv. Für eindeutigere Ergebnisse wird empfohlen, diese Untersuchungen an einem größeren Patientenkollektiv zu wiederholen.

3.4 Mögliche Einflussfaktoren auf die Größenausdehnung des Sternums

Die vorliegende Studie sollte weiterhin untersuchen, ob spezielle Einflussfaktoren auf die Größenausdehnung des Sternums identifiziert werden können. Analytierte Faktoren waren das Geschlecht, das Alter, die Körpergröße, und das Vorliegen einer Adipositas oder einer COPD-Erkrankung.

Um durch die Verwendung von berechneten Werten in der statistischen Analyse keine Ungenauigkeiten zu erzeugen, wurden für dieses Kapitel jeweils die Messwerte der rechten und linken Seite getrennt voneinander untersucht.

3.4.1 Geschlecht

Als Einflussfaktor auf die Sternumanatomie wurde zunächst das Geschlecht überprüft.

Für die Analyse wurde das Studienkollektiv nach dem Geschlecht aufgeteilt (42 Frauen, 41 Männer). Die beiden Gruppen unterschieden sich statistisch signifikant hinsichtlich der Körpergröße. Sie betrug bei den Frauen durchschnittlich

160,9 cm ($\pm 7,3$ cm), bei den Männern hingegen 173,0 cm ($\pm 6,1$ cm). Männer waren damit durchschnittlich ca. 12 cm größer als Frauen.

Im Vergleich der Sternummesswerte von Frauen und Männern zeigten sich bei einem Großteil der Werte statistisch signifikante Unterschiede zwischen beiden Gruppen (30 von 40 Messwerten, entspricht 75 %), wobei alle dieser 30 Messwerte bei den Männern höher lagen als bei den Frauen.

Auch von den restlichen 10 Messwerten lagen 9 bei den Männern höher als bei den Frauen. Insgesamt waren damit 97,5 % der Messwerte im männlichen Kollektiv größer als im weiblichen. Der Wert H11 war als einziger im weiblichen Kollektiv größer als im männlichen, was als Zufallsfund gewertet wird.

Die hier gezeigten Messungen belegen, dass das Geschlecht einer Person einen bedeutenden Einflussfaktor auf die Anatomie des Sternums darstellt. Um jedoch sicherzustellen, dass dieses Ergebnis nicht rein durch den natürlich bedingten Körpergrößenunterschied zwischen Frauen und Männern entstanden ist, wurde die Körpergröße im Folgekapitel als eigenständiger Einflussfaktor getestet.

Die Messwerte beider Gruppen sind in Abbildung 28 dargestellt. Die Messwerte mit statistisch signifikantem Unterschied zwischen beiden Gruppen sind mit einem Sternchen (*) markiert.

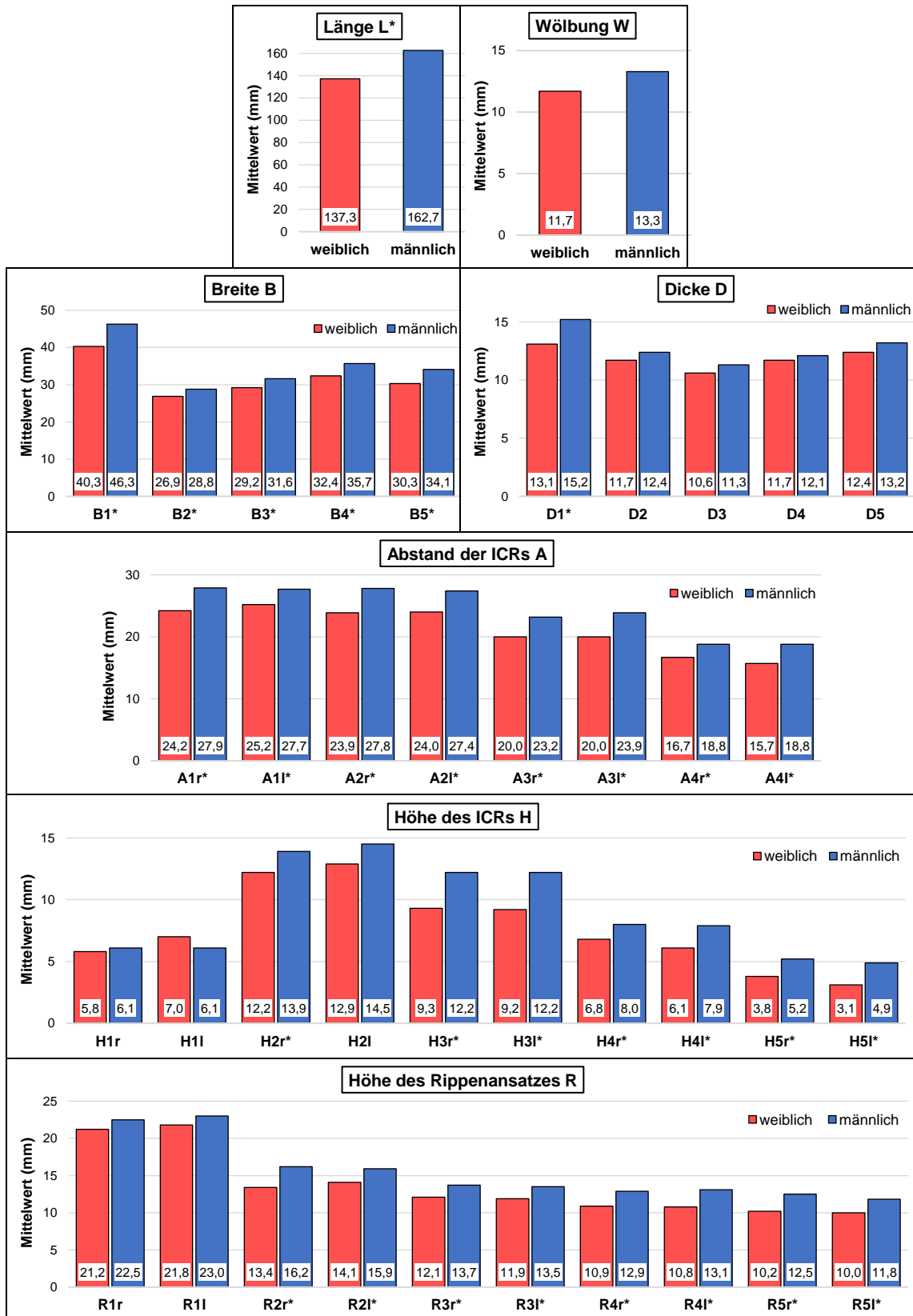


Abbildung 28: Balkendiagramme der Sternummesswerte von weiblichen und männlichen Patienten. Sich statistisch signifikant unterscheidende Werte sind mit einem Sternchen (*) markiert.

3.4.2 Körpergröße

Da sich die beiden Geschlechtsgruppen bei der Analyse des Einflussfaktors Geschlecht in Kapitel 3.4.1 hinsichtlich der Körpergröße statistisch signifikant unterschieden hatten, wurde auch der Faktor Körpergröße als eigenständiger Einflussfaktor auf die Sternumanatomie untersucht.

Um den Faktor Geschlecht in dieser Untersuchung zu eliminieren, wurde die Analyse für Frauen und Männer getrennt voneinander durchgeführt. Die Frauen bzw. Männer wurden nach dem Median ihrer Körpergrößen in jeweils eine körperlich „kleine“ und eine körperlich „große“ Gruppe eingeteilt, deren Sternummesswerte mittels statistischer Tests miteinander verglichen wurden.

Statistisch signifikante Unterschiede bezüglich der Sternummesswerte zeigten sich zwischen kleinen und großen Frauen bei lediglich 2 der insgesamt 40 gemessenen Werte (H1l, R1l). Hierbei lag der Messwert für H1l in der großen Gruppe höher, der Messwert für R1l allerdings entgegen der Erwartungen in der kleinen Gruppe.

Bei den Männern zeigten sich statistisch signifikante Unterschiede zwischen beiden Gruppen bei 6 von 40 Messwerten (L, A2r, A2l, A3l, A4r, H3l). Alle diese Messwerte lagen in der größeren Gruppe höher als in der kleinen Gruppe.

Auch eine probatorische Einteilung des Patientenkollektivs in drei bzw. vier Gruppen gestaffelt nach der Körpergröße (nach dem 33. und 66. Perzentil bzw. nach den Quartilen der Körpergröße) erbrachte keine deutlicheren Ergebnisse.

Da statistisch signifikante Unterschiede bezüglich der Sternummesswerte zwischen kleinen und großen Personen nur bei 5 % (Frauen) bzw. 15 % (Männer) der erhobenen Werte festgestellt werden konnten, wird in vorliegender Studie davon ausgegangen, dass der Einfluss der Körpergröße auf die Größenausdehnung des Sternums von geringerer Bedeutung sein muss als das Geschlecht. Ob die Körpergröße überhaupt ein ausschlaggebender Faktor für die anatomischen Gegebenheiten des Sternums ist, kann nicht abschließend beurteilt werden und sollte gegebenenfalls in einem größeren Patientenkollektiv erneut untersucht werden.

3.4.3 Alter

Weiterhin wurde analysiert, ob im vorliegenden Patientenkollektiv ein Einfluss des Patientenalters auf die anatomische Konfiguration des Sternums nachzuweisen war.

Für die Untersuchung wurden nach dem Median des Alters jeweils eine „junge“ und eine „alte“ Gruppe gebildet, deren Sternummesswerte miteinander verglichen wurden.

Statistisch signifikante Unterschiede zwischen beiden Gruppen wurden bei lediglich 2 der 40 Messwerte (entspricht 5 % der Messwerte) gefunden (H4r, R1l). Beide Werte lagen beim jüngeren Kollektiv höher.

