

Aus der Klinik für Radiologie und Neuroradiologie
(Direktor: Prof. Dr. Olav Jansen)
im Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel
an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Anatomische Betrachtung der Empfehlungen des
European Resuscitation Council zur Herzdruckmassage bei Kindern mittels
computertomographischer Bildgebung

Inauguraldissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde der Medizin
der Medizinischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von
Ole Sattler
aus Salzgitter

Kiel 2023

1. Berichterstatter*in: Prof. Dr. Olav Jansen, Klinik für Radiologie und Neuroradiologie
2. Berichterstatter*in: Prof. Dr. Markus Steinfath, Klinik für Anästhesiologie und Operative Intensivmedizin

Tag der mündlichen Prüfung: 19.11.2024

Zum Druck genehmigt, Kiel, den 30.08.2024

gez.: Prof. Dr. Marcus Both, Klinik für Radiologie und Neuroradiologie

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung.....	1
1.1 Reanimation.....	1
1.2 Der empfohlene Druckpunkt.....	2
1.3 Der ideale Druckpunkt.....	3
1.4 Fragestellung	5
2 Methoden.....	6
2.1 Studiendesign	6
2.2 Auswertung der Datensätze	7
2.3 Parameter	7
2.4 Statistische Berechnungen	10
3 Ergebnisse.....	11
3.1 Studienpopulation	11
3.2 Diameter des Sternums.....	12
3.3 Diameter des Herzens	18
3.4 Diameter des Thorax	22
3.5 Position des Druckpunktes	30
4 Diskussion	40
4.1 Studienpopulation	40
4.2 Diameter des Sternums.....	41
4.3 Diameter des Herzens	43
4.4 Diameter des Thorax	44
4.5 Position des Druckpunktes	46
4.6 Limitationen.....	47
4.7 Perspektive	50

5 Zusammenfassung.....	51
6 Literaturverzeichnis.....	53
7 Abbildungsverzeichnis.....	56
8 Anhänge.....	58
9 Danksagung und Hilfen.....	62
10 Veröffentlichungen.....	63

Abkürzungsverzeichnis

AHA	American Heart Association
BLS	Basic Life Support
CT	Computertomographie
EDV	Enddiastolisches Volumen
ERC	European Resuscitation Council
ESV	Endsystolisches Volumen
HF	Herzfrequenz
HZV	Herzzeitvolumen
ILCOR	International Liaison Committee on Resuscitation
MAD	Mittlerer arterieller Druck
SD	Standardabweichung
SV	Schlagvolumen
TPR	Totaler peripherer Widerstand
UKSH	Universitätsklinikum Schleswig-Holstein
WK	Wirbelkörper
ZVD	Zentralvenöser Druck

1 Einleitung

1.1 Reanimation

In der Medizin stellt der Herz-Kreislauf-Stillstand einen der gravierendsten Notfälle dar. Unmittelbar nach der Feststellung des Herzstillstandes ist die kardiopulmonale Reanimation die einzige kausale Therapieoption. Ziel der Reanimationsmaßnahmen ist die ausreichende Oxygenierung lebenswichtiger Organe und die Wiederherstellung einer spontanen und suffizienten Herz-Kreislauf-Aktivität.

Das zentrale Element einer jeden Reanimation stellt die Herzdruckmassage dar. Hierbei wird durch Druck auf das Sternum, welcher zu einer Kompression des Herzens führt, Blut in die Blutkreisläufe gepumpt und dadurch eine Oxygenierung der Organe angestrebt. Die Herzdruckmassage erfolgt durch eine manuelle Kompression des Thorax durch Druck auf das Sternum, kann jedoch, sollte keine hochwertige manuelle Kompression möglich sein oder eine Gefahr für die Helfenden bestehen, auch durch eine mechanische Reanimationshilfe durchgeführt werden (1).

Das International Liaison Committee on Resuscitation (ILCOR), die internationale Dachorganisation der Reanimationsforschung, welcher unter anderem auch der European Resuscitation Council (ERC) und die American Heart Association (AHA) angehören, gibt in seinen Empfehlungen zum Basic Life Support (BLS) bei Erwachsenen aus dem Jahr 2020 eine Liste der elementaren Komponenten einer qualitativ hochwertigen Reanimation an. Diese umfasst die Handposition der Thoraxkompression, die Kompressionsrate, die Kompressionstiefe, die Entlastung zwischen den Kompressionen, das Kompressions-Ventilations-Verhältnis, das Timing der Rhythmusanalyse und Feedbacksysteme zur Qualität der Herzdruckmassage (2).

Einige dieser Parameter sind aufgrund einer eingeschränkten Datenlage nur mit einem schwachen Empfehlungsgrad versehen. Diese Datenlage ist trotz der Relevanz des Themas durch große ethische Hürden in der Umsetzung von Studien in diesem Bereich zu erklären. Um dennoch Empfehlungen aussprechen zu können, haben mehrere Forschungsgruppen versucht, aus Betrachtungen der Anatomie und Physiologie Schlussfolgerungen abzuleiten, welche Faktoren zu einer erfolgreichen Reanimation beitragen.

In den Empfehlungen zum BLS bei Erwachsenen empfiehlt das ILCOR als Druckpunkt der Herzdruckmassage die untere Hälfte des Sternums zu nutzen (weak recommendation, very-low-certainty evidence). Das ILCOR betont in der Empfehlung die Wissenslücken, die zu diesem Forschungsfeld bestehen würden. So gäbe es keine Studien zu spezifischen Handpositionen und deren Auswirkungen auf das Kurz- oder Langzeitüberleben, sondern lediglich Studien über die Auswirkung auf physiologische Surrogatmarker (2–5). Zusätzlich würden einige Studien darauf hin deuten, dass es bedeutende Unterschiede in der Patientenanatomie gibt, welche unter anderem vom Alter, Geschlecht, Body-Mass-Index und möglichen chronischen Herzerkrankungen abhängen (2).

Bei der Reanimation von Kindern stellt die durch das Wachstum veränderte Thoraxanatomie, eine besondere und darüber hinaus unbekannte Einflussgröße dar. Die Körpergröße, bezogen auf die 50. Perzentile nimmt bei Jungen zwischen dem dritten und 16. Lebensjahr um 79,52 cm, bei Mädchen um 69,64 cm zu (6).

In Deutschland wurden im Jahr 2020 schätzungsweise 60.000 Patienten durch den Rettungsdienst reanimiert. 1,06% dieser Patienten waren zum Zeitpunkt der Reanimation jünger als 18 Jahre (7). Die Quote der unter 18-Jährigen bei innerklinischen Reanimationen im selben Zeitraum befindet sich mit ca. 0,74 % in derselben Größenordnung wie die der präklinischen Reanimationen (8). Die Reanimation von unter 18-Jährigen im Jahr 2020 stellt mit ca. 600 prähospitalen Fällen, aufgeteilt auf ca. 1.300 Notarzteinsatzfahrzeuge in Deutschland (9) eine Rarität dar, kann aber trotzdem nicht als Einzelfall betrachtet werden.

1.2 Der empfohlene Druckpunkt

Der ERC empfiehlt in seinen Reanimationsleitlinien bei Kindern für die Thoraxkompression den Druckpunkt in der unteren Hälfte des Brustbeins und eine Drucktiefe von einem Drittel des anterior-posterioren Thoraxdurchmessers jedoch von maximal 6 cm. Diese Leitlinie gilt für alle Kinder jenseits der Perinatalperiode bis zum Alter von 18 Jahren (10).

Aufgrund der schlechten Datenlage stützen sich die Empfehlungen zum Druckpunkt bei der Herzdruckmassage bei Kindern und Erwachsenen teilweise auf dieselben Studien. So schreibt das ILCOR in seinen Empfehlungen aus dem Jahr 2020, dass sich die Empfehlung für Erwachsene auch auf die Untersuchung von Säuglingsreanimationen stützt (2).

„Obwohl es einzelne frühere Fallberichte über Herzdruckmassagen bei Menschen gibt, stammen die ersten Empfehlungen zur Herzdruckmassage bei geschlossenem Thorax aus den frühen 1960er-Jahren“ (11). Frühere Reanimationen erfolgen bei Herzstillstand im Operationssaal bei geöffnetem Thorax durch die direkte Kompression des Herzens. Trotz einzelner Studien zur an Surrogatmarkern gemessenen Überlegenheit der Kompression bei offenem Thorax setzte sich die Methode bei geschlossenem Thorax aufgrund der besseren Handhabbarkeit durch (12).

In den folgenden Jahren wurde der Effekt der Herzdruckmassage diskutiert. 1981 konnte echokardiografisch gezeigt werden, dass es bei einigen Patienten zu keiner Kompression des linken Ventrikels kommt. Der Blutfluss während der Kompressionen kommt den Autoren zufolge primär durch die Kompression der Lunge und ihrer Gefäße zustande (13). Dieser Mechanismus wird als Thorax-Pumpen-Mechanismus bezeichnet. Der zweite diskutierte Mechanismus ist der Herz-Pumpen-Mechanismus, bei welchem von einer Kompression des linken Ventrikels ausgegangen wird (14).

1.3 Der ideale Druckpunkt

Wie in den Empfehlungen des ILCOR zur Herzdruckmassage bei Erwachsenen beschrieben, gibt es durch ethische Hindernisse bedingt wenig prospektive Studien zur Auswirkung der Handposition bei der Herzdruckmassage. In einer Studie untersuchte Orlowski 1986 in 10 Fällen die Auswirkung auf den arteriellen Mitteldruck (MAD) bei der Reanimation von Säuglingen in Abhängigkeit der Handposition. Hierbei stellt er fest, dass höhere mittlere arterielle Blutdrücke erzielt werden konnten, wenn entgegen der damals geltenden Empfehlung nicht das mittlere Drittel, sondern das untere Drittel des Sternums komprimiert wurde (3). Wie vom ILCOR erwähnt, ist diese Auswirkung lediglich ein Surrogatmarker und gibt keine endgültige Aussage über mögliche Auswirkungen auf das Kurz- oder Langzeitüberleben der Patienten. Klinische Studien zur Bestimmung des optimalen Druckpunktes während der Reanimation von Kindern sind auf Grund der rechtlichen Bestimmungen zu Einwilligung und ethischen Überlegungen nicht sinnvoll durchführbar. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit ein weiterer Schritt in der Kausalkette zurückgegangen und mit der Betrachtung der Anatomie trotz der damit verbundenen Unsicherheiten eine vermutete Auswirkung auf Surrogatmarker untersucht. Orlowski 1986

konnte in seiner Studie zeigen, dass diese Übertragung der anatomischen Betrachtungen des Thorax und Herzens auf Surrogatmarker der Reanimation grundsätzlich möglich ist (3).

Ziel der Herzdruckmassage ist eine möglichst gute Oxygenierung lebenswichtiger Organe. Als Surrogatmarker scheint der von Orlowski 1986 verwendete mittlere arterielle Blutdruck als Indikator für die Organperfusion geeignet zu sein (3) (15). Der MAD ist definiert als die Summe aus dem Produkt des totalen peripheren Widerstands (TPR) mit dem Herzzeitvolumen (HZV) und dem zentralvenösen Druck (ZVD).

$$MAD = TPR * HZV + ZVD$$

Der physiologische ZVD hat dabei nur einen geringen Einfluss auf den MAD und wird in vielen Berechnungen vernachlässigt (16). Da die Handposition bei der Herzdruckmassage gegenüber einer Therapie mit Volumen oder Katecholaminen vermutlich einen vernachlässigbaren Einfluss auf den ZVD und TPR hat, wird auf diese Parameter in der vorliegenden Studie nicht weiter eingegangen (17). Das HZV ist abhängig von der Herzfrequenz (HF) und dem Schlagvolumen (SV). Auf die HF, welche bei der Herzdruckmassage durch die Frequenz der Thoraxkompressionen künstlich vorgegeben ist und welche der ERC mit 100-120 pro Minute empfiehlt, wird bei dieser Betrachtung des optimalen Druckpunktes ebenso nicht weiter eingegangen. Das SV ist abhängig von dem linksventrikulären enddiastolischen Volumen (EDV) und dem linksventrikulären endsystolischen Volumen (ESV). Diese beiden Größen sind die vermutlich maßgeblich durch die Druckposition beeinflussbaren Faktoren der Herzdruckmassage. Das EDV wird besonders durch eine gute diastolische Füllung beeinflusst, welche vermutlich durch die in den ERC-Empfehlungen hervorgehobene Entlastung des Thoraxes zwischen den einzelnen Kompressionen beeinflusst wird. Das ESV wird durch eine maximale Kompression des linken Ventrikels beeinflusst. Das Ziel einer jeden Herzdruckmassage sollte also die maximale Kompression mit der dazugehörigen Entlastung des linken Ventrikels darstellen.

In der vorliegenden Studie wurde als Grundlage eines idealen Druckpunktes der Herz-Pumpen-Mechanismus zugrunde gelegt, für welchen Orlowski 1986 einen kausalen Zusammenhang zu Surrogatmarkern zeigen konnte. Um eine schnelle und einfache Bewertung zu ermöglichen, wurde der maximale Diameter der kurzen Herzachse in der Transversalebene als idealer anatomischer Punkt der Herzdruckmassage festgelegt (3).

1.4 Fragestellung

Um die oben beschriebenen Probleme in der Datenlage bei der Herzdruckmassage weiter zu beleuchten, ist das Ziel dieser Arbeit zu untersuchen, ob die Empfehlungen des ERC bezüglich der Herzdruckmassage bei Kindern der sich über die Lebensjahre verändernden Anatomie des kindlichen Thorax gerecht werden. Dazu wurden computertomografische (CT) Schnittbildgebungen von Drei- bis 16-Jährigen ausgewertet, um Rückschlüsse von der Anatomie auf das Patientenüberleben zu ziehen.

Zur Ermittlung des empfohlenen Druckpunktes wurden die Größe und Lage des Herzens sowie Parameter des knöchernen Thorax als kraftübertragende Struktur vermessen.

Wie oben beschrieben spielt besonders die Kompression des linken Ventrikels eine zentrale Rolle. Um die Effektivität des vom ERC empfohlenen Druckpunktes auf Höhe der unteren Hälfte des Brustbeins beurteilen zu können, wurde ein zweiter, anatomisch idealer Druckpunkt festgelegt. Als idealer Druckpunkt wurde der maximale Diameter der kurzen Herzachse bestimmt. Die kurze Herzachse ist hierbei analog zur Echokardiographie als Ebene senkrecht zur anatomischen langen Herzachse definiert und zeigt so die Breite des rechten und linken Ventrikels.

2 Methoden

2.1 Studiendesign

In die Studie wurden computertomografische Datensätze der Datenbanken des Universitätsklinikums Schleswig-Holstein (UKSH) Campus Kiel und Lübeck retrospektiv eingeschlossen, welche in den Jahren 2000 bis 2020 erstellt wurden. Einschlusskriterien waren ein vollständig aufgenommener Thorax, ein Alter des Patienten zum Zeitpunkt der Aufnahme zwischen drei und 16 Jahren und eine Auflösung mit einer Schichtdicke von maximal 5 mm. Ausgeschlossen wurden alle Patienten mit Skoliose und anderweitig starken Deformitäten der Brustwirbelsäule. Von neun Patienten wurden jeweils zwei Datensätze eingeschlossen, deren Erstellung mindestens 365 Tage auseinanderlag.

Die Suche und Auswertung der eingeschlossenen Datensätze erfolgte über das in der Klinik für Radiologie und Neuroradiologie verwendete Picture Archiving and Communication System Impax der Firma AGFA.

Geeignete Datensätze wurden über die Suchfunktion in Impax akquiriert. Hierfür wurde in den Archiven Kiel und Lübeck nach Datensätzen der Modalität „CT“ in bestimmten Zeitspannen von Geburtstagen und Erstellungszeiträumen gesucht. Die Zeitspannen wurden aufgrund der hohen Anzahl gespeicherter Datensätze so angepasst, dass Patienten zum Zeitpunkt der Aufnahme im Alter zwischen drei und 16 Jahren sein konnten, beispielsweise: Untersuchung 01.01.2010 – 01.01.2012 und Geburtsdatum 01.01.1994 – 01.01.2009. Das konkrete Alter zum Zeitpunkt der Untersuchung wurde aus der ausgegebenen Liste händisch errechnet und der Datensatz daraufhin eingeschlossen oder verworfen.

10 % der Messungen wurden von einem Facharzt für Radiologie stichprobenartig und verblindet kontrolliert, wobei keine relevanten Abweichungen gefunden wurden.

Die Studie wurde durch die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität genehmigt (D 586/20). Die Daten wurden anonymisiert ausgewertet. Zusätzlich zu den Bilddaten wurden das Geschlecht und das Alter des Patienten/der Patientin zum Zeitpunkt der Bildgebung erhoben.

2.2 Auswertung der Datensätze

Um eine möglichst standardisierte und vergleichbare Messvoraussetzung zu schaffen, wurden alle Datensätze mithilfe der in Impax integrierten Funktion „3D-Rekonstruktion“ rekonstruiert. Der Volumendatensatz wurde anschließend im Raum so rotiert, dass die Bandscheibenfächer parallel und die Brustwirbelsäule senkrecht zur Transversalebene ausgerichtet waren. Die Messungen erfolgten im vordefinierten Knochenfenster (C/W: 400/1800 HU)

Jedem Datensatz wurden das Geschlecht und Alter des Patienten zugeordnet. Weiterhin wurden Parameter aufgeteilt auf drei Kategorien erhoben. In der ersten Kategorie wurden orientierende Größen des Sternums und der Brustwirbelsäule gemessen. In den Kategorien zwei und drei wurden Parameter des Thorax und Herzens an zwei unterschiedlichen transversalen Höhen erhoben; auf Höhe des vom ERC empfohlenen Druckpunktes sowie auf Höhe des aus anatomischer Sicht idealen Druckpunktes. Insgesamt wurden so bis zu 19 Parameter pro Datensatz bestimmt.

2.3 Parameter

Orientierende Größen

In der ersten Kategorie der orientierenden Größen wurden in der Sagittalebene folgende Parameter erhoben:

- Länge des Sternums
- Länge des Corpus sterni
- Länge der Brustwirbelsäule.

Zur Erfassung dieser Parameter bei in der Throax-CT nicht vollständig erfasster Brustwirbelsäule wurde wie folgt verfahren:

- In Fällen, bei denen der 12. Brustwirbel nicht vollständig abgebildet war, wurde der 11. Brustwirbel dupliziert.

Empfohlener Druckpunkt

Der empfohlene Druckpunkt der Herz-Druck-Massage bei Kindern ist nach der Empfehlung des ERC in der Mitte der unteren Hälfte des Brustbeines (10). Um diesen Punkt in den CT-Bildern reproduzierbar bestimmen zu können, wurde in der Sagittalebene eine Gerade

zwischen dem am weitesten caudal und cranial gelegenen Punkt des Sternums eingezeichnet. Als empfohlener Druckpunkt wurde die Stelle betrachtet, welche nach 25 % der Länge der Geraden von caudal betrachtet auf dem Sternum lag, also die untere Hälfte des Sternums teilte. Kam die Gerade aufgrund einer konvexen Form des Sternums nicht auf dem Sternum zu liegen, wurde eine zweite Gerade orthogonal zur ersten Geraden durch den zuvor bestimmten Punkt gelegt und deren Schnittpunkt mit dem Sternum als empfohlener Druckpunkt angesehen. In der Transversalebene, welche den so bestimmten Druckpunkt schneidet, wurden folgende Parameter bestimmt:

- Breite des Sternums
- Maximaler Diameter der kurzen Herzachse (CT-Abb. 1: Länge 3)
- Länge der langen Herzachse (CT-Abb. 1: Länge 1)
- Abstand zwischen der Sternumhinterkante und der Wirbelkörpervorderkante (CT-Abb. 1: Länge 4)
- Prozentualer Anteil der langen Herzachse in der rechten Thoraxhälfte (CT-Abb. 1: Verhältnis von Länge 2 zu 1)
- Wirbelkörper (WK) auf Höhe der Transversalebene
- Rippenansatz auf Höhe der Transversalebene
- Maximaler Thoraxdiameter anterior- posterior
- Maximaler Thoraxdiameter dextra-sinistra.

Zur Erfassung der Parameter wurden folgende Regeln definiert:

- Aufgrund der älteren Niedrigdosis-CT-Aufnahmen ohne Kontrastmittel und der hierdurch eingeschränkten Abgrenzbarkeit unmittelbar benachbarter Strukturen mit ähnlichen Dichtewerten wurde bei der Bestimmung der langen Herzachse der Ausflusstrakt mitgemessen.
- Lag die lange Herzachse vollständig in der linken Thoraxhälfte, wurde der Anteil in der Rechten als Null gewertet.
- War auf Höhe der Transversalebene ein Bandscheibenfach angeschnitten, wurde der in der Sagittalebene räumlich nähere Wirbelkörper gewertet.
- Saß auf Höhe des Druckpunktes keine Rippe dem Sternum an, wurde der Zwischenrippenraum gewertet, welcher an das Sternum grenzte.

- War die Ebene des Druckpunkts caudal des Sternums gelegen, wurde er als Intercostalraum sieben notiert.

Idealer Druckpunkt

Wie in der Einleitung beschrieben ist der anatomisch ideale Druckpunkt in dieser Arbeit als Ort der maximalen Breite des linken Ventrikels definiert. Da der linke Ventrikel bedingt durch ältere Niedrigdosis-CT-Aufnahmen ohne Kontrastmittel nicht immer sicher bestimmt werden konnte, wurde als Näherung die Transversalebene bestimmt, in der die kurze Herzachse den maximalen Diameter aufwies. Die kurze Herzachse wurde analog zur Echokardiographie als die Achse definiert, welche senkrecht zur anatomischen langen Herzachse stand. Auf dieser Ebene wurden folgende Parameter erhoben:

- Breite des Corpus sterni
- Maximaler Diameter der kurzen Herzachse (CT-Abb. 1: Länge 3)
- Länge der langen Herzachse (CT-Abb.1: Länge 1)
- Abstand zwischen der Sternumhinterkante und der Wirbelkörpervorderkante (CT-Abb. 1: Länge 4)
- Prozentualer Anteil der langen Herzachse in der rechten Thoraxhälfte (CT-Abb. 1: Verhältnis von Länge 2 zu 1)
- Wirbelkörper auf Höhe der Transversalebene
- Rippenansatz auf Höhe der Transversalebene.

Zur Erfassung der Parameter des idealen Druckpunktes wurden dieselben Regeln angewendet wie für den empfohlenen Druckpunkt:

- Aufgrund der älteren Niedrigdosis-CT-Aufnahmen ohne Kontrastmittel wurde bei der Bestimmung der langen Herzachse der Ausflusstrakt mitgemessen.
- Lag die lange Herzachse vollständig in der linken Thoraxhälfte, wurde der Anteil in der Rechten als Null gewertet.
- War auf Höhe der Transversalebene ein Bandscheibenfach angeschnitten, wurde der in der Sagittalebene räumlich nähere Wirbelkörper gewertet.
- Saß auf Höhe des Druckpunktes keine Rippe dem Sternum an, wurde der Zwischenrippenraum gewertet, welcher an das Sternum grenzte.

- War die Ebene des Druckpunkts caudal des Sternums gelegen, wurde er als Intercostalraum sieben notiert.

2.4 Statistische Berechnungen

Um eine Aussage über die Qualität der anatomischen Unterschiede zwischen dem idealen und empfohlenen Druckpunkt treffen zu können, wurden diese mittels des Zweistichproben-t-Test auf statistische Signifikanz überprüft. Für Vergleiche des empfohlenen mit dem idealen Druckpunkt wurde der Zweistichproben-t-Test für abhängige Stichproben verwendet, für Vergleiche zwischen den Altersgruppen der Drei- und 16-Jährigen der Zweistichprobentest-t-Test für unabhängige Stichproben. Als Signifikanzniveau wurde $\alpha = 0,05$ gewählt.

