

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

Die Nadeldekompression des Spannungspneumothorax im Kindesalter:
CT-basierter Vergleich verschiedener Punktionsorte
bei Kindern im Alter von 0, 5 und 10 Jahren

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

vorgelegt von
Georg Leonhard

aus
Bad Friedrichshall
2020

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

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	1
1 EINLEITUNG.....	2
1.1 Epidemiologie und Ätiologie des Spannungspneumothorax im Kindesalter ..	2
1.2 Präklinische Diagnostik des (Spannungs)pneumothorax	4
1.3 Präklinische Versorgung des (Spannungs)pneumothorax.....	5
1.3.1 Studienlage zur Wahl des Punktionsortes und der Nadellänge für die Nadeldekompression.....	7
1.4 Fragestellung.....	10
2 MATERIAL UND METHODEN.....	11
2.1 Auswahl der CT-Aufnahmen	11
2.1.1 Einschluss- und Ausschlusskriterien.....	11
2.1.2 Technische Spezifikationen der CT-Aufnahmen.....	12
2.2 Messungen.....	13
2.2.1 Messung der ICR-Breite	13
2.2.2 Messung der Thoraxwanddicke (TWD)	15
2.2.3 Messung des Abstands zu vitalen Strukturen (TVS).....	17
2.2.4 Bestimmung der Intrapleuralen Sicherheitszone (ISZ)	18
2.3 Auswertung der Messungen.....	18
3 ERGEBNISSE	19
3.1 Demografische Daten der Patienten.....	19
3.2 ICR-Breite.....	20
3.2.1 ICR-Breite in Abhängigkeit vom Geschlecht.....	21
3.3 Thoraxwanddicke (TWD).....	22
3.3.1 Simulierte Misserfolgsrate bei einer Insertionstiefe von 5,0 cm	24
3.3.2 TWD in Abhängigkeit vom Geschlecht	25
3.4 Tiefe zu vitalen Strukturen (TVS).....	26
3.4.1 TVS in Abhängigkeit vom Geschlecht.....	28
3.4.2 Vitale Strukturen in einer Tiefe von weniger als 5,0 cm	29

3.5	Intrapleurale Sicherheitszone (ISZ)	34
3.5.1	Direkt anliegende vitale Strukturen	36
3.6	Vergleich von orthogonalem und sagittalem Punktionswinkel im 2. ICR	37
3.7	Vergleich der optimalen Punktionswinkel der jeweiligen Punktionsorte	39
3.8	Simulierte Erfolgs- und Verletzungsraten für unterschiedliche Nadeln	41
3.8.1	Nadellänge	41
3.8.2	Nadeldurchmesser	47
4	DISKUSSION	48
4.1	ICR-Breite	48
4.2	Thoraxwanddicke (TWD)	48
4.3	Tiefe zu vitalen Strukturen (TVS) und mögliche Verletzungsraten	51
4.3.1	TVS im Vergleich zu Erwachsenen	51
4.3.2	Verletzungsraten im Vergleich zu Erwachsenen	52
4.3.3	TVS in Abhängigkeit vom Punktionsort	53
4.3.4	Verletzungsraten in Abhängigkeit vom Punktionsort	53
4.3.5	TVS und getroffene Strukturen im Seitenvergleich	57
4.4	Intrapleurale Sicherheitszone (ISZ)	58
4.5	Auswahl der Nadel für die verschiedenen Altersgruppen	58
4.5.1	Nadellänge	58
4.5.2	Nadeldurchmesser	60
4.6	Sagittaler vs. orthogonaler Punktionswinkel im 2. ICR	60
4.7	Abhängigkeit der Ergebnisse vom Geschlecht	62
4.8	Limitationen	62
4.9	Schlussfolgerung / Ausblick	64
5	ZUSAMMENFASSUNG	66
6	LITERATURVERZEICHNIS	68
7	LEBENS LAUF	75
8	DANKSAGUNG	76

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ICR	Interkostalraum
AAL	anteriore Axillarlinie
MCL	Medioklavikularlinie
TWD	Thoraxwanddicke (chest wall thickness)
TWD _{ortho}	Thoraxwanddicke bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand
TWD _{close}	Thoraxwanddicke bei Punktion zur nächstgelegenen Struktur
TWD _{sag}	Thoraxwanddicke bei Punktion in Sagittalrichtung
TVS	Tiefe zu vitaler Struktur (depth to vital structure)
TVS _{ortho}	Tiefe zu vitaler Struktur bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand
TVS _{close}	Tiefe zu vitaler Struktur bei Punktion zur nächstgelegenen Struktur
TVS _{sag}	Tiefe zu vitaler Struktur bei Punktion in Sagittalrichtung
ISZ	Intrapleurale Sicherheitszone
ISZ _{ortho}	Intrapleurale Sicherheitszone bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand
ISZ _{close}	Intrapleurale Sicherheitszone bei Punktion zur nächstgelegenen Struktur
ISZ _{sag}	Intrapleurale Sicherheitszone bei Punktion in Sagittalrichtung

1 EINLEITUNG

Der Spannungspneumothorax stellt bei Kindern und Erwachsenen einen lebensbedrohlichen Notfall dar^{1, 2} und zählt zu den wichtigsten potentiell reversiblen Ursachen eines traumatisch bedingten Kreislaufstillstandes.³ Durch den unidirektionalen Ventilmechanismus kommt es zu einer Kompression der Lunge mit konsekutiver Hypoxämie, der erhöhte intrathorakale Druck führt zu einer Verminderung des venösen Rückstroms mit daraus resultierendem Herz-Kreislauf-Versagen.⁴ Eine erfolgreiche Entlastung kann im Einzelfall die Prognose des Patienten entscheidend verbessern und unerwartetes Überleben bedeuten,^{5, 6} umgekehrt kann ein nicht oder zu spät erkannter Spannungspneumothorax fatale Folgen haben.⁷

1.1 Epidemiologie und Ätiologie des Spannungspneumothorax im Kindesalter

Zur Inzidenz des Spannungspneumothorax im Kindesalter gibt es bislang wenige aussagekräftigen Daten. Prinzipiell kann er sich aus allen Arten von Pneumothoraxen entwickeln, weshalb an dieser Stelle besondere Risikokonstellationen im Kindesalter kurz dargelegt werden.

Epidemiologische Daten liegen am ehesten über den Spontanpneumothorax vor, dessen Inzidenz in einer aktuellen Studie von Schnell et al. mit etwa 22,2/100.000 bei Männern und 6,7/100.000 bei Frauen angegeben wird. Sie ist, basierend auf der Anzahl der Hospitalisationen mit Hauptdiagnose „Pneumothorax“, bei Männern mit 20-25 Jahren und bei Frauen mit 25-30 Jahren am höchsten.⁸ Allerdings gilt der Spontanpneumothorax in der Altersgruppe von 0-17 Jahren mit einer jährlichen Inzidenz von 4/100.000 bei Jungen bzw. 1,1/100.000 bei Mädchen als vergleichsweise selten.⁹ Eine Ausnahme stellen Neugeborene mit einer Inzidenz von 0,5-1 % und unter ihnen vor allem Frühgeborene mit einer Inzidenz von etwa 3-6 % dar.¹⁰ Risikofaktoren sind hierbei unter anderem das Atemnotsyndrom des Neugeborenen und die Überdruckbeatmung,^{10, 11} durch welche es zu einer Überblähung und Ruptur der Alveolarwand kommen kann.¹⁰

Auch der iatrogene Pneumothorax kann bei Kindern ebenso wie bei Erwachsenen beispielsweise durch ein Barotrauma bei Beatmung, als Komplikation invasiver

Maßnahmen wie einer ZVK-Anlage oder bei Pleurapunktionen (und somit auch bei einer Nadeldekompression) entstehen.¹²

Der traumatische Pneumothorax gilt als eine der häufigsten Verletzungen bei Thoraxtraumata, wobei die Häufigkeit mit etwa 5-50 % angegeben wird.¹³⁻¹⁵ Die zugrunde liegenden Traumata können penetrierend oder stumpf sein, wobei letztere bei Kindern überwiegen.^{2, 16} Als bedeutendste Ursache für Thoraxverletzungen und Pneumothoraxes im Kindesalter gelten Verkehrsunfälle, an denen Kinder als Fahrzeuginsassen oder Fußgänger bzw. Radfahrer beteiligt sein können.^{15, 17}

Das Risiko der Progression zu einem Spannungspneumothorax wird bei Kindern allgemein mit bis zu 20 %¹⁸ und bei traumatischem Pneumothorax mit ca. 25 % angegeben.^{19, 20} Auch die Progression könnte durch Überdruckbeatmung begünstigt werden, wenngleich die Evidenz für diesen möglichen Zusammenhang bislang gering ist. So konnte eine Studie von Moore et al. (2011) trotz deutlich höherer Wahrscheinlichkeit der Progression bei beatmeten gegenüber nicht-beatmeten Patienten (14 % vs. 6 %) die Überdruckbeatmung nicht als unabhängigen Prädiktor für eine Progression eines okkulten zu einem interventionsbedürftigen Pneumothorax identifizieren.²¹ Dennoch wird sowohl in der S3-Leitlinie Polytrauma / Schwerverletzten-Versorgung²² als auch in der 6. Auflage des Advanced Pediatric Life Support (APLS)²³ auf ein möglicherweise erhöhtes Risiko für eine Progredienz bei beatmeten Patienten hingewiesen und es werden in der Folge unterschiedliche Handlungsempfehlungen für beatmete und nicht-beatmete Patienten ausgesprochen (siehe Kap. 1.3).

Bei Kindern liegen mehrere spezielle Faktoren vor, die das Auftreten eines Spannungspneumothorax begünstigen und das Krankheitsbild noch bedrohlicher machen können:

Aufgrund einer höheren Elastizität des Brustkorbs werden die von außen einwirkenden Kräfte besonders stark an die darunterliegenden Strukturen weitergegeben. Aus demselben Grund liegen bei Kindern im Gegensatz zu Erwachsenen häufig auch schwerwiegende Thoraxverletzungen ohne Rippenfrakturen vor, was deren Diagnose erschweren kann.^{16, 24}

Die höhere Verschieblichkeit des Mediastinums kann bei einem Spannungspneumothorax eine Verlegung wichtiger Blutgefäße wie der V. cava superior begünstigen, wodurch es zu einem akuten Kreislaufversagen kommen kann.²⁰ Ferner kann sie zu einer im Vergleich zu Erwachsenen schnelleren

respiratorischen Dekompensation durch Kompression der kontralateralen Lunge durch die raumfordernde Wirkung der Luft in der Pleurahöhle beitragen.²⁵

Hinzu kommt, dass die Kompensationsmöglichkeiten zur Abwendung eines Sauerstoffmangels bei Kindern unter anderem durch einen im Vergleich zu Erwachsenen höheren Sauerstoffverbrauch bei gleichzeitig geringerer funktioneller Residualkapazität und Lungencompliance eingeschränkt sind.²⁵

1.2 Präklinische Diagnostik des (Spannungs)pneumothorax

Das Vorliegen eines ausgeprägten Pneumothorax lässt sich durch eine Kombination von Leitsymptomen und der Auskultation häufig feststellen. Bei gleichzeitigem Vorliegen von thorakalem Schmerz, Dyspnoe und dem typischen Auskultationsbefund (aufgehobenes Atemgeräusch) ist mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit ein Pneumothorax vorhanden.²² Von einem Spannungspneumothorax sollte ausgegangen werden, wenn parallel zum Auskultationsbefund schwere respiratorische oder hämodynamische Funktionsstörungen vorliegen.²²

Im präklinischen Setting kann jedoch vor allem die Auskultation durch einen zu hohen Geräuschpegel erschwert sein.^{26, 27} Zudem ist eine unterstützende apparative Diagnostik oft nicht möglich. Neben dem Risiko eines übersehenen Spannungspneumothorax können dadurch vermehrt falsch positive Befunde auftreten.²⁸ Bei Nichtvorhandensein eines Spannungspneumothorax sind die für die Punktion potentiell protektive intrapleurale Luftlamelle und die Mediastinalverlagerung zur Gegenseite nicht vorhanden und die Lunge vollständig expandiert. Auch deshalb ist die Auswahl einer im Hinblick auf darunterliegende Strukturen möglichst sicheren Punktionsstelle von großer Bedeutung.

Eine weitere Möglichkeit in der Diagnostik des Pneumothorax stellt die Ultraschalluntersuchung dar. Gemäß den Ergebnissen einer internationalen Konsensuskonferenz macht das Vorhandensein eines „Lungenpunktes“, sowie das Fehlen von „Lungengleiten“, „Lungenpuls“ und „B-Linien“ das Vorliegen eines Pneumothorax wahrscheinlich.²⁹ In einer Metaanalyse von Ding et al. zeigte sich, zumindest im klinischen Setting, eine Sensitivität von durchschnittlich 88 %.³⁰ Die Genauigkeit ist allerdings von der Fähigkeit des Untersuchers abhängig.^{30, 31} Das Verfahren geht beim geübten Anwender nur mit einem geringfügig erhöhten

Zeitaufwand einher, es muss jedoch darauf geachtet werden, die übrige Evaluation und Versorgung des Patienten nicht zu beeinträchtigen. Aufgrund der geringen Erfahrung und Evidenz für die präklinische Anwendung fand sich in der S3-Leitlinie Polytrauma / Schwerverletzten-Versorgung keine generelle Empfehlung für oder gegen den routinemäßigen Einsatz des Verfahrens.²² In der aktuellen, 10. Auflage des Advanced Trauma Life Support (ATLS) wurde der präklinische Ultraschall des Thorax bei entsprechender Ausrüstung und Erfahrung des Untersuchers als Teil der erweiterten Ultraschalluntersuchung (eFAST = extended focused assessment with sonography in trauma) erstmals in den Diagnosealgorithmus bei Verdacht auf Spannungspneumothorax aufgenommen.³²

1.3 Präklinische Versorgung des (Spannungs)pneumothorax

Gemäß der aktuellen S3-Leitlinie Polytrauma / Schwerverletzten-Versorgung sollte ein durch Auskultation festgestellter Pneumothorax bei spontan atmenden Patienten engmaschig kontrolliert, bei mit Überdruck beatmeten Patienten hingegen dekomprimiert werden. Bei einem Thoraxtrauma mit unauffälligem Auskultationsbefund kann nur unter besonderen Umständen wie einer absehbar langen Transportzeit und auch dann nur bei beatmeten Patienten eine Dekompression erfolgen, bei spontan atmenden besteht hier keine Indikation.

Wird (jedoch) ein Spannungspneumothorax anhand der in Kap. 1.2 genannten Kriterien vermutet, so wird in der Leitlinie und in zahlreichen Publikationen eine umgehende präklinische Dekompression ausdrücklich (Empfehlungsgrad A) empfohlen.^{14, 16, 22, 33, 34} Von bildgebenden Verfahren vor Einleitung der Therapie wird aufgrund der Zeitverzögerung vor allem bei instabilen Patienten abgeraten.^{14, 32, 35, 36}

Die Verwendung von Ultraschall durch den geschulten und geübten Anwender kann jedoch vorteilhaft sein.^{22, 32}

Für die Entlastung eines Pneumothorax stehen grundsätzlich drei Methoden zur Auswahl, die jeweils ein unterschiedliches Profil an Vor- und Nachteilen aufweisen und die im Folgenden kurz erläutert werden:

Die chirurgische Eröffnung in Kombination mit einer Thoraxdrainage zeichnet sich durch eine vergleichsweise hohe Erfolgsrate und anhaltende Wirksamkeit in 79-95 % der Fälle aus.^{37, 38} Allerdings kann es zu Verletzungen vitaler Strukturen und Organe kommen, außerdem stellen Fehllagen und Infektionen weitere mögliche

Komplikationen dar.^{26, 39} Bei Kindern kann dies auch mit einem Pigtail-Katheter in Seldinger-Technik durchgeführt werden.^{40, 41}

Eine einfache chirurgische Eröffnung ohne anschließende Thoraxdrainage gilt nur bei mit Überdruck beatmeten Patienten als Option, da anderenfalls der bei Spontanatmung größtenteils negative intrapleurale Druck einen weiteren Einstrom von Luft in den Pleuraspalt bewirken würde. Zur Entlastung eines Spannungspneumothorax erscheint sie jedoch prinzipiell geeignet.^{22, 42, 43}

Die Durchführung der Nadeldekompression erfolgt meist mithilfe einer Venenverweilkanüle. Von manchen Autoren wird empfohlen, die Insertion unter kontinuierlicher Aspiration über eine mit der Kanüle konnektierte flüssigkeitsgefüllte Spritze durchzuführen, das Erreichen des Pleuraspaltes kann bei Einströmen von Luft in die Spritze festgestellt werden.^{32, 44} Die Nadeldekompression bietet als wohl wichtigsten Vorteil eine deutliche Zeitersparnis, die gerade beim Spannungspneumothorax von großer Bedeutung ist.^{39, 45} Dem gegenüber steht eine hohe Misserfolgsrate, die zum einen durch ein Nicht-Erreichen des Pleuraspaltes bei einer zu großen Brustwanddicke¹³ und zum anderen sekundär durch ein mögliches Verstopfen, Abknicken oder Dislokation der Nadel bedingt ist.⁴⁶ Auch der Umstand, dass sie einen Spannungspneumothorax lediglich in einen einfachen Pneumothorax umwandelt⁴⁷, trägt dazu bei, dass sie von vielen Autoren nur als temporäre und nicht als definitive Maßnahme angesehen wird.^{32, 47-49} Komplikationen durch Verletzung unterschiedlicher wichtiger Strukturen bei der Nadeldekompression wurden in diversen Fallberichten beschrieben. So berichteten Butler et al. von einer Pulmonalarterienverletzung und einer daraus resultierenden Perikardtamponade bei einem weiblichen Verkehrsunfallopfer, infolge welcher eine Perikardiozentese und anschließend eine operative Exploration notwendig wurden.³⁷ In einem weiteren Fallbericht wurden drei Fälle von Spontanpneumothoraxes dargelegt, bei denen es im Anschluss an eine Nadeldekompression zu massiven Blutungen kam, die Patienten reanimationspflichtig wurden und in zwei der Fälle ebenfalls eine chirurgische Intervention zur Blutstillung und Thrombusentfernung durchgeführt werden musste.³⁸ Auch die versehentliche Punktion der A. subclavia mit einem resultierenden Blutverlust von insgesamt ca. 2.500 ml wurde in einem Fallbericht beschrieben.⁵⁰

Dass auch die Verletzung einer Intercostalarterie bei vergleichbaren Maßnahmen schwerwiegende Folgen haben kann, zeigte ein Fallbericht von Yacovone et al.

Infolge einer Thorakozentese mit einer 8-French-Kanüle (dies entspricht einem Außendurchmesser von 2,67 mm) entwickelte ein Patient einen Hämatothorax und eine konservativ nicht mehr beherrschbare Blutung.⁵¹

Bei einer Perforation von Bronchien oder Lungenparenchym kann es auch bei Patienten ohne initial bestehenden Pneumothorax zur Bildung eines Lecks und infolgedessen eines iatrogenen Pneumothorax kommen.⁴⁸

Insgesamt gelten Komplikationen infolge einer Nadeldekompression jedoch zumindest bei Erwachsenen als relativ selten.^{39, 48}

Eine auf vergleichenden Untersuchungen basierende Empfehlung für oder gegen eine bestimmte Methode liegt laut der S3-Leitlinie nicht vor. Nicht zuletzt angesichts der Zeitersparnis wird beim Spannungspneumothorax initial eine Nadeldekompression empfohlen, die im Anschluss durch eine einfache chirurgische Eröffnung (Mini-Thorakotomie) oder eine Thoraxdrainage ergänzt werden sollte. Bei ausbleibendem Erfolg des ersten Versuchs der Nadeldekompression soll umgehend zu einem der anderen Verfahren übergegangen werden. Für die Versorgung eines unkomplizierten Pneumothorax, sofern diese präklinisch indiziert ist, wird hingegen der Thoraxdrainage der Vorzug gegeben. Auch in der pädiatrischen Literatur wird die Nadeldekompression als Methode zur Erstversorgung des Spannungspneumothorax angeführt,^{15, 32, 52} zum Teil werden die Thoraxdrainage^{53, 54} oder die einfache Thorakotomie¹⁵ als alternative bzw. ergänzende Maßnahmen genannt.

1.3.1 Studienlage zur Wahl des Punktionsortes und der Nadellänge für die Nadeldekompression

Lange Zeit wurde bei Erwachsenen eine Nadeldekompression mit einer 5 cm langen Nadel als sichere und effektive Notfallmaßnahme angesehen,⁵⁵ bei Erwachsenen galt der 2. ICR in der Medioklavikularlinie als Standard. Nachdem vermehrt über erfolglose Entlastungsversuche berichtet wurde,^{56, 57} kamen Zweifel an dieser Empfehlung auf, und es wurde nach Möglichkeiten gesucht, die Rate an Misserfolgen zum einen durch die Wahl eines Punktionsortes mit möglichst geringer Thoraxwanddicke und zum anderen durch Evaluation einer optimalen Nadellänge zu reduzieren. Dennoch gehen die Empfehlungen bezüglich der Wahl des Punktionsortes und der Nadellänge für erwachsene Patienten auseinander.

Eine Metaanalyse von 13 größtenteils radiographischen, an Erwachsenen durchgeführten Studien sprach sich aufgrund der geringeren Brustwanddicke und der höheren theoretischen Erfolgsrate (bei Verwendung einer 5 cm langen Nadel) für die Wahl des 4. oder 5. ICR in der vorderen oder mittleren Axillarlinie als Punktionsort aus.⁵⁸ Da einzelne Studien beim Vergleich der Brustwanddicke zwischen dem 2.-3. ICR in der Medioklavikularlinie und dem 4.-5. ICR in der vorderen oder mittleren Axillarlinie zu unterschiedlichen Ergebnissen kamen, konnte die aktuelle AWMF-Leitlinie Polytrauma / Schwerverletzten-Versorgung keine eindeutige Empfehlung ableiten.²² Im ATLS-Kursbuch wird seit der Aktualisierung 2018 erstmals der 5. ICR in der mittleren Axillarlinie als bevorzugter Punktionsort angegeben.³²

Für eine Nadellänge von 4,5-5,0 cm lieferten sowohl CT-basierte Studien als auch klinisch prospektive Untersuchungen an realen Patienten sehr unterschiedliche theoretische bzw. tatsächliche Misserfolgsraten im Bereich zwischen 4 und 50%.⁵⁸ Daneben wurde auch der Einsatz längerer Kanülen evaluiert. So ergab eine CT-basierte Studie, dass die Verwendung einer längeren Nadel (80 mm vs. 50 mm) bei Erwachsenen mit einer höheren Erfolgsrate (96-100 % vs. 66-81 %), jedoch auch mit einem höheren Verletzungsrisiko (je nach Punktionsstelle maximal 9 % vs. 1 %) einhergeht.⁵⁹ Während im ATLS-Kursbuch in der aktuellen, 10. Auflage eine Nadellänge von 5 cm für kleinere und 8 cm für größere Personen empfohlen wird,³² wird im PHTLS-Kursbuch (Prehospital Trauma Life Support) und der auf militärische Einsätze ausgerichteten TCCC-Leitlinie (Tactical Combat Casualty Care) generell zur Verwendung von knapp 8 cm langen Kanülen geraten.^{59, 60} Die deutsche Leitlinie verzichtet auch bei der Nadellänge bislang auf eine generelle Empfehlung.²²

Auch in der spärlich vorhandenen Literatur zum Thema Spannungspneumothorax im Kindesalter finden sich zum Teil unterschiedliche Empfehlungen.

So wird in der 10. Auflage des ATLS-Kursbuchs nach wie vor eine Punktion im 2. ICR medioklavikulär empfohlen.³² Auch in „Kinderchirurgie: Basiswissen und Praxis“ (Heinrich/Neuhaus, 2012) und wird der 2./3. ICR als Punktionsort genannt. Hier findet sich auch die Empfehlung, mit „der größtmöglichen Kanüle (bis 15 G)“ zu punktieren,⁶¹ es findet hierbei jedoch keine Differenzierung nach Altersgruppen statt. Für Neugeborene wurden in Publikationen unter anderem 22-G-Kanülen⁶² oder 21-G-Butterfly-Nadeln⁶³ erwähnt, die genaue Nadellänge wurde jedoch, obwohl gängige Modelle mit diesen Durchmesser in Längen von 19 bis 40 mm zu finden sind, nicht angegeben. Das ATLS Students Course Manual nannte bei Säuglingen

und Kleinkindern 14-18 G als Durchmesser, mahnte jedoch zur Vorsicht aufgrund der Gefahr, durch die Punktion selbst einen Pneumothorax hervorzurufen.³²

In der 3. Auflage von „Pädiatrische Pneumologie“ (Mutius, Gappa et al., 2013) wird für Thoraxdrainage und Punktion, bei Pneumothorax allgemein, das „sichere axilläre Dreieck“ zwischen dem lateralen Rand des M. pectoralis major (vordere Begrenzung) und dem anterioren Rand des M. latissimus dorsi (hintere Begrenzung) empfohlen, welches am ehesten der hier untersuchten lateralen Punktionsstelle im 4. ICR entspricht. Für apikale Pneumothoraxes wird jedoch auch die Monaldi-Position als möglicher Punktionsort aufgeführt. Hier finden sich zudem etwas konkretere Empfehlungen für die Auswahl einer Kanüle: für Frühgeborene werden 24 G, für Säuglinge 22 G und für Kinder und Jugendliche 14/16 G genannt.⁶⁴ Hierbei ist jedoch anzumerken, dass sich dies zum einen auf Einmalpunktionen bezieht, bei denen nicht notwendigerweise eine akute vitale Bedrohung vorliegen muss, und zum anderen keine genaueren Angaben über die Nadellänge (oder ungefähre Thoraxwanddicke) zu finden sind.