Aufgrund des geringen Prozentsatzes der sich statistisch signifikant unterscheidenden Messwerte, wird geschlussfolgert, dass das Patientenalter in dieser Studie keinen relevanten Einfluss auf die Größenausdehnung des Sternums hatte. Beachtet werden muss dabei jedoch, dass in die vorliegende Studie überwiegend ältere Patienten eingeschlossen wurden und dass kaum Patienten im jungen und mittleren Erwachsenenalter vertreten waren (Altersspanne von 30 – 85 Jahren, jedoch nur acht Patienten unter 60 Jahren; vgl. Abbildung 19). Möglicherweise wären die Unterschiede der Sternummesswerte bei einer ausgeglicheneren Altersverteilung des Patientenkollektivs ausgeprägter ausgefallen.

3.4.4 Adipositas

Da eine Adipositas durch die größere Masse, vor allem des Fettgewebes, eine zusätzliche Belastung des muskuloskelettalen Systems mit sich bringt [38], wurde auch dieser Faktor auf eine Einflussnahme auf die Sternumanatomie überprüft.

Zur Untersuchung des Einflussfaktors Adipositas wurden die Patienten nach den Richtwerten der WHO [39] in eine Gruppe Nicht-Adipöse (Normalgewichtige und Präadipöse, BMI 18,50 – 29,99 kg/m²; 60 Patienten) und eine Gruppe Adipöse (BMI ≥ 30,00 kg/m²; 22 Patienten) eingeteilt. Ein Patient wurde aufgrund eines

BMI's im untergewichtigen Bereich ($< 18,50 \text{ kg/m}^2$) von der Analyse ausgeschlossen.

Statistisch signifikante Unterschiede zwischen beiden Gewichtsgruppen konnten für nur 2 der 40 Messwerte (entspricht 5 % der Messwerte) festgestellt werden (A2I, R5I). Während der Wert A2I bei den Normalgewichtigen höher lag, fiel der Wert R5I bei den Adipösen höher aus.

Es konnte somit für die vorliegende Studie auch beim Faktor Adipositas keine Beeinflussung der Sternummesswerte nachgewiesen werden.

3.4.5 COPD

Eine COPD-Erkrankung kann z.B. durch eine gesteigerte Hustenfrequenz oder größere Atemanstrengung eine erhöhte Belastung für das thorakale Skelett bedeuten. Zudem kann eine COPD die Entwicklung eines Lungenemphysems nach sich ziehen, welches durch die Entwicklung eines Fassthorax auch eine Veränderung der Thoraxform mit sich bringen kann [40]. Die COPD wurde daher als möglicher Einflussfaktor auf die Sternumanatomie betrachtet.

Für die Analyse wurde das Studienkollektiv nach dem Vorliegen einer COPD-Erkrankung in zwei Gruppen (COPD: 16 Patienten, keine COPD: 67 Patienten) aufgeteilt und die Sternumparameter beider Gruppen miteinander verglichen.

Für keinen der 40 Sternummesswerte konnte ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen beiden Gruppen erfasst werden.

Eine COPD-Erkrankung konnte damit in der vorliegenden Studie als Einflussfaktor auf die Sternumanatomie ausgeschlossen werden.

3.5 Sternummesswerte von Patienten mit und ohne Wundheilungsstörung

Fünf Patienten des untersuchten Patientenguts dieser Studie entwickelten postoperativ eine sternale WHS (vgl. Abbildung 18), darunter befanden sich drei Frauen und zwei Männer. Es kam zu oberflächlichen und tiefen Wundinfektionen und zu Sternuminsuffizienzen ohne Keimnachweis.

Im Rahmen dieser Studie wurde untersucht, ob bei den Patienten mit sternaler WHS andere anatomische Gegebenheiten des Sternums gefunden werden konnten, als bei den Patienten ohne WHS.

Hierfür wurden die Sternummesswerte der Patienten mit postoperativer WHS denen der Patienten ohne WHS gegenübergestellt und miteinander verglichen. Statistische Signifikanztests konnten aufgrund der geringen Fallzahl von WHS nicht durchgeführt werden.

Wie in den Streudiagrammen in Abbildung 29 beispielhaft für die Werte L, W, B1 – B5 und D1 – D5 zu sehen ist, lagen die Sternummesswerte der Patienten mit sternaler WHS im Durchschnitt der Messwerte der Patienten ohne WHS und wiesen keine Ausreißer auf. Auch in den hier nicht dargestellten Streudiagrammen für die Werte A1 – A5, H1 – H5 und R1 – R5 zeigten sich keine Besonderheiten im Vergleich der beiden Patientengruppen.

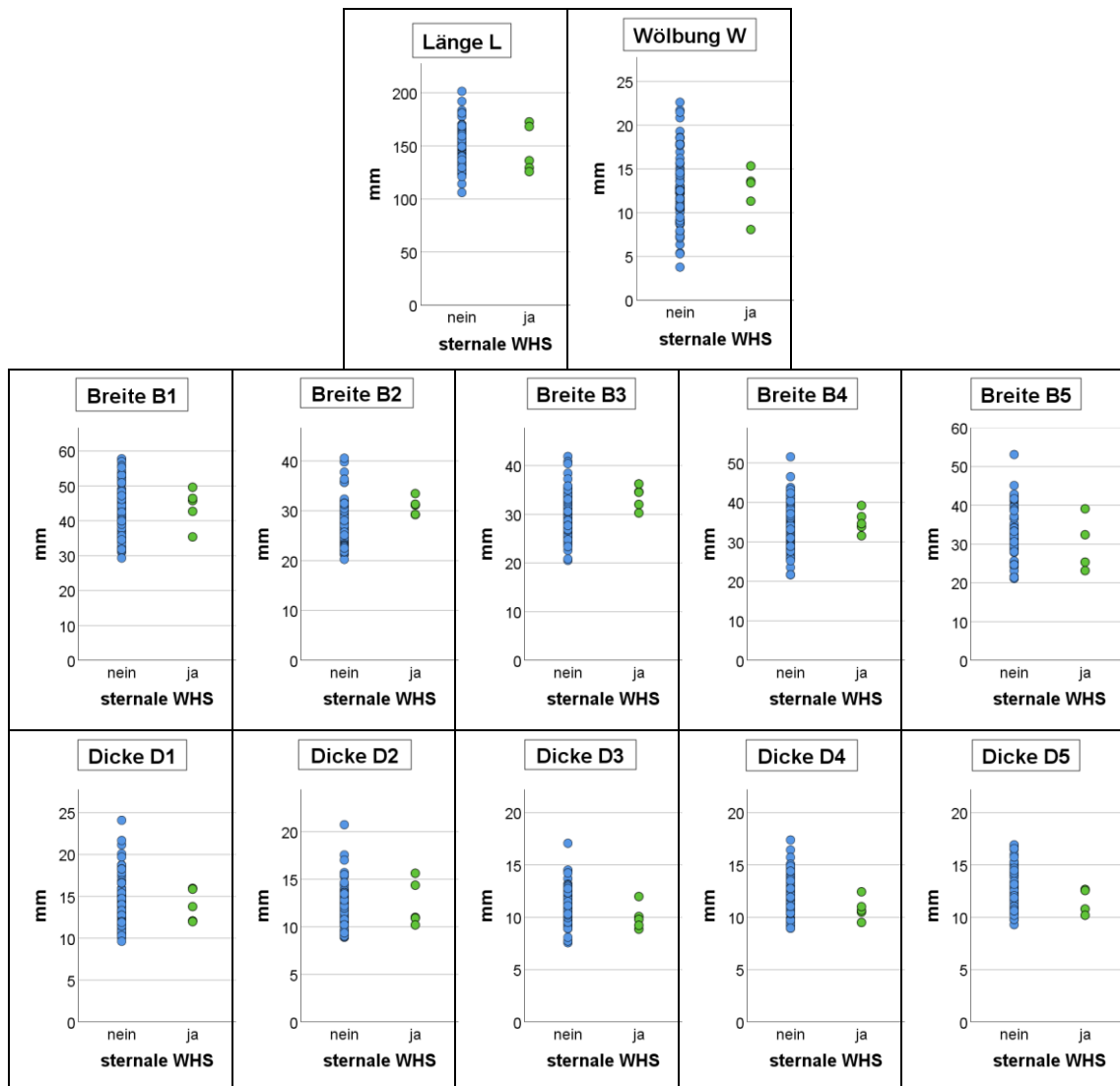


Abbildung 29: Streudiagramme der Sternummesswerte von Patienten mit und ohne Wundheilungsstörung.

Die Mittelwerte der erhobenen Sternummesswerte von Patienten mit und ohne sternale WHS sind in Abbildung 30 dargestellt. Auch hier fielen keine bedeutenden Abweichungen der Messwerte auf.

