

Aus der Klinik für Anästhesiologie und Operative Intensivmedizin
der Medizinischen Fakultät Mannheim
(Direktor: Prof. Dr. med. Manfred Thiel)

Evaluation der Mamille als Landmarke zur Nadeldekompression des
Spannungspneumothorax im Kindesalter

Inauguraldissertation
zur Erlangung des medizinischen Doktorgrades
der
Medizinischen Fakultät Mannheim
der Ruprecht-Karls-Universität
zu
Heidelberg

vorgelegt von
Lea-Antonia Hebllich

aus
Bad Kreuznach
2022

Dekan: Prof. Dr. med. Sergij Goerd
Referent: Prof. Dr. med. Tim Viergutz

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	1
1 EINLEITUNG.....	2
1.1 Definition des Spannungspneumothorax.....	2
1.2 Ätiologie und Pathophysiologie des Spannungspneumothorax.....	4
1.3 Diagnostik und Therapie des Spannungspneumothorax	7
1.4 Spannungspneumothorax beim Kind.....	10
1.5 Fragestellung.....	14
2 MATERIAL UND METHODEN.....	15
2.1 Auswahl der CT-Aufnahmen.....	15
2.1.1 Ein- und Ausschlusskriterien	16
2.2 Messungen	17
2.2.1 Anteriore Punktionsstelle (2. Interkostalraum, Medioklavikularlinie)....	17
2.2.2 Laterale Punktionsstelle (4. und 5. Interkostalraum, mittlere Axillarlinie)	21
2.3 Auswertung der Messungen.....	24
3 ERGEBNISSE	25
3.1 Studienkollektiv.....	25
3.2 Demographische Daten.....	28
3.3 Anteriore Punktionsstelle (2. ICR, MCL).....	29
3.3.1 Abstand und Lagebeziehung zwischen MCL und Mamille	29
3.3.2 Abstand und Lagebeziehung zwischen MHL und Mamille	31
3.3.3 Abstand zwischen vitaler Struktur und MCL	32
3.3.4 Abstand zwischen vitaler Struktur und Mamille	35
3.3.5 Abstand zwischen vitaler Struktur und MHL	36
3.3.6 Vergleich zwischen MCL, MHL und Mamillarlinie als Punktionsort im 2. ICR	38

3.4	Laterale Punktionsstelle (4. und 5. ICR, MAL).....	39
3.4.1	Höhe der Mamille in Bezug zum ICR.....	39
3.4.2	Abstand der Mamille zum Zwerchfell.....	42
3.4.3	Tiefe zur vitalen Struktur im 4. ICR, MAL	44
3.4.4	Tiefe zur vitalen Struktur im 5. ICR, MAL	47
3.4.5	Vergleich zwischen 4. und 5. ICR.....	51
4	DISKUSSION	52
4.1	Anteriore Punktionsstelle (2. ICR, MCL).....	52
4.1.1	Lagebeziehungen der Landmarken und seitlicher Abstand zu vitalen Strukturen	52
4.1.2	Nächstgelegene vitale Strukturen links.....	55
4.1.3	Nächstgelegene vitale Strukturen rechts	57
4.2	Laterale Punktionsstelle (4. und 5. ICR, MAL).....	59
4.2.1	Identifikation der Punktionsstelle mit Hilfe der Mamille	59
4.2.2	Abstand zum Zwerchfell	62
4.2.3	Tiefe zur vitalen Struktur.....	64
4.2.4	Vitale Strukturen im Bereich der lateralen Punktionsstelle	67
4.3	Limitationen	69
5	ZUSAMMENFASSUNG.....	71
6	LITERATURVERZEICHNIS.....	73
7	LEBENS LAUF	79
8	DANKSAGUNG	80

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ICR	Interkostalraum
MCL	Medioklavikularlinie
AAL	anteriore Axillarlinie
MAL	mittlere Axillarlinie
TVS	Tiefe zur vitalen Struktur

Im folgenden Text wird in einigen Fällen nur die männliche Wortform verwendet (z.B. der Patient), die anschließend getroffenen Aussagen beziehen sich jedoch auf alle Geschlechtsidentitäten gleichermaßen.

1 EINLEITUNG

Der Spannungspneumothorax ist ein eher seltenes, aber unmittelbar lebensbedrohliches Notfallbild, das hauptsächlich prähospital, in Notaufnahmen oder auf Intensivstationen vorkommt.¹ Er entsteht dadurch, dass bei jeder Inspiration Luft in den Pleuraspalt gelangt, aufgrund eines Ventilmechanismus jedoch nicht mehr aus demselben entweichen kann. Diese kontinuierliche Akkumulation von Luft bedingt einen Kollaps der ipsilateralen Lunge und eine Verschiebung des Mediastinums zur kontralateralen Seite.^{2,3} Wird der Spannungspneumothorax nicht umgehend erkannt und sofort therapiert, kann es schnell zu einem tödlichen Ausgang kommen.⁴

1.1 Definition des Spannungspneumothorax

Eine einheitlich anerkannte klinische oder wissenschaftliche Definition des Spannungspneumothorax existiert bislang nicht. Dies liegt unter anderem am Fehlen eines realistischen Tiermodells.⁴ Im folgenden Abschnitt sollen daher die verschiedenen aktuell vorhandenen Möglichkeiten, diese Spannungsphysiologie^{3, 4} näher zu charakterisieren, kurz vorgestellt werden.

Definitionen eines Spannungspneumothorax, welche den intrapleurale Druck berücksichtigen, gelten allgemein als exakter gegenüber solchen, die sich ausschließlich auf klinische Kriterien beziehen.⁵

Der Grad des Lungenkollapses korreliert mit der Menge an Luft, die sich im Pleuraspalt befindet. Normalerweise ist der intrapleurale Druck während In- und Expiration subatmosphärisch (-5 bis -8 cm H₂O). Findet ein kontinuierlicher Einstrom von Luft in den Pleuraspalt statt, erhöht sich der Druck auf überatmosphärische Level.⁶ Deshalb schlugen Rutherford et al. vor, dass ein Spannungspneumothorax dann vorliegt, wenn der intrapleurale Druck auf der ipsilateralen Seite während des Atemzyklus durchgängig positiv ist.⁷ Spätere Autoren wiesen jedoch darauf hin, dass - je nachdem, ob der Patient spontan atmet oder beatmet wird - sich die Druckverhältnisse über die gesamte Dauer des Atemzyklus positiv verhalten oder auch nur während der Expiration positiv werden können (*expiratory tension pneumothorax*).^{8, 9} In jedem Fall gilt: Je höher der durchschnittliche intrapleurale Druck, desto bedrohlicher die Situation.^{4, 10}

Da im praktischen Alltag die Messung von intrapleuralen Drücken allerdings eher von nachrangiger Bedeutung ist, empfiehlt es sich, auch die klinische Definition des

Spannungspneumothorax zu kennen. Von einem solchen kann ausgegangen werden, wenn bei Punktion des Pleuraraums als indirektes Zeichen des erhöhten intrapleuralen Drucks Luft hörbar durch die Nadel entweicht, wenn schwere klinische Manifestationen vorliegen (s. Kap. 1.3) oder bestimmte radiologische Kriterien vorhanden sind. Häufige Symptome bei der klinischen Untersuchung sind Atemnot mit pleuritischen Thoraxschmerz und Husten, Abweichung der Trachea von der Mittellinie, hypersonorer Klopfeschall bei abgeschwächtem Atemgeräusch, Zyanose sowie interkostale Einziehungen. Für die radiologische Diagnose muss eine Dehiszenz der parietalen und viszeralen Pleura auf dem Röntgenbild oder der Schnittbildgebung zu sehen sein.⁶ Wenn sich bei Bildaufnahme in Rückenlage die beim Pneumothorax im Pleuraraum befindliche freie Luft im lateralen Rippen-Zwerchfell-Winkel sammelt, führt sie dort zu einer Transparenzerhöhung, was als *deep sulcus sign* bezeichnet wird.¹¹ Als beweisend für das Vorliegen eines Pneumothorax gilt ebenfalls der sonographische Nachweis eines „Lungenpunktes“ (s. Kap. 1.3). Ein Mediastinalshift und ein einseitig abgeflachtes Zwerchfell sind hoch verdächtige Zeichen speziell für einen Spannungspneumothorax.⁶

Ein Spannungspneumothorax kann auch nur durch seine hämodynamische Wirksamkeit (Hypotension) definiert werden.¹² Bei fehlender Hypoxämie, klinischen Zeichen und Vorhandensein eines Pneumothorax ohne Mediastinalshift kann bei verbesserter Kreislauftsituation nach Drainage der Luft von einer vorher bestehenden Spannungskomponente ausgegangen werden.^{3, 12} Als Spannungspneumothorax behandelt werden sollte auch ein größer werdender Pneumothorax in Kombination mit einer Beeinträchtigung des Kreislaufs.⁷

1.2 Ätiologie und Pathophysiologie des Spannungspneumothorax

Grundsätzlich gibt es verschiedene Gründe, die zur Entstehung eines (Spannungs)Pneumothorax führen können. Man unterscheidet dabei spontane von nicht spontanen Ursachen.² In 85% der Fälle ist ein Spontanpneumothorax primär (idiopathisch) verursacht, also ohne klinisch apparente zugrundeliegende Lungenerkrankung.^{13, 14} Die verbleibenden 15% sind sekundär spontane Pneumothoraces.¹³ Eine Vielzahl pulmonaler Störungen kann hierfür ursächlich sein, die häufigsten sind die chronisch obstruktive Lungenerkrankung (COPD) mit Emphysem, zystische Fibrose, Tuberkulose, Lungenkrebs und die *Pneumocystis jirovecii*-Pneumonie, welche mit HIV assoziiert sein kann.¹⁴

Den nicht spontanen Pneumothorax unterteilt man nach traumatischer (nicht iatrogener) und iatrogener Ursache.²

Nach den Rippenfrakturen ist der Pneumothorax mit 40% die zweithäufigste Verletzung im Rahmen eines Thoraxtraumas beim Erwachsenen.^{15, 16} Dabei wird der überwiegende Großteil der Pneumothoraces durch stumpfe Thoraxtraumen verursacht (94,1%), welche wiederum am häufigsten durch Autounfälle herbeigeführt werden (28%).¹⁷

Penetrierende Thoraxtraumen werden in mehr als der Hälfte der Fälle durch Stichwaffen ausgelöst.¹⁸

Eine besondere Form des traumatischen Pneumothorax stellt der iatrogene Pneumothorax dar, welcher als Folge einer ärztlichen Intervention zu diagnostischen oder therapeutischen Zwecken auftritt.¹⁹ Zu den führenden Gründen zählen hierbei transthorakale Aspiration, Punktion der V. subclavia, Pleurapunktion und Biopsien, aber auch die Überdruckbeatmung.^{2, 20}

Eine mögliche Komplikation eines jeden Pneumothorax ist seine Progression zum Spannungspneumothorax, der sich vor allem bei Traumapatienten schnell entwickeln kann.⁴

Anhand bisher durchgeführter Studien, die sich mit der Pathophysiologie des Spannungspneumothorax beschäftigten, wurden zwei Hypothesen formuliert, um die schwere kardiorespiratorische Beeinträchtigung, die durch einen Spannungspneumothorax hervorgerufen wird, zu erklären.

1. Durch Druckerhöhung aufgrund mechanischer Kompression kommt es zu vermindertem venösem Rückfluss zum Herzen, Abfall des Schlagvolumens und daraus resultierend schließlich zum kardiogenen Schock.^{3, 21}

2. Es entsteht eine progressive Hypoxämie durch fortschreitenden parenchymalen Kollaps der ipsilateralen Lunge, der einen steigenden pulmonal-vaskulären Shunt bedingt, weil durchfließendes Blut durch die mangelnde Belüftung nur noch schlecht mit Sauerstoff aufgesättigt wird.^{7, 21}

Jedoch verhindern mehrere Kompensationsmechanismen, dass es zu einem signifikanten Abfall des Herzzeitvolumens und mittleren arteriellen Drucks (MAP) kommt. Die rechtsventrikuläre Druckerhöhung verursacht zwar eine Abnahme des Schlagvolumens, was aber durch eine Erhöhung der Herzfrequenz kompensiert wird.^{7, 9} Während auf der ipsilateralen Seite der intrapleurale Druck stark ansteigt, wird er auf der kontralateralen Seite negativer und ist während des Respirationszyklus größeren Schwankungen unterworfen, die Ausdruck einer vermehrten Atemarbeit sind. Zwar nimmt auch das Atemzugvolumen ab, durch kompensatorische Steigerung der Atemfrequenz kann dennoch zunächst das Atemminutenvolumen aufrechterhalten werden.⁷ Aufgrund Muskelermüdung und Restriktion der kontralateralen Lunge während der Ventilation kommt es schließlich zu progressivem Versagen der Atmung, was auch zwangsläufig eine CO₂-Retention und einen sinkenden arteriellen Sauerstoffpartialdruck bedingt.⁹

Nelson et al. beschäftigten sich mit der Entwicklung eines Modells eines großen Tieres, anhand dessen sich die zentralen und hämodynamischen Veränderungen beim Übergang eines simplen Pneumothorax zu einem Spannungspneumothorax beschreiben und analysieren lassen: In erster Linie wurden hier mechanisch beatmete Patienten anhand von 8 intubierten, sedierten und Volumen-kontrolliert beatmeten Schweinen simuliert. Spontan atmende oder Druck-kontrolliert beatmete Patienten müssen zur Aufrechterhaltung des Atemzugvolumens den steigenden intrathorakalen Druck überwinden, was im Laufe der Entwicklung des Spannungspneumothorax zur schnelleren Abnahme des Tidalvolumens führen kann. Diese Situation wurde mittels zweier Druck-kontrolliert beatmeter Schweine nachgestellt. In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass offenbar beide der oben beschriebenen Pathomechanismen korrekt sind und die Spannungsphysiologie durch ein Zusammenspiel miteinander vergesellschafteter, jedoch deutlich variierender pathophysiologischer Prozesse bedingt ist: Bei spontan atmenden

Patienten kann das sinkende Atemzugvolumen zu einem kompletten Lungenkollaps führen, sodass eine frühe und schwere Hypoxie entsteht und einen hypoxischen Herzstillstand herbeiführt, ehe die klassisch beschriebenen hämodynamischen Veränderungen aufgrund von mechanischer Kompression überhaupt einsetzen können. Pulmonale Effekte werden im Kontext eines spontan atmenden oder druckkontrolliert beatmeten Patienten daher sehr wahrscheinlich vorherrschen. Anders verhält es sich bei Volumen-kontrolliert beatmeten Personen, bei denen durch die Beatmung Ventilation und Oxygenierung aufrechterhalten werden können. Der intrathorakale Druck kann so weit ansteigen, dass sich der zentralvenöse Druck dem diastolischen Blutdruck annähert und schließlich ausgleicht, was zu direktem und signifikantem Abfall von Herzzeitvolumen und Blutdruck, also einem obstruktiven Schock, führt.⁴

Die Ventilationsform des Patienten spielt also, neben anderen Faktoren, eine große Rolle bei der Progression des Spannungspneumothorax.

1.3 Diagnostik und Therapie des Spannungspneumothorax

Die Basisuntersuchung des Thorax in der Notfallsituation am Unfallort sollte mindestens die Prüfung der Atemfrequenz und die Auskultation der Lunge (Vorhandensein und Seitengleichheit der Atemgeräusche) beinhalten. Die Verdachtsdiagnose Spannungspneumothorax sollte bei einseitig fehlendem Atemgeräusch (gegebenenfalls nach Lagekontrolle des Tubus) und zusätzlichem Vorliegen von typischen Symptomen, insbesondere einer schweren respiratorischen oder zirkulatorischen Störung, gestellt werden.²²

Je nachdem, ob der Patient spontan atmet oder beatmet ist, kann sich ein Spannungspneumothorax unterschiedlich klinisch manifestieren und typische Symptome prägen sich mit verschiedenen Häufigkeiten aus: Die drei häufigsten Symptome (in mehr als 45% der Fälle auftretend) beim spontan atmenden Patienten sind Thoraxschmerzen, Tachypnoe und abgeschwächtes Atemgeräusch. Beim beatmeten Patienten dagegen sind es Hypoxie/steigender Sauerstoffbedarf, häufig plötzlich einsetzende Hypotension und ebenfalls ein abgeschwächtes Atemgeräusch. Weitere oft vorkommende Symptome (in 30-45% der Fälle auftretend) sind Kurzatmigkeit, Atemnot, Hypoxie, Tachykardie und hypersonorer Klopfeschall bei Spontanatmung und Tachykardie, subkutanes Emphysem und Herzstillstand bei maschineller Beatmung.²³

Steht ein Ultraschallgerät zur Verfügung, kann ein Pneumothorax auch im Rahmen eines eFAST (*extended focused assessment with sonography in trauma*) diagnostiziert werden.²⁴ Der Nachweis des Lungenpunktes (*lung point sign*) ist zu 100% spezifisch für das Vorliegen eines Pneumothorax: Er markiert seine Grenze und lässt Rückschlüsse über seine Größe zu.²⁵ Umgekehrt kann bei vorhandenem Pleuragleiten im Ultraschall ein Pneumothorax sicher ausgeschlossen werden.²⁶ Weil allerdings bisher keine belastbaren Erfahrungen zur präklinischen Anwendung vorliegen, wird in der S3-Leitlinie Polytrauma / Schwerverletzten-Behandlung noch keine generelle Empfehlung für oder gegen das Verfahren ausgesprochen.²²

Innerklinisch besteht dagegen die Möglichkeit, von einer Vielzahl unterstützender Methoden der apparativen Diagnostik Gebrauch zu machen. Mehrere Meta-Analysen zeigten, dass die Sonographie des Thorax als ausgezeichnete und einfache Methode zur Detektion eines Pneumothorax dem klassischen Röntgen-Thorax bezüglich dieser Fragestellung überlegen ist. Die gepoolte Sensitivität des transthorakalen Ultraschalls reichte dabei von 78,6% bis 90,9%, die gepoolte Spezifität von 98,2%

bis 99%.²⁷⁻³⁰ Die Genauigkeit des Verfahrens ist auch von der Erfahrung des Untersuchers abhängig. So konnte gezeigt werden, dass die Sensitivität noch etwas höher lag, wenn ein Notfallmediziner die Untersuchung durchführte.³⁰ Außerdem sollte die Behandlung vor allem bei Beatmeten nicht durch das Warten auf die radiographische Bestätigung der Diagnose verzögert werden, denn gegenüber einer Diagnosestellung anhand klinischer Hinweise und der daraus resultierenden unmittelbaren Therapie ist hier die Mortalität der Patienten stark erhöht.^{31, 32} Die Folgen einer möglicherweise fälschlich gestellten Diagnose bilden im Vergleich zum Unterlassen einer sofortigen Therapie in der Regel ein untergeordnetes Problem.²² So wurde der nicht (adäquat) behandelte Spannungspneumothorax beispielsweise als eine der häufigsten vermeidbaren, präklinischen Todesursachen identifiziert.^{33, 34}

Die einzige existierende Therapie des Spannungspneumothorax ist die sofortige Entlastung, welche präklinisch nicht durch den Transport, selbst in ein unmittelbar in der Nähe gelegenes, Krankenhaus verzögert werden sollte.^{22, 35}

Für die erfolgreiche Dekompression kommen grundsätzlich zwei Methoden in Betracht: Die am schnellsten umzusetzende Methode ist dabei die Nadeldekompression, welche prähospital für viele Notfallmediziner die Therapie der 1. Wahl ist, aber auch häufig im Krankenhaus eingesetzt wird, falls Material oder Expertise für andere Lösungen nicht sofort verfügbar sind.^{34, 36} Das Prinzip der Technik besteht darin, den Pleuraraum durch perkutane Punktion mit einer großen Venenverweilkanüle (z.B. orange = 14 G), welche ubiquitär vorhanden und ohne große Vorbereitung einsetzbar ist, oder einer für diesen Zweck konzipierten Pleurapunktionskanüle zu eröffnen und das Entweichen der Luftansammlung zu ermöglichen. Auf die Kanüle kann eine partiell mit Flüssigkeit gefüllte Spritze aufgesetzt werden, um bei Aspiration von Luft das Erreichen des Pleuraspalts festzustellen.^{36, 37}

Als geeigneter Punktionsort wird hierfür der 2. ICR in Medioklavikularlinie angegeben. An dieser Stelle kommt es jedoch zu teilweise hohen Misserfolgsraten, da die empfohlene 5 cm lange Nadel nicht bei allen Patienten aufgrund individuell unterschiedlich ausgeprägter Muskel-/Fettgewebsdicke die Brustwand durchdringen und somit den Pleuraraum nicht erreichen kann.³⁸⁻⁴² Weil sich aber mit steigender Nadellänge auch die Gefahr potentiell schwerwiegender Komplikationen wie zum Beispiel Hämatothorax, Verletzung der Pulmonalarterie oder Perikardtampnade

erhöht,⁴³⁻⁴⁵ wurden von mehreren Autoren bereits alternative Punktionsorte evaluiert: Eine Metaanalyse verschiedener Studien von Laan et al. ergab eine durchschnittlich dünnere Brustwand im 4. und 5. ICR sowohl in vorderer (34,33 mm) als auch mittlerer Axillarlinie (39,85 mm) im Vergleich zum 2. ICR MCL (42,79 mm). Die theoretisch niedrigste Misserfolgsrate fand sich mit 13% in der AAL (MAL 31%, MCL 38%).⁴⁶ Auch in weiteren Veröffentlichungen wird der 5. ICR AAL explizit als geeignet empfohlen.⁴⁷⁻⁴⁹ Wax und Leibowitz raten in ihrer Arbeit zur Punktion am sternalen Winkel (entsprechend der Höhe des 2. ICR) in der mittleren Thoraxlinie (*midhemithoracic line*) als sicherster Stelle für die Nadeldekompression bei Spannungspneumothorax: Die Pleura wurde in allen Fällen mit einer 7 cm-Nadel erreicht, bis zu einer Tiefe von 10 cm lagen keine vitalen Strukturen im Stichkanal und verglichen mit den anderen Punktionsstellen befanden sich am wenigsten intrathorakale Strukturen, die der Brustwand direkt anlagen.⁵⁰

Aufgrund der widersprüchlichen Studienlage bezüglich der Wahl des Punktionsortes spricht die S3-Leitlinie zu Polytrauma / Schwerverletzten-Behandlung hierzu derzeit keine eindeutige Empfehlung aus.²²

Nachteil der Nadeldekompression ist die leichte Okklusion des Katheters aufgrund des geringen Durchmessers (14 G = 2,2 mm) bzw. sein Abknicken durch mangelnde Stabilität.³⁷ Es kann trotz Durchführung der Maßnahme zum Fortbestehen des Spannungspneumothorax kommen, falls die Menge an neu einströmender Luft größer ist als diejenige, die über den dünnen Katheter entlastet werden kann. Auch wird ein Herausrutschen der Kanüle möglicherweise erst spät erkennbar, wenn es anfangs zu einem Hinein- und Hinausgleiten in/aus dem Pleuraraum kommt.^{37, 51} Obwohl die Nadeldekompression aufgrund der kürzesten Behandlungszeit eine initial lebensrettende Maßnahme sein kann, benötigt ein Großteil der Patienten (85%) spätestens nach Ankunft in einem Krankenhaus ergänzende bzw. definitive Therapie.^{22, 37, 52} Dafür kommt die chirurgische Eröffnung des Pleuraspalts (Minithorakotomie), ohne oder mit unmittelbar anschließender Anlage einer Thoraxdrainage, in Frage, wobei die einfache Minithorakotomie ohne Drainageeinlage nur bei mit Überdruck beatmeten Patienten erfolgsversprechend ist, da sonst bei jedem Atemzyklus Luft von außen in den Pleuraspalt gezogen würde.^{22, 35} Die Thoraxdrainage ist eine hochwirksame, aber komplikationsbehaftete Maßnahme zur Entlastung eines Spannungspneumothorax, wobei die Komplikationsraten präklinisch höher sind als innerklinisch.^{22, 35, 37}

1.4 Spannungspneumothorax beim Kind

Ein Spannungspneumothorax kann bei Kindern allgemein dieselben Ursachen haben wie bei erwachsenen Patienten.