Auch Metzelder und Sacher geben im Kapitel „Thoraxtrauma“ in „Pädiatrie: Grundlagen und Praxis“ (2014) den 4. ICR in der mittleren Axillarebene als Punktionsort an.²⁰

Anfang 2019 wurde erstmals eine Studie veröffentlicht, die sich mit der Auswahl der Nadellänge bei Kindern befasste. Mandt et al. vermaßen in CT-Aufnahmen die Thoraxwanddicke im 2. ICR (MCL) und im 4. ICR (AAL). Die Patienten im Alter von 0-13 Jahren wurden entsprechend der Körperlänge in vier Gruppen eingeteilt, die jeweils mehrere Kategorien gemäß dem Broselow™-Band umfassten. Hierbei handelt es sich um ein spezielles Maßband, mit dem sich bei Kindern anhand der Körperlänge das Körpergewicht zügig abschätzen lässt, um beispielsweise Medikamentendosierungen oder Endotrachealtubusgrößen im Notfall schnell auszuwählen. Aufgrund der als gering bewerteten Unterschiede zwischen den Altersgruppen und zwischen den Punktionsorten wurde eine Nadellänge von 3,8 cm bei einem Nadeldurchmesser von 14-16 G für alle untersuchten Altersgruppen als angemessen erachtet. Die Studie beschränkte sich auf die Messung der Thoraxwanddicke, ein Vergleich hinsichtlich der Sicherheit der beiden Punktionsorte fand nicht statt.⁶⁵

Da bis zum Erscheinen der Publikation von Mandt et al. keine Studien bekannt waren, die sich mit der Auswahl des Punktionsortes und der Nadellänge bei einem Spannungspneumothorax im Kindesalter befassten, ist davon auszugehen, dass die übrigen, zuvor genannten Empfehlungen hierzu nicht evidenzbasiert sind.

1.4 Fragestellung

Den vorliegenden Studien ist gemeinsam, dass sie sich fast ausschließlich mit der Versorgung von Erwachsenen befassten, und minderjährige Patienten entweder als Teil des Patientenkollektivs nicht separat betrachtet, oder aber für die Analyse von vornherein ausgeschlossen wurden.

Somit stellt sich die Frage, ob die bislang gewonnenen Ergebnisse auf Kinder übertragen werden können. Zudem ergeben sich, auch aufgrund der kleineren Körpermaße, einige zum Teil neue Fragestellungen, die einer näheren Betrachtung bedürfen:

1. Welcher Punktionsort bietet eine größere ICR-Breite und somit ein geringeres Risiko für eine versehentliche Verletzung des interkostalen Gefäß-Nerven-Bündels?
2. Welche Thoraxwanddicke ist an den empfohlenen Punktionsstellen in welcher Altersklasse zu erwarten?
3. Welcher Punktionsort ist sicherer im Hinblick auf eine mögliche Verletzung vitaler Strukturen?
4. Welche Nadellänge sollte in welcher Altersgruppe gewählt werden?

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Auswahl der CT-Aufnahmen

2.1.1 Einschluss- und Ausschlusskriterien

Um Veränderungen in den relevanten Parametern im Verlauf des Wachstumsprozesses erkennen zu können und gleichzeitig (auch im Hinblick auf die praktische Umsetzung der Ergebnisse) eine gewisse Übersichtlichkeit zu wahren, wurde die Entscheidung zur Untersuchung von drei Altersgruppen getroffen. Es wurden deshalb die Aufnahmen von Kindern herausgesucht, die zum Zeitpunkt der Aufnahme unter ein Jahr, fünf Jahre sowie zehn Jahre alt waren. Pro Altersgruppe wurde die Analyse von 50 Patienten anvisiert. Die Suche erfolgte hierfür mit einer PACS-Workstation (Aycan OsiriX PRO v.2.10, Aycan Digitalsysteme GmbH, Würzburg) in chronologisch absteigender Reihenfolge. Sämtliche Aufnahmen wurden in die oben genannte PACS-Workstation importiert, in welcher die Evaluation und die Messungen (siehe Kap. 2.2) in den entsprechenden Bildebenen durchgeführt wurden.

Grundsätzlich wurde bei allen gefundenen Aufnahmen, unabhängig von den zugrundeliegenden Diagnosen, geprüft, ob sie für die Messung und Auswertung geeignet waren. Aufnahmen wurden nur dann akzeptiert, wenn keine wesentlichen Fehlbildungen der Brustwand oder intrathorakale Pathologien wie Raumforderungen, entzündliche Prozesse oder Mediastinalverschiebungen vorlagen, die die Ergebnisse der Messungen beeinflussten.

Um Verzerrungen beim Vergleich zwischen linker und rechter Thoraxseite zu vermeiden, wurden die Patienten auch dann ausgeschlossen, wenn die Strukturen nur auf einer Seite beurteilbar waren.

Zur Auswertung herangezogen wurden insgesamt 197 Thorax-CT-Aufnahmen, die im Zeitraum von Juli 1997 bis Mai 2018 im Rahmen des stationären Aufenthalts der Patienten im Universitätsklinikum Mannheim angefertigt worden waren.

Nach der initialen Evaluation wurden insgesamt 58 dieser Aufnahmen nicht zur Messung herangezogen, weil Auffälligkeiten vorlagen, durch welche eine sinnvolle Durchführung der Messungen nicht möglich war (siehe Tab. 1). Davon waren 48 Aufnahmen von Säuglingen unter einem Jahr, 8 Aufnahmen von Fünfjährigen und 2

Aufnahmen von Zehnjährigen. Die häufigsten Gründe dafür waren eine deutliche Verlagerung der intrathorakalen Strukturen (bei 14 Aufnahmen) und massive Infiltrate (bei 12 Aufnahmen), aufgrund derer vor allem die Äste der Pulmonalgefäße nicht sicher beurteilbar waren.

4 Aufnahmen wurden aufgrund unbefriedigender Bildqualität, etwa durch Atemartefakte, ausgeschlossen, da hierdurch eine hinreichend genaue Vermessung nicht möglich war.

Tab. 1: Aufnahmen, die von der Auswertung ausgeschlossen wurden

Ausschlussgrund	n (<1J)	n (5J)	n (10J)	n gesamt
Mediastinalverlagerung	12	1	1	14
Infiltrat	11	1	0	12
CPAM	8	0	0	8
Bullöse Veränderungen	6	0	0	6
Pleuraerguss/-empyem	3	2	0	5
Bildqualität	1	3	0	4
Skoliose/Anatomie/Fehlhaltung	1	1	1	3
Emphysem	3	0	0	3
CDH	2	0	0	2
Raumforderung	1	0	0	1
Summe	48	8	2	58

2.1.2 Technische Spezifikationen der CT-Aufnahmen

Alle untersuchten Patienten hatten ein standardisiertes Thorax-CT-Protokoll erhalten. Hierfür kamen zwei CT-Geräte zum Einsatz: ein Dual Source CT System (DSCT) der 2. Generation (Siemens Somatom Definition Flash, Siemens Healthineers, Erlangen) oder ein 16-Schicht Multi Slice CT system (MSCT) (Siemens Emotion 16, Siemens Healthineers, Erlangen). Die Aufnahmen beider Geräte erfolgten mit einer Schichtdicke von 1,5 mm und einem Rekonstruktionsinkrement von 1,0 mm. Für die Rekonstruktion kamen harte (I70s im DSCT bzw. B70s im MSCT) sowie weiche (I30s im DSCT bzw. B30s im MSCT) Faltungskerne zur Anwendung. Die Faltungskerne des DSCT-Systems verwendeten einen iterativen Rekonstruktionsalgorithmus der 2. Generation (SAFIRE, Siemens Healthineers, Erlangen) mit einem Stärke-Level von 2, welches dem klinischen Standard in unserer Abteilung entspricht.

2.2 Messungen

2.2.1 Messung der ICR-Breite

Die Breite des ICR auf beiden Thoraxseiten wurde von der Unterkante der oberen zur Oberkante der unteren Rippe gemessen.

Da man im 2. ICR in der Medioklavikularlinie von ventral punktieren würde, wurde die Breite des Interkostalraums hier in der Sagittal-Aufnahme bestimmt (siehe Abb. 1). Als Herausforderung zeigte sich hierbei die Tatsache, dass vor allem bei den jüngeren Kindern in diesem Bereich noch keine Verkalkung des Rippenknorpels stattgefunden hat und die genaue Abgrenzung der Rippengrenze im CT dadurch erschwert, jedoch möglich war.



Abb. 1: Beispielaufnahme zur Messung der ICR-Breite im 2. ICR MCL (orange)

Im Gegensatz dazu würde man im 4. ICR eher von lateral punktieren, weshalb hier die Messungen in der Koronarebene durchgeführt wurden. Dies ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abb. 2: Beispielaufnahme zur Messung der ICR-Breite im 4. ICR AAL (orange)

Um die Thoraxwanddicke (TWD) und die Tiefe zu vitalen Strukturen (TVS) für eine Punktionsstelle im gleichen Winkel zu messen, wurden alle Messungen für eine Position in einem Durchgang ausgeführt. Als Konsequenz ergab sich, dass zunächst die TVS und danach die TWD für diesen Einstichwinkel gemessen wurde.

Die Messung der beiden Parameter erfolgte dabei stets in der Transversalebene. Da die Kompression des Fettgewebes im CT nicht simuliert werden kann, wurden TVS und TWD von der Hautoberfläche aus gemessen.

Entsprechend der Empfehlung, für eine Schonung der Interkostalarterie am Oberrand der Rippe zu punktieren,^{32, 66} erfolgte für das Auffinden der Punktionshöhe eine Orientierung am Oberrand der 3. bzw. 5. Rippe.

2.2.2 Messung der Thoraxwanddicke (TWD)

Für die Bestimmung der Thoraxwanddicke wurde die Tiefe des Gewebes von der Hautoberfläche bis einschließlich der Pleura parietalis gemessen.

Es wurde dabei in allen Positionen jeweils die TWD bei Punktionsrichtung orthogonal zur Thoraxwand (im Folgenden bezeichnet als TWD_{ortho}) sowie in Richtung der nächstgelegenen vitalen Struktur (TWD_{close}) bestimmt. Im 2. ICR wurde zudem eine dritte, streng sagittale Messung (TWD_{sag}) durchgeführt.

2.2.2.1 Besonderheiten bei den Messungen im 2. ICR

Zum Auffinden der Medioklavikularlinie wurde zunächst in einer anderen Schicht in der Transversalebene links und rechts die Mitte der Clavicula markiert und davon ausgehend im 2. ICR am Oberrand der 3. Rippe die Punktionsstelle aufgesucht.

Während der Messungen fiel auf, dass eine Punktion orthogonal zur Brustwand aufgrund der Thoraxform häufig nicht gleichbedeutend mit einer streng sagittal ausgerichteten Punktion war und in einigen Fällen das Perikard bei erstgenannter Punktionsrichtung getroffen würde, im zweiten Fall jedoch nicht. Um diesen Zusammenhang weiter untersuchen zu können, wurde für den 2. ICR zusätzlich, wie unter 2.2.2 beschrieben, die TWD und TVS in Sagittalrichtung gemessen.

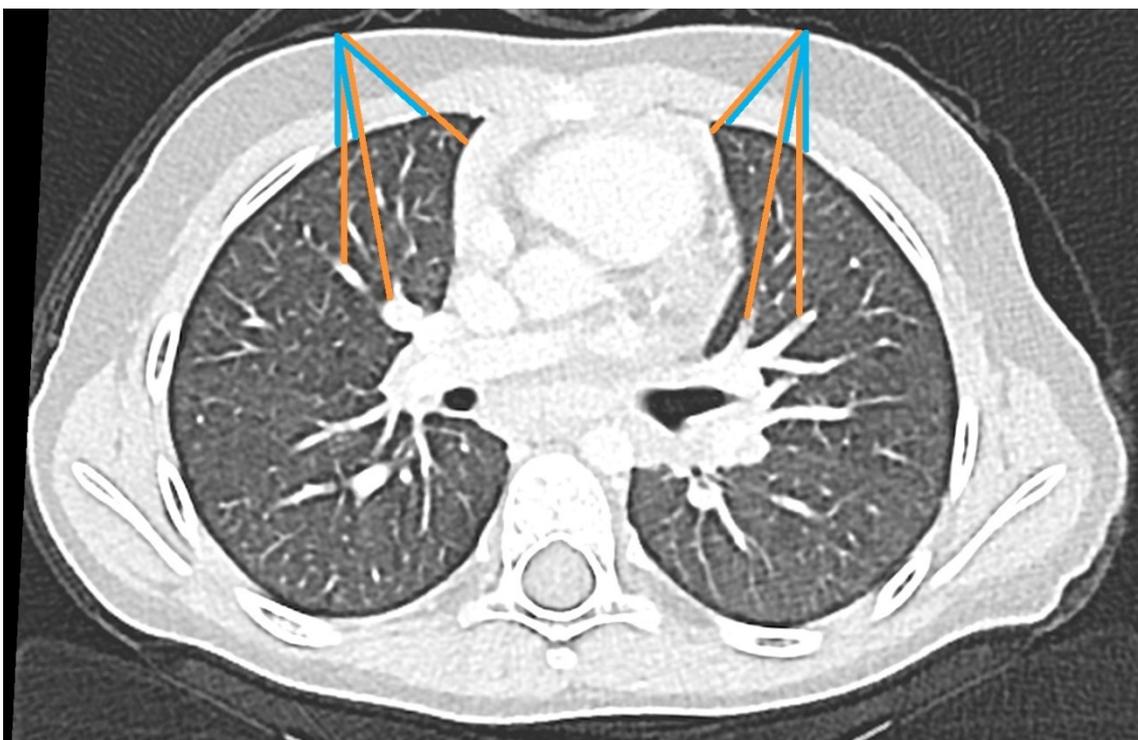


Abb. 3: Beispielaufnahme zur Messung der TVS (orange) und TWD (blau) im 2. ICR MCL

2.2.2.2 Besonderheiten bei den Messungen im 4. ICR

Auch im 4. ICR wurde jeweils die TWD bei Punktionsrichtung orthogonal zur Brustwand und bei Punktion in Richtung der nächstgelegenen vitalen Struktur gemessen, um die Differenz zwischen TVS und TWD mit den Messwerten des 2. ICR vergleichen zu können.

Für das Auffinden der anterioren Axillarlinie (AAL) in der Transversalebene wurde, analog der an Erwachsenen durchgeführten Studie von Chang et al.⁵⁹ der Hinterrand des M. pectoralis major auf Höhe des 4. ICR gewählt.

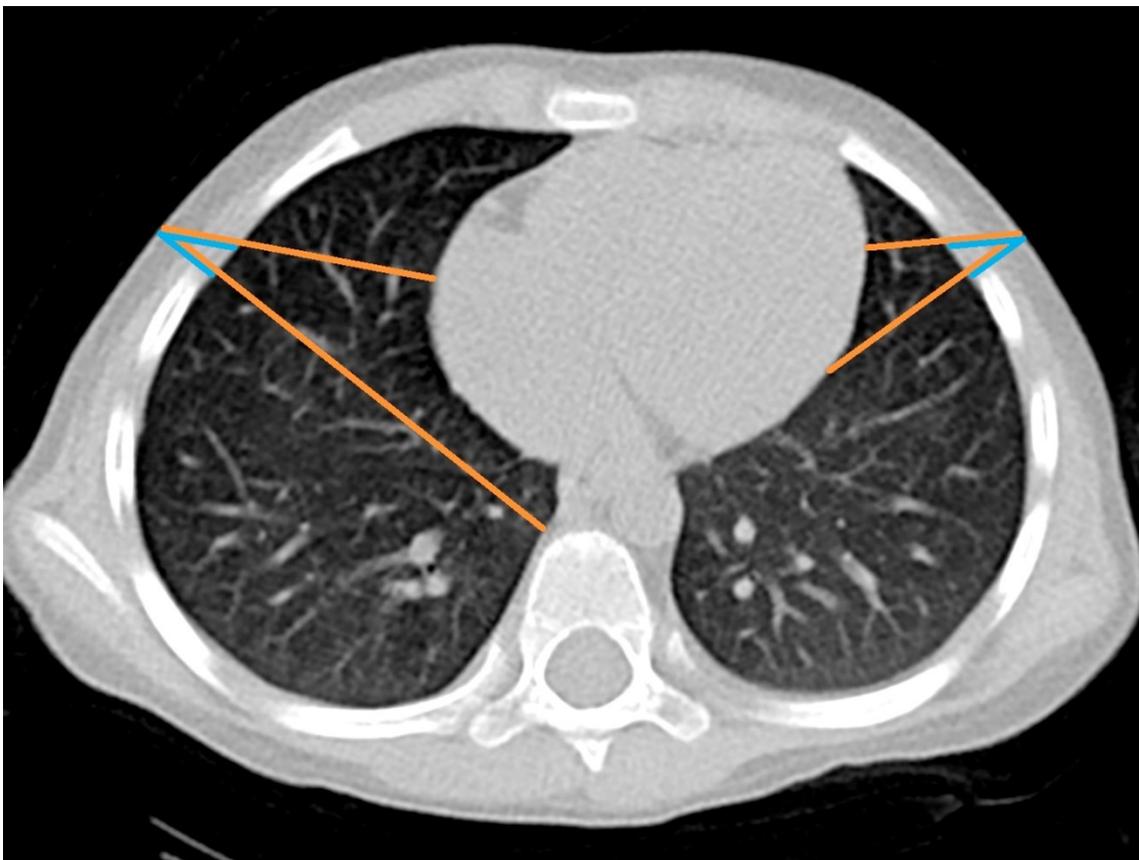


Abb. 4: Beispielaufnahme zur Messung der TVS (orange) und TWD (blau) im 2. ICR MCL

2.2.3 Messung des Abstands zu vitalen Strukturen (TVS)

Als vitale Strukturen im Thoraxbereich, deren ungewollte Punktion lebensbedrohliche Folgen, insbesondere Blutungen haben könnte, wurden definiert:

- das Perikard
- der Thymus
- die Aorta
- die Vena cava superior und inferior
- der Truncus pulmonalis
- die Pulmonalarterien und ihre größeren Äste.

Als relevante Pulmonalarterien-Äste wurden die Aufzweigungen bis einschließlich der Segmentarterien gewählt, da zum einen der individuelle Verlauf weiter distal gelegener Gefäße noch variabler ist und zum anderen bei einer akzidentellen Punktion dieser proximal lokalisierten Gefäße ein Blutverlust in beträchtlichem und potentiell lebensbedrohlichem Ausmaß zu erwarten wäre.

Ebenso wie bei der TWD erfolgte auch hier die Messung immer orthogonal zur Thoraxwand (TVS_{ortho}), in Richtung der nächstgelegenen vitalen Struktur (TVS_{close}) sowie im 2. ICR zusätzlich in sagittaler Richtung (TVS_{sag}).

Im Anschluss wurde der Winkel zwischen der orthogonalen und den anderen beiden Punktionsrichtungen gemessen.

2.2.3.1 Bestimmung der theoretischen Verletzungsraten

Sofern sich im jeweiligen Punktionswinkel und -ort eine Struktur in weniger als 5,0 cm Tiefe befand – also bei einer TVS kleiner als 5,0 cm – wurde dies vermerkt und die Struktur identifiziert. In Kombination mit der TVS konnten so anschließend die Verletzungsraten für beliebige Insertionstiefen bis 5 cm simuliert werden. Die in Kapitel 3.4.2 aufgeführten Verletzungsraten für einzelne Strukturen beziehen sich auf diese Erhebungen.

2.2.4 Bestimmung der Intrapleuralen Sicherheitszone (ISZ)

Neben der isolierten Betrachtung der Brustwanddicke und der TVS erschien auch der Vergleich der Differenz zwischen diesen beiden Messwerten sinnvoll, da diese den "sicheren Bereich" abbildet, der bei Nichtvorliegen eines Pneumothorax bis zu einer möglichen Verletzung einer als „vitale Struktur“ definierten Struktur verbleibt. Bei Vorliegen eines Pneumothorax addiert sich hierzu noch die Breite der intrapleuralen Luftlamelle.

2.3 Auswertung der Messungen

Die Messwerte wurden zunächst in eine Excel-Tabelle übertragen und im Anschluss daran die statistische Auswertung mit der Statistiksoftware JMP (Version 13.0.0, SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA) durchgeführt. Diese erfolgte stets getrennt nach Altersgruppen, Punktionsort und Thoraxseite.

Da nicht bei allen Parametern eine Normalverteilung vorlag, (überprüft mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests), wurde zur Bestimmung der Signifikanz von Lageunterschieden der Mann-Whitney-U-Test angewendet. Das Signifikanzniveau wurde auf 5 % festgelegt, signifikante Ergebnisse ($p < 0,05$) wurden in den Tabellen mit einem Stern (*) hervorgehoben.

Auch die grafische Darstellung der Ergebnisse wurde mit JMP erstellt. Bei sämtlichen Box-and-Whisker-Plots im Ergebnisteil dieser Arbeit wird die Box durch das erste und dritte Quartil der Messwerte begrenzt, der Median entspricht der horizontalen Linie innerhalb der Box. Die Whisker repräsentieren die jeweils kleinsten bzw. größten Werte innerhalb des 1,5-fachen des Interquartilabstandes vom ersten bzw. dritten Quartil. Ausreißer, sofern vorhanden, sind als schwarze Punkte gekennzeichnet.

Für die Durchführung der retrospektiven Untersuchung wurde ein Ethikvotum der Ethikkommission II der Universität Heidelberg eingeholt (Referenznummer 2013-818R-MA).

3 ERGEBNISSE

3.1 Demografische Daten der Patienten

Insgesamt wurden nach Ausschluss ungeeigneter Aufnahmen (siehe Kap. 2.1.1) die CT-Scans von 139 pädiatrischen Patienten zur Auswertung herangezogen.

85 (61,2 %) der Kinder waren weiblich, 54 (38,8 %) männlich. Eine Übersicht über das Patientenkollektiv findet sich in der nachfolgenden Tabelle (Tab. 2).

Tab. 2: Altersstruktur der in die Auswertung eingeschlossenen Aufnahmen

	<u>Ø-Alter</u>	<u>männlich</u>	<u>weiblich</u>	<u>gesamt</u>	<u>Aufnahmezeitraum</u>
<u>0 Jahre</u>	0,42 J	29 (=58,0%)	21 (=42,0%)	50	13.03.12 – 14.05.18
<u>5 Jahre</u>	5,48 J	28 (=59,6%)	19 (=40,4%)	47	28.07.97 – 30.04.18
<u>10 Jahre</u>	10,45 J	28 (=66,7%)	14 (=33,3%)	42	14.10.98 – 15.03.18
<u>gesamt</u>	<i>5,2 J</i>	85 (=61,2%)	54 (=38,8%)	139	28.07.97 – 14.05.18

3.2 ICR-Breite

Die ICR-Breite war an allen Lokalisationen bei den 10-Jährigen größer als bei den 5-Jährigen und bei diesen wiederum größer als bei den Säuglingen. Wesentliche Unterschiede zwischen den Thoraxseiten waren in keiner der Gruppen festzustellen. Die durchschnittliche ICR-Breite war im 2. ICR in allen Altersgruppen und für jede Thoraxseite isoliert betrachtet signifikant größer als im 4. ICR. Die betragsmäßig größte Differenz fand sich mit 0,63 cm rechts bzw. 0,60 cm links bei den 5-Jährigen, die geringste mit 0,14 bzw. 0,12 cm bei den 0-Jährigen.

Tab. 3: Mittelwerte [\pm Standardabweichungen] der Messergebnisse für die ICR-Breite, getrennt nach Altersgruppe, Thoraxseite und Punktionsort, Angaben in cm

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
2. ICR MCL	0,55 [$\pm 0,18$]	0,58 [$\pm 0,19$]	1,35 [$\pm 0,31$]	1,43 [$\pm 0,37$]	1,58 [$\pm 0,32$]	1,67 [$\pm 0,34$]
4. ICR AAL	0,41 [$\pm 0,13$]	0,46 [$\pm 0,13$]	0,72 [$\pm 0,18$]	0,83 [$\pm 0,23$]	1,07 [$\pm 0,33$]	1,16 [$\pm 0,38$]
p-Wert	<0,0001*	0,0011*	<0,0001*	<0,0001*	<0,0001*	<0,0001*

Zur Veranschaulichung folgt hier eine Darstellung der Ergebnisse als Box-and-Whisker-Plot.

