

**Die Genauigkeit der transthorakalen Echokardiographie bei der
Beurteilung der Position der zentralvenösen Katheterspitze unter
Verwendung der transösophagealen Echokardiographie als
Referenzmethode bei Kindern in der Herzchirurgie**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Medizin (Dr. med.)

an der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.

vorgelegt von

Michael Fritz
aus
Neubrandenburg

Betreuer der Dissertation: Prof. Dr. Bernd Christopher Saugel

Gutachtende:

Gutachter: Prof. Dr. Bernd Christopher Saugel

Gutachter: PD Dr. Daniel Biermann

Mitglieder der Prüfungskommission:

Vorsitz der Prüfungskommission: PD Dr. Daniel Biermann

Mitglied der Prüfungskommission: Prof. Dr. Christoph Sinning

Mitglied der Prüfungskommission: Prof. Dr. Christian Büchel

Datum der mündlichen Prüfung: 07.09.2026

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
I Abbildungsverzeichnis	5
II Tabellenverzeichnis.....	6
1. Einleitung	7
1.1 Indikationen für die Anlage zentralvenöser Katheter	7
1.2 Risiken, Komplikationen und Fehllagen	8
1.2.1 Punktionsbedingte Komplikationen	8
1.2.2 Infektionen	9
1.2.3 Thrombosen.....	10
1.2.4 Fehllagen	11
1.3 Gesundheitsökonomie	12
1.4 Ultraschallgestützte Punktion.....	13
1.5 Lagekontrolle	14
1.5.1 Thorax-Röntgen.....	14
1.5.2 Elektrokardiographie	16
1.5.3 Transösophageale Echokardiographie.....	17
1.5.4 Transthorakale Echokardiographie	18
1.5.5 TTE-Protokolle	20
1.6 Arbeitshypothese und Fragestellungen.....	21
1.6.1 Ziel.....	21
1.6.2 Hypothese	21
2. Material und Methoden.....	22
2.1 Setting und Design der Studie	22
2.2 Patientinnen und Patienten.....	22
2.2.1 Einschlusskriterien	22
2.2.2 Ausschlusskriterien	23
2.2.3 Studieneinschluss	23
2.3 Studienablauf.....	23
2.3.1 Anästhesiologisches Management.....	24
2.3.2 US-gestützte ZVK-Anlage	26
2.3.3 Untersuchungsablauf der TTE und TEE.....	28
2.3.4 Auswertung der Thorax-Röntgenbilder.....	34
2.4 Endpunkte	35
2.4.1 Primärer Endpunkt.....	35
2.4.2 Sekundäre Endpunkte	35
2.4.3 Explorative Endpunkte	35

2.4.4 Subgruppenanalyse	35
2.5 Statistische Analyse.....	36
2.5.1 Basischarakteristika der Patientinnen und Patienten.....	36
2.5.2 Analyse des primären Endpunkts.....	36
2.5.3 Analyse der sekundären Endpunkte	36
2.5.4 Analyse der explorativen Endpunkte.....	36
2.5.5 Subgruppenanalyse	37
2.5.6 Fallzahlberechnung.....	37
3. Ergebnisse	38
3.1 Datenerhebung und Ausschluss	38
3.2 Analysekohorte.....	39
3.3 Primärer Endpunkt.....	39
3.4 Sekundäre Endpunkte	40
3.4.1 Transthorakale Echokardiographie	40
3.4.2 Transösophageale Echokardiographie.....	40
3.5 Subgruppenanalyse.....	41
3.6 Explorative Endpunkte – Auswertung der Thorax-Röntgenbilder	42
4. Diskussion	45
4.1 Ergebnisinterpretation.....	45
4.1.1 Primärer Endpunkt.....	45
4.1.2 Sekundäre Endpunkte	45
4.1.3 Explorative Endpunkte – Thorax-Röntgen.....	46
4.2 Altersabhängigkeit, Subgruppenanalyse.....	48
4.2.1 Altersabhängige Darstellbarkeit in der TTE.....	48
4.2.2 Nutzung weiterer Schallfenster	49
4.3. Referenzmethoden	50
4.3.1 Thorax-Röntgen.....	50
4.3.2 Transösophageale Echokardiographie.....	51
4.4 Limitationen und Ausblick	52
4.5 Fazit	53
5. Zusammenfassung	54
6. Abkürzungsverzeichnis	58
7. Literaturverzeichnis.....	59
8. Erklärung des Eigenanteils.....	66
9. Eidesstattliche Versicherung	67
10. Danksagungen.....	68