Spontanpneumothoraces im Kindesalter sind allerdings selten: In der Altersgruppe 0-17 Jahre wurde die jährliche Inzidenz auf 2,6 pro 100.000 geschätzt, mit 4/100.000 bei Jungen deutlich häufiger als bei Mädchen mit 1,1/100.000.^{53, 54} Aufgrund dieser Prädominanz wird der Spontanpneumothorax in der pädiatrischen Population als Krankheit des männlichen Teenageralters gesehen, denn nur 7% aller Spontanpneumothoraces treten unter einem Alter von 10 Jahren auf.⁵⁴ Der primär spontane Pneumothorax kommt gehäuft bei Jugendlichen mit großem, schlankem Habitus vor, während einer der prädisponierenden Faktoren für einen sekundären Spontanpneumothorax bei Kindern vor allem Asthma ist.⁵⁴⁻⁵⁶ Bei den Neugeborenen sind besonders Frühgeborene und Kinder mit geringem Geburtsgewicht für einen Pneumothorax gefährdet, jedoch steigt das Risiko auch ab der 35. Schwangerschaftswoche wieder an und weist einen weiteren Gipfel im Bereich des normalen Geburtsgewichts auf.⁵⁷

Die meisten Pneumothoraces im Kindesalter resultieren aus Verletzungen oder aus mechanischer (Überdruck-) Beatmung, können aber, wie beim Erwachsenen, prinzipiell auch durch andere Arten von iatrogenen Traumata verursacht werden (s. Kap. 1.2).^{55, 57, 58} Wenngleich insgesamt seltener, so überwiegt bei Kindern ebenso die Häufigkeit stumpfer Thoraxtraumen: Kleine Kinder sind hierbei häufig passive Opfer, beispielsweise bei Autounfällen, während es im Schulkind-Alter eher zu Unfällen mit Skateboards, Rollern, Inlinern, Fahrrädern oder Ähnlichem kommt. Teenager sind vermehrt in Hochrasanz-Unfälle, Sportverletzungen, gewalttätige Auseinandersetzungen oder Suizide verwickelt, hier steigt auch die Rate penetrierender Thoraxtraumen wie Messerstiche oder Schusswunden.⁵⁹⁻⁶¹

Bei Kindern mit einem traumatischen Pneumothorax kommt es in ca. einem Viertel der Fälle zu einem Spannungspneumothorax.⁶²

Aufgrund anatomischer und physiologischer Unterschiede zum Erwachsenen weist das Notfallbild des Spannungspneumothorax im Kindesalter einige besondere Tücken auf: Bei Kindern besteht der Brustkorb aufgrund inkompletter Ossifikation der Rippen noch zu einem größeren Teil aus Knorpel, woraus eine hohe Compliance der Thoraxwand resultiert. Dies verhindert Rippenfrakturen bei einem Trauma, führt

jedoch zur Ableitung der Energie in die darunterliegenden Strukturen. So können schwere intrathorakale Verletzungen im Kindesalter durch das Fehlen äußerer Verletzungszeichen oder aufgrund eines unauffälligen Röntgenbilds leicht übersehen werden.⁶³⁻⁶⁵ Das kindliche Mediastinum ist außerdem insgesamt flexibler und die intrathorakalen Organe weniger fixiert, was einen stärker ausgeprägten Mediastinalshift, exzessive Dislokation mit Verlegung der V. cava superior und infolgedessen einen obstruktiven Schock bedingen kann.^{7, 62} Kinder sind daher viel anfälliger für einen Spannungspneumothorax – er ist die häufigste unmittelbar lebensbedrohende Verletzung im Kindesalter!²⁴ Das Herzzeitvolumen ist beim Kind in hohem Maße von der Vorlast abhängig und fällt dementsprechend bei einer durch Erhöhung des intrathorakalen Drucks bedingten Verminderung des venösen Rückstroms rasch ab.⁶⁶ Ferner ist der Sauerstoffbedarf gesehen auf das Körpergewicht verhältnismäßig größer, die funktionelle Residualkapazität der Lunge aber geringer. Es kommt deshalb schneller zu einer Hypoxämie.^{59, 66}

Beim pädiatrischen Patienten sind die Zeichen eines Spannungspneumothorax oft fast unmerklich vorhanden, die Möglichkeit dieser Diagnose sollte daher immer in Erwägung gezogen und bei der Untersuchung auf Hautzeichen oder schwere Tachykardie als Hinweis für einen Schock geachtet werden.⁶⁵

Im ATLS Kursbuch 2018 wird zur Therapie des Spannungspneumothorax ebenfalls die Nadeldekompression über der 3. Rippe medioklavikulär mittels einer 14 bis 18 G-Kanüle empfohlen, wobei bei Säuglingen und Kleinkindern besondere Vorsicht bei Durchführung der Maßnahme geboten ist, denn je länger die Nadel, desto größer auch die Gefahr, eher einen iatrogenen (Spannungs)Pneumothorax zu verursachen.²⁴ Als Merkhilfe zur Thoraxdekompression und Anlage von Thoraxdrainagen bei schwerverletzten Kindern veröffentlichten Teague et al. 2019 die „*Rule of 4's*“. Diese enthält die wichtigsten Schritte zur Schaffung eines Zugangs zur Pleurahöhle (*4 steps to make a good hole*) sowie zur Platzierung der Drainage (*4 steps for inserting a good tube*), die Lokalisation des Inzisionsorts (4. (oder 5.) ICR im „*triangle of safety*“), die altersangepasste Größe der Drainage (4x Größe des ungeblockten Endotrachealtubus, aufgerundet zur nächsten Größe in French) sowie die Tiefe, bis zu der die Drainage vorgeschoben werden sollte (4 cm Markierung).⁶⁷

Die 3. Auflage von „Pädiatrische Pneumologie“ (von Mutius et al., 2013) nennt das „sichere axilläre Dreieck“ (*safe triangle*) als in den meisten Fällen geeignete Punktionsstelle sowohl für eine Nadeldekompression („Einmalpunktion“) als auch Drainagenanlage und gibt dazu ebenfalls eine Tabelle mit Empfehlungen zur Wahl der Kanülen-/Drainagengrößen in Abhängigkeit vom Alter an die Hand. Oben genanntes „Dreieck“ wird durch die anteriore Grenze des M. latissimus dorsi (hintere Grenze), durch die laterale Grenze des M. pectoralis major (vordere Grenze), eine horizontale Linie in Höhe der Mamille (basale Grenze) und einen Punkt unterhalb der Axilla (Spitze) begrenzt. Auch hier soll die Punktion wie stets am Oberrand der Rippe erfolgen, um interkostale Gefäße und Nerven nicht zu verletzen.⁶⁸

In einer Veröffentlichung von Avarello und Cantor ist von der Nadeldekompression in der präklinischen Situation die Rede, welche entweder im 2. ICR in MCL oder möglicherweise im 4. ICR in AAL erfolgen sollte.⁶⁵ Im Vergleich ist die Breite des Interkostalraumes im 2. ICR größer als im 4. ICR und nimmt insgesamt mit dem Alter des Kindes zu. Je schmaler der ICR, desto größer die Gefahr mit der Nadel das interkostale Gefäß-Nerven-Bündel zu beschädigen, was eine schwere Blutung zur Folge haben kann.^{69, 70} Bei Säuglingen wurde zusätzlich herausgefunden, dass in einigen Fällen wichtige Strukturen wie das Herz oder der Thymus im 2. ICR in Höhe der MCL der Thoraxwand direkt anliegen, weshalb von einer Punktion zumindest in dieser Altersgruppe an dieser Stelle abgeraten wird. Im 4. ICR AAL war dies nie der Fall, dafür war der intrathorakale Abstand zu vitalen Strukturen (*intrapleural safety zone*) an diesem Punktionsort kleiner. Insgesamt sprechen sich die Autoren für den 4. ICR AAL als Stelle der 1. Wahl zur Entlastungspunktion eines Spannungspneumothorax bei Kindern aus.⁷⁰ Auch die 2020 erschienene S2K-Leitlinie zur „Polytraumaversorgung im Kindesalter“ sieht die Dekompression bevorzugt in Bülow-Position im 4./5. ICR in vorderer Axillarlinie vor und empfiehlt die Nadeldekompression als passagere Maßnahme, die Thoraxdrainage als definitive Versorgung. Dabei sollte, insbesondere bei Kindern in den ersten Lebensjahren, die Seldinger-Technik mit Pigtail-Kathetern statt der Minithorakotomie mit stumpfer Präparation des Stichkanals Anwendung finden.⁷¹

Im Gesamten lässt sich feststellen, dass die Thoraxdekompression im Kindesalter eine sehr selten durchgeführte Maßnahme darstellt: Nach einer Auswertung von Carlson et al. betreffen nur 6,8% aller Fälle im Notfalldienst Kinder und nur 0,3/1.000 Fälle benötigen eine Entlastungspunktion als zeitkritische Maßnahme.⁷² Aufgrund dieser geringen Häufigkeit ist ihre Durchführung fast immer mit einem hohen Maß an kognitivem Stress für die Behandelnden verbunden, sodass eine Orientierung an leicht nachvollziehbaren Handlungsschritten essentiell ist.

1.5 Fragestellung

Wie aus den bisherigen Darlegungen hervorgeht, gibt es noch keine einheitliche Empfehlung für den Punktionsort zur Nadeldekompression im Kindesalter. Hierbei kommt erschwerend hinzu, dass evidenzbasierte Studien zu diesem Thema (Vergleich und Sicherheit der in adulten Patientenkollektiven beschriebenen möglichen Insertionsstellen) für pädiatrische Populationen nur eingeschränkt vorhanden sind.

Neben der vergleichenden Evaluation der grundsätzlichen Eignung der für Erwachsene untersuchten Punktionsorte, stellt sich auch die Frage nach der Möglichkeit der Verwendung alternativer Landmarken zur Orientierung bei Kindern gegenüber Erwachsenen:

1. Ist die Mamille als Landmarke zur Identifikation einer alternativen Punktionsstelle im 2. ICR geeignet und wie ist ihre Lagebeziehung verglichen mit den von anderen Autoren vorbeschriebenen Hilfslinien an dieser Lokalisation?
2. Wie groß ist der seitliche Abstand zu vitalen Strukturen an den verschiedenen Insertionsorten der anterioren Punktionsstelle bei Kindern verschiedener Altersklassen und welche Strukturen befinden sich hier in unmittelbarer Nähe?
3. Wie ist die Lage der Mamille in Bezug auf die darunter liegenden Interkostalräume und kann sie auch als Landmarke zur Identifikation der lateralen Punktionsstelle im 4. oder 5. ICR verwendet werden?
4. Wie groß ist der kaudale Abstand der Mamille zur Zwerchfellkuppel?
5. Wie groß ist die Distanz zu den in der Tiefe gelegenen intrathorakalen Strukturen bei einer Punktion in der mittleren Axillarlinie und um welche Strukturen handelt es sich dabei?

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Auswahl der Computertomographie (CT)-Aufnahmen

Zur Auswertung wurden CT-Aufnahmen des Thorax aus der lokalen Datenbank der Universitätsmedizin Mannheim herangezogen, welche im Rahmen verschiedenster Fragestellungen angefertigt und retrospektiv ausgewählt wurden. Der häufigste Grund für die Durchführung der Untersuchung war das Vorliegen einer Krebserkrankung (beispielsweise Hepato-, Nephro- oder Neuroblastome, Sarkome, Leukämien oder Lymphome), sie erfolgte dabei entweder initial bei der Durchführung des Stagings, zur Kontrolle nach erfolgreicher Tumor-Therapie oder beim Auftreten von Metastasen. Weiterhin wurden viele Aufnahmen im Zusammenhang (infektiöser) Erkrankungen der Lunge wie Pneumonien, *Acute Respiratory Distress Syndrome* (ARDS), Tuberkulose oder der Abklärung von Infiltraten vorgenommen. Eine häufige Indikation in den jüngeren Altersgruppen war auch der Verdacht auf eine Kindesmisshandlung.

Als Ziel wurde vor Beginn definiert, die Aufnahmen nach Alter der Kinder einzuteilen und Bildmaterial von jeweils 20 Patienten der Altersgruppen 0 bis 10 Jahre zu analysieren (11 Untergruppen). Die Sichtung erfolgte dabei in chronologischer Reihenfolge von neu nach alt, bis pro Altersklasse 20 geeignete Datensätze eingeschlossen waren.

Sowohl die Suche und Auswahl als auch die anschließende Vermessung der Aufnahmen wurden mit einer PACS Workstation durchgeführt (Aycan OsiriX PRO v.2.10, Aycan Digitalsysteme GmbH, Würzburg, Deutschland), in welche alle Datensätze zuvor importiert wurden.

Bei den eingeschlossenen CTs handelt es sich um solche, die im Zeitraum vom 14.10.1998 bis 06.06.2019 angefertigt wurden. Für die Scans kamen zwei CT-Geräte zum Einsatz: ein zweite/dritte Generation Dual Source CT (SOMATOM® Definition Flash 2x128 slice MSCT/SOMATOM® Definition Force 2x192 slice MSCT, Siemens Healthineers, Forchheim, Deutschland) sowie ein Single Source CT (SOMATOM® Emotion 16, 16 slice MSCT, Siemens Healthineers, Forchheim, Deutschland). Die Schichtdicke variierte zwischen 0,6 mm und 4 mm. Das Rekonstruktionsinkrement betrug 1 mm.

2.1.1 Ein- und Ausschlusskriterien

Bei jedem potentiellen Patienten wurde die individuelle Eignung des Bildmaterials für die Studie geprüft. Eingeschlossen wurden nur Kinder, bei denen keine relevanten Fehlbildungen des Thorax oder signifikante Pathologien der Lunge vorlagen, die die Messungen erschwert oder unmöglich gemacht hätten. Verschiedene Anomalien führen zu veränderten anatomischen Verhältnissen des Brustkorbs, sodass bei ihrer Auswertung die Messergebnisse als nicht repräsentativ und dadurch als nicht auf die Allgemeinheit der Kinder dieses Alters übertragbar angesehen werden müssten (s. Kap. 3.1). Geringfügige Veränderungen, wie zum Beispiel ein Infiltrat, das nicht im Messbereich lag, führten nicht zum Ausschluss der Aufnahme.

Abgesehen von einer normalen Anatomie des Thorax war es essentiell, dass alle für die Messung wichtigen Strukturen in der Aufnahme abgebildet waren. Dazu zählten vor allem die komplette Abbildung der Clavicula, der Rippen und der Zwerchfellkuppel.

2.2 Messungen

2.2.1 Anteriore Punktionsstelle (2. Interkostalraum, Medioklavikularlinie)

Um die Medioklavikularlinie (MCL) im CT-Bild aufzusuchen, wurde zunächst in axialer Schnittebene die Länge der Clavicula ausgemessen und anschließend auf ihrer halben Länge eine senkrechte Linie eingezeichnet (s. Abb. 2 A und B).

Daraufhin wurde, ebenfalls in axialer Ebene, der 2. Interkostalraum (ICR) aufgesucht und am Oberrand der 3. Rippe auf Höhe der MCL die Insertionsstelle markiert (s. Abb. 2 C). Ausgehend von dort erfolgte die Bestimmung des seitlichen Abstands zu der nächstgelegenen vitalen Struktur (s. Tab. 1, s. Abb. 1 A und 2 C). Lag die Struktur dabei lateral der MCL, wurde der Wert mit einem negativen Vorzeichen versehen.

Danach wurde die Mitte der Mamille aufgesucht und ihr Abstand zur MCL auf Hautniveau bestimmt (s. Abb. 1 B). Bei dieser Messung erhielt der Wert immer dann ein negatives Vorzeichen, wenn die Mamille medial der MCL zu liegen kam.

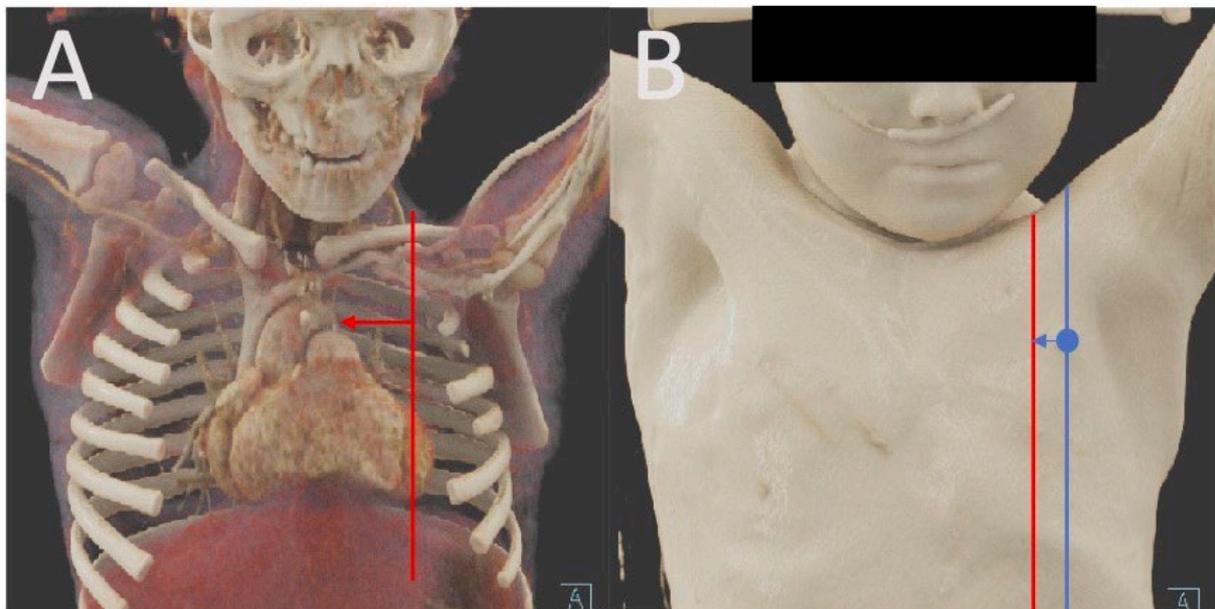


Abb. 1: A – Messung des seitlichen Abstands von der MCL (rote Linie) zur nächstgelegenen vitalen Struktur auf Höhe des Oberrands der 3. Rippe (roter Pfeil) B – Aufsuchen der Mamille (blauer Punkt) und Bestimmung des Abstands (blauer Pfeil) zur MCL (rote Linie)

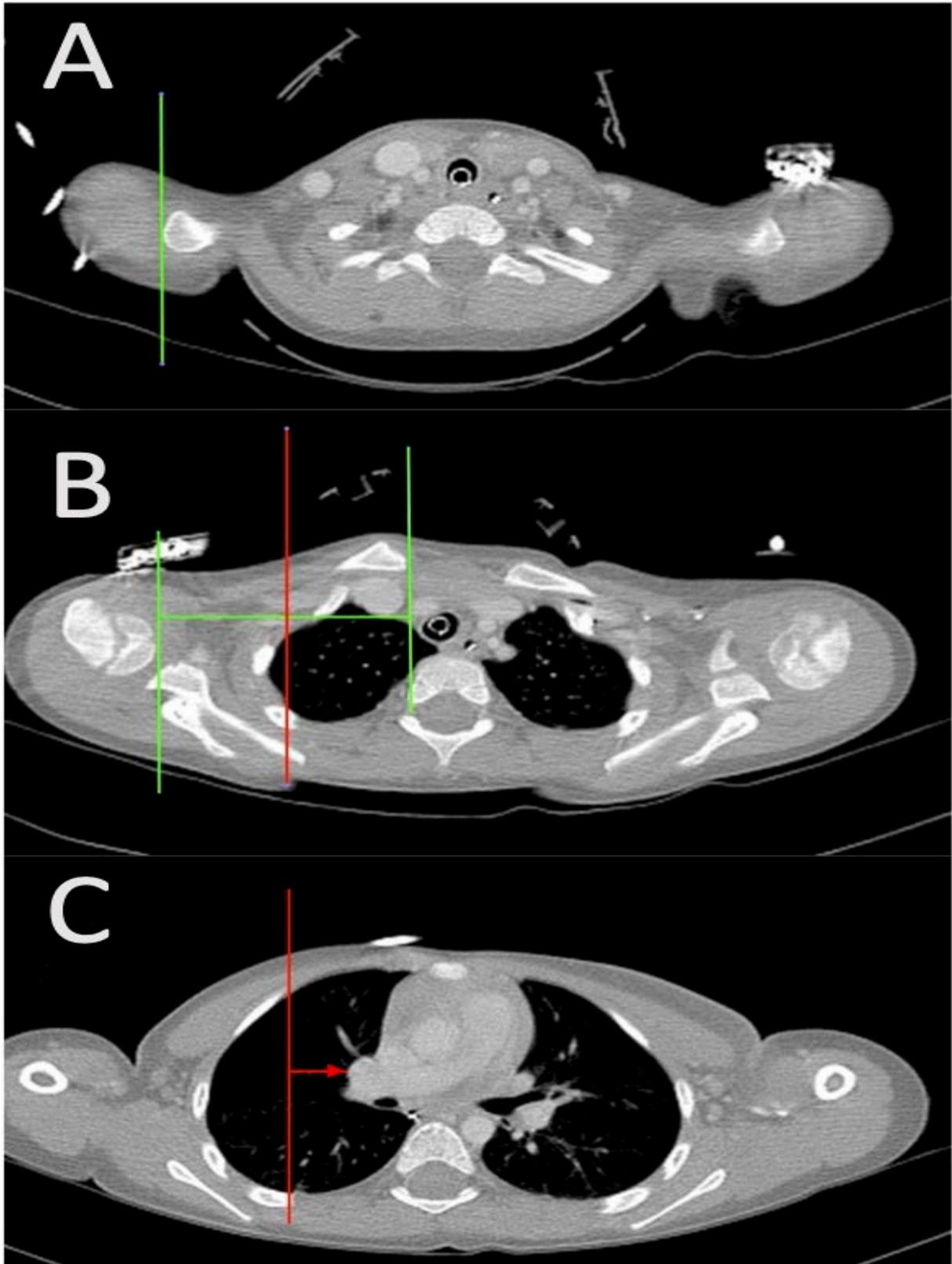


Abb. 2: Beispiel der Messungen für die anteriore Punktionsstelle am CT eines 4-Jährigen auf der rechten Thoraxseite, A – Markierung des lateralen Endes der Clavicula (grüne Linie) B – Markierung des medialen Endes der Clavicula (rechte senkrechte grüne Linie), Bestimmung der Länge der Clavicula (waagrechte grüne Linie) und Einzeichnen der MCL durch Halbieren der gemessenen Länge (rote Linie) C – Messung des seitlichen Abstands von der MCL zur nächstgelegenen vitalen Struktur auf Höhe des Oberrands der 3. Rippe (roter Pfeil)

Weiterhin erfolgte die Bestimmung des Abstands der Mamille zur mittleren Thoraxlinie (MHL, *midhemithoracic line*). Hierzu wurde zunächst die Breite des knöchernen Thorax von der Außenkante der Rippen (maximalste Breite) bis zur Mitte des Sternums bestimmt, anschließend halbiert und wieder eine senkrechte Linie eingezeichnet (s. Abb. 3). Diese Messung erfolgte in koronarer Schnittebene und unter Einsatz der MIP (*Maximal Intensity Projection*, Abbildung des maximalen Dichtewerts eines 3D-Datensatzes im betrachteten Bereich). Die MHL wurde in die axiale Schnittebene übertragen und anschließend der Abstand zur Mitte der Mamille gemessen. Sobald die Mamille medial der MHL zu finden war, bekam der Wert auch hier ein negatives Vorzeichen.

Die Messungen erfolgten auf der rechten und linken Thoraxseite gleichermaßen.

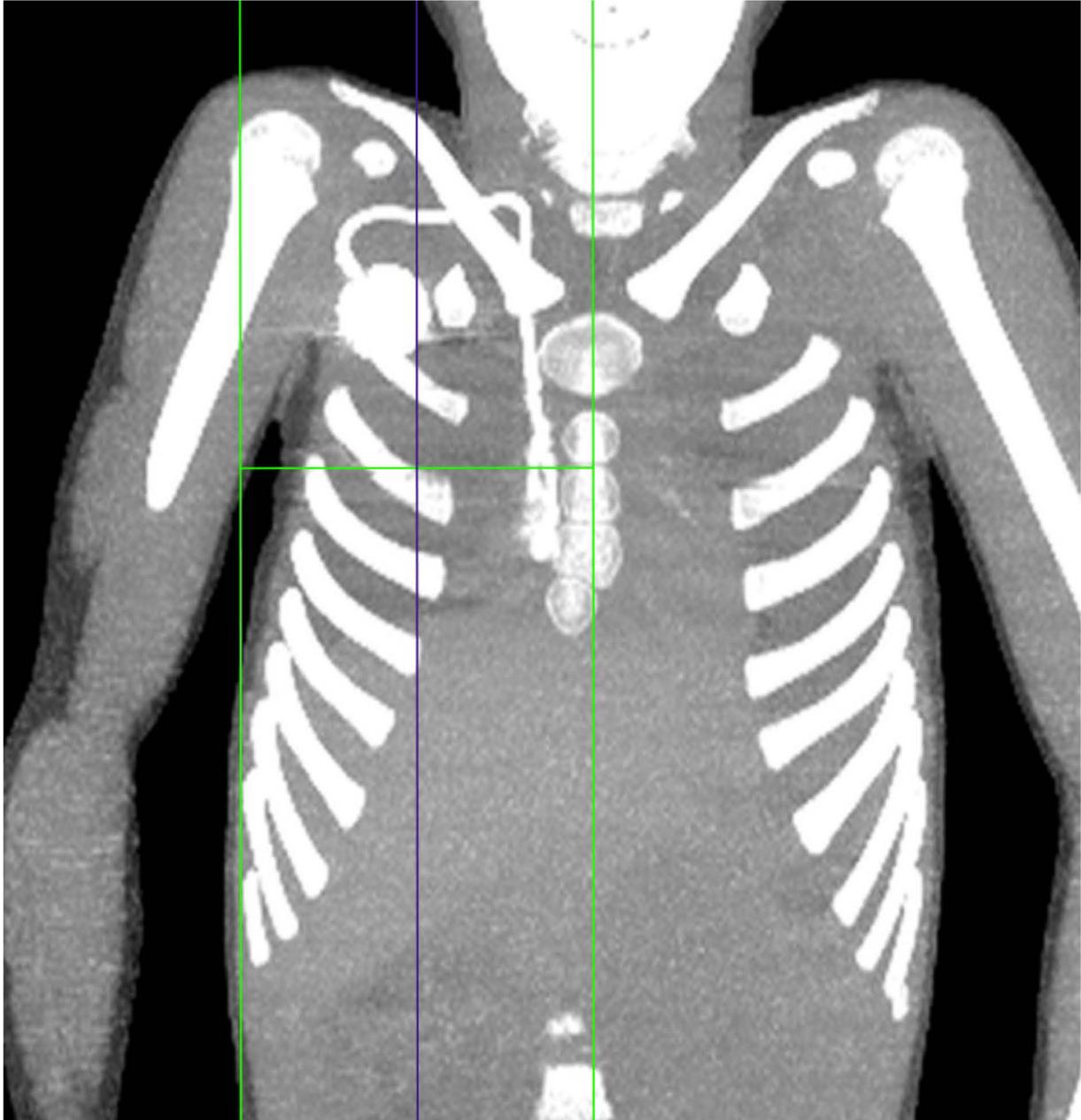


Abb. 3: Beispiel der Messungen für die anteriore Punktionsstelle am CT eines 4-Jährigen auf der rechten Thoraxseite unter Anwendung der MIP, Markierung der Außenkante der Rippen (linke senkrechte grüne Linie) und der Mitte des Sternums (rechte senkrechte grüne Linie), Messung des Abstands (waagrechte grüne Linie) und Einzeichnen der MHL durch Halbieren der gemessenen Strecke (violette Linie)

Durch Addition der Abstände vitale Struktur – MCL und MCL – Mamille konnte der Abstand zwischen vitaler Struktur und Mamille errechnet werden.

Durch Subtraktion des Abstandes Mamille – MHL vom Abstand Mamille – vitale Struktur erhielt man den Abstand zwischen vitaler Struktur und MHL.

2.2.2 Laterale Punktionsstelle (4. und 5. Interkostalraum, mittlere Axillarlinie)

Die mittlere Axillarlinie (MAL) wurde mittels multiplanarer Rekonstruktion bestimmt. Danach wurden die Interkostalräume beginnend mit dem ersten ICR in der axialen Ebene abgezählt und sowohl auf Höhe des 4. als auch des 5. ICRs am Oberrand der 5. sowie 6. Rippe die Tiefe zur nächstgelegenen vitalen Struktur (s. Tab. 1) erfasst. Dabei wurde eine Punktionsrichtung im rechten Winkel zur Haut angenommen und ab der Hautoberfläche gemessen (s. Abb. 4).



Abb. 4: Beispiel der Messungen für die laterale Punktionsstelle am CT eines 4-Jährigen auf der linken Thoraxseite, Bestimmung des Abstands zur nächstgelegenen vitalen Struktur (hier ein Lungengefäß) im 4. ICR, MAL am Oberrand der 5. Rippe bei zur Hautoberfläche rechtwinkliger Punktion (grüne Linie)

Außerdem wurde die Höhe bestimmt, auf welcher die Mamille in Bezug auf die Rippen/Interkostalräume in der MAL zu liegen kommt. Dafür wurde die Höhe der Mamille in sagittaler Schnittebene mit einer Linie markiert und erneut unter Zuhilfenahme der MIP der Interkostalraum abgezählt (s. Abb. 5). Lag die Mamille auf Höhe des Verlaufs einer Rippe, so wurde in der Auswertung der ICR oberhalb dieser Rippe gewertet.