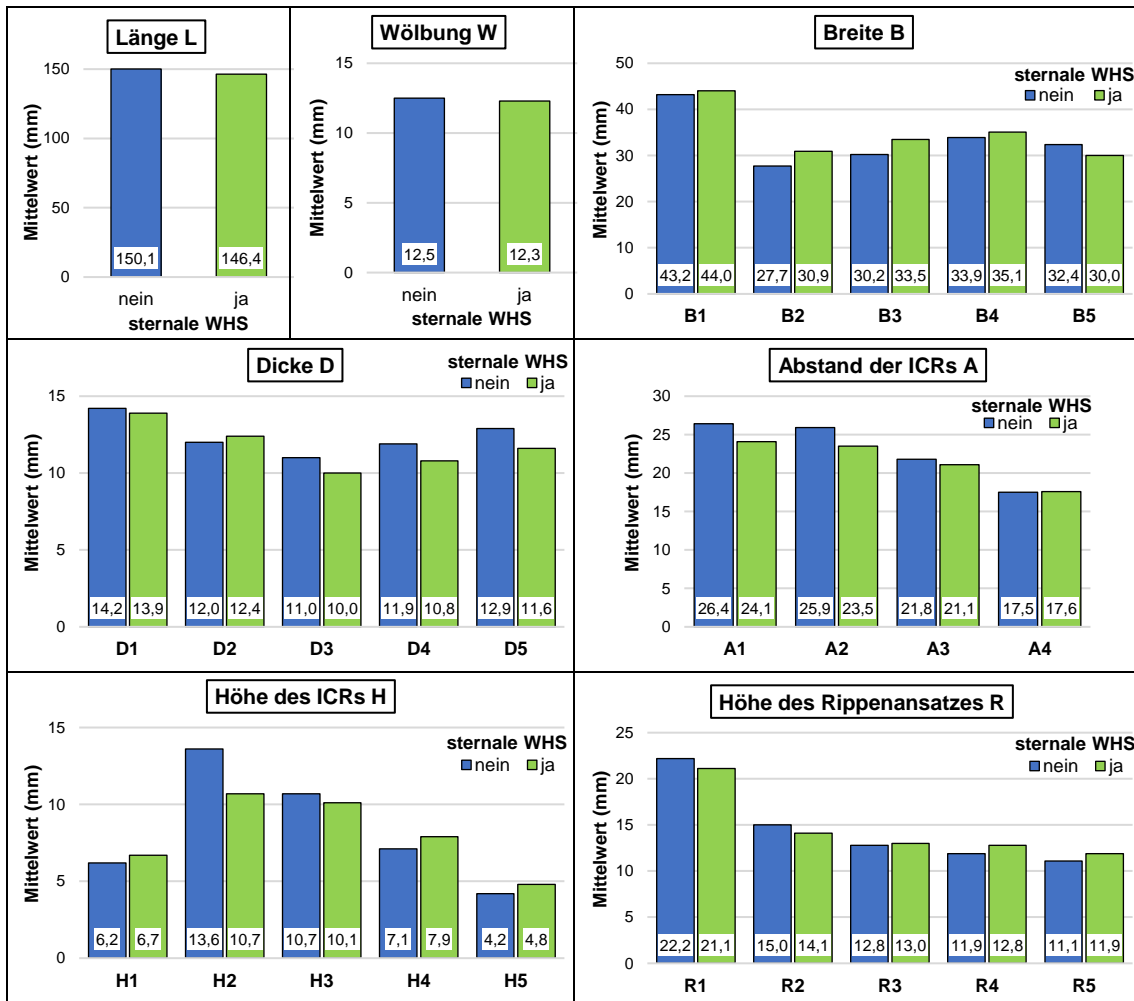


Abbildung 30: Balkendiagramme der Sternummesswerte von Patienten mit und ohne Wundheilungsstörung.

Im Hinblick auf die Identifikation weiterer Einflussfaktoren auf die Entstehung von WHS wurden für diese Studie neben den Sternummesswerten viele klinische prä-, peri- und postoperative Parameter (vgl. Tabelle 1) der Patienten erfasst. Aufgrund der geringen Anzahl von Patienten mit WHS im vorliegenden Patientenkollektiv wurden hierfür letztendlich keine statistischen Analysen durchgeführt. Es wird daher an dieser Stelle auf die betreffenden Studien zu Einflussfaktoren auf die Entstehung von sternalen WHS verwiesen [20, 21, 23-31].

4 Diskussion

Die Sternotomie ist ein Standardzugangsweg für viele thorax- und herzchirurgische Operationen. Am Ende der Operation muss das Sternum wieder adäquat verschlossen werden, damit die Organe im Inneren des Thorax geschützt sind, damit eine suffiziente Atmung möglich ist und auch um der Entwicklung von ster-nalen Wundheilungsstörungen vorzubeugen. Letztere beeinträchtigen nicht nur den Patienten massiv, sondern belasten auch das Gesundheitssystem.

Für einen adäquaten Sternumverschluss sind deshalb Techniken und Systeme notwendig, die die beiden Sternalhälften fest aneinander fixieren, ohne Verschiebungen zuzulassen und ohne zu großen Druck auszuüben.

Bisher verfügbare Verschlusssysteme umfassen im Wesentlichen Drahtcerclagen, die in unterschiedlicher Technik verwendet die Standardmethode darstellen, Bänder und Platten- und Klammersysteme.

Während Drähte und Bänder meist beliebig an die Sternumkontur anpassbar sind, müssen Platten- und mehrere Intercostalräume umspannende Klammersysteme bereits möglichst gut auf den Knochen zugeschnitten sein, da intraoperativ nur noch leichtere Formveränderungen vorgenommen werden können. Für die Entwicklung und Herstellung möglichst passgenauer Platten- und Klammersysteme ist daher ein detailliertes anatomisches Wissen über die Dimensionen des menschlichen Sternums und der angrenzenden Rippen und Intercostalräume notwendig. Um diese Wissenslücke zu schließen, wurde in der vorliegenden Arbeit die Sternumanatomie eines klinisch relevanten Patientenguts umfassend analysiert.

4.1 Patientenkohorte

In der vorliegenden Studie wurden in präoperativen CT-Thorax-Aufnahmen die Sterna von Patienten vermessen, die sich einer Sternotomie unterzogen. Die gewonnenen Daten beschreiben daher die durchschnittliche Größenausdehnung des Sternums eines Patientenkollektivs, das bezüglich der epidemiologischen Struktur repräsentativ für viele thorax- und herzchirurgische Patienten ist. Nachdem genau diese Patienten postoperativ mit einem geeigneten Sternumver-

schlussystem versorgt werden müssen, sind ihre Sternummesswerte von besonderem medizintechnischem Interesse im Hinblick auf die Herstellung neuer Sternumverschlussysteme.

Die vorliegende Studie wurde als retrospektive Untersuchung angelegt und für die umfassende anatomische Charakterisierung des Sternums wurden die präoperativen, zur OP-Planung routinemäßig angefertigten CT-Aufnahmen des Thorax herangezogen. Bei dem eingeschlossenen Patientenkollektiv mit einem Umfang von 83 Patienten stellt sich die Frage, ob die Anzahl der ausgemessenen Sterna ausreichend für die detaillierte Beschreibung der anatomischen Größen-dimensionen des Sternums war. Wie der Vergleich von Sternummesswerten aus der vorliegenden Arbeit mit Sternummesswerten aus anderen Studien zeigt, ist dieser Kritikpunkt jedoch zu vernachlässigen (siehe Kapitel 4.3). In der vorliegenden Studie war weiterhin ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen beiden Geschlechtern (83 Patienten, davon 42 Frauen und 41 Männer) gegeben.

4.2 Messtechnik

Die Schichtdicke der präoperativen CT-Thorax-Aufnahme lag in 97,6 % der Fälle bei 1 mm oder 3 mm. Nur 2,4 % der Aufnahmen hatten eine Schichtdicke von 5 mm. Je größer die Schichtdicke der CT-Thorax-Aufnahme war, desto geringer war die Auflösung der Bilder (vor allem bei Betrachtung in Vergrößerung) und desto größer war tendenziell die Ungenauigkeit bei den Messungen am Sternum. Selbiges gilt für die Messungen in rekonstruiertem Bildmaterial, das herangezogen wurde, um das Sternum in allen drei Körperebenen vermessen zu können. Das rekonstruierte Bildmaterial wies eine geringere Auflösung als der Primärscan auf.

Die Aufnahmen mit größerer Schichtdicke und die Bilder aus rekonstruiertem Bildmaterial wurden für die Vermessung des Sternums dennoch verwendet, um ein ausreichend großes Patientenkollektiv generieren zu können.

Messungen fielen bei sehr eng aneinander liegenden bzw. aneinander anliegenden Rippen oftmals schwer. Sternummesswerte mit nicht mehr messbar kleinen Beträgen (bei den Werten A und H) wurden in den betreffenden Fällen mit 0 mm

angenommen und in die statistische Analyse einbezogen. Für die Breiten- und Dickenmessungen (Werte B und D) konnte nicht immer ein adäquates axiales Schichtbild aus der Mitte des ICRs ohne Rippenansätze gefunden werden. Für die Werte B5 und D5 konnten deshalb bei einigen Patienten keine Messwerte erhoben werden.

Ähnliche Probleme bezüglich der Auflösung der Bilder [41, 42], der Enge in den ICRs [43] und des Auffindens eines geeigneten Bildes zur Vermessung [41] wurden bereits in vorhergehenden Studien festgestellt.

Die Vermessung des Sternums wurde in anderen Studien entweder, ebenso wie in der vorliegenden Studie, indirekt an Bildmaterial (CT-Aufnahmen [41, 44-46] oder Röntgenbildern [47, 48]) vorgenommen oder mittels Messschiebern direkt an den entnommenen Sterna von Toten durchgeführt [49-63].

Auch andere Autoren teilen, trotz der oben genannten Limitationen, die Ansicht, dass Bildmaterial aus CT-Aufnahmen eine gute Grundlage für die Vermessung des Sternums darstellt. [41, 44]

Alle Messungen am Sternum in der vorliegenden Studie wurden von derselben Person durchgeführt. Ein Abweichen der angewandten Messtechnik zwischen den einzelnen Patienten wurde damit ausgeschlossen.

4.3 Erhobene Sternummesswerte

Die Fragestellung, mit der sich die vorliegende Studie befasst, ist neu und wurde in dieser Form noch nicht von anderen Wissenschaftlern bearbeitet. Deshalb fällt der Vergleich der hier erhobenen Sternummesswerte mit Sternummesswerten aus anderen Studien schwer.