I Abbildungsverzeichnis

Abb 1: TEE bikavale Einstellung; ZVK-Spitze in der SVC	18
Abb 2: US-gestützte Punktion der SVC rechts, out-of-plane-Technik.....	27
Abb 3: US-gestützte Punktion der SVC rechts, in-plane-Technik.....	27
Abb 4: schematische Darstellung (1) US-gesteuerte Punktion (2) TTE-Lagekontrolle von Führungsdraht und ZVK.....	29
Abb 5: TTE subxiphoidale Einstellung; Darstellung RA, SVC, RA-SVC-Übergang.....	31
Abb 6: TTE subxiphoidale Einstellung; Darstellung Seldinger-Draht über die SVC im RA ...	31
Abb 7: TEE bikavale Einstellung; Seldinger-Draht in SVC und RA.....	32
Abb 8: TTE subxiphoidale Einstellung von 4 verschiedenen Kindern; Darstellung der ZVK- Spitze in der SVC	32
Abb 9: TTE subxiphoidale Einstellung; sequenzielle Darstellung, „flush sign“ im RA nach Applikation eines NaCl-Bolus.....	33
Abb 10: TTE subxiphoidale Einstellung; Darstellung der ZVK-Spitze in der SVC und „flush sign“ im RA nach Applikation eines NaCl-Bolus	33
Abb 11: Flussdiagramm zur Datenerhebung: Rekrutierung, Ausschluss, Analysekohorte ...	38
Abb 12: Subgruppenanalyse: korrekte Position, direkte und indirekte Identifizierung der ZVK- Spitze im TTE	42
Abb 13: korrekt platzierte ZVK-Spitze, Vergleich der Referenzmethoden TEE und CXR	44

II Tabellenverzeichnis

Tab 1: Dosierungen der verwendeten Medikamente zur Narkoseinduktion	25
Tab 2: Patientencharakteristika	39
Tab 3: Subgruppenanalyse der TTE-gesteuerten ZVK-Anlage.....	41
Tab 4: Auswertung der Thorax-Röntgenbilder.....	43

1. Einleitung

1.1 Indikationen für die Anlage zentralvenöser Katheter

Der zentralvenöse Katheter (ZVK) ist ein seit Jahrzehnten etabliertes Standardinstrument zur klinischen Versorgung pädiatrischer Patientinnen und Patienten. Sein Synonym – Cavakatheter – beschreibt dessen Positionierung in der oberen oder unteren Hohlvene.

Indikationen für die Anlage eines ZVK bei Säuglingen und Kindern sind vielfältig. Aufgrund der anatomischen Gegebenheiten stellt die venöse Punktion bei Säuglingen und Kindern oft eine Herausforderung dar. Wiederholte Venenpunktionen sind für Kinder mit erheblichem Stress und einer erhöhten Schmerzperzeption verbunden (Bisogni et al., 2014). Durch Anlage eines ZVK können wiederholte periphere Punktionen und die damit verbundene Stressreaktion vermindert werden. Bei schwierigen Venenverhältnissen ermöglicht ein ZVK den primären Zugang zum Gefäßsystem und längerfristige Infusionstherapien.

Bei herzchirurgischen Eingriffen und in der intensivmedizinischen Therapie spielt insbesondere die herznahe Gabe kreislaufwirksamer Medikamente, wie Katecholamine, sowie die sichere Applikation kontinuierlich verabreichter Medikamente eine Rolle. Großlumige Katheter wiederum erlauben die rasche Infusion und Transfusion bei hypovolämer Kreislagsituation. Diagnostisch dient ein ZVK dem intra- und perioperativen hämodynamischen Monitoring, der Messung des zentralvenösen Drucks und der unkomplizierten Abnahme von Blutproben, etwa zur Durchführung einer zentralvenösen Blutgasanalyse (vgl. Annecke, 2022, Striebel, 2019, Miller et al., 2013).