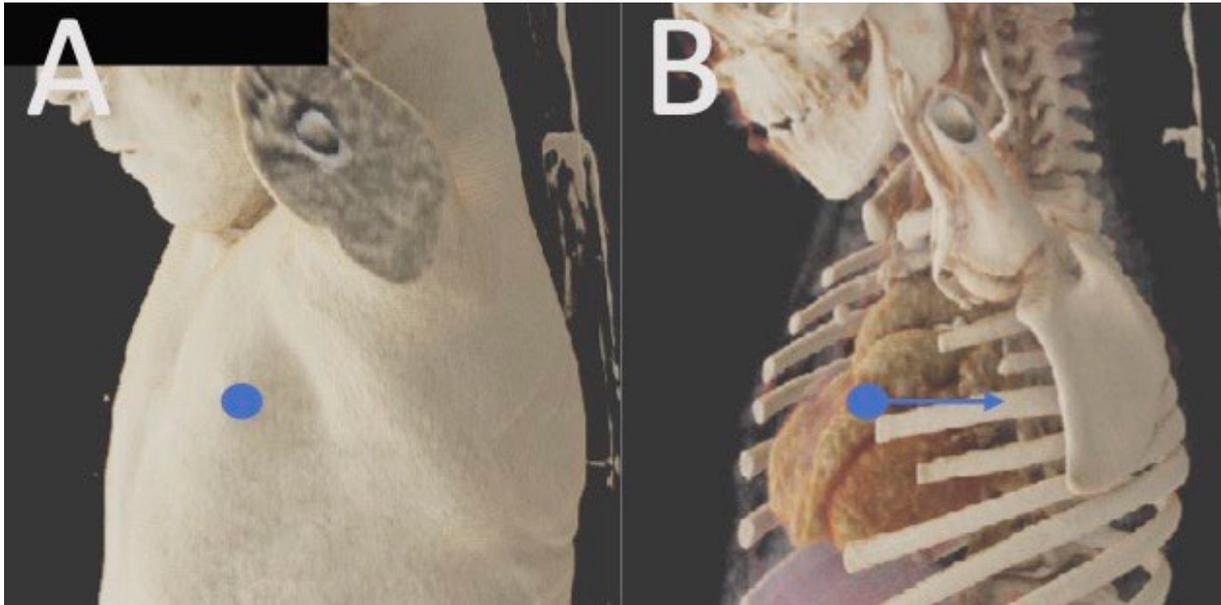


Abb. 5: A – Markierung der Mamille (blauer Punkt) B – Bestimmung der Höhe der Mamille in Bezug zum ICR in MAL (blauer Pfeil)

Weiterhin wurde ausgehend von der bereits eingezeichneten Höhe der Mamille die Distanz zum höchsten Punkt der Zwerchfellkuppel bestimmt (s. Abb. 6). Dies geschah wiederum in koronarer Schnittebene unter Einsatz der MIP. Reichte das Zwerchfell über die Mamillenhöhe hinaus, wurde der Wert mit einem negativen Vorzeichen versehen.

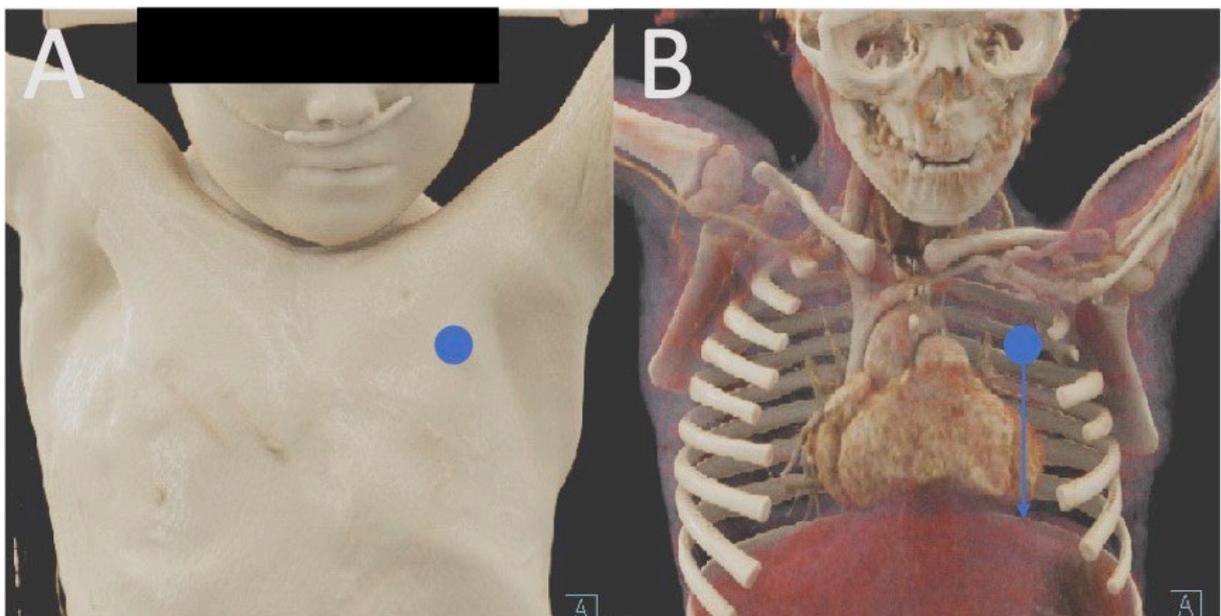


Abb. 6: A – Markierung der Mamille (blauer Punkt) B – Bestimmung der Distanz zwischen Mamille und höchstem Punkt des Zwerchfells (blauer Pfeil)

Die Messungen erfolgten auf der rechten und linken Thoraxseite gleichermaßen.

Tab. 1: Vitale Strukturen

Als „vital“ definierte Strukturen
Lungengefäße (größer als Segmentgefäße)
V. cava superior und inferior
Aorta
Rechter und linker Vorhof sowie rechter und linker Ventrikel
Bronchien (größer als Segmentbronchien)
Zwerchfell
Thymus
Oberes sowie hinteres, unteres Mediastinum

2.3 Auswertung der Messungen

Alle gemessenen Daten wurden in einer Excel-Tabelle erfasst, die statistische Analyse erfolgte anschließend mittels SAS Version 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA).

Stetige Variablen wurden als Mittelwert \pm Standardabweichung angegeben. Zur Signifikanztestung wurde, insofern nicht anders vermerkt, der T-Test für verbundene Stichproben verwendet und das Signifikanzniveau auf 5% festgelegt. Die Signifikanztestung zwischen den verschiedenen Punktionshöhen (MCL, MHL, Mamille, s. Kap. 2.2.1) erfolgte unter Verwendung der Beträge der Abstände zur vitalen Struktur. Wenn nicht anders vermerkt, wurde zur Korrelationsanalyse zwischen zwei quantitativen Merkmalen der Pearson-Korrelations-Koeffizient berechnet.

Die graphischen Darstellungen der Ergebnisse wurden mit Microsoft® Excel Version 16.34 erstellt.

Das Ethikvotum für diese Studie wurde bei der Ethikkommission II der Medizinischen Fakultät Mannheim der Universität Heidelberg eingeholt (Referenznummer 2019-837R).

3 ERGEBNISSE

3.1 Studienkollektiv

Von potentiell 353 in Frage kommenden Patienten wurden 143 aus verschiedenen Gründen ausgeschlossen (s. Abb. 7).

Der häufigste Ausschlussgrund war entweder das aktuelle Vorliegen einer angeborenen Zwerchfellhernie, vor allem bei den Säuglingen, Verlaufskontrolle nach operativ korrigierter Zwerchfellhernie sowie Rezidive kongenitaler Zwerchfellhernien bei älteren Kindern, da es sich beim Universitätsklinikum Mannheim um ein Zwerchfellhernien-Zentrum handelt, das europaweit die meisten Neugeborenen mit diesem Krankheitsbild pro Jahr behandelt. Es kann verschiedene Folgen für die Entwicklung von Lunge und Brustkorb haben (z.B. Lungenhypoplasie, Asymmetrie des Thorax mit Pectus excavatum, Mediastinalshift, Skoliose), sodass von einer vollständig normalen Anatomie selbst nach Therapie nicht ausgegangen werden kann.

Ein Ausschluss erfolgte auch bei den beiden Lungenfehlbildungen kongenitale zystisch adenomatoide Malformation der Lunge (CPAM), welche häufig eine Lobektomie nötig macht, und bronchopulmonale Dysplasie (BPD). Lagen in CT-Bildern Folgeschäden der genannten Erkrankungen vor, so führte dies gleichermaßen zum Ausschluss von der Studie.

Ebenfalls sehr häufig mussten Aufnahmen ausgeschlossen werden, weil die Clavicula darauf nicht vollständig abgebildet war, was jedoch für das korrekte Aufsuchen der Medioklavikularlinie essentiell war.

Noch einige andere Gründe bedingten den Ausschluss, wobei es sich um weitere Veränderungen an Lunge, Herz und Thorax handelte, bei denen die genaue bzw. repräsentative Vermessung nicht sicher gewährleistet erschien. Die unterschiedlichen Ausschlussgründe sind detailliert in Tab. 2 aufgelistet.

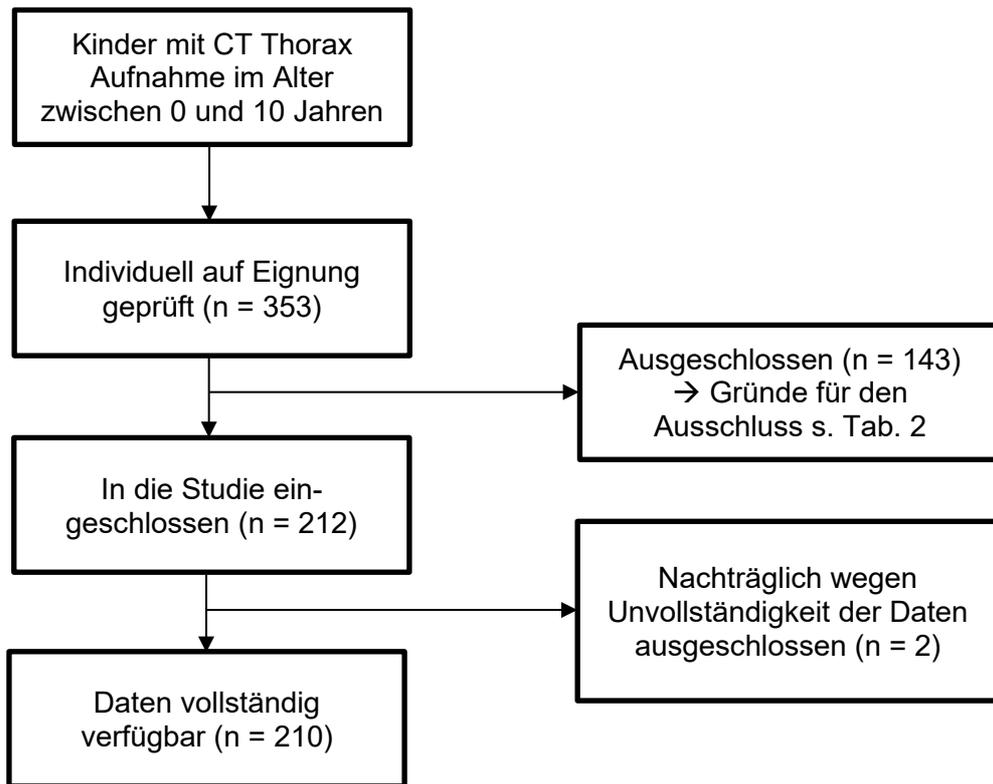


Abb. 7: Ablauf der Patientenselektion

Somit wurden letztlich die Aufnahmen von 210 Kindern im Alter von 0-10 Jahren analysiert. In den Altersgruppen 7, 9 und 10 Jahre konnte das definierte Ziel, 20 Datensätze zur Auswertung heranzuziehen, nicht vollständig erfüllt werden, da keine ausreichende Anzahl geeigneter Aufnahmen zur Verfügung stand.

Tab. 2: Ausschlussgründe

Grund für den Ausschluss	Anzahl ausgeschlossener Aufnahmen
Zwerchfellhernie/Z.n. Zwerchfellhernie/Rezidiv einer Zwerchfellhernie	51
Unvollständige Abbildung der Clavicula	29
Mediastinalshift	15
- davon nach Zwerchfellhernie	6
- davon bei CPAM	2
Pectus excavatum	7
Z.n. Lobektomie	7
- davon bei CPAM	4
Congenital Pulmonary Airway Malformation (CPAM)	6
Atelektasen	4
Skoliose	4
Bronchopulmonale Dysplasie (BPD)	3
Pleuraergüsse	2
Pneumothorax	2
Empyem	2
Emphysem	2
Seropneumothorax	1
Abszess	1
Intrathorakaler Tumor	1
Keilwirbel	1
Rippenfusion	1
Thoraxdeformität nach Unfall	1
Kardiomegalie	1
Massive Lungenmetastasen	1
Vernarbungen bei chronischem Asthma	1
gesamt	143

3.2 Demographische Daten

Ausgewertet wurden die CT-Bilder von 210 Kindern, die zum Zeitpunkt des Scans zwischen 0 Monaten (0 Jahre) und 131 Monaten (10,92 Jahre) alt waren (s. Tab. 3). Davon waren 121 (57,62%) Jungen und 89 (42,38%) Mädchen (s. Tab. 3).

Tab. 3: Alters- und Geschlechtsverteilung nach Gruppen

Altersgruppe	Durchschnittsalter (in Jahren)	männlich	weiblich	gesamt
0 Jahre	0,42	12 (60%)	8 (40%)	20 (9,52%)
1 Jahr	1,5	11 (55%)	9 (45%)	20 (9,52%)
2 Jahre	2,52	12 (60%)	8 (40%)	20 (9,52%)
3 Jahre	3,45	10 (50%)	10 (50%)	20 (9,52%)
4 Jahre	4,39	10 (50%)	10 (50%)	20 (9,52%)
5 Jahre	5,41	12 (60%)	8 (40%)	20 (9,52%)
6 Jahre	6,44	13 (65%)	7 (35%)	20 (9,52%)
7 Jahre	7,42	8 (50%)	8 (50%)	16 (7,62%)
8 Jahre	8,43	13 (65%)	7 (35%)	20 (9,52%)
9 Jahre	9,56	9 (56,25%)	7 (43,75%)	16 (7,62%)
10 Jahre	10,44	11 (61,11%)	7 (38,89%)	18 (8,57%)
alle	5,29	121 (57,62%)	89 (42,38%)	210

3.3 Anteriore Punktionsstelle (2. ICR, MCL)

3.3.1 Abstand und Lagebeziehung zwischen MCL und Mamille

Der Abstand der MCL zur Mamille betrug durchschnittlich $1,53 \pm 1,89$ cm rechts und $1,72 \pm 1,85$ cm links.

Rechts lag die Mamille in 97,14% der Fälle lateral der MCL, links in 99,05% (s. Tab. 4).

Tab. 4: Lage- und Streuungsmaße, Abstand zwischen Mamille und 2. ICR, MCL (Angaben in cm)

	Anzahl	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum	Standard- abweichung
rechts	210	1,53	1,51	-1,66	4,64	1,89
links	210	1,72	1,61	-0,68	4,6	1,85
	Mamille lateral MCL			Mamille medial MCL		
rechts	204 (97,14%)			6 (2,86%)		
links	208 (99,05%)			2 (0,95%)		

Zwischen rechter und linker Thoraxseite ergab sich ein geringer, aber im T-Test signifikanter Seitenunterschied von -0,2 cm ($p=0,012$).

Die Distanz zwischen MCL und Mamille war nicht mit dem Alter korreliert ($r=0,02$ rechts und $r=0,07$ links). Dies verdeutlichen die Regressionsgeraden in Abb. 8 A und B.

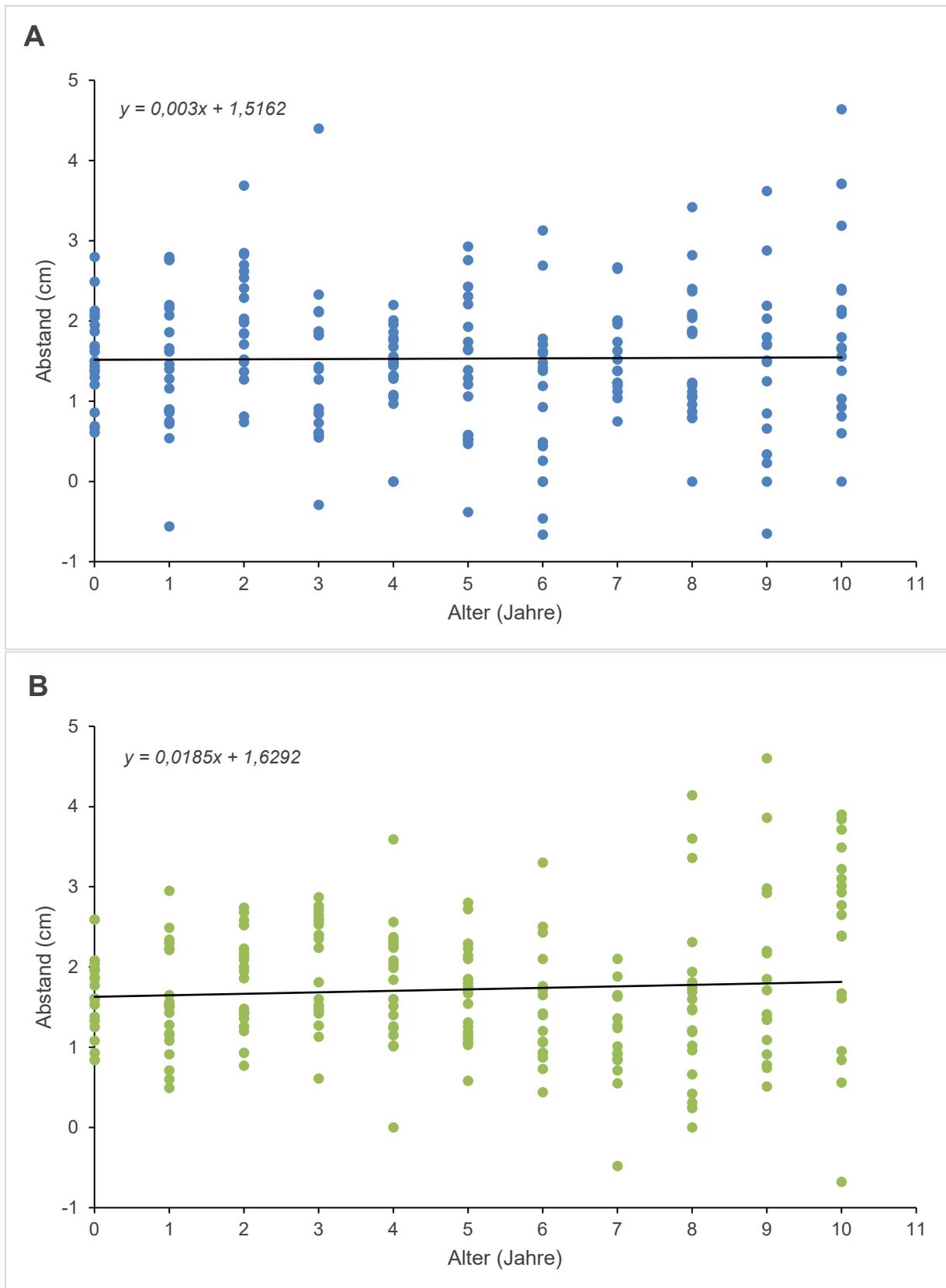


Abb. 8: A – Abstand MCL - Mamille in Abhängigkeit vom Alter rechts B – Abstand MCL - Mamille in Abhängigkeit vom Alter links

3.3.2 Abstand und Lagebeziehung zwischen MHL und Mamille

Der Abstand zwischen MHL und Mamille war durchschnittlich $1,47 \pm 0,72$ cm rechts sowie $1,67 \pm 0,70$ cm links.

Die Mamille kam in nur einem Fall rechts medial der MHL zu liegen, links in keinem (s. Tab. 5).

Tab. 5: Lage- und Streuungsmaße, Abstand zwischen MHL und Mamille (Angaben in cm)

	Anzahl	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum	Standard- abweichung
rechts	210	1,47	1,47	-0,16	4,27	0,72
links	210	1,67	1,62	0	4,69	0,70
	Mamille lateral MHL			Mamille medial MHL		
rechts	209 (99,52%)			1 (0,47%)		
links	210 (100%)			0 (0%)		

Es gab einen signifikanten Unterschied von -0,2 cm zwischen rechter und linker Thoraxseite ($p=0,0003$).

Der Abstand korrelierte nur sehr schwach mit dem Alter ($r=0,32$ rechts und $r=0,35$ links).

3.3.3 Abstand zwischen vitaler Struktur und MCL

Der Abstand der MCL zur vitalen Struktur betrug durchschnittlich $0,99 \pm 0,80$ cm rechts und $0,81 \pm 0,70$ cm links.

Dabei lag die vitale Struktur rechts in 159 Fällen medial der MCL, in 50 Fällen lateral. Auf der linken Seite lag die vitale Struktur 123 Mal medial, 87 Mal lateral der MCL (s. Tab. 6).

Tab. 6: Lage- und Streuungsmaße, Abstand zur vitalen Struktur 2. ICR, MCL (Angaben in cm)

	Anzahl	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum	Standardabweichung
rechts	209	0,99	0,84	0	4,31	0,80
links	210	0,81	0,65	0	3,83	0,70
	Vitale Struktur medial MCL			Vitale Struktur lateral MCL		
rechts	159 (76,08%)			50 (23,92%)		
links	123 (58,57%)			87 (41,43%)		

Zwischen rechter und linker Thoraxseite bestand im T-Test ein signifikanter Seitenunterschied von 0,18 cm ($p=0,0022$).

Die Distanz zwischen vitaler Struktur und MCL war nicht mit dem Alter korreliert ($r=0,13$ rechts und $r=0,002$ links). Die Regressionsgeraden in Abb. 9 A und B verdeutlichen die schlechte Vorhersagbarkeit des Abstands anhand des Alters.

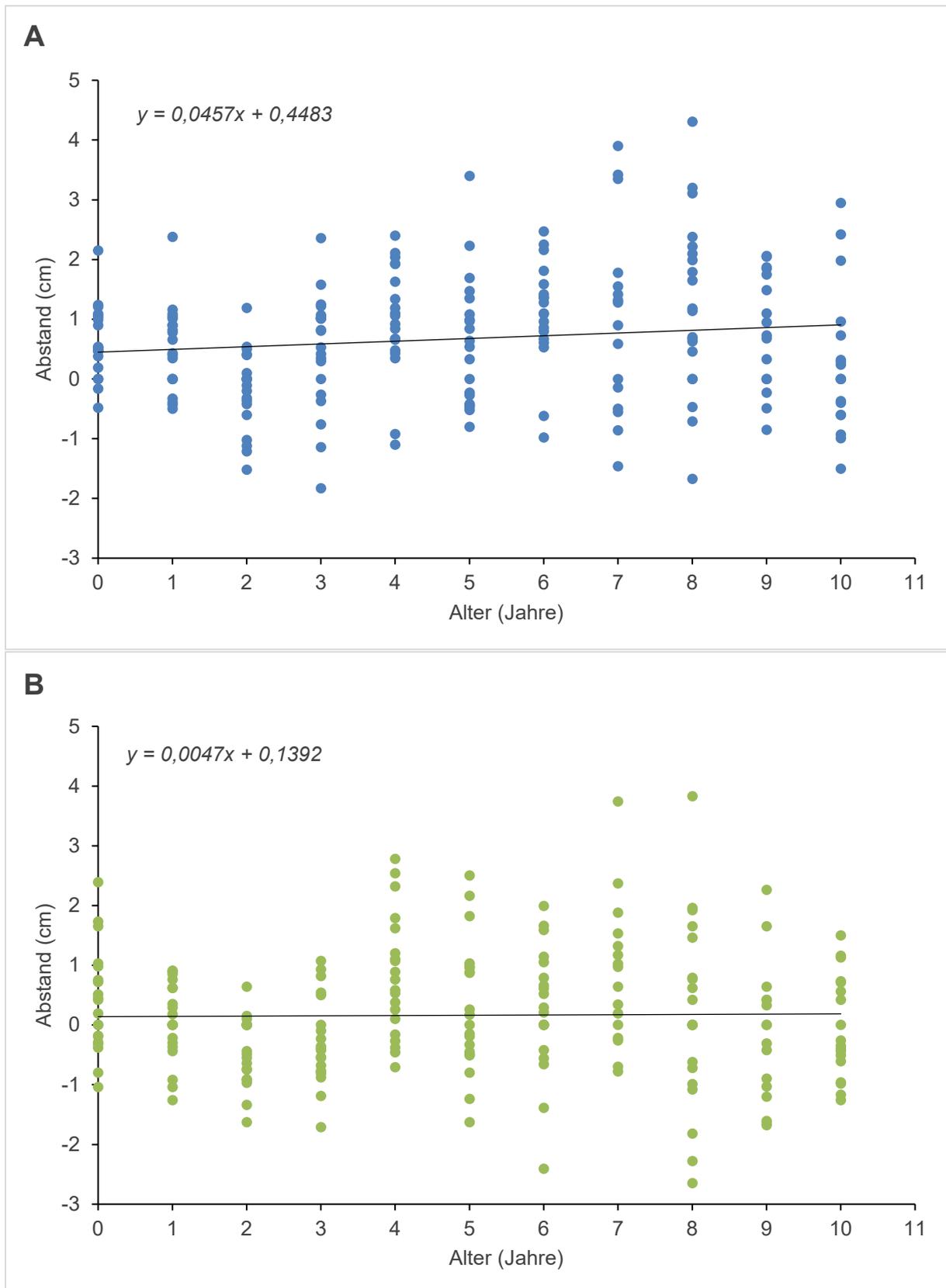


Abb. 9: A – Abstand vitale Struktur - MCL in Abhängigkeit vom Alter rechts B – Abstand vitale Struktur - MCL in Abhängigkeit vom Alter links

Es folgt eine Übersicht der vitalen Strukturen im 2. ICR und die Häufigkeit ihres Vorkommens als nächstgelegene bzw. getroffene Struktur zur MCL (s. Abb. 10 A). Die zweite Darstellung zeigt noch einmal separat die großen intrathorakalen Strukturen, deren Verletzung bei akzidenteller Punktion schwerwiegende Folgen nach sich ziehen kann (s. Kap. 3), nachdem die anatomisch sehr individuellen kleineren Gefäße ab Generation der Segmentarterien und -venen, Bronchien ab Größe der Segmentbronchien sowie das obere Mediastinum als „freier“ Raum zu Zwecken der Übersichtlichkeit aus der Grafik entfernt wurden (s. Abb. 10 B).