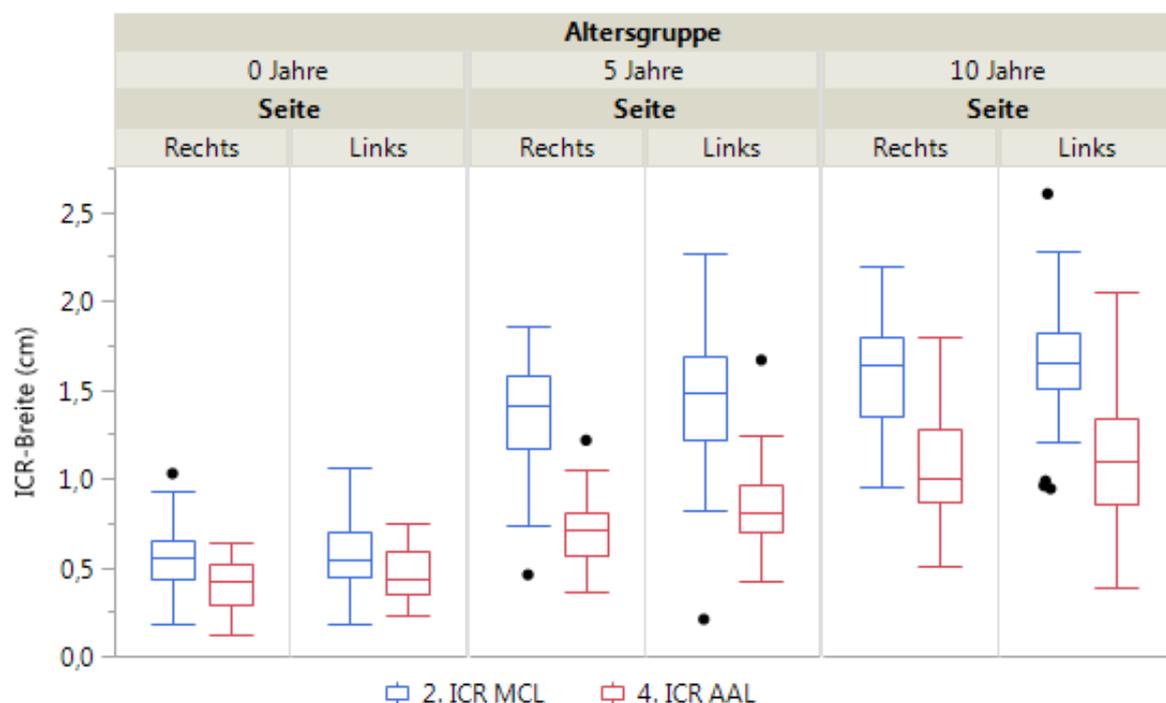


Abb. 5: Box-and-Whisker-Plot für die ICR-Breite, getrennt nach Altersgruppe, Thoraxseite und Punktionsort

3.2.1 ICR-Breite in Abhängigkeit vom Geschlecht

Die Ergebnisse wurden zugunsten der Übersichtlichkeit in zwei separaten Tabellen dargestellt, jeweils eine pro Punktionsort. Je nach Punktionsort und Altersgruppe fanden sich Unterschiede von maximal 0,16 cm, bis auf eine Ausnahme (Altersgruppe 5 Jahre, Messung im 4. ICR auf der linken Thoraxseite) waren alle Unterschiede statistisch nicht signifikant.

Tab. 4: Mittelwerte [\pm Standardabweichungen] der Messergebnisse für die ICR-Breite im 2. ICR MCL, getrennt nach Altersgruppe, Thoraxseite und Geschlecht, Angaben in cm

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
weiblich	0,52 [$\pm 0,18$]	0,56 [$\pm 0,19$]	1,44 [$\pm 0,28$]	1,48 [$\pm 0,28$]	1,56 [$\pm 0,36$]	1,65 [$\pm 0,29$]
männlich	0,58 [$\pm 0,17$]	0,59 [$\pm 0,20$]	1,28 [$\pm 0,32$]	1,39 [$\pm 0,41$]	1,59 [$\pm 0,30$]	1,67 [$\pm 0,37$]
p-Wert	0,4375	0,6301	0,0868	0,3240	0,9894	0,8310

Tab. 5: Mittelwerte [\pm Standardabweichungen] der Messergebnisse für die ICR-Breite im 4. ICR AAL, getrennt nach Altersgruppe, Thoraxseite und Geschlecht, Angaben in cm

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
weiblich	0,40 [$\pm 0,13$]	0,44 [$\pm 0,13$]	0,73 [$\pm 0,16$]	0,90 [$\pm 0,19$]	1,00 [$\pm 0,28$]	1,11 [$\pm 0,32$]
männlich	0,42 [$\pm 0,14$]	0,47 [$\pm 0,13$]	0,71 [$\pm 0,20$]	0,79 [$\pm 0,25$]	1,12 [$\pm 0,36$]	1,18 [$\pm 0,41$]
p-Wert	0,6654	0,3067	0,3083	0,0294*	0,2458	0,5483

3.3 Thoraxwanddicke (TWD)

Für eine bessere Vergleichbarkeit zwischen dem 2. und 4. ICR wurden die Mittelwerte für die verschiedenen Punktionsrichtungen in separaten Tabellen dargestellt.

Bei senkrechter Punktion war die mittlere TWD in allen Altersgruppen im 4. ICR kleiner als im 2. ICR, ein signifikanter Unterschied ergab sich hier jedoch nur bei den 5-jährigen Kindern.

Tab. 6: Mittelwert [±SD] für die Thoraxwanddicke bei Punktionsrichtung senkrecht zur Thoraxwand, Angaben in cm

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
2. ICR MCL	1,42 [±0,46]	1,41 [±0,45]	1,62 [±0,43]	1,60 [±0,38]	2,54 [±1,20]	2,53 [±1,28]
4. ICR AAL	1,38 [±0,48]	1,41 [±0,50]	1,34 [±0,46]	1,28 [±0,41]	2,21 [±1,33]	2,19 [±1,30]
p-Wert	0,5059	0,9040	0,0005*	<0,0001*	0,0561	0,0780

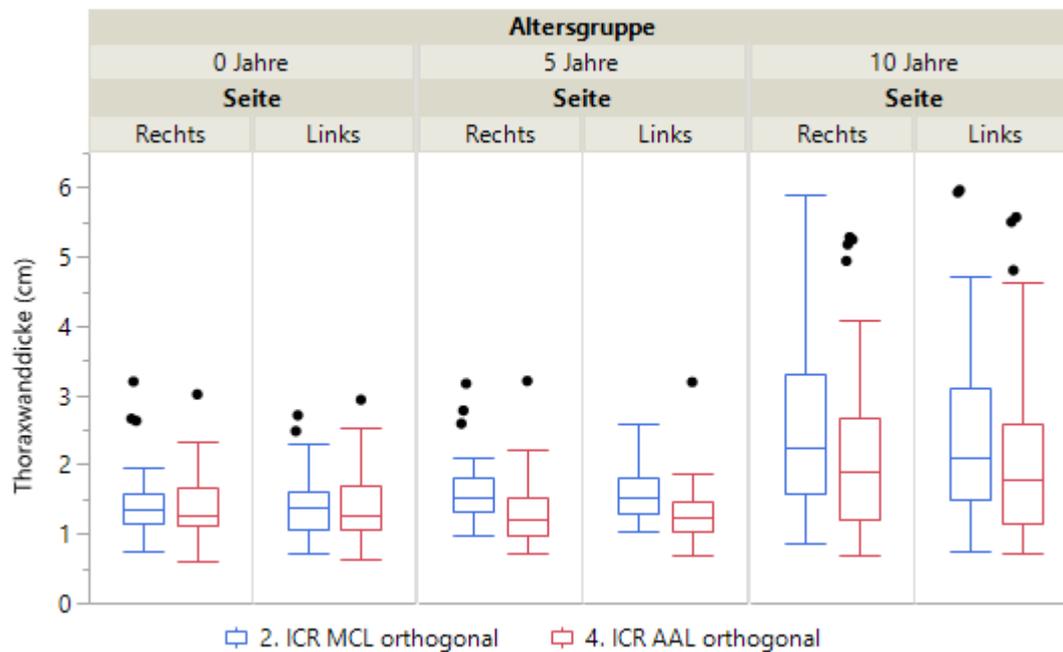


Abb. 6: Box-and-Whisker-Plot für die Thoraxwanddicke bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand, getrennt nach Altersgruppe, Thoraxseite und Punktionsort

Bei Punktion in Richtung der nächstgelegenen vitalen Struktur (die Punktionswinkel entsprechen hier denen für die jeweilige TVS) ergab sich bei den meisten Punktionsstellen ein jeweils leicht höherer Mittelwert als bei senkrechter Punktion.

Tab. 7: Mittelwert [\pm SD] für die Thoraxwanddicke bei Punktion in Richtung der nächstgelegenen vitalen Struktur, Angaben in cm

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
2. ICR MCL	1,43 [\pm 0,41]	1,40 [\pm 0,41]	1,69 [\pm 0,46]	1,69 [\pm 0,48]	2,61 [\pm 1,17]	2,59 [\pm 1,28]
4. ICR AAL	1,44 [\pm 0,48]	1,45 [\pm 0,48]	1,42 [\pm 0,50]	1,37 [\pm 0,44]	2,32 [\pm 1,34]	2,32 [\pm 1,39]
p-Wert	0,9396	0,7226	0,0005*	<0,0001*	0,0687	0,1103

Auch bei sagittaler Punktion war die mittlere TWD in allen Gruppen größer als bei senkrechter Punktionsrichtung.

Tab. 8: Mittelwert [\pm SD] für die Thoraxwanddicke im 2. ICR MCL bei sagittaler Punktionsrichtung, Angaben in cm

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
2. ICR MCL	1,52 [\pm 0,51]	1,56 [\pm 0,61]	1,76 [\pm 0,48]	1,81 [\pm 0,48]	2,61 [\pm 1,15]	2,63 [\pm 1,23]

3.3.1 Simulierte Misserfolgsrate bei einer Insertionstiefe von 5,0 cm

Tab. 9: Anzahl der Messungen mit einer Thoraxwanddicke von mehr als 5,0 cm, Punktion senkrecht zur Thoraxwand

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
2. ICR MCL	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	2 (4,8%)	2 (4,8%)
4. ICR AAL	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	3 (7,1%)	2 (4,8%)

Eine TWD von mehr als 5,0 cm fand sich ausschließlich in der Gruppe der 10-Jährigen. Abhängig von der Punktionsstelle betraf dies in dieser Altersgruppe höchstens 3 der 42 Patienten (7,1 %).

Bei einem Patienten war die TWD sowohl im 2. als auch im 4. ICR größer als 5 cm, bei einer Patientin fanden sich solche Werte nur im 2. ICR und bei insgesamt 3 Patienten (bei zwei davon ausschließlich auf der rechten, bei einem nur auf der linken Seite) war die Thoraxwand nur im 4. ICR dicker als 5 cm.

Die Rate an zu erwartenden Misserfolgen erhöhte sich hierbei nicht, wenn in Richtung der nächstgelegenen vitalen Struktur oder streng sagittal punktiert wurde. Allerdings hatte der Punktionswinkel bei den Patienten, bei denen bereits bei senkrechter Punktion eine TWD von mehr als 5,0 cm ermittelt wurde, eine größere TWD zur Folge: So betrug der größte gemessene Wert bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand im 2. ICR 5,96 cm und im 4. ICR 5,57 cm, bei Punktion in Richtung der nächsten vitalen Struktur lag das Maximum bei 6,43 cm (2. ICR) bzw. 6,22 cm (4. ICR). Auch bei sagittaler Punktion (im 2. ICR) war der größte gemessene Wert mit 6,44 cm größer als bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand.

3.3.2 TWD in Abhängigkeit vom Geschlecht

Da ein Vergleich der Messwerte bei Punktion in Richtung der nächstgelegenen vitalen Struktur aufgrund der methodenbedingt unterschiedlichen Punktionswinkel nicht ohne weiteres möglich ist, beschränkt sich die nachfolgende Darstellung auf die Punktionsrichtung orthogonal zur Thoraxwand.

Wie in den beiden Tabellen, jeweils eine für den 2. und den 4. ICR, zu entnehmen ist, fanden sich an keinem der Punktionsorte signifikante Unterschiede zwischen den männlichen und den weiblichen Kindern.

Tab. 10: Mittelwert [\pm SD] für die Thoraxwanddicke im 2. ICR MCL bei Punktionsrichtung senkrecht zur Thoraxwand, getrennt nach Geschlecht, Angaben in cm

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
weiblich	1,40 [\pm 0,38]	1,47 [\pm 0,49]	1,63 [\pm 0,39]	1,64 [\pm 0,41]	2,69 [\pm 1,38]	2,65 [\pm 1,46]
männlich	1,44 [\pm 0,52]	1,36 [\pm 0,42]	1,61 [\pm 0,47]	1,57 [\pm 0,36]	2,47 [\pm 1,11]	2,47 [\pm 1,20]
p-Wert	0,8442	0,5423	0,7698	0,5953	0,8206	0,7590

Tab. 11: Mittelwert [\pm SD] für die Thoraxwanddicke im 4. ICR AAL bei Punktionsrichtung senkrecht zur Thoraxwand, getrennt nach Geschlecht, Angaben in cm

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
weiblich	1,38 [\pm 0,47]	1,39 [\pm 0,48]	1,30 [\pm 0,34]	1,28 [\pm 0,28]	2,29 [\pm 1,30]	2,26 [\pm 1,34]
männlich	1,39 [\pm 0,50]	1,42 [\pm 0,52]	1,37 [\pm 0,53]	1,29 [\pm 0,48]	2,16 [\pm 1,36]	2,16 [\pm 1,31]
p-Wert	0,8059	0,8135	0,8965	0,6412	0,6406	0,6597

3.4 Tiefe zu vitalen Strukturen (TVS)

Die geringste TVS fand sich bei senkrechter Punktion in allen Altersgruppen im 4. ICR auf der linken Seite, wobei die Mittelwerte jedoch nur bei den 5-Jährigen signifikant kleiner waren als im 2. ICR. Auffällig ist, dass auf der linken Thoraxseite die Mittelwerte im 4. ICR kleiner sind als im 2. ICR, wohingegen es sich rechts bei den 5- und 10-Jährigen umgekehrt verhält.

Tab. 12: Mittelwert [±SD] der TVS bei Punktionsrichtung senkrecht zur Thoraxwand, Angaben in cm

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
2. ICR MCL	4,29 [1,43]	3,55 [1,76]	5,41 [1,45]	5,00 [2,07]	7,77 [2,32]	7,11 [3,18]
4. ICR AAL	4,02 [1,08]	3,15 [0,95]	5,98 [1,60]	4,29 [1,29]	8,00 [2,29]	6,11 [1,81]
p-Wert	0,4279	0,4319	0,0278*	0,0451*	0,2850	0,2578

Im Gegensatz dazu fanden sich bei Punktion zur nächstgelegenen vitalen Struktur die größeren Mittelwerte überwiegend im 4. ICR.

Tab. 13: Mittelwert [±SD] der TVS bei Punktion zur nächstgelegenen vitalen Struktur, Angaben in cm

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
2. ICR MCL	2,44 [±0,63]	1,96 [±0,66]	3,53 [±0,71]	3,10 [±0,92]	4,94 [±1,19]	4,33 [±1,45]
4. ICR AAL	3,01 [±0,78]	2,46 [±0,60]	4,01 [±1,01]	3,00 [±0,71]	5,52 [±1,78]	4,36 [±1,46]
p-Wert	0,0003*	0,0001*	0,0157*	0,7594	0,1054	0,9323

Bei sagittaler Punktion im 2. ICR war die mittlere TVS in allen Altersgruppen auf beiden Thoraxseiten größer als die entsprechenden Werte für die senkrechte Punktion am gleichen Punktionsort und auch als die Mittelwerte bei senkrechter Punktion im 4. ICR. Ein umfassender Vergleich zwischen sagittalem und orthogonalem Punktionswinkel im 2. ICR findet sich in Kapitel 3.6.

Tab. 14: Mittelwert [±SD] der TVS im 2. ICR MCL bei sagittaler Punktionsrichtung, Angaben in cm

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
2. ICR MCL	4,96 [1,68]	4,48 [1,77]	6,90 [2,43]	6,78 [2,67]	9,20 [2,94]	9,18 [3,36]

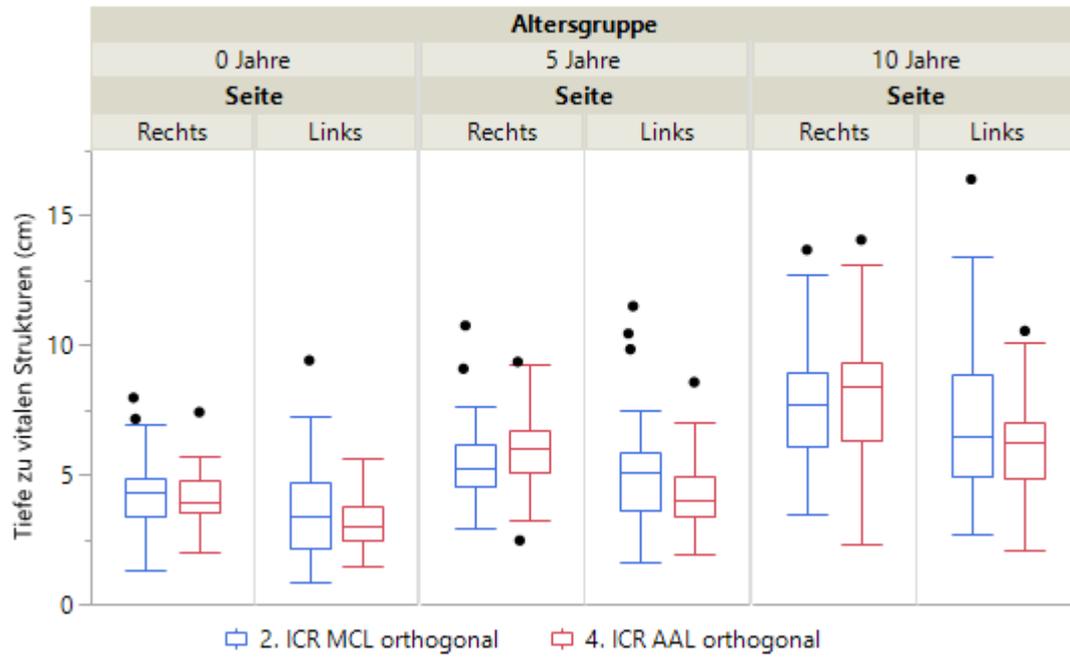


Abb. 7: Box-and-Whisker-Plot für die Tiefe zu vitalen Strukturen bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand, getrennt nach Altersgruppe, Thoraxseite und Punktionsort

3.4.1 TVS in Abhängigkeit vom Geschlecht

Wie zuvor bei der TWD, sind in den nachfolgenden Tabellen aufgrund der besseren Vergleichbarkeit die Mittelwerte und Standardabweichungen bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand aufgeführt. Auch hier fanden sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den männlichen und weiblichen Probanden.

Tab. 15: Tiefe zu vitalen Strukturen im 2. ICR MCL bei Punktionsrichtung senkrecht zur Thoraxwand, getrennt nach Geschlecht, Angaben in cm

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
weiblich	4,48 [1,50]	4,08 [2,05]	5,30 [1,56]	4,89 [2,09]	7,96 [2,32]	7,06 [3,19]
männlich	4,16 [1,38]	3,17 [1,44]	5,49 [1,40]	5,07 [2,09]	7,68 [2,36]	7,13 [3,24]
p-Wert	0,2885	0,1252	0,3457	0,9051	0,6792	0,9468

Tab. 16: Tiefe zu vitalen Strukturen im 4. ICR AAL bei Punktionsrichtung senkrecht zur Thoraxwand, getrennt nach Geschlecht, Angaben in cm

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
weiblich	3,89 [1,00]	3,05 [1,00]	5,56 [1,48]	4,04 [1,45]	7,88 [2,51]	5,66 [1,60]
männlich	4,12 [1,14]	3,23 [0,91]	6,26 [1,64]	4,45 [1,16]	8,06 [2,21]	6,34 [1,89]
p-Wert	0,5554	0,4260	0,1860	0,2689	0,8102	0,2458

3.4.2 Vitale Strukturen in einer Tiefe von weniger als 5,0 cm

Die angenommene Wahrscheinlichkeit, bei der vollständigen Insertion einer 5,0 cm langen Nadel keine wichtigen Strukturen zu treffen, war bei den 10-Jährigen an jeder Punktionsstelle höher als bei den 5-Jährigen und bei diesen wiederum zum Teil erheblich höher als bei den Säuglingen unter einem Jahr.

Die getroffenen bzw. nächstgelegenen vitalen Strukturen waren in den meisten Fällen entweder die Herzwand oder ein Pulmonalarterienast, deutlich seltener wären die Vena cava superior, die Aorta ascendens, (beide nur im 2. ICR rechts) der Truncus pulmonalis (nur im 2. ICR links), oder das Zwerchfell (ausschließlich im 4. ICR rechts) getroffen worden.

Bis auf eine Ausnahme (Altersgruppe 5 Jahre, 2. ICR MCL, bei Punktion zur nächstgelegenen Struktur) war die Verletzungsrate auf der linken Thoraxseite höher oder zumindest nicht geringer als auf der rechten.

Im Vergleich zur rechten Seite, auf welcher je nach Punktionsstelle und -richtung die Pulmonalarterien am häufigsten getroffen worden wären, war auf der linken Thoraxseite die Herzwand in der Mehrzahl der Fälle die nächstgelegene vitale Struktur. Auch die Wahrscheinlichkeit, dass die Herzwand die erste getroffene Struktur wäre, war unabhängig vom Punktionswinkel sowohl im 2. als auch im 4. ICR links höher als rechts.

Bei streng sagittaler Punktion im 2. ICR fanden sich, verglichen mit der orthogonalen Ausrichtung, auf beiden Seiten höhere Raten an Punktionen ohne Verletzung vitaler Strukturen. Insbesondere das Risiko für eine Punktion der Herzwand wäre – rechts für die 0- und 5-Jährigen und links in allen Altersgruppen – deutlich geringer als bei orthogonaler Punktion. Auf der linken Seite wären dafür häufiger Pulmonalarterien getroffen worden, allerdings war die Risikozunahme – sofern vorhanden – in allen Gruppen geringer als die absolute Risikoreduktion für die Punktion des Herzens.

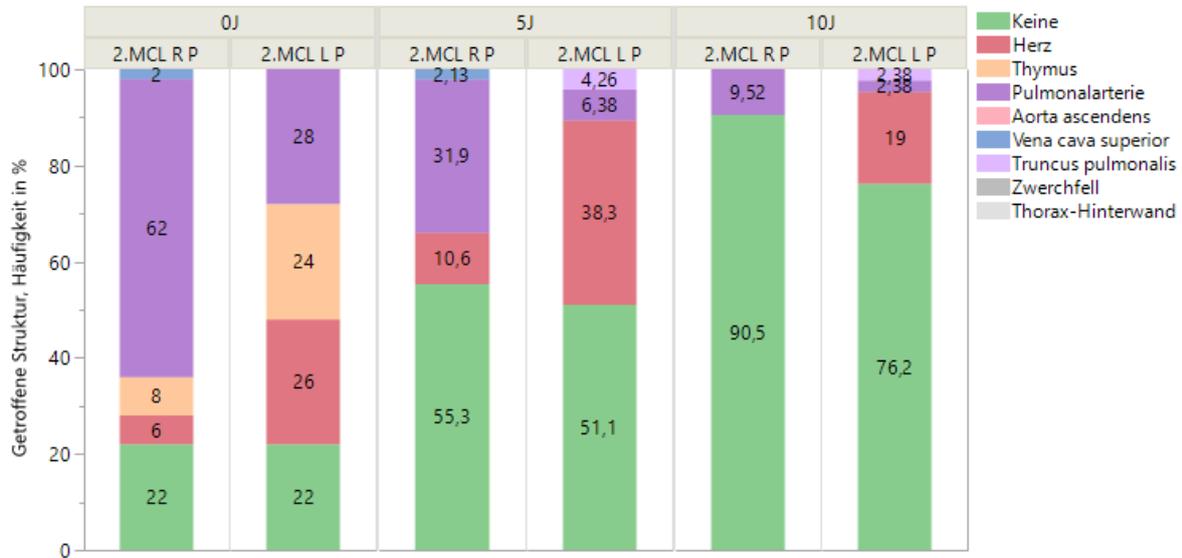


Abb. 8: Getroffene Strukturen im 2. ICR bei einer Insertionstiefe von 5,0 cm, Punktion senkrecht zur Thoraxwand, getrennt nach Altersgruppe und Thoraxseite



Abb. 9: Getroffene Strukturen im 4. ICR bei einer Insertionstiefe von 5,0 cm, Punktion senkrecht zur Thoraxwand, getrennt nach Altersgruppe und Thoraxseite

Im Folgenden findet sich eine Auflistung der ersten getroffenen vitalen Strukturen für jeweils eine Altersgruppe und Thoraxseite, sofern sich diese in einer Entfernung von weniger als 5,0 cm von der Einstichstelle befanden.

3.4.2.1 Getroffene vitale Strukturen in der Altersgruppe der 0-Jährigen

In der Altersgruppe der 0-Jährigen wäre auch bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand in der überwiegenden Anzahl der Fälle eine vitale Struktur innerhalb von 5,0 cm in Stichrichtung getroffen worden. Bei der Betrachtung unabhängig vom Punktionswinkel fand sich sogar in bis zu 100 % der Fälle eine Struktur in einem Radius von 5 cm.

Der Thymus stellte im 2. ICR in dieser Altersgruppe je nach Punktionswinkel und Thoraxseite die insgesamt zweit- oder dritthäufigste Struktur in einer Tiefe von weniger als 5,0 cm dar.

Bei den Säuglingen fand sich in jeweils einem Fall je Seite (bei sagittaler Punktion im 2. ICR) die Konstellation, dass in weniger als 5 cm Tiefe bereits die Pleura parietalis der Thorax-Hinterwand erreicht worden wäre.