Für die Beantwortung der dieser Analyse zugrundeliegenden Fragestellung wurden – im Vergleich mit anderen auf die Sternumanatomie abzielenden wissenschaftlichen Untersuchungen – Messwerte an abweichenden Messstellen erhoben. Beispielsweise wurden in den meisten anderen Studien getrennte Längenmesswerte für Manubrium sterni und Corpus sterni erhoben. Um einen gemeinsamen Längenmesswert für Manubrium sterni und Corpus sterni zu erhalten,

wurden die beiden Längenmesswerte anschließend addiert. Genau genommen müsste aus dieser Vorgehensweise ein geringfügig höherer Längenmesswert als in der vorliegenden Studie resultieren (vgl. Abbildung 31).

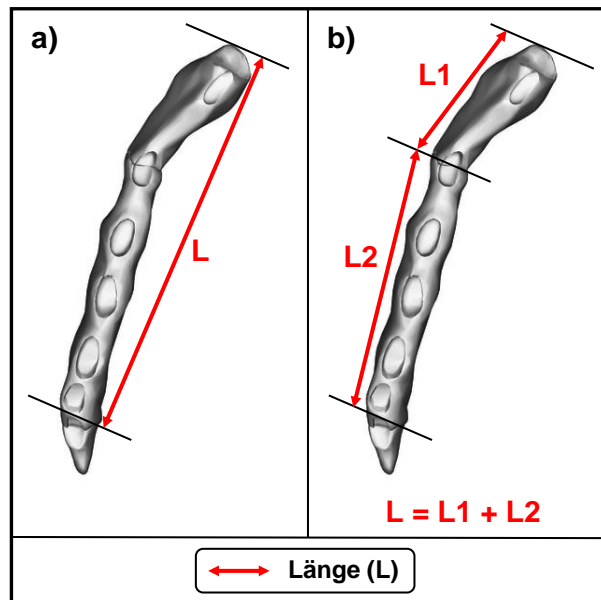


Abbildung 31: Messungen des Längenwerts L...

a) ...in der vorliegenden Studie. [6]

b) ...in vielen anderen Studien. [6]

Viele Autoren führten die Messungen weiterhin für Frauen und Männer getrennt voneinander durch und gaben keine gemeinsamen Mittelwerte für beide Geschlechter an. Da die vorliegende Studie jedoch auf die Erarbeitung geschlechterübergreifender Sternumabmessungen für eine mögliche Implantatherstellung für beide Geschlechter gleichermaßen abzielt, standen hier die gemeinsamen Mittelwerte im Vordergrund.

Zudem stammten die Studienkollektive anderer Studien in den meisten Fällen aus anderen Ländern und von anderen Erdteilen. Da die Größenausdehnung des Sternums jedoch populationsspezifisch ist [41, 43-46, 48, 49, 53, 57, 59-65], sind die gewonnenen Sternummesswerte nicht ohne Weiteres mit denen aus anderen Studien vergleichbar. Weiterhin weisen die Studienkollektive unterschiedlicher Studien immer auch unterschiedliche Altersverteilungen auf. Beim Vergleich der Sternummesswerte aus der vorliegenden Arbeit mit denen aus anderen Studien wurde darauf geachtet, dass ausschließlich erwachsene Individuen einbezogen

wurden, die das Behandlungskollektiv für innovative Sternumverschluss-techniken bilden.

Neben der vorliegenden Studie konnte nur eine weitere Studie ausfindig gemacht werden, die sich bereits mit dem Thema der Größendimensionierung von Implantaten zum Sternumverschluss und der dafür benötigten Erhebung von Sternummesswerten befasst hatte. Die Studie stammt von Mall et al. [66] aus dem Jahr 1991 und wurde in Köln durchgeführt. Vermessen wurden die Sterna von 44 Frauen und 30 Männern.

Die von Mall et al. erhobenen Sternummesswerte sind aufgrund unterschiedlicher Messstellen in deren und der vorliegenden Studie nicht uneingeschränkt miteinander vergleichbar. Für einige der in ähnlicher Weise gemessenen Werte wurde dennoch versucht, Parallelen zwischen beiden Studien zu ziehen.

Die Länge des Sternums ohne Xiphoid (Mall et al.: Wert a; vorliegende Studie: Wert L) geben Mall et al. für Frauen mit 150 mm (vorliegende Studie: 137,3 mm) und für Männer mit 166 mm (vorliegende Studie: 162,7 mm) an.

Die Breitenmessungen des Sternums nahmen Mall et al. ihrer Abbildung zufolge jeweils auf mittlerer Höhe der Rippenansätze vor, während in der vorliegenden Studie immer mittig in den ICRs gemessen wurde. Die von Mall et al. erhobenen Breitenmesswerte am Corpus sterni (Werte b2 – b4; beide Geschlechter) liegen jedoch vergleichbar mit denen der vorliegenden Studie zwischen 27 mm und 35 mm (vorliegende Studie: Werte B2 – B5; 27,9 – 34,0 mm). Die Breitenmesswerte am Manubrium sterni sind aufgrund der Unterschiedlichkeit der Messstellen hingegen nicht vergleichbar zwischen beiden Studien.

Die Dickenmesswerte am Corpus sterni bei Mall et al. (Werte d5 – d10; beide Geschlechter) bewegen sich zwischen 10 mm und 14 mm und in der vorliegenden Studie (Werte D2 – D5) zwischen 11,0 mm und 12,8 mm. Beide Studien beschreiben eine leichte Dickenzunahme des Corpus sterni im unteren Abschnitt (Mall et al. beim Wert d10, die vorliegende Studie bei den Werten D4 und D5). Die Dicke in der Mitte des Manubrium sterni (Werte d2 – d3, beide Geschlechter) geben Mall et al. zwischen 10 mm und 15 mm an, während der Wert D1 der vorliegenden Studie bei 14,1 mm liegt.

Während also die Breitenmesswerte von Corpus sterni und die Dickenmesswerte von Manubrium und Corpus sterni dieser beiden Studien einen sehr ähnlichen Betrag aufweisen, so zeigen sich bei den Längenmesswerten leichte Unterschiede. Die Länge des Sternums von Frauen geben Mall et al. durchschnittlich mit 12,7 mm mehr an als die vorliegende Studie. Die Länge des Sternums von Männern wurde bei Mall et al. mit durchschnittlich 3,3 mm mehr gemessen.

Über die konkrete Ursache bezüglich der Unterschiede bei diesen Messwerten kann nur gemutmaßt werden. Möglicherweise sind Abweichungen in Hinsicht auf die Messmethodik und der Studienkollektive beider Studien ausschlaggebend. So wurde die Studie von Mall et al. im Jahr 1991, also vor fast 30 Jahren, veröffentlicht, während die CT-Bilder der vorliegenden Studie aus dem Jahr 2015 stammen. Beide Studien wurden in Deutschland durchgeführt, die von Mall et al. in Köln, die vorliegende Studie in Würzburg. Unterschiede bezüglich der Ethnien der in die beiden Studienkollektive eingeschlossenen Personen sollten daher nicht in größerem Ausmaß bestehen. Auch der Altersdurchschnitt der beiden Studienkollektive ist recht ähnlich. Bei Mall et al. waren Frauen durchschnittlich 74 Jahre alt und Männer 71 Jahre. Der Mittelwert des Alters in der vorliegenden Studie liegt bei 72,6 Jahren, bzw. der Median bei 76 Jahren. Ein Punkt, der sich wiederum zwischen beiden Studien unterscheidet, betrifft die Messmethodik. Mall et al. vermaßen extrahierte und gesäuberte Sterna aus dem Anatomischen Institut der Universität zu Köln. Für die vorliegenden Studie wurden CT-Bilder von lebenden Patienten der Herz-Thorax-Chirurgie der Universitätsklinik Würzburg für die Vermessung der Sterna herangezogen. Die Sternummesswerte der vorliegenden Studie stammen somit von einem Patientenkollektiv, das für die medizintechnische Konstitution neuer Implantate für den Sternumverschluss von größerer Bedeutung ist als die Sternummesswerte des Studienkollektivs von Mall et al.

Schlussfolgernd empfehlen Mall et al. für den Sternumverschluss am Manubrium sterni breitere Klammern als am schmaleren Corpus sterni zu verwenden. Auch in der vorliegenden Studie zeigte sich das Manubrium sterni signifikant breiter als der Corpus sterni. Zudem merken Mall et al. an, dass die Dickenwerte des Sternums maßgebend für die Länge der Schenkel von Sternumklammern seien.

Durch die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten zusätzlichen Messungen können die erforderlichen Längen der Schenkel für Sternumklammern spezifiziert werden.

Eine weitere Studie von Selthofer et al. [54] hatte zum Ziel, Maße eines „Standardsternums“ zu definieren, die auch im Hinblick auf die Erforschung der Entwicklung sternaler WHS und Sternumfrakturen und auf die Herstellung suffizienter Sternumverschlusstechniken hilfreich sein sollten. Für die Analyse wurden die Sterna von 35 kroatischen Frauen und 55 kroatischen Männern untersucht.

Die Länge des Sternums wurde bei Selthofer et al. für Manubrium sterni und Corpus sterni getrennt voneinander gemessen, ein kombinierter Wert wurde nicht angegeben. Addiert man jedoch die beiden Längenmesswerte, so erhält man für Frauen eine Länge von 146,6 mm (52,4 mm + 94,2 mm; vorliegende Studie: 137,3 mm) und für Männer eine Länge von 164,9 mm (55,2 mm + 109,7 mm; vorliegende Studie: 162,7 mm).