Die Leitlinien der italienischen Gesellschaft für Pädiatrische Hämatologie und Onkologie führen weitere spezielle Indikationen für die Anlage eines ZVK bei Kindern auf (Giordano et al., 2015). Neben Hämodialyse und Apherese ermöglicht die Platzierung in einem starkwandigen Gefäß die Gabe venenreizender Medikamente, wie z.B. Zytostatika, Natriumhydrogenkarbonat, Kalium oder Osmodiuretika, ebenso die parenterale Ernährung mit hyperosmolaren Lösungen auf der Intensivstation.

1.2 Risiken, Komplikationen und Fehllagen

Die Anlage eines zentralvenösen Katheters bei Kindern zählt zu den Routineeingriffen im anästhesiologischen und intensivmedizinischen Alltag. Die Indikation zur ZVK-Anlage sollte aufgrund einer Vielzahl von Risiken und Komplikationen jedoch eng gestellt werden.

Die Komplikationen lassen sich in punktionsbedingte und später während der Nutzung eines ZVK auftretende Komplikationen unterteilen.

1.2.1 Punktionsbedingte Komplikationen

Die häufigsten punktionsbedingten Komplikationen bilden Herzrhythmusstörungen, versehentliche arterielle Punktionen und Kanülierungen, Hämatome sowie Pneumo- oder Hämatothoraces (Rey et al., 2009). Das Verschieben des Führungsdrahtes nach der Methode von Seldinger (1953) und die Platzierung der Katheterspitze im rechten Vorhof (RA) können Rhythmusstörungen hervorrufen, die kardiovaskulär beeinträchtigte Patientinnen und Patienten im Rahmen kinderherzchirurgischer Eingriffe erheblich gefährden können. Seltener, vital bedrohliche Komplikationen sind die Perforation der Vena cava superior (SVC), des rechten und linken Vorhofs, die Ausbildung eines tamponierenden Perikardergusses, mediastinale Hämatome oder eine Aortenperforation (Hodzic et al., 2014). Weil et al. (2010) beschrieben das Auftreten einer hämodynamisch wirksamen Perikardtampnade in 6 von 463 Fällen (1,3%) infolge einer ZVK-Anlage bei Kindern.

Im pädiatrischen Bereich wird die Rate an punktionsbedingten Komplikationen mit 7 bis 18% angegeben (Gibson und Bodenham, 2013, Alexandrou et al., 2014). In einer Untersuchung von 825 ZVK-Anlagen bei Kindern mit einem medianen Alter von 22 Monaten kam es in 151 Fällen (17,5%) zu anlagebedingten Komplikationen. Darunter fanden sich arterielle Punktionen (7,2%), Katheterfehllagen (4,7%), Arrhythmien (2,3%) und Hämatome (1,4%). Risikofaktoren für das Auftreten mechanischer Komplikationen waren die Anlage durch weniger erfahrene Assistenzärztinnen und -ärzte, mehrfache Punktionsversuche sowie die Auswahl des Punktionsortes. Dabei traten bei Punktionen der Vena jugularis interna (VJI) und der Vena subclavia (SCV) signifikant häufiger Komplikationen auf als bei der Vena femoralis (FV) (Rey et al., 2009).

In einer großen prospektiven Studie über 15 Jahre beschrieben Moore et al. (2022) die Komplikationsraten bei 8.747 ZVK-Anlagen bei pädiatrischen Patientinnen und Patienten, vornehmlich im neonatalen Bereich. Die Gesamtrate an mechanischen Komplikationen lag bei 6,1 pro 1.000 Kathetertagen über alle eingeschlossenen Katheterarten hinweg (nichtgetunnelte ZVK, getunnelte ZVK wie Broviak- und Hickman-Katheter). Deutlich niedriger lag die Komplikationsrate in der Subgruppe mit Katheterpositionierungen in der SVC oder im RA mit 4,6 pro 1.000 Kathetertagen.

Eine weitere seltene, aber klinisch relevante Komplikation stellt die Entwicklung eines Horner-Syndroms dar, das durch mechanische Schädigung – direkt durch die Punktionsnadel oder durch Kompression eines zervikalen Hämatoms – entlang des anatomischen Verlaufs des sympathischen Plexus in der karotidealen Gefäß-Nerven-Scheide oder am Ganglion cervicale superius hervorgerufen werden kann. Inzidenzen werden mit bis zu 2% angegeben (Butty et al., 2016, Garcia et al., 1994).