Tab. 17: Nächstgelegene getroffene vitale Struktur bei einer Insertionstiefe von 5,0 cm, Altersgruppe 0 Jahre, rechte Thoraxseite

	orthogonal		close		sagittal
	2. ICR MCL	4. ICR AAL	2. ICR MCL	4. ICR AAL	2. ICR MCL
Keine	11 (22,0%)	7 (14,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	22 (44,0%)
Herz	3 (6,0%)	23 (46,0%)	16 (32,0%)	11 (22,0%)	0 (0,0%)
Thymus	4 (8,0%)	0 (0,0%)	13 (26,0%)	0 (0,0%)	2 (4,0%)
Pulmonalarterienast	31 (62,0%)	19 (38,0%)	16 (32,0%)	39 (78,0%)	25 (50,0%)
Aorta ascendens	0 (0,0%)				
Vena cava superior	1 (2,0%)	0 (0,0%)	5 (10,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)
Truncus pulmonalis	0 (0,0%)				
Zwerchfell	0 (0,0%)	1 (2,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)
Thorax-Hinterwand	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	1 (2,0%)

Tab. 18: Nächstgelegene getroffene vitale Struktur bei einer Insertionstiefe von 5,0 cm, Altersgruppe 0 Jahre, linke Thoraxseite

	orthogonal		close		sagittal
	2. ICR MCL	4. ICR AAL	2. ICR MCL	4. ICR AAL	2. ICR MCL
Keine	11 (22,0%)	2 (4,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	18 (36,0%)
Herz	13 (26,0%)	42 (84,0%)	22 (44,0%)	28 (56,0%)	6 (12,0%)
Thymus	12 (24,0%)	0 (0,0%)	17 (34,0%)	0 (0,0%)	4 (8,0%)
Pulmonalarterienast	14 (28,0%)	6 (12,0%)	9 (18,0%)	22 (44,0%)	21 (42,0%)
Aorta ascendens	0 (0,0%)				
Vena cava superior	0 (0,0%)				
Truncus pulmonalis	0 (0,0%)	0 (0,0%)	2 (4,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)
Zwerchfell	0 (0,0%)				
Thorax-Hinterwand	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	1 (2,0%)

3.4.2.2 Getroffene vitale Strukturen in der Altersgruppe der 5-Jährigen

Bei senkrechter Punktion wäre eine Punktion in 5 cm Tiefe ohne Verletzung einer vitalen Struktur zwar wahrscheinlicher als bei den 0-Jährigen, vor allem bei Punktion in Richtung der nächstgelegenen Struktur waren die möglichen Verletzungsraten jedoch kaum geringer als bei den Säuglingen.

Verglichen mit der senkrechten Punktion war die Verletzungsrate bei sagittalem Punktionswinkel sowohl rechts (17,0 % vs. 44,7 %) als auch links (25,5 % vs. 48,9 %) deutlich geringer.

Der Thymus stellte in dieser Altersgruppe nur in jeweils 2 Fällen pro Thoraxseite die nächstgelegene Struktur dar, bei orthogonaler oder sagittaler Punktion hingegen in keinem der Fälle.

Tab. 19: Nächstgelegene getroffene vitale Struktur bei einer Insertionstiefe von 5,0 cm, Altersgruppe 5 Jahre, rechte Thoraxseite

	orthogonal		close		sagittal
	2. MCL	4. AAL	2. MCL	4. AAL	2. MCL
Keine	26 (55,3%)	36 (76,6%)	1 (2,1%)	6 (12,8%)	39 (83,0%)
Herz	5 (10,6%)	2 (4,3%)	14 (29,8%)	3 (6,4%)	0 (0,0%)
Thymus	0 (0,0%)	0 (0,0%)	2 (4,3%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)
Pulmonalarterienast	15 (31,9%)	5 (10,6%)	25 (53,2%)	34 (72,3%)	8 (17,0%)
Aorta ascendens	0 (0,0%)	0 (0,0%)	1 (2,1%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)
Vena cava superior	1 (2,1%)	0 (0,0%)	4 (8,5%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)
Truncus pulmonalis	0 (0,0%)				
Zwerchfell	0 (0,0%)	4 (8,5%)	0 (0,0%)	4 (8,5%)	0 (8,5%)
Thorax-Hinterwand	0 (0,0%)				

Tab. 20: Nächstgelegene getroffene vitale Struktur bei einer Insertionstiefe von 5,0 cm, Altersgruppe 5 Jahre, linke Thoraxseite

	orthogonal		close		sagittal
	2. MCL	4. AAL	2. MCL	4. AAL	2. MCL
Keine	24 (51,1%)	11 (23,4%)	2 (4,3%)	1 (2,1%)	35 (74,5%)
Herz	18 (38,3%)	27 (57,4%)	23 (48,9%)	24 (51,1%)	3 (6,4%)
Thymus	0 (0,0%)	0 (0,0%)	2 (4,3%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)
Pulmonalarterienast	3 (6,4%)	9 (19,1%)	8 (17,0%)	22 (46,8%)	8 (17,0%)
Aorta ascendens	0 (0,0%)				
Vena cava superior	0 (0,0%)				
Truncus pulmonalis	2 (4,3%)	0 (0,0%)	12 (25,5%)	0 (0,0%)	1 (2,1%)
Zwerchfell	0 (0,0%)				
Thorax-Hinterwand	0 (0,0%)				

3.4.2.3 Getroffene vitale Strukturen in der Altersgruppe der 10-Jährigen

Die Rate an verletzungsfreien Punctionen bei senkrechtem und sagittalem Punctionswinkel war bei den 10-Jährigen an allen Punctionsorten relativ hoch, im ungünstigsten Fall („close“) wäre jedoch auch hier bei insgesamt mehr als der Hälfte der Fälle eine Struktur getroffen worden. Während bei senkrechter Punction kaum Unterschiede zwischen den beiden Punctionsorten für die jeweilige Thoraxseite festzustellen waren, zeigte sich bei Punction zur nächstgelegenen Struktur rechts ein Vorteil für den 4. ICR, auf der linken Seite hingegen für den 2. ICR.

Die Herzwand fand sich in dieser Altersgruppe vor allem links in einer Tiefe von weniger als 5 cm zur Hautoberfläche, auf der rechten Seite war dies nur im 2. ICR bei Punction zur nächstgelegenen Struktur der Fall. Der Thymus stellte bei den 10-Jährigen in keinem der Fälle die nächstgelegene Struktur dar.

Tab. 21: Nächstgelegene getroffene vitale Struktur bei einer Insertionstiefe von 5,0 cm, Altersgruppe 10 Jahre, rechte Thoraxseite

	orthogonal		close		sagittal	
	2. ICR MCL	4. ICR AAL	2. ICR MCL	4. ICR AAL	2. ICR MCL	
Keine	38 (90,5%)	38 (90,5%)	17 (40,5%)	28 (66,7%)	41 (97,6%)	
Herz	0 (0,0%)	0 (0,0%)	10 (23,8%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	
Thymus	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	
Pulmonalarterienast	4 (9,5%)	2 (4,8%)	13 (31,0%)	12 (28,6%)	1 (2,4%)	
Aorta ascendens	0 (0,0%)	0 (0,0%)	1 (2,4%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	
Vena cava superior	0 (0,0%)	0 (0,0%)	1 (2,4%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	
Truncus pulmonalis	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	
Zwerchfell	0 (0,0%)	2 (4,8%)	0 (0,0%)	2 (4,8%)	0 (0,0%)	
Thorax-Hinterwand	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	

Tab. 22: Nächstgelegene getroffene vitale Struktur bei einer Insertionstiefe von 5,0 cm, Altersgruppe 10 Jahre, linke Thoraxseite

	orthogonal		close		sagittal	
	2. ICR MCL	4. ICR AAL	2. ICR MCL	4. ICR AAL	2. ICR MCL	
Keine	32 (76,2%)	31 (73,8%)	14 (33,3%)	8 (19,0%)	36 (85,7%)	
Herz	8 (19,0%)	9 (21,4%)	16 (38,1%)	14 (33,3%)	4 (9,5%)	
Thymus	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	
Pulmonalarterienast	1 (2,4%)	2 (4,8%)	8 (19,0%)	20 (47,6%)	2 (4,8%)	
Aorta ascendens	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	
Vena cava superior	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	
Truncus pulmonalis	1 (2,4%)	0 (0,0%)	4 (9,5%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	
Zwerchfell	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	
Thorax-Hinterwand	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	

3.5 Intrapleurale Sicherheitszone (ISZ)

Da die Messungen für TVS und TWD stets parallel vorgenommen wurden, lässt sich die Differenz dieser beiden Werte als Sicherheitsbereich ermitteln, welcher ab dem Erreichen des Pleuraspaltes bis zu einer potentiellen Verletzung verbleibt. Dieser soll im Folgenden als „Intrapleurale Sicherheitszone“ (ISZ) bezeichnet werden.

Bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand ergaben sich nur bei den 5- und 10-Jährigen auf der rechten Seite im 4. ICR signifikant größere Mittelwerte. Allerdings fand sich hier bei den 0-Jährigen die größere mittlere ISZ im 2. ICR. Auf der linken Seite waren hingegen in allen Altersgruppen die Mittelwerte im 2. ICR größer.

Tab. 23: Mittelwert [±SD] für die ISZ bei Punktionsrichtung senkrecht zur Thoraxwand, Angaben in cm

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
2. ICR MCL	2,87 [±1,28]	2,14 [±1,60]	3,79 [±1,29]	3,40 [±2,06]	5,23 [±2,25]	4,58 [±2,88]
4. ICR AAL	2,64 [±0,98]	1,75 [±0,76]	4,64 [±1,72]	3,00 [±1,33]	5,79 [±2,12]	3,92 [±1,53]
p-Wert	0,2317	0,4061	0,0017*	0,3484	0,0256*	0,5459

Bei Punktion zur nächstgelegenen vitalen Struktur waren in sämtlichen Positionen die Mittelwerte der ISZ im 4. ICR größer als im 2. ICR, wobei die Unterschiede rechts in allen Altersgruppen und links nur für die 0-Jährigen signifikant waren.

Tab. 24: Mittelwert [±SD] für die ISZ bei Punktion zur nächstgelegenen vitalen Struktur, Angaben in cm

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
2. ICR MCL	1,01 [±0,61]	0,56 [±0,65]	1,84 [±0,78]	1,42 [±1,04]	2,33 [±1,10]	1,75 [±1,30]
4. ICR AAL	1,58 [±0,70]	1,01 [±0,43]	2,58 [±1,02]	1,63 [±0,67]	3,19 [±1,38]	2,04 [±0,96]
p-Wert	<0,0001*	<0,0001*	0,0002*	0,1551	0,0048*	0,2555

Bei sagittaler Punktion war die mittlere ISZ in allen Gruppen größer als bei senkrechter Punktionsrichtung am gleichen Punktionsort.

Tab. 25: Mittelwert [±SD] für die ISZ im 2. ICR MCL bei sagittaler Punktionsrichtung, Angaben in cm

	0 Jahre		5 Jahre		10 Jahre	
	R	L	R	L	R	L
2. ICR MCL	3,44 [±1,59]	2,92 [±1,61]	5,14 [±2,46]	4,97 [±2,68]	6,59 [±2,98]	6,55 [±3,29]

Wie in der Boxplot-Darstellung erkennbar wird, ist bei senkrechter Punktion (Abb. 10) der Median, ebenso wie der Mittelwert, bei den 5- und 10-Jährigen rechts im 4. ICR größer, in allen anderen Gruppen dagegen im 2. ICR. Im ungünstigsten Fall (Abb. 11) liegt der Vorteil hingegen bei allen Altersgruppen beim lateralen Punktionsort.

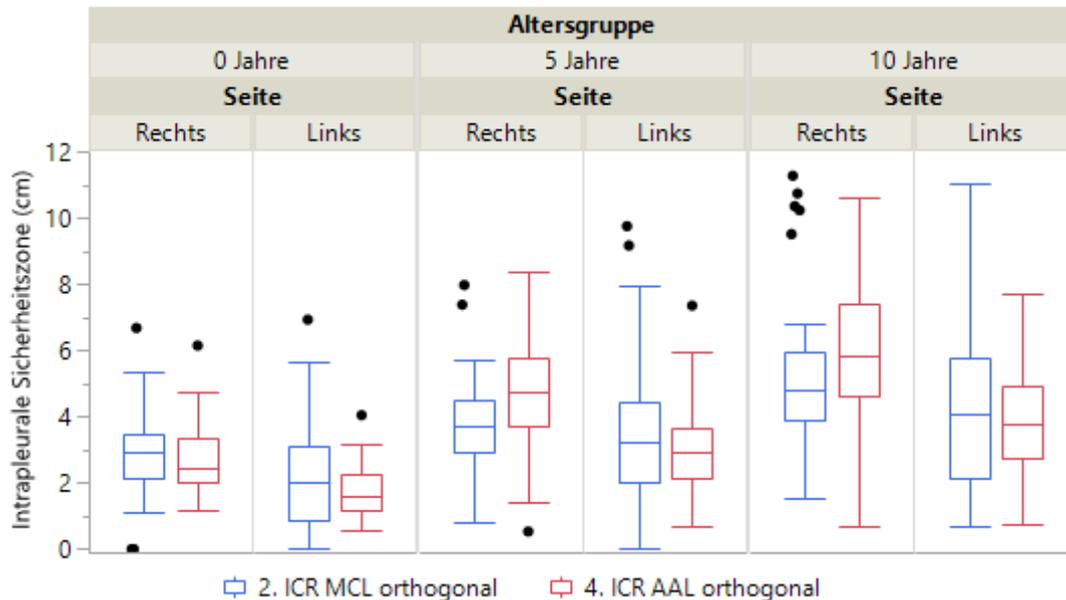


Abb. 10: Box-and-Whisker-Plot für die ISZ bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand

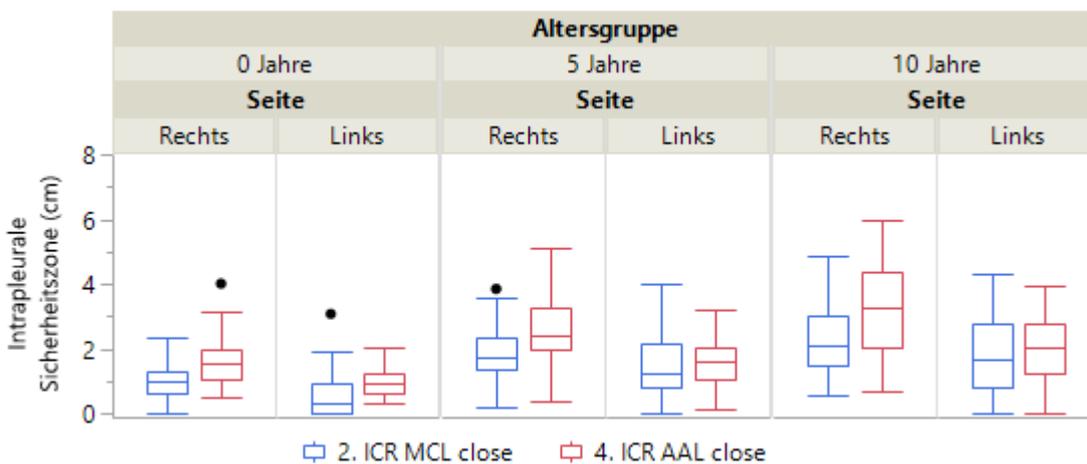


Abb. 11: Box-and-Whisker-Plot für die ISZ bei Punktion zur nächstgelegenen vitalen Struktur

In einigen Fällen ergab sich auch bei senkrechter Punktion die Situation, dass entweder das Herz oder der Thymus der Thoraxwand direkt anliegend war. Dies entspricht somit einer ISZ von 0 cm. In diesen Fällen wäre unter Umständen eine Verletzung der Struktur direkt nach oder sogar ohne Erreichen des Pleuraspaltes möglich, weshalb sie im Folgenden genauer betrachtet werden sollen.

3.5.1 Direkt anliegende vitale Strukturen

Direkt anliegende Strukturen fanden sich nahezu ausschließlich im 2. ICR. Die Wahrscheinlichkeit hierfür war bei den Säuglingen mit bis zu 38 % bei fehlgerichteter Punktion („close“) deutlich höher als in den anderen Altersgruppen. Zudem konnten sie bei den Säuglingen auf beiden Thoraxseiten beobachtet werden (links häufiger als rechts), bei den 5- und 10-Jährigen dagegen nur auf der linken Seite.

Sofern vorhanden, war die Wahrscheinlichkeit bei sagittalem Punktionswinkel stets etwas geringer als bei orthogonaler Punktion.

In der Gruppe der Säuglinge bildete der Thymus auf beiden Seiten und unabhängig vom Punktionswinkel die Struktur, die am häufigsten direkt der Thoraxwand anlag. Bei den 5- und 10-Jährigen war hingegen die Herzwand die einzige potentiell anliegende Struktur.

Tab. 26: Direkt anliegende Strukturen, Altersgruppe 0 Jahre

Rechter Hemithorax	2. ICR MCL			4. ICR AAL	
	ortho	sag	close	ortho	close
Keine	48 (96%)	48 (96%)	46 (92%)	50 (100%)	50 (100%)
Herz	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Thymus	2 (4%)	2 (4%)	4 (8%)	0 (0%)	0 (0%)
Linker Hemithorax	ortho	sag	close	ortho	close
Keine	46 (92%)	49 (98%)	31 (62%)	50 (100%)	50 (100%)
Herz	1 (2%)	0 (0%)	8 (16%)	0 (0%)	0 (0%)
Thymus	3 (6%)	1 (2%)	11 (22%)	0 (0%)	0 (0%)

Tab. 27: Direkt anliegende Strukturen, Altersgruppe 5 Jahre

Rechter Hemithorax	2. ICR MCL			4. ICR AAL	
	ortho	sag	close	ortho	close
Keine	47 (100%)	47 (100%)	47 (100%)	47 (100%)	47 (100%)
Herz	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Thymus	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Linker Hemithorax	ortho	sag	close	ortho	close
Keine	45 (95,7%)	46 (97,9%)	45 (95,7%)	47 (100%)	47 (100%)
Herz	2 (4,3%)	1 (2,1%)	2 (4,3%)	0 (0%)	0 (0%)
Thymus	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)

Tab. 28: Direkt anliegende Strukturen, Altersgruppe 10 Jahre

Rechter Hemithorax	2. ICR MCL			4. ICR AAL	
	ortho	sag	close	ortho	close
Keine	42 (100%)	42 (100%)	42 (100%)	42 (100%)	42 (100%)
Herz	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Thymus	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Linker Hemithorax	ortho	sag	close	ortho	close
Keine	42 (100%)	42 (100%)	35 (83,3%)	42 (100%)	41 (97,6%)
Herz	0 (0%)	0 (0%)	7 (16,7%)	0 (0%)	1 (2,4%)
Thymus	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)

3.6 Vergleich von orthogonalem und sagittalem Punktionswinkel im 2. ICR

Bei einer Punktionstiefe von 5,0 cm wäre durch eine streng sagittale Punktion (im Vergleich zur Punktion orthogonal zur Thoraxwand) bei insgesamt 49 von 278 Punktionen (17,6 %) die Verletzung einer vitalen Struktur vermieden worden.

In 23 Fällen (8,3 % aller Punktionen) wäre allein das Perikard durch die Änderung des Punktionswinkels verfehlt worden, dies mehrheitlich auf der linken Thoraxseite. In 11 weiteren Fällen (4,0 %) wäre zwar das Perikard verfehlt, dafür jedoch eine andere Struktur in weniger als 5,0 cm Tiefe getroffen worden.

Ein typisches Beispiel für eine relativ ungünstige Lage des Herzens, hier bei einem 5-jährigen Jungen, ist in Abbildung 12 zu sehen. Bei einer sagittalen Punktion wären die TVS und die ISZ vor allem auf der linken Seite bedeutend größer als bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand.

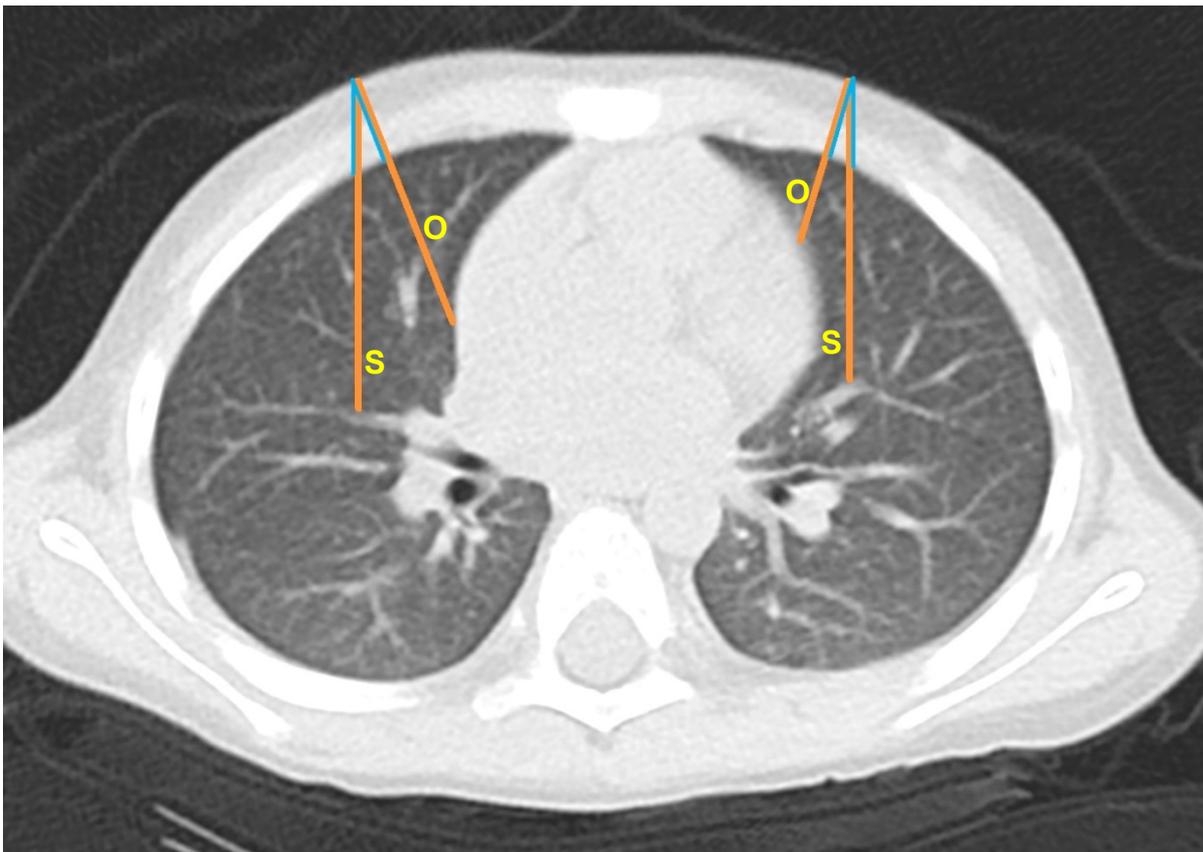


Abb. 12: Beispielaufnahme zur Messung der TVS (orange) und TWD (blau) im 2. ICR MCL, Patient männlich, Alter 5 Jahre, zwecks Übersichtlichkeit wurden nur die Punktionswinkel orthogonal zur Thoraxwand (O) sowie sagittal zur Unterlage (S) dargestellt

In den folgenden drei Tabellen sind die Mittelwerte der TVS und der TWD für die jeweilige Altersgruppe sowie die Signifikanzniveaus dargestellt.

In allen Gruppen waren sowohl die mittlere TWD als auch die TVS sowie die jeweils einzeln errechnete Differenz bei sagittaler Punktionsrichtung größer.

Während die TWD jedoch nur bei den 5-Jährigen auf der linken Seite signifikante Unterschiede abhängig vom Punktionswinkel aufwies, war die TVS und, bis auf eine Ausnahme, auch die ISZ (TVS-TWD) in allen Altersgruppen beidseits bei sagittaler Punktionsrichtung signifikant größer. Alle genannten Unterschiede waren auf der linken Körperseite deutlicher als auf der rechten.

Tab. 29: Ergebnisse gegliedert nach Punktionswinkel, Altersgruppe 0 Jahre, Angaben in cm

	rechte Seite			linke Seite		
	TWD	TVS	ISZ	TWD	TVS	ISZ
2. ICR MCL orthogonal	1,42 [0,46]	4,29 [1,43]	2,87 [1,28]	1,41 [0,45]	3,55 [1,76]	2,14 [1,60]
2. ICR MCL sagittal	1,52 [0,51]	4,96 [1,68]	3,44 [1,59]	1,56 [0,61]	4,48 [1,77]	2,92 [1,61]
p-Wert	0,2582	0,0346*	0,0584	0,1606	0,0064*	0,0104*

Tab. 30: Ergebnisse gegliedert nach Punktionswinkel, Altersgruppe 5 Jahre, Angaben in cm

	rechte Seite			linke Seite		
	TWD	TVS	ISZ	TWD	TVS	ISZ
2. ICR MCL orthogonal	1,62 [0,43]	5,41 [1,45]	3,79 [1,29]	1,60 [0,38]	5,00 [2,07]	3,40 [2,06]
2. ICR MCL sagittal	1,76 [0,48]	6,90 [2,43]	5,14 [2,49]	1,81 [0,48]	6,78 [2,67]	4,97 [2,68]
p-Wert	0,0954	0,0010*	0,0123*	0,0217*	0,0004*	0,0023*

Tab. 31: Ergebnisse gegliedert nach Punktionswinkel, Altersgruppe 10 Jahre, Angaben in cm

	rechte Seite			linke Seite		
	TWD	TVS	ISZ	TWD	TVS	ISZ
2. ICR MCL orthogonal	2,54 [1,20]	7,77 [2,32]	5,23 [2,25]	2,53 [1,28]	7,11 [3,18]	4,58 [2,88]
2. ICR MCL sagittal	2,61 [1,15]	9,21 [2,94]	6,59 [2,98]	2,63 [1,23]	9,18 [3,36]	6,55 [3,29]
p-Wert	0,6579	0,0446*	0,0432*	0,5224	0,0038*	0,0057*

3.7 Vergleich der optimalen Punktionswinkel der jeweiligen Punktionsorte

In den vorherigen Kapiteln hatten sich, von den untersuchten Punktionsrichtungen, im 2. ICR ein sagittaler Punktionswinkel und im 4. ICR ein Punktionswinkel senkrecht zur Thoraxwand im Hinblick auf die TVS und die ISZ, als am besten geeignet erwiesen. In den nachfolgenden Tabellen (Tab. 32–34) sind die Ergebnisse für diese beiden Punktionswinkel nun für die jeweilige Altersgruppe gegenübergestellt.