Rechts konnte bei einem Patienten die vitale Struktur wegen eines Artefakts nicht sicher bestimmt werden, weshalb diese in der Auswertung fehlt.

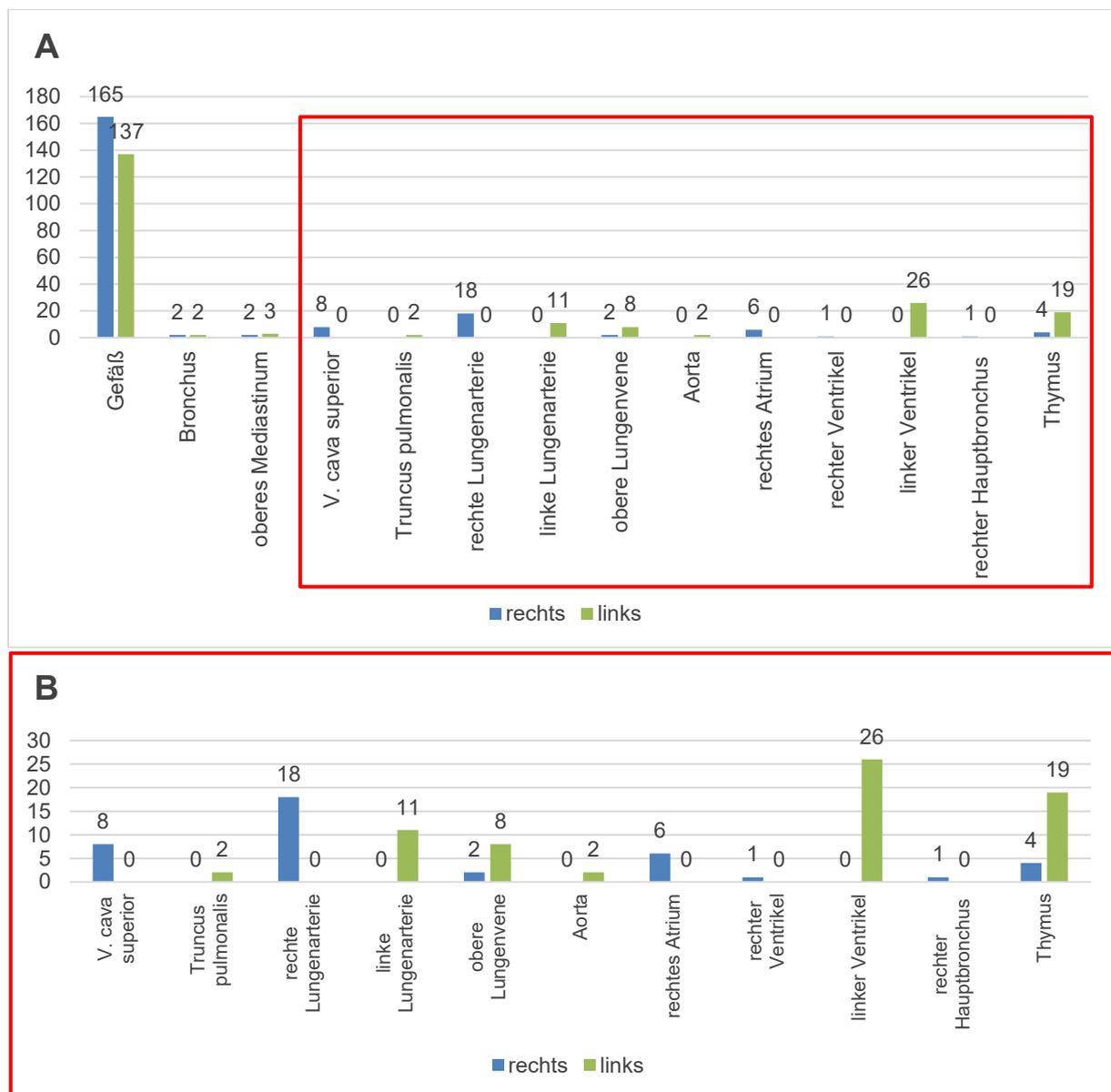


Abb. 10: A – Absolute Häufigkeit der einzelnen vitalen Strukturen im 2. ICR, MCL B – Absolute Häufigkeit der einzelnen vitalen Strukturen im 2. ICR, MCL modifiziert

3.3.4 Abstand zwischen vitaler Struktur und Mamille

Der Abstand zwischen vitaler Struktur und Mamille war rechts durchschnittlich $2,21 \pm 1,17$ cm groß, links $1,88 \pm 1,26$ cm.

Im T-Test bestand ebenfalls ein signifikanter Unterschied von 0,33 cm zwischen der rechten und linken Thoraxseite ($p=0,001$). Auch hier konnte keine Korrelation mit dem Alter festgestellt werden ($r=0,14$ rechts und $r=0,05$ links), was die Regressionsgeraden in Abb. 11 A und B noch einmal darstellen.

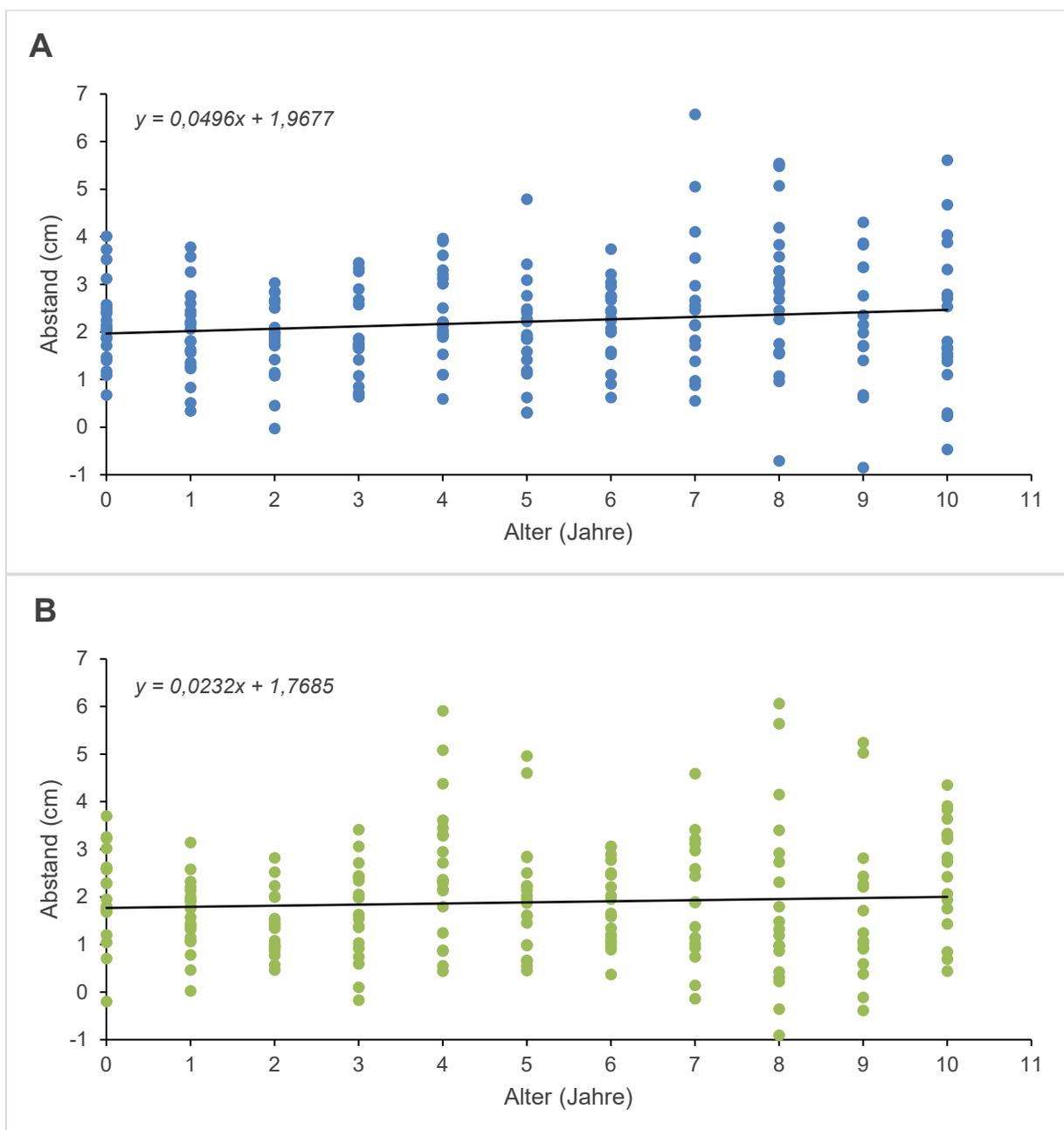


Abb. 11: A – Abstand vitale Struktur - Mamille in Abhängigkeit vom Alter rechts B – Abstand vitale Struktur - Mamille in Abhängigkeit vom Alter links

3.3.5 Abstand zwischen vitaler Struktur und MHL

Der Abstand zwischen vitaler Struktur und MHL betrug durchschnittlich $0,98 \pm 0,73$ cm rechts und $0,79 \pm 0,71$ cm links.

Eine vergleichende Übersicht der Werte bezüglich des Abstandes zur nächstgelegenen vitalen Struktur getrennt nach Thoraxseiten und ausgehend von den verschiedenen Punktionshöhen (MCL, Mamille, nachfolgend als Mamillarlinie bezeichnet, und MHL) gibt Abb. 12 A-F.

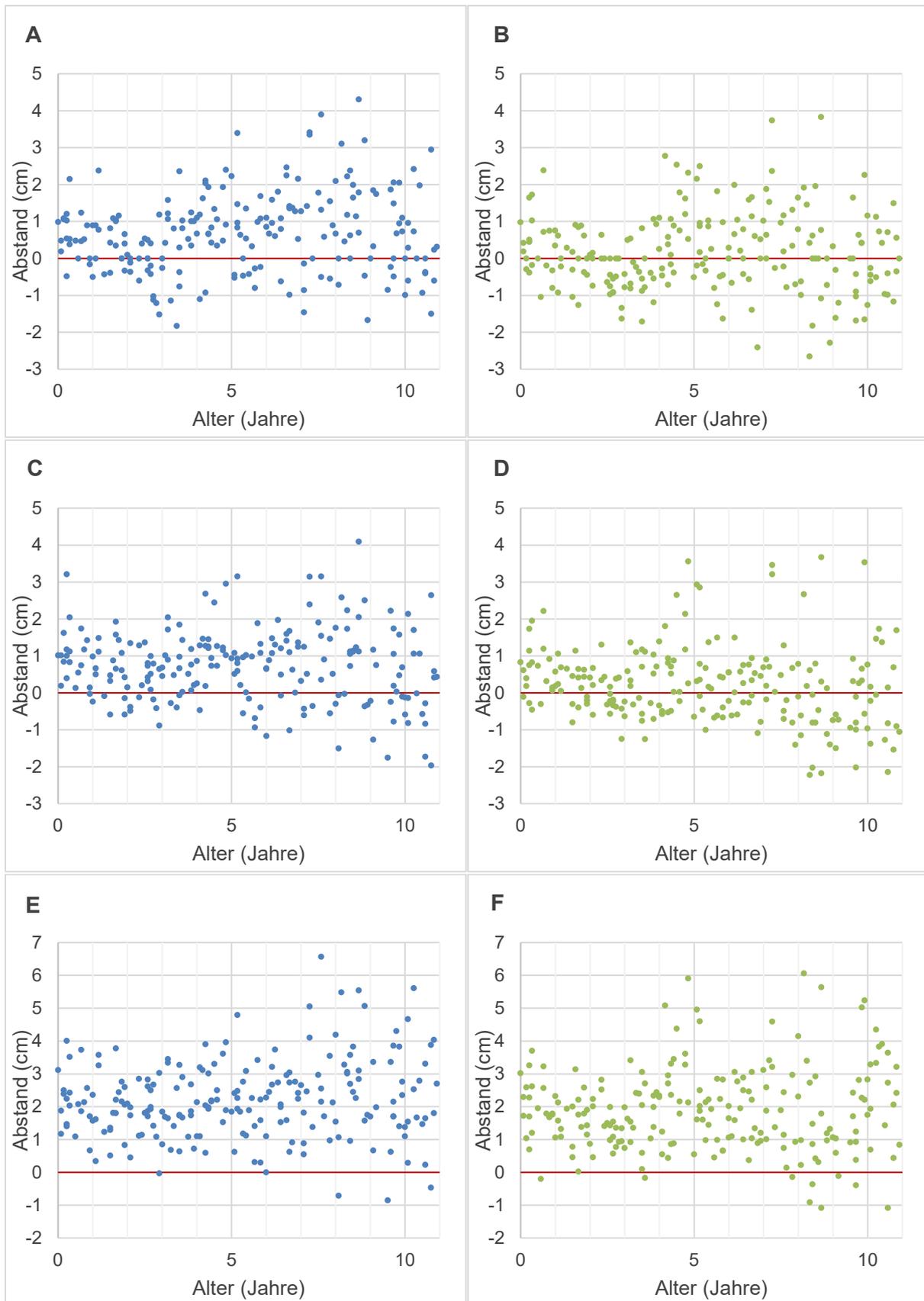


Abb. 12: Abstand zur vitalen Struktur ausgehend von den verschiedenen Punktionshöhen im 2. ICR
 A – 2. ICR, MCL rechts B – 2. ICR, MCL links C – 2. ICR, MHL rechts D – 2. ICR, MHL links
 E – 2. ICR, Mamillarlinie rechts F – 2. ICR, Mamillarlinie links

3.3.6 Vergleich zwischen MCL, MHL und Mamillarlinie als Punktionsort im 2. ICR

Der Abstand der MHL zur vitalen Struktur war verglichen mit dem Abstand der MCL zur vitalen Struktur nicht signifikant größer ($p=0,75$ rechts und $p=0,62$ links).

Dagegen war der Abstand der Mamille zur vitalen Struktur im Vergleich zum Abstand der MCL zur vitalen Struktur signifikant deutlich größer ($p<0,0001$ auf beiden Seiten). Auch der Vergleich zwischen MHL und Mamille zeigte einen signifikant größeren Abstand zur vitalen Struktur auf Höhe der Mamillarlinie ($p<0,0001$ auf beiden Seiten).

Die genauen Abstandsunterschiede können Tab. 7 entnommen werden und sind in Abb. 14 graphisch dargestellt.

Tab. 7: Durchschnittliche Unterschiede im Abstand zur vitalen Struktur zwischen den drei Punktionsorten im 2. ICR (Angaben in cm)

Vergleich „Abstand zur vitalen Struktur“	rechts	links
MCL vs. MHL	0,01 ($p=0,75$)	0,02 ($p=0,62$)
MCL vs. Mamillarlinie	-1,24 ($p<0,0001$)	-1,12 ($p<0,0001$)
MHL vs. Mamillarlinie	-1,25 ($p<0,0001$)	-1,14 ($p<0,0001$)

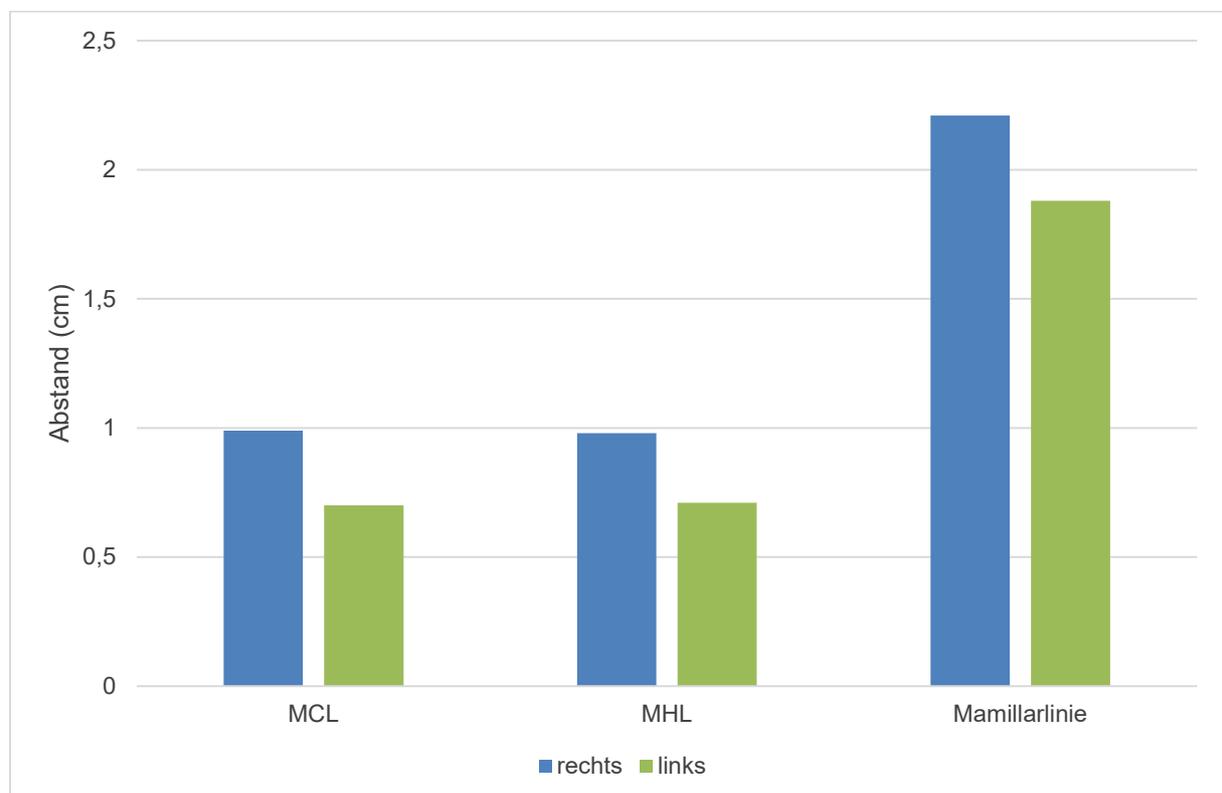


Abb. 14: Durchschnittlicher Abstand zur vitalen Struktur im Vergleich

3.4 Laterale Punktionsstelle (4. und 5. ICR, MAL)

3.4.1 Höhe der Mamille in Bezug zum ICR

Die Spannweite der Interkostalräume, auf deren Höhe die Mamille zu liegen kam, reichte rechts vom 3. bis 7. ICR, links vom 2. bis 6. ICR.

Im Großteil der Fälle war die Brustwarze auf beiden Thoraxseiten in Höhe des 4. oder 5. ICR zu finden (in 83,80% rechts und 88,09% links, s. Abb. 15). Wenn sie nicht auf Höhe des 4. oder 5. ICR zu liegen kam, befand sie sich in ca. 2 Drittel der Fälle im 6. ICR und in ca. 1 Drittel der Fälle im 3. ICR.

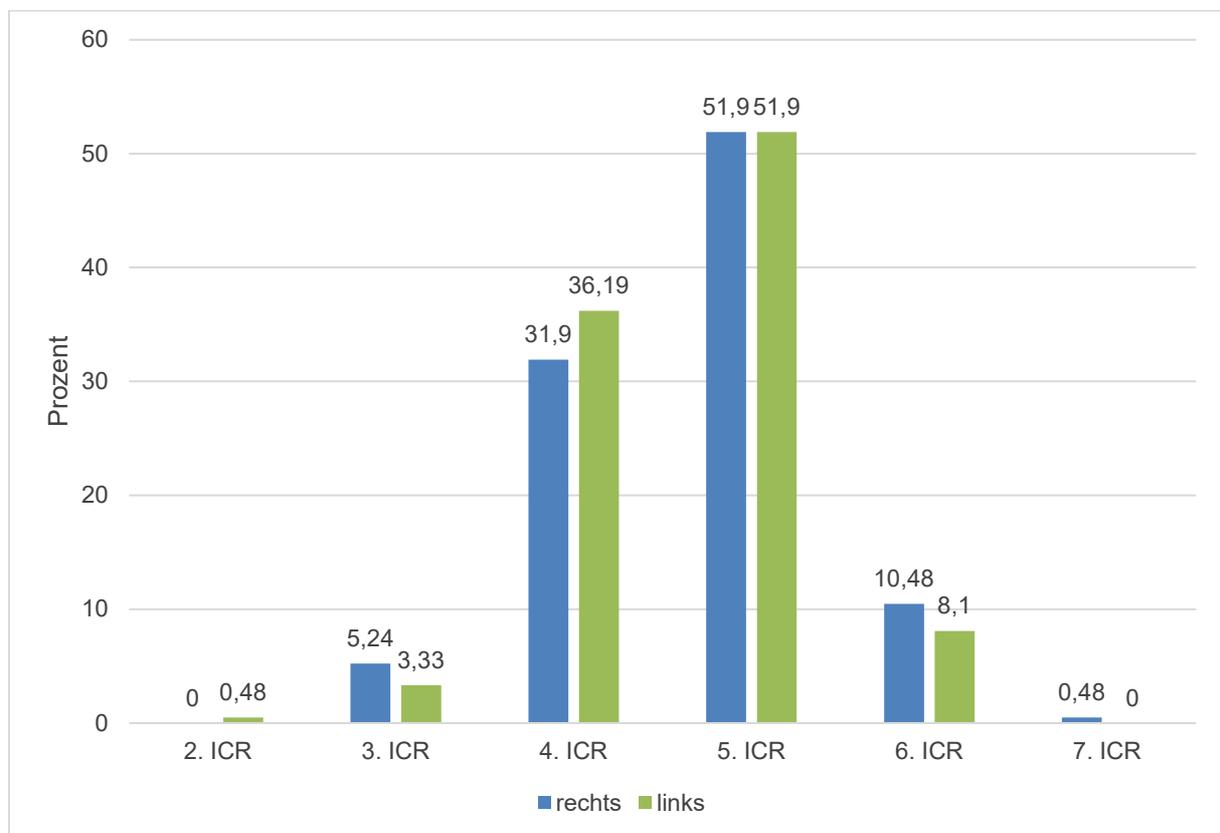


Abb. 15: Höhe der Mamille im Bezug zum ICR

Eine genauere Übersicht über die Verteilung in den einzelnen Altersklassen zeigen die Tab. 8 A und B.

Tab. 8 A: Höhe der Mamille in Bezug zum ICR rechts getrennt nach Altersgruppen, Anzahl der Fälle sowie prozentualer Anteil innerhalb der Altersgruppe

Alters- gruppe	3. ICR	4. ICR	5. ICR	6. ICR	7. ICR	gesamt
0	1 (5%)	5 (25%)	11 (55%)	3 (15%)	0 (0%)	20
1	1 (5%)	6 (30%)	12 (60%)	1 (5%)	0 (0%)	20
2	2 (10%)	6 (30%)	10 (50%)	2 (10%)	0 (0%)	20
3	1 (5%)	8 (40%)	9 (45%)	2 (10%)	0 (0%)	20
4	2 (10%)	6 (30%)	10 (50%)	2 (10%)	0 (0%)	20
5	0 (0%)	10 (50%)	9 (45%)	1 (5%)	0 (0%)	20
6	1 (5%)	6 (30%)	13 (65%)	0 (0%)	0 (0%)	20
7	2 (12,50%)	2 (12,50%)	8 (50%)	4 (25%)	0 (0%)	16
8	1 (5%)	4 (20%)	12 (60%)	2 (10%)	1 (5%)	20
9	0 (0%)	6 (37,50%)	9 (56,25%)	1 (6,25%)	0 (0%)	16
10	0 (0%)	8 (44,44%)	6 (33,33%)	4 (22,22%)	0 (0%)	18
gesamt	11 (5,24%)	67 (31,90%)	109 (51,90%)	22 (10,48%)	1 (0,48%)	210

Tab. 8 B: Höhe der Mamille in Bezug zum ICR links getrennt nach Altersgruppen, Anzahl der Fälle sowie prozentualer Anteil innerhalb der Altersgruppe

Alters- gruppe	2. ICR	3. ICR	4. ICR	5. ICR	6. ICR	gesamt
0	0 (0%)	1 (5%)	7 (35%)	11 (55%)	1 (5%)	20
1	0 (0%)	0 (0%)	7 (35%)	13 (65%)	0 (0%)	20
2	0 (0%)	2 (10%)	8 (40%)	9 (45%)	1 (5%)	20
3	1 (5%)	1 (5%)	8 (40%)	8 (40%)	2 (10%)	20
4	0 (0%)	1 (5%)	9 (45%)	9 (45%)	1 (5%)	20
5	0 (0%)	0 (0%)	8 (40%)	12 (60%)	0 (0%)	20
6	0 (0%)	1 (5%)	7 (35%)	9 (45%)	3 (15%)	20
7	0 (0%)	1 (6,25%)	5 (31,25%)	7 (43,75%)	3 (18,75%)	16
8	0 (0%)	0 (0%)	4 (20%)	15 (75%)	1 (5%)	20
9	0 (0%)	0 (0%)	5 (31,25%)	11 (68,75%)	0 (0%)	16
10	0 (0%)	0 (0%)	8 (44,44%)	5 (27,78%)	5 (27,78%)	18
gesamt	1 (0,48%)	7 (3,33%)	76 (36,19%)	109 (51,90%)	17 (8,10%)	210

Für die Höhe der Mamille im Bezug zum ICR konnte keinerlei Korrelation mit dem Alter nachgewiesen werden (Spearman-Korrelations-Koeffizient $r=0,03$ rechts und $r=0,12$ links).

Weiterhin unterschied sich die Höhe nicht signifikant zwischen weiblichen und männlichen Kindern, weder auf der rechten noch auf der linken Thoraxseite (s. Abb. 16 A und B). Der U-Test nach Mann und Whitney zeigte $p=0,14$ rechts und $p=0,24$ links.

Grundsätzlich fand sich sowohl bei Mädchen als auch bei Jungen am häufigsten der 5. ICR auf Mamillenhöhe, mit Ausnahme bei den weiblichen Kindern am linken Hemithorax: Hier waren 4. und 5. ICR in etwa gleich oft vertreten (s. Abb. 16 B).