1.2.2 Infektionen

Den Großteil der Komplikationen bei liegenden Kathetern machen fremdkörperassoziierte Infektionen aus. Dazu gehören Infektionen an der Austrittsstelle des ZVK an der Haut, an der ZVK-Spitze sowie katheterassoziierte Blutstrominfektionen (*CRBSI, catheter-related bloodstream infections*). Die Inzidenz ist sowohl abhängig vom Anlageort als auch von der Verweildauer und liegt zwischen 4 und 26% (Ruesch et al., 2002, McGee und Gould, 2003). In Deutschland liegt die ZVK-assoziierte Sepsisrate seit Jahren unverändert bei 1,1 pro 1.000 Kathetertagen (Behnke et al., 2017, Aghdassi et al., 2024). Jährlich kommt es zu über 8.000 ZVK-assoziierten Sepsisfällen in Deutschland (Geffers und Gastmeier, 2009).

Hinsichtlich der Infektionsraten – abhängig vom Anlageort des ZVK – ist die Datenlage uneinheitlich. Mehrere groß angelegte Beobachtungsstudien zeigten ein erhöhtes Infektionsrisiko bei der ZVK-Anlage in der FV (Lorente et al., 2005, Nagashima et al., 2006). Günstig erscheint die SCV als Anlageort bei Intensivpatienten (Parienti et al., 2015). In anderen randomisiert kontrollierten Studien konnte hingegen kein Unterschied in den Infektionsraten abhängig vom Anlageort gezeigt werden (Timsit et al., 2013, Zingg et al., 2014).

Auch im pädiatrischen Bereich stellt der femorale Zugangsweg keinen unabhängigen Risikofaktor für erhöhte Infektionsraten dar (de Jonge et al., 2005, Reyes et al., 2012).

Die Lage im Windelbereich erfordert jedoch strikte Hygienemaßnahmen zur Vermeidung von Keimmigration. Die Rate an CRBSI liegt im pädiatrischen Bereich höher als bei Erwachsenen. In einer Untersuchung auf 29 pädiatrischen Intensivstationen fanden Niedner et al. eine Inzidenzrate von 3,1 pro 1.000 Kathetertagen (Niedner et al., 2011). Noch höher ist die Rate speziell bei kinder-kardiochirurgischen Intensivpatienten mit Raten zwischen 7,8 (Costello et al., 2008) und 11,7 (Bezzio et al., 2009) pro 1.000 Kathetertagen. Die ZVK-assoziierte Sepsisrate liegt auf pädiatrischen Intensivstationen in Deutschland im Mittel bei 1,9 pro 1.000 Kathetertagen (Behnke et al., 2017). Verlängerte Behandlungen auf pädiatrischen Intensivstationen (um 6,5–14 Tage) und der gesamten Krankenhausverweildauer (um 9–21 Tage) (Nowak et al., 2010, Slonim et al., 2001) tragen bei katheterassoziierten Infektionen zu erheblichen Mehrkosten bei. Die Mortalitätsrate, die auf CRBSI zurückzuführen ist, lag bei der Untersuchung von Slonim et al. (2001) bei 13,1%.

1.2.3 Thrombosen

Gegenüber Erwachsenen liegt die Gesamtinzidenz von Thrombosen im pädiatrischen Patientenkollektiv deutlich niedriger (Citla Sridhar et al., 2020). An der Gesamtzahl aller venös-thrombotischen Ereignisse bei Kindern haben ZVK-assoziierte Thrombosen mit einer Rate von 50–80% allerdings den größten Anteil – das Vorhandensein eines ZVK stellt bei Kindern den größten Risikofaktor für die Entwicklung einer Thrombose dar (Takemoto et al., 2014). Inzidenzraten für das Auftreten einer ZVK-assoziierten Thrombose bei Kindern werden in unterschiedlichen Studien zwischen 2 und 81% angegeben (Cotogni et al., 2013, Price et al., 2004, Smitherman et al., 2015). Die jeweils untersuchten Patientengruppen unterscheiden sich jedoch deutlich hinsichtlich weiterer Risikofaktoren für thrombotische Ereignisse, etwa hämatologische Erkrankungen, Sepsis oder extrakorporale Nierenersatzverfahren. In einer Studie mit 1.135 eingebrachten ZVK an nicht-kritisch kranken Kindern über insgesamt 118.023 Kathetertage wurde eine Rate venöser Thrombosen von 3,2% ermittelt, entsprechend 0,3 Thrombosen pro 1.000 Kathetertagen (Smitherman et al., 2015). Bei 10–15% aller Patienten mit ZVK-assoziierten Thrombosen kommt es zu weiteren Komplikationen wie pulmonalen Embolien oder zur Entwicklung eines postthrombotischen Syndroms (Wall et al., 2016).