Tab. 32: Ergebnisse für die jeweils optimalen Punktionswinkel, Altersgruppe 0 Jahre, Angaben in cm

	rechte Seite			linke Seite		
	TWD	TVS	ISZ	TWD	TVS	ISZ
2. ICR MCL sagittal	1,52 [±0,51]	4,96 [±1,68]	3,44 [±1,59]	1,56 [±0,61]	4,48 [±1,77]	2,92 [±1,61]
4. ICR AAL orthogonal	1,38 [±0,48]	4,02 [±1,08]	2,64 [±0,98]	1,41 [±0,50]	3,15 [±0,95]	1,75 [±0,76]
p-Wert	0,106	0,0024*	0,0034*	0,1526	<0,0001*	<0,0001*

Tab. 33: Ergebnisse für die jeweils optimalen Punktionswinkel, Altersgruppe 5 Jahre, Angaben in cm

	rechte Seite			linke Seite		
	TWD	TVS	ISZ	TWD	TVS	ISZ
2. ICR MCL sagittal	1,76 [±0,48]	6,90 [±2,43]	5,14 [±2,49]	1,81 [±0,48]	6,78 [±2,67]	4,97 [±2,68]
4. ICR AAL orthogonal	1,34 [±0,46]	5,98 [±1,60]	4,64 [±1,72]	1,28 [±0,41]	4,29 [±1,29]	3,00 [±1,33]
p-Wert	<0,0001*	0,1403	0,8205	<0,0001*	<0,0001*	<0,0001*

Tab. 34: Ergebnisse für die jeweils optimalen Punktionswinkel, Altersgruppe 10 Jahre, Angaben in cm

	rechte Seite			linke Seite		
	TWD	TVS	ISZ	TWD	TVS	ISZ
2. ICR MCL sagittal	2,61 [±1,15]	9,21 [±2,94]	6,59 [±2,98]	2,63 [±1,23]	9,18 [±3,36]	6,55 [±3,29]
4. ICR AAL orthogonal	2,21 [±1,33]	8,00 [±2,29]	5,79 [±2,12]	2,19 [±1,30]	6,11 [±1,81]	3,92 [±1,53]
p-Wert	0,0228*	0,134	0,5822	0,0294*	<0,0001*	<0,0001*

Sowohl für die TWD als auch für die TVS waren die Mittelwerte bei sagittaler Punktionsrichtung im 2. ICR größer als bei orthogonaler Punktionsrichtung im 4. ICR. Die absoluten Differenzen der Mittelwerte waren hierbei für die TVS stets größer als für die TWD, was sich letztlich auch in einer einheitlich größeren mittleren ISZ im 2. ICR widerspiegelte. Hinsichtlich der TWD fanden sich bei den 5- und 10-Jährigen beidseits signifikante Unterschiede. Hingegen waren die Mittelwerte für TVS und ISZ auf der linken Thoraxseite in allen Altersgruppen im 2. ICR signifikant größer, auf der rechten Seite war dies nur bei den Säuglingen der Fall.

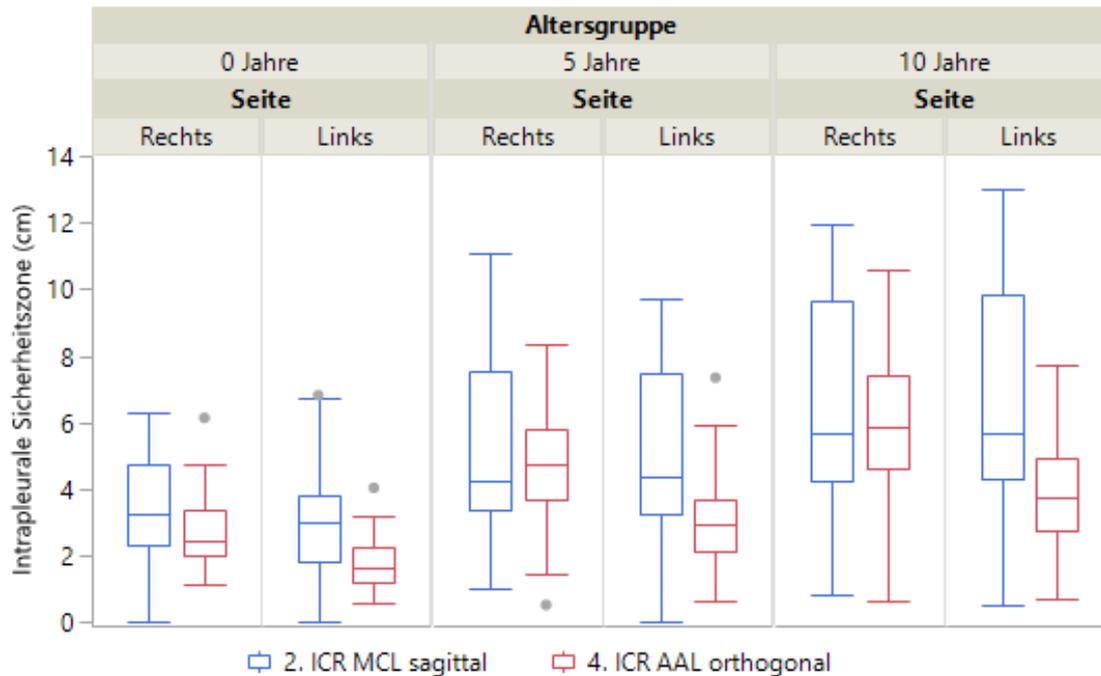


Abb. 13: Box-and-Whisker-Plot für die ISZ bei sagittaler Punktion im 2. ICR und orthogonaler Punktion im 4. ICR

In der Box-Plot-Darstellung (Abb. 13) zeigen sich im Hinblick auf den Median in der Mehrzahl der Gruppen ebenfalls zum Teil deutliche Vorteile für den 2. ICR (sagittal). Bei den 5- und 10-Jährigen war der Median auf der rechten Seite hingegen im 4. ICR geringfügig größer.

Allerdings wird in dieser Darstellung auch erkennbar, dass bei den 0- und 5-Jährigen auch bei sagittaler Punktion im 2. ICR direkt der Thoraxwand anliegende Strukturen (entspricht einer ISZ von 0 cm) zu finden waren.

3.8 Simulierte Erfolgs- und Verletzungsraten für unterschiedliche Nadeln

3.8.1 Nadellänge

Basierend auf den Messergebnissen wurde für verschiedene gängige Kanülen die Erfolgs- und möglichen Verletzungsrate bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand, in Richtung der nächstgelegenen vitalen Struktur und (im 2. ICR) sagittal ermittelt. Für jede Altersgruppe wurden jeweils drei Kanülen untersucht, deren Maße in Tab. 35 genannt sind. In der rechten Tabellenspalte sind vergleichbare Modelle abgebildet (Hersteller: Becton Dickinson Infusion Therapy, Helsingborg, Schweden; Modell: 24 G: BD Insyte™ Autoguard™; 22-16 G: BD Venflon™ Pro Safety).

Tab. 35: Maße der untersuchten Kanülen

Altersgruppe	Durchmesser	Länge	Abbildung	
0 Jahre	24 G	0,07 cm	1,9 cm	
	22 G	0,09 cm	2,5 cm	
5 Jahre	20 G	0,11 cm	3,2 cm	
10 Jahre	18 G	0,13 cm	4,5 cm	
	16 G	0,18 cm	4,5 cm	

Eine erfolgreiche Entlastung im Sinne des Erreichens des Pleuraspalt wurde immer dann angenommen, wenn die Nadellänge größer war als die gemessene TWD; als mögliche Verletzung wurde gewertet, wenn die Nadellänge mindestens gleich groß war wie die gemessene TVS.

In den nachfolgenden Tabellen (Tab. 36–44) ist die relative Erfolgsrate (Spalte „Erreicht“) und mögliche Verletzungsrate (Spalte „Verletzt“) dargestellt. Zusätzlich ist in der Spalte „ Δ “ die Differenz aus diesen berechnet worden, gleichbedeutend mit der Rate an Punktionen, bei denen bei vollständiger Insertion der Pleuraspalt erreicht worden wäre, ohne dass eine Struktur getroffen worden wäre. Die Nadellänge mit dem höchsten Anteil erfolgreicher, verletzungsfreier Punktionen wurde zwecks besserer Übersichtlichkeit grau hinterlegt.

3.8.1.1 Vergleich verschiedener Nadellängen bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand

Tab. 36: Erfolgs- und Verletzungsraten für verschiedene Kanülen bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand, Altersgruppe 0 Jahre

Durchmesser	Länge	2. ICR MCL Rechts			2. ICR MCL Links			4. ICR AAL Rechts			4. ICR AAL Links			
		Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	
24G	0,07 cm	1,9 cm	92,0%	4,0%	88,0%	86,0%	18,0%	68,0%	82,0%	0,0%	82,0%	80,0%	6,0%	74,0%
22G	0,09 cm	2,5 cm	94,0%	10,0%	84,0%	98,0%	36,0%	62,0%	98,0%	14,0%	84,0%	96,0%	24,0%	72,0%
20G	0,11 cm	3,2 cm	100,0%	20,0%	80,0%	100,0%	44,0%	56,0%	100,0%	18,0%	82,0%	100,0%	62,0%	38,0%

Tab. 37: Erfolgs- und Verletzungsraten für verschiedene Kanülen bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand, Altersgruppe 5 Jahre

Durchmesser	Länge	2. ICR MCL Rechts			2. ICR MCL Links			4. ICR AAL Rechts			4. ICR AAL Links			
		Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	
22G	0,09 cm	2,5 cm	93,6%	0,0%	93,6%	95,7%	10,6%	85,1%	97,9%	2,1%	95,8%	97,9%	4,3%	93,6%
20G	0,11 cm	3,2 cm	100,0%	2,1%	97,9%	100,0%	14,9%	85,1%	97,9%	2,1%	95,8%	100,0%	17,0%	83,0%
18G	0,13 cm	4,5 cm	100,0%	23,4%	76,6%	100,0%	42,6%	57,4%	100,0%	21,3%	78,7%	100,0%	59,6%	40,4%

Tab. 38: Erfolgs- und Verletzungsraten für verschiedene Kanülen bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand, Altersgruppe 10 Jahre

Durchmesser	Länge	2. ICR MCL Rechts			2. ICR MCL Links			4. ICR AAL Rechts			4. ICR AAL Links			
		Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	
20G	0,11 cm	3,2 cm	69,0%	0,0%	69,0%	76,2%	4,8%	71,4%	78,6%	2,4%	76,2%	78,6%	9,5%	69,1%
18G	0,13 cm	4,5 cm	90,5%	4,8%	85,7%	88,1%	23,8%	64,3%	90,5%	7,1%	83,4%	90,5%	11,9%	78,6%
16G	0,18 cm	4,5 cm	90,5%	4,8%	85,7%	88,1%	23,8%	64,3%	90,5%	7,1%	83,4%	90,5%	11,9%	78,6%

Bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand konnte in der Altersgruppe der 0-Jährigen abhängig vom Punktionsort in mindestens 80 % der Fälle ein Erreichen des Pleuraspaltes mit der kürzesten Nadel im Vergleich (24 G, Länge 1,9 cm), angenommen werden. Bei der nächstlängeren Kanüle (22 G, Länge 2,5 cm) erhöhte sich die Wahrscheinlichkeit hierfür zwar auf 94-100 %, allerdings war das Risiko, eine vitale Struktur zu treffen, bei einer Insertionstiefe von 2,5 cm jeweils mindestens doppelt so hoch wie mit der 1,9 cm langen Nadel. Entsprechend fand sich die höchste Rate an erfolgreichen, verletzungsfreien Punktionen an 3 von 4 Punktionsorten bei Verwendung der 1,9 cm Nadel, lediglich im 4. ICR rechts war sie mit der 2,5 cm Nadel minimal höher.

Auch bei den 5-Jährigen wäre die kürzeste Nadel (hier 22 G, Länge 2,5 cm) in den meisten Fällen ausreichend gewesen, mit der nächstlängeren Kanüle (20 G, Länge 3,2 cm) ergab sich, mit Ausnahme des 4. ICR links, kein so deutlicher Anstieg der theoretischen Verletzungsraten.

Im Vergleich dazu waren die Erfolgsraten bei den 10-Jährigen mit der kürzeren Kanüle geringer, die höhere Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche, verletzungsfreie Punktion ergäbe sich hier mehrheitlich mit einer Nadellänge von 4,5 cm.

In den beiden jüngeren Altersgruppen fällt auf, dass bei Auswahl der jeweils längsten Nadel (3,2 cm bei den 0-Jährigen und 4,5 cm bei den 5-Jährigen) die potentielle Verletzungsrate deutlich stärker zunehmen würde als die Erfolgsrate. Dieser Anstieg fällt links deutlicher aus als rechts.

Die Unterschiede zwischen dem 2. und dem 4. ICR waren bei senkrechter Punktion insgesamt relativ gering. Während auf der rechten Thoraxseite im Hinblick auf die Rate an erfolgreichen, verletzungsfreien Punktionen mit der jeweils am besten geeigneten Kanüle ein minimaler Vorteil zugunsten des 2. ICR zu beobachten war, verhielt es sich auf der linken Seite umgekehrt.

Zur Veranschaulichung folgt hier eine grafische Darstellung der Ergebnisse bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand (Abb. 14 – 16).

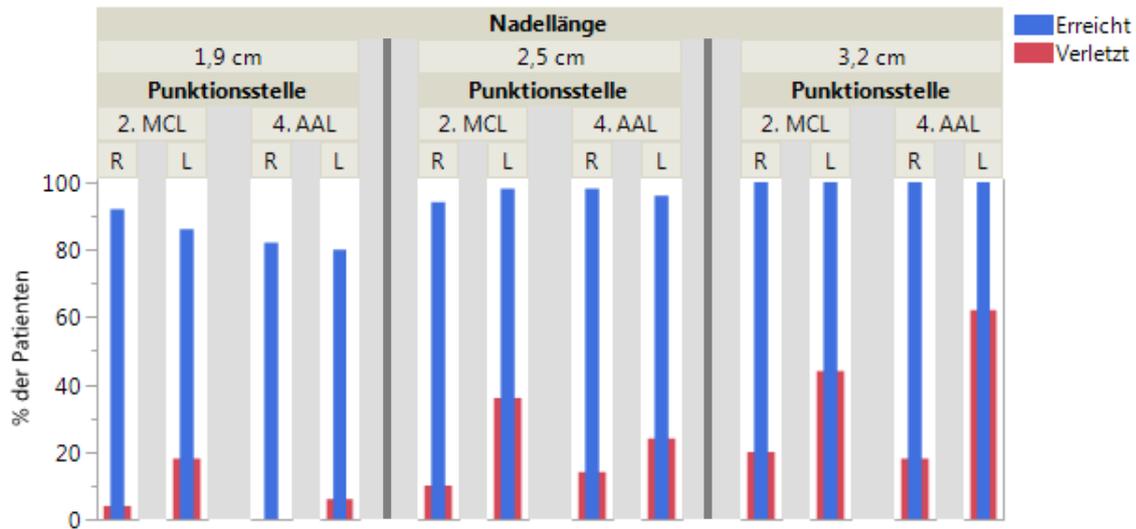


Abb. 14: Erfolgs- und Verletzungsraten für verschiedene Kanülen bei senkrechter Punktion, Altersgruppe 0 Jahre

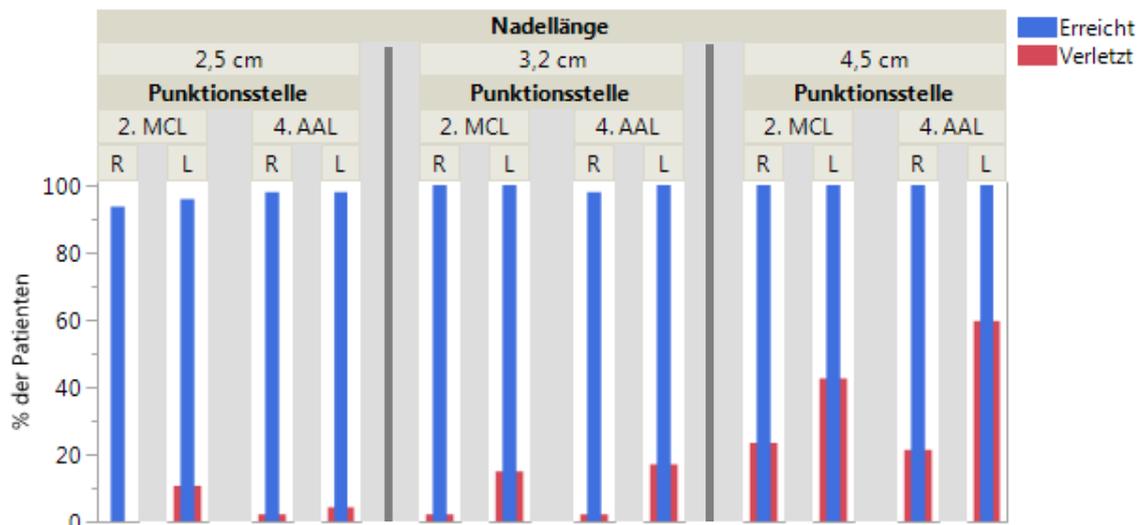


Abb. 15: Erfolgs- und Verletzungsraten für verschiedene Kanülen bei senkrechter Punktion, Altersgruppe 5 Jahre

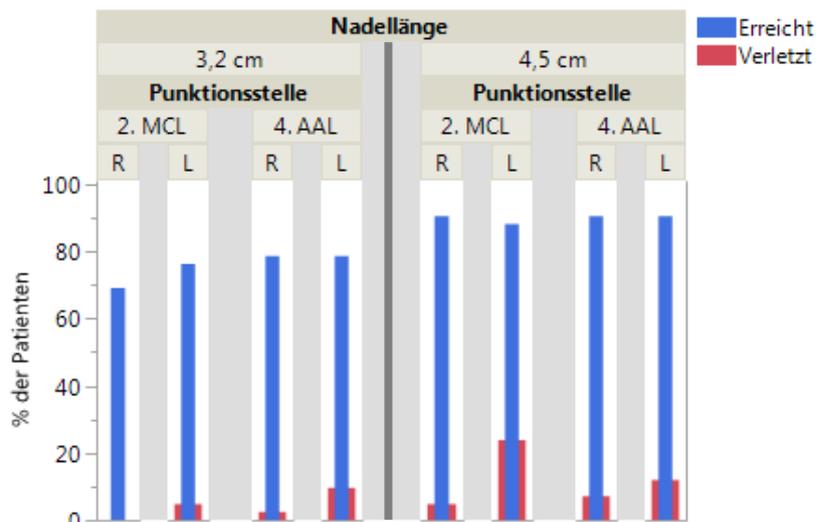


Abb. 16: Erfolgs- und Verletzungsraten für verschiedene Kanülen bei senkrechter Punktion, Altersgruppe 10 Jahre

3.8.1.2 Vergleich verschiedener Nadellängen bei Punktion zur nächsten vitalen Struktur

Tab. 39: Erfolgs- und Verletzungsraten für verschiedene Kanülen bei Punktion zur nächstgelegenen vitalen Struktur, Altersgruppe 0 Jahre

Durchmesser	Länge	2. ICR MCL Rechts			2. ICR MCL Links			4. ICR AAL Rechts			4. ICR AAL Links			
		Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	
24G	0,07 cm	1,9 cm	86,0%	24,0%	62,0%	90,0%	52,0%	38,0%	80,0%	10,0%	70,0%	82,0%	20,0%	62,0%
22G	0,09 cm	2,5 cm	96,0%	54,0%	42,0%	98,0%	82,0%	16,0%	98,0%	24,0%	74,0%	96,0%	50,0%	46,0%
20G	0,11 cm	3,2 cm	100,0%	88,0%	12,0%	100,0%	96,0%	4,0%	100,0%	66,0%	34,0%	100,0%	84,0%	14,0%

Tab. 40: Erfolgs- und Verletzungsrate für verschiedene Kanülen bei Punktion zur nächstgelegenen vitalen Struktur, Altersgruppe 5 Jahre

Durchmesser	Länge	2. ICR MCL Rechts			2. ICR MCL Links			4. ICR AAL Rechts			4. ICR AAL Links			
		Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	
22G	0,09 cm	2,5 cm	95,7%	8,5%	87,2%	91,5%	27,7%	63,8%	95,7%	6,4%	89,4%	97,9%	25,5%	72,3%
20G	0,11 cm	3,2 cm	97,9%	29,8%	68,1%	97,9%	57,4%	40,4%	97,9%	21,3%	76,6%	97,9%	74,5%	23,4%
18G	0,13 cm	4,5 cm	100,0%	89,4%	10,6%	100,0%	93,6%	6,4%	100,0%	78,7%	21,3%	100,0%	97,9%	2,1%

Tab. 41: Erfolgs- und Verletzungsraten für verschiedene Kanülen bei Punktion zur nächstgelegenen vitalen Struktur, Altersgruppe 10 Jahre

Durchmesser	Länge	2. ICR MCL Rechts			2. ICR MCL Links			4. ICR AAL Rechts			4. ICR AAL Links			
		Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	
20G	0,11 cm	3,2 cm	76,2%	7,1%	69,0%	76,2%	28,6%	47,6%	78,6%	9,5%	69,0%	78,6%	16,7%	61,9%
18G	0,13 cm	4,5 cm	90,5%	35,7%	54,8%	90,5%	59,5%	31,0%	88,1%	28,6%	59,5%	88,1%	59,5%	28,6%
16G	0,18 cm	4,5 cm	90,5%	35,7%	54,8%	90,5%	59,5%	31,0%	88,1%	28,6%	59,5%	88,1%	59,5%	28,6%

Bei Betrachtung der Ergebnisse für die Punktion zur nächstgelegenen vitalen Struktur wäre es bereits bei einer geringeren Insertionstiefe zu einem deutlichen Anstieg der theoretischen Verletzungsraten gekommen. Dementsprechend ergab sich die höchste Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche, verletzungsfreie Punktion hier in fast allen Fällen mit der jeweils kürzesten Nadellänge.

Beim Vergleich zwischen den Punktionsorten zeigte sich mit der jeweils kürzesten Nadel fast durchgehend ein Vorteil im 4. ICR.

3.8.1.3 Vergleich verschiedener Nadellängen bei sagittaler Punktion

Tab. 42: Erfolgs- und Verletzungsraten für verschiedene Kanülen bei sagittaler Punktion, Altersgruppe 0 Jahre

Durchmesser	Länge	2. ICR MCL Rechts			2. ICR MCL Links			
		Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	
24G	0,07 cm	1,9 cm	86,0%	4,0%	82,0%	82,0%	10,0%	72,0%
22G	0,09 cm	2,5 cm	94,0%	4,0%	90,0%	92,0%	14,0%	78,0%
20G	0,11 cm	3,2 cm	98,0%	16,0%	82,0%	98,0%	24,0%	74,0%

Tab. 43: Erfolgs- und Verletzungsraten für verschiedene Kanülen bei sagittaler Punktion, Altersgruppe 5 Jahre

Durchmesser	Länge	2. ICR MCL Rechts			2. ICR MCL Links			
		Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	
22G	0,09 cm	2,5 cm	91,5%	2,1%	89,4%	87,2%	8,5%	78,7%
20G	0,11 cm	3,2 cm	97,9%	2,1%	95,8%	100,0%	8,5%	91,5%
18G	0,13 cm	4,5 cm	100,0%	14,9%	85,1%	100,0%	17,0%	83,0%

Tab. 44: Erfolgs- und Verletzungsraten für verschiedene Kanülen bei sagittaler Punktion, Altersgruppe 10 Jahre

Durchmesser	Länge	2. ICR MCL Rechts			2. ICR MCL Links			
		Erreicht	Verletzt	Δ	Erreicht	Verletzt	Δ	
20G	0,11 cm	3,2 cm	71,4%	0,0%	71,4%	71,4%	0,0%	71,4%
18G	0,13 cm	4,5 cm	90,5%	0,0%	90,5%	95,2%	9,5%	85,7%
16G	0,18 cm	4,5 cm	90,5%	0,0%	90,5%	95,2%	9,5%	85,7%

Bei sagittaler Punktion im 2. ICR ergaben sich die höchsten Raten an erfolgreichen, verletzungsfreien Punktionen im Gegensatz zu den anderen Punktionswinkeln mit einer etwas größeren Nadellänge, nämlich 2,5 cm bei den Säuglingen, 3,2 cm bei den 5-Jährigen und 4,5 cm bei den 10-Jährigen.