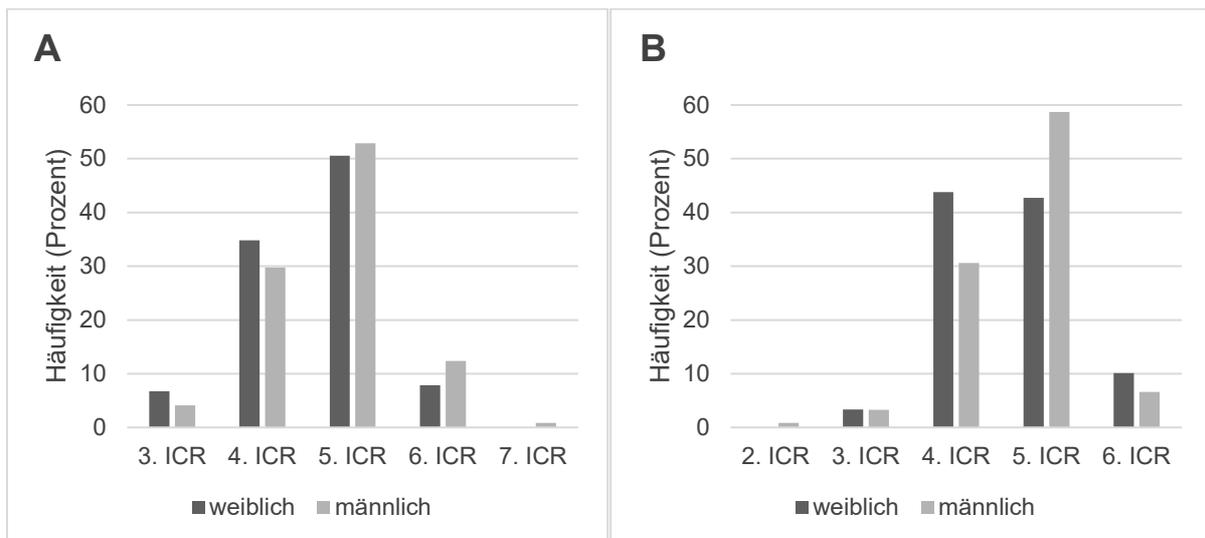


Abb. 16: A – Häufigkeit der ICRs auf Höhe der Mamille getrennt nach Geschlecht rechts
B – Häufigkeit der ICRs auf Höhe der Mamille getrennt nach Geschlecht links

3.4.2 Abstand der Mamille zum Zwerchfell

Der durchschnittliche Abstand der Mamille zum höchsten Punkt des Zwerchfells betrug $2,63 \pm 1,85$ cm rechts und $3,40 \pm 1,86$ cm links (s. Tab. 9).

In 7,14% der Fälle erreichte die Zwerchfellkuppel rechts die Höhe der Mamille oder ragte darüber hinaus, links war dies in 2,86% der Fälle. Bei einem 7-jährigen Kind befand sich der höchste Punkt des Diaphragmas verglichen mit den übrigen Werten besonders weit oberhalb der Mamille (s. Tab. 9, s. Abb. 17 A und B).

Tab. 9: Lage- und Streuungsmaße, Abstand der Mamille zum höchsten Punkt des Zwerchfells (Angaben in cm)

	Anzahl	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum	Standardabweichung
rechts	210	2,63	2,43	-4,40	7,32	1,85
links	210	3,40	3,33	-4,14	8,52	1,86

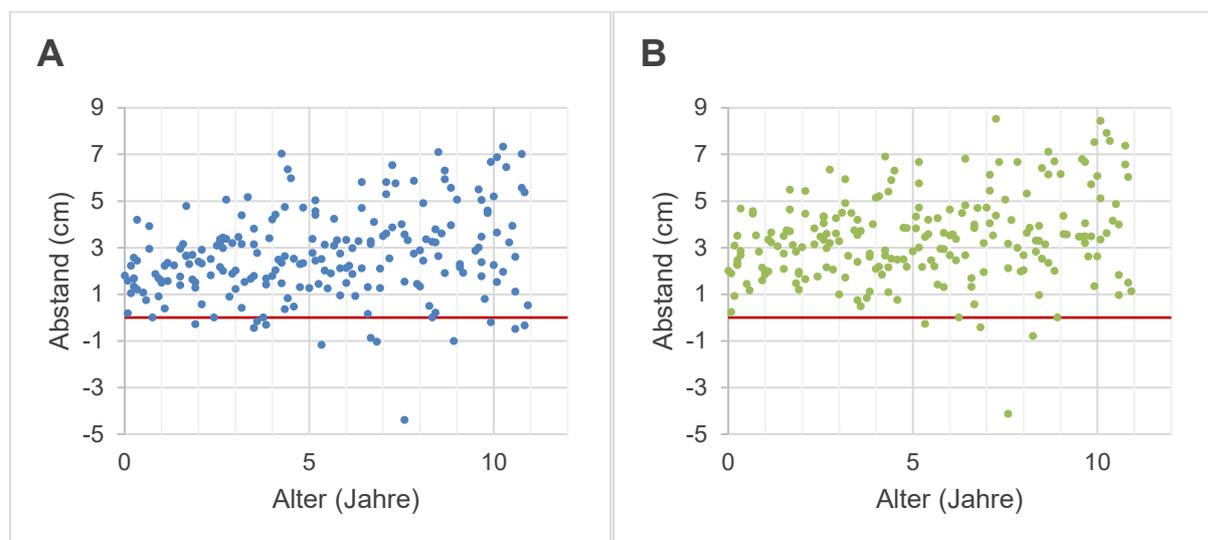


Abb. 17: A – Abstand zwischen Mamille und Zwerchfell rechts B – Abstand zwischen Mamille und Zwerchfell links

Im T-Test zeigte sich, dass zwischen rechter und linker Thoraxseite ein signifikanter Unterschied von $-0,77$ cm bestand ($p < 0,0001$). Eine Korrelation mit dem Alter bestand nicht ($r = 0,26$ rechts und $r = 0,25$ links). Der geringe Einfluss des Alters zeigt sich in den Regressionsgeraden in Abb. 18 A und B.

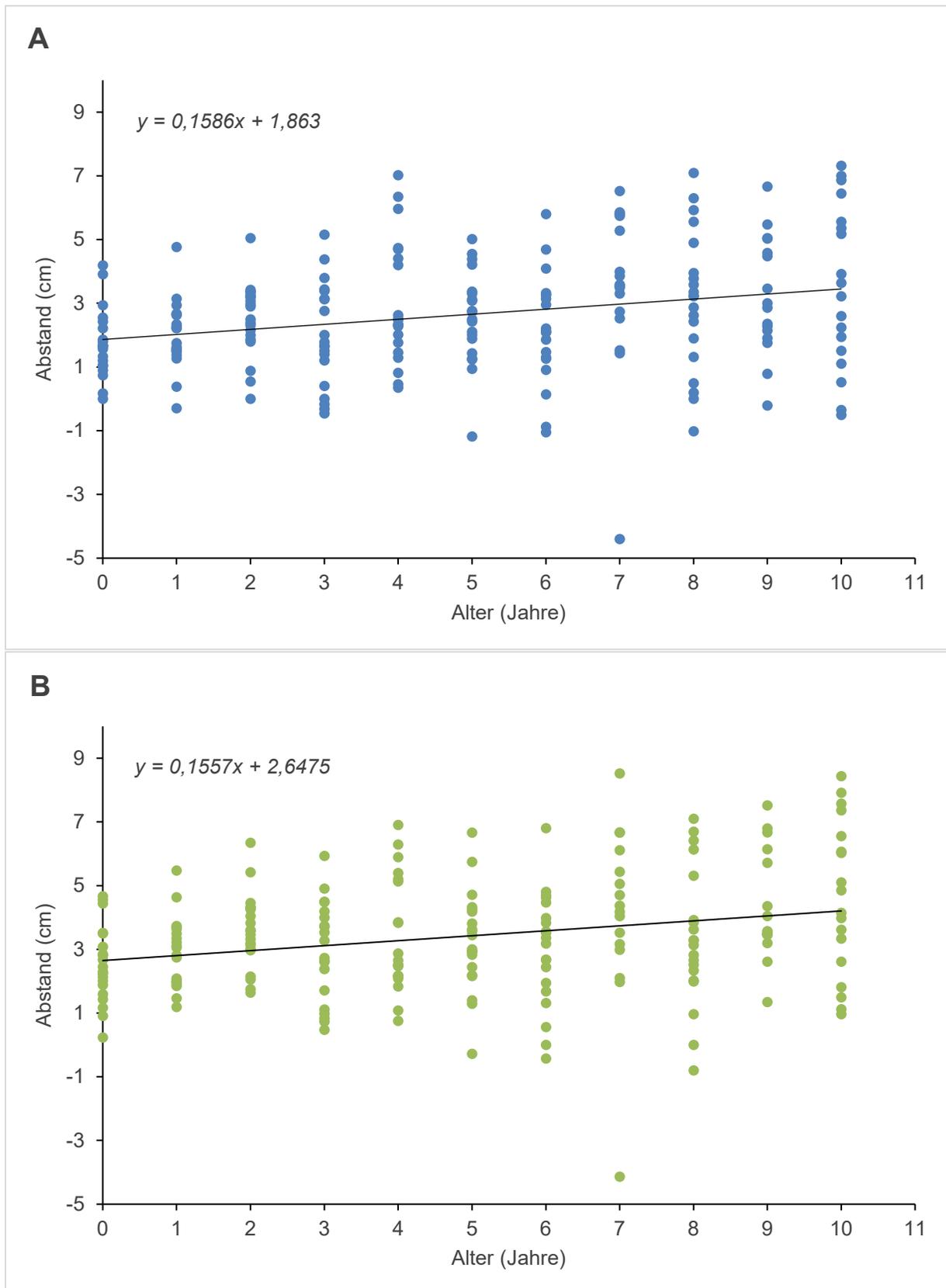


Abb. 18: A – Abstand Mamille - Zwerchfell in Abhängigkeit vom Alter rechts B – Abstand Mamille - Zwerchfell in Abhängigkeit vom Alter links

3.4.3 Tiefe zur vitalen Struktur im 4. ICR, MAL

Die Tiefe zur nächsten vitalen Struktur im 4. ICR lag durchschnittlich bei $6,52 \pm 1,90$ cm rechts und $5,71 \pm 1,57$ cm links (s. Tab. 10). Eine detaillierte Übersicht der Durchschnittswerte für die einzelnen Altersgruppen gibt Tab. 11, welche Abb. 18 graphisch darstellt.

Tab. 10: Lage- und Streuungsmaße, Tiefe zur vitalen Struktur 4. ICR, MAL (Angaben in cm)

	Anzahl	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum	Standard- abweichung
rechts	210	6,52	6,40	2,79	11,80	1,90
links	210	5,71	5,53	2,19	10,62	1,57

Tab. 11: Mittelwert \pm Standardabweichung, Tiefe zur vitalen Struktur 4. ICR, MAL getrennt nach Altersgruppen (Angaben in cm)

	0 Jahre	1 Jahr	2 Jahre	3 Jahre	4 Jahre	5 Jahre	6 Jahre	7 Jahre	8 Jahre	9 Jahre	10 Jahre
rechts	4,29	4,68	5,84	6,77	6,38	6,92	7,08	6,77	7,49	7,30	8,51
	\pm 1,69	\pm 1,03	\pm 1,14	\pm 1,30	\pm 0,95	\pm 1,17	\pm 1,58	\pm 2,01	\pm 1,98	\pm 1,76	\pm 2,14
links	3,89	4,49	4,69	5,25	6,17	5,73	5,84	6,07	6,62	6,39	8,12
	\pm 0,91	\pm 0,97	\pm 0,66	\pm 0,94	\pm 1,03	\pm 1,22	\pm 1,11	\pm 1,08	\pm 1,42	\pm 1,46	\pm 1,25

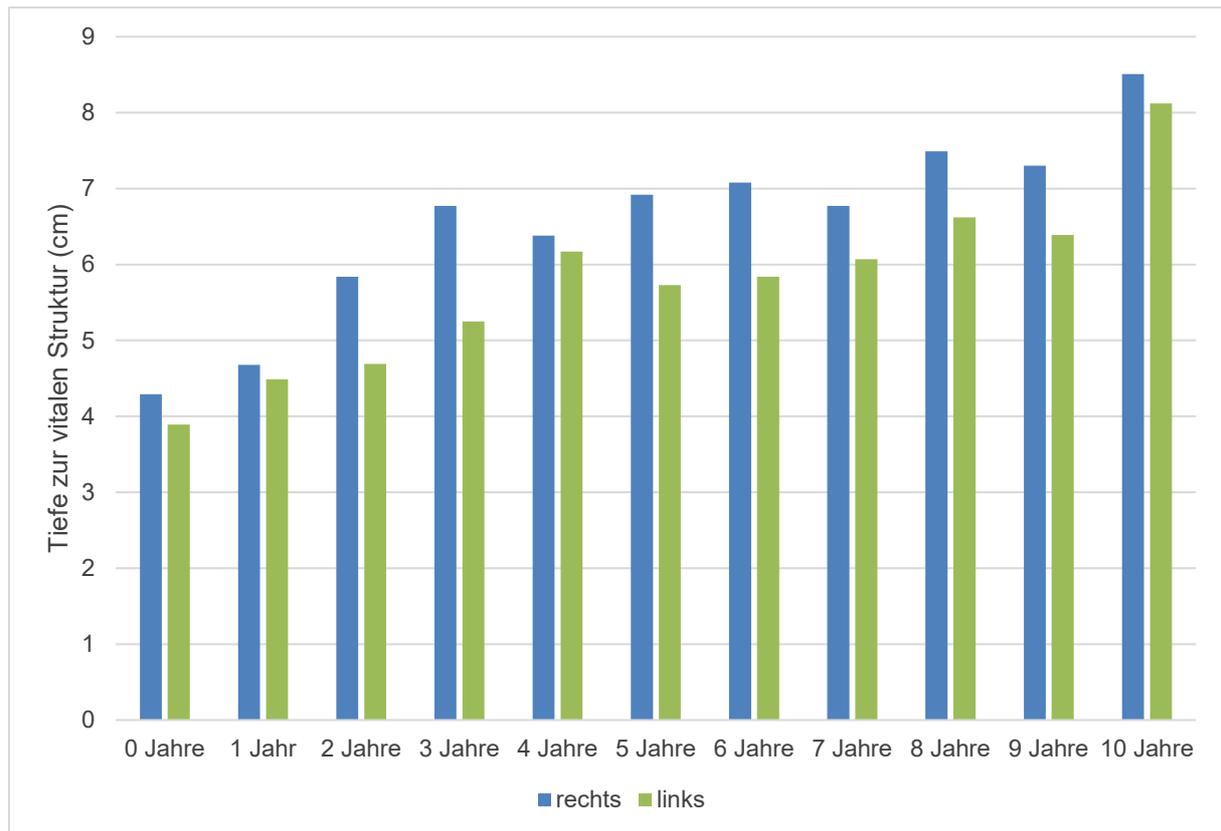


Abb. 19: Durchschnittliche Tiefe zur vitalen Struktur im 4. ICR, MAL getrennt nach Altersgruppen und Thoraxseite

Geht man in Bezug auf die verwendeten Nadellängen von 2,5 cm für die 0-Jährigen, 3,2 cm für die 5-Jährigen und 4,5 cm für die 10-Jährigen aus (s. Kap. 4.2.3), so zeigt Tab. 12 die Anzahl der Fälle, in denen bei vollständiger Insertion der Kanüle die Tiefe zur vitalen Struktur geringer war als die Länge der Nadel.

Tab. 12: Anzahl der Fälle (sowie prozentualer Anteil an der jeweiligen Altersgruppe), wenn empfohlene Kanüle länger als Tiefe zur nächstgelegenen vitalen Struktur im 4. ICR, MAL

	0 Jahre, TVS < 2,5 cm	5 Jahre, TVS < 3,2 cm	10 Jahre, TVS < 4,5 cm
rechts	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
links	1 (5%)	0 (0%)	0 (0%)

Box-and-Whisker-Plots für die Tiefe zur vitalen Struktur im 4. ICR, MAL finden sich in Abb. 20.

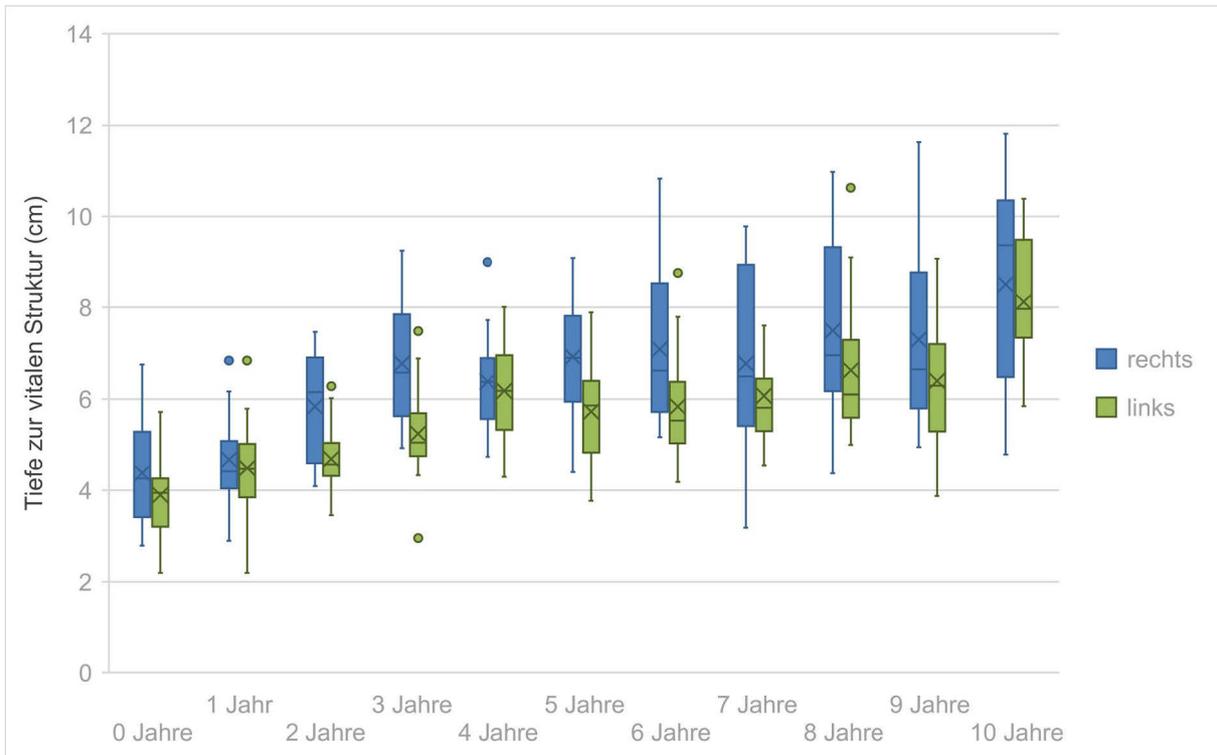


Abb. 20: Box-and-Whisker-Plots für die Tiefe zur vitalen Struktur im 4. ICR, MAL getrennt nach Altersgruppen und Thoraxseite

Die folgende Abbildung zeigt eine Übersicht der vitalen Strukturen im 4. ICR MAL und die Häufigkeit ihres Vorkommens (s. Abb. 21).

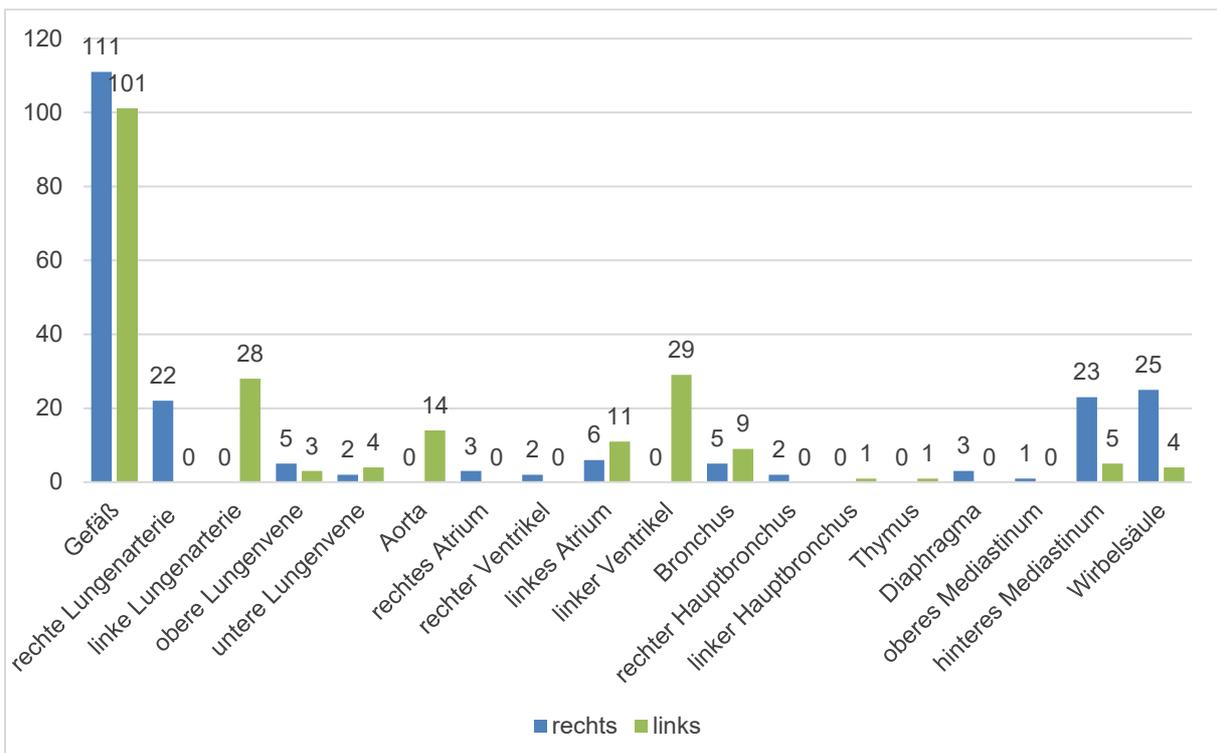


Abb. 21: Absolute Häufigkeit der einzelnen vitalen Strukturen im 4. ICR, MAL

3.4.4 Tiefe zur vitalen Struktur im 5. ICR, MAL

Im 5. ICR betrug die Tiefe zur nächsten vitalen Struktur durchschnittlich $6,31 \pm 2,22$ cm rechts und $5,68 \pm 1,57$ cm links (s. Tab. 13). Tab. 14 bildet die Durchschnittswerte der Altersklassen einzeln ab, die graphische Darstellung folgt in Abb. 22.

Tab. 13: Lage- und Streuungsmaße, Tiefe zur vitalen Struktur 5. ICR, MAL (Angaben in cm)

	Anzahl	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum	Standard- abweichung
rechts	210	6,31	6,06	1,50	14,19	2,22
links	210	5,68	5,40	1,70	10,80	1,57

Tab. 14: Mittelwert \pm Standardabweichung, Tiefe zur vitalen Struktur 5. ICR, MAL getrennt nach Altersgruppen (Angaben in cm)

	0 Jahre	1 Jahr	2 Jahre	3 Jahre	4 Jahre	5 Jahre	6 Jahre	7 Jahre	8 Jahre	9 Jahre	10 Jahre
rechts	4,32	4,83	5,95	5,78	7,08	6,53	5,72	7,23	7,13	6,74	8,64
	\pm 1,38	\pm 1,19	\pm 0,96	\pm 2,18	\pm 1,81	\pm 1,96	\pm 1,87	\pm 1,88	\pm 1,71	\pm 2,11	\pm 3,07
links	3,80	4,51	4,86	5,54	6,22	5,93	5,69	6,18	6,41	6,67	7,15
	\pm 0,83	\pm 1,12	\pm 0,59	\pm 1,42	\pm 1,16	\pm 1,37	\pm 1,17	\pm 1,03	\pm 1,52	\pm 1,55	\pm 1,61

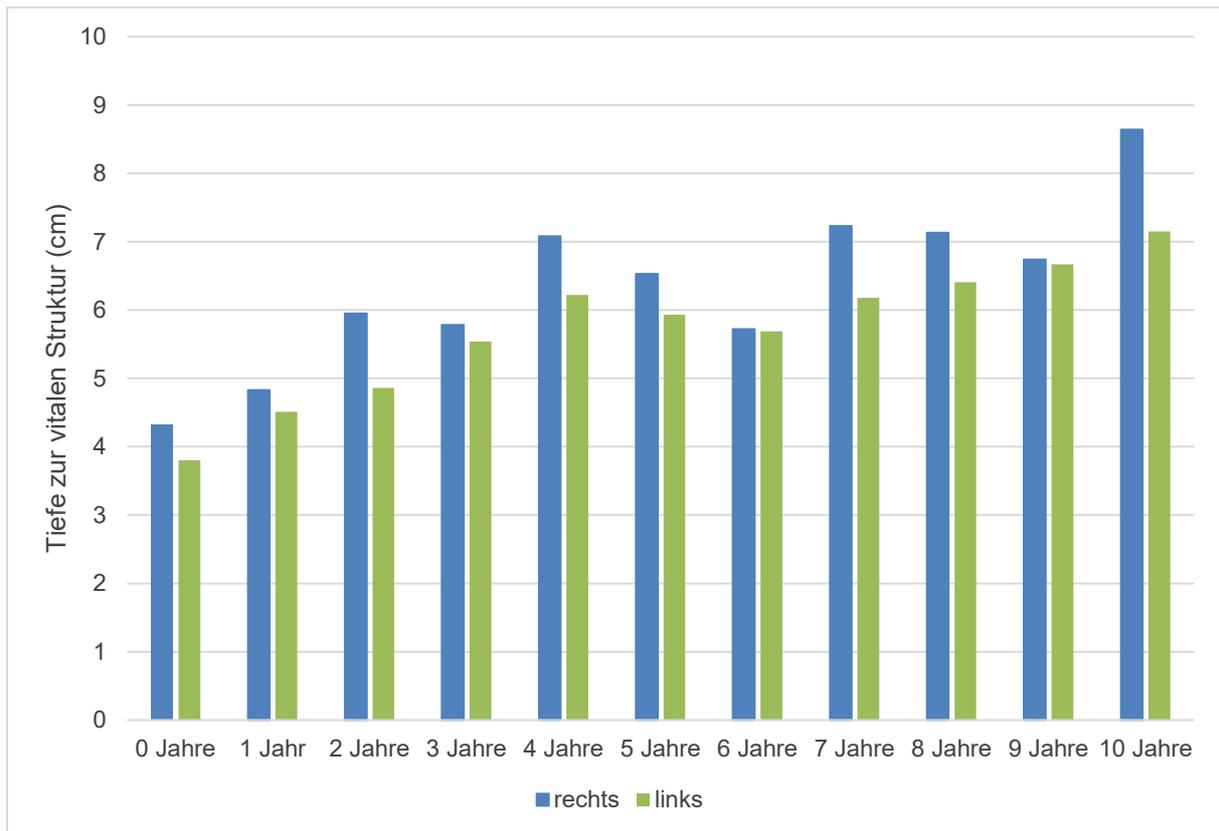


Abb. 22: Durchschnittliche Tiefe zur vitalen Struktur im 5. ICR, MAL getrennt nach Altersgruppen und Thoraxseite

Die Anzahl der Fälle, in denen die für die verschiedenen Altersgruppen empfohlene Nadellänge die Tiefe zur vitalen Struktur überschreitet, kann erneut Tab. 15 entnommen werden.