Abhängig vom Insertionsort tragen über die FV und SCV eingebrachte Katheter bei Kindern ein höheres thromboembolisches Risiko als solche, die über die V. jugularis interna (VJI) eingebracht werden (Male et al., 2005).

1.2.4 Fehllagen

Fehllagen eines ZVK können sowohl primär bei der Katheteranlage als auch sekundär nach initial korrekter venöser Punktion und Lagekontrolle auftreten. Dies kann beispielsweise durch Bewegungen, operative Eingriffe nahe der Katheterposition oder eine mechanische Irritation durch den Katheter selbst mit sekundärer Gefäßwandperforation auftreten (vgl. Tschirschwitz et al., 2022).

Bei radiologisch auffälligen Katheterpositionen müssen differentialdiagnostisch intra- und extravaskuläre Fehllagen in Betracht gezogen werden. Die häufigste intravaskuläre Fehllage bei Kindern ist die Position des ZVK in der rechten SCV, in die der Katheter bei der Insertion „abgebogen“ ist. Wesentlich seltener ist die Lage in den Vv. thoracicae internae, intercostales oder pericardiacophrenicae – bei kongenitalen Gefäßanomalien z.B. auch in einer persistierenden linken oberen Hohlvene (Schummer et al., 2002, Desai et al., 2017).

Angaben zur Häufigkeit von ZVK-Fehllagen bei Kindern sind in der Literatur sehr heterogen und liegen zwischen 1–23% (Parienti et al., 2015, Lanza et al., 2006, Park et al., 2014, Yesilbas et al., 2018). Yesilbas et al. (2018) beobachteten bei 22 von 95 (23,1%) ZVK-Anlagen bei Kindern (medianes Alter: 0,6 Jahre) in fast einem Viertel der Fälle Fehllagen. Dzierzega et al. (2014) beschrieben die ZVK-Fehllage bei Kindern als ein seltenes Ereignis und beobachteten lediglich 3 von 309 (1,0%) fehlpositionierte ZVK (getunnelt und nichtgetunnelt) auf pädiatrischen Stationen. Allerdings unterscheiden sich die Studien teils deutlich in der Definition einer „korrekten“ Position und einer „Fehllage“ (*malposition*). So gilt in manchen Studien lediglich die Position der ZVK-Spitze außerhalb der SVC (Pittiruti et al., 2012, Dzierzega et al., 2014), etwa in der ipsi- oder kontralateralen SCV, als Fehllage. Andere Studien werteten auch eine Lage der ZVK-Spitze im RA als fehlpositioniert (Thomsen et al., 2023, Park et al., 2014).

In einer Studie zur Inzidenz von ZVK-Fehllagen bei kinderherzchirurgischen Eingriffen untersuchten Maddali et al. die Position von 200 perioperativ gelegten ZVK, je 100 inseriert über die rechte VJI und 100 über die linke. Bei rechtsseitigen Anlagen kam es

in 4% zu Fehllagen, bei linksseitigen Anlagen in 22,4%, am häufigsten in die rechte SCV. Die Autoren führen den deutlich längeren, gewundeneren Verlauf, den ein linksseitig eingebrachter ZVK nehmen muss, um die SVC zu erreichen, als Hauptfaktor für die erheblich höhere Rate an Fehllagen bei ZVK über die linke VJI an (Maddali et al., 2022).