Die Längenmesswerte in der Studie von Selthofer et al. fielen somit etwas höher aus als in der vorliegenden Studie. Frauen hatten bei Selthofer et al. durchschnittlich ein um 9,3 mm längeres Sternum, Männer ein um 2,2 mm längeres Sternum. Vergleicht man die Rahmenbedingungen der beiden Studien, so lassen sich einige Unterschiede erkennen. Die Studie von Selthofer et al. wurde im Jahr 2006 veröffentlicht und in Kroatien durchgeführt, die CT-Bilder der vorliegenden Studie stammen hingegen aus dem Jahr 2015 aus Würzburg. Unterschiede bezüglich der Ethnien der Patientenkollektive der beiden Studien sind somit also denkbar. Vergleicht man die aktuelle durchschnittliche Körpergröße von Kroaten und Deutschen, so stellt man fest, dass die Körpergrößen relativ ähnlich sind und keine ausreichende Erklärung für die Unterschiede zwischen den Sternummesswerten liefern können. Während kroatische Frauen durchschnittlich um 3 mm kleiner sind als deutsche Frauen (Kroatinnen: 165,6 cm; Deutsche: 165,9 cm) [67], wurden ihre Sterna um 9,3 mm länger gemessen. Und während kroatische Männer im Durchschnitt 9 mm größer sind als deutsche Männer (Kroaten: 180,8 cm; Deutsche: 179,9 cm) [67], wurden ihre Sterna hingegen um 2,2 mm länger gemessen.

Das Durchschnittsalter des Patientenkollektivs bei Selthofer et al. lag bei 65 Jahren, während es in der vorliegenden Studie 72,6 Jahre (Mittelwert), bzw. 76 Jahre (Median) betrug. Das Patientenkollektiv der vorliegenden Studie war also etwas älter. Die Unterschiede der Sternummesswerte dürften sich dadurch jedoch nicht erklären lassen, da sich die Größe des Sternums nach dem 30. Lebensjahr nicht mehr in höherem Maße verändert [42] (vgl. auch Kapitel 4.5.3).

Eine Begründung der Messwertunterschiede kann jedoch möglicherweise in den verschiedenen Messtechniken der beiden Studien gefunden werden. Während Selthofer et al. Sterna aus der Knochensammlung des Anatomischen Instituts der Universität Osijek in Kroatien vermaßen, so wurden in der vorliegenden Studie CT-Thorax-Aufnahmen von lebenden Patienten der Universitätsklinik Würzburg herangezogen. Zudem kommt beim Vergleich der beiden Studien möglicherweise der oben erklärte Effekt bei der Addition der Längenmesswerte von Manubrium sterni und Corpus sterni zum Tragen (vgl. Abbildung 31) und begründet somit die höheren Längenmesswerte von Selthofer et al.

Die Breiten- und Dickenmesswerte an Manubrium sterni und Corpus sterni wurden bei Selthofer et al. auf unterschiedliche Weise erhoben, um die Werte mit der vorliegenden Studie vergleichen zu können.

Im Allgemeinen konnten Selthofer et al. bei zwei Drittel der untersuchten Sterna sowohl bei Frauen als auch bei Männern die Form eines „Standardsternums“ feststellen. Das „Standardsternum“ war definiert über das Vorliegen von Sternummesswerten, die sich im Rahmen einer Standardabweichung um den Mittelwert befanden. Das „Standardmanubrium“ beschrieben Selthofer et al. als trapezförmig, während es in abweichenden Fällen eher dreieckig oder viereckig geformt war. Der „Standardcorpus“ war nach Selthofer et al. länglich oval geformt, in abweichenden Fällen eher O-förmig oder schmal.

Darüber hinaus existieren zahlreiche Studien mit forensisch-anthropologischer Herangehensweise, deren Hauptanliegen es war, möglichst signifikante Sternummesswerte zu identifizieren, um anhand menschlicher Überreste auf Geschlecht, Alter und Körpergröße einer toten Person schließen zu können. [41, 43-51, 53, 55-65]

Derartige Studien wurden in vielen unterschiedlichen Ländern und Regionen durchgeführt, darunter in Indien [43, 46, 50-53, 55, 56, 60-64], Japan [45], Australien [44], Südafrika [49], Spanien [47, 65], Portugal [59], der Türkei [41, 58] und den USA [57].

In den meisten dieser Studien wurden sehr ähnliche Sternummesswerte erhoben, wovon aufgrund der Wahl der Messstellen nur wenige mit denen aus der vorliegenden Studie vergleichbar sind. Vergleichbare Werte sind die Länge L, die in den anderen Studien immer getrennt für Manubrium sterni und Corpus sterni gemessen und später addiert wurde, und die Breitenwerte B2 und B4. Exemplarisch wurden diese Sternummesswerte aus einigen dieser Studien den Messwerten aus der vorliegenden Studie in Tabelle 11 gegenübergestellt.

Studie		Vorliegende Studie	Bongiovanni et al. [57]	Chandrakanth et al. [61]	Franklin et al. [44]	Macaluso [49]	Macaluso et al. [47]	Ramadan et al. [41]	Torimitsu et al. [45]
Land		Deutschland	USA	Indien	Australien	Südafrika	Spanien	Türkei	Japan
Jahr		2019	2012	2015	2012	2010	2014	2010	2015
Länge Manubrium und Corpus (mm)	zusammen	149,9		132,4					
	♀	137,3	136,75	122,4	130,22	125,28	133,62	135,4	133,25
	♂	162,7	154,97	139,8	151,96	174,24	158,10	154,6	151,38
B2 (mm)	zusammen	27,9		25,8					
	♀	26,9	24,29	23,2	23,41	21,83	24,68	25,2	24,89
	♂	28,8	27,35	27,8	27,24	24,95	28,31	28,7	29,16
B4 (mm)	zusammen	34,0		27,3					
	♀	32,4	30,15	25,4	29,06	27,30	30,15	30,7	27,17
	♂	35,7	34,47	28,8	33,17	31,77	35,36	34,9	32,93

Tabelle 11: Gegenüberstellung von Sternummesswerten aus verschiedenen Studien.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass vielen anderen Studien zur Dimensionierung des Sternums andere Fragestellungen zugrunde lagen und dass deshalb dem Großteil der in der vorliegenden Studie erhobenen Sternummesswerte kein Korrelat aus anderen Studien zugeordnet werden konnte.

Diejenigen Sternummesswerte der vorliegenden Studie, für die analoge Messwerte in anderen Studien vorhanden waren, liegen im internationalen Vergleich eher im oberen Bereich. Diese Beobachtung kann möglicherweise unter anderem dadurch erklärt werden, dass Deutsche bezüglich der durchschnittlichen Körpergröße auf Platz 14 (Frauen) bzw. Platz 11 (Männer) der Weltrangliste stehen [67]. Außer einer aus Kroatien [54] konnten keine weiteren Studien zur Sternumdimensionierung aus Ländern gefunden werden, deren Einwohner durchschnittlich größer sind als Deutsche.

Weitere Unterschiede zwischen den Sternummesswerten sind unter anderem auf Faktoren, wie beispielsweise unterschiedliche Messtechniken und unterschiedliche Populationen in den Patientenkollektiven der Studien, zurückzuführen.

Unter Berücksichtigung der vielen Faktoren, die zu einer Abweichung führen können, befinden sich die Sternummesswerte dieser Studie verglichen mit den Sternummesswerten aus anderen Studien, dennoch in derselben Größenordnung. Es wird daher angenommen, dass die Vorgehensweisen und Messtechniken der vorliegenden Studie (Umfang und Eigenschaften der Patientenkohorte, Bildmaterial der CT-Aufnahmen, Messung durch eine einzelne Person, usw.) geeignet für den hier verfolgten Zweck der medizintechnischen Dimensionierung von Implantaten waren und exakte Sternummesswerte lieferten. Mögliche entstandene Messfehler konnten vermutlich durch die Berechnung von Mittelwerten für das gesamte Patientenkollektiv ausgeglichen werden.

Bei der medizintechnischen Größendimensionierung von Implantaten muss ohnehin immer auch ein gewisser Spielraum für individuelle Unterschiede eingerechnet werden. Der Operateur muss in der Lage sein, intraoperativ kleinere Größen- oder Formveränderungen der Implantate vorzunehmen, um sie auf die individuellen anatomischen Bedürfnisse des Patienten anzupassen.

Diejenigen Messwerte, für die in anderen Studien kein Messwertäquivalent gefunden werden konnte, stellen den wissenschaftlichen Zugewinn durch die vorliegende Studie dar. In der vorliegenden Studie wurde mit 40 erhobenen Sternummesswerten eine deutlich größere Anzahl an Messwerten als in anderen Studien erfasst. Um für möglichst viele Zwecke genutzt werden zu können, wurden

die Daten auch in dieser Ausführlichkeit dargestellt und veröffentlicht. Diese Informationen ermöglichen eine sehr detaillierte Größenbeschreibung des Sternums.

Die in der vorliegenden Studie gewonnenen Messwerte können beispielsweise für die Dimensionierung eines neuen Klammerverschlusssystems des Sternums herangezogen werden. Abbildung 32 zeigt, welche der gewonnenen Werte für die Abmessungen der gezeigten Klammer von besonderer Relevanz sind.

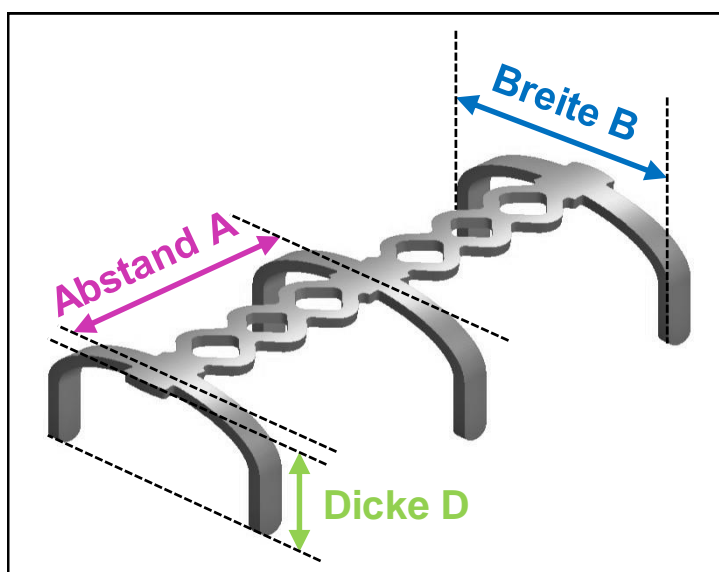


Abbildung 32: Anwendung der erhobenen Sternummesswerte zur medizintechnischen Dimensionierung einer Sternumklammer.