Vergleicht man die Ergebnisse für die jeweils optimale Nadellänge, so waren die Wahrscheinlichkeiten bei den Säuglingen und den 10-Jährigen bei sagittaler Punktion im 2. ICR höher als bei orthogonaler Punktion im 2. oder im 4. ICR, lediglich bei den 5-Jährigen war dies nicht der Fall.

3.8.2 Nadeldurchmesser

Um eine weitere Einschätzung der Platzverhältnisse und des Risikos für eine Verletzung des intercostalen Gefäß-Nervenbündels zu ermöglichen, wurde die Differenz zwischen der gemessenen ICR-Breite und dem Durchmesser der Kanülen ermittelt. Wie in den nachfolgenden Tabellen (Tab. 45 – 47) erkennbar ist, zeigte sich vor allem bei den Säuglingen im 4. ICR ein sehr geringer Spielraum.

Tab. 45: Mittelwert, Minimum und Maximum der Differenz zur ICR-Breite abhängig vom Kanülen-durchmesser, Altersgruppe 0 Jahre

Durchmesser	Länge	2. ICR MCL Rechts			2. ICR MCL Links			4. ICR AAL Rechts			4. ICR AAL Links			
		Mittel	Min	Max	Mittel	Min	Max	Mittel	Min	Max	Mittel	Min	Max	
24G	0,07 cm	1,9 cm	0,48	0,11	0,96	0,51	0,11	0,99	0,34	0,06	0,57	0,39	0,15	0,68
22G	0,09 cm	2,5 cm	0,46	0,09	0,94	0,49	0,09	0,97	0,32	0,04	0,55	0,37	0,13	0,66
20G	0,11 cm	3,2 cm	0,44	0,07	0,92	0,47	0,07	0,95	0,30	0,02	0,53	0,35	0,11	0,64

Tab. 46: Mittelwert, Minimum und Maximum der Differenz zur ICR-Breite abhängig vom Kanülen-durchmesser, Altersgruppe 5 Jahre

Durchmesser	Länge	2. ICR MCL Rechts			2. ICR MCL Links			4. ICR AAL Rechts			4. ICR AAL Links			
		Mittel	Min	Max	Mittel	Min	Max	Mittel	Min	Max	Mittel	Min	Max	
22G	0,09 cm	2,5 cm	1,26	0,37	1,77	1,34	0,12	2,18	0,63	0,28	1,13	0,74	0,33	1,58
20G	0,11 cm	3,2 cm	1,24	0,35	1,75	1,32	0,10	2,16	0,61	0,26	1,11	0,72	0,31	1,56
18G	0,13 cm	4,5 cm	1,22	0,33	1,73	1,30	0,08	2,14	0,58	0,24	1,09	0,70	0,29	1,54

Tab. 47: Mittelwert, Minimum und Maximum der Differenz zur ICR-Breite abhängig vom Kanülen-durchmesser, Altersgruppe 10 Jahre

Durchmesser	Länge	2. ICR MCL Rechts			2. ICR MCL Links			4. ICR AAL Rechts			4. ICR AAL Links			
		Mittel	Min	Max	Mittel	Min	Max	Mittel	Min	Max	Mittel	Min	Max	
20G	0,11 cm	3,2 cm	1,47	0,84	2,08	1,56	0,83	2,49	0,97	0,39	1,69	1,05	0,27	1,94
18G	0,13 cm	4,5 cm	1,48	0,82	2,06	1,54	0,81	2,47	0,95	0,37	1,67	1,03	0,25	1,92
16G	0,18 cm	4,5 cm	1,48	0,77	2,01	1,54	0,76	2,42	0,95	0,32	1,62	1,03	0,20	1,87

4 DISKUSSION

4.1 ICR-Breite

Während bei der Anlage einer Thoraxdrainage eine stumpfe Präparation empfohlen wird,²² besteht bei der Nadeldekompression die Risikominimierung in Bezug auf die Interkostalgefäße im Wesentlichen darin, sich am Oberrand der Rippe zu orientieren. Bei einer Verletzung der Interkostalarterie sind, wie in Kapitel 1.3 beschrieben, auch bei Erwachsenen lebensbedrohliche Blutungen möglich, deren Auswirkungen bei Traumapatienten durch gleichzeitig vorliegende Verletzungen womöglich noch verstärkt werden könnten.

Dennoch ist der Aspekt der ICR-Breite in den Studien, die an Erwachsenen durchgeführt wurden, und in denen zum Teil ebenfalls mehrere Punktionsorte verglichen wurden, bislang nicht thematisiert worden. Die ICR-Breite ist als Risikoindikator vor allem in den Fällen wichtig, in denen nur eine geringe Differenz zwischen der ICR-Breite und dem Nadeldurchmesser vorhanden ist.

Dieser Umstand wird auch dadurch verstärkt, dass zur raschen Entlastung und zur Reduktion der Rate an sekundär verstopften Nadeln meist Kanülen mit relativ großem Durchmesser (für Säuglinge und Kleinkinder beispielsweise laut ATLS-Kursbuch 18 G = 1,27 mm bis 12 G = 2,11 mm) empfohlen werden.³²

Im untersuchten Patientenkollektiv betrifft dies erwartungsgemäß vor allem die Säuglinge unter einem Jahr, bei denen gelegentlich auch Werte unter 3 mm, in Einzelfällen sogar unter 2 mm gemessen wurden. Auch wenn die absolute Differenz zwischen den Punktionsorten (2. ICR MCL vs. 4. ICR AAL) bei dieser Altersgruppe am geringsten ausfiel (0,55 cm vs. 0,41 cm rechts bzw. 0,58 cm vs. 0,46 cm links), spricht dieser Aspekt ebenso wie die signifikanten Unterschiede, die sich in allen Altersgruppen gezeigt haben, im Hinblick auf die ICR-Breite für die Wahl des 2. ICR in der Medioklavikularlinie als Punktionsort.

4.2 Thoraxwanddicke (TWD)

Vergleicht man die durchschnittliche TWD der 0- und der 5-Jährigen, so fällt zunächst auf, dass die Zunahme, vor allem im Verhältnis zum Längenwachstum, sehr gering ausfällt. Im 4. ICR war die TWD der 5-Jährigen zum Teil sogar etwas

geringer als die der Säuglinge. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass der Körperfettanteil im Verlauf des 1. Lebensjahres sein Maximum erreicht und in den folgenden Jahren absinkt.⁶⁷

Die Übereinstimmung der Punktionsorte legt den Vergleich zur Studie von Mandt et al., der einzigen bislang veröffentlichten Studie an Kindern außerhalb dieser Untersuchung, nahe. Bedingt durch die unterschiedliche Einteilung der Patientengruppen (siehe Kap. 1.3.1) können die Ergebnisse jedoch nur indirekt mit dieser verglichen werden. Die Unterteilung in vier Kategorien entsprechend der Körperlänge hatte bei der Studie von Mandt Gruppen mit einem mittleren Alter von 0, 1, 4 und 8 Jahren ergeben. Die Mittelwerte der in der hier vorliegenden Arbeit untersuchten Säuglinge (bei senkrechter Punktion) lagen an beiden Punktionsorten geringfügig unter denen der jüngsten Patientengruppe bei Mandt et al.; die Mittelwerte der 5-Jährigen waren zudem jeweils geringer (im 2. ICR um 5,1 mm, im 4. ICR um 6,0 mm) als die der Gruppe mit einem Durchschnittsalter von 4 Jahren. Lediglich bei den 10-Jährigen ergaben sich geringfügig (weniger als 2 mm) höhere Mittelwerte als bei der ältesten Gruppe von Mandt et al. (Durchschnittsalter 8 Jahre).⁶⁵ Insgesamt liegen die Ergebnisse jedoch in einem ähnlichen Bereich. Ob weitere Parameter wie Körpergröße, Körpergewicht und BMI für die hier tendenziell leicht geringeren Mittelwerte verantwortlich sind, kann aufgrund der fehlenden Erhebung von Körpergröße und -gewicht in dieser Arbeit nicht eruiert werden.

Verglichen mit Studien bei Erwachsenen, die für die Verwendung einer 5,0 cm langen Nadel zum Teil sehr hohe Misserfolgsraten aufgrund einer zu großen TWD ermittelten, waren diese bei den hier untersuchten Kindern relativ niedrig. Bei den 0- und 5-Jährigen war eine TWD von mehr als 5,0 cm gar nicht, und auch bei den 10-Jährigen je nach Position nur in höchstens 3 Fällen (7,1%) vorhanden.

Ob dies tatsächlich bei allen dieser Patienten zu einem primären Versagen der Nadeldekompression führen würde, lässt sich methodenbedingt nicht mit letzter Sicherheit ableiten, da bei allen dieser Patienten das subkutane Fettgewebe wesentlich zur Thoraxwanddicke beigetragen hat und sich dessen Komprimierbarkeit in einer CT-Messung nicht wirklich einschätzen lässt. Angesichts der gemessenen Werte, die sich alle in einem Bereich kleiner als 6 cm bewegten, ist eine erfolgreiche Punktion durchaus vorstellbar. Allerdings sollte, falls eine besonders hohe TWD zu erwarten ist, im 4. ICR umso strenger auf eine Punktion senkrecht zur Thoraxwand

geachtet werden, da eine Abweichung hiervon stets höhere Messwerte zur Folge hatte. Zudem sollten Maßnahmen zur Vermeidung einer Dislokation (z.B. durch Rückstellkräfte des komprimierten Fettgewebes) getroffen werden.

Die TWD im 4. ICR in der vorderen Axillarlinie erwies sich insgesamt bei der Mehrzahl der untersuchten Aufnahmen als geringer im Vergleich zum 2. ICR. Damit zeigt sich grundsätzlich eine ähnliche Tendenz wie bei erwachsenen Patienten, bei denen die Studienlage wesentlich zur Änderung der Empfehlung im aktuellen ATLS Manual zugunsten einer lateralen Punktionsstelle beigetragen hatte.³²

Allerdings war der Unterschied nur in der Altersgruppe der 5-Jährigen signifikant, in welcher er links 0,32 cm und rechts 0,28 cm maß. Bei den 0-Jährigen betrug die Differenz rechts 0,04 cm und links zeigte sich sogar eine minimal (0,0005 cm) größere TWD im 4. ICR. Auch bei den 10-Jährigen war der Mittelwert auf beiden Seiten im 4. ICR geringer, die simulierte Misserfolgsrate konnte dies jedoch zumindest bei der hier untersuchten Probandengruppe nicht widerspiegeln.

Auch in der Studie von Mandt et al. hatten sich bei der TWD in allen Altersgruppen nur geringe Unterschiede (maximal 0,26 cm) zwischen dem 2. und 4. ICR gezeigt.⁶⁵

Die Differenz zwischen den Punktionsorten ist damit – bezogen auf den absoluten Wert – insgesamt nicht ganz so deutlich wie bei der Mehrzahl der Studien, die an Erwachsenen durchgeführt wurden. Laut einer Metaanalyse hatte sich hier im 4. ICR eine im Durchschnitt um 8,46 mm geringere Brustwanddicke gezeigt als im 2. ICR. Bei einer mittleren TWD von 42,79 mm im 2. ICR entspricht dies einer relativen Reduktion von 19,9%.⁵⁸ In der hier vorliegenden Arbeit zeigte sich die größte relative Differenz zwischen den Punktionsorten bei den 5-Jährigen, bei denen die TWD im 4. ICR links 20,0 % und rechts 17,3 % geringer war. Prozentual gesehen liegen die Differenzen somit zumindest in dieser Altersgruppe in einem ähnlichen Bereich, bei den 10-Jährigen und vor allem bei den Säuglingen waren jedoch auch die relativen Differenzen geringer als die der Metaanalyse von Chang et al.

Eine mögliche Erklärung für die geringen absoluten Unterschiede könnte die bei Kindern noch verhältnismäßig dünne Brustmuskulatur sein. Dies wurde unter anderem von Lamblin et al. bei ihrer Untersuchung einer rein militärischen Probandengruppe als mögliche Ursache für die (in der Studie um durchschnittlich 11,9 mm) dickere Thoraxwand im 2. ICR gesehen.⁶⁸ Auch Harcke et al. vermuteten im besseren Trainingszustand ihrer ebenfalls militärischen Kohorte eine mögliche Erklärung für den im Vergleich zu anderen Studien hohen Mittelwert.⁶⁹ Im Gegensatz

zum Bereich des 2. ICR MCL, der vom Musculus pectoralis major bedeckt ist, bleibt der Punktionsort im 4. ICR (von der Interkostalmuskulatur abgesehen) weitgehend muskelfrei.

Gerade angesichts der geringen absoluten TWD in der untersuchten Probandengruppe und der damit verbundenen geringen theoretischen Misserfolgsrate kann deshalb allein aufgrund der TWD keine eindeutige Empfehlung für oder gegen einen Punktionsort ausgesprochen werden.

4.3 Tiefe zu vitalen Strukturen (TVS) und mögliche Verletzungsraten

Während die TWD und die angenommene (Miss-)erfolgsrate bei Erwachsenen in zahlreichen Studien thematisiert wurden, beschäftigten sich nur wenige Studien empirisch mit der Sicherheit der Nadeldekompression.

4.3.1 TVS im Vergleich zu Erwachsenen

So wurde von Zengerink et al.³⁴ durch Messung der Distanz zwischen der Hautoberfläche und dem Perikard im 2. ICR in der Medioklavikularlinie in CT-Aufnahmen von Erwachsenen eine Wahrscheinlichkeit von 2,45 % ermittelt, mit einer 4,5 cm langen Kanüle das Perikard zu penetrieren. Der Punktionswinkel wurde hierbei nicht genauer beschrieben, andere vitale Strukturen wurden in dieser Studie nicht vermessen.

Die einzige bekannte Studie, in welcher Werte für die TVS an den hier untersuchten Punktionsorten angegeben wurden, ist eine ebenfalls CT-basierte Studie von Chang et al. an 100 erwachsenen Traumapatienten. Hier wurden bei senkrechter Punktion abhängig von der Punktionsstelle für die TVS Werte von durchschnittlich 10,94 bis 12,80 cm ermittelt.⁵⁹ In einer weiteren Publikation, ebenfalls mit erwachsenen Traumapatienten, erfolgte die Bestimmung der TVS nur am lateralen Punktionsort im 4. ICR in der mittleren Axillarlinie und somit weiter posterior als hier untersucht. Die Werte dort waren mit 14,38 cm (rechts) bzw. 13,15 cm (links) ähnlich hoch wie in der erstgenannten Studie.⁷⁰

Die Mittelwerte der hier bei Kindern erhobenen Ergebnisse lagen auch bei den 10-Jährigen (6,11 bis 8,00 cm) deutlich darunter. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass das Brustkorbwachstum in einem Alter von 10 Jahren noch nicht

abgeschlossen ist und dadurch die Distanz zwischen Hautoberfläche und zentraler gelegenen Strukturen im Wachstumsverlauf weiter zunimmt. Auch methodische Unterschiede könnten eine Rolle spielen, da trotz insgesamt recht ähnlicher Durchführung bei bestimmten Strukturen, beispielsweise bei den Pulmonalarterienästen, schwierig zu definieren ist, bis wohin die Aufzweigungen als vitale Strukturen (im Sinne eines vital bedrohlichen, interventionspflichtigen Blutverlustes im Falle einer Punktion) einzuschätzen sind. Letztlich trägt wohl auch die TWD, die bei den 10-Jährigen im Mittel um mehr als 1 cm geringer war als die der Erwachsenen in der Studie von Chang et al., zu den großen Unterschieden bei, da eine höhere TWD eine Erhöhung der ebenfalls von der Hautoberfläche ausgemessenen TVS in gleichem Maße nach sich zieht.

4.3.2 Verletzungsraten im Vergleich zu Erwachsenen

Die deutlichen Unterschiede zu den Erwachsenen finden sich ebenso bei den Verletzungsraten bei einer simulierten Insertionstiefe von 5,0 cm wieder.

Auch wenn die Wahrscheinlichkeit für eine Punktion ohne Verletzung vitaler Strukturen mit höherem Alter der Probanden zunahm, erreichte sie selbst bei den 10-Jährigen nicht die Werte, die aus Studien an Erwachsenen berichtet wurden. So ermittelten Chang et al.⁵⁹ eine Wahrscheinlichkeit für „radiographic noninjury“ von mindestens 99 % bei Punktion in Richtung der nächstgelegenen vitalen Struktur und sogar 100 % bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand, jeweils mit einer Nadellänge von 5,0 cm. In der Studie von Wax und Leibowitz war die Rate an Messungen mit einer (in der Publikation nicht exakt definierten) „bedeutenden Weichgewebsstruktur“ in 5 cm Tiefe zwar teilweise höher als bei Chang (bis zu 21 % je nach Punktionsort), jedoch immer noch leicht geringer als bei den hier untersuchten 10-Jährigen (26,2 % im gleichen Punktionsort).

In der Gruppe der 0-Jährigen betrug diese Rate hingegen mindestens 78 % bei senkrechter Punktion, und bei 100 % der Aufnahmen fand sich in einem Radius von 5,0 cm eine Struktur, die theoretisch bei einem anderen Einstichwinkel hätte erreicht werden können. An dieser Stelle sei zu erwähnen, dass bei der Bestimmung der nächstgelegenen Struktur für den Punktionswinkel kein Limit festgelegt worden ist und die mittlere Differenz zur orthogonalen Punktionsrichtung mit durchschnittlich 12,5° bis 23,8° (je nach Punktionsort) recht hoch war. Dennoch fand sich in manchen Fällen eine sehr ungünstig und oberflächlich gelegene Struktur auch bei deutlich

geringerer Abweichung von der orthogonalen Punktionsrichtung. Zudem kann eine solche Abweichung aufgrund von Kräfteeinwirkungen oder Verbiegen der Nadel nie vollständig ausgeschlossen werden.

4.3.3 TVS in Abhängigkeit vom Punktionsort

Der Vergleich der durchschnittlichen TVS bei senkrechter Punktion erbrachte zunächst ein eher uneinheitliches Bild, da der Vorteil auf der linken Thoraxseite in allen Altersgruppen auf Seiten des 2. ICR lag, auf der rechten jedoch bei den 5- und 10-Jährigen im 4. ICR. Bei sagittaler Punktion im 2. ICR waren die Mittelwerte jedoch in allen Altersgruppen signifikant größer als bei senkrechter Punktion am lateralen Punktionsort. Vergleicht man allerdings die Ergebnisse für den ungünstigsten Fall, also eine Punktion in Richtung der nächstgelegenen vitalen Struktur, konnte sich dieser scheinbar klare Vorteil für den 2. ICR nicht bestätigen, die größere Tiefe zur nächstgelegenen Struktur fand sich überwiegend im 4. ICR.

4.3.4 Verletzungsraten in Abhängigkeit vom Punktionsort

Auch wenn er generell eine gute Orientierung über die Sicherheit eines einzelnen Punktionsortes bietet, sollte die Aussagekraft des Mittelwertes der TVS für sich genommen nicht unkritisch betrachtet werden.

Beim Vergleich zwischen dem 2. und dem 4. ICR besteht eine gewisse Gefahr der Verzerrung, da die theoretischen Maximalwerte im 2. ICR bei verletzungsfreier Punktion beinahe dem Durchmesser des Thorax in Sagittalrichtung entsprechen, wohingegen im 4. ICR aufgrund der lateralen Punktionsrichtung selbst im günstigsten Fall eine Begrenzung durch die Wirbelsäule oder weitere medial gelegene Strukturen erfolgen würde.

Aus diesem Grund erschien neben der Betrachtung der TVS auch ein Vergleich der simulierten Verletzungsraten, sowohl insgesamt als auch für einzelne Strukturen, sinnvoll.

Abhängig vom Punktionswinkel ergaben sich, ähnlich wie für die TVS, unterschiedliche Tendenzen. Die sagittale Punktion im 2. ICR war der orthogonalen

im 4. ICR in der Mehrzahl der Fälle überlegen, im ungünstigsten Fall könnten mit derselben Insertionstiefe jedoch im 2. ICR jedoch mehr Strukturen getroffen werden.

Mehrere Publikationen attestierten der lateralen Punktionsstelle bei Erwachsenen eine höhere Sicherheit im Hinblick auf die Verletzung mediastinaler Strukturen, insbesondere des Herzens.^{38, 44} Beim Vergleich der möglichen Verletzungsraten für das Herz ergaben sich in vorliegender Arbeit prinzipiell ähnliche Ergebnisse wie bei der Gesamt-Verletzungsrate: bei sagittaler Punktion im 2. ICR wäre das Perikard fast durchgehend seltener getroffen worden als im 4. ICR, bei einer Punktion in Richtung der nächstgelegenen Struktur ergab sich dagegen zumindest mit der kürzesten und der mittellangen Kanüle ein einheitlicher Vorteil für den lateralen Punktionsort. In diesem Zusammenhang ist vor allem zu erwähnen, dass die Konstellation, bei der die Nadel ohne im CT erkennbares Erreichen des Pleuraspaltes direkt das Perikard getroffen hätte, bei sagittaler bzw. orthogonaler Punktion ausschließlich im 2. ICR auftrat (Kap. 3.5.1).

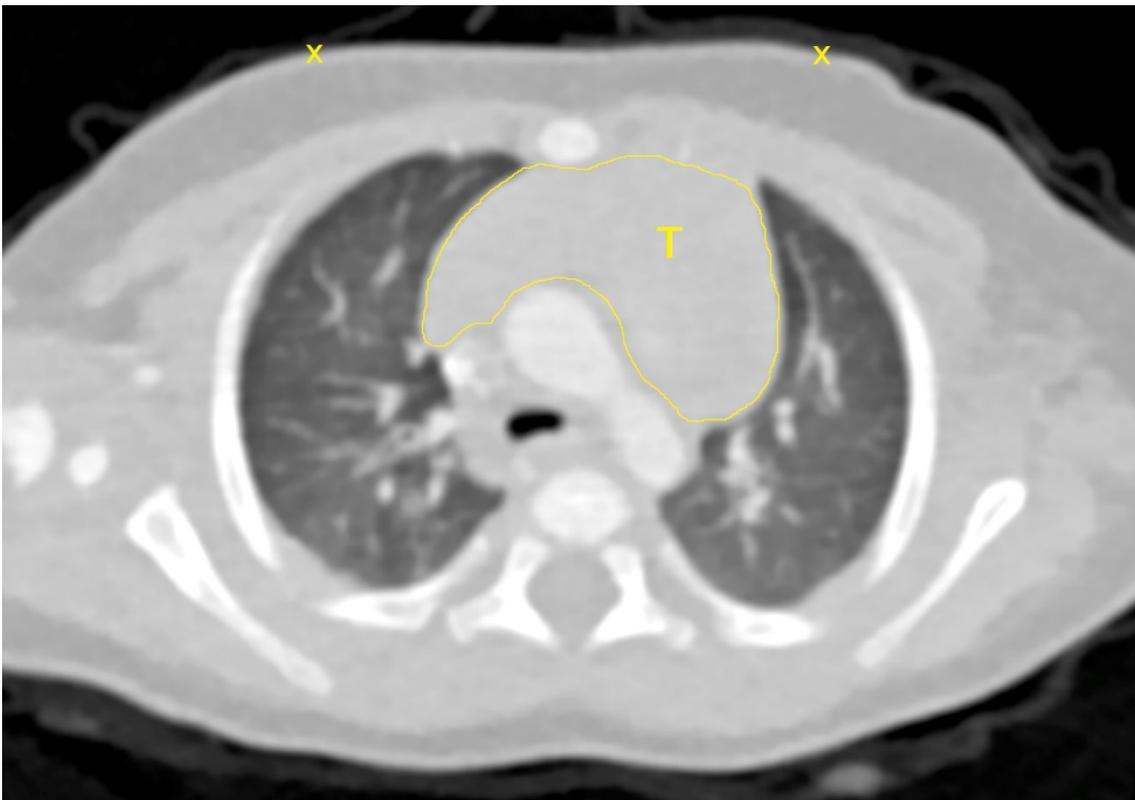


Abb. 17: Beispielaufnahme auf Höhe des 2. ICR, Patient männlich, Alter 4 Monate, markiert sind Thymus (T) und Punktionsstellen (x)

Eine weitere Struktur, die im 2. ICR speziell bei den jüngeren Kindern Einfluss auf den Erfolg einer Nadeldekompression haben kann, ist der Thymus. Dieser ist in der

Regel bei Säuglingen im Verhältnis zum restlichen Körper am größten⁷¹ und kann bis etwa zum 5. Lebensjahr in der axialen CT-Aufnahme eine vierseitige, konvexe Form haben.⁷² Seine Größe und Lage im vorderen Mediastinum, deren Beurteilung ohne Bildgebung nicht möglich ist, können auch zwischen Kindern gleichen Alters stark variieren.⁷³

Bei den hier untersuchten Säuglingen fand sich der Thymus bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand im 2. ICR rechts in 8 % und links in 24 % der Fälle in einer Tiefe von weniger als 5,0 cm. Bei den 5- und 10-Jährigen wäre er hingegen weder bei senkrechter noch bei sagittaler Punktion getroffen worden.

Ob eine versehentliche Punktion dieses Organs selbst hämodynamisch relevante Auswirkungen haben könnte, ist (auch mangels Evidenz) schwer einzuschätzen, Fälle von interventionsbedürftigen spontanen^{74, 75} oder traumabedingten⁷⁶ Thymuseinblutungen bei Kindern wurden jedoch bereits beschrieben. Die aus einer Punktion resultierende Verletzung wäre zwar womöglich kleiner als die Ruptur durch ein schweres Thoraxtrauma, es sollte allerdings bedacht werden, dass sich die Symptome, wie die obere Einflusstauung infolge der intrakapsulären und letztendlich raumfordernden Blutung im Fallbericht von Labitzke und Schramm, auch erst nach einiger Zeit manifestieren können.⁷⁶

Bei einem Spannungspneumothorax ist allerdings vor allem das mögliche Szenario zu beachten, dass der Thymus der vorderen Thoraxwand direkt anliegt. Eine zu tiefe Insertion, bei der die Nadelspitze im Thymus zum Liegen kommen würde, hätte im Hinblick auf den Spannungspneumothorax unter Umständen eine Obstruktion der Kanüle und einen erfolglosen Entlastungsversuch zur Folge.