Eine intrakardiale Katheterposition kann bei Kindern zur Ausbildung von Perikardergüssen und -tamponaden mit deletären Folgen führen (Darling et al., 2001). Die Verletzung und iatrogene Katheterisierung des Ductus thoracicus mit Ausbildung eines Chylothorax wurde ebenfalls beschrieben (Kono et al., 2022, Saxena et al., 2015) – bedingt durch die anatomische Nähe zur linksseitigen VJI. Gefäßwand-arrosionen und -perforationen können zu mediastinalen Fehllagen führen, die schwer zu detektieren sind. Chen et al. (2018) berichteten über den Fall eines Patienten mit Ausbildung eines deletären Mediastinalhämatoms nach Perforation der V. brachiocephalica. Ein Hydrothorax kann ebenfalls bei der Nutzung eines fehlpositionierten Katheters entstehen (Döbel und Braun, 1999) – treffenderweise auch als „Infusothorax“ bezeichnet – etwa bei iatrogener Infusion von Kristalloiden, parenteraler Ernährung oder Kontrastmittel via eines intrapleural liegenden ZVK (vgl. Tschirschwitz et al., 2022).

1.3 Gesundheitsökonomie

Komplikationen im Rahmen einer ZVK-Anlage bei Kindern sind mit erhöhter Mortalität assoziiert und stellen auch gesundheitsökonomisch eine erhebliche Belastung dar. Die genaue Bezifferung der dabei entstehenden Kosten ist jedoch schwierig. Entstehende Mehrkosten sind hauptsächlich auf eine verlängerte Krankenhausverweildauer sowie die damit verbundene zusätzliche Diagnostik und Therapie zurückzuführen.

Die Auswertung von über 1,6 Mio. Datensätzen pädiatrischer Patientinnen und Patienten, erhoben zwischen 2008 und 2011 in den USA, zeigte eine durchschnittliche Kostenzunahme von 55.646 US-Dollar sowie eine Verlängerung der Krankenhausverweildauer um 19 Tage bei Auftreten einer ZVK-assoziierten Blutstrominfektion (Goudie et al., 2014). Im vulnerablen Bereich der pädiatrischen Hämatonkologie wurden durchschnittliche Zusatzkosten von 69.332 US-Dollar und eine verlängerte Krankenhausverweildauer von 21 Tagen bei Auftreten von ZVK-assoziierten Infektionen auf der Intensivstation festgestellt (Wilson et al., 2014).

1.4 Ultraschallgestützte Punktion

Neben der klassischen Landmarkentechnik, die genaue Kenntnisse der Anatomie des Punktionsgebietes voraussetzt, hat sich in den letzten Jahrzehnten die Verwendung von Ultraschall (US) zur Anlage von ZVK etabliert. Sowohl anatomische Varianten in der Gefäßsituation als auch vorbestehende venöse Thrombosen sind methodenimmanent mit der Landmarkentechnik nicht erfassbar, können jedoch mit dem US bereits präinterventionell detektiert werden.

Während der Punktion kann mittels US die genaue Anatomie und Position des Zielgefäßes in Quer- und Längsschnitt dargestellt und der Nadelvorschub unter direkter sonographischer Kontrolle vorgenommen werden (vgl. Saugel et al., 2017). Die Bezeichnungen *in plane* und *out of plane* beziehen sich dabei auf die Position der Punktionsnadel in Relation zur Ultraschallebene. Bei der *in-plane*-Technik wird die Nadel idealerweise exakt in der dargestellten Schallebene geführt und ist damit in ihrer gesamten Länge sichtbar. In der *out-of-plane*-Technik treffen Nadel und Schallebene in einem Winkel aufeinander, die Nadel schneidet die Ebene und ist im US-Bild nur als echoreicher Punkt erkennbar (vgl. Notheisen et al., 2016).

Etliche groß angelegte randomisierte Studien zeigen, dass bei Säuglingen und Kindern US-gestützte Punktionstechniken eine deutlich geringere Rate an Komplikationen, Fehllagen und Punktionsversuchen gegenüber der Landmarkentechnik aufweisen (de Souza et al., 2018). Für ZVK-Anlagen in der VJI zeigte eine Metaanalyse von Brass et al. (2015b) mit über 5.000 inkludierten Patientinnen und Patienten aus 35 Studien bei Verwendung von US während der Punktion eine Komplikationsrate von 4,0% (48/1.212) gegenüber 13,5% (161/1.194) bei Punktion in Landmarkentechnik. Geringere Evidenz für die Überlegenheit von US-gestützten Verfahren gegenüber der Landmarkentechnik besteht bei der Anlage eines ZVK über die SCV oder FV (Brass et al., 2015a).