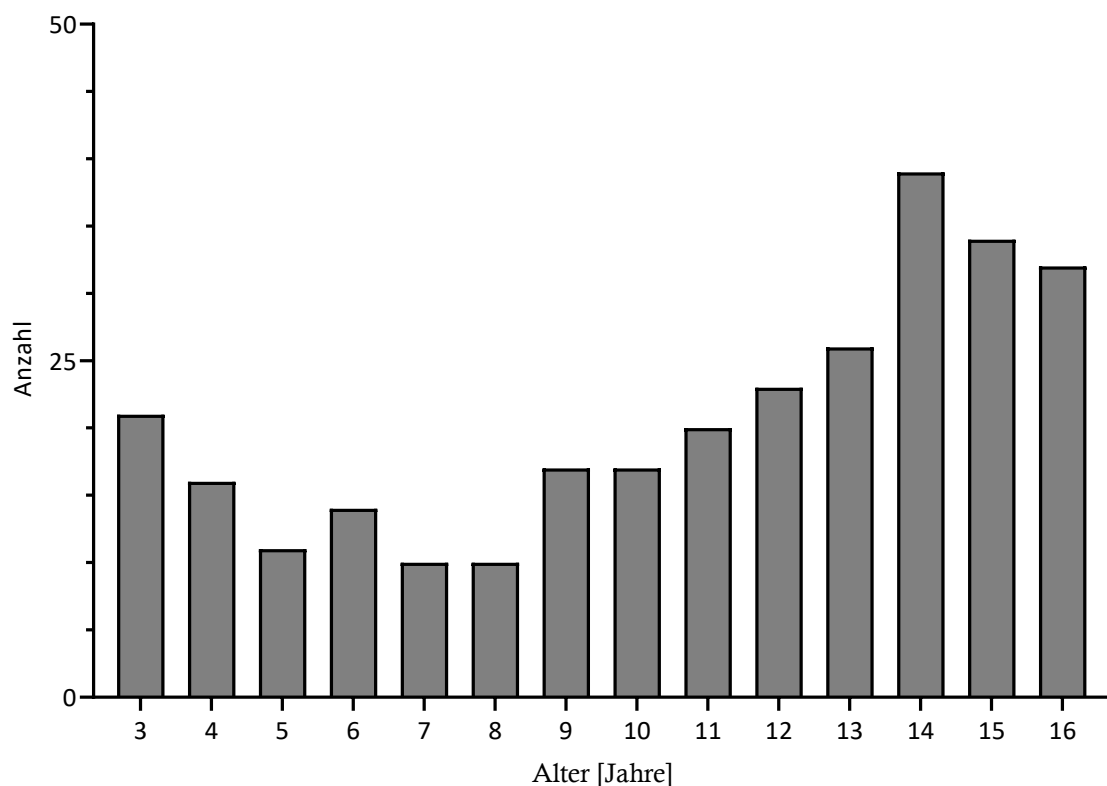
3 Ergebnisse

3.1 Studienpopulation

Insgesamt konnten 290 Datensätze in die Studie eingeschlossen werden. Die ältesten verwertbaren Datensätze, welche die Einschlusskriterien erfüllten, stammen aus dem Jahr 2003. Von den 290 auswertbaren Datensätzen war bei der Mehrheit mit 173 das Geschlecht als männlich, bei 115 als weiblich und bei zwei als divers in der Datenbank gespeichert.

Mit 10 Datensätzen pro Alter zeigten die Kohorten der Sieben- und Achtjährigen die niedrigste Anzahl an Datensätzen, zusätzlich können zwei Maxima in den Altersgruppen der Drei- und 14-Jährigen beobachtet werden. Das Durchschnittsalter aller eingeschlossenen Patienten betrug 10,83 Jahre (SD 4,16 Jahre) (Abb. 1).

Abb. 1: Altersverteilung

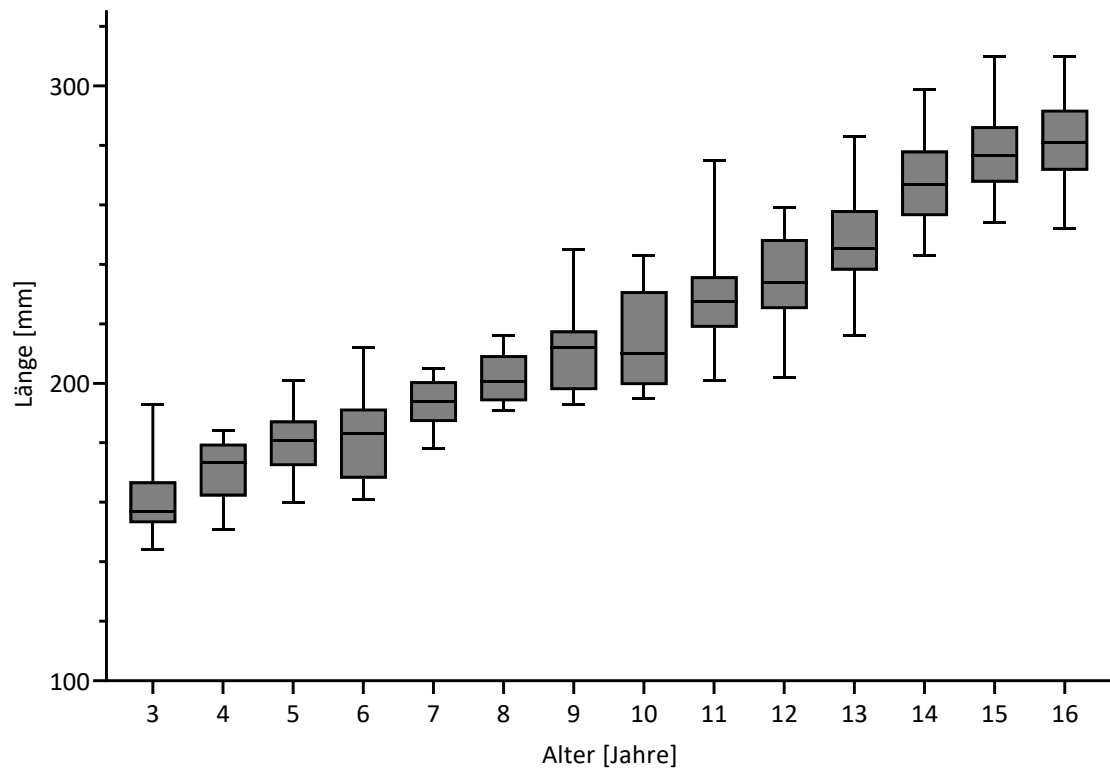


Länge der Brustwirbelsäule

Die Länge der Brustwirbelsäule konnte bei 285 Patienten bestimmt werden. Sie beginnt in der Altersgruppe der Dreijährigen mit einer Länge von 161 mm (SD 12 mm) und steigt stetig bis auf einen Wert von 282 mm (SD 14 mm) in der Altersgruppe der 16-Jährigen. Der Mittelwert

über alle Altersgruppen beträgt 232 mm (SD 43 mm) (Abb. 2). In fünf Fällen war der elfte Wirbelkörper nicht vollständig abgebildet, sodass keine Länge nach den genannten Kriterien bestimmt werden konnte.

Abb. 2: Länge der Brustwirbelsäule

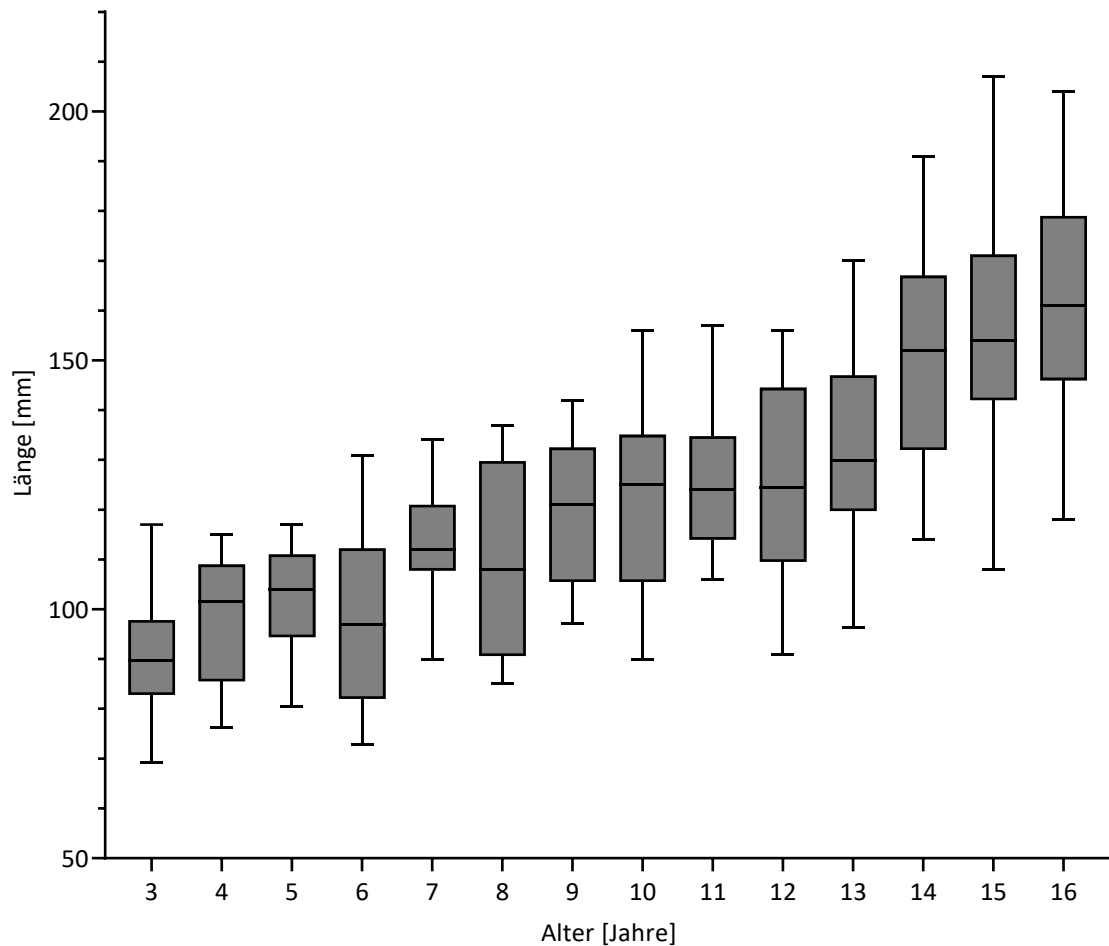


3.2 Diameter des Sternums

Länge des Sternums

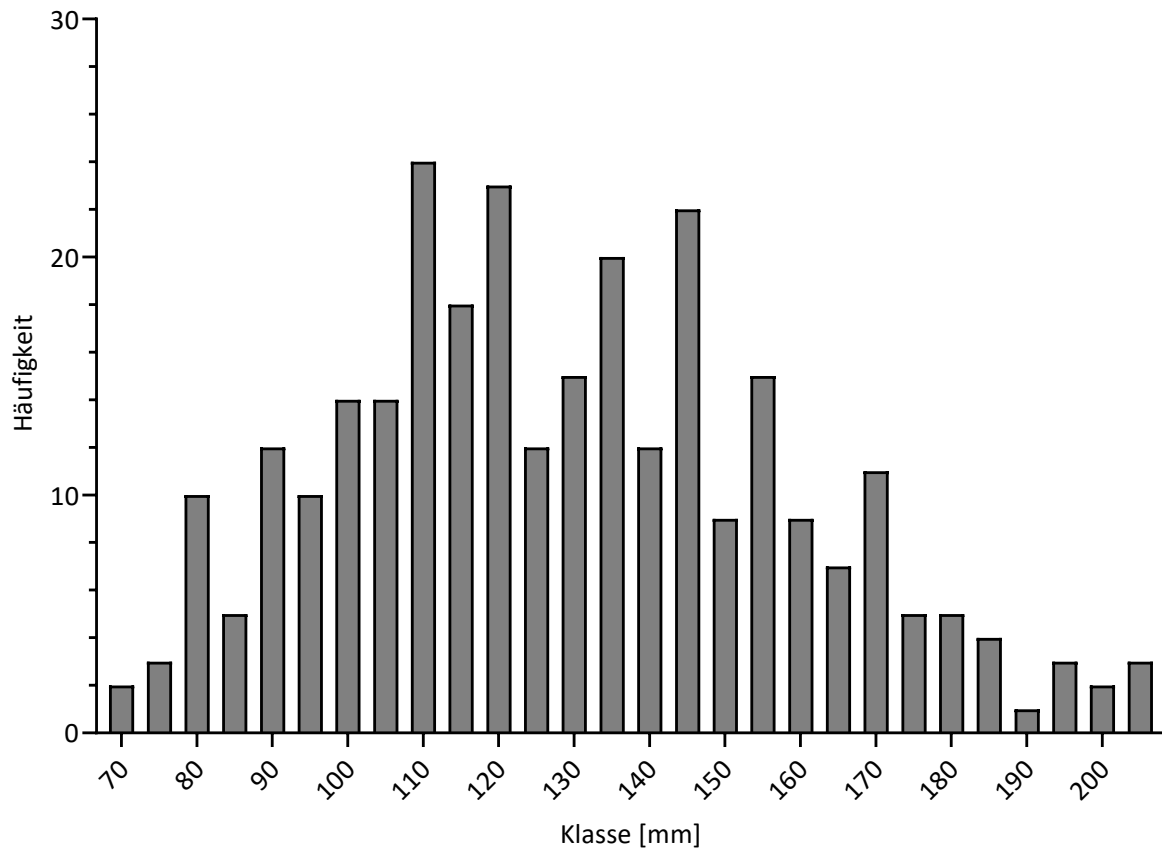
Die Länge des Sternums konnte bei allen 290 Datensätzen bestimmt werden. Sie hat in der Altersgruppe der Dreijährigen einen Mittelwert von 91 mm (SD 11 mm) und steigt mit einem un stetigen Verlauf auf 162 mm (SD 22 mm) in der Altersgruppe der 16-Jährigen. Der Mittelwert über alle Datensätze beträgt 129 mm (SD 30 mm) (Abb. 3).

Abb. 3: Länge des Sternums



Während der Auswertung der Datensätze fiel auf, dass durch eine unzureichende Ossifikation die Länge des Sternums nicht immer sicher bestimmt werden konnte, da durch die CT-spezifische Darstellung nur knöcherne Strukturen sicher ausgewertet werden konnten. Insbesondere eine fehlende Ossifikation des Processus xiphoideus hat so zu einer subjektiv erheblichen Schwankung der Länge des Sternums geführt (CT-Abb. 2, 3, 4, 5). Aufgrund dieser Beobachtung wurde eine weitere Analyse der Häufigkeiten der Länge des Sternums durchgeführt (Abb. 4).

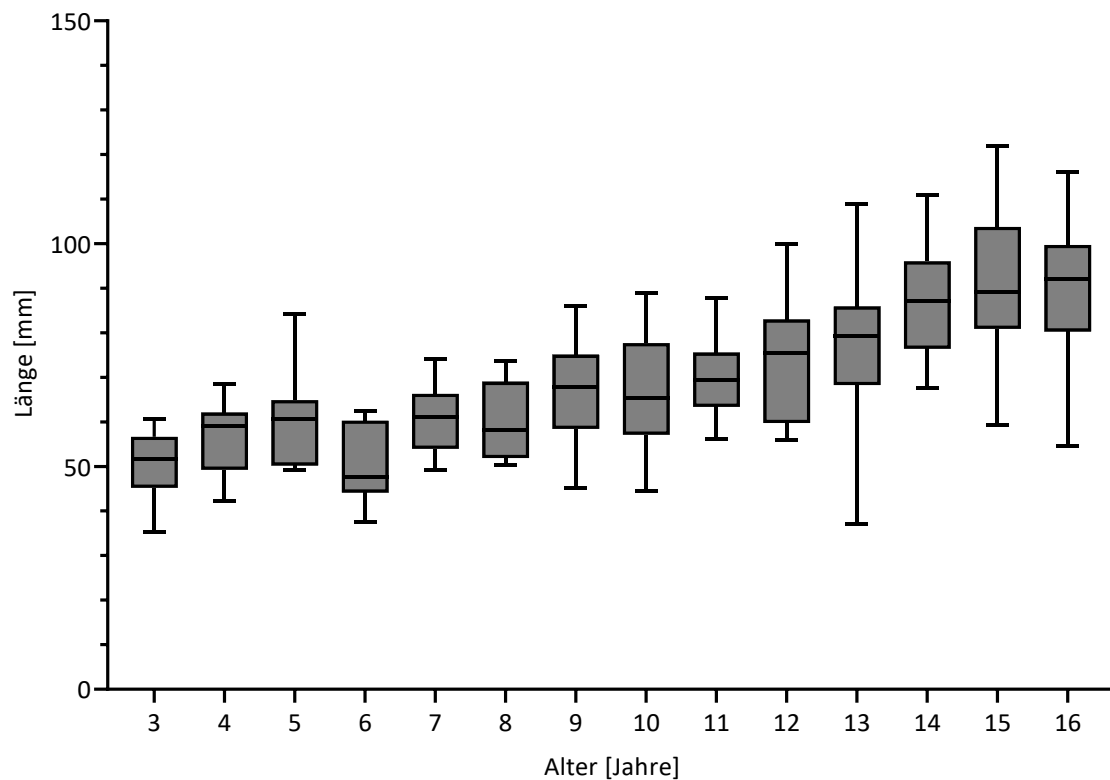
Abb. 4: Histogramm Verteilung der Länge des Sternums



Länge des Corpus sterni

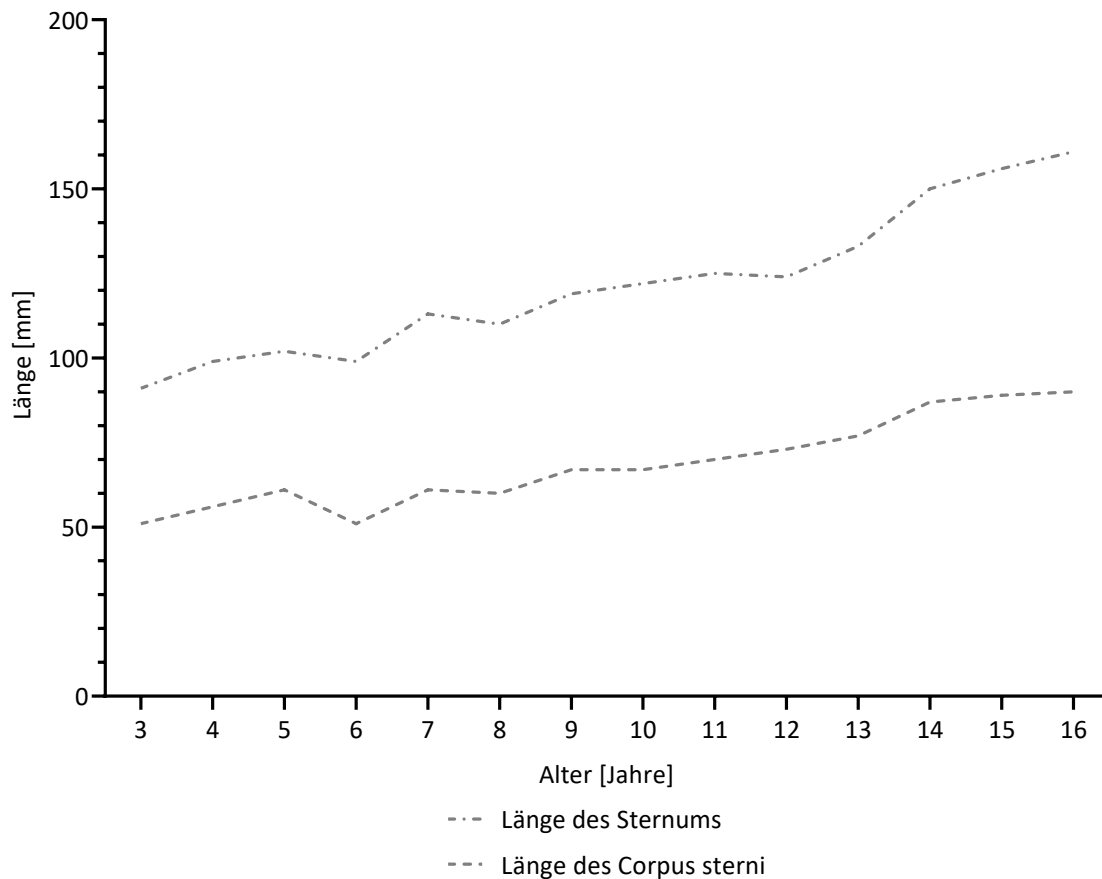
Die Länge des Corpus sterni zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Länge des gesamten Sternums. Der Mittelwert in der Altersgruppe der Dreijährigen beträgt 51 mm (SD 7 mm) und steigt un stetig bis zu einer Länge von 90 mm (SD 15 mm) in der Altersgruppe der 16-Jährigen. Der Mittelwert über alle Datensätze beträgt 73 mm (SD 18 mm) (Abb. 5).

Abb. 5: Länge des Corpus sterni



Wie in Abbildung 6 ersichtlich, korreliert die Länge des gesamten Sternums sehr stark mit der Länge des Corpus sterni. Dies spricht gegen einen systemischen Messfehler und für eine Schwankung bei den Patienten, z.B. durch die diskutierte Problematik der Ossifikation des Processus xiphoideus. Trotz des potenziellen Unterschätzens der Länge des Sternums, stehen bei der Herzdruckmassage von dreijährigen Patienten in 84 % der Fälle mindestens 44 mm verknöchertes Corpus sterni als Druckaufnehmende Struktur zur Verfügung.

Abb. 6: Vergleich Länge Sternum - Corpus sterni

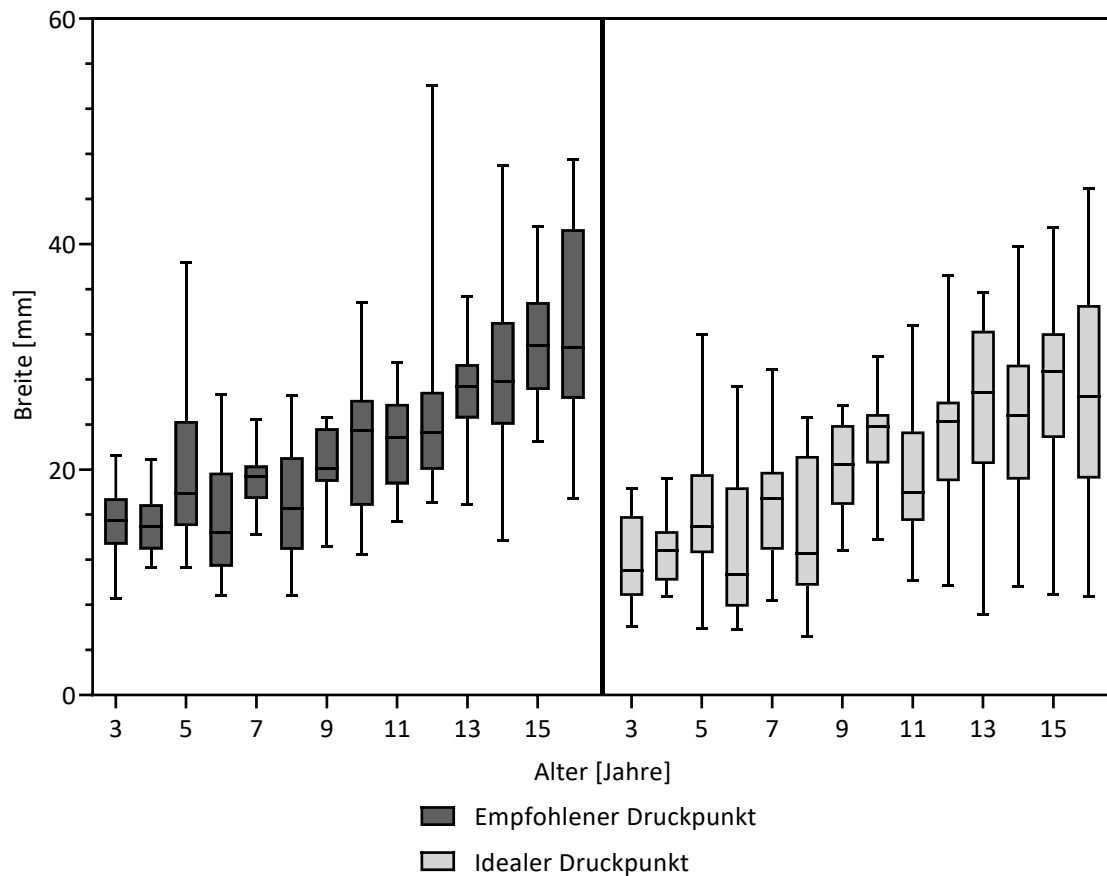


Breite des Sternums

Auf Höhe des empfohlenen Druckpunktes beträgt die Breite des Sternums in der Altersgruppe der Dreijährigen im Durchschnitt 15 mm (SD 5 mm). Sie steigt unstetig auf eine Breite von 33 mm (SD 8 mm) in der Altersgruppe der 16-Jährigen an. Der Durchschnitt über alle Altersgruppen beträgt 24 mm (SD 8 mm) (Abb. 7). In sieben Fällen lag der empfohlene Druckpunkt caudal des Corpus sterni, in einem nicht verknöcherten Bereich zwischen dem Corpus sterni und dem Processus xiphoideus.