Als weiteres Argument für die Wahl des lateralen Punktionsortes wird gelegentlich angeführt, dass dadurch die Verletzung einiger wichtiger vaskulärer Strukturen grundsätzlich vermieden werden könne. So betonen Rawlins et al. in ihrem Fallbericht die Nähe des Punktionsortes im 2. ICR MCL zur A. subclavia,³⁸ deren Verletzung in einem anderen Fallbericht (bei versehentlicher Platzierung im 1. ICR) tatsächlich nachgewiesen werden konnte.⁵⁰ Bei den hier untersuchten Aufnahmen wurde hingegen in keinem der Fälle eine simulierte Punktion dieser Arterie beobachtet. Dennoch ist eine solche Komplikation, vor allem bei zu sehr nach kranial gerichtetem Punktionswinkel, zweifellos möglich.

Daneben wurde auch die Nähe des anterioren Punktionsortes zur A. mammaria interna betont, die parallel zum lateralen Sternumrand verläuft.³⁸ Dieser Aspekt

wurde hier nicht untersucht, da sich die Arterie in der Mehrzahl der Aufnahmen, vor allem in den ohne Kontrastmittel durchgeführten, nicht gut darstellen ließ. Dennoch erscheint der Umstand relevant, auch da in mehreren prospektiven Studien beobachtet werden konnte, dass der Punktionsort im 2. ICR häufig zu weit medial lokalisiert wird.^{44, 77, 78}

Andererseits besteht im 4. ICR das zusätzliche Risiko, das Zwerchfell (und darunterliegende Strukturen) zu punktieren. Bei einer simulierten Punktionstiefe von 5,0 cm konnte dies ausschließlich auf der rechten Thoraxseite festgestellt werden, bei den 5-Jährigen in 4 Fällen (8,5 %) und bei den 10-Jährigen in 2 Fällen (4,8 %). Der Unterschied im Seitenvergleich lässt sich am ehesten dadurch erklären, dass das Zwerchfell rechts physiologisch höher steht als links.⁷⁹ Bei der Beurteilung dieser Werte muss jedoch bedacht werden, dass der erhöhte intrapleurale Druck bei einem Spannungspneumothorax in der Realität eine Tieferstellung des Zwerchfells auf der betroffenen Seite haben kann.^{80, 81} Dennoch lässt sich hieraus, auch unter dem Aspekt einer möglichen Fehldiagnose (also eines falsch positiven Befundes), die Empfehlung ableiten, Punktionen im 4. ICR nicht zu sehr nach kaudal gerichtet auszuführen.

Insgesamt lässt sich also festhalten, dass beide Punktionsorte im Hinblick auf die benachbarten Strukturen und Organe jeweils für sie spezifische Risiken bergen. Allerdings können im 4. ICR Verletzungen wichtiger Strukturen und Organe (das Lungenparenchym nicht eingeschlossen) durch korrekte Punktionstechnik auch bei einem zu Unrecht vermuteten Pneumothorax weitestgehend vermieden werden. Die Möglichkeit einer direkt der Thoraxwand anliegenden Struktur, die hier bei korrekter Punktionsrichtung ausschließlich im 2. ICR gegeben war, stellt jedoch einen wesentlichen Unterschied zu den bisherigen Erkenntnissen für erwachsene Patienten dar und kann an diesem Punktionsort die Versorgung des Patienten sowohl durch das Verletzungsrisiko als auch durch die Gefahr einer erfolglosen Punktion gefährden. Im Gegensatz zur Verletzung von Strukturen, die sich erst in einer gewissen Entfernung von der Pleura parietalis befinden, können hierbei Komplikationen auch bei sehr vorsichtiger Insertion der Kanüle eintreten. Besonders problematisch ist dabei, dass eine solche Lage des Perikards oder des Thymus ohne bildgebende Verfahren nicht ausgeschlossen werden kann. Der Ausschluss einer direkt anliegenden Struktur könnte deshalb speziell bei jüngeren Kindern eine

weitere Aufgabe einer präklinischen Ultraschalluntersuchung darstellen. Sofern jedoch kein Ultraschallgerät im Notarzteinsatz verfügbar oder eine mögliche zeitliche Verzögerung dadurch nicht vertretbar ist, erscheint aufgrund dieses Umstandes vor allem bei Säuglingen und Kleinkindern die Punktion im 4. ICR als die sicherere Alternative.

4.3.5 TVS und getroffene Strukturen im Seitenvergleich

Betrachtet man die Ergebnisse im Seitenvergleich, so fällt auf, dass in den allermeisten Fällen sowohl die TVS als auch die Wahrscheinlichkeit, in einer Tiefe von 5,0 cm keine Struktur zu treffen, auf der linken Thoraxseite geringer war als auf der rechten. In dieser Hinsicht zeigen die Ergebnisse – trotz methodischer Unterschiede – eine ähnliche Tendenz wie die der Studien von Wax/Leibowitz (2007),⁸² Sanchez et al (2011)⁷⁰ und Chang et al (2014).⁵⁹

Bei differenzierterer Betrachtung der Strukturen, die bei einer Punktion bis in 5 cm Tiefe getroffen würden, zeigt sich, dass bei senkrechter Punktion auf der linken Thoraxseite die Herzwand in allen Gruppen die am häufigsten als erstes getroffene Struktur darstellt. Auf der rechten Seite wäre es hingegen häufiger zur Verletzung eines Pulmonalarterienastes gekommen.

Auch die Rate an direkt anliegenden Strukturen (Herz bzw. Thymus, vgl. Abschnitt 3.5.1) war im direkten Seitenvergleich in den allermeisten Fällen auf der linken Seite höher als auf der rechten.

Dies scheint insgesamt dafür zu sprechen, dass die Unterschiede der TVS und der simulierten Verletzungsraten im Seitenvergleich mit der anatomischen Ausrichtung des Herzens zusammenhängen.

Die Unterschiede hinsichtlich der mittleren TVS (siehe Kap. 3.4) im Seitenvergleich waren für den jeweiligen Punktionswinkel im 4. ICR stets deutlicher ausgeprägt als im 2. ICR. Auch hier spielt die Lage des Herzens im Mediastinum eine Rolle. Aufgrund der im Regelfall nach links unten ausgerichteten anatomischen Herzachse ist das Herz auf Höhe des 4. ICR deutlicher nach links lateralisiert als auf der anderen, weiter kranial gelegenen Punktionshöhe und deshalb auf dieser Seite wesentlich näher an der Thoraxwand als rechts.

4.4 Intrapleurale Sicherheitszone (ISZ)

Angesichts der insgesamt relativ geringen Unterschiede bei der TWD zwischen den Punktionsorten lassen sich für die ISZ (als Differenz aus TVS und TWD) grundsätzlich ähnliche Aussagen ableiten wie für die isolierte Betrachtung der TVS. Während die mittlere ISZ bei sagittaler Punktion im 2. ICR durchgehend und meist signifikant größer war als im 4. ICR, ergab sich bei Punktion zur nächsten vitalen Struktur ein einheitlicher Vorteil für den lateralen Punktionsort.

Auch bei der intrapleurale Sicherheitszone ist der Unterschied zu Studien, die am Erwachsenen durchgeführt wurden, erheblich. Zwar ist die ISZ darin bislang noch kaum explizit betrachtet worden, aus der Studie von Chang et al., in welcher die TWD und TVS bei Erwachsenen mit ähnlichen Methoden wie hier gemessen wurden, ließen sich Differenzen von durchschnittlich 7,18 bis 9,03 cm bei Punktion senkrecht zur Hautoberfläche errechnen.⁵⁹

Im Gegensatz dazu war dieser Sicherheitsbereich vor allem in der Altersgruppe der 0-Jährigen auch beim jeweils optimalen Punktionswinkel erheblich kleiner und die nächstgelegene Struktur zum Teil in weniger als 1 cm Abstand von der Pleura parietalis zu finden. Wie im vorherigen Kapitel erläutert, kommen im 2. ICR die direkt anliegenden Strukturen hinzu, die vor allem bei jüngeren Kindern die Eignung dieses Punktionsortes limitieren könnten.

Als wichtigste Schlussfolgerung aus diesem Vergleich bleibt dennoch die Empfehlung, unabhängig vom Punktionsort, bei der Punktion auf das Austreten von Luft (als Zeichen für das Erreichen des Pleuraspaltes) zu achten und im Anschluss daran die Kanüle nicht mehr wesentlich tiefer vorzuschieben. Im Anschluss sollte eine Fixierung der richtig positionierten Kanüle zur Vermeidung einer potentiell gefährlichen Dislokation erfolgen.⁶⁰

4.5 Auswahl der Nadel für die verschiedenen Altersgruppen

4.5.1 Nadellänge

Bei den Säuglingen ließen sich die besten Ergebnisse im Hinblick auf die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche und gleichzeitig verletzungsfreie Punktion überwiegend mit einer Nadellänge von 1,9 cm (orthogonal) bzw. 2,5 cm (sagittal)

simulieren. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass im Laufe des ersten Lebensjahres ein erhebliches Wachstum des Körpers stattfindet und die tatsächlichen Körpermaße eines Neugeborenen oder eines 11 Monate alten Kindes vergleichsweise deutlich von den im Mittel etwa 5 Monate alten Kindern abweichen können.

Auch bei den 5-Jährigen konnte bei senkrechter Punktion bereits mit der kürzesten untersuchten Nadellänge (2,5 cm) in mindestens 93,6 % der Fälle ein Erreichen des Pleuraspaltes simuliert werden, bei sagittaler Punktion im 2. ICR erscheint jedoch die 3,2 cm Kanüle geeigneter.

Bei den 10-Jährigen ergab sich für die 4,5 cm lange Kanüle hingegen eine wesentlich höhere angenommene Erfolgsrate als mit einer 3,2 cm langen 20-G-Nadel. Im Hinblick auf die Rate an erfolgreichen, verletzungsfreien Punktionen war die längere Kanüle sowohl bei senkrechter als auch bei sagittaler Punktion an fast allen Punktionsorten überlegen.

Beim Vergleich verschiedener Nadellängen zeigte sich einerseits, dass unter Umständen jeweils zwei Kanülen mit leicht unterschiedlichen Längen, gemessen an der Rate an erfolgreichen verletzungsfreien Punktionen, ähnlich gut geeignet wären. Im Einzelfall muss allerdings auch immer die Konstitution des Kindes, beispielsweise das Vorliegen von Übergewicht, berücksichtigt werden. Zudem sollte bedacht werden, dass die Verwendung einer zu kurzen Nadel im Einzelfall eine Wiederholung der gesamten Prozedur und somit den Verlust wertvoller Zeit bedeuten kann. Vor allem bei den 0- und 5-Jährigen kam es jedoch mit den jeweils längsten getesteten Nadeln (3,2 cm bzw. 4,5 cm) zu einem erheblichen Anstieg der simulierten Verletzungsrate bei nur minimaler Verbesserung der Erfolgsrate. Eine Insertionstiefe von deutlich mehr als 2,5 cm bei Säuglingen und mehr als 3,2 cm bei 5-Jährigen sollte daher gut überlegt sein.

Die Untersuchungen haben somit gezeigt, dass eine bestimmte Nadellänge in einer Altersgruppe bei zu tiefer Insertion ein erhöhtes Verletzungsrisiko darstellen und gleichzeitig in einer anderen Altersgruppe in nicht wenigen Fällen zu kurz sein könnte. Ausgehend vom hier untersuchten Patientenkollektiv kann deshalb die Empfehlung von Mandt et al. für eine einheitliche Nadellänge von 3,8 cm für alle Altersgruppen nicht geteilt werden.⁶⁵

Während in einer Metaanalyse bei Erwachsenen eine Nadellänge von 6,44 cm als notwendig für eine Erfolgsrate von 95 % ermittelt wurde,⁸³ konnten ähnlich hohe

Erfolgsraten bei den hier untersuchten Kindern auch mit deutlich kürzeren Kanülen simuliert werden.

Sowohl die hohe angenommene Verletzungsrate als auch die geringe Misserfolgsrate sprechen daher bei Kindern bis zum Alter von 10 Jahren gegen die – bei Erwachsenen Patienten viel diskutierte – Verwendung einer Nadel mit mehr als 5,0 cm Länge.

4.5.2 Nadeldurchmesser

Die Bedeutung des Nadeldurchmessers wird insbesondere bei den 0-Jährigen relevant, da die Differenz zwischen ICR-Breite und Nadeldurchmesser in dieser Altersgruppe am geringsten ist. Insofern spricht dieser Umstand hier – bei isolierter Betrachtung der Sicherheit im Hinblick auf die Interkostalarterie – ebenfalls für die Verwendung einer 24-G-Kanüle.

Generell ist hier jedoch anzumerken, dass für eine erfolgreiche Entlastung eines Spannungspneumothorax auch eine ausreichende Flussrate notwendig ist. Eine Kanüle mit sehr kleinem Durchmesser könnte unter Umständen nicht ausreichen, um die Pleurahöhle von der nachströmenden Luft zu drainieren.

4.6 Sagittaler vs. orthogonaler Punktionswinkel im 2. ICR

Hinsichtlich des korrekten Punktionswinkels bei Auswahl des 2. ICR finden sich je nach Quelle unterschiedliche Empfehlungen, auch die einzelnen Studien variieren bezüglich der Durchführung der Messungen. Teils wurde senkrecht zur Thoraxwand bzw. Hautoberfläche gemessen,^{55, 59, 84} teils senkrecht zur Horizontalebene, also in Sagittalrichtung.^{82, 85, 86} In anderen Studien findet sich keine genaue Angabe über den Messwinkel.^{34, 47, 87}

Während der Messungen zeigte sich, dass bei einem zu sehr nach medial geneigten Punktionswinkel vor allem im 2. ICR häufig in Richtung des Perikards punktiert worden wäre, welches sehr nah an der Vorderseite der Brustwand gelegen ist bzw. ihr streckenweise sogar anliegt. Bedingt durch den eher ovalen Thoraxquerschnitt trat dies auch bei Punktion senkrecht zur Thoraxwand auf. Dies führte zur Überlegung, ob eine streng sagittale Punktion Vorteile im Hinblick auf die Sicherheit

haben könnte. Tatsächlich ergab der Vergleich zwischen dem orthogonalen und dem sagittalen Punktionswinkel einen weitgehend signifikanten Vorteil bezüglich der TVS und auch der Differenz zwischen TVS und TWD, also zweier für die Sicherheit relevanter Parameter.

Vor allem angesichts der geringen anzunehmenden Misserfolgsraten ist bei Kindern der signifikanten Erhöhung der TVS eine größere Bedeutung beizumessen als der vergleichsweise geringeren Zunahme der TWD.

Auch beim Vergleich verschiedener Nadellängen zeigte sich in der Mehrzahl der Fälle eine im Vergleich zur senkrechten Punktion wie auch zum 4. ICR höhere Differenz zwischen Erfolgs- und Verletzungsrate. Es sollte jedoch beachtet werden, dass bei sagittaler Punktion die jeweils beste Differenz unter Umständen mit einer leicht höheren Nadellänge erreicht werden kann (siehe Kap. 3.8.1.3).

Dieser Vorteil spiegelte sich auch in den theoretischen Verletzungsraten bei einer Insertionstiefe von 5,0 cm (Kap. 3.4.2) wider. Durch die Änderung des Punktionswinkels wäre in einer nicht unerheblichen Anzahl an Fällen die potentielle Verletzung einer vitalen Struktur vermieden worden, für das Risiko im Hinblick auf das Perikard und, bei den Säuglingen, den Thymus war der Vorteil vor allem auf der linken Thoraxseite besonders deutlich.

Außerdem wäre bei sagittaler im Vergleich zur orthogonalen Punktion gelegentlich zwar das Perikard verfehlt, dafür aber ein Pulmonalarterienast getroffen worden wäre. Letztere Situation kam aber vergleichsweise selten vor, sodass ein sagittaler Punktionswinkel im Falle einer Entscheidung für den 2. ICR insgesamt eine sinnvolle Option im 2. ICR darstellt.

Unter den Studien, in denen die Messungen im 2. ICR sagittal durchgeführt wurden, fand sich eine Publikation, in welcher auch der Abstand zu wichtigen Strukturen gemessen wurde. Zwar erfolgte dort kein Vergleich zu anderen Punktionswinkeln, als Punktionsstelle wurde zudem die „midhemithoracic line“ gewählt, die sich leicht von der MCL unterscheidet. Dennoch empfahlen Wax und Leibowitz in ihrer Schlussfolgerung die Punktion senkrecht zur Horizontalebene.⁸²

Von einigen Autoren wurde bereits die Empfehlung ausgesprochen, die Nadeldekompression nicht mehr als 2 cm medial der MCL⁷⁷ oder sogar lateral der Mamille durchzuführen,^{44, 66} zum einen für eine Risikoreduktion im Hinblick auf das Herz, aber auch um eine Verletzung der A. mammaria interna zu vermeiden. Die hier

dargestellten Ergebnisse, die im Prinzip den gleichen Ansatz verfolgen, bekräftigen diese Empfehlung.

Die Rate an direkt anliegenden Strukturen war zudem, sofern vorhanden, bei sagittaler Punktion größtenteils geringer als bei orthogonaler Punktion im selben Punktionsort (Kap. 3.5.1). Dennoch sollte auch bei sagittaler Punktion behutsam und wenn möglich ultraschallgestützt vorgegangen werden, da die Möglichkeit einer direkt anliegenden Struktur dadurch nicht ausgeschlossen werden kann.

4.7 Abhängigkeit der Ergebnisse vom Geschlecht

Insgesamt waren beim Vergleich zwischen männlichen und weiblichen Kindern weder für die ICR-Breite, noch für die TVS oder TWD einheitlich signifikante Unterschiede festzustellen.

Bezüglich der TWD könnte dies damit einen Unterschied zu den an Erwachsenen festgestellten Ergebnissen darstellen. Hier war in der Mehrzahl der Studien^{34, 47, 85, 86, 88} im 2. ICR bei Frauen eine signifikant größere TWD gemessen worden als bei Männern. Für den 4. ICR AAL sind bislang noch keine nach Geschlechtern getrennten Ergebnisse bekannt, im 5. ICR in der mittleren Axillarlinie wurden jedoch ebenfalls bei Frauen größere Mittelwerte erhoben.⁸⁸

Die Unterschiede könnten mit einem höheren Anteil⁸⁹ oder einer andere Verteilung des subkutanen Fettgewebes bei Frauen zusammenhängen. Bei der hier untersuchten Gruppe spielte dieser Einflussfaktor wahrscheinlich kaum eine Rolle, da solche Unterschiede bei präpubertären Kindern nicht zu erwarten sind.

Lediglich bei der ICR-Breite trat in einer einzelnen Position (4. ICR links, Altersgruppe 5 Jahre) ein schwach signifikanter Unterschied auf. Aufgrund der geringen absoluten Differenz der Mittelwerte von nur 0,11 cm und der Tatsache, dass weder auf der rechten Thoraxseite derselben Probandengruppe noch bei den anderen Altersgruppen signifikante Unterschiede festgestellt werden konnten, erscheinen weitere Schlussfolgerungen aus diesem Ergebnis jedoch nicht angebracht.

4.8 Limitationen

Da es sich um eine retrospektive Analyse handelt, konnten bestimmte patientenbezogene Parameter, wie beispielsweise der BMI, der zahlreichen Studien

zufolge^{84, 90, 91} positiv mit der TWD korreliert, nicht als weitere Einflussgröße herangezogen werden.

Zudem sei anzumerken, dass bei keinem der untersuchten Probanden tatsächlich ein Spannungspneumothorax vorgelegen hat.

Die Lungen der untersuchten Kinder waren daher vollständig entfaltet, wohingegen bei einem ausgeprägten Pneumothorax die Lunge in der Regel kollabiert und die Pulmonalarterienäste weiter von der Thoraxwand entfernt wären. Die simulierten Verletzungsraten könnten somit, zumindest zum Zeitpunkt der Punktion und unter der Voraussetzung einer korrekten Diagnosestellung, überschätzt worden sein. Bei einem fälschlicherweise vermuteten Spannungspneumothorax würde dieser „protektive“ Aspekt allerdings wegfallen. Zudem sollte man bedenken, dass es bei einer erfolgreichen Entlastung zu einer Reexpansion der Lunge und bei liegender Kanüle währenddessen zu weiteren Verletzungen kommen kann, falls die Nadel in situ belassen wird.

Auch die mögliche Mediastinalverlagerung zur kontralateralen Seite konnte bei der Ermittlung der TVS nicht berücksichtigt werden. Es ist nicht auszuschließen, dass sich hierdurch weitere Unterschiede zwischen dem anterioren und dem lateralen Zugangsweg ergeben, da die TVS durch diese Verschiebung an den verschiedenen Punktionsorten unterschiedlich stark zunehmen könnte.

Gleichzeitig wäre jedoch auch eine erhöhte TWD infolge subkutaner Lufteinschlüsse denkbar.

Wie im Abschnitt 4.2 bei der TWD erwähnt, lässt sich die Komprimierbarkeit des subkutanen Fettgewebes in einer CT-basierten Untersuchung nicht genau bestimmen. Diese hätte im gleichen Maße eine Verringerung der TWD wie auch der TVS zur Folge.

Die Bestimmung der TVS wurde für jede Position nur in jeweils einer axialen Schnittebene durchgeführt. Der Einfluss möglicher Abweichungen im Punktionswinkel in Vertikalrichtung wurde hier folglich nicht betrachtet. Zudem unterliegt der Verlauf der Strukturen, vor allem der Pulmonalarterienäste, interindividuellen Schwankungen. Die tatsächliche TVS beim einzelnen Patienten in der Akutsituation lässt sich ohne unterstützende Bildgebung nicht genau voraussagen.

Neben der Erfolgsrate und der Sicherheit im Hinblick auf vitale Strukturen spielen sicherlich auch weitere Faktoren, die mit der Nadeldekompression in Zusammenhang stehen, für das Outcome des Patienten eine Rolle. So sollte beispielsweise im Anschluss an die erfolgte Dekompression eine Dislokation der Kanüle vermieden werden. Ein solche Ursache für ein sekundäres Versagen der Nadeldekompression nach initial erfolgreicher Entlastung wurde beispielsweise in einem Fallbericht von Britten et al. vermutet.⁹² Auch aus diesem Grund empfiehlt die S3-Leitlinie Polytrauma / Schwerverletzten-Behandlung auch bei erfolgreicher Entlastung des Spannungspneumothorax eine ggf. sogar präklinische „definitive Versorgung“ mittels Thoraxdrainage.²² In einer Kadaverstudie zeigte sich, dass es während des Transports im 2. ICR signifikant häufiger zu Dislokationen kam als im 5. ICR.⁹³ Außerdem kann es sekundär, d.h. auch nach erfolgreicher Dekompression, zu einer Obstruktion der Kanüle kommen. Ob auch hierbei die Punktionsstelle eine Rolle spielt (z. B. durch die unterschiedliche Höhe beim liegenden Patienten), ist bislang noch nicht untersucht worden. Insgesamt ist dadurch anzunehmen, dass die tatsächliche Misserfolgsrate im Verlauf der präklinischen Versorgung durch die Vielzahl an Einflussfaktoren insgesamt womöglich unterschätzt worden ist.

4.9 Schlussfolgerung / Ausblick

Insgesamt hat sich während der Untersuchung gezeigt, dass sich die Maße der Kinder sowohl von den bei Erwachsenen erhobenen als auch untereinander deutlich unterscheiden.

Dank der Studie liegen nun Daten über die Thoraxwanddicke von drei verschiedenen Altersgruppen vor, die gemeinsam mit den simulierten Erfolgsraten Anhaltspunkte für eine sinnvolle Insertionstiefe geben können.

Die Empfehlungen für die Auswahl der Nadellänge bzw. Insertionstiefe sind als Orientierungswerte zu sehen, von denen je nach Habitus des Patienten und Dringlichkeit der Situation abgewichen werden kann.

Die Ergebnisse bezüglich des Erreichens des Pleuraspaltes bekräftigen den Stellenwert der Nadeldekompression als lebensrettende Ersttherapie des Spannungspneumothorax, gleichzeitig sollte das hohe Risiko, verschiedene wichtige Strukturen zu verletzen, dazu anhalten, sie auch in der lebensbedrohlichen Situation behutsam durchzuführen.

Die bei erwachsenen Patienten seit längerem geführte Diskussion um die Notwendigkeit einer größeren Nadellänge scheint bei Kindern bis zu einem Alter von 10 Jahren nur eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Dafür ist bei ihnen der Aspekt der Sicherheit der Nadeldekompression umso größer und sollte in weiteren Studien unbedingt berücksichtigt werden. Vor allem das Risiko für direkt an der Thoraxwand anliegende Strukturen hat sich als wesentlicher Unterschied zu den Erwachsenen herausgestellt. Da dies im Einzelfall nicht vorherzusehen ist, sollte vor allem im 2. ICR eine solche Lage von Herz oder Thymus, wenn möglich, vor der Punktion per Ultraschall ausgeschlossen werden.