(Bild der Sternumklammer mit freundlicher Genehmigung durch die Firma MedXpert)

4.4 Korrelationen der Sternummesswerte untereinander

Um die Implantatherstellung weiter zu erleichtern, wurde in der vorliegenden Studie auch nach Korrelationen der einzelnen Sternummesswerte untereinander gesucht. So sollte geklärt werden, ob Individuen mit breiteren Sterna auch gleichzeitig dickere Sterna aufweisen bzw. ob Personen mit längeren Sterna gleichzeitig breitere oder dickere Sterna besitzen.

Korrelationen zwischen Breite und Dicke konnten nicht festgestellt werden. Für die Korrelationen zwischen Länge und Breite zeigten sich je nach Breitenmesswert schwach bis deutlich positive Zusammenhänge. Für die Korrelation zwischen Länge und Dicke zeigten sich je nach Dickenmesswert keine oder schwach positive Zusammenhänge.

Da für diese Messwertpaare also keine stark ausgeprägten Korrelationen gefunden werden konnten, wird für diese Studie geschlussfolgert, dass die Größen dimensionen der einzelnen Sternummesswerte in den unterschiedlichen Ebenen im eingeschlossenen Patientenkollektiv sehr individuell ausgeprägt waren. Für verlässlichere Aussagen scheinen an dieser Stelle weitere Untersuchungen in größeren Kollektiven notwendig zu sein.

4.5 Einflussfaktoren auf die Größenausdehnung des Sternums

4.5.1 Geschlecht

Viele Studien mit forensisch-anthropologischer Herangehensweise untersuchten bereits, inwiefern Sternummesswerte zur Geschlechtsdifferenzierung bei unbekanntem toten Personen verwendet werden können [41, 43-47, 49-58, 62-65]. In den meisten Studien wurden dafür folgende Sternummesswerte erhoben: Länge des Manubrium sterni, Länge des Corpus sterni, kombinierte Länge von Manubrium sterni und Corpus sterni und zudem Breitenmesswerte, die in etwa den Werten B2 und B4 der vorliegenden Studie entsprechen. Die Autoren konnten bei fast allen dieser Messwerte statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Messwerten von Frauen und Männern feststellen, wobei die Messwerte bei Männern stets höher lagen [41, 43-47, 49, 50, 52, 54-58, 62, 63, 65].

Als besonders hilfreich bei der Geschlechtszuordnung unbekannter Individuen erwies sich beispielsweise in vielen Fällen die addierte Länge von Manubrium sterni und Corpus sterni [45, 46, 52, 53, 55-58, 62, 63, 65]. Oftmals wurden aber auch Kombinationen aus verschiedenen Sternummesswerten und speziell für die Geschlechtsdifferenzierung entwickelte Funktionen und Regeln herangezogen. Dennoch lagen viele der Sternummesswerte von Frauen und Männern auch in einem sich überschneidenden Bereich von beiden Geschlechtern, sodass auch ein großer Teil der Sterna nicht dem korrekten Geschlecht zugeordnet werden konnte.

Viele Autoren beurteilten die Sternummesswerte insgesamt als hilfreich bei der Geschlechtsbestimmung unbekannter Individuen [44-47, 49, 50, 53, 57, 58, 65].

Die Sterna von Frauen wurden als generell kürzer [54, 57], schmaler [54] und dünner [54] beschrieben.

Auch in der vorliegenden Studie zeigten sich auffällige Unterschiede zwischen den Sternummesswerten von Frauen und Männern. 75 % der in dieser Studie erhobenen Sternummesswerte unterschieden sich statistisch signifikant zwischen beiden Geschlechtern, wobei alle dieser Messwerte bei Männern höher lagen als bei Frauen. Auch die sich nicht statistisch signifikant unterscheidenden Sternummesswerte (W, D2 – D5, H1r, H2l, R1r und R1l) eingerechnet, lagen sogar 97,5 % der Sternummesswerte von Männern über denen von Frauen. Einzig der Wert H1l lag im weiblichen Kollektiv höher als im männlichen, was als Zufallsfund gewertet wurde.

Tabelle 11 stellt exemplarisch einige Messwerte von Männern und Frauen gegenüber.

Folgendes Beispiel soll die Größenunterschiede der Sterna von Frauen und Männern zusätzlich verdeutlichen: Die Differenz zwischen den Längen-Durchschnittswerten bei Frauen und Männern beträgt je nach Studie zwischen 17,4 mm [61] und 48,96 mm [49]. In der vorliegenden Studie wurde eine durchschnittliche Längen-Differenz von 25,4 mm (Männer: 162,7 mm; Frauen: 137,3 mm) gefunden.

Alle der oben genannten Studien wurden an den Sterna von erwachsenen Individuen durchgeführt. Es muss jedoch beachtet werden, dass sich Geschlechtsunterschiede zwischen den Sterna von Frauen und Männern (bzw. Mädchen und Jungen) erst ab dem Pubertätsalter von ca. 10 – 15 Jahren ausmachen lassen [42, 50, 68].

4.5.2 Körpergröße

In Studien aus dem forensisch-anthropologischen Wissenschaftsbereich wurde weiterhin untersucht, inwiefern die Sternummesswerte verschiedener Populationen zur Körpergrößenbestimmung eines Individuums herangezogen werden können [43, 48, 58-61]. Untersucht wurden dafür die Korrelationen zwischen den

Sternummesswerten und der Körpergröße in den jeweiligen Studienkollektiven. Für die meisten Sternummesswerte, vor allem für Längenmaße wie die Länge von Manubrium sterni, die Länge von Corpus sterni und die gemeinsame Länge von Manubrium und Corpus sterni, konnten je nach Studie schwache bis deutlich positive Korrelationen zwischen den Sternummesswerten und der Körpergröße der Individuen festgestellt werden. Je nach der Höhe der gefundenen Korrelationskoeffizienten schlussfolgerten die Autoren, dass sich das Sternum eher besser [43, 58, 60] oder schlechter [48, 59, 61] für die Größenbestimmung eines Individuums eignet.

In der vorliegenden Studie wurde hingegen ein Gruppenvergleich für die Geschlechter getrennt voneinander vorgenommen. Die Frauen bzw. Männer wurden nach dem Median der Körpergröße je in eine körperlich kleine und eine körperlich große Gruppe eingeteilt und die jeweiligen Mittelwerte der Sternummesswerte der beiden Gruppen statistisch miteinander verglichen. Während sich zwischen kleinen und großen Frauen 5 % der Sternummesswerte signifikant unterschieden, so waren es zwischen kleinen und großen Männern 15 % der Sternummesswerte. Zwischen kleinen und großen Männern unterschied sich der Längenmesswert L signifikant, zwischen kleinen und großen Frauen war dies nicht der Fall. Aufgrund der geringen Rate an sich signifikant unterscheidenden Sternummesswerten wurde geschlussfolgert, dass innerhalb der Population der vorliegenden Studie kein bedeutender Einfluss der Körpergröße eines Individuums auf die Sternummesswerte festgestellt werden konnte.

Auch in den oben angeführten forensisch-anthropologischen Studien kamen einige Autoren zu dem Ergebnis, dass zwischen den Sternummesswerten und der Körpergröße eines Individuums ein relativ geringer Zusammenhang besteht und dass sich das Sternum daher nicht ausreichend gut zur Körpergrößenbestimmung eignet.

Es ist jedoch zu beachten, dass in der vorliegenden Studie nicht die Korrelationen von Sternummesswerten und Körpergröße untersucht wurden, sondern dass ein Gruppenvergleich zwischen kleinen und großen Individuen vorgenommen wurde.

4.5.3 Alter

Bei der Geburt besteht das Sternum zu großen Teilen aus Knorpel. Im Laufe der Kindheit bis zum jungen Erwachsenenalter verknöchert das Sternum zunehmend, ausgehend von mehreren Ossifikationszentren in Manubrium sterni, Corpus sterni und Xiphoid. Zusätzlich können im Laufe des Lebens die Synchondrosen zwischen Manubrium sterni und Corpus sterni bzw. zwischen Corpus sterni und Xiphoid verknöchern. [69]

Größen- und Formveränderungen des Sternums geschehen vor allem bis zum 30. Lebensjahr während der Ossifikationsprozesse. Danach bleiben Größe und Form des Sternums für den Rest des Lebens weitgehend konstant. [42]

Die vorliegende und weitere Studien [41, 65], die den Einfluss des Lebensalters auf die Größenausdehnung des Sternums ausschließlich bei erwachsenen Individuen untersuchten, konnten daher keine Größenunterschiede der Sternummesswerte zwischen den Altersgruppen feststellen.

4.5.4 Adipositas und COPD

Untersuchungen zu einem möglichen Einfluss einer Adipositas oder einer COPD-Erkrankung in früheren Studien waren nicht bekannt. Die vorliegende Studie konnte keinen dieser beiden Faktoren als Einflussfaktor auf die Größenausdehnung des Sternums identifizieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass von den fünf potenziellen hier untersuchten Einflussfaktoren auf die Größenausdehnung des Sternums das Geschlecht den eindeutigsten und stärksten Faktor darstellte. Diese Feststellung wird auch durch die Ergebnisse vieler weiterer Studien gestützt.