Auf Höhe des idealen Druckpunktes beträgt die Breite des Sternums im Durchschnitt 12 mm (SD 4 mm) in der Altersgruppe der Dreijährigen. Sie steigt unstetig auf eine Breite von 26 mm (SD 10 mm) in der Altersgruppe der 16-Jährigen. Der Mittelwert über alle Altersgruppen beträgt 21 mm (SD 9 mm) (Abb. 7). In 67 Fällen lag der Druckpunkt caudal des Corpus sterni.

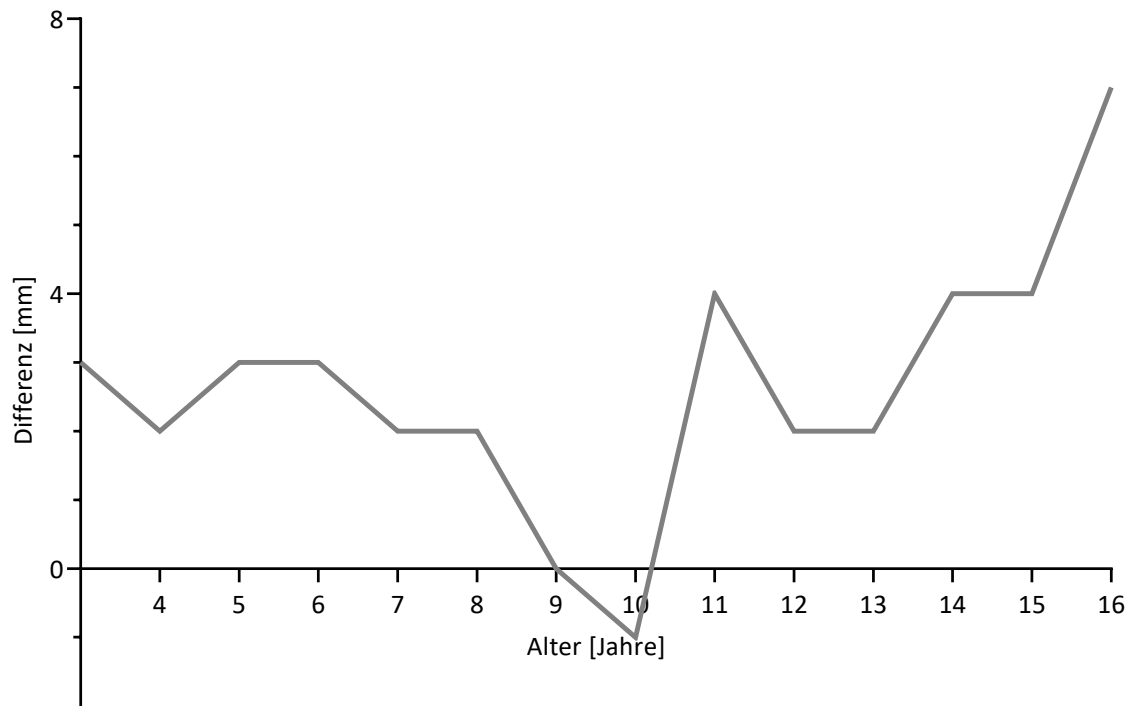
Abb. 7: Breite des Sternums



Bei der Breite des Sternums zeigt sich eine zu erwartende altersabhängige Größenzunahme. Ebenso fällt eine sehr große Streuung der Werte auf. Wie bereits bei der Läng des Sternums beobachtet, fiel bei der Auswertung der Datensätze eine inhomogene Verknöcherung des Sternums auf. Diese führte vor allem bei Kleinkindern zu einer schwankenden Breite der messbaren knöchernen Struktur auch innerhalb des Sternums (CT-Abb. 2).

Betrachtet man die Differenz der Breite des Sternums eines jeden Patienten auf Höhe des empfohlenen und idealen Druckpunktes, beträgt diese im Mittel 3,27 mm (SD 6,7 mm) und ist statistisch signifikant (p-Wert < 0,0001). In allen Altersgruppen außer der der Neun- und Zehnjährigen ist das Sternum am idealen Druckpunkt im Mittel schmäler als am empfohlenen Druckpunkt (Abb. 8).

Abb. 8: Differenz der Breiten des Sternums empfohlenen - ideal

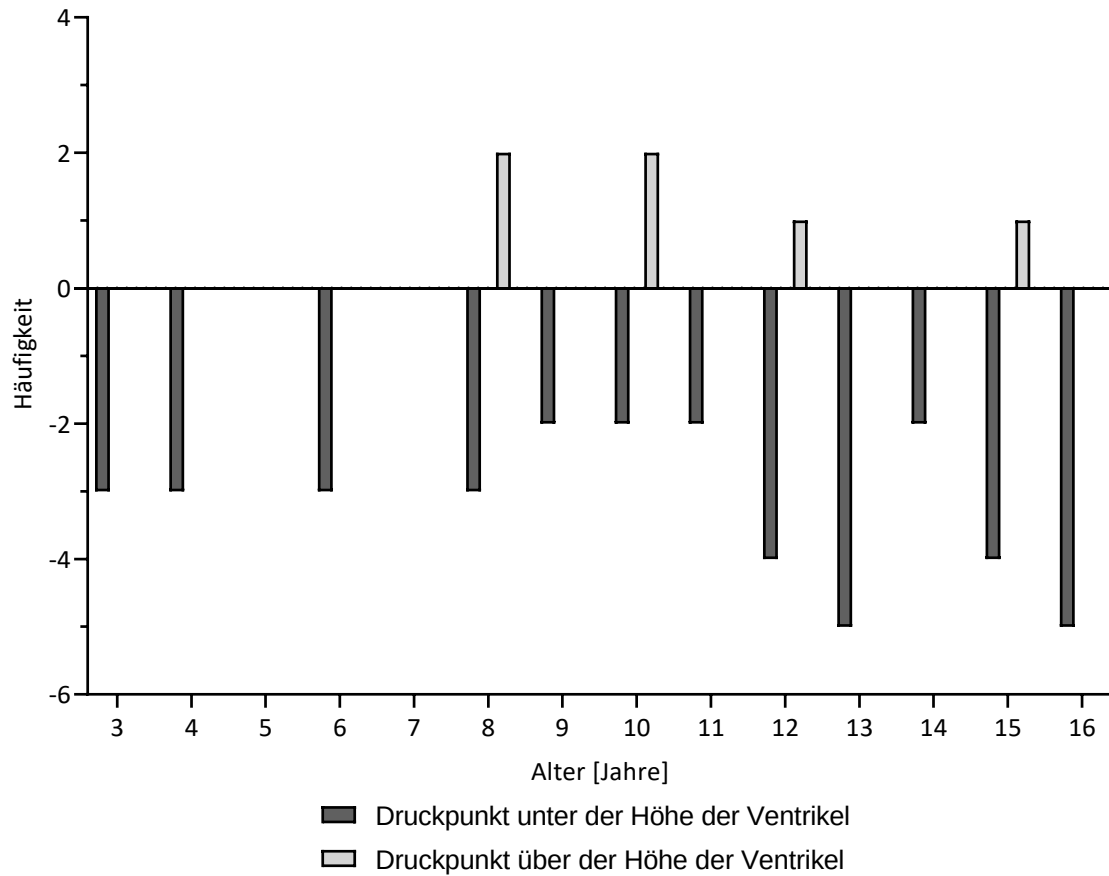


3.3 Diameter des Herzens

Maximaler Diameter der kurzen Herzachse

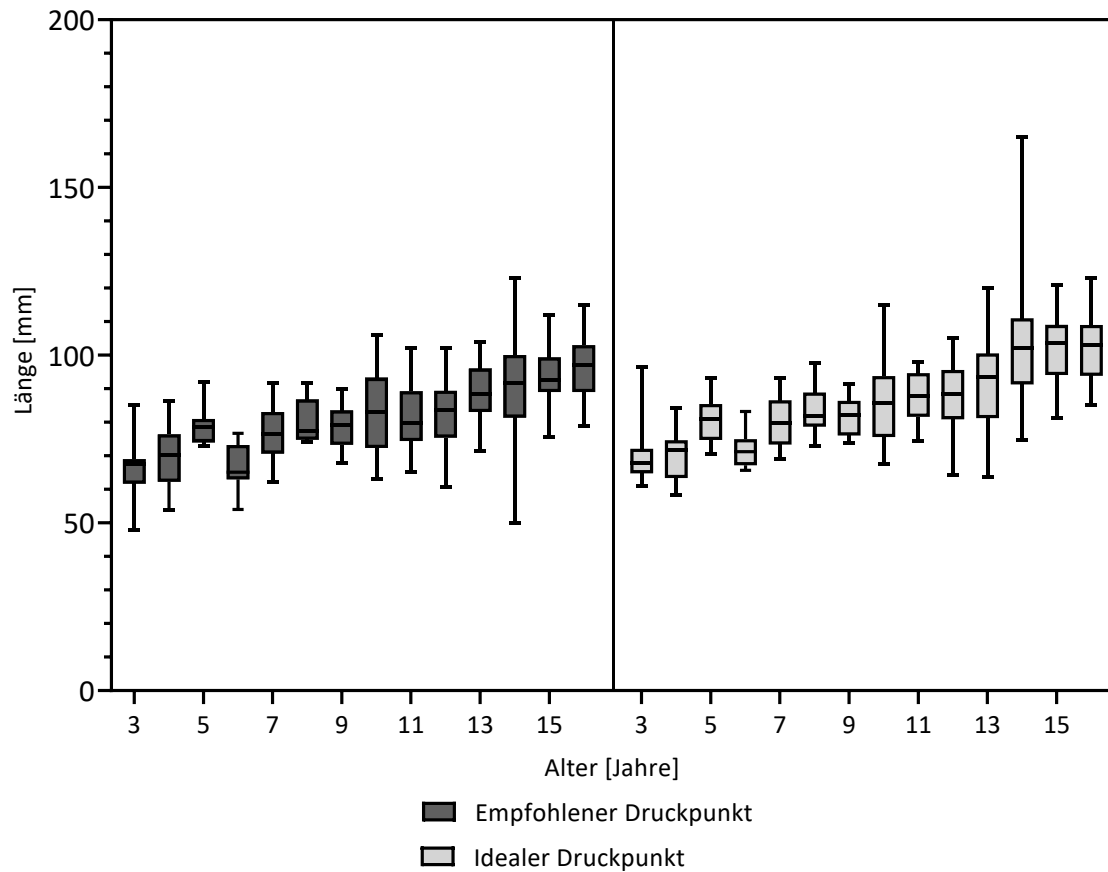
Auf Höhe des empfohlenen Druckpunktes steigt der maximale Diameter der kurzen Herzachse von 67 mm (SD 6 mm) in der Gruppe der Dreijährigen auf 96 mm (SD 10 mm) in der Gruppe der 16-Jährigen. Im Durchschnitt beträgt der maximale Diameter 84 mm (SD 14 mm) (Abb. 10). In 38 Fällen lag der empfohlene Druckpunkt cranial, in sechs Fällen caudal der Ventrikel, weshalb in 44 Fällen kein Diameter der kurzen Herzachse auf Höhe des vom ERC empfohlenen Druckpunktes bestimmt werden konnte (Abb. 9).

Abb. 9: Kurze Herzachse am empf. Druckpunkt nicht bestimmbar



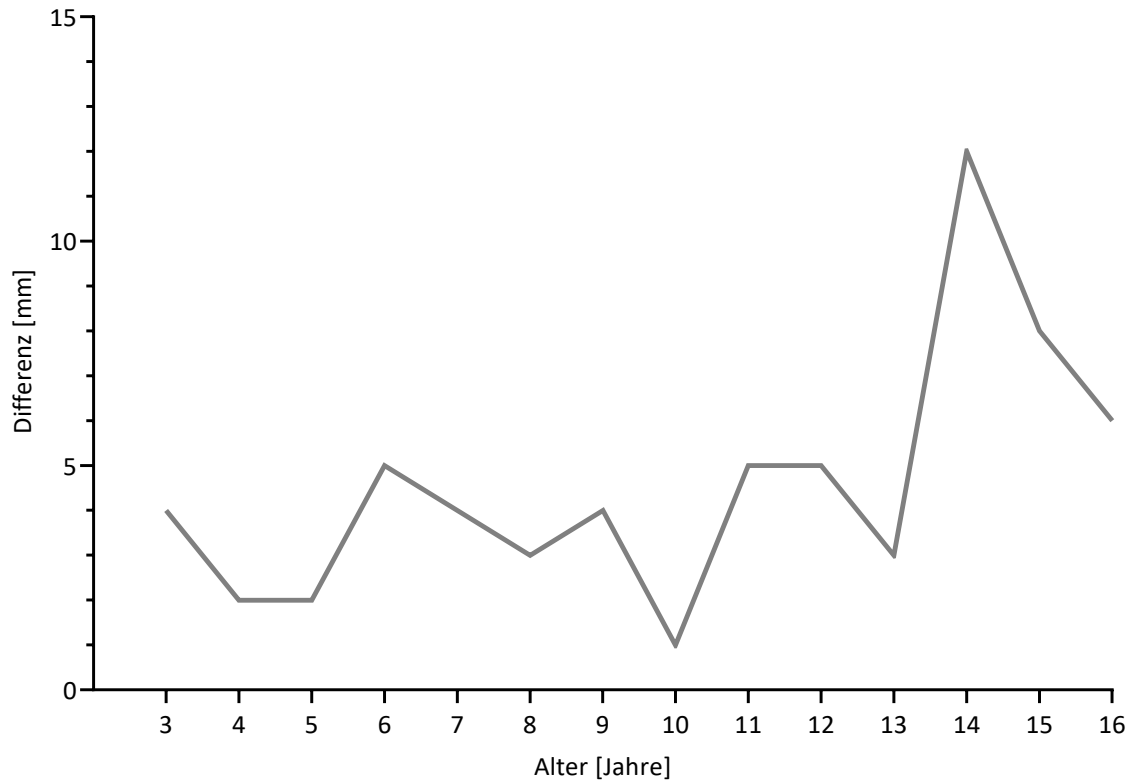
Auf Höhe des idealen Druckpunktes steigt der maximale Diameter der kurzen Herzachse von 70 mm (SD 9 mm) in der Kohorte der Dreijährigen auf 102 mm (SD 10 mm) in der Kohorte der 16-Jährigen. Über alle Altersgruppen liegt der Durchschnitt bei 89 mm (SD 15 mm) (Abb. 10).

Abb. 10: Maximaler Diameter der kurzen Herzachse



Die maximalen Diameter der kurzen Herzachse steigen wie erwartet altersabhängig an, sodass es am empfohlenen Druckpunkt zu einer Zunahme von 43 % und am idealen Druckpunkt von 46 % kommt. Der Mittelwert aller einzelnen Differenzen der kurzen Herzachse auf Höhe des empfohlenen und idealen Druckpunktes beträgt 5,98 mm (SD 7,37 mm) und ist statistisch signifikant (p -Wert $< 0,0001$). Diese Differenz entspricht in etwa 7 % des maximalen Diameters der kurzen Herzachse (Abb. 11).

Abb. 11: Differenz der kurzen Herzachsen empfohlen - ideal

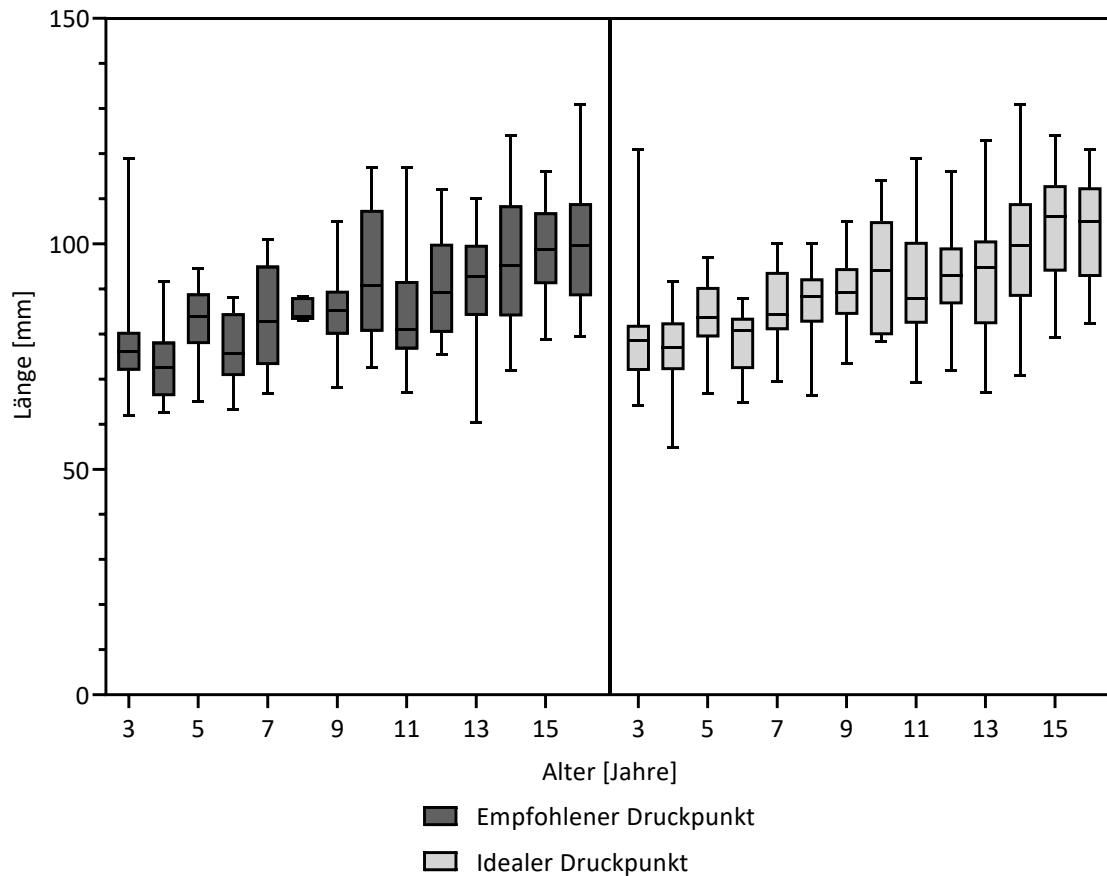


Maximaler Diameter der langen Herzachse

Auf Höhe des empfohlenen Druckpunktes beträgt die lange Herzachse in der Kohorte der Dreijährigen 78 mm (SD 13 mm). Sie steigt diskontinuierlich auf einen Wert von 101 mm (SD 13 mm) in der Kohorte der 16-Jährigen. Im Durchschnitt über alle Altersgruppen beträgt die lange Herzachse 90 mm (SD 14 mm) (Abb. 12). Wie bei der Bestimmung der kurzen Herzachse lag auch hier in 38 Fällen der Druckpunkt über und in sechs Fällen unter den Ventrikeln (Abb. 9).

Auf Höhe des idealen Druckpunktes beträgt die lange Herzachse in der Kohorte der Dreijährigen 80 mm (SD 12 mm) und steigt un stetig auf 102 mm (SD 12 mm) in der Kohorte der 16-Jährigen an. Im Durchschnitt über alle Altersgruppen beträgt die Länge 93 mm (SD 14 mm) (Abb. 12).

Abb. 12: Maximaler Diameter der langen Herzachse

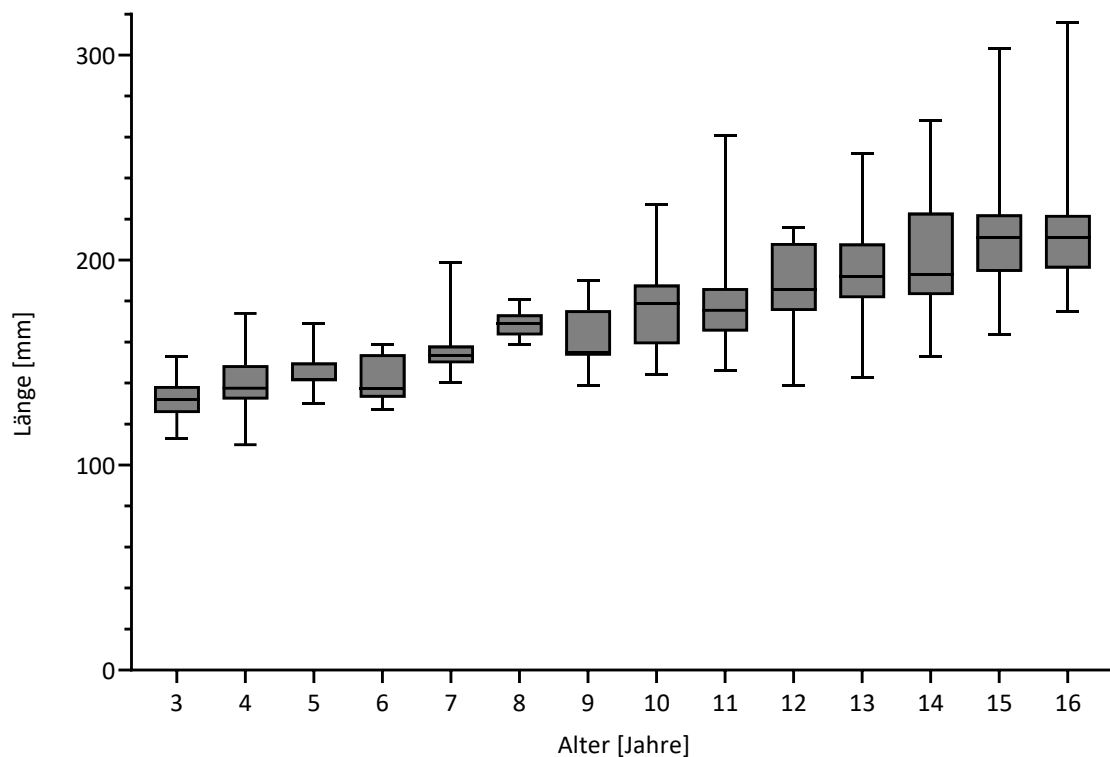


Der Mittelwert aller einzelnen Differenzen der langen Herzachse auf Höhe des empfohlenen und idealen Druckpunktes beträgt 3,68 mm (SD 6,55 mm) und ist statistisch signifikant (p-Wert < 0,0001).

3.4 Diameter des Thorax

Der maximale Thoraxdiameter anterior-posterior betrug in der Gruppe der Dreijährigen 132 mm (SD 10 mm) und steigt kontinuierlich auf einen Wert von 213 mm (SD 27 mm) in der Gruppe der 16-Jährigen. Der durchschnittliche Patient über alle Altersgruppen hat einen Diameter von 180 mm (SD 34 mm) (Abb. 13).