In ihrer Metaanalyse werteten Lau und Chamberlain (2016) acht randomisiert kontrollierte Studien mit insgesamt 760 pädiatrischen Patientinnen und Patienten aus. Im Vergleich zur Landmarkentechnik erhöhte die US-gestützte Technik die Rate erfolgreicher Punktionen um 31,8% und reduzierte signifikant die Anzahl an Punktionsversuchen und arteriellen Fehlpunktionen.

In den letzten Jahren veröffentlichten diverse internationale medizinische Fachgesellschaften Leitlinien, die die Verwendung von US zur ZVK-Anlage bei Kindern

empfehlen – bei Katheteranlagen in der VJI mehrheitlich mit höchstem Empfehlungsgrad (Troianos et al., 2011, Rupp et al., 2012, Bodenham Chair et al., 2016, Jenssen et al., 2016). Die aktualisierten Empfehlungen der *Task Force on Central Venous Access* der American Society of Anesthesiologists (ASA) (2020) sowie die Leitlinien der American Society of Echocardiography (Vegas et al., 2025) sprechen sich mit höchstem Empfehlungsgrad für die Anwendung US-gestützter Techniken zur ZVK-Anlage bei Neugeborenen und Kindern aus. Die internationalen evidenzbasierten Leitlinien der ESPNIC (European Society of Paediatric and Neonatal Intensive Care) zum *point of care* Ultraschall (POCUS) empfehlen die Anwendung US-gestützter Techniken bei der Katheterisierung der VJI (Evidenzgrad A) und SCV (Evidenzgrad B) bei Neugeborenen und Kindern (Singh et al., 2020).

1.5 Lagekontrolle

Neben der korrekt durchgeführten perkutanen Punktion stellt die Lagekontrolle des eingebrachten Katheters einen unverzichtbaren Bestandteil des Insertionsprozesses dar. Als Goldstandard galt über Jahrzehnte die Röntgenaufnahme des Thorax (CXR, *chest x-ray*). Daneben stehen elektrokardiographische, ultrasonographische und echokardiographische Methoden zur Verfügung.

Eine weltweite Umfrage unter klinisch tätigen Ärztinnen und Ärzten ergab ein sehr heterogenes Bild in der Anwendung der unterschiedlichen Methoden zur ZVK-Lagekontrolle bei Kindern. Trotz mittlerweile gesicherter Evidenz, dass bei Verwendung sonographischer Verfahren auf ein CXR verzichtet werden kann, ist die röntgenologische Lagekontrolle weiterhin weit verbreitete klinische Praxis (Camporesi et al., 2023).

1.5.1 Thorax-Röntgen

Fragestellungen, die durch ein CXR beantwortet werden können, umfassen den Verlauf des ZVK zum Ausschluss einer Fehllage oder Schlingenbildung, die Lage der Katheterspitze sowie den Ausschluss eines punktionsbedingten Pneumo-, Hämato- oder Pneumohämatothorax.

Zur Vermeidung anlagebedingter Komplikationen eines zu tief eingeführten Katheters, wie der Perforation des RA, sollte die ZVK-Spitze kranial des RA-SVC-Übergangs

außerhalb des Perikards in der SVC liegen. Das Perikard ist röntgenologisch jedoch nicht darstellbar. Die zuverlässigste radiologische Landmarke stellt der rechte tracheobronchiale Winkel zur Identifizierung der SVC dar, welcher jedoch oft schwer zu identifizieren ist (Rutherford et al., 1994, Aslany et al., 1998). In praxi wird die Projektion der Carina als zuverlässige radiographische Landmarke verwendet. Diese ist nahezu immer detektierbar, auch bei schlechter Bildqualität. Caruso et al. (2002) verglichen computertomographische mit konventionellen Röntgenaufnahmen des Thorax und bestätigten die Carina als verlässliche radiographische Landmarke.