Tab. 15: Absolute Anzahl (sowie prozentualer Anteil an der jeweiligen Altersgruppe), wenn empfohlene Kanüle länger als Tiefe zur nächstgelegenen vitalen Struktur im 5. ICR, MAL

	0 Jahre, TVS < 2,5 cm	5 Jahre, TVS < 3,2 cm	10 Jahre, TVS < 4,5 cm
rechts	3 (15%)	2 (10%)	3 (16,67%)
links	2 (10%)	0 (0%)	2 (11,11%)

Abb. 23 zeigt die Box-and-Whisker-Plots für den 5. ICR in MAL und die Tiefe zur vitalen Struktur.

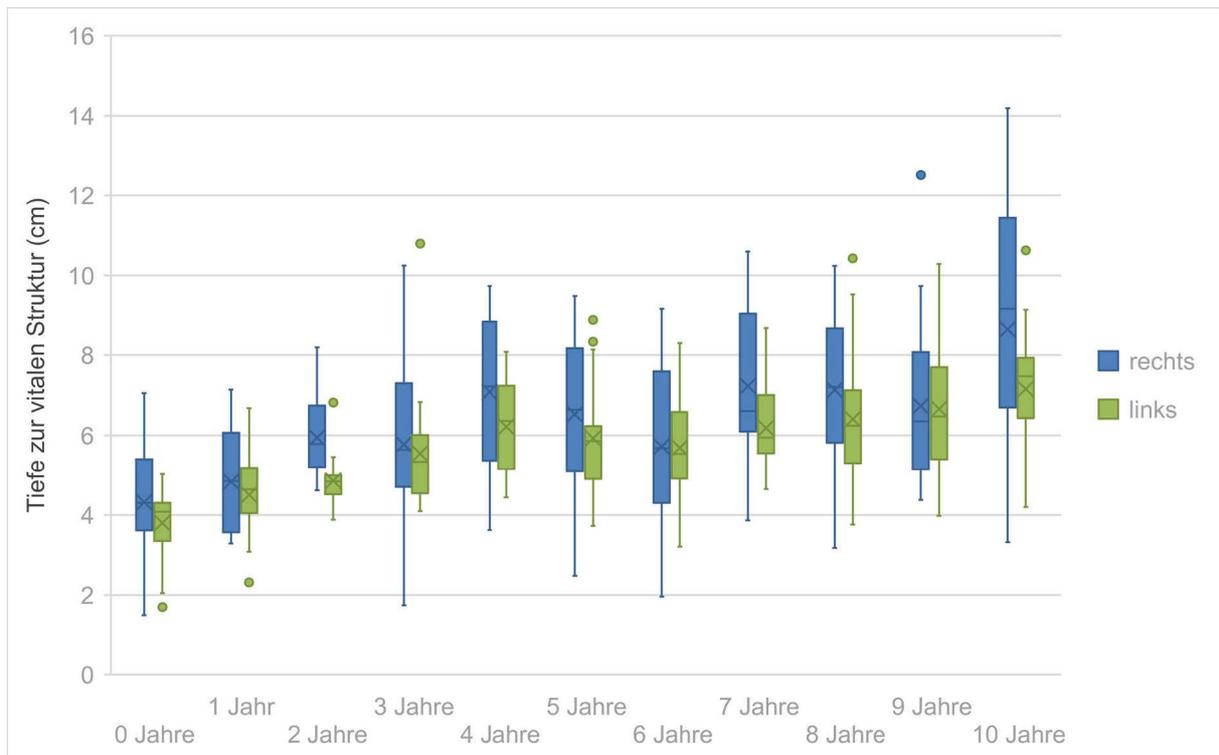


Abb. 23: Box-and-Whisker-Plots für die Tiefe zur vitalen Struktur im 5. ICR, MAL getrennt nach Altersgruppen und Thoraxseite

Es folgt auch hier eine Übersicht der vitalen Strukturen im 5. ICR, MAL und die Häufigkeit ihres Vorkommens (s. Abb. 24).

Rechts konnte bei einem Patienten die vitale Struktur aufgrund eines Infiltrates nicht bestimmt werden, weshalb diese in der Auswertung fehlt.

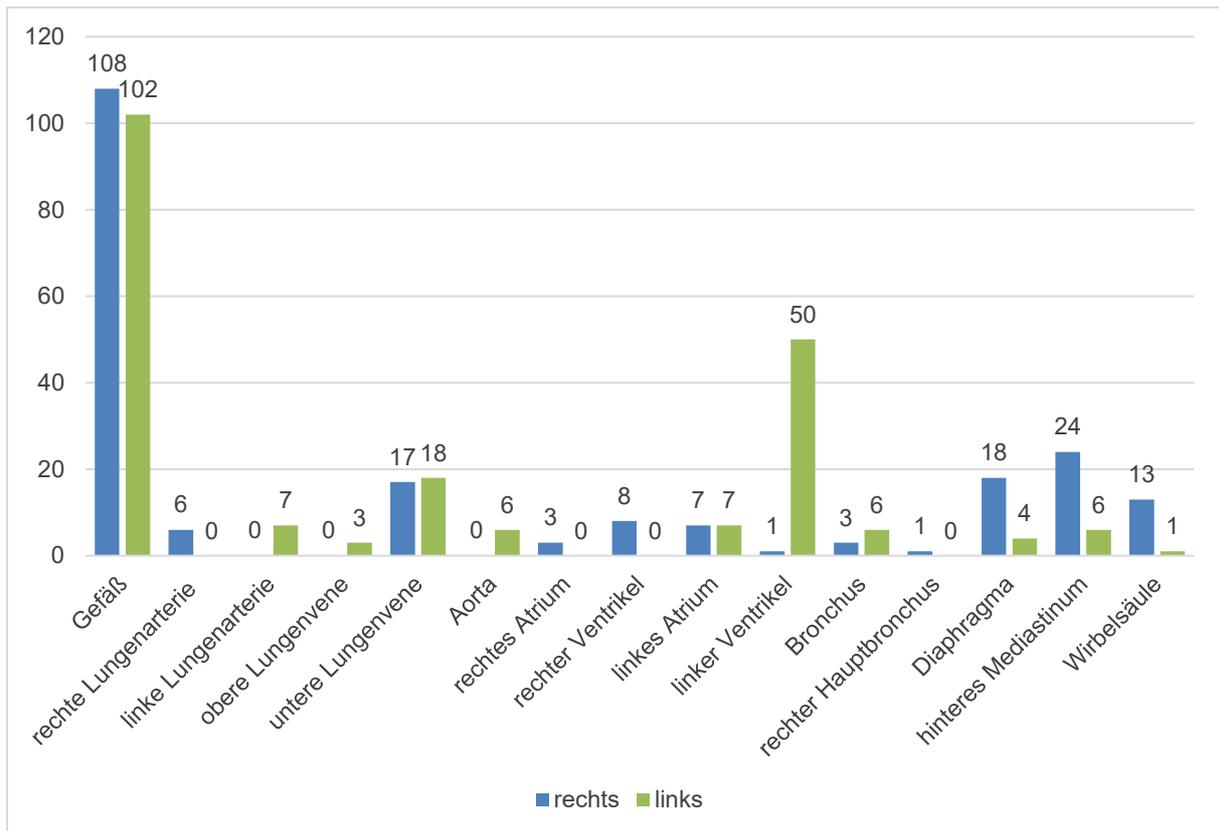


Abb. 24: Absolute Häufigkeit der einzelnen vitalen Strukturen im 5. ICR, MAL

Der T-Test ergab einen signifikanten Unterschied zwischen der rechten und linken Thoraxseite, sowohl im 4. ICR ($p < 0,0001$) als auch im 5. ICR ($p < 0,0001$): Im 4. ICR ist die Tiefe zur vitalen Struktur rechts durchschnittlich 0,81 cm größer als links, im 5. ICR durchschnittlich 0,63 cm. Auf beiden Punktionshöhen ist die Tiefe zur vitalen Struktur positiv mit dem Alter korreliert (s. Tab. 16).

Tab. 16: Korrelation Tiefe zur vitalen Struktur und Alter im 4. und 5. ICR, MAL

	rechts	links
4. ICR	$r = 0,56$	$r = 0,65$
5. ICR	$r = 0,44$	$r = 0,56$

3.4.5 Vergleich zwischen 4. und 5. ICR

Der Vergleich zwischen 4. und 5. ICR rechts ($6,52 \pm 1,90$ cm im 4. ICR vs. $6,31 \pm 2,22$ cm im 5. ICR) sowie zwischen 4. und 5. ICR links ($5,71 \pm 1,57$ cm im 4. ICR vs. $5,68 \pm 1,57$ cm im 5. ICR) zeigte in Bezug auf die Tiefe zur vitalen Struktur keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Punktionshöhen auf der gleichen Thoraxseite ($p=0,19$ rechts und $p=0,73$ links).

4 DISKUSSION

Die Versorgung eines vital gefährdeten Kindes kann aufgrund der häufig geringen Routine des behandelnden Teams und der hohen Anzahl an zu berücksichtigenden Faktoren eine extreme Herausforderung darstellen. Gerade in diesen Situationen sind wenig komplexe Versorgungsschritte und im Falle invasiver Maßnahmen leicht lokalisierbare Landmarken sehr hilfreich.

Die Mamille ist eine bei allen Patienten vorhandene Struktur, die auch unter Zeitdruck am entkleideten Oberkörper ohne große Schwierigkeiten erkennbar ist. Der beim Erwachsenen häufig vorhandene limitierende Faktor zur Verwendung der Brustwarze als Landmarke ist ihre Verschieblichkeit aufgrund des subkutanen Gewebes. Im Kindesalter ergibt sich demgegenüber der Vorteil, dass die Mamille durch weitestgehend fehlendes Fettgewebe relativ wenig verschieblich ist. Der Beginn der Pubertätsentwicklung und damit auch eine Ausbildung der Brust bei Mädchen ist durchschnittlich zwischen dem 10. und 11. Lebensjahr zu erwarten.⁷³

Diese Umstände könnten die Nutzung der Brustwarze zur Lokalisation der Insertionsstellen von Dekompressionsnadeln oder Thoraxdrainagen bei Kindern ermöglichen. Nachfolgend sollen die zu dieser Thematik erhobenen Ergebnisse diskutiert werden.

4.1 Anteriore Punktionsstelle (2. ICR, MCL)

4.1.1 Lagebeziehungen der Landmarken und seitlicher Abstand zu vitalen Strukturen

In dieser Arbeit wurden drei mögliche Punktionsorte für die Nadeldekompression im 2. ICR bei Kindern in Bezug auf ihren jeweiligen Abstand zur nächstgelegenen vitalen Struktur untersucht: Eine Punktion auf Höhe von MCL, MHL oder Mamille (Mamillarlinie) erscheint prinzipiell denkbar und wurde an erwachsenen Patienten bereits in mehreren Studien thematisiert.^{50, 74}

Die korrekte Identifikation der Medioklavikularlinie am Körper eines Patienten ist schwierig.⁷⁵ Will man eine Nadeldekompression in der MCL durchführen, so tastet man die Enden der Clavicula am entkleideten Thorax des Patienten und sucht auf diese Weise deren Mitte auf. Die Orientierung an knöchernen Strukturen im Kindesalter wird durch die Tatsache erheblich erschwert, dass Sternum, Clavicula

und Rippen noch knorpelige Anteile aufweisen.⁷⁶ Bringt die Punktion an dieser Insertionsstelle, vor allem im Kleinkindalter durch die starke räumliche Nähe zu lebenswichtigen Strukturen wie dem Herzen, bereits schon ein nicht geringes Risiko mit sich, so ist dieses umso höher, sollte man zudem noch den Punktionsort falsch identifizieren.^{70, 77} Ferrie et al. zeigten, dass die MCL selbst von geschultem Personal in vielen Fällen zu weit medial lokalisiert wird.⁷⁷ Dies hängt am ehesten mit dem schwer zu ertastenden lateralen Ende der Clavicula im Bereich des Akromions zusammen und macht eine Verletzung mediastinaler Strukturen wahrscheinlicher. Eine einfacher und dadurch sicherer aufzufindende Landmarke wäre dementsprechend von Vorteil.

In der hier untersuchten Gruppe von Kindern lag die Mamille bei der überwiegenden Mehrheit der Patienten lateral der MCL (rechts 97,14%, links 99,05%). Zwar ergab sich zwischen den beiden Thoraxhälften ein statistisch signifikanter Unterschied, jedoch befand sich die Mamille links durchschnittlich nur 2 mm weiter lateral als rechts. Dies stellt für die klinische Praxis keine relevante Differenz dar.

Verwendet man also die Mamille als Orientierungspunkt, auf dessen Höhe man die Punktion im 2. ICR vornimmt, so verschiebt sich der Insertionsort der Dekompressionsnadel rechts um $1,53 \pm 1,89$ cm nach lateral und der Abstand zu verletzungsgefährdeten vitalen Strukturen vergrößert sich. Linksseitig betrug die Vergrößerung des seitlichen Abstands zur vitalen Struktur sogar $1,72 \pm 1,85$ cm gegenüber der MCL.

Die im vorliegenden Patientenkollektiv fehlende Korrelation mit dem Alter lässt den Rückschluss zu, dass sich dieser Umstand auf alle Altersklassen verallgemeinern lässt: Die Mamille befindet sich bei fast allen Kindern lateral der MCL, unabhängig davon, ob es sich bei dem Patienten um einen Säugling, ein Kleinkind oder Schulkind handelt. Die durchgeführte Regressionsanalyse bestätigte den geringen Einfluss des Alters. Für den behandelnden Arzt bedeutet dies, dass er sich in einer Stresssituation wenig Gedanken über die richtige Therapievariante machen muss, sondern diese Option zur Lokalisation der Insertionsstelle universell einsetzen kann.

Die mittlere Thoraxlinie wurde von Wax und Leibowitz beim Erwachsenen medial der MCL beschrieben und in dieser Arbeit als geeignetste Alternative zum lateralen Punktionsort für die Nadeldekompression bezeichnet.⁵⁰

In der hier untersuchten Patientengruppe zeigte sich eine im Vergleich zur MCL durchschnittlich geringfügig weiter laterale Lage der MHL. Der Abstand zur vitalen

Struktur war jedoch nur weniger als ein Millimeter größer (0,01 cm rechts, 0,02 cm links). Die Mamille befand sich in einem einzigen Fall medial der MHL, und zwar um 16 mm bei einem Kind auf der rechten Thoraxseite. Links war die Lage der Mamille in 100% der Fälle lateral der MHL. Der hier ebenfalls als statistisch signifikant berechnete Seitenunterschied von 0,2 cm links gegenüber rechts ist wie im Falle der Medioklavikularlinie klinisch vernachlässigbar.

Erneut wurde nur eine geringe Korrelation mit dem Alter gefunden, der Abstand der MHL zur Mamille ändert sich also mit zunehmendem Alter und Wachstum des Kindes nicht.

Aus den dargestellten Ergebnissen lassen sich folgende Lagebeziehungen zwischen den genannten drei Landmarken ableiten: Am weitesten medial befindet sich die MCL mit nur geringer Entfernung zur MHL, weshalb es zwischen den beiden zu keinem signifikanten Unterschied bezüglich ihres Abstands zu vitalen Strukturen kommt ($p = 0,75$ rechts, $p = 0,62$ links). Praktisch gesehen liegen MCL und MHL quasi auf gleicher Höhe, sodass sich daraus keine entscheidende Abweichung oder gar ein Vorteil einer der beiden in Bezug auf die Gefährdung vitaler Strukturen ergibt. Im Gegensatz dazu liegt die Mamille durchschnittlich eindeutig weiter lateral, sodass der Abstand zu vitalen Strukturen gegenüber sowohl der MCL (rechts um 1,24 cm, links um 1,12 cm) als auch der MHL (rechts um 1,25 cm, links um 1,14 cm) auf Höhe der Mamillarlinie signifikant vergrößert wird (jeweils $p < 0,0001$).

Hinzu kommt, dass der Abstand zwischen vitaler Struktur und Mamille ebenfalls keine Korrelation mit dem Alter aufwies. Die Größe des Abstandes ist folglich nicht abhängig vom Alter des Kindes und dadurch ein größerer Abstand zur vitalen Struktur in jeder Altersgruppe gewährleistet.

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass es sich bei der Mamille um eine leicht und schnell auffindbare anatomische Struktur handelt, welche innerhalb aller Altersgruppen von 0 bis 10 Jahren gleichermaßen verlässlich einen größeren Sicherheitsabstand zu vitalen Strukturen gegenüber vorbeschriebenen Punktionshöhen (MCL und MHL) bei anteriorer Punktion aufweist. Sie ist somit als Landmarke zur Identifikation des Punktionsortes für eine Nadeldekompression im 2. ICR der MCL und der MHL überlegen und sollte demzufolge zur Minimierung des Risikos einer akzidentiellen Verletzung lebenswichtiger Organe als Orientierung verwendet werden.

4.1.2 Nächstgelegene vitale Strukturen links

Die Mehrheit der vitalen Strukturen waren auf der linken Seite Gefäße (65,24%), die sich nach ihrem Abgang aus den Lungenarterien und -venen zunächst in Lappen-, dann Segmentgefäße aufzweigen. Es liegen bislang keine Daten über lebensbedrohliche oder interventionsbedürftige Verletzungen bei akzidenteller Punktion dieser Gefäße vor, ein beträchtlicher Blutverlust ist jedoch nicht auszuschließen.

Der Abstand zur vitalen Struktur ist am linken Hemithorax grundsätzlich signifikant kleiner (Abstand vitale Struktur – MCL: $0,99 \pm 0,80$ cm rechts vs. $0,81 \pm 0,70$ cm links, $p = 0,0022$). Dies begründet sich in der Lokalisation des Herzens auf der überwiegend linken Thoraxseite, sodass der linke Ventrikel als große und lebenswichtige Struktur hier mit 12,38% der Fälle am zweithäufigsten die der Insertionsstelle nächstgelegene vitale Struktur war.

Eine weitere häufig in unmittelbar räumlicher Nähe gefundene Struktur, die wegen ihrer Größe vor allem bei jungen Kindern relevant ist, stellt der Thymus dar. Dieses primär lymphatische Organ erreicht vor der Geburt sein größtes Gewicht in Bezug auf das Körpergewicht und wächst im Kindesalter weiter an, bis er in der Pubertät sein Maximalgewicht erreicht. Danach beginnt die Involution, die Atrophie und Verfettung des Thymus. Er liegt im vorderen Mediastinum vor Aorta ascendens und Truncus pulmonalis.⁷⁸ Aufgrund dieser Tatsachen ist das Organ einem Risiko für akzidentelle Punktion besonders im Säuglingsalter ausgesetzt: Eine zuvor von Terboven et al. durchgeführte Untersuchung zeigte, dass in einigen Fällen bei Kindern unter einem Jahr im Bereich der klassischen Insertionsstelle (2. ICR, MCL) der Thymus sogar direkt an der Thoraxwand anlag.⁷⁰ Im hier untersuchten Patientenkollektiv war der Thymus links in 19 von 210 Fällen (9,05%) die nächstgelegene vitale Struktur. Erneut gibt es bisher keine Berichte über die Folgen einer versehentlichen Punktion in Thymusgewebe, jedoch sind seltene Fälle von spontanen Thymusblutungen bei Neugeborenen vorbeschrieben, welche zu schweren hämorrhagischen Konsequenzen führten.^{79, 80} Ob die Schwere des Blutverlusts nach einer Fehlpunktion vergleichbar groß sein könnte und ob sie in älteren Kindern eine eventuell geringere Beeinträchtigung bedingt, lässt sich aus diesen Fallberichten allerdings nicht ableiten. Sollte man den Thymus unbeabsichtigt punktieren, so hätte dies jedoch nicht nur die Verletzung desselbigen zur Folge,

sondern würde ebenfalls eine erfolglose Dekompression des Thorax nach sich ziehen.

Dagegen existieren mehrere Fallberichte über die schwerwiegenden Folgen einer Fehlpunktion in eine Lungenarterie, sowohl für erwachsene als auch pädiatrische Patienten.^{45, 76} Bei einem 5-jährigen polytraumatisierten Mädchen mit progredienter Kreislaufinstabilität, aggravierender Oxygenierungsstörung sowie linksseitig fehlendem Atemgeräusch wurde aufgrund des Verdachts eines Spannungspneumothorax links eine Entlastungspunktion mittels einer 14 G-Venenverweilkanüle im 2. ICR in der MCL durchgeführt. Direkt nach Zurückziehen des Mandrins kam es jedoch zum pulsierenden Rückfluss dunklen Blutes. In der anschließend vorgenommenen CT-Untersuchung des Thorax zeigte sich der medial der MCL im 1. ICR liegende Katheter, dessen Spitze in den Truncus pulmonalis eingedrungen war.⁷⁶ Durch die falsch lokalisierte Insertionsstelle ist es in diesem Fallbericht folglich zu einer Fehlpunktion der Arterie gekommen, da sie sich in unmittelbarer Nähe zum Punktionsort befand und dadurch ein hohes Verletzungsrisiko besteht. Die linke Lungenarterie wurde im hier untersuchten Patientenkollektiv bei 11 Patienten (5,24%) als zum Punktionsort nächstgelegenen identifiziert. Die obere Lungenvene war links in 3,81% betroffen.

4.1.3 Nächstgelegene vitale Strukturen rechts

Auch am rechten Thorax waren Gefäße die am häufigsten in unmittelbarer Nähe zum Punktionsort gefundenen vitalen Strukturen (78,95%).

Die anderen intrathorakalen Strukturen, die sich in der Nähe der anterioren Punktionsstelle befinden können, unterschieden sich zwischen den beiden Thoraxseiten: Die häufigste, durch akzidentielle Punktion gefährdete vitale Struktur war am rechten Thorax die rechte Lungenarterie (8,61%).

Eine seltene Komplikation der Insertion zentralvenöser Katheter ist die Perforation der V. cava superior. Bare et al. berichteten über zwei Neugeborene mit Zwerchfellhernie und damit assoziiertem Mediastinalshift, welche bei Anlage einer ECMO-Kanüle einen massiven Hämothorax und infolgedessen einen Kreislaufstillstand erlitten. Beide Kinder verstarben.⁸¹ Auch bei einer Verletzung der Gefäßwand von außen wäre ein solches Szenario theoretisch denkbar, wenn sich die V. cava superior bei einer Nadeldekompression in unmittelbarer Nähe zum Stichkanal befindet. Dies war bei 3,83% der hier untersuchten Kinder der Fall.

In jeweils wenigen Fällen waren am rechten Hemithorax außerdem das rechte Herz (rechtes Atrium in 2,87%, rechter Ventrikel in 0,48%), der Thymus (1,91%) sowie die rechte obere Lungenvene (0,96%) betroffen.

Wie bereits in Kapitel 1.4 beschrieben kann die Nadeldekompression selbst auch zur Entstehung eines Pneumothorax führen.^{5, 20} Die Häufigkeit wurde bei Erwachsenen in der präklinischen Situation mit 2% angegeben, wobei die Nadeldekompression in den beobachteten Fällen ohne klare Indikation durchgeführt worden war.⁸² Tatsächlich kann sich die Diagnose des Spannungspneumothorax im präklinischen Kontext schwierig gestalten, da weitere Notfallbilder ähnlich erscheinen können und die diagnostischen Möglichkeiten unter Umständen eingeschränkt oder nur erschwert durchführbar sind.^{35, 83} Ein Pneumothorax kann theoretisch auch bei der akzidentiellen Punktion von Bronchien (jeder Größe) verursacht werden, da dabei eine iatrogene Verbindung zwischen luftleitenden Wegen und Pleuraraum entsteht. Dieser Umstand erscheint besonders wahrscheinlich, wenn eine Verletzung eines großen Luftweges eintritt. Bei einem Kind lag der rechte Hauptbronchus benachbart zur Punktionsstelle in der MCL.

Am rechten Hemithorax war der grundsätzliche Abstand zur vitalen Struktur sowie der Anteil der vitalen Strukturen größer, deren Fehlpunktion man als weniger gravierend einschätzen würde, d.h. Gefäße der Generation Segment- und Lappengefäß (links 65,24% vs. rechts 78,95%). Darüber hinaus war der Anteil der vitalen Strukturen, die lateral der MCL gefunden werden konnten, geringer (rechts 23,92% der Fälle vs. links 41,43% der Fälle). Im direkten Vergleich erscheint eine Punktion im 2. ICR, MCL also im Hinblick auf den Abstand sowie die Folgen einer versehentlichen Punktion vitaler intrathorakaler Strukturen auf der rechten Thoraxseite prinzipiell sicherer.

4.2 Laterale Punktionsstelle (4. und 5. ICR, MAL)

4.2.1 Identifikation der Punktionsstelle mit Hilfe der Mamille

Die mittlere Axillarlinie (MAL) ist bei Erwachsenen als alternative Punktionsstelle für die Nadeldekompression bei Spannungspneumothorax bereits vorbeschrieben, hinsichtlich einer Insertion der Kanüle auf Höhe des 4. und 5. ICR untersucht und aktuell in einigen Empfehlungen aufgrund der geringeren Brustwanddicke gegenüber der MCL als bevorzugt beschrieben worden.^{46, 47, 84} Sowohl bei erwachsenen als auch bei pädiatrischen Patienten handelt es bei der Bülau-Position (anteriore bis mittlere Axillarlinie im 4. oder 5. ICR) um den bevorzugten Ort zur Anlage einer Thoraxdrainage.^{24, 85} Hierbei wird vielerorts die Empfehlung gegeben, niemals kaudal der Mamille zu präparieren, da die Gefahr einer intraabdominellen Fehllage besteht, die mit einem hohen Risiko von Organverletzungen assoziiert ist.³⁷ Auch für eine Punktion innerhalb des „sicheren axillären Dreiecks“ (*safe triangle*) wird die Mamille als untere (basale) Grenze angesehen.⁶⁸ Die aktuelle, 10. Auflage des ATLS Kursbuch von 2018 gibt die Lage des 5. ICR als korrespondierend mit der Höhe der Mamille beim Mann bzw. der inframammären Falte bei der Frau an.²⁴ Eine Studie an 16 Leichen in Rückenlage zeigte jedoch, dass in der Mehrheit der Fälle (47%) der 6. ICR auf dem Level des oberen Randes der Mamille gefunden wurde, während der 5. oder ein darüber liegender Interkostalraum in nur 13% identifiziert werden konnte.⁸⁶ Diese Daten bei adulten Patienten lassen eine zu tiefe Identifikation der Punktionsstelle also als nicht unwahrscheinlich erscheinen, deren Folge eine Erhöhung des Risikos einer Perforation des Zwerchfells und der Verletzung direkt darunter liegender intraabdominaler Organe sein kann.⁸⁷ Aufgrund der in einer vorherigen Studie festgestellten Komplikationsrate von 22% im Hinblick auf die notfallmäßige Anlage von Thoraxdrainagen evaluierten Gray et al. die Verwendung einer Ultraschalluntersuchung zur Überprüfung der anhand von Landmarken identifizierten Insertionsstelle im 5. ICR.^{88, 89} Mithilfe der Sonographie konnten in der Nähe befindliche Organe (z.B. Lunge oder Leber) und Strukturen (wie das Diaphragma) identifiziert und gemieden werden, wodurch die Häufigkeit unbeabsichtigter intraperitonealer/pleuraler Verletzungen gesenkt werden konnte.⁸⁹ Hinsichtlich vermeidbarer Fehlpunktionen bei der Thoraxdekompression könnte die Verwendung dieser Herangehensweise ebenfalls erwägenswert sein.