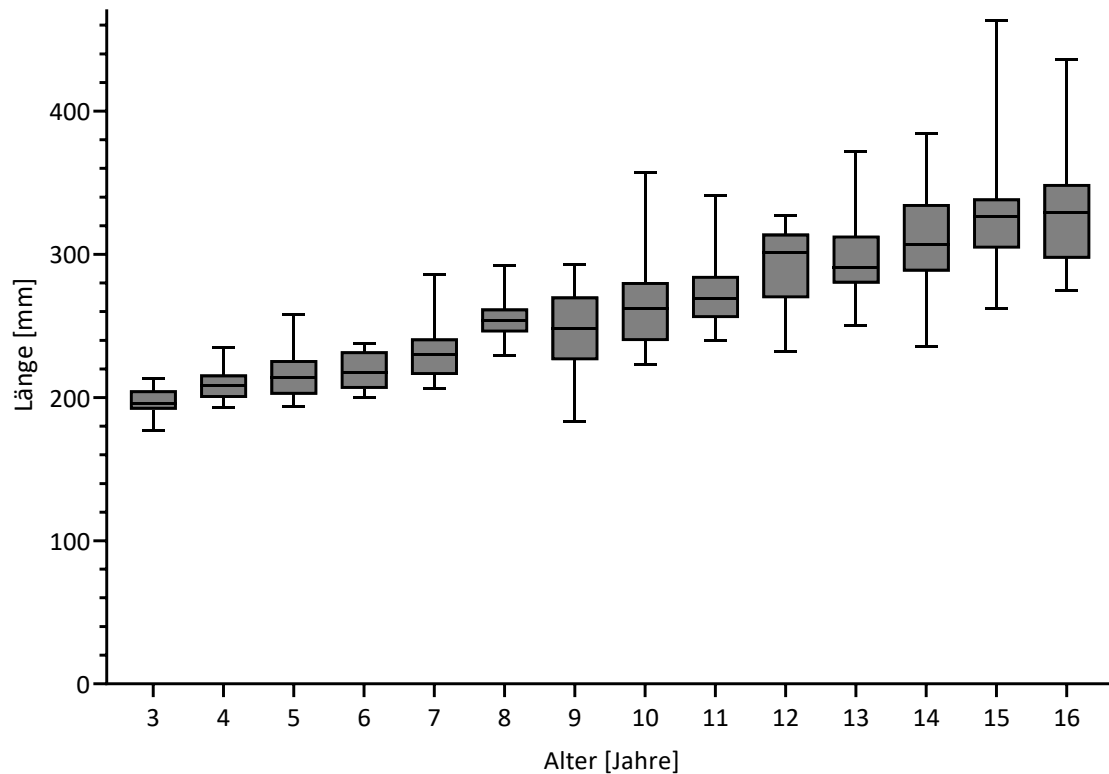
Abb. 13: Thoraxdiameter Anterior-Posterior



Der maximale Thoraxdiameter dextra-sinistra beträgt 197 mm (SD 10 mm) in der Altersgruppe der Dreijährigen und steigt auf 329 mm (SD 52 mm) in der Altersgruppe der 16-Jährigen. Der Mittelwert über alle Datensätze beträgt 276 mm (SD 52 mm) (Abb. 14).

Bei geringen Standardabweichungen erscheinen die Werte plausibel. Was durch die Betrachtung statischer CT-Bilder nicht berücksichtigt werden kann, ist die atemabhängige Veränderung der Thoraxdiameter, welche vor allem bei den sehr jungen Patienten zu tragen kommt, da diese aufgrund der Compliance nicht in Inspiration durchgeführt werden können.

Abb. 14: Thoraxdiameter Dexter-Sinister

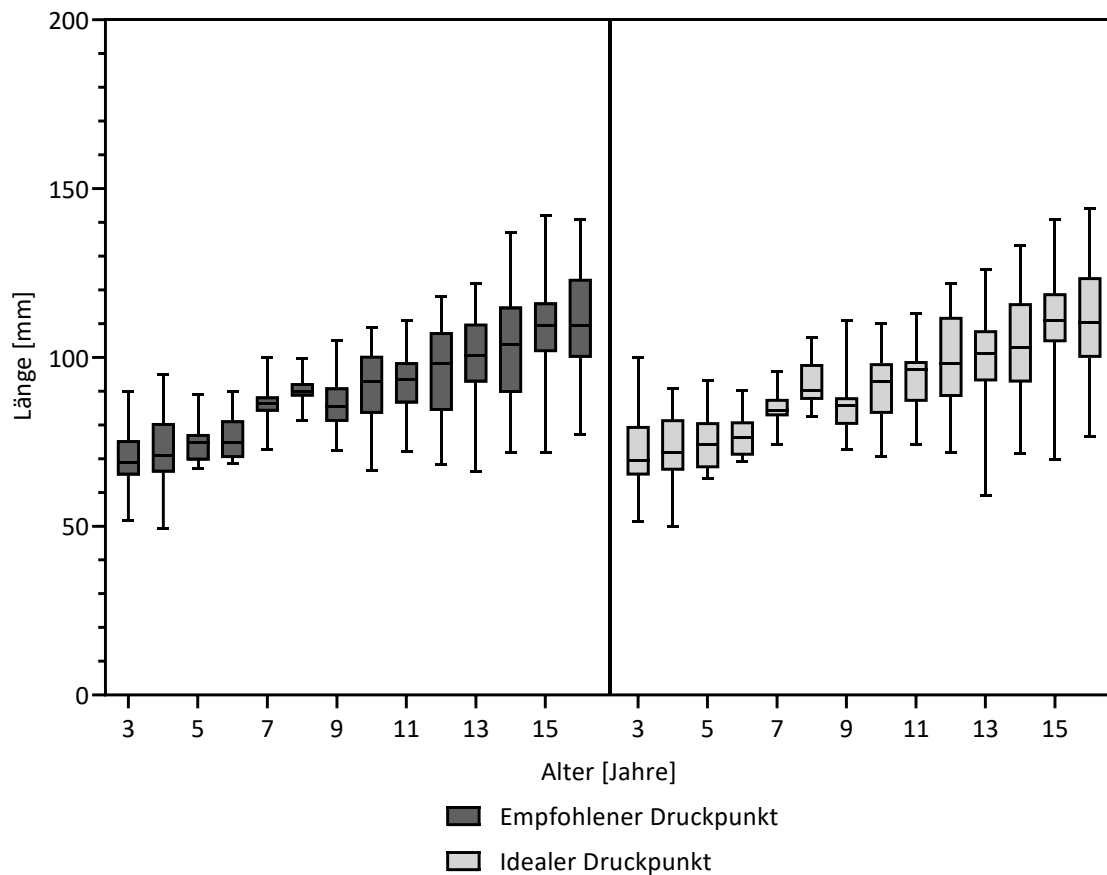


Abstand zwischen der Sternumhinterkante und der Wirbelkörpervorderkante

Auf Höhe des empfohlenen Druckpunktes beträgt der Abstand von der Sternumhinterkante zur Wirbelkörpervorderkante in der Kohorte der Dreijährigen 70 mm (SD 10 mm). Er steigt kontinuierlich auf 111 mm (SD 16 mm) in der Kohorte der 16-Jährigen an. Der Durchschnitt über alle Altersgruppen beträgt 94 mm (SD 18 mm) (Abb. 15).

Auf Höhe des idealen Druckpunktes beträgt der Abstand von der Sternumhinterkante zur Wirbelkörpervorderkante in der Kohorte der Dreijährigen 72 mm (SD 11 mm). In der Kohorte der 16-Jährigen steigt er diskontinuierlich auf 112 mm (SD 17 mm) an. Der Durchschnitt über alle Altersgruppen beträgt 95 mm (SD 19 mm) (Abb. 15).

Abb. 15: Abstand Sternumhinterkante - Wirbelkörpervorderkante



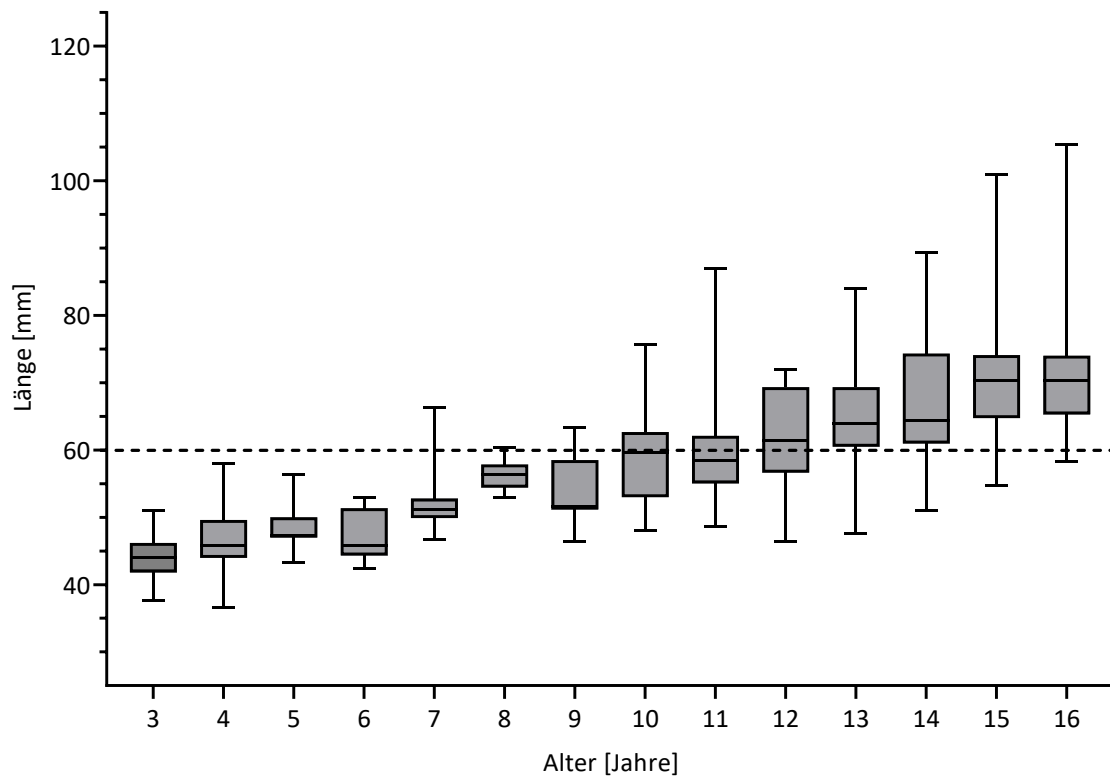
Der Mittelwert aller einzelnen Differenzen des Abstandes zwischen der Sternumhinterkante und der Wirbelkörpervorderkante auf Höhe des empfohlenen und idealen Druckpunktes beträgt 0,56 mm (SD 3,93 mm) und ist statistisch signifikant (p-Wert = 0,0078).

Drucktiefe

Aus dem Thoraxdiameter anterior-posterior lässt sich der von die vom ERC empfohlene Drucktiefe von einem Drittel des Thorax berechnen. Sie beträgt in der Altersgruppe der Dreijährigen 44 mm (SD 3 mm) und steigt auf 71 mm (SD 9 mm) in der Altersgruppe der 16-Jährigen. Der Durchschnitt über alle Altersgruppen beträgt 60 mm (SD 11 mm) (Abb. 16).

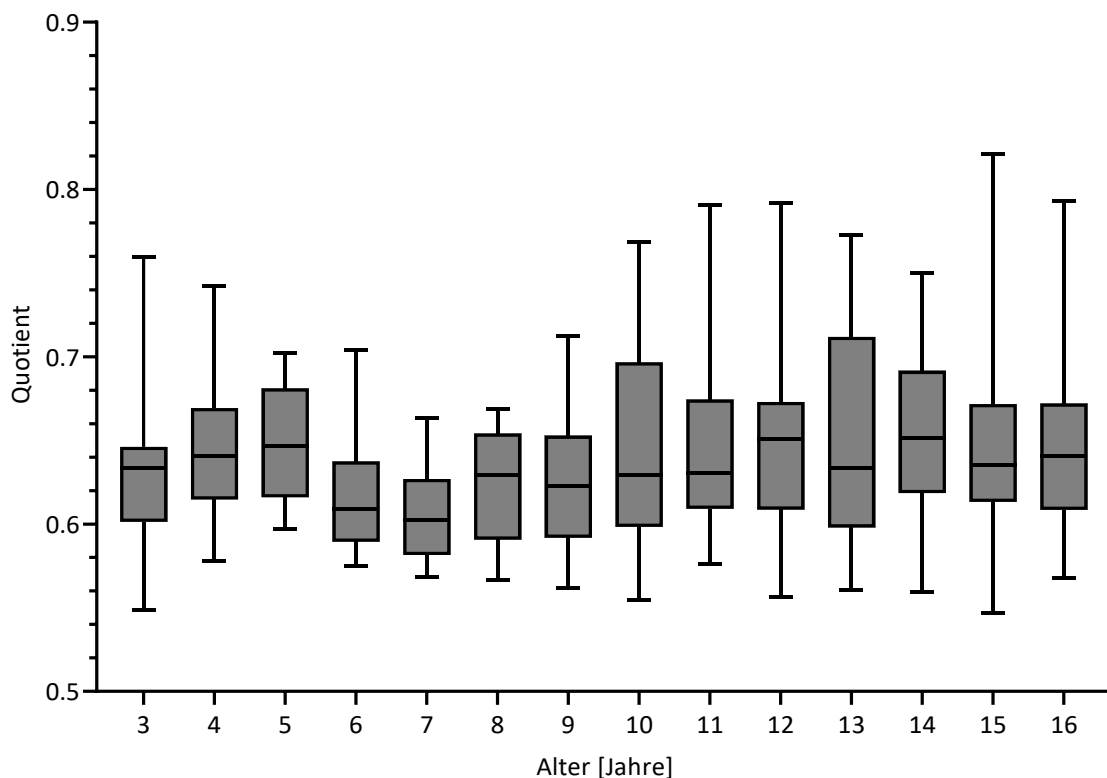
In Abbildung 16 wurde die vom ERC für Kinder und Erwachsene empfohlene maximale Drucktiefe von 6 cm als gestrichelte Linie hervorgehoben.

Abb. 16: Drucktiefe bei Kompression des Thorax um 1/3



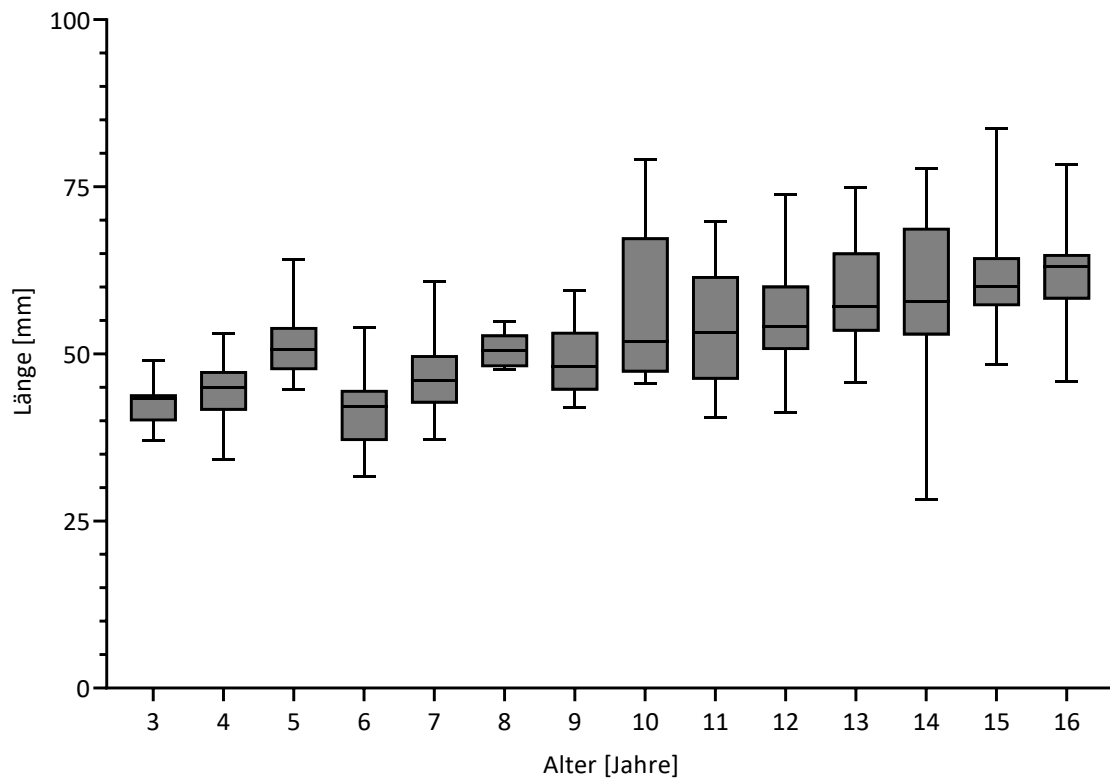
Aus der Drucktiefe lässt sich für den empfohlenen Druckpunkt berechnen, um wie viel Prozent der Raum zwischen der Wirbelkörpervorderkante und der Sternumhinterkante komprimiert wird. Bei einer theoretisch homogenen Kompression aller Thoraxorgane würde dieser Wert die maximale prozentuale Kompression des Herzens wiedergeben und es ließe sich somit eine maximal zu erreichende Ejektionsfraktion berechnen. In der Altersgruppe der Dreijährigen beträgt der Wert 63,3 % (SD 5 %), in der Altersgruppe der 16-jährigen 64,2 % (SD 4,9 %). Der Durchschnitt über alle Altersgruppen beträgt 64,2 % (SD 5,1 %) (Abb. 17).

Abb. 17: Quotient der Kompression des Raumes zwischen Sternum und Wirbelsäule



In einer Modelbetrachtung wurde anschließend für die Hypothese, dass sich alle Thoraxorgane gleichmäßig komprimieren lassen, untersucht, um welchen absoluten Wert die kurze Herzachse bei der empfohlenen Kompression des Thorax um ein Drittel komprimiert würde. Als Ergebnis würde es zu einer Kompression der kurzen Herzachse in der Altersgruppe der Dreijährigen von 43 mm (SD 3 mm) kommen. In der Altersgruppe der 16-Jährigen würde die kurze Herzachse um 62 mm (SD 7 mm) komprimiert werden. Der Durchschnitt über alle Altersgruppen würde 54 mm (SD 10 mm) betragen (Abb. 18). Bei dieser modellhaften Betrachtung ist zu berücksichtigen, dass der hier verwendete Diameter der kurzen Herzachse räumlich nicht direkt zwischen der Sternumhinterkante und der Wirbelkörpervorderkante zu liegen kam. Ebenso ist bei dieser Modellbetrachtung angenommen, dass sich alle Thoraxorgane gleichmäßig komprimieren lassen und es während der Kompression zu keiner Verlagerung der Organe im Thorax kommt.

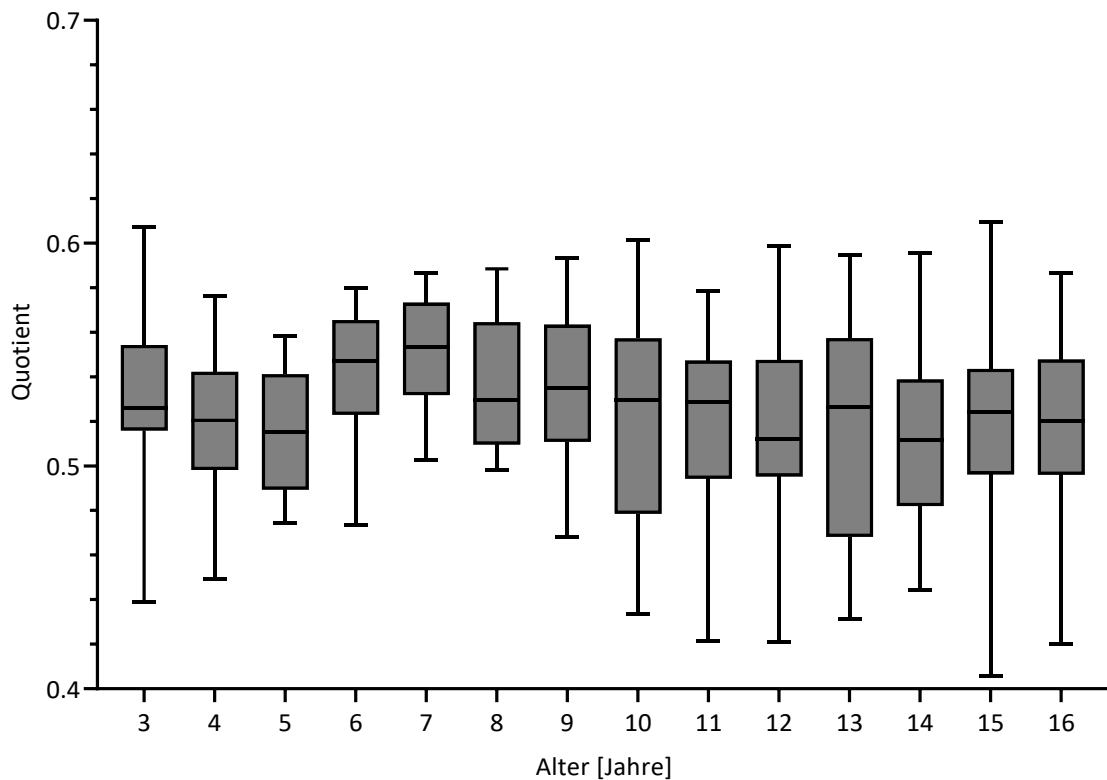
Abb. 18: Theoretisch ideale Kompression der kurzen Herzachse



Bei genauer Betrachtung der Werte fällt auf, dass die absolute Kompression der kurzen Herzachse im Wachstum um lediglich 44 % ansteigt (von 43 mm auf 62 mm), während die Drucktiefe um 61 % ansteigt (von 44 mm auf 71 mm). Dies deutet auf ein prozentual ungleiches Wachstum des Thorax und des Herzens hin.

Schaut man sich das Verhältnis vom Abstand der Sternumhinterkante-Wirbelkörpervorderkante zum maximalen Thoraxdiameter anterior-posterior an, fällt auf, dass dieses Verhältnis über alle Altersgruppen konstant ist. In der Altersgruppe der Dreijährigen 52,9 % (SD 4 %), in der Altersgruppe der 16-Jährigen 52,2 % (SD 3,8 %). Der Durchschnitt über alle Altersgruppen beträgt 52,2 % (SD 3,9 %) (Abb. 19). Dieses konstante Verhältnis deutet drauf hin, dass die Proportionen des Thorax während des Wachstums ebenfalls konstant bleiben.

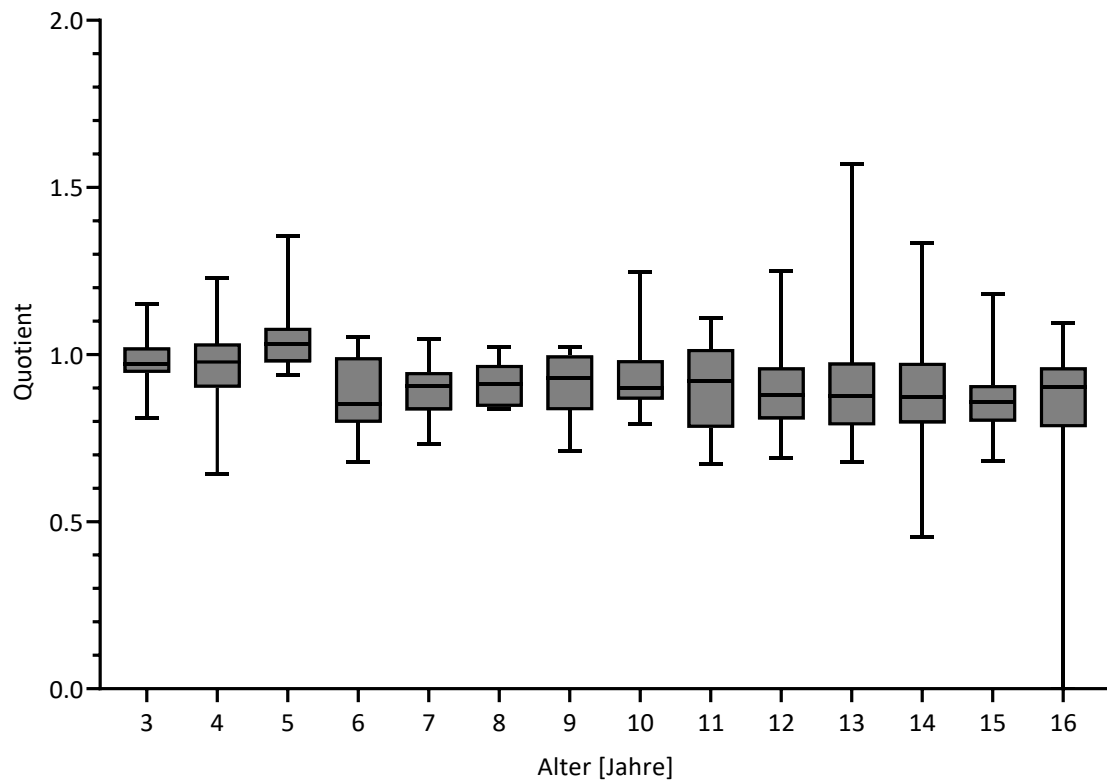
Abb. 19: Quotient aus dem Abstand Sternum - Wirbelkörper und Thorax AP



Dies wird bestätigt, wenn man den prozentualen Zuwachs der Diameter zwischen der Altersgruppe der Drei- und der 16-Jährigen betrachtet. Der Thoraxdiameter anterior-posterior wächst im Durchschnitt um 61 %, der Abstand zwischen der Sternumhinterkante und der Wirbelkörpervorderkante um 59 %.