4.6 Sternummesswerte von Patienten mit und ohne Wundheilungsstörung

Im vorliegenden Patientenkollektiv entwickelten fünf Patienten eine postoperative sternale WHS. Ihre Sternummesswerte wurden mit den Sternummesswerten von nicht betroffenen Patienten verglichen, um zu überprüfen, ob die Patienten mit

WHS aufgrund ihrer Sternumanatomie gegenüber der Entwicklung einer WHS exponiert waren. Eine statistische Auswertung konnte aufgrund der geringen Fallzahl (5 Patienten mit WHS vs. 78 Patienten ohne WHS) nicht vorgenommen werden. Bei der reinen Gegenüberstellung der Sternummesswerte konnten keine relevanten anatomischen Unterschiede zwischen den Messwerten von Patienten mit und ohne postoperative sternale WHS festgestellt werden. Auf Basis der hier vorliegenden Daten konnte daher die individuelle Sternumanatomie nicht als Risikofaktor für die Entwicklung einer sternalen WHS identifiziert werden.

5 Zusammenfassung

Die komplette und die partielle mediane Sternotomie sind operative Zugangswege zum Inneren des Thorax, die in der Thorax- und Herzchirurgie häufig zur Anwendung kommen. Um den Schutz der intrathorakalen Organe, eine suffiziente Atmung und eine erfolgreiche Heilung der Sternotomiewunde zu gewährleisten, muss das Sternum am OP-Ende wieder adäquat verschlossen werden. Die Verschlussysteme müssen hierfür eine angemessene Festigkeit der Osteosynthese erzielen. Standardmäßig wird die Sternotomie mithilfe von Drahtcerclagen verschlossen, die kostengünstig und individuell anpassbar sind. Bei besonderen patientenspezifischen Konstellationen, wenn beispielsweise Risikofaktoren für die Entwicklung einer sternalen Wundheilungsstörung vorliegen oder wenn bereits eine sternale Wundheilungsstörung eingetreten ist, können andere Verschlussmethoden in Form von Bändern oder Klammer- und Plattensystemen zum Einsatz kommen.

Theoretisch haben Sternumverschlussysteme, die mehrere Intercostalräume gleichzeitig überbrücken, eine höhere longitudinale Festigkeit und bieten damit einen biomechanischen Vorteil gegenüber den bisher existierenden Verschlussystemen. Für die medizintechnische Entwicklung und Herstellung dieser komplexen Sternumverschlussysteme, vor allem solcher in Klammer- oder Plattenform, ist ein sehr detailliertes Wissen über die Größendimensionen eines operierten Sternums in allen drei Raumebenen und auf der kompletten Länge der Sternums notwendig.

In der vorliegenden Arbeit wurde deshalb ein sehr detaillierter Datensatz an Sternummesswerten generiert, der die Größenausdehnung eines durchschnittlichen Sternums in einem chirurgischen Patientengut ausführlich beschreibt.

Starke Korrelationen zwischen Breite und Dicke, Länge und Breite oder Länge und Dicke des Sternums konnten nicht nachgewiesen werden. Die Größenkonstitution der Sterna scheint daher sehr individuell ausgeprägt zu sein.

Als wichtigster Einflussfaktor auf die Größendimensionen des Sternums innerhalb der Studienpopulation konnte das Geschlecht einer Person ausgemacht werden.

Für Patienten mit sternaler Wundheilungsstörung konnten im Vergleich mit Patienten ohne Wundheilungsstörungen keine Unterschiede bezüglich der Sternummesswerte gefunden werden.

Die in der vorliegenden Studie gewonnenen Daten und Informationen können nicht nur zur Entwicklung neuer Sternumverschlussysteme herangezogen werden, sondern eignen sich beispielsweise auch für die Herstellung von Sternummodellen, die für Lehrzwecke oder biomechanische Studien notwendig sind. Die Daten erweitern zudem das allgemeine Wissen über die Anatomie des Menschen.

6 Literaturverzeichnis

1. **Schünke M.** *Prometheus: Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem.* 3. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag. 2011. S. 132-134.
2. **Benninghoff A und Drenckhahn D.** *Taschenbuch Anatomie.* 1. Auflage. München: Elsevier, Urban & Fischer. 2008. S. 132-134.
3. Modifiziert nach: **Was a bee.** *File: Sternum front3.png.* Wikimedia Commons. 2012. Lizenz: Creative Commons Attribution-Share Alike 2.1 Japan. Zitiert am 22.05.2019. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sternum_front3.png>.
4. **Drake RL.** *Gray's Anatomie für Studenten.* 1. Auflage. München: Elsevier, Urban & Fischer Verlag. 2007. S. 124-125.
5. Modifiziert nach: **Was a bee.** *File: Sternum - close-up - anterior view.png.* Wikimedia Commons. 2013. Lizenz: Creative Commons Attribution-Share Alike 2.1 Japan. Zitiert am 22.05.2019. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sternum_-_close-up_-_anterior_view.png>.
6. Modifiziert nach: **Was a bee.** *File: Sternum - close-up - lateral view.png.* Wikimedia Commons. 2013. Lizenz: Creative Commons Attribution-Share Alike 2.1 Japan. Zitiert am 22.05.2019. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sternum_-_close-up_-_lateral_view.png>.
7. **Benninghoff A und Drenckhahn D.** *Taschenbuch Anatomie.* 1. Auflage. München: Elsevier, Urban & Fischer. 2008. S. 154.
8. **Berdajs D, Zünd G, Turina MI, et al.** *Blood Supply of the Sternum and Its Importance in Internal Thoracic Artery Harvesting.* Ann Thorac Surg. 2006. Band 81, S. 2155-2159.
9. **Schünke M.** *Prometheus: Innere Organe.* 3. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag. 2009. S. 70-71.
10. **Benninghoff A und Drenckhahn D.** *Taschenbuch Anatomie.* 1. Auflage. München: Elsevier, Urban & Fischer. 2008. S. 153-154.
11. Modifiziert nach: **Schünke M.** *Prometheus: Innere Organe.* 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag. 2009: S. 176.
12. **Dürtleman N und Massard G.** *Sternotomy.* Multimed Man Cardiothorac Surg. 2006. Zitiert am 24.05.2019. <<https://mmcts.org/tutorial/1154>>.
13. **Reser D, Caliskan E, Tolboom H, et al.** *Median sternotomy.* Multimed Man Cardiothorac Surg. 2015. Zitiert am 24.05.2019. <<https://mmcts.org/tutorial/80>>.

14. **Reser D, Holubec T, Scherman J, et al.** *Upper ministernotomy*. Multimed Man Cardiothorac Surg. 2015. Zitiert am 24.05.2019. <<https://mmcts.org/tutorial/571>>.
15. **Yan T und Flynn C.** *Upper hemisternotomy*. Multimed Man Cardiothorac Surg. 2017. Zitiert am 24.05.2019. <<https://mmcts.org/tutorial/610>>.
16. **Schimmer C, Bensch M, Sommer SP, et al.** *Technik des Sternumverschlusses*. Z Herz Thorax Gefasschir. 2009. Band 23, S. 277-284.
17. **Robicsek F, Fokin A, Cook J, et al.** *Sternal Instability After Midline Sternotomy*. Thorac Cardiovasc Surg. 2000. Band 48, S. 1-8.
18. **Drake RL.** *Gray's Anatomie für Studenten*. 1. Auflage. München: Elsevier, Urban & Fischer Verlag. 2007. S. 104.
19. **Schimmer C, Reents W und Elert O.** *Primary Closure of Median Sternotomy: A Survey of all German Surgical Heart Centers and a Review of the Literature Concerning Sternal Closure Technique*. Thorac Cardiovasc Surg. 2006. Band 54, S. 408-413.
20. **Borger MA, Rao V, Weisel RD, et al.** *Deep Sternal Wound Infection: Risk Factors and Outcomes*. Ann Thorac Surg. 1998. Band 65, S. 1050-1056.
21. **The Parisian Mediastinitis Study Group.** *Risk factors for deep sternal wound infection after sternotomy: A prospective, multicenter study*. J Thorac Cardiovasc Surg. 1996. Band 111, S. 1200-1207.
22. **Robicsek F.** *Postoperative sterno-mediastinitis*. Am Surg. 2000. Band 66, S. 184-192.
23. **Abboud CS, Wey SB und Baltar VT.** *Risk factors for mediastinitis after cardiac surgery*. Ann Thorac Surg. 2004. Band 77, S. 676-683.
24. **Diez C, Koch D, Kuss O, et al.** *Risk factors for mediastinitis after cardiac surgery - a retrospective analysis of 1700 patients*. J Cardiothorac Surg. 2007. Band 2, S. 23.
25. **Filsoufi F, Castillo JG, Rahmanian PB, et al.** *Epidemiology of Deep Sternal Wound Infection in Cardiac Surgery*. J Cardiothorac Vasc Anesth. 2009. Band 23, S. 488-494.
26. **Loop FD, Lytle BW, Cosgrove DM, et al.** *Sternal wound complications after isolated coronary artery bypass grafting: Early and late mortality, morbidity, and cost of care*. Ann Thorac Surg. 1990. Band 49, S. 179-187.
27. **Salehi Omran A, Karimi A, Ahmadi SH, et al.** *Superficial and deep sternal wound infection after more than 9000 coronary artery bypass graft (CABG): incidence, risk factors and mortality*. BMC Infect Dis. 2007. Band 7, S. 112.