Im hier untersuchten Patientenkollektiv von 210 Kindern lag die Mamille in der überwiegenden Mehrheit der Fälle auf Höhe des 4. oder 5. ICR (rechts in 83,80%, links in 88,09%): Der größere Anteil davon entfiel auf den 5. ICR mit jeweils ca. 52% auf beiden Seiten, während die übrigen 31,90% rechts und 36,19% links den 4. ICR betrafen. Der höchste auf Höhe der Mamille identifizierte ICR war der 2. ICR am linken Hemithorax eines 3-jährigen Patienten, der niedrigste der 7. ICR bei ebenfalls nur einem 8 Jahre alten Patienten an der rechten Thoraxhälfte. In 5,24% rechts und 3,33% links wurde der 3. ICR auf Höhe der Mamille gefunden, jeweils etwa doppelt so häufig der 6. ICR (10,48% rechts, 8,10% links). Wenngleich die prozentuale Häufigkeit der Interkostalräume in Bezug auf die Lage der Mamille in den einzelnen Altersgruppen leicht schwankte, so waren dennoch der 4. und 5. ICR in jeder Gruppe für sich gesehen am häufigsten.

Diese Daten lassen die Schlussfolgerung zu, dass eine Nadeldekompression bei pädiatrischen Patienten an der lateralen Punktionsstelle (in AAL oder MAL) mit hoher Wahrscheinlichkeit den von vielen Autoren empfohlenen 4. oder 5. Interkostalraum treffen würde, wenn man sich an der Mamille als Landmarke zur Identifikation der Höhe orientiert. Eine Insertion von Nadeln oder Drainagen würde dadurch sowohl innerhalb des „sicheren axillären Dreiecks“ erfolgen als auch die Definition der Büllau-Position erfüllen.

Trotz der geringfügigen Unterschiede innerhalb der einzelnen Altersgruppen, konnte insgesamt keine Korrelation mit dem Alter festgestellt werden. Die Orientierung an der Mamille ist also unabhängig vom Alter des Kindes eine verlässliche Methode, um einen sicheren ICR zur Punktion aufzusuchen.

Wie bereits thematisiert (s. Kap. 4.1) spielt das Geschlecht bei Erwachsenen hinsichtlich der Punktionssicherheit bei Verwendung der Mamille als Orientierungsstruktur eine nicht unerhebliche Rolle: Bowness et al. identifizierten in 14 von 32 weiblichen Freiwilligen (44%) mittels Ultraschall auf Höhe der Mamille einen tieferen als den 5. ICR. Dies setzt Frauen gegenüber Männern bei Anwendung dieser Methode zumindest theoretisch einem gesteigerten Risiko für subdiaphragmatische Insertionen aus. Die Lagebeziehungen weichgewebiger Landmarken in Bezug auf die knöchernen Strukturen des Thorax sind folglich nicht nur durch den Habitus des Patienten und die Extremitätenposition beeinflusst, sondern ebenfalls durch das Geschlecht und scheinen einer stärkeren Variabilität zu unterliegen als angenommen.⁷⁴

Aus diesen Gründen führten auch wir einen Vergleich zwischen den Jungen und Mädchen unserer Untersuchungsgruppe durch. Es zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Geschlechtern hinsichtlich der Höhe der Mamille in Bezug zu den darunterliegenden Interkostalräumen. Aufgrund des im Kindesalter kaum vorhandenen subkutanen Fettgewebes im Bereich der Mamille bei weiblichen und männlichen Patienten gleichermaßen zeigt sich hier eine Überlegenheit der Struktur als Landmarke gegenüber dem Erwachsenenalter. Die Mamille vereint also im pädiatrischen Patientenkollektiv gleich zwei Vorteile: 1. Eine höhere Treffsicherheit des geeigneten ICR auf ihrer Höhe und 2. eine Geschlechtsunabhängigkeit dieser Treffsicherheit. Da bei den untersuchten Kindern keine Daten bezüglich des BMI bzw. keine Unterscheidung nach Armposition während der CT-Aufnahme vorgenommen wurde, kann der Einfluss dieser beiden Faktoren auf das Ergebnis nicht evaluiert werden.

4.2.2 Abstand zum Zwerchfell

Als Komplikation unbeabsichtigt zu tiefer Insertion von Nadeln und Drainagen droht an der lateralen Punktionsstelle die Gefahr einer Verletzung des Zwerchfells und intraabdominaler Organe: Eine Laceration oder Perforation kann verursacht werden, wenn die Spitze des verwendeten Instruments (z.B. distales Ende der Thoraxdrainage) in Kontakt mit dem Diaphragma kommt.⁹⁰ Ebenso ist eine primär subdiaphragmatische Punktion bzw. Drainagenanlage möglich. Vor allem in Expiration erhöht sich das Risiko, da das Zwerchfell bei vollständiger Ausatmung bis zum 4. Interkostalraum hinauf reichen kann.⁹¹

Aufgrund des im Allgemeinen als höher anzunehmenden Risikos intraabdomineller Fehllagen oder Verletzungen durch das weiter kranial stehende Diaphragma im Kindesalter wurde in dieser Arbeit der Abstand der Brustwarze zur Zwerchfellkuppel untersucht. Eine ausreichende Distanz nach kaudal würde bezüglich genannter Problematik einen Zugewinn an Sicherheit nach sich ziehen. Der durchschnittliche Abstand der Mamille zum höchsten Punkt der Zwerchfellkuppel betrug im untersuchten Patientenkollektiv $2,63 \pm 1,85$ cm rechts und $3,40 \pm 1,86$ cm links. Zwischen den beiden Thoraxseiten bestand erwartungsgemäß ein signifikanter Unterschied: Der bereits bekannte und beschriebene Umstand des physiologisch auf der rechten Seite höherstehenden Zwerchfells, zeigte sich auch im hier untersuchten pädiatrischen Kollektiv.⁹² Es handelte sich dabei um eine am linken Hemithorax um 0,77 cm größere Distanz zwischen Mamille und Diaphragma.

Der Abstand zwischen Brustwarze und Zwerchfell erscheint zwar insgesamt relativ groß, jedoch befand sich das Zwerchfell bei 15 Kindern rechts (7,14%) und 6 Kindern links (2,86%) entweder direkt auf Höhe der Mamille oder sogar darüber. Auch bei Erwachsenen wurden in einer aktuellen Studie aus dem Jahr 2020 Daten mit einem ähnlichen Ergebnis erhoben: In 13% der Fälle kreuzte die Bewegung des Zwerchfells während des Atemzyklus die festgelegte Punktionshöhe (5. ICR), in 6% befand es sich darüber. Aus diesen Gründen empfehlen die Autoren die Sonographie vor Durchführung einer Maßnahme, um einer vermeidbaren Zwerchfellverletzung aufgrund variabler anatomischer Gegebenheiten aus dem Weg zu gehen.⁸⁹ Der geringste Abstand zum Diaphragma in Stichrichtung fand sich in unserer Patientengruppe mit 1,5 cm rechts und 1,7 cm links, zeitgleich war in diesen Fällen der kaudale Abstand zur Zwerchfellkuppel nicht gegeben bzw. sehr klein (0 cm

rechts, 0,23 cm links). Die Empfehlung von Gray et al. erscheint in diesem Kontext also auch in Bezug auf Kinder als durchaus sinnvoll.

Weiterhin sollte auf den Fall eines 7-jährigen Jungen im vorliegenden Kollektiv gesondert eingegangen werden, bei dem das Diaphragma die Mamille rechts um 4,4 cm und links um 4,14 cm überragte. Es handelte sich dabei um eine PET-CT Untersuchung, welche im Vergleich zu reinen Thorax-Aufnahmen nicht zwangsläufig in Inspiration durchgeführt wird, weshalb es denkbar ist, dass der Scan während der Expiration erfolgte und aufgrund dessen das Zwerchfell überdurchschnittlich weit nach oben reichte. Ferner war bei diesem Patienten eine leichte Hyperkyphose der Brustwirbelsäule festzustellen, was den Umstand zusätzlich verstärken kann. Letztlich lag aber kein definitiver Grund zum Ausschluss des Patienten vor (s. Kap. 3.1), weswegen die Daten in der Analyse nichtsdestotrotz berücksichtigt wurden.

Der vorhandene Abstand zwischen Mamillenhöhe und Zwerchfellkuppel in der von uns untersuchten Patientengruppe wies keine Korrelation mit dem Alter auf und vergrößert sich deshalb nicht mit steigendem Alter. Ein über alle Altersklassen hinweg ausreichender Sicherheitsabstand nach kaudal ist bei Verwendung der Mamille zur Auswahl der Punktionshöhe somit gegeben.

4.2.3 Tiefe zur vitalen Struktur

Im 4. Interkostalraum lag die nächste vitale Struktur in einer Tiefe von durchschnittlich $6,52 \pm 1,90$ cm rechts und $5,71 \pm 1,57$ cm links. Zwischen den beiden Thoraxseiten bestand ein signifikanter Unterschied von 0,81 cm rechts gegenüber links. Was den 5. Interkostalraum betrifft, so war die nächstgelegene vitale Struktur rechts in einer Tiefe von durchschnittlich $6,31 \pm 2,22$ cm zu finden, links in einer Tiefe von durchschnittlich $5,68 \pm 1,57$ cm. Auch hier lagen die Strukturen rechts signifikant weiter vom Insertionsort entfernt (durchschnittlich 0,63 cm). Die signifikant größere Tiefe zur vitalen Struktur rechts ist im Falle der lateralen Punktionsstelle ebenfalls durch die anatomischen Gegebenheiten im linken Hemithorax erklärbar (s. Kap. 4.1). Zwischen dem 4. und 5. ICR der jeweils gleichen Thoraxseite ($6,52$ cm vs. $6,31$ cm rechts; $5,71$ cm vs. $5,68$ cm links) wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt. Dadurch ist anzunehmen, dass beide Punktionshöhen in Bezug auf den Abstand zu verletzungsgefährdeten intrathorakalen Strukturen in Stichrichtung gleich sicher sind. Einschränkend sei hier jedoch erwähnt, dass die ermittelten Werte den Durchschnitt über alle Altersklassen des untersuchten Kollektivs abbilden.

Die hier erhobenen Werte für die durchschnittliche Tiefe zur nächsten vitalen Struktur bei Kindern liegen deutlich unter denen bei Erwachsenen am gleichen Punktionsort: Diese waren mit 14,38 cm rechts und 13,15 cm links für den 4. ICR sowie 13,38 cm rechts und 11,80 cm links für den 5. ICR angegeben worden.⁹³ Eine andere Studie thematisierte die Tiefe zur nächstgelegenen vitalen Struktur bei zur Hautoberfläche senkrechter Punktion im 4. ICR, AAL: Hier war die Distanz bei Erwachsenen vergleichsweise deutlich geringer als im 4. ICR, MAL (rechts AAL vs. MAL: 12,80 cm vs. 14,38 cm; links AAL vs. MAL: 10,94 cm vs. 13,15 cm).⁴³ Im 4. ICR, AAL existieren für pädiatrische Patienten bezüglich der Tiefe zur vitalen Struktur bei zur Hautoberfläche senkrechter Punktion Daten für 3 Altersklassen (0-, 5- und 10-Jährige).⁷⁰ Vergleicht man diese mit den ermittelten Werten im hier untersuchten Patientenkollektiv für den 4. ICR, MAL in denselben Altersklassen, so stellt man fest, dass sich die Distanz bei Verwendung der MAL wie bei erwachsenen Patienten vergrößert (0-Jährige AAL vs. MAL: 4,02 cm vs. 4,29 cm rechts, 3,15 cm vs. 3,89 cm links; 5-Jährige AAL vs. MAL: 5,98 cm vs. 6,92 cm rechts, 4,29 cm vs. 5,73 cm links; 10-Jährige AAL vs. MAL: 8,00 cm vs. 8,51 cm rechts und 6,11 cm vs. 8,12 cm links) und somit der Sicherheitsabstand zu vitalen Strukturen durchschnittlich größer ist.

Leonhard et al. empfahlen für eine Entlastungspunktion im 4./5. ICR, AAL nach Bestimmung des Verletzungsrisikos an dieser Insertionsstelle Nadeln mit einer Länge von 2,5 cm für Säuglinge, 3,2 cm für 5-Jährige und 4,5 cm für Kinder im Alter von 10 Jahren.⁹⁴ Ausgehend von den hier gefundenen Mittelwerten für die vier verschiedenen Insertionsstellen bestünde mit den empfohlenen Nadellängen also grundsätzlich ein geringes Verletzungsrisiko, da die durchschnittliche Tiefe zur nächstgelegenen vitalen Struktur jeweils größer war als die Länge der theoretisch verwendeten Kanüle. Praktisch gab es davon einige Ausnahmen: So wiesen im vorliegenden Patientenkollektiv bei einer Punktion in MAL mit einer angenommenen Nadellänge von 2,5 cm für den 4. ICR links 5% der 0-Jährigen eine geringere Tiefe zur vitalen Struktur auf und man hätte die Struktur bei vollständiger Insertion verletzt. Im 5. ICR waren es 15% rechts und 10% links. Bei einer theoretischen Nadellänge von 3,2 cm mit 5 Jahren handelte es sich rechtsseitig um 10% im 5. ICR. In der Altersgruppe der 10-Jährigen war die mögliche Verletzungsrate mit einer 4,5 cm langen Kanüle im 4. ICR mit 0% sowohl rechts als auch links gegenüber des 5. ICR mit 16,67% rechts und 11,11% links deutlich geringer. Zieht man auch hier einen Vergleich zu den beobachteten Verletzungsraten für den 4. ICR, AAL, so ist der Anteil durch die Nadel getroffener Strukturen bei gleicher Kanülenlänge in allen untersuchten Gruppen im 4. ICR, MAL eindeutig kleiner (0-Jährige AAL vs. 0-Jährige MAL: 14,0% vs. 0% rechts, 24,0% vs. 5% links; 5-Jährige AAL vs. 5-Jährige MAL: 2,1% vs. 0% rechts, 17,0% vs. 0% links; 10-Jährige AAL vs. 10-Jährige MAL: 7,1% vs. 0% rechts, 11,9% vs. 0% links), was für ein niedrigeres theoretisches Verletzungsrisiko bei Punktion in MAL spricht.⁹⁴

Im Allgemeinen lässt sich aus den vorliegenden Daten schließen, dass zu vitalen intrathorakalen Strukturen bei zur Hautoberfläche senkrechter Punktion in der MAL sowohl im 4. als auch 5. ICR mit altersadaptiert unterschiedlichen Nadellängen ein ausreichend großer Sicherheitsabstand besteht und eine Verletzung dieser Strukturen dadurch relativ unwahrscheinlich erscheint.

Die Verwendung von mit zunehmendem Alter längeren und dickeren Kanülen im Hinblick auf die Versagensrate (zur Vermeidung des Nichterreichens des Pleuraspaltes) zeigte sich auch in dieser Studie insofern bestätigt und sinnvoll, als dass hier eine positive Korrelation mit dem Alter festgestellt werden konnte (für den 4. und 5. ICR rechts: $r = 0,56$ und $0,44$; für den 4. und 5. ICR links: $r = 0,65$ und $0,56$): Die Tiefe zur vitalen Struktur nimmt mit steigendem Alter des Kindes zu,

was das Verletzungsrisiko intrathorakaler Strukturen bei älteren Kindern verringert und den Einsatz stärkerer Nadeln ermöglicht.

4.2.4 Vitale Strukturen im Bereich der lateralen Punktionsstelle

Im präklinischen Umfeld wird eine Thoraxdekompression bei Trauma-Patienten gegebenenfalls auch ohne gesicherte Diagnose durchgeführt. Im Falle der Entlastungspunktion bei Erwachsenen war in einigen Untersuchungen die eindeutige Indikation bei bis nahezu 30% der Patienten nicht nachvollziehbar.^{95, 96} Eine Nadeldekompression ohne Vorhandensein eines Spannungspneumothorax zieht ein hohes Risiko der Verletzung intrathorakaler Organe, in erster Linie der Lunge, nach sich. Insbesondere am linken Hemithorax ist bei Kindern zusätzlich eine mögliche Verletzung des Herzens von größter Bedeutung. Da das Zwerchfell im Kindesalter weiter kranial liegt, kommt das Herz in einer mehr transversalen Position im Thoraxraum zu liegen, was es links insgesamt stärker in die Nähe der Brustwand bringt.⁹⁴

Betrachtet man zunächst die linke Thoraxhälfte, so war das Herz im hier vorliegenden Patientenkollektiv im 4. ICR in 19,05% der Fälle in Stichrichtung die nächstgelegene vitale Struktur, im 5. ICR waren es 27,14%. Auch die großen thorakalen Gefäße (Lungenarterien, Lungenvenen, Aorta) waren betroffen (im 4. ICR 23,33%, im 5. ICR 16,19%). Im Vergleich dazu wurde das Herz am rechten Hemithorax erwartungsgemäß deutlich seltener als nächstgelegene vitale Struktur identifiziert (im 4. ICR 5,24%, im 5. ICR 9,05%). Was die großen Gefäße betraf, so entfielen darauf rechts im 4. ICR 13,81%, im 5. ICR 10,95%. Der Anwender sollte sich also bei der Thoraxentlastungspunktion am linken Thorax bewusst sein, dass ein größeres Risiko der Verletzung von Herz und Gefäßen besteht. Weiterhin legen die vorliegenden Daten nahe, dass eine Punktion im 4. ICR gegenüber dem 5. ICR stärker die direkt vom Herzen abgehenden Gefäße gefährdet, während eine Punktion im 5. ICR gegenüber dem 4. ICR das Herz selbst einem größeren Risiko aussetzt.

In circa der Hälfte der Fälle befand sich auch am lateralen Punktionsort ein kleineres und damit für lebensbedrohliche Blutungen bei akzidentieller Punktion weniger gefährdetes Gefäß (s. Kap. 4.1) als erste vitale Struktur im Verlauf der theoretischen Insertionslinie (4. ICR: rechts 52,86%, links 48,10%; 5. ICR: rechts 51,67%, links 48,57%).

Wie bereits besprochen ist auch das Zwerchfell dem Risiko einer Verletzung ausgesetzt, wobei die Wahrscheinlichkeit rechts größer ist als links (s. Kap. 4.2): Am rechten Hemithorax war das Diaphragma im 4. ICR 3 Mal, im 5. ICR 18 Mal (8,61%) die der Insertionslinie am nächsten gelegene Struktur bei zur Hautoberfläche

senkrechter Punktion. Dagegen konnte es links im 4. ICR kein Mal, im 5. ICR 4 Mal als nächstgelegenen identifiziert werden.

Grundsätzlich sollte, um eine tiefer als notwendiges Einführen der Nadel zu vermeiden, die Kanüle unter Aspiration mittels einer Spritze eingeführt und die Nadelbewegung bei Ansaugung von Luft gestoppt werden. Wann immer möglich sollte bei Verdacht auf einen (Spannungs-)Pneumothorax auch eine Sonografie zur weiteren Evaluation durchgeführt werden. Dadurch kann sowohl die benötigte Insertionstiefe als auch das Vorhandensein anliegender vitaler Strukturen im Insertionsbereich vor der Punktion geprüft bzw. ausgeschlossen werden.^{70, 89}

Zusammenfassend lässt sich demnach sagen, dass bei altersangepasstem Einsatz der empfohlenen Nadellängen und unter besonderer Beachtung der am linken Hemithorax geringeren Tiefe zu vitalen Strukturen sowie des höherstehenden Zwerchfells an der rechten Thoraxseite eine Nadeldekompression bei Kindern zur Entlastung eines Spannungspneumothorax im 4. oder 5. ICR, MAL sicher möglich ist.

4.3 Limitationen

Da es sich bei der vorliegenden Analyse um eine retrospektive Arbeit handelt, konnte auf bestimmte Umstände kein Einfluss genommen werden. So sind beispielsweise die Aufnahmen in verschiedenen Phasen des Atemzyklus gemacht worden (s. auch Kap. 4.2): Darunter befinden sich viele reine CT-Thorax Scans, welche nach Möglichkeit in Inspiration durchgeführt werden. Dies ist jedoch vor allem bei den jüngeren Kindern kaum zu gewährleisten, da diese Anweisungen zu einem Atemmanöver nicht befolgen können. Ebenfalls ausgewertet wurden Ganzkörper-CTs im Rahmen von Schockraum-Protokollen oder für PET-Untersuchungen bei krebserkrankten Patienten, bei denen keine Rücksicht auf den Zeitpunkt des Atemzyklus genommen wird. Weiterhin waren einige der Kinder mechanisch beatmet oder sediert. Diese Unterschiede in der Respirationssituation können die verschiedenen Zustände von realen Patienten zum Zeitpunkt einer Nadeldekompression jedoch möglicherweise gut abbilden.

Bei wachen Kindern besteht zudem immer die Gefahr von Bewegungsartefakten. Dadurch kann es leicht passieren, dass zum Beispiel die Wirbelsäule nicht exakt gerade abgebildet oder die Schultern nicht symmetrisch in einer Linie positioniert waren, was die Messwerte beeinflussen kann.

Zudem spielt auch die durch die Einstellung vor dem Scan festgelegte Schichtdicke eine Rolle: Während bei einer Schichtdicke von 0,6 mm eine sehr exakte Auswahl der Messhöhe möglich war, fiel die Festlegung bei höheren Schichtdicken gröber aus. Nach Möglichkeit wurden allerdings jene Aufnahmen ausgewertet, welche dünnere Schichtdicken aufwiesen, sodass nur sehr wenige CTs (4 von 210) eine Schichtdicke über 3 mm besaßen.

Bei keinem der untersuchten Kinder lag tatsächlich ein Spannungspneumothorax vor, im Gegenteil wurden strikt nur solche ausgewählt, bei denen die Anatomie des Thorax möglichst normal war. Zum einen wäre das Studienkollektiv an Kindern mit Spannungspneumothorax zu klein, um daraus universelle Schlüsse ziehen zu können; zum anderen kann bei vorliegendem Spannungspneumothorax keine Aussage über dessen tatsächliche Ausdehnung und somit auch nicht über die intrathorakalen Abstände getroffen werden. Folglich konnte der Einfluss typischer Veränderungen bei einem Spannungspneumothorax hier nicht untersucht werden. Darunter fällt zum einen die Mediastinalverschiebung, welche Änderungen in der

Entfernung zu vitalen Strukturen bedingen könnte. Ferner entsteht durch die Akkumulation von Luft im Pleuraspalt im Falle eines realen Pneumothorax ein „Puffer“, welcher die Distanz zu potenziell gefährdeten vitalen Strukturen vergrößert und somit das Verletzungsrisiko senkt. Beispielsweise wären in einer kollabierten Lunge die Äste der Pulmonalarterien, welche häufig als erste Struktur in räumlicher Nähe zum Punktionsort gefunden wurden, weiter von der Thoraxwand entfernt. Weil ein Spannungspneumothorax in der Praxis aber nicht immer leicht zu diagnostizieren ist und es fälschlicherweise zu nicht indizierten Punktionen bei vollständig entfalteter Lunge kommen kann,^{37, 83, 95} ist es durchaus relevant, Kenntnis über die Verhältnisse ohne Vorliegen der eigentlichen Notfallsituation zu haben.

Zu guter Letzt wurden in dieser Studie keine Informationen über Körpergröße und -gewicht der eingeschlossenen Kinder gesammelt. Untersuchungen bei Erwachsenen zeigten jedoch, dass sowohl die Brustwanddicke als auch die Entfernung zu vitalen Strukturen mit steigendem BMI zunahm.⁴³ Über den Einfluss dieses Faktors im Kindesalter kann hier demzufolge keine Aussage getroffen werden.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Nadeldekompression ist bei Spannungspneumothorax eine potenziell lebensrettende Notfallmaßnahme, zu deren sicherer und erfolgreicher Durchführung im Kindesalter jedoch erst wenige Studien vorliegen. Aufgrund des nicht unerheblichen Verletzungsrisikos intrathorakaler Strukturen bei der Punktion ist eine sorgfältige Auswahl und vor allem die richtige Identifikation der Insertionsstelle von großer Bedeutung.

Anhand von 210 retrospektiv ausgewählten CT-Aufnahmen des Thorax von Kindern im Alter zwischen 0 und 10 Jahren wurden die Lage und der Abstand zur nächstgelegenen vitalen Struktur bei sagittaler Punktionsrichtung an der klassischen anterioren Punktionsstelle (2. Interkostalraum, Medioklavikularlinie) im Vergleich zu alternativen Insertionsorten im 2. ICR (mittlere Thoraxlinie und Mamillarlinie) erhoben. Des Weiteren erfolgte die Bestimmung der Höhe der Mamille im Bezug zu den Interkostalräumen in der mittleren Axillarlinie sowie die Messung des kaudalen Abstands zum höchsten Punkt des Zwerchfells ausgehend von der Brustwarze. Die Distanz zur nächstgelegenen vitalen Struktur im 4. und 5. ICR, MAL bei zur Hautoberfläche senkrechter Punktion wurde ebenfalls ermittelt.

Die Mamille lag bei der überwiegenden Mehrheit der Fälle lateral von sowohl MCL als auch MHL (MCL: 97,14% rechts, 99,05% links; MHL: 99,52% rechts, 100% links). Daher erwies sich der Abstand zur nächstgelegenen vitalen Struktur im 2. ICR auf Höhe der Brustwarze gegenüber MCL und MHL als signifikant größer (rechts: $0,99 \pm 0,80$ cm (MCL) vs. $0,98 \pm 0,73$ cm (MHL) vs. $2,21 \pm 1,17$ cm (Mamillarlinie); links: $0,81 \pm 0,70$ cm (MCL) vs. $0,79 \pm 0,71$ cm (MHL) vs. $1,88 \pm 1,26$ cm (Mamillarlinie), $p < 0,0001$ jeweils). Eine Korrelation des Abstandes mit dem Alter der Kinder konnte bei keinem der untersuchten Punktionsorte festgestellt werden.