Wie oben bestimmt, beträgt das Wachstum der kurzen Herzachse am empfohlenen Druckpunkt lediglich 43 % und am idealen Druckpunkt 46 %. Betrachtet man das Verhältnis von absoluter Kompression der kurzen Herzachse zur absoluten Kompression des Thorax, fällt wie erwartet auf, dass dieser Wert bei Kleinkindern größer als bei Jugendlichen ist. In der Altersgruppe der Dreijährigen beträgt das Verhältnis 98,8 % (SD 8,9 %), in der Altersgruppe der 16-jährigen 84,9 % (SD 20,2 %). Der Durchschnitt über alle Altersgruppen beträgt 91 % (SD 14,9 %) (Abb. 20).

Abb. 20: Quotient aus der absoluten Kompression kurze Herzachse und Thorax AP



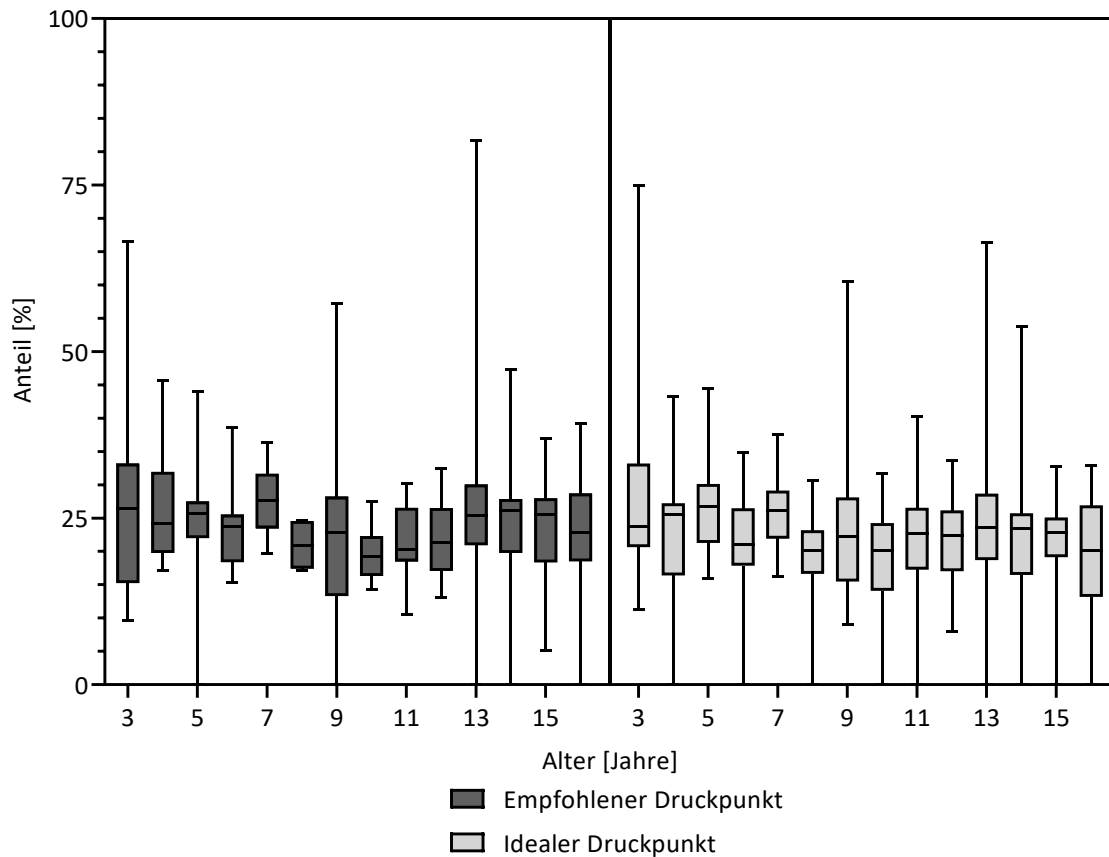
3.5 Position des Druckpunktes

Anteil der langen Herzachse in der rechten Thoraxhälfte

Auf Höhe des empfohlenen Druckpunktes beträgt der Anteil der langen Herzachse in der rechten Thoraxhälfte in der Kohorte der Dreijährigen 27 % (SD 14 %). Der Anteil sinkt stark diskontinuierlich auf 23 % (SD 8 %) in der Altersgruppe der 16-Jährigen. Der Mittelwert über alle Altersgruppen beträgt 24 % (SD 9 %) (Abb. 21). Wie bei der Bestimmung der langen Herzachse lag bei 38 Patienten der Druckpunkt cranial und bei sechs Patienten caudal der Ventrikel. Bei fünf Patienten lag die lange Herzachse vollständig in der linken Thoraxhälfte.

Auf Höhe des idealen Druckpunktes beträgt der Anteil der langen Herzachse in der rechten Thoraxhälfte in der Kohorte der Dreijährigen 28 % (SD 14 %). Er sinkt stark diskontinuierlich auf 20 % (8 %) in der Kohorte der 16-Jährigen. Der Mittelwert über alle Altersgruppen beträgt 23 % (SD 10 %) (Abb. 21). Bei 13 Patienten lag die lange Herzachse vollständig in der linken Thoraxhälfte.

Abb. 21: Prozentualer Anteil der langen Herzachse in der rechten Thoraxhälfte



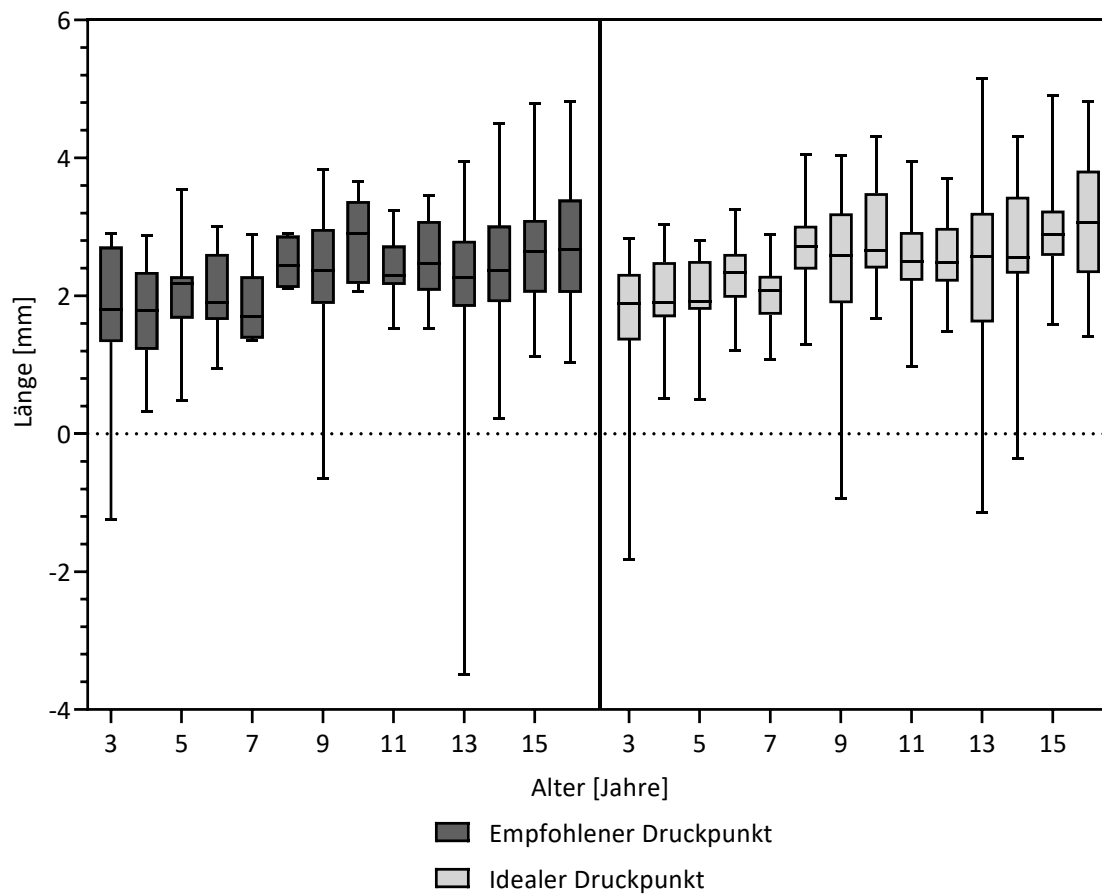
Die ermittelten Prozentwerte zeigen eine starke Streuung um 24,2 % am empfohlenen Druckpunkt und 22,6 % am individuellen Druckpunkt auf. Der Mittelwert aller einzelnen Differenzen des Anteiles der langen Herzachse in der rechten Thoraxhälfte auf Höhe des empfohlenen und idealen Druckpunktes beträgt 1,34 % (SD 6,57 %) und ist statistisch signifikant (p-Wert = 0,0008). Die altersabhängige Tendenz ist leicht fallend. Die Abnahme des Anteils der langen Herzachse in der rechten Thoraxhälfte auf Höhe des empfohlenen Druckpunktes im von der Altersgruppe der Drei- bis 16-Jährigen von 4,58 % ist nicht statistisch signifikant (p-Wert = 0,0885). Die deutlich größere Abnahme auf Höhe des idealen Druckpunktes von 8,69 % ist statistisch signifikant (p-Wert = 0,0026). Ob der Unterschied in der Höhe der Abnahme und der daraus resultierende Unterschied in der Signifikanz durch ein unterschiedliches Wachstum oder eine höhere Streuung der Werte zustande kommt, kann anhand der Daten nicht sicher bestimmt werden. Da die oben genannten Standardabweichungen mit 9 % und 10 % jedoch eine ähnliche Größenordnung besitzen, scheint eine asymmetrische Verlagerung des Herzens mit einer größeren Verlagerung der

caudalen Anteile des Herzens während des Wachstums in Richtung der linken Thoraxhälfte jedoch nicht ausgeschlossen.

Wie bei dem maximalen Diameter der langen Herzachse, ist auch hier bei der Interpretation der Werte zu berücksichtigen, dass aufgrund der niedrigen Auflösung der Ausflusstrakt bei der Bestimmung der langen Herzachse mitgemessen wurde.

Um eine mögliche Verlagerung des Herzens während des Wachstums zu objektivieren, wurde die Verlagerung des Herzmittelpunktes in Zentimetern berechnet. Hierzu wurde der Prozentsatz der Länge der langen Herzachse berechnet, um welchen die Mitte der langen Herzachse vom Sternum im linken Thorax liegt. Dieser Prozentsatz wurde mit der Länge in der langen Herzachse multipliziert. In der Gruppe der Dreijährigen liegt die Mitte der langen Herzachse beider Druckpunkte 1,8 cm links des Sternums und steigt unstetig an. In der Gruppe der 16-Jährigen liegt die Mitte der langen Herzachse am empfohlenen Druckpunkt 2,7 cm, am idealen 3,1 cm links des Sternums (Abb. 22). Die Verlagerung der Mitte der langen Herzachse ist bei beiden Druckpunkten nicht statistisch signifikant.

Abb. 22: Abstand der Mitte der langen Herzachse zum Sternum

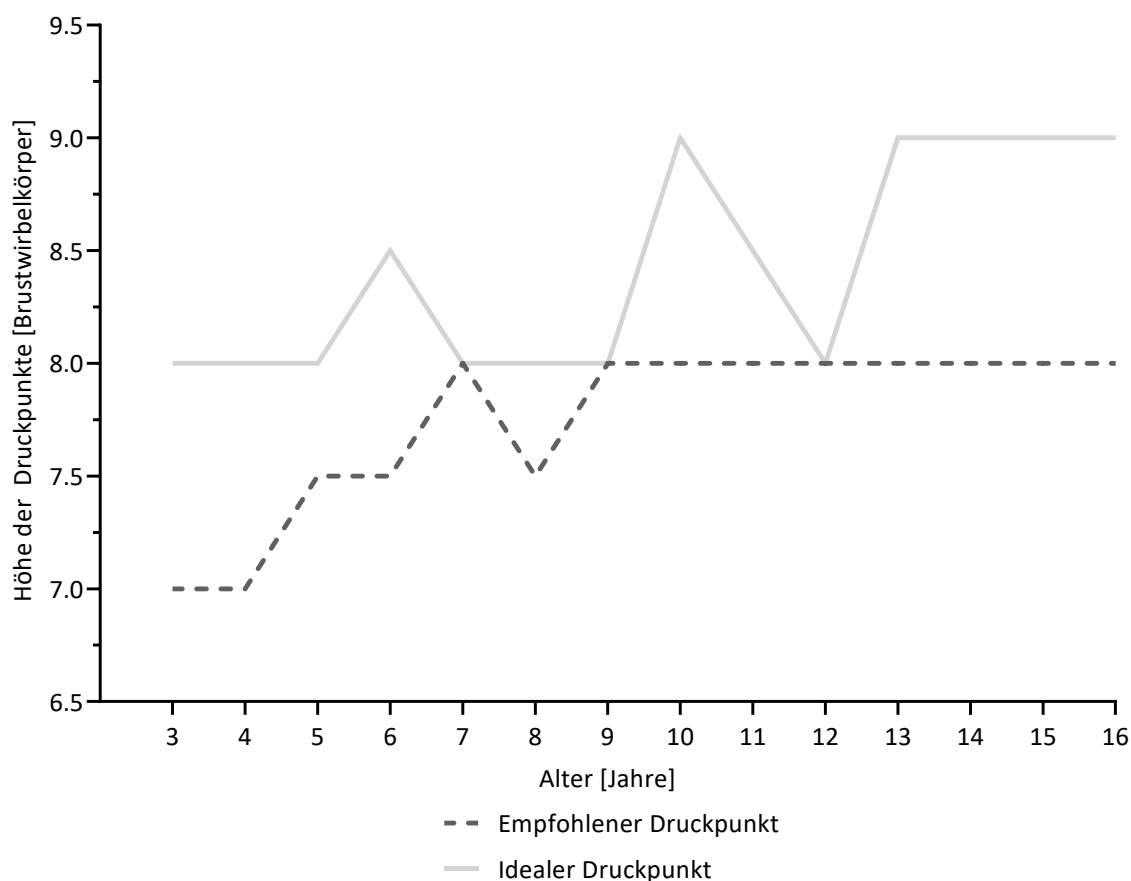


Wirbelkörper auf Höhe des Druckpunktes

Für den empfohlenen Druckpunkt liegt der Median der Wirbelkörper in der Altersgruppe der Dreijährigen beim siebten, in der Altersgruppe der 16-Jährigen beim achten Brustwirbelkörper. Der Median über alle Altersgruppen ist der achte Brustwirbelkörper (Abb. 23).

Für den idealen Druckpunkt liegt der Median der Wirbelkörper in der Altersgruppe der Dreijährigen beim achten in der Altersgruppe der 16-Jährigen beim neunten Brustwirbelkörper. Der Median über alle Altersgruppen ist der achte Brustwirbelkörper (Abb. 23).

Abb. 23: Median der Höhe der Druckpunkte gemessen am Wirbelkörper



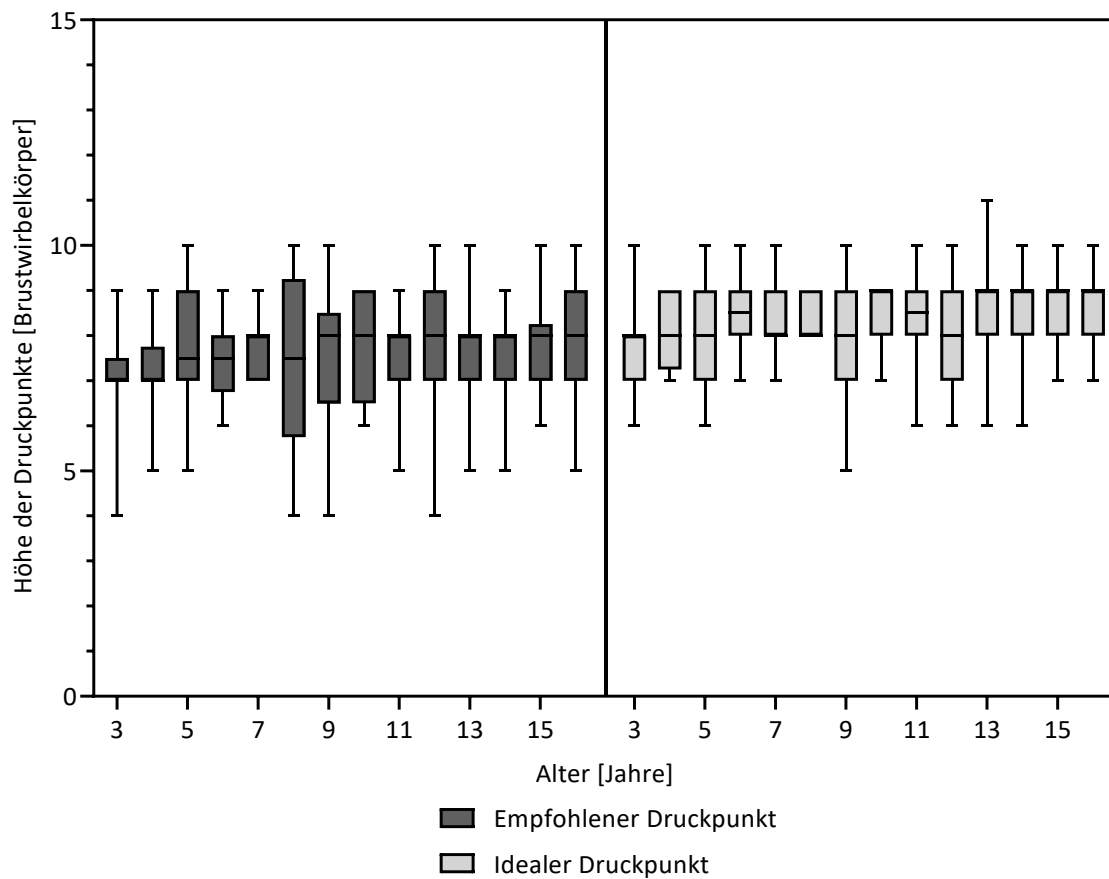
Bei 83 Patienten wurde für die Höhe beider Druckpunkte der gleiche Brustwirbelkörper gemessen. Bei 25 Patienten lag der ideale über dem empfohlenen Druckpunkt, bei 181 Patienten lag der ideale unter dem empfohlenen Druckpunkt.

Die Mediane der einzelnen Altersgruppen lassen vermuten, dass sich beide Druckpunkte im Laufe des Lebens Richtung caudal verlagern. Ebenso zeigt sich ein Unterschied in der Höhe des empfohlenen und idealen Druckpunktes. Um diese Feststellung weiter quantifizieren zu können, wurde den ordinalskalierten zwölf Brustwirbelkörpern modellhaft eine identische Größe zugeschrieben, um sie als verhältnisskaliert erachten zu können und unter dieser Annahme ein arithmetisches Mittel berechnen zu können.

In der Kohorte der Dreijährigen lag der empfohlene Druckpunkt auf Höhe des 6,9. Brustwirbels (SD 1,2 WK). Der Druckpunkt sinkt statistisch signifikant kontinuierlich auf die Höhe des achten Brustwirbelkörpers (SD 1,2 WK) in der Kohorte der 16-Jährigen ($p\text{-Wert} = 0,0007$). Der Mittelwert über alle Altersgruppen ist der 7,6. Brustwirbel (SD 1,2 WK) (Abb. 24).

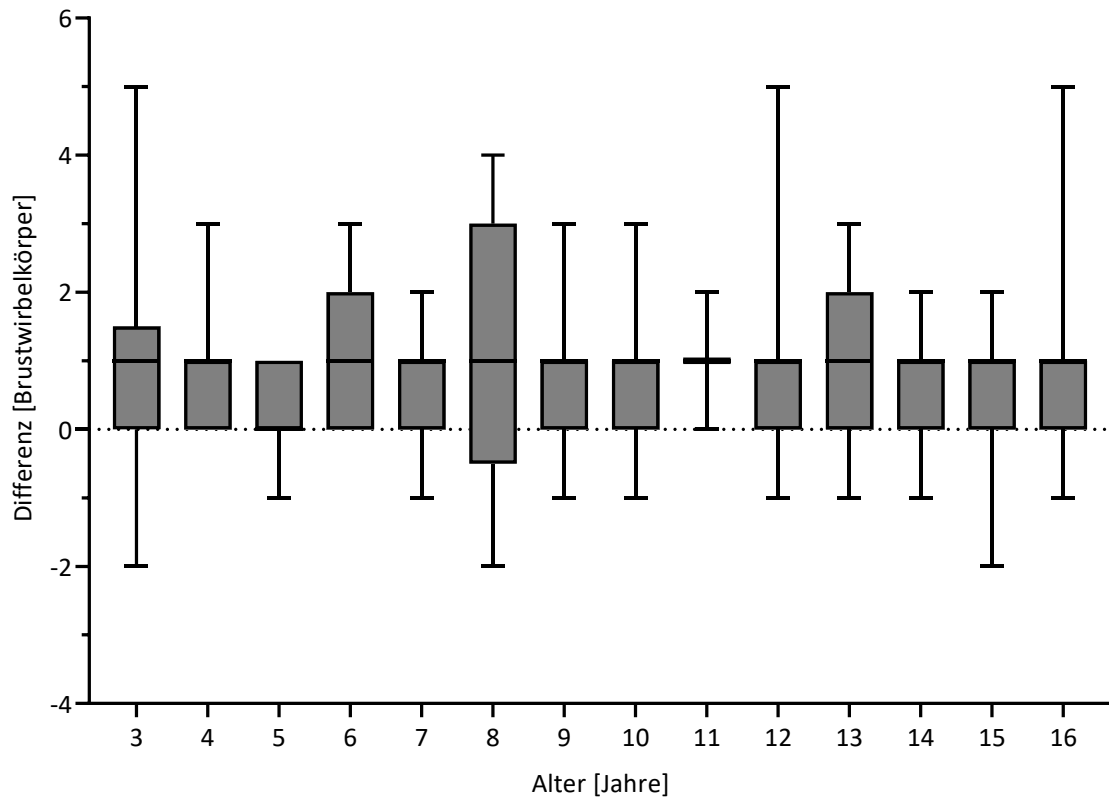
In der Kohorte der Dreijährigen lag der ideale Druckpunkt auf Höhe des 7,8. Brustwirbels (SD 1 WK). Der Druckpunkt sinkt in der Kohorte der 16-Jährigen statistisch signifikant auf den 8,7. Wirbelkörper (SD 0,74 WK) (p-Wert = 0,0003). Der Druckpunkt aller Altersgruppen liegt auf Höhe des 8,4. Brustwirbels (SD 0,94 WK) (Abb. 24).