Die Differenz zwischen TVS und TWD gibt Auskunft über die Sicherheitszone nach dem Erreichen des Pleuraspaltes und kann vergleichend betrachtet werden. Angesichts der Ergebnisse für die Wahl eines sagittalen Punktionswinkels könnten die Effekte einer Änderung des Punktionswinkels (in horizontale oder vertikale Richtungen) oder der genauen Punktionsstelle (z. B. weiter lateral im 2. ICR) untersucht werden. Zur weiteren Validierung der Ergebnisse bezüglich der TWD könnte in prospektiven Studien zusätzlich eine Korrelation mit Körpergröße und BMI der Kinder bestimmt oder beispielsweise der Einfluss der Armposition (anliegend vs. eleviert) auf die Thoraxwanddicke erfasst werden.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Der Spannungspneumothorax stellt bei Kindern eine lebensbedrohliche Situation dar und muss auch präklinisch umgehend entlastet werden. Fast alle bislang veröffentlichten Studien zu Effektivität und Sicherheit der Nadel-dekompression wurden an Erwachsenen durchgeführt.

In einer retrospektiven Analyse wurden anhand von Thorax-CT-Aufnahmen bei insgesamt 139 Kindern im Alter von 0, 5 und 10 Jahren die Breite des Interkostalraums (ICR), die Thoraxwanddicke und die Tiefe zu vitalen Strukturen an zwei verschiedenen Punktionsorten (2. ICR, Medioklavikularlinie und 4. ICR, anteriore Axillarlinie) bestimmt. Die Messung von Thoraxwanddicke und Tiefe zu vitalen Strukturen erfolgte jeweils orthogonal zur Thoraxwand und in Richtung der nächstgelegenen vitalen Struktur sowie im 2. ICR zusätzlich in sagittaler Richtung. Davon ausgehend wurden Erfolgs- und Verletzungsraten einer Nadeldekompression mit unterschiedlich langen Kanülen simuliert.

Die ICR-Breite erwies sich in allen Altersgruppen im 2. ICR als signifikant (jeweils $p < 0,01$) größer als im 4. ICR (0 Jahre: 0,56 cm vs. 0,44 cm; 5 Jahre: 1,39 cm vs. 0,78 cm; 10 Jahre: 1,62 cm vs. 1,12 cm).

Im 2. ICR resultierte ein streng sagittaler Punktionswinkel (im Vergleich zur Punktion senkrecht zur Thoraxwand) in allen Altersgruppen auf beiden Thoraxseiten in einer signifikant größeren Tiefe zu vitalen Strukturen, während die Thoraxwanddicke nur geringfügig zunahm.

Für die Thoraxwanddicke im 2. ICR (sagittal) bzw. 4. ICR (orthogonal) ergaben sich Mittelwerte von 1,54 cm vs. 1,39 cm (0 Jahre), 1,79 cm vs. 1,31 cm (5 Jahre) und 2,62 cm vs. 2,20 cm (10 Jahre). Ein Nichterreichen der Pleurahöhle bei Verwendung einer 5,0 cm langen Nadel konnte nur bei den 10-Jährigen (mit einer Wahrscheinlichkeit von 4,8 % bis 7,1 %) simuliert werden.

Die Tiefe zu vitalen Strukturen war im 2. ICR (sagittal) weitgehend signifikant größer als im 4. ICR (orthogonal). Im ungünstigsten Fall (bei Punktion zur nächstgelegenen vitalen Struktur) ergab sich jedoch ein einheitlicher Vorteil zugunsten des 4. ICR. Direkt der Thoraxwand anliegende Strukturen fanden sich zudem bei korrekter Punktionsrichtung ausschließlich im 2. ICR.

Im Seitenvergleich war die Tiefe zu vitalen Strukturen (bei gleicher Nadellänge und Punktionshöhe) auf der linken Thoraxseite stets geringer und das Verletzungsrisiko höher als auf der rechten. Die am häufigsten getroffenen Strukturen waren das Perikard und Äste der Pulmonalarterien.

Die Nadellänge mit der jeweils höchsten Rate an erfolgreichen, verletzungsfreien Punktionsen betrug bei den 0-Jährigen 2,5 cm, bei den 5-Jährigen 3,2 cm und bei den 10-Jährigen 4,5 cm. Bei Verwendung deutlich längerer Kanülen stieg die simulierte Verletzungsrate bei den 0- und 5-Jährigen deutlich stärker an als die Erfolgsrate.

Klinisch relevante Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Kindern wurden nicht festgestellt.

Die gewonnenen Ergebnisse unterscheiden sich erheblich von den in Studien an Erwachsenen erhobenen, insbesondere das potentielle Verletzungsrisiko bei den jüngeren Kindern ist erheblich höher. Für die Auswahl des Punktionsortes ist bei Kindern im Vergleich zu Erwachsenen daher die Sicherheit von noch größerer Bedeutung.

Der 2. ICR bietet im Hinblick auf das interkostale Gefäß-Nerven-Bündel Vorteile, die insbesondere bei den Säuglingen von Bedeutung sein könnten. Dafür ist an diesem Punktionsort die Thoraxwanddicke geringfügig größer als im 4. ICR. Da bei der versehentlichen Punktionsen einer direkt anliegenden Struktur sowohl schwerwiegende Verletzungen als auch ein Versagen der Dekompression drohen, kann der 2. ICR trotz der größeren mittleren TVS bei Säuglingen und Kleinkindern ohne vorherigen Ausschluss einer direkt anliegenden Struktur nicht als Punktionsort empfohlen werden.

Für kleinere Kinder genügt in der Regel eine vergleichsweise kurze Nadellänge, in einer lebensbedrohlichen Situation sollte jedoch kein Zeitverlust durch einen Nichterreichen des Pleuraspaltes riskiert werden. Aufgrund des hohen Verletzungsrisikos bei zu großer Insertionstiefe ist es dafür bei Kindern unabhängig vom Punktionsort besonders wichtig, die Kanüle nach dem Erreichen des Pleuraspaltes und dem Entweichen von Luft nicht wesentlich tiefer zu inserieren.

Der Einfluss weiterer biometrischer Faktoren oder Änderungen des Punktionsortes und -winkels sowie die Eignung von Ultraschall zur Detektion von direkt anliegenden Strukturen sollten Gegenstand zukünftiger Studien sein.

6 LITERATURVERZEICHNIS

1. Tovar, JA, Vazquez, JJ: Management of Chest Trauma in Children. *Paediatric Respiratory Reviews*, 14: 86-91, 2013.
2. Bliss, D, Silen, M: Pediatric thoracic trauma. *Critical care medicine*, 30: S409-415, 2002.
3. Kleber, C, Giesecke, MT, Lindner, T, Haas, NP, Buschmann, CT: Requirement for a structured algorithm in cardiac arrest following major trauma: Epidemiology, management errors, and preventability of traumatic deaths in Berlin. *Resuscitation*, 85: 405-410, 2014.
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. *The Journal of surgical research*, 184: 450-457, 2013.
5. Bushby, N, Fitzgerald, M, Cameron, P, Marasco, S, Bystrzycki, A, Rosenfeld, JV, Bailey, M: Prehospital intubation and chest decompression is associated with unexpected survival in major thoracic blunt trauma. *Emergency medicine Australasia : EMA*, 17: 443-449, 2005.
6. Warner, KJ, Copass, MK, Bulger, EM: Paramedic Use of Needle Thoracostomy in the Prehospital Environment. *Prehospital Emergency Care*, 12: 162-168, 2008.
7. Mines, D, Abbuhl, S: Needle thoracostomy fails to detect a fatal tension pneumothorax. *Annals of emergency medicine*, 22: 863-866, 1993.
8. Schnell, J, Koryllos, A, Lopez-Pastorini, A, Lefering, R, Stoelben, E: Spontaneous Pneumothorax: Epidemiology and Treatment in Germany Between 2011 and 2015. *Dtsch Arztebl International*, 114: 739-744, 2017.
9. Dotson, K, Johnson, LH: Pediatric spontaneous pneumothorax. *Pediatric emergency care*, 28: 715-720; quiz 721-713, 2012.
10. Hoffmann, GF, Lentze, MJ, Spranger, J, Zepp, F, Schaub, J, Schulte, FJ: *Pädiatrie: Grundlagen und Praxis*, Springer Berlin Heidelberg, 2014.
11. 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.
12. Michels, G: Pneumologie. In: *Repetitorium Internistische Intensivmedizin*. edited by MICHELS, G., KOCHANEK, M., Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2017, pp 371-425.
13. Baumann, MH, Noppen, M: Pneumothorax. *Respirology (Carlton, Vic)*, 9: 157-164, 2004.
14. Waydhas, C, Sauerland, S: Pre-hospital pleural decompression and chest tube placement after blunt trauma: A systematic review. *Resuscitation*, 72: 11-25, 2007.
15. Nakayama, DK, Ramenofsky, ML, Rowe, MI: Chest injuries in childhood. *Annals of surgery*, 210: 770-775, 1989.
16. Avarello, JT, Cantor, RM: Pediatric major trauma: an approach to evaluation and management. *Emergency medicine clinics of North America*, 25: 803-836, x, 2007.
17. Pecllet, MH, Newman, KD, Eichelberger, MR, Gotschall, CS, Garcia, VF, Bowman, LM: Thoracic trauma in children: An indicator of increased mortality. *Journal of Pediatric Surgery*, 25: 961-966, 1990.

18. Fleisher, GR, Ludwig, S: *Textbook of pediatric emergency medicine*, Philadelphia, Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, 2010.
19. Rieger, C, von der Hardt, H, Sennhauser, FH, Wahn, U, Zach, MS: *Pädiatrische Pneumologie*, Springer Berlin Heidelberg, 2013.
20. Metzelder, ML: Thoraxtrauma. In: *Pädiatrie: Grundlagen und Praxis*. edited by HOFFMANN, G. F., LENTZE, M. J., SPRANGER, J., ZEPP, F., Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp 1310-1311.
21. Moore, FO, Goslar, PW, Coimbra, R, Velmahos, G, Brown, CV, Coopwood, TB, Jr., Lottenberg, L, Phelan, HA, Bruns, BR, Sherck, JP, Norwood, SH, Barnes, SL, Matthews, MR, Hoff, WS, de Moya, MA, Bansal, V, Hu, CK, Karmy-Jones, RC, Vincas, F, Pembaur, K, Notrica, DM, Haan, JM: Blunt traumatic occult pneumothorax: is observation safe?--results of a prospective, AAST multicenter study. *The Journal of trauma*, 70: 1019-1023; discussion 1023-1015, 2011.
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: 20.06.2019.
23. Advanced Life Support Group: *Advanced Paediatric Life Support: A Practical Approach to Emergencies*, Chichester, West Sussex, UK Wiley Blackwell, 2016.
24. Sartorelli, KH, Vane, DW: The diagnosis and management of children with blunt injury of the chest. *Seminars in pediatric surgery*, 13: 98-105, 2004.
25. Berger, S, Stroedter, L: Kinderchirurgische Aspekte der Pädiatrischen Pneumologie. In: *Pädiatrische Pneumologie*. edited by VON MUTIUS, E., GAPPA, M., EBER, E., FREY, U., Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp 831-851.
26. Drinhaus, H, Annecke, T, Hinkelbein, J: Die Thoraxdekompression in der Notfall- und Intensivmedizin. *Der Anaesthetist*, 65: 768-775, 2016.
27. Chen, SC, Markmann, JF, Kauder, DR, Schwab, CW: Hemopneumothorax missed by auscultation in penetrating chest injury. *The Journal of trauma*, 42: 86-89, 1997.
28. Blaivas, M: Inadequate needle thoracostomy rate in the prehospital setting for presumed pneumothorax: an ultrasound study. *Journal of ultrasound in medicine : official journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine*, 29: 1285-1289, 2010.
29. Volpicelli, G, Elbarbary, M, Blaivas, M, Lichtenstein, DA, Mathis, G, Kirkpatrick, AW, Melniker, L, Gargani, L, Noble, VE, Via, G, Dean, A, Tsung, JW, Soldati, G, Copetti, R, Bouhemad, B, Reissig, A, Agricola, E, Rouby, JJ, Arbelot, C, Liteplo, A, Sargsyan, A, Silva, F, Hoppmann, R, Breikreutz, R, Seibel, A, Neri, L, Storti, E, Petrovic, T: International evidence-based recommendations for point-of-care lung ultrasound. *Intensive care medicine*, 38: 577-591, 2012.
30. 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.
31. 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 (London, England)*, 17: R208, 2013.

32. American College of Surgeons. Committee on Trauma: *Advanced trauma life support : student course manual*, Chicago, IL, American College of Surgeons, 2018.
33. Ball, CG, Wyrzykowski, AD, Kirkpatrick, AW, Dente, CJ, Nicholas, JM, Salomone, JP, Rozycki, GS, Kortbeek, JB, Feliciano, DV: Thoracic needle decompression for tension pneumothorax: clinical correlation with catheter length. *Canadian Journal of Surgery*, 53: 184-188, 2010.
34. 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.
35. Baumann, MH, Sahn, SA: Tension pneumothorax: Diagnostic and therapeutic pitfalls. *Critical care medicine*, 21: 177-178, 1993.
36. Barton, ED: Tension pneumothorax. *Current opinion in pulmonary medicine*, 5: 269-274, 1999.
37. 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.
38. 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 : EMJ*, 20: 383-384, 2003.
39. 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 : official journal of the National Association of EMS Physicians and the National Association of State EMS Directors*, 9: 191-197, 2005.
40. Wei, Y-H, Lee, C-H, Cheng, H-N, Tsao, L-T, Hsiao, C-C: Pigtail Catheters Versus Traditional Chest Tubes for Pneumothoraces in Premature Infants Treated in a Neonatal Intensive Care Unit. *Pediatrics & Neonatology*, 55: 376-380, 2014.
41. Florin, T, Ludwig, S, Netter, FH, Aronson, PL, Werner, HC: *Netter's Pediatrics*, Elsevier Saunders, 2011.
42. Massarutti, D, Trillo, G, Berlot, G, Tomasini, A, Bacer, B, D'Orlando, L, Viviani, M, Rinaldi, A, Babuin, A, Burato, L, Carchietti, E: Simple thoracostomy in prehospital trauma management is safe and effective: a 2-year experience by helicopter emergency medical crews. *European journal of emergency medicine : official journal of the European Society for Emergency Medicine*, 13: 276-280, 2006.
43. Deakin, CD, Davies, G, Wilson, A: Simple thoracostomy avoids chest drain insertion in prehospital trauma. *The Journal of trauma*, 39: 373-374, 1995.
44. 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.
45. 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.
46. 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.
47. Givens, ML, Ayotte, K, Manifold, C: Needle thoracostomy: implications of computed tomography chest wall thickness. *Academic emergency medicine :*

- official journal of the Society for Academic Emergency Medicine*, 11: 211-213, 2004.
48. Wernick, B, Hon, HH, Mubang, RN, Cipriano, A, Hughes, R, Rankin, DD, Evans, DC, Burfeind, WR, Jr., 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.
 49. Cullinane, DC, Morris, JA, Bass, JG, Rutherford, EJ: Needle thoracostomy may not be indicated in the trauma patient. *Injury*, 32: 749-752, 2001.
 50. Riwoe, D, Poncia, HD: Subclavian artery laceration: A serious complication of needle decompression. *Emergency medicine Australasia : EMA*, 23: 651-653, 2011.
 51. Yacovone, ML, Kartan, R, Bautista, M: Intercostal artery laceration following thoracentesis. *Respiratory care*, 55: 1495-1498, 2010.
 52. King, C, Henretig, FM: *Textbook of Pediatric Emergency Procedures*, Lippincott Williams & Wilkins, 2008.
 53. Hansmann, G: *Neugeborenen-Notfälle: Erstversorgung und Intensivmedizin*, Schattauer GmbH, 2015.
 54. Gardner, SL, Carter, BS, Hines, ME, Hernandez, JA: *Merenstein & Gardner's handbook of neonatal intensive care*, Elsevier Health Sciences, 2015.
 55. Aho, JM, Thiels, CA, El Khatib, MM, Ubl, DS, Laan, DV, Berns, KS, Habermann, EB, Zietlow, SP, Zielinski, MD: Needle thoracostomy: Clinical effectiveness is improved using a longer angiocatheter. *The journal of trauma and acute care surgery*, 80: 272-277, 2016.
 56. Jones, R, Hollingsworth, J: Tension pneumothoraces not responding to needle thoracocentesis. *Emergency medicine journal : EMJ*, 19: 176-177, 2002.
 57. Jenkins, C, Sudheer, PS: Needle thoracocentesis fails to diagnose a large pneumothorax. *Anaesthesia*, 55: 925-926, 2000.
 58. 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.
 59. 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.
 60. *Präklinisches Traumamanagement: Prehospital Trauma Life Support (PHTLS), Deutsche Bearbeitung durch PHTLS Deutschland und Schweiz*, Urban & Fischer/Elsevier, 2016.
 61. Heinrich, M, Neuhaus, K: *Kinderchirurgie: Basiswissen und Praxis*, W. Zuckschwerdt Verlag, 2012.
 62. Kim, SK, Kim, WH: Tension pneumothorax in a newborn after Cesarean-section delivery -A case report. *Korean Journal of Anesthesiology*, 59: 420-424, 2010.
 63. Hassan, M, Begum, M, Haque, S, Jahan, N, Mannan, A, Rob, A: Pneumothorax in Neonate. *Northern International Medical College Journal*, 5: 357-359.
 64. Schwerk, N: Pleuraerguss, Pneumothorax, Chylothorax und Hämatothorax. In: *Pädiatrische Pneumologie*. edited by VON MUTIUS, E., GAPPA, M., EBER, E., FREY, U., Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp 733-742.
 65. Mandt, MJ, Hayes, K, Severyn, F, Adelgais, K: Appropriate Needle Length for Emergent Pediatric Needle Thoracostomy Utilizing Computed Tomography.

- Prehospital emergency care : official journal of the National Association of EMS Physicians and the National Association of State EMS Directors*: 1-9, 2019.
66. Neitzel, C, Ladehof, K: *Taktische Medizin: Notfallmedizin und Einsatzmedizin*, Springer Berlin Heidelberg, 2015.
 67. Kearns, GL, Abdel-Rahman, SM, Alander, SW, Blowey, DL, Leeder, JS, Kauffman, RE: Developmental pharmacology--drug disposition, action, and therapy in infants and children. *The New England journal of medicine*, 349: 1157-1167, 2003.
 68. Lamblin, A, Turc, J, Bylicki, O, Loheas, D, Martinez, JY, Derkenne, C, Wey, PF, Precloux, P: Measure of chest wall thickness in French soldiers: which technique to use for needle decompression of tension pneumothorax at the front? *Military medicine*, 179: 783-786, 2014.
 69. Harcke, HT, Pearse, LA, Levy, AD, Getz, JM, Robinson, SR: Chest Wall Thickness in Military Personnel: Implications for Needle Thoracentesis in Tension Pneumothorax. *Military medicine*, 172: 1260-1263, 2007.
 70. 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 : official journal of the Society for Academic Emergency Medicine*, 18: 1022-1026, 2011.
 71. Nishino, M, Ashiku, SK, Kocher, ON, Thurer, RL, Boiselle, PM, Hatabu, H: The thymus: a comprehensive review. *Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, Inc*, 26: 335-348, 2006.
 72. Siegel, MJ, Glazer, HS, Wiener, JI, Molina, PL: Normal and abnormal thymus in childhood: MR imaging. *Radiology*, 172: 367-371, 1989.
 73. Frush, DP: Imaging Evaluation of the Thymus and Thymic Disorders in Children. In: *Pediatric Chest Imaging: Chest Imaging in Infants and Children*. edited by LUCAYA, J., STRIFE, J. L., Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp 215-240.
 74. 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.
 75. Bees, NR, Richards, SW, Fearn, C, Drake, DP, Dicks-Mireaux, C: Neonatal thymic haemorrhage. *The British Journal of Radiology*, 70: 210-212, 1997.
 76. Labitzke, R, Schramm, G: Thymusruptur nach Thoraxtrauma. *Eur J Pediatr Surg*, 33: 147-149, 1981.
 77. Tien, HC, Jung, V, Rizoli, SB, Acharya, SV, MacDonald, JC: An evaluation of tactical combat casualty care interventions in a combat environment. *Journal of the American College of Surgeons*, 207: 174-178, 2008.
 78. Ferrie, EP, Collum, N, McGovern, S: The right place in the right space? Awareness of site for needle thoracocentesis. *Emergency medicine journal : EMJ*, 22: 788-789, 2005.
 79. Reddy, V, Sharma, S, Cobanoglu, A: What dictates the position of the diaphragm--the heart or the liver? A review of sixty-five cases. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 108: 687-691, 1994.
 80. Lomoschitz, FM, Eisenhuber, E, Linnau, KF, Peloschek, P, Schoder, M, Bankier, AA: Imaging of chest trauma: radiological patterns of injury and diagnostic algorithms. *European journal of radiology*, 48: 61-70, 2003.
 81. Leong, T, Bourke, W: The many faces of tension pneumothoraces. *The Lancet*, 374: 404, 2009.

82. Wax, DB, Leibowitz, AB: Radiologic assessment of potential sites for needle decompression of a tension pneumothorax. *Anesthesia and analgesia*, 105: 1385-1388, table of contents, 2007.
83. Clemency, BM, Tanski, CT, Rosenberg, M, May, PR, Consiglio, JD, Lindstrom, HA: Sufficient catheter length for pneumothorax needle decompression: a meta-analysis. *Prehospital and disaster medicine*, 30: 249-253, 2015.
84. 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 (Chicago, Ill : 1960)*, 147: 813-818, 2012.
85. Hecker, M, Hegenscheid, K, Volzke, H, Hinz, P, Lange, J, Ekkernkamp, A, Frank, M: Needle decompression of tension pneumothorax: Population-based epidemiologic approach to adequate needle length in healthy volunteers in Northeast Germany. *The journal of trauma and acute care surgery*, 80: 119-124, 2016.
86. Yamagiwa, T, Morita, S, Yamamoto, R, Seki, T, Sugimoto, K, Inokuchi, S: Determination of the appropriate catheter length for needle thoracostomy by using computed tomography scans of trauma patients in Japan. *Injury*, 43: 42-45, 2012.
87. Carter, TE, Mortensen, CD, Kaistha, S, Conrad, C, Dogbey, G: Needle decompression in appalachia do obese patients need longer needles? *The western journal of emergency medicine*, 14: 650-652, 2013.
88. 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.
89. Harcke, HT, Pearse, LA, Levy, AD, Getz, JM, Robinson, SR: Chest wall thickness in military personnel: implications for needle thoracentesis in tension pneumothorax. *Military medicine*, 172: 1260-1263, 2007.
90. Powers, WF, Clancy, TV, Adams, A, West, TC, Kotwall, CA, Hope, WW: Proper catheter selection for needle thoracostomy: a height and weight-based criteria. *Injury*, 45: 107-111, 2014.
91. Schroeder, E, Valdez, C, Krauthamer, A, Khati, N, Rasmus, J, Amdur, R, Brindle, K, Sarani, B: Average chest wall thickness at two anatomic locations in trauma patients. *Injury*, 44: 1183-1185, 2013.
92. Britten, S, Palmer, SH: Chest wall thickness may limit adequate drainage of tension pneumothorax by needle thoracocentesis. *Journal of accident & emergency medicine*, 13: 426-427, 1996.
93. Leatherman, ML, Held, JM, Fluke, LM, McEvoy, CS, Inaba, K, Grabo, D, Martin, MJ, Earley, AS, Ricca, RL, Polk, TM: Relative device stability of anterior versus axillary needle decompression for tension pneumothorax during casualty movement: Preliminary analysis of a human cadaver model. *The journal of trauma and acute care surgery*, 83: S136-s141, 2017.

Eigene Publikationen:

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. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med*, 27: 90, 2019.

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. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med*, 27: 45, 2019.

7 LEBENS LAUF

PERSONALIEN

Name und Vorname: Leonhard, Georg
Geburtsdatum: 29.08.1996
Geburtsort: Bad Friedrichshall
Familienstand: ledig
Vater: Sergej Leonhard
Mutter: Larissa Leonhard

SCHULISCHER WERDEGANG

2002 – 2006 Gerhart-Hauptmann-Schule Heilbronn
2006 – 2014 Robert-Mayer-Gymnasium Heilbronn
03.06.2014 Abitur

UNIVERSITÄRER WERDEGANG

WS2014/15 Beginn des Studiums der Humanmedizin
an der Medizinischen Fakultät Mannheim
der Universität Heidelberg
2014 – 2016 Grundstudium
15.09.2016 1. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
2016 – 2020 Hauptstudium
seit 2020 Praktisches Jahr

8 DANKSAGUNG

Ich möchte mich herzlich bei all jenen bedanken, die durch ihr Engagement, ihre Erreichbarkeit und ihre Kompetenz die Arbeit an der Dissertation zu einem bereichernden und motivierenden Teil meines Studiums gemacht haben.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. med. Tim Viergutz, danke ich für die Überlassung des Themas dieser Arbeit und die Ermöglichung und intensive Begleitung ihrer Durchführung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. med. Tom Terboven für die großartige Betreuung und die wertvollen Anregungen, die diese Arbeit maßgeblich weitergebracht haben.

Ebenso danke ich Herrn Dr. med. Holger Haubenreisser für die Mitbetreuung und die Unterstützung mit seiner Erfahrung in der kardiothorakalen Bildgebung.

Auch meiner Familie, allen voran meiner Mutter, danke ich für den liebevollen Rückhalt während meines Studiums und auf dem Weg dorthin.