In der mittleren Axillarlinie befand sich die Mamille beim Großteil der Kinder auf Höhe des 4. oder 5. Interkostalraums (83,80% rechts, 88,09% links). Zwischen Jungen und Mädchen zeigte sich kein signifikanter Unterschied bezüglich der Mamillenhöhe ($p = 0,14$ rechts, $p = 0,24$ links). Der Abstand zur Zwerchfellkuppel betrug durchschnittlich $2,63 \pm 1,85$ cm auf der rechten und $3,40 \pm 1,86$ cm auf der linken Thoraxseite und auch dieser vergrößerte sich nicht mit zunehmendem Kindesalter. Was die Tiefe zur vitalen Struktur im 4. und 5. ICR betraf, so unterschied sie sich nicht signifikant

zwischen den beiden Punktionshöhen (rechts: $6,52 \pm 1,90$ cm (4. ICR) vs. $6,31 \pm 2,22$ cm (5. ICR), $p = 0,19$; links: $5,71 \pm 1,57$ cm (4. ICR) vs. $5,68 \pm 1,57$ cm (5. ICR), $p = 0,73$). Es konnte in diesem Fall jedoch eine positive Korrelation mit dem Alter nachgewiesen werden (4. ICR: $r = 0,56$ rechts, $r = 0,65$ links; 5. ICR: $r = 0,44$ rechts, $r = 0,56$ links).

Die aus dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse ermöglichen die Empfehlung einer alternativen Landmarke zur sicheren Orientierung bei der Auswahl des Insertionsortes für eine Thoraxentlastungspunktion im Kindesalter: Bei Durchführung der Nadeldekompression am anterioren Punktionsort sollte im 2. ICR in Höhe der Mamillarlinie punktiert werden, da durch ihre weiter laterale Lage das Verletzungsrisiko für lebenswichtige, im Thorax in unmittelbarer Nähe gelegene Organe verringert wird. Auch für eine Punktion am lateralen Insertionsort eignet sich die Mamille zur Lokalisation des richtigen Interkostalraums. Im Vergleich zu an Erwachsenen durchgeführten Studien kann die Brustwarze bei Kindern unabhängig vom Geschlecht eine zuverlässige Orientierung geben und erweist sich als Marker in dieser Patientenpopulation als ideal. Ein nach kaudal ausreichender Sicherheitsabstand zur Zwerchfellkuppel ist gegeben, sodass intraabdominelle Fehlpunktionen und Verletzungen vermieden werden können. Unter Verwendung von altersadaptiert unterschiedlich langen Kanülen kann das Risiko für die Verletzung intrathorakaler Strukturen bei einer Thoraxdekompression an dieser Stelle als ebenfalls gering angesehen werden.

Trotzdem die Orientierung an der Mamille als Landmarke zur Erhöhung der Sicherheit der Nadeldekompression bei Spannungspneumothorax im Kindesalter beitragen kann, sollte die Maßnahme im Hinblick auf das gesteigerte Verletzungsrisiko bei Kindern vor allem am linken Hemithorax stets unter großer Achtsamkeit erfolgen.

6 LITERATURVERZEICHNIS

1. Roberts, DJ, Leigh-Smith, S, Faris, PD, Ball, CG, Robertson, HL, Blackmore, C, Dixon, E, Kirkpatrick, AW, Kortbeek, JB, Stelfox, HT: Clinical manifestations of tension pneumothorax: protocol for a systematic review and meta-analysis. *Systematic Reviews*, 3: 3, 2014.
2. Dogrul, BN, Kiliccalan, I, Asci, ES, Peker, SC: Blunt trauma related chest wall and pulmonary injuries: An overview. *Chinese Journal of Traumatology*, 23: 125-138, 2020.
3. Barton, ED: Tension pneumothorax. *Current Opinion in Pulmonary Medicine*, 5: 269-274, 1999.
4. Nelson, D, Porta, C, Satterly, S, Blair, K, Johnson, E, Inaba, K, Martin, M: Physiology and cardiovascular effect of severe tension pneumothorax in a porcine model. *Journal of Surgical Research*, 184: 450-457, 2013.
5. Leigh-Smith, S, Harris, T: Tension pneumothorax - time for a re-think? *Emergency Medicine Journal*, 22: 8-16, 2005.
6. Teplick, SK, Clark, RE: Various Faces of Tension Pneumothorax. *Postgraduate Medicine*, 56: 87-92, 1974.
7. Rutherford, RB, Hurt, HH, Brickman, RD, Tubb, JM: The Pathophysiology of progressive Tension Pneumothorax. *The Journal of Trauma*, 8: 212-227, 1968.
8. Fraser, RS: "Tension" Pneumothorax and Hydrothorax. In: *Diagnosis of Diseases of the Chest Vol 2*. edited by FRASER, R. G., PARÉ, J. A. P., W.B. Saunders, Philadelphia, 1978, pp 598-601.
9. Gustman, P, Yerger, L, Wanner, A: Immediate Cardiovascular Effects of Tension Pneumothorax. *American Review of Respiratory Disease*, 127: 171-174, 1983.
10. Light, RW: Tension pneumothorax. *Intensive Care Medicine*, 20: 468-469, 1994.
11. Kong, A: The Deep Sulcus Sign. *Radiology*, 228: 415-416, 2003.
12. Yu, PYH, Lee, LW: Pulmonary artery pressures with tension pneumothorax. *Canadian Journal of Anaesthesia*, 37: 584-586, 1990.
13. Bobbio, A, Dechartres, A, Bouam, S, Damotte, D, Rabbat, A, Regnard, JF, Roche, N, Alifano, M: Epidemiology of spontaneous pneumothorax: gender-related differences. *Thorax*, 70: 653-658, 2015.
14. Noppen, M: Spontaneous pneumothorax: epidemiology, pathophysiology and cause. *European Respiratory Review*, 19: 217-219, 2010.
15. Dougall, AM, Paul, ME, Finley, RJ, Holliday, RL, Coles, JC, Duff, JH: Chest Trauma - Current Morbidity and Mortality. *The Journal of Trauma*, 17: 547-553, 1977.
16. Bridges, KG, Welch, G, Silver, M, Schinco, MA, Esposito, B: CT Detection of occult pneumothorax in multiple trauma patients. *The Journal of Emergency Medicine*, 11: 179-186, 1993.
17. Vodička, J, Špidlen, V, Třeška, V, Vejvodová, Š, Doležal, J, Židková, A, Škorpil, J: Traumatic pneumothorax - diagnosis and treatment of 322 cases over a five-year period. *Rozhledy v Chirurgii*, 96: 457-462, 2017.
18. Vodička, J, Špidlen, V, Třeška, V, Vejvodová, Š, Doležal, J, Židková, A, Škorpil, J: Penetrating chest trauma - experience of the Pilsen University Hospital Trauma Centre. *Rozhledy v Chirurgii*, 96: 463-468, 2017.

19. Swierzy, M, Helmig, M., Ismail, M, Rückert, J, Walles, T, Neudecker, J: Pneumothorax. *Zentralblatt für Chirurgie*, 139: 69-87, 2014.
20. Sassoon, CSH, Light, RW, O'Hara, VS, Moritz, TE: Iatrogenic Pneumothorax: Etiology and Morbidity. *Respiration*, 59: 215-220, 1992.
21. Barton, ED, Rhee, P, Hutton, KC, Rosen, P: The pathophysiology of tension pneumothorax in ventilated swine. *The Journal of Emergency Medicine*, 15: 147-153, 1997.
22. Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie e.V. (federführend): S3 – *Leitlinie Polytrauma / Schwerverletzten-Behandlung. Langfassung. 2016*, AWMF Registernummer 012/019. Online: https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/012-019l_S3_Polytrauma_Schwerverletzten-Behandlung_2017-08.pdf, Stand: 03.2021.
23. Roberts, DJ, Leigh-Smith, S, Faris, PD, Blackmore, C, Ball, CG, Robertson, HL, Dixon, E, James, MT, Kirkpatrick, AW, Kortbeek, JB, Stelfox, HT: Clinical Presentation of Patients With Tension Pneumothorax: A Systematic Review. *Annals of Surgery*, 261: 1068-1078, 2015.
24. American College of Surgeons. The Committee on Trauma: Advanced Trauma Life Support ® Student Course Manual. Chicago, IL, American Collge of Surgeons, 2018.
25. Lichtenstein, D, Meziere, G, Biderman, P, Gepner, A: The "lung point": an ultrasound sign specific to pneumothorax. *Intensive Care Medicine*, 26: 1434-1440, 2000.
26. Lichtenstein, DA, Menu, Y: A Bedside Ultrasound Sign Ruling Out Pneumothorax in the Critically Ill. Lung Sliding. *Chest*, 108: 1345-1348, 1995.
27. Ding, W, Shen, Y, Yang, J, He, X, Zhang, M: Diagnosis of pneumothorax by radiography and ultrasonography: a meta-analysis. *Chest*, 140: 859-866, 2011.
28. Alrajhi, K, Woo, MY, Vaillancourt, C: Test characteristics of ultrasonography for the detection of pneumothorax: a systematic review and meta-analysis. *Chest*, 141: 703-708, 2012.
29. Alrajab, S, Youssef, AM, Akkus, NI, Caldito, G: Pleural ultrasonography versus chest radiography for the diagnosis of pneumothorax: review of the literature and meta-analysis. *Critical Care*, 17: R208, 2013.
30. Ebrahimi, A, Yousefifard, M, Kazemi, HM, Rasouli, HR, Asady, H, Jafari, AM, Hosseini, M: Diagnostic Accuracy of Chest Ultrasonography versus Chest Radiography for Identification of Pneumothorax: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Tanaffos*, 13: 29-40, 2014.
31. Baumann, MH, Sahn, SA: Tension pneumothorax: diagnostic and therapeutic pitfalls. *Critical Care Medicine*, 21: 177-179, 1993.
32. Steier, M, Ching, N, Roberts, EB, Nealon, TF: Pneumothorax complicating continuous ventilatory support. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 67: 17-23, 1974.
33. Kleber, C, Giesecke, MT, Tsokos, M, Haas, NP, Buschmann, CT: Trauma-related preventable deaths in Berlin 2010: need to change prehospital management strategies and trauma management education. *World Journal of Surgery*, 37: 1154-1161, 2013.
34. Kuckelman, J, Derickson, M, Phillips, C, Barron, M, Marko, S, Eckert, M, Martin, M: Evaluation of a novel thoracic entry device versus needle decompression in a tension pneumothorax swine model. *The American Journal of Surgery*, 215: 832-835, 2018.

35. Waydhas, C, Sauerland, S: Pre-hospital pleural decompression and chest tube placement after blunt trauma: A systematic review. *Resuscitation*, 72: 11-25, 2007.
36. Martin, M, Satterly, S, Inaba, K, Blair, K: Does needle thoracostomy provide adequate and effective decompression of tension pneumothorax? *The Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 73: 1412-1417, 2012.
37. Drinhaus, H, Annecke, T, Hinkelbein, J: Die Thoraxdekompression in der Notfall- und Intensivmedizin. *Der Anaesthetist*, 65: 768-775, 2016.
38. Barton, ED, Epperson, M, Hoyt, DB, Fortlage, D, Rosen, P: Prehospital needle aspiration and tube thoracostomy in trauma victims: a six-year experience with aeromedical crews. *The Journal of Emergency Medicine*, 13: 155-163, 1995.
39. Britten, S, Palmer, SH, Snow, TM: Needle thoracocentesis in tension pneumothorax: Insufficient cannula length and potential failure. *Injury*, 27: 321-322, 1996.
40. Givens, ML, Ayotte, K, Manifold, C: Needle Thoracostomy: Implications of Computed Tomography Chest Wall Thickness. *Academic Emergency Medicine*, 11: 211-213, 2004.
41. Davis, DP, Pettit, K, Rom, CD, Poste, JC, Sise, MJ, Hoyt, DB, Vilke, GM: The safety and efficacy of prehospital needle and tube thoracostomy by aeromedical personnel. *Prehospital Emergency Care*, 9: 191-197, 2005.
42. Zengerink, I, Brink, PR, Laupland, KB, Raber, EL, Zygun, D, Kortbeek, JB: Needle thoracostomy in the treatment of a tension pneumothorax in trauma patients: what size needle? *The Journal of Trauma*, 64: 111-114, 2008.
43. Chang, SJ, Ross, SW, Kiefer, DJ, Anderson, WE, Rogers, AT, Sing, RF, Callaway, DW: Evaluation of 8.0-cm needle at the fourth anterior axillary line for needle chest decompression of tension pneumothorax. *The Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 76: 1029-1034, 2014.
44. Rawlins, R, Brown, KM, Carr, CS, Cameron, CR: Life threatening haemorrhage after anterior needle aspiration of pneumothoraces. A role for lateral needle aspiration in emergency decompression of spontaneous pneumothorax. *Emergency Medicine Journal*, 20: 383-384, 2003.
45. Butler, KL, Best, IM, Weaver, WL, Bumpers, HL: Pulmonary artery injury and cardiac tamponade after needle decompression of a suspected tension pneumothorax. *The Journal of Trauma*, 54: 610-611, 2003.
46. Laan, DV, Vu, TD, Thiels, CA, Pandian, TK, Schiller, HJ, Murad, MH, Aho, JM: Chest wall thickness and decompression failure: A systematic review and meta-analysis comparing anatomic locations in needle thoracostomy. *Injury*, 47: 797-804, 2016.
47. Inaba, K, Branco, BC, Eckstein, M, Shatz, DV, Martin, MJ, Green, DJ, Noguchi, TT, Demetriades, D: Optimal positioning for emergent needle thoracostomy: a cadaver-based study. *The Journal of Trauma*, 71: 1099-1103; discussion 1103, 2011.
48. Inaba, K, Ives, C, McClure, K, Branco, BC, Eckstein, M, Shatz, D, Martin, MJ, Reddy, S, Demetriades, D: Radiologic evaluation of alternative sites for needle decompression of tension pneumothorax. *Archives of Surgery*, 147: 813-818, 2012.
49. Inaba, K, Karamanos, E, Skiada, D, Grabo, D, Hammer, P, Martin, M, Sullivan, M, Eckstein, M, Demetriades, D: Cadaveric comparison of the optimal site for needle decompression of tension pneumothorax by prehospital care providers. *The Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 79: 1044-1048, 2015.

50. Wax, DB, Leibowitz, AB: Radiologic assessment of potential sites for needle decompression of a tension pneumothorax. *Anesthesia and Analgesia*, 105: 1385-1388, 2007.
51. Wernick, B, Hon, HH, Mubang, RN, Cipriano, A, Hughes, R, Rankin, DD, Evans, DC, Burfeind Jr, WR, Hoey, BA, Cipolla, J, Galwankar, SC, Papadimos, TJ, Stawicki, SP, Firstenberg, MS: Complications of needle thoracostomy: A comprehensive clinical review. *International Journal of Critical Illness and Injury Science*, 5: 160-169, 2015.
52. Dominguez, KM, Ekeh, AP, Tchorz, KM, Woods, RJ, Walusimbi, MS, Saxe, JM, McCarthy, MC: Is routine tube thoracostomy necessary after prehospital needle decompression for tension pneumothorax? *The American Journal of Surgery*, 205: 329-332, 2013.
53. Davis, AM, Wensley, DF, Phelan, PD: Spontaneous pneumothorax in paediatric patients. *Respiratory Medicine*, 87: 531-534, 1993.
54. Dotson, K, Johnson, LH: Pediatric Spontaneous Pneumothorax. *Pediatric Emergency Care*, 28: 715-723, 2012.
55. Poenaru, D, Yazbeck, S, Murphy, S: Primary Spontaneous Pneumothorax in Children. *Journal of Pediatric Surgery*, 29: 1183-1185, 1994.
56. Lee, LPY, Lai, MHY, Chiu, WK, Leung, MWY, Liu, KKW, Chan, HB: Management of primary spontaneous pneumothorax in Chinese children. *Hong Kong Medical Journal*, 16: 94-100, 2010.
57. Duong, HH, Mirea, L, Shah, PS, Yang, J, Lee, SK, Sankaran, K: Pneumothorax in neonates: Trends, predictors and outcomes. *Journal of Neonatal-Perinatal Medicine*, 7: 29-38, 2014.
58. Mayordomo-Colunga, J, Rey, C, Medina, A, Concha, A: Iatrogenic tension pneumothorax in children: two case reports. *Journal of Medical Case Reports*, 3: 7390, 2009.
59. Bliss, D, Silen, M: Pediatric thoracic trauma. *Critical Care Medicine*, 30: 409-415, 2002.
60. Ceran, S, Sunam, GS, Aribas, OK, Gormus, N, Solak, H: Chest trauma in children. *European Journal of Cardio-thoracic Surgery* 21: 57-59, 2002.
61. Reinhorn, M, Kaufman, HL, Hirsch, EF, Millham, FH: Penetrating Thoracic Trauma in a Pediatric Population. *Annals of Thoracic Surgery*, 61: 1501-1505, 1996.
62. Metzelder, M: Thoraxtrauma bei Kindern und Jugendlichen. In: *Pädiatrie*. edited by HOFFMANN, G., LENTZE, M., SPRANGER, J., ZEPP, F., BERNER, R., Springer, Berlin, Heidelberg, 2019, pp 190-192.
63. Berger, S, Stroedter, L: Kinderchirurgische Aspekte der Pädiatrischen Pneumologie. In: *Pädiatrische Pneumologie*. edited by VON MUTIUS, E., GAPPA, M., EBER, E., FREY, U., Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, pp 831-851.
64. Kisson, N, Dreyer, J, Walia, M: Pediatric trauma: differences in pathophysiology, injury patterns and treatment compared with adult trauma. *Canadian Medical Association Journal*, 142: 27-34, 1990.
65. Avarello, JT, Cantor, RM: Pediatric major trauma: an approach to evaluation and management. *Emergency Medicine Clinics of North America*, 25: 803-836, 2007.
66. Sartorelli, KH, Vane, DW: The Diagnosis and Management of Children with Blunt Injury of the Chest. *Seminars in Pediatric Surgery*, 13: 98-105, 2004.

67. Teague, WJ, Amarakone, KV, Quinn, N: Rule of 4's: Safe and effective pleural decompression and chest drain insertion in severely injured children. *Emergency Medicine Australasia*, 31: 683-687, 2019.
68. Schwerk, N: Pleuraerguss, Pneumothorax, Chylothorax und Hämatothorax. In: *Pädiatrische Pneumologie*. edited by VON MUTIUS, E., GAPP, M., EBER, E., FREY, U., Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, pp 733-742.
69. Yacovone, ML, Kartan, R, Bautista, M: Intercostal Artery Laceration Following Thoracentesis. *Respiratory Care*, 55: 1495-1498, 2010.
70. Terboven, T, Leonhard, G, Wessel, L, Viergutz, T, Rudolph, M, Scholer, M, Weis, M, Haubenreisser, H: Chest wall thickness and depth to vital structures in paediatric patients - implications for prehospital needle decompression of tension pneumothorax. *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*, 27: 45, 2019.
71. Deutsche Gesellschaft für Kinderchirurgie e.V. (federführend): *S2K – Leitlinie Polytraumaversorgung im Kindesalter. Langfassung. 2020*, AWMF Registernummer 006-120. Online: https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/006-120I_S2k_Polytraumaversorgung-im-Kindesalter_2021-02.pdf, Stand: 03.2021.
72. Carlson, JN, Gannon, E, Mann, NC, Jacobson, KE, Dai, M, Colleran, C, Wang, HE: Pediatric Out-of-Hospital Critical Procedures in the United States. *Pediatric Critical Care Medicine*, 16: 260-267, 2015.
73. Wood, CL, Lane, LC, Cheetham, T: Puberty: Normal physiology (brief overview). *Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism*, 33: 101265, 2019.
74. Bowness, JS, Nicholls, K, Kilgour, PM, Ferris, J, Whiten, S, Parkin, I, Mooney, J, Driscoll, P: Finding the fifth intercostal space for chest drain insertion: guidelines and ultrasound. *Emergency Medicine Journal*, 32: 951-954, 2015.
75. Netto, FA, Shulman, H, Rizoli, SB, Tremblay, LN, Brenneman, F, Tien, H: Are needle decompressions for tension pneumothoraces being performed appropriately for appropriate indications? *The American Journal of Emergency Medicine*, 26: 597-602, 2008.
76. Terboven, T, Felcht, J, Zahn, K, Rudolph, M, Schöler, M: Verletzung der A. pulmonalis im Rahmen einer Nadeldekompression bei einem 5-jährigen Mädchen. *Notfall + Rettungsmedizin*, 23: 289-292, 2020.
77. Ferrie, EP, Collum, N, McGovern, S: The right place in the right space? Awareness of site for needle thoracocentesis. *Emergency Medicine Journal*, 22: 788-789, 2005.
78. Nishino, M, Ashiku, SK, Kocher, ON, Thurer, RL, Boiselle, PM, Hatabu, H: The Thymus: A Comprehensive Review. *RadioGraphics*, 26, 2006.
79. Woolley, MM, Isaacs, H, Lindesmith, G, Vollmer, DM, Van Adelsberg, S: Spontaneous Thymic Hemorrhage in the Neonate: Report of Two Cases. *Journal of Pediatric Surgery*, 9: 231-233, 1974.
80. Bees, NR, Richards, SW, Fearn, C, Drake, DP, Dicks-Mireaux, C: Neonatal thymic haemorrhage. *The British Journal of Radiology*, 70: 210-212, 1997.
81. Bare, JB, Abramowsky, CR, Denton, TD, Dykes, FD, Shehata, BM: Perforation of the superior vena cava during ECMO catheterization in two neonates with congenital diaphragmatic hernia: a cause of accidental death. *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology*, 29: 271-273, 2008.
82. Eckstein, M, Suyehara, D: Needle Thoracostomy in the Prehospital Setting. *Prehospital Emergency Care*, 2: 132-135, 1998.

83. Blaivas, M: Inadequate Needle Thoracostomy Rate in the Prehospital Setting for Presumed Pneumothorax: An Ultrasound Study. *Journal of Ultrasound in Medicine*, 29: 1285-1289, 2010.
84. Akoglu, H, Akoglu, EU, Evman, S, Akoglu, T, Altinok, AD, Guneyssel, O, Onur, OE, Eroglu, SE: Determination of the appropriate catheter length and place for needle thoracostomy by using computed tomography scans of pneumothorax patients. *Injury*, 44: 1177-1182, 2013.
85. Eifinger, F, Lenze, M, Brisken, K, Welzing, L, Roth, B, Koebke, J: The anterior to midaxillary line between the 4th or 5th intercostal space (Buelau position) is safe for the use of thoracostomy tubes in preterm and term infants. *Pediatric Anesthesia*, 19: 612-617, 2009.
86. Bowness, J, Kilgour, PM, Whiten, S, Parkin, I, Mooney, J, Driscoll, P: Guidelines for chest drain insertion may not prevent damage to abdominal viscera. *Emergency Medicine Journal*, 32: 620-625, 2015.
87. Ellis, H: The applied anatomy of chest drain insertion. *British Journal of Hospital Medicine*, 71: M52-53, 2010.
88. Ball, CG, Lord, J, Laupland, KB, Gmora, S, Mulloy, RH, Ng, AK, Schieman, C, Kirkpatrick, AW: Chest tube complications: How well are we training our residents? *Canadian Journal of Surgery*, 50: 450-458, 2007.
89. Gray, EJ, Cranford, JA, Betcher, JA, Huang, RD, Kessler, RA, Theyyuni, N, Majkrzak, AA: Sonogram of safety: Ultrasound outperforms the fifth intercostal space landmark for tube thoracostomy site selection. *Journal of Clinical Ultrasound*, 48: 303-306, 2020.
90. Kwiatt, M, Tarbox, A, Seamon, MJ, Swaroop, M, Cipolla, J, Allen, C, Hallenbeck, S, Davido, HT, Lindsey, DE, Doraiswamy, VA, Galwankar, S, Tulman, D, Latchana, N, Papadimos, TJ, Cook, CH, Stawicki, SP: Thoracostomy tubes: A comprehensive review of complications and related topics. *International Journal of Critical Illness and Injury Science*, 4: 143-155, 2014.
91. Miller, KS, Sahn, SA: Chest tubes. Indications, technique, management and complications. *Chest*, 91: 258-264, 1987.
92. Reddy, V, Sharma, S, Cobanoglu, A: What dictates the position of the diaphragm - The heart or the liver? *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 108: 687-691, 1994.
93. Sanchez, LD, Straszewski, S, Saghir, A, Khan, A, Horn, E, Fischer, C, Khosa, F, Camacho, MA: Anterior versus lateral needle decompression of tension pneumothorax: comparison by computed tomography chest wall measurement. *Academic Emergency Medicine*, 18: 1022-1026, 2011.
94. Leonhard, G, Overhoff, D, Wessel, L, Viergutz, T, Rudolph, M, Scholer, M, Haubenreisser, H, Terboven, T: Determining optimal needle size for decompression of tension pneumothorax in children - a CT-based study. *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*, 27: 90, 2019.
95. Sokol, KK, Black, GE, Azarow, KS, Long, W, Martin, MJ, Eckert, MJ: Prehospital interventions in severely injured pediatric patients: Rethinking the ABCs. *The Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 79: 983-989; discussion 989-990, 2015.
96. Aylwin, CJ, Brohi, K, Davies, GD, Walsh, MS: Pre-hospital and in-hospital thoracostomy: indications and complications. *Annals of the Royal College of Surgeons of England*, 90: 54-57, 2008.

7 LEBENS LAUF

PERSONALIEN

Name und Vorname: Heblich, Lea-Antonia
Geburtsdatum: 20.02.1996
Geburtsort: Bad Kreuznach
Familienstand: ledig
Vater: Scholl, Thomas
Mutter: Heblich, Esther

SCHULISCHER WERDEGANG

2002 – 2006 Grundschule Kleiststraße Bad Kreuznach
2006 – 2015 Lina-Hilger-Gymnasium Bad Kreuznach

12. März 2015 Abitur

UNIVERSITÄRER WERDEGANG

WS2015/16 Beginn des Studiums der Humanmedizin
 an der Medizinischen Fakultät Mannheim
 der Universität Heidelberg

2015 – 2017 Grundstudium
2017 - 2022 Hauptstudium

14. September 2017 1. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

7. Oktober 2021 2. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

11. November 2022 3. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

8 DANKSAGUNG

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. med. Tim Viergutz, danke ich für die Überlassung des Themas dieser Arbeit und die ausgezeichneten Möglichkeiten, es zu bearbeiten.

Ebenso danke ich Herrn Dr. med. Daniel Overhoff für die Unterstützung bei der Datenerhebung sowie Beantwortung aller radiologisch-technischen Fragen und Frau Prof. Dr. Christel Weiß und den Kollegen ihrer Abteilung für die stets schnelle und zuverlässige Bearbeitung aller statistischen Anfragen.

Besonderen Dank jedoch schulde ich Herrn Dr. med. Tom Terboven für die überragende Betreuung, sein uneingeschränktes Engagement für das Projekt sowie die vielen Hinweise, die zur Vollendung desselben notwendig waren.

Weiterhin danke ich Christian Blaufuß für die Durchsicht meiner Arbeit.

Mein letzter großer Dank gilt meiner Familie, die immer hinter mir steht, mich unterstützt und mir stets beim Erreichen meiner Ziele geholfen hat.