Abb. 24: Höhe der Druckpunkte gemessen am Wirbelkörper Boxplot



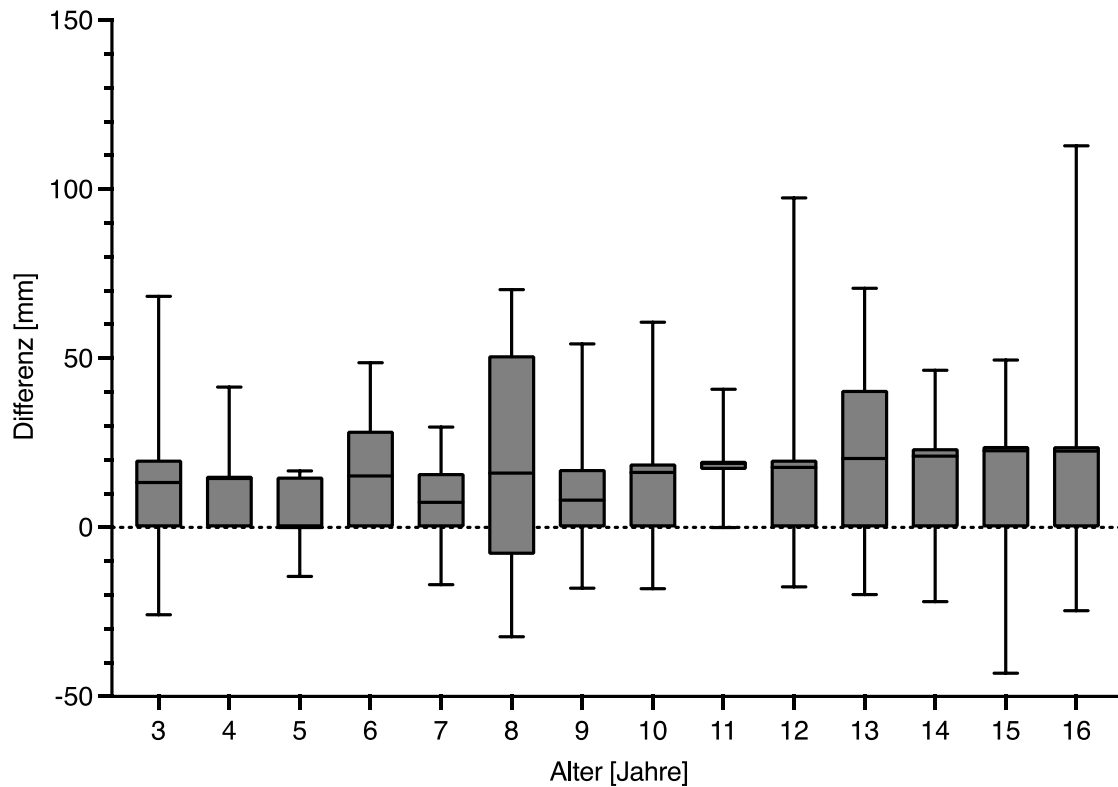
Schaut man sich die Differenz der gemessenen Wirbelkörper eines jeden Patienten separat an, beträgt der Mittelwert der Differenz in der Altersgruppe der Dreijährigen 0,9 Wirbelkörper (SD 1,41 WK). In der Altersgruppe der 16-Jährigen beträgt der Mittelwert 0,69 WK (SD 1,35 WK). Der Mittelwert der Differenz über alle Altersgruppen beträgt 0,79 Wirbelkörper (SD 1,09 WK) und ist statistisch signifikant (p-Wert < 0,0001) (Abb. 25). Da die mittels der Verhältnisskale ermittelte Differenz (0,8 WK) nur um 0,01 Wirbelkörper abweicht, wird dieses Modell in seiner Aussagekraft gestärkt.

Abb. 25: Differenz der Höhe der Druckpunkte gemessen am Wirbelkörper



Um die Relevanz des Höhenunterschiedes besser abschätzen zu können, wurde im vorher beschriebenen verhältnisskalierten Modell eine einheitliche und durchschnittliche Größe aller Brustwirbel berechnet, indem die Gesamtlänge der Brustwirbelsäule durch 12 geteilt wurde. Die durchschnittliche Differenz zwischen den Druckpunkten aller Patienten beträgt 0,8 Brustwirbelkörper bei einer Länge der gesamten Brustwirbelsäule von 232 mm. Dies würde einer Differenz von 1,5 cm entsprechen. Gemessen an der Brustwirbelsäule liegt der ideale Druckpunkt im Durchschnitt über alle Altersgruppen für diese Modellrechnung 1,5 cm weiter caudal als der empfohlene Druckpunkt. Da der achte Brustwirbelkörper, auf dessen Höhe sich beide Druckpunkte befinden, vermutlich größer als der durchschnittliche Brustwirbelkörper ist, wird der wahre Abstand vermutlich sogar größer sein.

Abb. 26: Differenz der Höhe der Druckpunkte gemessen am Wirbelkörper in mm

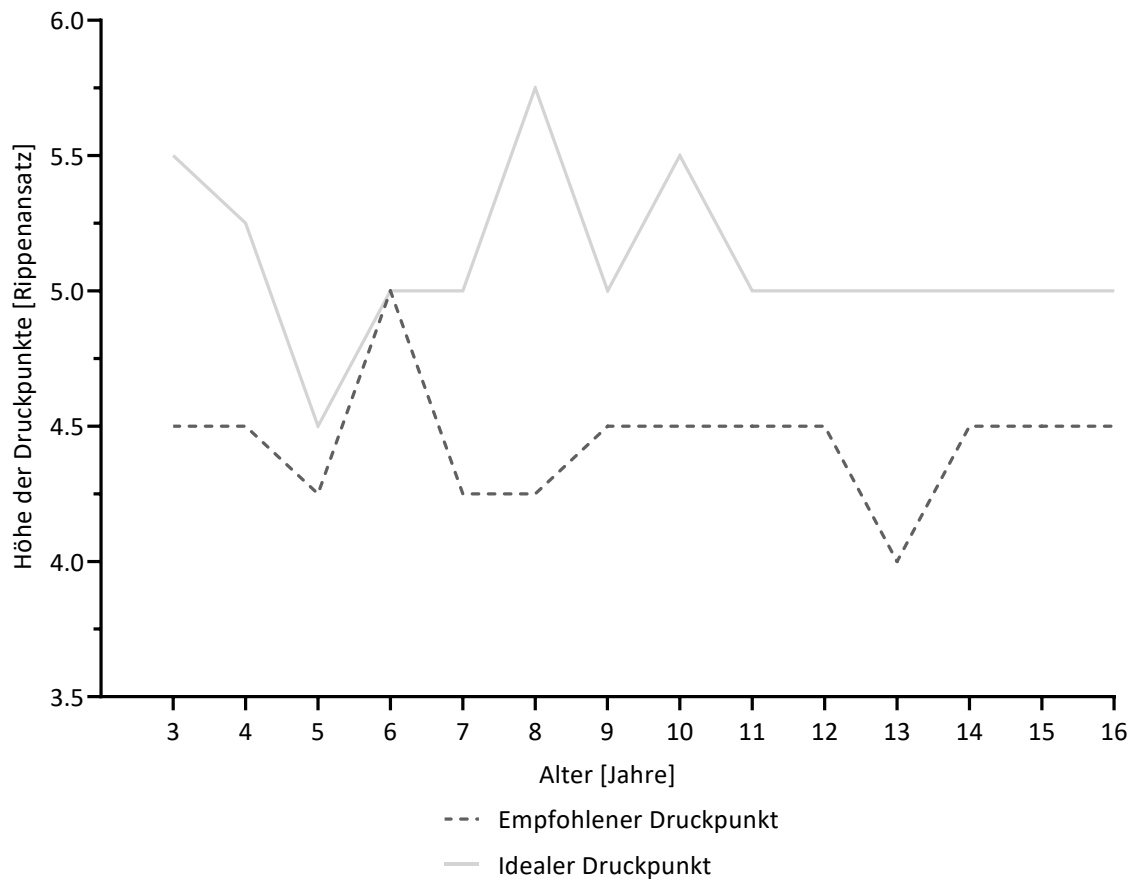


Rippenansatz auf Höhe des Druckpunktes

Für den empfohlenen Druckpunkt liegt der Median der Rippe, welche am Sternum ansetzt in der Altersgruppe der Dreijährigen beim vierten Intercostalraum, in der Altersgruppe der 16-Jährigen ebenso beim vierten Intercostalraum. Der Median über alle Altersgruppen ist der vierte Intercostalraum (Abb. 27).

Für den idealen Druckpunkt liegt der Median der Rippe, welche am Sternum ansetzt in der Altersgruppe der Dreijährigen beim fünften Intercostalraum, in der Altersgruppe der 16-Jährigen bei der fünften Rippe. Der Median über alle Altersgruppen ist die fünfte Rippe (Abb. 27).

Abb. 27: Median der Höhe der Druckpunkte gemessen am Rippenansatz

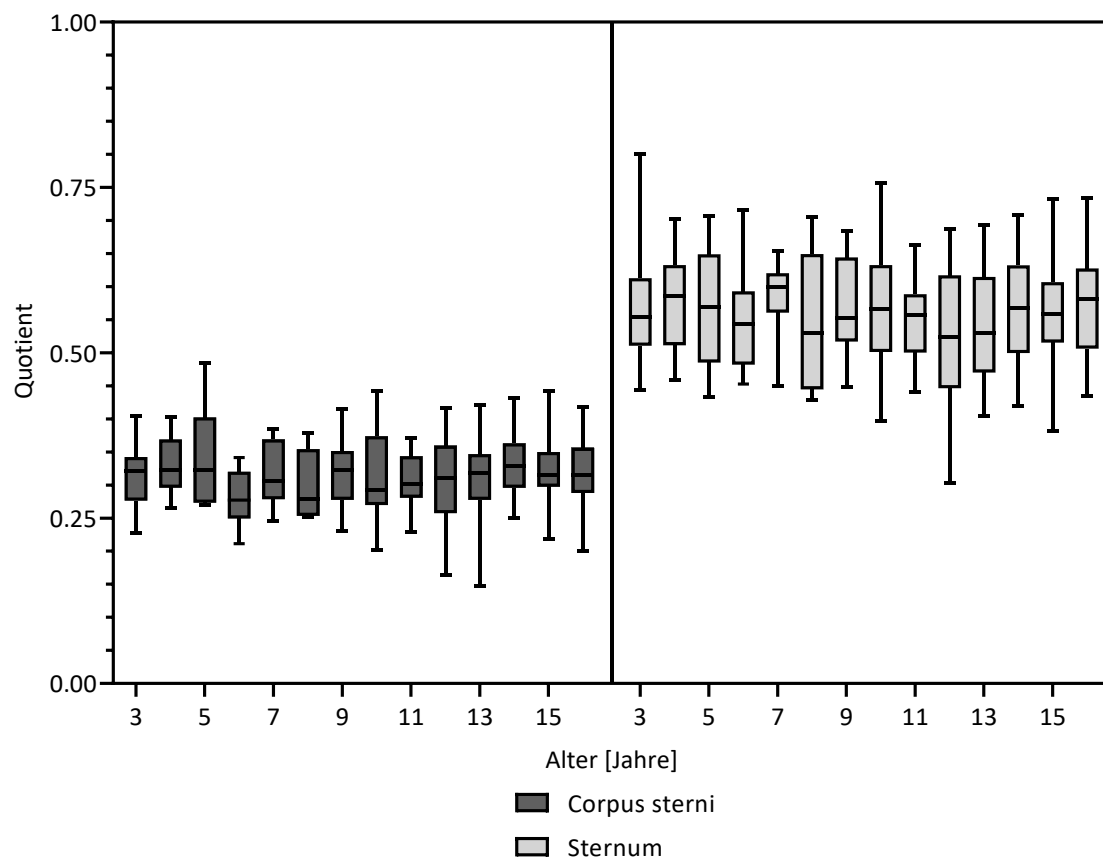


Auch gemessen an den Rippenansätzen liegt der ideale Druckpunkt weiter caudal als der empfohlene. Auffällig ist jedoch, dass im Gegensatz zur Höhe gemessen an den Wirbelkörpern keine altersabhängige Verlagerung der Druckpunkte nach caudal stattfindet. Beim empfohlenen Druckpunkt ist das durch die Definition dieses Druckpunktes zu erklären. Die Erklärung für den idealen Druckpunkt, dass das Sternum weniger wächst als die Brustwirbelsäule, kann mittels der erhobenen Daten widerlegt werden.

Das Verhältnis von Corpus sterni zu Brustwirbelsäule beträgt in der Altersgruppe der Dreijährigen 0,315 (SD 0,043) und in der Altersgruppe der 16-Jährigen 0,319 (SD 0,051). Der Durchschnitt über alle Altersgruppen beträgt 0,316 (SD 0,052) (Abb. 28).

Das Verhältnis vom Sternum zur Brustwirbelsäule beträgt in der Altersgruppe der Dreijährigen 0,567 (SD 0,078) und in der Altersgruppe der 16-Jährigen 0,574 (SD 0,076). Der Durchschnitt über alle Altersgruppen beträgt 0,559 (SD 0,079) (Abb. 28).

Abb. 28: Quotient aus dem Wachstum des Sternums und der Brustwirbelsäule



4 Diskussion

Mit den erhobenen Daten konnte gezeigt werden, dass der hier postulierte ideale und der vom ERC empfohlene Druckpunkt nicht identisch sind. So konnte gezeigt werden, dass der ideale Druckpunkt weiter caudal als der empfohlene Druckpunkt liegt. Ebenso konnte gezeigt werden, dass am idealen Druckpunkt die kurze Herzachse länger ist und somit vermutlich eine effizientere Kompression des Ventrikels möglich ist. Zuletzt konnte gezeigt werden, dass der knöcherne Thorax prozentual mehr wächst als das Herz und somit fraglich ist, ob eine Drucktiefe von einem Drittel des Thorax über alle Altersgruppen eine sinnvolle Empfehlung darstellt.

4.1 Studienpopulation

Aufgrund der erhöhten Strahlenvulnerabilität werden Kinder nur mit besonders strengen Indikationen ionisierender Strahlung ausgesetzt. Auffällig ist die hier festgestellte Häufung der Untersuchungen in den Gruppen der Drei- und Vierjährigen. Erklärungen hierfür könnten die teilweise schwierige sprachliche Anamnese und die Kontrolle juveniler Grunderkrankungen wie angeborene Herzfehler sein. Der Rückgang der Fallzahlen bei den 15- und 16-Jährigen ist vermutlich artifiziell und durch die Filterung der Datenbank zu erklären. Da es leider nicht möglich ist, Patienten nach Alter bei Untersuchung zu filtern, musste bei allen Patienten das Alter durch manuelle Berechnung mittels des Aufnahme- und Geburtsdatums erfolgen. Durch die geringe Anzahl an Datensätzen in den Altersgruppen der Fünf- bis Achtjährigen steigt in einigen Auswertungen die Streuung in diesen an. Trotz des Einschließens der Datensätze beider Campi des Universitätsklinikums Schleswig-Holstein, konnte die Anzahl an Datensätzen in diesen Altersgruppen nicht suffizient gesteigert werden. Sollte in späteren Studien eine Reduktion dieser Streuung angestrebt werden, wäre es ratsam, Datensätze aus mehreren Kliniken zu nutzen.

Brandy, Cain et al. konnten 2011 eine ähnliche Altersverteilung in der CT-Bildgebung am Royal Children's Hospital in Melbourne, Australien zeigen (18). Dort wurden die meisten pädiatrischen CT-Bildgebungen in der Altersgruppe der unter Einjährigen (ca. 11 %) vorgenommen. Mit steigendem Alter nahm die Anzahl der Bildgebungen bis zur Altersgruppe der 5- und 6-jährigen (ca. 3,5 %) ab, stieg bis zur Altersgruppe der 14-Jährigen (ca. 8 %) wieder an und nahm bis zur Altersgruppe der 18-jährigen (ca. 1,5 %) wieder stark ab. In der Studie

wurde der starke Unterschied zu den von allen Arztpraxen im Bundesstaat Victoria abgerechneten pädiatrischen CT-Bildgebungen dargestellt. Dort wurden in den Altersgruppen der 0- bis Dreijährigen (ca. 0,5 %) ähnlich oft Bildgebungen abgerechnet, danach steigt der Anteil bis zur Altersgruppe der 18-Jährigen (ca. 16 %) jedoch stetig an. Beide Verteilungen weichen stark von der ebenfalls gezeigten, nahezu über alle Altersgruppen konstant aufgeteilten Altersverteilung im Bundesstaat Victoria ab. Die Autoren vermuten, dass der hohe Anteil der sehr jungen Patienten dadurch zustande kommt, dass durch die Krankheitsschwere und Unruhe der kleinen Kinder auf eine für ein strahlenfreies Magnetresonanztomografie-Bildgebungsverfahren nötige Sedierung zugunsten der Strahlenlast verzichtet wurde (16,18).

Länge der Brustwirbelsäule

Die Länge der Brustwirbelsäule als Indikator für die Größe der Probanden zeigt einen zu erwartenden altersabhängigen, ansteigenden linearen Verlauf. Die Länge der Brustwirbelsäule ist eine technisch einfach zu bestimmende Größe. Durch die hohen Dichteunterschiede zum umliegenden Gewebe ist sie auch bei Niedrigdosis-CTs sicher abzugrenzen. Ein Störfaktor bei der Bestimmung der Länge der Brustwirbelsäule war, dass nicht bei allen Bildgebungen die Brustwirbelsäule vollständig abgebildet ist. Um eine bessere Aussagekraft zu erhalten, wurden wie im Methodenteil beschrieben, bei fehlendem oder unvollständigen 12. Brustwirbel der 11. dupliziert. Die fehlenden fünf Werte sind durch Aufnahmen begründet, bei denen auch der 11. Brustwirbel nicht vollständig abgebildet wurde. Bei allen anderen Aufnahmen war mindestens der 11. Brustwirbelkörper abgebildet. Trotz dieser Einschränkungen stimmen die hier erhobenen Messwerte mit Ergebnissen von Kennedy et al. 2019 (19) und Dede et al. 2017 (20) überein, was eine alterstypische Größenverteilung der Probanden in der hier durchgeführten Studie erwarten lässt.

4.2 Diameter des Sternums

Wie in den Ergebnissen besprochen führte eine inhomogene Verknöcherung des Sternums zu einer starken Streuung der Längen des Sternums. In der Darstellung der Häufigkeiten in Abbildung 4 können zwei Maxima erahnt werden. Diese könnten durch zwei addierten Normalverteilungen zustande kommen. Eine Gruppe mit geringeren Größen, bei denen das Xiphoid nicht messbar war, und eine Gruppe, bei denen das Xiphoid verknöchert und die Länge des Sternums somit länger war. Aufgrund der für diese Darstellung geringen Anzahl an

Datensätzen kann keine Aussage über die Signifikanz der Maxima getroffen werden. Anhand der CT-Abbildungen 2, 3, 4 und 5 kann jedoch festgestellt werden, dass die CT-Untersuchung mit der mangelnden Darstellung von knorpeligen Strukturen bei der Bestimmung des empfohlenen Druckpunktes an ihre Grenzen stößt. Da in einer Notfallsituation eine Bestimmung über das Tasten oder visuell über die Brustwarzen erfolgen würde, wirkt sich eine fehlende Ossifikation dort nicht auf die Bestimmung des Druckpunktes aus. Dies könnte zu einer Differenz des empfohlenen Druckpunktes, welcher in der Notfallsituation bestimmt wird, zu dem hier bestimmten empfohlenen Druckpunkt führen. Diese Differenz betrifft Patienten, bei denen das Xiphoid noch nicht verknöchert ist, was dazu führt, dass der hier bestimmte empfohlene Druckpunkt weiter cranial als der in der Realität ertastete Druckpunkt liegen würde. Diese Vermutung wird durch die in CT-Abbildung 5 zu sehende Cerclage des Sternums verdeutlicht, da zu vermuten ist, dass die Chirurgen nicht verknöcherte Anteile intraoperativ fixiert haben, obwohl diese in der CT-Bildgebung nicht sicher zu identifizieren sind.

Die durchschnittliche Breite des Sternums an beiden Druckpunkten hat eine Differenz von 3 mm, was einer Abweichung von 7 % entspricht. Die Relevanz dieser Differenz scheint jedoch fraglich. Die Breite des Sternums ist als kraftaufnehmende Struktur der Herzdruckmassage von Bedeutung, ohne eine genauere Betrachtung der biomechanischen Eigenschaften erscheint eine so geringe Differenz jedoch nicht als praktisch relevant.

In einer Untersuchung der Ossifikationszentren des Sternums mittels CT-Bildgebung kamen Cui, Li et al. zu dem Ergebnis, dass der Processus xiphoideus das am meisten variable Ossifikationszentrum des Sternums darstellt. Bei 43 % ihrer 600 Patienten im Alter von einem Monat bis 19 Jahren ließ sich der Processus xiphoideus nicht darstellen. Da nur bei wenigen Erwachsenen kein Xiphoid darstellbar ist, kommen die Autoren zu dem Schluss, dass das fehlende Xiphoid bei Kindern als noch nicht verknöchert anzunehmen ist. In ihrer Studie war bei über der Hälfte aller Altersgruppen unter 15 Jahren kein Xiphoid darstellbar. Erst ab der Altersgruppe der 15-Jährigen ist bei einer Mehrheit ein Xiphoid darstellbar (21). Die Ergebnisse von Cui, Li et al. decken sich mit den Beobachtungen dieser Studie, auch wenn hier ein nicht darstellbares Xiphoid nicht ausgewertet wurde. Es ist aber anzunehmen, dass es durch die hier verwendete Methode der Bestimmung des empfohlenen Druckpunktes zu einer Vergrößerung der Streuung der Ergebnisse durch die zwei Subpopulationen vorhandenes und

nicht darstellbares Xiphoid gekommen ist. Diese Vermutung wird durch die oben gezeigte Abbildung 4 der Häufigkeiten mit zwei Maxima untermauert.

Analog zur Ossifikation des Xiphoids und der daraus resultierenden Schwankung der gemessenen Länge des Sternums ergibt sich das gleiche Problem auch beim Corpus sterni. Cui, Li et al. konnten in ihrer Studie ermitteln, dass die Anzahl der Ossifikationszentren im Corpus sterni starken Schwankungen unterworfen ist und während des Alterns einem Wandel unterliegt. In der Altersgruppe der unter 5-Jährigen wurden bei 62 % der Patienten drei und bei 34 % vier Ossifikationszentren im Corpus sterni gefunden. In der Altersgruppe der 15- bis unter 20-Jährigen hat eine Mehrheit von 65 % vier und 34 % lediglich drei Ossifikationszentren im Corpus sterni (21).

Auch Weaver et al. kommen zu ähnlichen Ergebnissen bei der Länge des Sternums (22). Da ihre Arbeitsgruppe das Xiphoid bei der Messung vernachlässigt hat, liegen die Werte der gesamten Länge des Sternums konstant unter den hier und bei Cui et al. erhobenen Werten. Zusätzlich haben sich Weaver et al. mit der Breite und Morphologie des Sternums beschäftigt. Um das bereits beschriebene Problem der Ossifikationszentren zu lösen, haben Weaver et al. Umriss-Modelle erstellt, diese auf bestimmte Landmarken des Sternums projiziert und so verschiedene Parameter ausgewertet. Die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Werte passen sehr gut zu den von Weaver et al. erhobenen Werten der maximalen Breite des Corpus sterni. Interessant bei ihrer Betrachtung der Umrisse des Sternums ist die Feststellung, dass der breiteste Teil des Corpus sterni am caudalen Ende dieses zu finden ist. In der Beurteilung der Breite des Sternums kann bei unterschiedlichen Werten also nicht auf eine Höhe rückgeschlossen werden, solange keine Information dazu vorliegt, ob die Druckpunkte unterhalb oder oberhalb der maximalen Breite des Corpus sterni gelegen sind.