28. **Milano CA, Kesler K, Archibald N, et al.** *Mediastinitis After Coronary Artery Bypass Graft Surgery: Risk Factors and Long-term Survival.* Circulation. 1995. Band 92, S. 2245-2251.
29. **Bitkover Md CY und Gårdlund PhD B.** *Mediastinitis After Cardiovascular Operations: A Case-Control Study of Risk Factors.* Ann Thorac Surg. 1998. Band 65, S. 36-40.
30. **Crabtree TD, Codd JE, Fraser VJ, et al.** *Multivariate analysis of risk factors for deep and superficial sternal infection after coronary artery bypass grafting at a tertiary care medical center.* Semin Thorac Cardiovasc Surg. 2004. Band 16, S. 53-61.
31. **Gummert JF, Barten MJ, Hans C, et al.** *Mediastinitis and Cardiac Surgery - an Updated Risk Factor Analysis in 10,373 Consecutive Adult Patients.* Thorac Cardiovasc Surg. 2002. Band 50, S. 87-91.
32. **Graf K, Ott E, Vonberg R-P, et al.** *Economic aspects of deep sternal wound infections.* Eur J Cardiothorac Surg. 2010. Band 37, S. 893-896.
33. **Hauser J, Steinau HU, Ring A, et al.** *Sternumosteomyelitis.* Chirurg. 2014. Band 85, S. 357-367.
34. Modifiziert nach: **Schimmer C, Bensch M, Sommer SP, et al.** *Technik des Sternumverschlusses.* Z Herz Thorax Gefasschir. 2009. Band 23, S. 277-284.
35. **Robicsek F, Daugherty HK und Cook JW.** *The prevention and treatment of sternum separation following open-heart surgery.* J Thorac Cardiovasc Surg. 1977. Band 73, S. 267-268.
36. **Losanoff JE, Jones JW und Richman BW.** *Primary closure of median sternotomy: techniques and principles.* Cardiovasc Surg. 2002. Band 10, S. 102-110.
37. **TomCatX.** *File: Human anatomy Koerperebenen.svg.* Wikimedia Commons. 2011. Lizenz: Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported. Zitiert am 22.05.2019. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human_anatomy_Koerperebenen.svg>.
38. **Herold G, [Hrsg.].** *Innere Medizin 2015.* Köln: Gerd Herold. 2015. S. 713-716.
39. **WHO.** *Body mass index - BMI.* Zitiert am 14.05.2019. <<http://www.euro.who.int/en/health-topics/disease-prevention/nutrition/a-healthy-lifestyle/body-mass-index-bmi>>.
40. **Herold G, [Hrsg.].** *Innere Medizin 2015.* Köln: Gerd Herold. 2015. S. 349-360.

41. **Ramadan SU, Turkmen N, Dolgun NA, et al.** *Sex determination from measurements of the sternum and fourth rib using multislice computed tomography of the chest.* Forensic Sci Int. 2010. Band 197, S. 120.e1-120.e5.
42. **Weaver AA, Schoell SL, Nguyen CM, et al.** *Morphometric analysis of variation in the sternum with sex and age.* J Morphol. 2014. Band 275, S. 1284-1299.
43. **Singh J, Pathak RK und Chavali KH.** *Skeletal height estimation from regression analysis of sternal lengths in a Northwest Indian population of Chandigarh region: A postmortem study.* Forensic Sci Int. 2011. Band 206, S. 211.e1-211.e8.
44. **Franklin D, Flavel A, Kuliukas A, et al.** *Estimation of sex from sternal measurements in a Western Australian population.* Forensic Sci Int. 2012. Band 217, S. 230.e1-230.e5.
45. **Torimitsu S, Makino Y, Saitoh H, et al.** *Estimation of sex in Japanese cadavers based on sternal measurements using multidetector computed tomography.* Leg Med (Tokyo). 2015. Band 17, S. 226-231.
46. **Changani MV, Javia MD und Varma KA.** *Determination of sex from various measurements of human sternum and manubrium in Gujarat population.* J Res Med Den Sci. 2014. Band 2, S. 59-65.
47. **Macaluso PJ, Jr. und Lucena J.** *Estimation of sex from sternal dimensions derived from chest plate radiographs in contemporary Spaniards.* Int J Legal Med. 2014. Band 128, S. 389-395.
48. **Macaluso PJ, Jr. und Lucena J.** *Stature estimation from radiographic sternum length in a contemporary Spanish population.* Int J Legal Med. 2014. Band 128, S. 845-851.
49. **Macaluso PJ, Jr.** *The efficacy of sternal measurements for sex estimation in South African blacks.* Forensic Sci Int. 2010. Band 202, S. 111.e1-111.e7.
50. **Atal D, Murari A und Naik S.** *Gender differentiation from sternal width.* Journal of the Indian Academy of Forensic Medicine. 2008. Band 30, S. 198-201.
51. **Gautam R, Shah G, Jadav H, et al.** *The human sternum as an index of age and sex.* J Anat Soc India. 2003. Band 52, S. 20-23.
52. **Jit I, Jhingan V und Kulkarni M.** *Sexing the human sternum.* Amer J Phys Anthropol. 1980. Band 53, S. 217-224.

53. **Singh J und Pathak RK.** *Morphometric sexual dimorphism of human sternum in a north Indian autopsy sample: Sexing efficacy of different statistical techniques and a comparison with other sexing methods.* Forensic Sci Int. 2013. Band 228, S. 174.e1-174.e10.
54. **Selthofer R, Nikolic V, Mrcela T, et al.** *Morphometric analysis of the sternum.* Coll Antropol. 2006. Band 30, S. 43-47.
55. **Dahiphale V, Baheete B und Kamkhedkar S.** *Sexing the human sternum in Marathwada region.* J Anat Soc India. 2002. Band 51, S. 162-167.
56. **Mahajan A, Batra APS, Khurana BS, et al.** *Sex determination of human sterna in North Indians.* J Punjab Acad Forensic Med Toxicol. 2009. Band 9, S. 12-15.
57. **Bongiovanni R und Spradley MK.** *Estimating sex of the human skeleton based on metrics of the sternum.* Forensic Sci Int. 2012. Band 219, S. 290.e1-290.e7.
58. **Yonguc GN, Kurtulus A, Bayazit O, et al.** *Estimation of stature and sex from sternal lengths: an autopsy study.* Anat Sci Int. 2015. Band 90, S. 89-96.
59. **Marinho L, Almeida D, Santos A, et al.** *Is the length of the sternum reliable for estimating adult stature? A pilot study using fresh sterna and a test of two methods using dry sterna.* Forensic Sci Int. 2012. Band 220, S. 292.e1-292.e4.
60. **Menezes RG, Kanchan T, Kumar GP, et al.** *Stature estimation from the length of the sternum in South Indian males: a preliminary study.* J Forensic Leg Med. 2009. Band 16, S. 441-443.
61. **Chandrakanth HV, Kanchan T und Krishan K.** *Effect of fusion status of sternum in stature estimation - A study from South India.* J Forensic Leg Med. 2015. Band 36, S. 90-95.
62. **Hunnargi SA, Menezes RG, Kanchan T, et al.** *Sexual dimorphism of the human sternum in a Maharashtrian population of India: a morphometric analysis.* Leg Med (Tokyo). 2008. Band 10, S. 6-10.
63. **Chandrakanth HV, Kanchan T und Krishan K.** *Osteometric analysis for sexing of modern sternum - an autopsy study from South India.* Leg Med (Tokyo). 2014. Band 16, S. 350-356.
64. **Singh J, Pathak R und Singh D.** *Morphometric sex determination from various sternal widths of Northwest Indian sternums collected from autopsy cadavers: a comparison of sexing methods.* Egypt J Forensic Sci. 2012. Band 2, S. 18-28.

65. **García-Parra P, Pérez Fernández Á, Djorojevic M, et al.** *Sexual dimorphism of human sternum in a contemporary spanish population.* Forensic Sci Int. 2014. Band 244, S. 313.e1-313.e9.
66. **Mall G, Sprinzl G und Koebke J.** *Clinical morphology of the sternum.* Biomed Tech (Berl). 1991. Band 36, S. 288-289.
67. **NCD Risk Factor Collaboration.** *Height. Evolution of adult height over time. Ranking for people born from 1896 to 1996.* Zitiert am 10.06.2019. <<http://www.ncdrisc.org/height-mean-ranking.html>>.
68. **Sandoz B, Badina A, Laporte S, et al.** *Quantitative geometric analysis of rib, costal cartilage and sternum from childhood to teenagehood.* Med Biol Eng Comput. 2013. Band 51, S. 971-979.
69. **O'Neal ML, Dwornik JJ, Ganey TM, et al.** *Postnatal development of the human sternum.* J Pediatr Orthop. 1998. Band 18, S. 398-405.

Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei...

...meinem Doktorvater Herrn **Prof. Dr. med. Thorsten Walles** für die Überlassung des Themas dieser Arbeit, für die bemerkenswerte Unterstützung bei der Erstellung der Dissertation und die konstruktive Kritik.

...Frau **Dr. Sara Christner** vom Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie des Universitätsklinikums Würzburg für die Hilfsbereitschaft und die rasche Beantwortung vieler Fragen in radiologischen Belangen.

...Frau **Viktoria Rücker** vom Institut für Klinische Epidemiologie und Biometrie des Universitätsklinikums Würzburg für die Hilfe bei der statistischen Auswertung und bei der Interpretation der Daten.

...Herrn **Johannes Mußler** von MedXpert für die Anregung des Themas, die Unterstützung und die wertvollen Diskussionen.

...Herrn **Prof. Dr. med. Christoph Schimmer** von der Klinik für Thorax-, Herz- und Thorakale Gefäßchirurgie des Universitätsklinikums Würzburg und **Albert Ertl** sowie den oben angeführten Verlagen und Unternehmen für die Bereitstellung des Bildmaterials.

...**Dominik Gunz** für seinen Einsatz und die unermüdliche Unterstützung auf allen Ebenen.

...meinem Vater **Manfred Mayer** und meinem Bruder **Max Mayer** für die Durchsicht der Arbeit und die hilfreiche Kritik.

...**meiner gesamten Familie** für die stetige Unterstützung.