4.3 Diameter des Herzens

Maximaler Diameter der kurzen Herzachse

In der Studie konnte gezeigt werden, dass die kurze Herzachse am idealen Druckpunkt länger als am empfohlenen Druckpunkt ist. Wie bei der Breite des Sternums kann keine abschließende Aussage darüber getroffen werden, ob diese Differenz einen Einfluss auf die Qualität der Reanimation hat. Da die Größe des linken Ventrikels nicht bestimmt wurde, kann keine Vermutung über eine Änderung der potenziellen Ejektionsfraktion getroffen werden, da

der erhobene Wert den Durchmesser des gesamten Herzens inklusive des rechten Ventrikels darstellt.

Aufgrund der Darstellung konnte kein Vergleichskollektiv gefunden werden. Es gibt mehrere Arbeiten, welche sich mit der kurzen Herzachse beschäftigen. Da diese in der Regel jedoch mittels Echokardiographie durchgeführt wurden, wurden die Ventrikel direkt vermessen und kein Gesamtdurchmesser angegeben. Da die Ventrikel aufgrund der CT-Darstellung in dieser Studie nicht vermessen wurden, können somit keine Vergleiche gezogen werden. Ebenso ist im Gegensatz zur dynamischen Echokardiographie in der statischen CT-Bildgebung keine Aussage zur Phase des Herzzyklus bezogen auf Diastole und Systole möglich.

Maximaler Diameter der langen Herzachse

Bei der Beurteilung der Länge der Herzachse ist die in den Methoden angegebene Mitbestimmung des Ausflusstraktes zu berücksichtigen, da dieser aufgrund der älteren Niedrigdosis-CT-Aufnahmen ohne Kontrastmittel nicht immer sicher abzugrenzen war. Aufgrund dieser Einschränkung konnte kein Vergleichskollektiv gefunden werden. Wie bei der kurzen Herzachse kann auch hier aufgrund der statischen Bildgebung keine Aussage über eine Größenänderung zwischen der Systole und Diastole getroffen werden.

4.4 Diameter des Thorax

International gibt es nur wenige Studien, welche sich mit der Proportion des Thoraxes bei Kindern und den altersabhängigen Veränderungen beschäftigen. Kim, Lee et al. haben sich in einer Studie aus dem Jahr 2020 mit dem anterior-posterioren Durchmesser des Thorax auf Höhe des empfohlenen Druckpunktes bei koreanischen Kindern im Alter von 13 bis 119 Monaten beschäftigt. Die von ihnen erhobenen Mittelwerte liegen alle in der ersten Standardabweichung der in dieser Studie erhobenen Daten. Kim, Lee et al. weisen in ihrer Studie daraufhin, dass sie keine Daten zum Vergleich finden konnten (23).

Nathan, Prithishkumar et al. haben Daten zum Thoraxdiameter indischer Patienten veröffentlicht. Einer ihrer Messpunkte war dabei die Ebene direkt cranial des Zwerchfells. In den von ihnen veröffentlichten Daten fällt auf, dass die in Gruppen zusammengefassten Werte der Altersgruppen von 0 bis 18 Jahren einen ähnlichen Anstieg zeigen, jedoch konstant unter den in dieser Studie erhobenen Daten liegen (24). Diese Abweichung der Daten könnte durch die Betrachtung unterschiedlicher Ethnien zustande kommen. Für diese Vermutung spricht

die Tatsache, dass die durchschnittliche Körpergröße 19-Jähriger in Südkorea und Deutschland signifikant über der Körpergröße 19-jähriger Inder liegt (25). In Indien hat es zwischen den Jahren 1985 und 2019 jedoch eine deutlichere Größenzunahme gegeben als in Deutschland und Südkorea (25).

Abstand Sternumhinterkante-Wirbelkörperpervorderkante

Da sich die altersabhängigen Werte des empfohlenen und idealen Druckpunktes lediglich um einen Millimeter unterscheiden, scheint der Druckpunkt bezogen auf diesen Parameter keinen Einfluss auf die Herzdruckmassage zu haben. An beiden Druckpunkten steht der annähernd gleiche durch knöcherne Strukturen begrenzte Raum zur Kompression des Herzens zur Verfügung. In den sehr jungen Altersgruppen sind wie bei den Thoraxdiametern die Werte als Mittelwerte der In- und Expiration zu betrachten.

Ong, Ang et al. haben 2021 eine mögliche Überkompression bei Herzdruckmassage bei Kindern untersucht. Dazu haben sie computertomografische Bildgebungen ausgewertet und unter anderem die anterior-posterioren Diameter des gesamten Thorax sowie den Abstand der Sternumhinterkante zur Wirbelkörperpervorderkante auf Höhe der unteren Hälfte des Sternums erhoben. Die in ihrer Veröffentlichung angegebenen Werte des Abstandes der Sternumhinterkante zur Wirbelkörperpervorderkante stimmen mit den hier erhobenen Werten überein (26).

Drucktiefe

Die anatomische Betrachtung der absoluten Drucktiefe im Altersverlauf wirft die Frage auf, ob bei Kleinkindern eine Kompression des Thorax von einem Drittel nötig ist oder ob eine geringere Kompression ausreichend wäre. Es erscheint nicht schlüssig, dass bei allen Kindern eine Kompression des Thorax um ein Drittel empfohlen ist, wenn die ebenfalls vom ERC empfohlenen maximalen 6 cm Drucktiefe bereits in der Altersgruppe der 11-Jährigen bei einer Kompression um ein Drittel erreicht werden. Ebenso stellt sich die Frage, ob durch das unterschiedliche Wachstumsverhältnis des Herzens und Thorax eine einheitliche prozentuale Drucktiefe gemessen am Thorax über alle Altersgruppen zielführend ist.

Kim, Lee et al. haben 2018 die empfohlene Drucktiefe bei koreanischen Kindern untersucht. Sie kamen zu den gleichen Ergebnissen wie diese Studie, woraufhin die in die ERC-Leitlinien aufgenommene Empfehlung der maximalen Drucktiefe von 6 cm nun auch bei Kindern gültig

ist (27). Anhand der in dieser Studie ausgewerteten Daten lässt sich vermuten, dass diese an koreanischen Kindern erhobenen Werte grundsätzlich auf deutsche Kinder übertragbar ist.

Coulangeat, Jarrar et al. haben 2013 versucht, das Wachstum der Thoraxorgane mittels quadratischer Regressionen zu objektivieren. Dazu haben sie bei 31 Patienten im Alter zwischen vier Monaten und 23 Jahren verschiedene Parameter in CT-Bildgebungen ausgewertet. Sie kommen zu dem Schluss, dass ihre Daten aufgrund der großen Streuung durch die niedrige Fallzahl in den meisten Fällen nicht aussagekräftig sind. Jedoch kommt es auch in ihren Daten zu einer Abnahme des Herz-Thorax-Quotienten (28).

Die in der vorliegenden Studie erhobenen Daten stimmen mit anderen Beobachtungen überein. So wurde in den Empfehlungen der AHA zur Drucktiefe eine Kompression von zwei Drittel des Thorax als zu tief gewertet und 2010 zu einem Drittel des Thorax geändert (29).

4.5 Position des Druckpunktes

Anteil der langen Herzachse in der rechten Thoraxhälfte

Zu der von mir untersuchten Position des Herzens im Thorax konnte mangels ähnlicher Studien kein Vergleichskollektiv gefunden werden. Park, Oh et al. haben 2018 untersucht, wie weit die Mitte des linken Ventrikels vom Sternum entfernt liegt. In ihren Ergebnissen wächst der Abstand von 30 mm in der Altersgruppe der Ein- bis Vierjährigen auf 39 mm in der Altersgruppe der 10-14-Jährigen (30). Da in ihrer Studie kein prozentualer Abstand oder ein Wachstum des Thorax erhoben wurde, sind die Ergebnisse jedoch nur schwer zu vergleichen.

Höhe des Druckpunktes in Relation zur Brustwirbelsäule

Wie oben genannt haben Coulangeat, Jarrar et al. versucht das Wachstum der Thoraxorgane zu objektivieren. In der Veränderung der Höhe des Herzens in Relation zur Wirbelsäule erzielen sie trotz geringer Fallzahlen jedoch ähnliche Ergebnisse wie diese Studie. Der bei ihnen höchste gemessene Punkt des Herzens verlagert sich zwischen dem Alter von drei bis 16 Jahren um 0,26 Wirbelkörper, der tiefste Punkt des Herzens um 1,17 Wirbelkörper nach caudal (28).

Höhe des Druckpunktes in Relation zum Rippenansatz

Zur Höhe des Druckpunktes in Relation zum Rippenansatz konnte kein Vergleichskollektiv gefunden werden.

Wie bei den Ergebnissen geschildert, lässt sich die an den Wirbelkörpern erkennbare Verlagerung der Druckpunkte während des Alterns am Rippenansatz nicht feststellen. Mit Hilfe der Auswertung aus Abbildung 28 konnte gezeigt werden, dass diese Differenz nicht durch ein Unterschiedliches Wachstum des Sternums und der Brustwirbelsäule zustande kommt. Eine mögliche Erklärung der Differenz könnte die Lagerung der Patienten während der Untersuchung sein. Wenn die Wirbelsäule durch eine Unterlage unter Nacken oder Kopf eine konvexe Form einnimmt, verkippt die Transversalebene. Die Transversalebenen wurden in dieser Studie anhand der Wirbelkörper ausgerichtet, bei diesen ist dadurch eine sichere Aussage über die Höhe möglich. Die Betrachtung des vorderen Anteils des Thorax könnte durch eine lagerungsbedingt konvexe Form der Wirbelsäule jedoch verfälscht werden.

4.6 Limitationen

Patientenbias

Durch die hier durchgeführte Art der Patientenrekrutierung stellt sich die Frage der Allgemeingültigkeit der getroffenen Feststellungen. Für die Bearbeitung der für die Arbeit definierten Fragestellung könnten unterschiedliche Studienpopulation betrachtet werden. Zwei mögliche Gruppen könnten die Gesamtheit aller in Deutschland bzw. Europa lebenden Jugendlichen als universal gültiges Patientenkollektiv sowie spezifische Patientenkollektive, welche überdurchschnittlich häufig reanimiert werden, darstellen. Die Art der Rekrutierung der Patienten hat einen erheblichen Einfluss auf die betrachtete Population. So zeigte sich in dieser Studie eine überdurchschnittlich hohe Sternotomie-Rate der Patienten, welche vermutlich durch eine strenge Indikationsstellung für CT-Untersuchungen und der damit verbundenen schwere von Erkrankungen als Indikation der Untersuchung bei Kindern zustande kommt. Die fehlende Erfassung der Eigenschaft „Sternum-Cerclage“ in dieser Studie führt dazu, dass keine verlässliche Auswertung zu dieser subjektiven Beobachtung getroffen werden kann.

Goldstick, Cunningham et al. haben 2022 die führenden Todesursachen für Kinder im Alter von 1-19 Jahren in USA zwischen den Jahren 1990 und 2020 betrachtet. Führend mit einer Inzidenz von ca. 5 Todesfällen pro 100.000 Kindern/Jugendlichen pro Jahr sind Schusswaffenverletzungen und Autounfälle. Mit einigem Abstand folgen maligne Neoplasien, Ersticken, Intoxikation, kongenitale Anomalien, Ertrinken, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Verbrennungen und chronische Atemwegserkrankungen (31). Eisenberg, Bergner et al. haben

1983 eine Untersuchung über nicht traumatische Ursachen einer Reanimation bei Kindern in den USA durchgeführt. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass die meisten Kinder aufgrund eines plötzlichen Kindstodes, gefolgt von Ertrinken, Hypoxie, kongenitaler Herzfehler, neurologischen Ursachen, Neoplasien, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Intoxikationen, Anaphylaxie und endokrinen Ursachen reanimationspflichtig geworden sind (32). Auch wenn diese Zahlen vermutlich nicht vollständig auf Deutschland übertragbar sind, stellt sich die Frage, warum pädiatrische Patienten in Deutschland reanimationspflichtig werden und ob die hier untersuchten Patienten dieser Kohorte entsprechen. In mehreren erhobenen Parametern scheinen die Patienten jedoch nicht von dem durchschnittlichen Kind abzuweichen, es konnten jedoch nicht für alle Werte Vergleichskohorten gefunden werden.

Idealer Druckpunkt

Eine weitere Unsicherheit ist durch die hier getroffene Definition des idealen Druckpunktes begründet. Wie in der Einleitung beschrieben, gibt es unterschiedliche Ideen zur Wirkweise der Herzdruckmassage. In der hier fokussierten Betrachtung des Herz-Pumpen-Mechanismus spielt eine möglichst effektive Kompression des linken Ventrikels die entscheidende Rolle. Aufgrund der hier gewählten Betrachtung mittels CT-Bildgebung konnte, wie bereits besprochen, lediglich eine Betrachtung des Diameters, der gesamten kurzen Herzachse durchgeführt werden. Unklar ist, ob dieser Diameter mit dem maximalen Diameter des linken Ventrikels übereinstimmt und ob die Kompression auf Höhe des maximalen Diameters des linken Ventrikels zum besten Langzeitergebnis führt. Diese Herangehensweise fokussiert sich lediglich auf die Aufrechterhaltung des großen Kreislaufs. Ähnlich wie bei Herzinsuffizienz-Patienten spielt die Auswurfleistung des linken und rechten Herzens über den Frank-Starling-Mechanismus aber eine entscheidende Rolle für die Funktion des gesamten Kreislaufsystems (33). Ob der kleine Kreislauf über den Thorax-Pumpen-Mechanismus oder eine Kompression des rechten Ventrikels aufrechterhalten wird, kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht gesagt werden. Die Betrachtung des maximalen Diameters, der kurzen Herzachse und somit der Summe aus rechtem und linkem Ventrikel scheint unter dieser Annahme jedoch schlüssig.

Ein weiterer Aspekt des idealen Druckpunktes ist die Handhabbarkeit in der realen Reanimationssituation. In der Studie wurde von einem nahezu punktförmigen Druckpunkt ausgegangen. Die Leitlinien empfehlen bei Kindern über einem Jahr je nach Alter eine Kompression mit einem oder beiden Handballen. In der weiter oben gerechneten

Modellbetrachtung weichen die Druckpunkte gemessen an der Wirbelsäule ca. 1,5 cm voneinander ab. Choi, Lee et al. haben den Einfluss der Handbreite auf die optimale Position der Herzdruckmassage bei Erwachsenen untersucht. In ihrer Untersuchung wurde die durchschnittliche Handbreite von 300 männlichen Krankenhausmitarbeitern je nach Handposition auf 7,44 cm bis 8,29 cm und bei 300 Krankenhausmitarbeiterinnen mit 6,45 cm bis 7,29 cm ermittelt (34). Da die Handbreite der Probanden mit den geringsten Handbreiten trotzdem über vier Mal so groß wie der geschätzte Höhenunterschied ist, stellt sich die Frage, ob der Höhenunterschied in der Praxis überhaupt berücksichtigt werden kann. Aus Sicht der Effizienz der Herzdruckmassage, gemessen an der Breite der Ventrikel, kann die Empfehlung gegeben werden, den Druckpunkt tendenziell weiter caudal als cranial zu positionieren.

Des Weiteren muss der ideale Druckpunkt abseits der hämodynamischen Effektivität der Herzdruckmassage betrachtet werden. So kann es durch eine Verlagerung des empfohlenen Druckpunktes nach caudal bei Erwachsenen, besonders durch Frakturen der Rippen und des Sternums zu Verletzungen der Oberbauchorgane, insbesondere der Leber, des Magens und der Milz kommen. Diese seltenen Verletzungen können zu einer erfolglosen Reanimation führen (35). Ob die Verlagerung des Druckpunktes bei Kindern einen Einfluss auf iatrogene Verletzungen hat, kann nicht ausgeschlossen werden.

Übertragbarkeit

Wie bereits erläutert, ist eine Limitation dieser Arbeit die unklare Übertragbarkeit der Betrachtung der Patientenanatomie mittels CT-Bildgebung auf die Physiologie und das Kurz- sowie langfristige Ergebnis. In der Einleitung wurde beschrieben, dass Orlowski zeigen konnte, dass anatomische Betrachtungen Surrogatmarker für den MAD sein können (3). Eine Studie, welche einen klaren Zusammenhang zwischen dem MAD und dem Langzeitüberleben bei Kindern zeigt, gibt es nicht. Ein Problem der Betrachtung mittels CT-Bildgebung ist zudem, dass es sich bei den Bildern um statische Bilder handelt. Dies muss vor allem bei Parametern wie dem maximalen Diameter der kurzen Herzachse bedacht werden, da sich dieser zwischen der Diastole und Systole unterscheidet. Brown, Johnson et al. konnten zeigen, dass sich der Herz-Thorax-Quotient bei Hunden zwischen der Diastole und der Systole um 2,2 % (SD 1,2 %) unterscheidet (36). Weitere Störfaktoren sind die Atmung und der Herzschlag des Patienten. Moderne Spiral-CT-Geräte haben eine Umlaufzeit von ca. 330 ms (37). Bei Kindern mit einer durchschnittlichen Herzfrequenz in Ruhe von 100 Schlägen pro Minute dauert ein Herzzyklus

ca. 600 ms (38). Dies hat zur Folge, dass beim Durchscrollen durch ein CT-Bild eine artifizielle Engstelle bedingt durch die Aufnahme in Diastole-Systole-Diastole entstehen kann, was die Bestimmung des maximalen Diameters zusätzlich erschwert.

Über die Auswirkung der Herzdruckmassage auf die Organe des Thorax kann keine Aussage getroffen werden. Die potenziell komprimierbare luftgefüllte Lunge wird sich bei Druck anders verhalten als das mit Blut gefüllte und dadurch nahezu unkomprimierbare Herz, bei welchem eine Kompression nur durch den Ausstrom von Blut ermöglicht wird. Ebenfalls lässt sich über die unter mechanischen Druck potenzielle Verschiebung dieser Organe mittels der CT-Bildgebung keine Aussage treffen.

4.7 Perspektive

Aus der Summe der Ergebnisse lässt sich ein Unterschied zwischen der Höhe des empfohlenen und idealen Druckpunktes vermuten. Da der Unterschied gering ausfällt und aufgrund der begrenzten Studienpopulation sind nicht alle erhobenen Werte statistisch signifikant. Für die Aussagekraft müsste ebenso eine epidemiologische Auswertung der Kinderreanimationen und der Todesursachen erfolgen sowie eine genauere medizinische und epidemiologische Evaluation der Patienten erfolgen, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse stützen zu können.

Das größte Problem stellt jedoch nach wie vor die unklare Übertragbarkeit der Surrogatmarker dar. Für dieses Ziel müsste in einem ersten Schritt die von Orlowski gezeigte Kausalität der anatomischen Betrachtung und des MAD bestätigt und genauer klassifiziert werden. In einem nächsten Schritt sollten weitere Surrogatmarker identifiziert und deren Auswirkung auf das Langzeitüberleben als Endpunkt überprüft werden.

5 Zusammenfassung

Das European Resuscitation Council empfiehlt in seinen aktuellen Leitlinien für die Reanimation von Kindern die untere Hälfte des Sternums als Druckpunkt für die Herzdruckmassage. Diese Arbeit untersucht die anatomischen Lagebeziehungen der für die Reanimation relevanten Strukturen am empfohlenen Druckpunkt und ob es sich um den aus der anatomischen Sicht idealen Druckpunkt für die Reanimation handelt.

Für die Arbeit wurden 290 computertomografische Bildgebungen des Thorax von Kindern im Alter zwischen drei und 16 Jahren retrospektiv ausgewertet. Es wurden insgesamt bis zu 16 verschiedene Thoraxdiameter pro Datensatz verglichen, welche in zwei Transversalschnitten erhoben wurden: erstens stellvertretend für den empfohlenen Druckpunkt in der Mitte der unteren Sternumhälfte; zweitens stellvertretend für den aus anatomischer Sicht ideal anzunehmenden Druckpunkt auf Höhe des maximalen Diameters der kurzen Herzachse. Zusätzlich wurde die Länge des Sternums, des Corpus sterni und die Länge der Brustwirbelsäule ermittelt.

In der Arbeit konnte gezeigt werden, dass der anatomisch ideale Druckpunkt etwa einen Wirbelkörper bzw. eine Rippe unterhalb des empfohlenen Druckpunktes liegt, was dazu führt, dass der ideale Druckpunkt in 67 Fällen (23,1 %) caudal des Corpus sterni und somit nicht auf Höhe der knöchernen, druckaufnehmenden Struktur lag. Im Gegensatz dazu lag der empfohlene Druckpunkt in 38 Fällen (13,1 %) oberhalb der Ventrikel und somit oberhalb der Zielstruktur der Herzdruckmassage. Der beschriebene Höhenunterschied resultiert in einer geringeren Breite des Sternums und einem größeren Diameter der kurzen Herzachse auf Höhe des idealen Druckpunktes. Der Abstand zwischen der Sternumhinterkante und der Wirbelkörpervorderkante weist auf Höhe des empfohlenen und idealen Druckpunktes keinen relevanten Unterschied auf. In der Zusammenschau aller Ergebnisse scheint der Höhenunterschied zwischen dem vom ERC empfohlenen und dem hier definierten idealen Druckpunkt jedoch nicht von praktischer Relevanz zu sein.

Weiter konnte gezeigt werden, dass sich der Druckpunkt gemessen an der Brustwirbelsäule während des Wachstums der untersuchten Kinder um einen Wirbelkörper nach caudal verlagert. Dieser Trend konnte gemessen am Rippenansatz nicht festgestellt werden, was

vermutlich durch die hier definierte Methode der Orientierung der Transversalebene an der Wirbelsäule zustande kommt.

Ebenso konnte in der Studie gezeigt werden, dass die in den ERC-Leitlinien empfohlene Drucktiefe von einem Drittel des Thorax nur bei Klein- und Schulkindern anwendbar ist. Diese für die praktische Reanimation relevante Erkenntnis beruht darauf, dass bei der Kompression um ein Drittel des Thorax durch das Wachstum die für Kinder und Erwachsene empfohlene maximale Kompressionstiefe von 6 cm im Druckschnitt bereits mit 11 Jahren erreicht ist.

Auch bei Kindern unter 11 Jahren scheint die Empfehlung über alle Altersgruppen fraglich, da in der Arbeit gezeigt werden konnte, dass das Herz und der Thorax nicht im gleichen Verhältnis wachsen und so bei einer nur am Thorax orientierten Drucktiefe vermutlich eine effektiv unterschiedliche Kompression des Herzens über die Altersgruppen erfolgt.

Ob diese anatomischen Betrachtungen jedoch hämodynamisch relevant sind und zu einem Unterschied im Endpunkt des Langzeitüberlebens führen, kann nicht abschließend beurteilt werden und muss in weiteren Studien näher beleuchtet werden.

6 Literaturverzeichnis

1. Soar J, Böttiger BW, Carli P, Couper K, Deakin CD, Djärv T, u. a. European Resuscitation Council Guidelines 2021: Adult advanced life support. *Resuscitation*. 1. April 2021;161:115–51.
2. Olasveengen TM, Mancini ME, Perkins GD, Avis S, Brooks S, Castrén M, u. a. Adult Basic Life Support: 2020 International Consensus on Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care Science With Treatment Recommendations. *Circulation*. 20. Oktober 2020;142(16_suppl_1):S41–91.
3. Orlowski JP. Optimum position for external cardiac compression in infants and young children. *Ann Emerg Med*. 1. Juni 1986;15(6):667–73.
4. Cha KC, Kim HJ, Shin HJ, Kim H, Lee KH, Hwang SO. Hemodynamic Effect of External Chest Compressions at the Lower End of the Sternum in Cardiac Arrest Patients. *J Emerg Med*. 1. März 2013;44(3):691–7.
5. Qvigstad E, Kramer-Johansen J, Tømte Ø, Skålhegg T, Sørensen Ø, Sunde K, u. a. Clinical pilot study of different hand positions during manual chest compressions monitored with capnography. *Resuscitation*. 1. September 2013;84(9):1203–7.
6. Neuhauser H, Schienkiewitz A, Rosario AS, Dortschy R, Kurth BM. Referenzperzentile für anthropometrische Maßzahlen und Blutdruck aus der Studie zur Gesundheit von Kindern und Jugendlichen in Deutschland (KiGGS) [Internet]. Robert Koch-Institut; 2013 Aug [zitiert 13. Januar 2023]. Verfügbar unter: <https://edoc.rki.de/handle/176904/3254>
7. Fischer M. Jahresbericht des Deutschen Reanimationsregisters: Außerklinische Reanimation 2021. Fisch M Wnent J Gräsner J-T Seewald St Brenner Bein B Al Jahresber Dtsch Reanimationsregisters Außerklinische Reanim 2021. 14. Juni 2022;(6–2022):V116–22.
8. Seewald S, Brenner S, Fischer M, Ristau P, Bein B. Jahresbericht des Deutschen Reanimationsregisters Innerklinische Reanimation 2020. *Anästh Intensiv*. 2020;
9. Über 1.200 Notarztstandorte in Deutschland [Internet]. Bundesvereinigung der Arbeitsgemeinschaften der Notärzte Deutschlands e.V (BAND); [zitiert 8. Januar 2023]. Verfügbar unter: <https://band-online.de/wp-content/uploads/2022/06/BAND-Uebersicht-Notarztstandorte-1.pdf>
10. Van de Voorde P, Turner NM, Djakow J, de Lucas N, Martinez-Mejias A, Biarent D, u. a. European Resuscitation Council Guidelines 2021: Paediatric Life Support. *Resuscitation*. 1. April 2021;161:327–87.
11. Kouwenhoven WB, Jude JR, Knickerbocker GG. CLOSED-CHEST CARDIAC MASSAGE. *JAMA*. 9. Juli 1960;173(10):1064–7.

12. Del Guercio LRM, Feins NR, Cohn JD, Coomaraswamy RP, Wollman SB, State D. Comparison of Blood Flow During External and Internal Cardiac Massage in Man. *Circulation*. April 1965;31(4s1):I-171.
13. Rich S, Wix HL, Shapiro EP. Clinical assessment of heart chamber size and valve motion during cardiopulmonary resuscitation by two-dimensional echocardiography. *Am Heart J*. 1. September 1981;102(3, Part 1):368-73.
14. Andreka P, Frenneaux MP. Haemodynamics of cardiac arrest and resuscitation. *Curr Opin Crit Care*. Juni 2006;12(3):198.
15. Hernandez G, Messina A, Kattan E. Invasive arterial pressure monitoring: much more than mean arterial pressure! *Intensive Care Med*. 1. Oktober 2022;48(10):1495-7.
16. Joachim J, Coutrot M, Millasseau S, Matéo J, Mebazaa A, Gayat E, u. a. Real-time estimation of mean arterial blood pressure based on photoplethysmography dicrotic notch and perfusion index. A pilot study. *J Clin Monit Comput*. 1. April 2021;35(2):395-404.
17. McKinley BA, Sucher JF, Todd SR, Gonzalez EA, Kozar RA, Sailors RM, u. a. CENTRAL VENOUS PRESSURE VERSUS PULMONARY ARTERY CATHETER-DIRECTED SHOCK RESUSCITATION. *Shock*. November 2009;32(5):463.
18. Brady Z, Cain TM, Johnston PN. Paediatric CT imaging trends in Australia. *J Med Imaging Radiat Oncol*. 2011;55(2):132-42.
19. Kennedy J, Hoffman T, Unasa H, Frampton C, Howard A, Kiely PJ, u. a. Thoracic proportions in children without scoliosis. *J Child Orthop*. 1. Juni 2019;13(3):304-9.
20. Dede O, Büyükdogan K, Demirkiran HG, Akpinar E, Yazici M. Thoracic Spine Growth Revisited: How Accurate Is the Dimeglio Data? *Spine*. 15. Juni 2017;42(12):917.
21. Cui X, Li R guang, Ma D ting. A safe area for sternal puncture in children: an MSCT study based on sternal development. *Surg Radiol Anat*. 2022;44(1):105-15.
22. Weaver AA, Schoell SL, Nguyen CM, Lynch SK, Stitzel JD. Morphometric analysis of variation in the sternum with sex and age. *J Morphol*. 2014;275(11):1284-99.
23. Kim YH, Lee JH, Lee DW, Song YG, Lee KY, Lee YH, u. a. Applicability of Anatomical Landmarks for Chest Compression Depth in Cardiopulmonary Resuscitation for Children. *Sci Rep*. 5. Februar 2020;10:1921.
24. Nathan V, Prithishkumar IJ, Livingstone RS. Estimation of Anatomical Dimensions of the Thorax from Computed Tomography Images of the Adult and Pediatric Indian Population for Developing Optimal Radiological Protocols. *J Med Phys*. 2021;46(4):295-9.
25. Height and body-mass index trajectories of school-aged children and adolescents from 1985 to 2019 in 200 countries and territories: a pooled analysis of 2181 population-based studies with 65 million participants. *Lancet Lond Engl*. 7. November 2020;396(10261):1511-24.

26. Ong GYK, Ang AJF, S O Aurangzeb A, Fong ESS, Tan JY, Chen ZJ, u. a. What is the potential for over-compression using current paediatric chest compression guidelines? - A chest computed tomography study. *Resusc Plus*. Juni 2021;6:100112.
27. Kim YH, Lee JH, Cho KW, Lee DW, Kang MJ, Lee KY, u. a. Verification of the Optimal Chest Compression Depth for Children in the 2015 American Heart Association Guidelines: Computed Tomography Study. *Pediatr Crit Care Med*. Januar 2018;19(1):e1.
28. Coulangeat F, Jarrar MS, Thollon L, Serre T. Growth characterisation of intra-thoracic organs of children on CT scans. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*. Februar 2013;16(2):217–21.
29. Jin SY, Oh SB, Kim YO. Estimation of optimal pediatric chest compression depth by using computed tomography. *Clin Exp Emerg Med*. März 2016;3(1):27–33.
30. Park M, Oh WS, Chon SB, Cho S. Optimum Chest Compression Point for Cardiopulmonary Resuscitation in Children Revisited Using a 3D Coordinate System Imposed on CT: A Retrospective, Cross-Sectional Study. *Pediatr Crit Care Med J Soc Crit Care Med World Fed Pediatr Intensive Crit Care Soc*. November 2018;19(11):e576–84.
31. Goldstick JE, Cunningham RM, Carter PM. Current Causes of Death in Children and Adolescents in the United States. *N Engl J Med*. 19. Mai 2022;386(20):1955–6.
32. Eisenberg M, Bergner L, Hallstrom A. Epidemiology of cardiac arrest and resuscitation in children. *Ann Emerg Med*. 1. November 1983;12(11):672–4.
33. Kemp CD, Conte JV. The pathophysiology of heart failure. *Cardiovasc Pathol*. 1. September 2012;21(5):365–71.
34. Choi H, Lee CC, Kim HJ, Singer AJ. Identifying the optimal hand placement site for chest compression by measuring hand width and sternal length in young adults. *Am J Emerg Med*. März 2016;34(3):407–11.
35. Buschmann C, Tsokos M. [Iatrogenic trauma following resuscitation measures]. *Dtsch Med Wochenschr* 1946. Juni 2008;133(23):1244–8.
36. Brown CS, Johnson LR, Visser LC, Chan JC, Pollard RE. Comparison of fluoroscopic cardiovascular measurements from healthy dogs obtained at end-diastole and end-systole. *J Vet Cardiol*. 1. Juni 2020;29:1–10.
37. Goldman LW. Principles of CT and CT Technology. *J Nucl Med Technol*. 1. September 2007;35(3):115–28.
38. van den Berg ME, Rijnbeek PR, Niemeijer MN, Hofman A, van Herpen G, Bots ML, u. a. Normal Values of Corrected Heart-Rate Variability in 10-Second Electrocardiograms for All Ages. *Front Physiol*. 27. April 2018;9:424.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Altersverteilung

Abbildung 2: Länge der Brustwirbelsäule

Abbildung 3: Länge des Sternums

Abbildung 4: Histogramm Verteilung der Länge des Sternums

Abbildung 5: Länge des Corpus sterni

Abbildung 6: Vergleich Länge Sternum - Corpus sterni

Abbildung 7: Breite des Sternums

Abbildung 8: Differenz der Breiten des Sternums empfohlenen - ideal

Abbildung 9: Kurze Herzachse am empf. Druckpunkt nicht bestimmbar

Abbildung 10: Maximaler Diameter der kurzen Herzachse

Abbildung 11: Differenz der kurzen Herzachsen empfohlenen – ideal

Abbildung 12: Maximaler Diameter der langen Herzachse

Abbildung 13: Thoraxdiameter Anterior-Posterior

Abbildung 14: Thoraxdiameter Dexter-Sinister

Abbildung 15: Abstand Sternumhinterkante – Wirbelkörpervorderkante

Abbildung 16: Drucktiefe bei Kompression des Thorax um $\frac{1}{3}$

Abbildung 17: Quotient der Kompression des Raumes zwischen Sternum und Wirbelsäule

Abbildung 18: Theoretisch ideale Kompression der kurzen Herzachse

Abbildung 19: Quotient aus dem Abstand Sternum - Wirbelkörper und Thorax AP

Abbildung 20: Quotient aus der absoluten Kompression kurze Herzachse und Thorax AP

Abbildung 21: Prozentualer Anteil der langen Herzachse in der rechten Thoraxhälfte

Abbildung 22: Abstand der Mitte der langen Herzachse zum Sternum

Abbildung 23: Median der Höhe der Druckpunkte gemessen am Wirbelkörper

Abbildung 24: Höhe der Druckpunkte gemessen am Wirbelkörper, Boxplot

Abbildung 25: Differenz der Höhe der Druckpunkte gemessen am Wirbelkörper

Abbildung 26: Differenz der Höhe der Druckpunkte gemessen am Wirbelkörper in cm

Abbildung 27: Median der Höhe der Druckpunkte gemessen am Rippenansatz

Abbildung 28: Quotient aus dem Wachstum des Sternums und der Brustwirbelsäule

CT-Abbildung 1: Messskizze

CT-Abbildung 2: Sternum Ossifikationszentren

CT-Abbildung 3: Fehlendes Xiphoid

CT-Abbildung 4: In Ansätzen verknöchertes Xiphoid

CT-Abbildung 5: Sternumcerclage

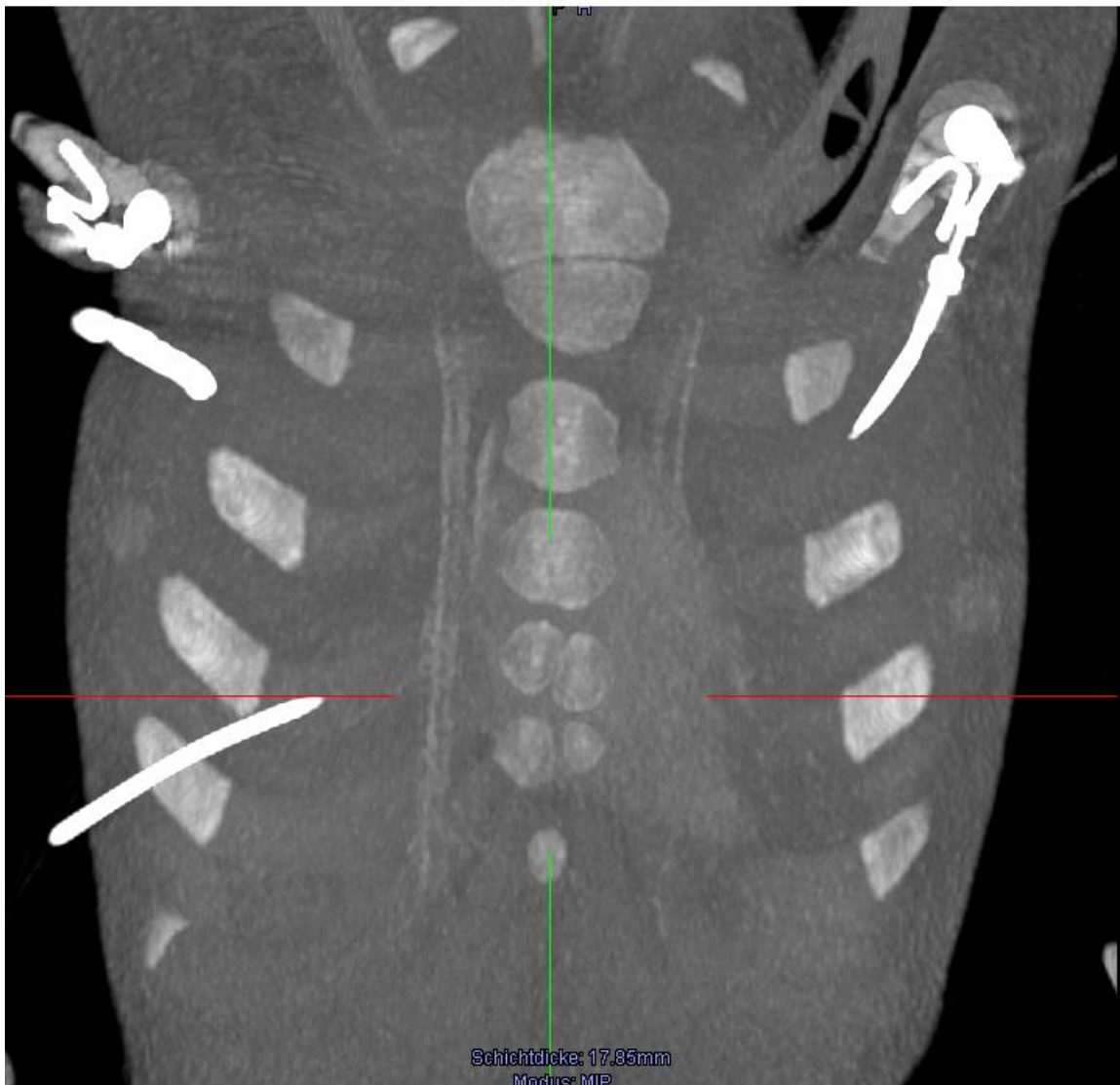
8 Anhänge

CT-Abb. 1: Messskizze



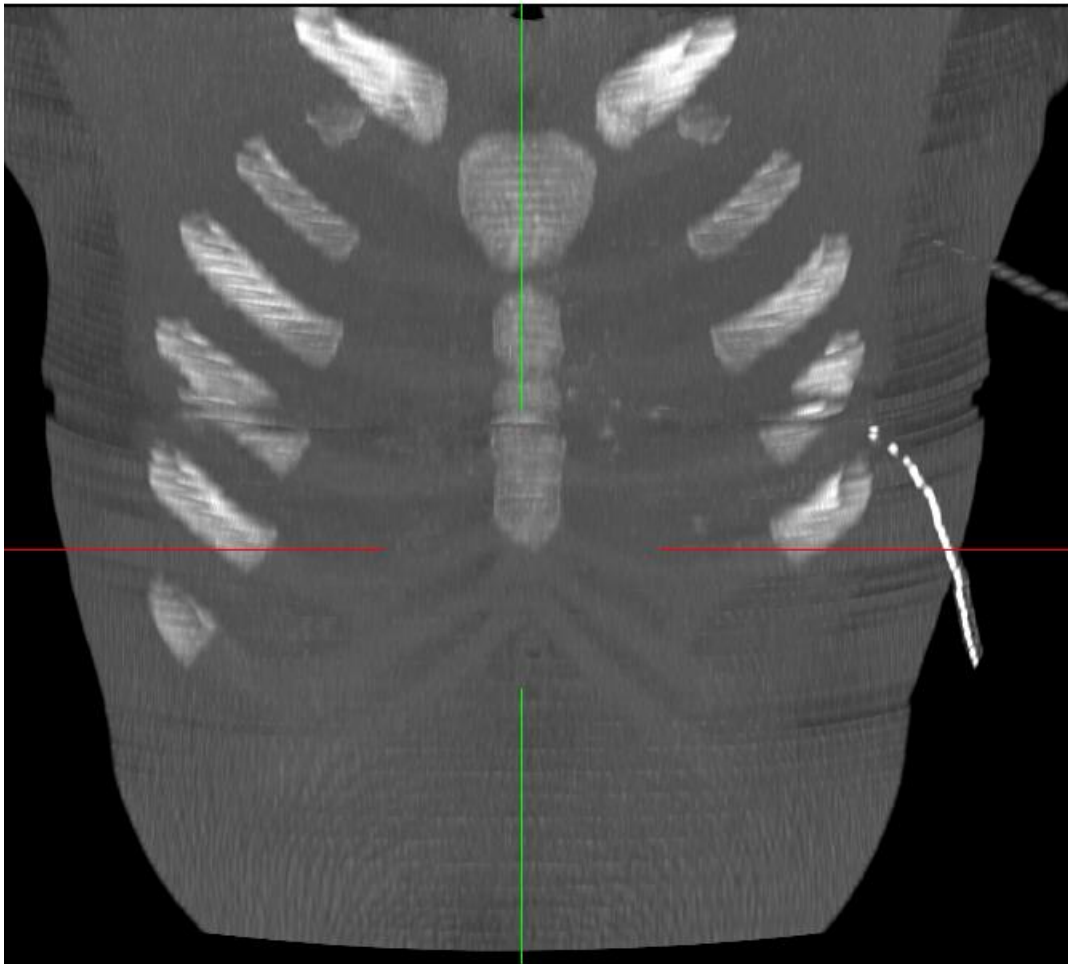
14 Jahre alte weibliche Patientin: In der CT-Thorax-Bildgebung sind schematisch die gemessenen Parameter lange Herzachse (1), Anteil der langen Herzachse im rechten Thorax (2), kurze Herzachse (3) und Abstand der Sternumhinterkante zur Wirbelkörpervorderkante (4) eingezeichnet

CT-Abb. 2: Sternum Ossifikationszentren



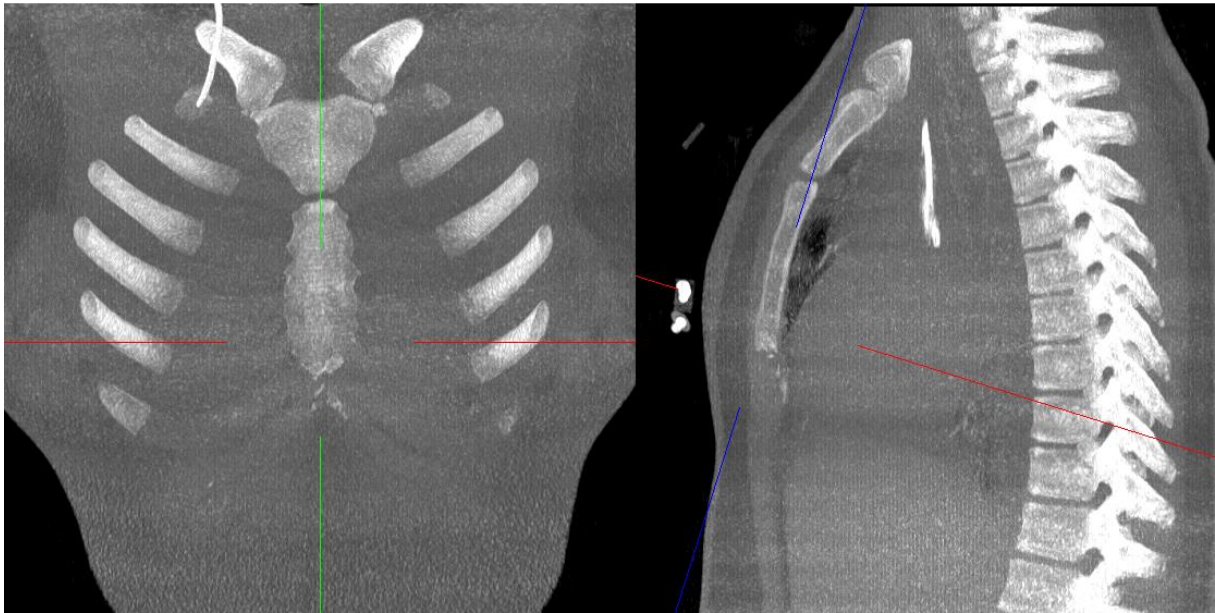
Sechs Jahre alter männlicher Patient: Die CT-Thorax-Bildgebung zeigt neun Ossifikationszentren im Sternum

CT-Abb. 3: Fehlendes Xiphoid



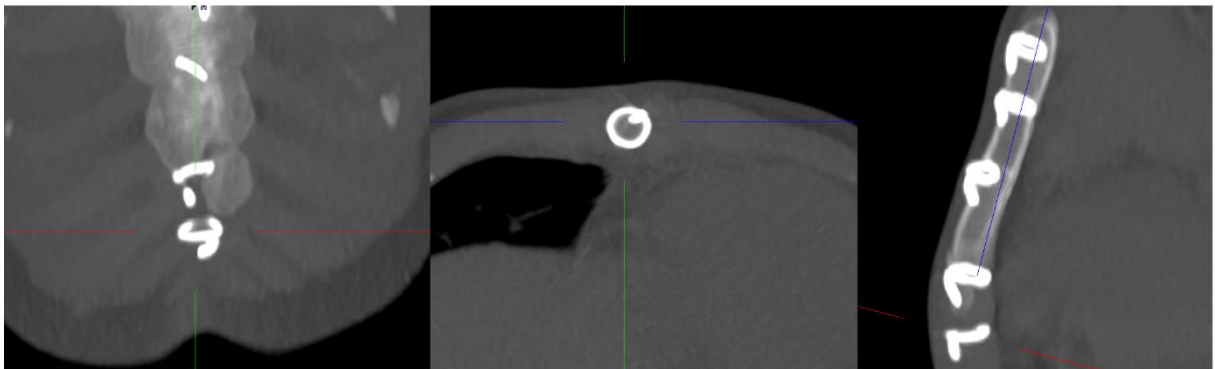
11 Jahre alter männlicher Patient: In der CT-Thorax-Bildgebung ist kein Ossifikationszentrum des Processus xiphoideus zu erkennen

CT-Abb. 4: In Ansätzen verknöchertes Xiphoid



14 Jahre alte weibliche Patientin: In der CT-Thorax-Bildgebung sind einzelne verknöcherte Areale im Bereich des Processus xiphoideus zu erkennen

CT-Abb. 5: Sternumcerclage



Acht Jahre alter männlicher Patient: Die CT-Thorax-Bildgebung zeigt mehrere Cerclagen des Sternums auch in nicht verknöcherten Bereichen des Processus xiphoideus

9 Danksagung und Hilfen

Ich möchte mich herzlich bei den betreuenden Personen meiner Dissertation bedanken. Herrn Prof. Dr. Olav Jansen für die wissenschaftliche Betreuung im Ganzen und dem Ermöglichen der Bearbeitung dieses interessanten Themas durch die Bereitstellung der technischen Infrastruktur sowie den in seiner Klinik erhobenen Datensätzen. Frau Dr. Christine Eimer für ein allzeit offenes Ohr und unsere regelmäßigen Treffen, welche mich sehr vorangebracht haben, Herrn Dr. Stephan Seewald für die stets wertvollen Anregungen und Frau Dr. Monika Huhndorf für die gelungene radiologische Einarbeitung.

Einen ebenso großen Dank möchte ich meiner Familie aussprechen, meiner Frau, die jedes Auf unterstützt und jedes Ab erfolgreich abgefedert hat und meinen Eltern, ohne deren Unterstützung ich nicht wäre, wo ich bin.

10 Veröffentlichungen

Sattler O. Der Einfluss von verkürzten Anfahrtszeiten des Rettungsdienstes bei Reanimation.
Notfallmedizin up2date 2017; 12: 121

Sattler O, Huhndorf M, Seewald S, Jansen O, Lorenzen U, Grünewald M, Gräsner JT, Eimer C.
Vergleich der kindlichen Anatomie des Thorax mit den Empfehlungen zur Herzdruckmassage
mittels computertomographischer Bildgebung [E-Poster]. 2022, 01.12.. 22. Kongress der
Deutschen Interdisziplinären Vereinigung für Intensiv- und Notfallmedizin e.V., Hamburg