Auch bei Säuglingen und Kindern eignet sich die Projektion der Carina als Landmarke zur Lagekontrolle einer optimalerweise extraperikardialen Positionierung der ZVK-Spitze. In einer Kadaverstudie an 31 Kindern (mittleres Alter: $12,5 \pm 3,4$ Monate) demonstrierten Albrecht et al. (2006) die Position der Carina $0,5 \pm 0,04$ cm oberhalb des horizontalen Verlaufs der perikardialen Umschlagsfalte am Eintritt der SVC in den Herzbeutel. Yoon et al. (2005) stellten in ihrer Studie an Kindern mittels transösophagealer Echokardiographie (TEE) einen Abstand zwischen Carina und RA-SVC-Übergang von durchschnittlich 1,5 cm (95%-CI: 1,3–1,8 cm) fest. Eine Lage der ZVK-Spitze im RA ist nahezu ausgeschlossen bei Positionierung in Höhe der Carina.

Neben der Lagekontrolle stellt die Detektion eines möglichen Pneumo-/Hämatothorax die Hauptindikation für eine Röntgenaufnahme des Thorax dar. Allerdings kann sich ein Pneumothorax auch verzögert entwickeln und in einer sofort nach Anlage eines ZVK durchgeführten Röntgenaufnahme noch nicht sichtbar sein.

Jede Röntgenaufnahme geht mit einer – wenn auch geringen – Strahlenbelastung einher. Die effektive Dosis eines CXR in 2 Ebenen beträgt 0,01 mSv. Dies entspricht einem ungefähren Zeitraum der natürlichen Strahlenexposition ($2,1$ mSv/Jahr) von 15 Tagen (Grunert, 2019).

Eine Reihe von Autoren sprechen sich gegen die verbreitete Praxis der röntgenologischen Lagekontrolle aus. In der Auswertung von über 6.800 US-gesteuert angelegten ZVK berichteten Chui et al. von einer Pneumothoraxrate von 0,33% ($23/6.875$) und Fehllagen in 1,91% der Fälle ($131/6.857$). Die Autoren bewerteten diese Komplikationen als extrem seltene Ereignisse und schlussfolgerten, dass die routinemäßige postprozedurale Durchführung eines CXR unnötig ist und in keinem Verhältnis zu Aufwand, Kosten und Risiken steht (Chui et al., 2018).

1.5.2 Elektrokardiographie

Eine weit verbreitete Methode zur Detektion der korrekt positionierten Katheterspitze ist die Anwendung der Elektrokardiographie (EKG), die bereits 1949 durch Hellerstein beschrieben wurde (Hellerstein et al., 1949).

Die *Italian Group for Venous Access Devices* untersuchte diese Methode in einer multizentrischen Studie an 309 Kindern im Alter von 1 Monat bis 18 Jahren. Mithilfe des EKG konnte in 95,8% der Fälle eine Positionierung der ZVK-Spitze am RA-SVC-Übergang erreicht werden. Die Autoren bewerteten das intracavitäre EKG als sicheres und verlässliches Verfahren bei pädiatrischen Patientinnen und Patienten (Rossetti et al., 2015).

Die Grundlage dieser Methode bildet die intracavitäre Ableitung des EKG über den Seldinger-Draht. Nach Einführung des Katheters in die SVC wird der Führungsdraht so weit vorgeschoben, bis das Draht- mit dem Katheterende abschließt – erkennbar anhand einer Drahtmarkierung am proximalen Ende. Verbunden wird der Draht über einen Konnektor (z.B. Krokodilklemme), direkt oder über ein Zwischenmodul (z.B. Certodyn® Universal Adapter, B. Braun Melsungen AG, 34209 Melsungen, Deutschland), mit der rechtsthorakalen Ableitung (Einthoven-II-Ableitung).

Je nach Einführtiefe des ZVK zeigen sich charakteristische Veränderungen der P-Welle im EKG, abhängig von der relativen Position der detektierenden Drahtspitze zum Sinusknoten. Am Übergang zum RA vergrößert sich die P-Welle, verändert sich in Folge von mono- zu biphasisch, nimmt nach Passage des Sinusknotens wieder ab und wird negativ. Bei der EKG-gestützten Anlage wird der ZVK bis zur Vergrößerung der P-Welle vorgeschoben und anschließend bis zur Normalisierung wieder zurückgezogen, um eine sichere Positionierung der Katheterspitze in der SVC zu erreichen (Wilson und Gaer, 1988, Hansen et al., 1998). Häufige klinische Praxis ist das Zurückziehen um weitere 2 cm nach Normalisierung der P-Welle. Eine TEE-gestützte Lagekontrolle von Schummer et al. (2005) bei 200 Patienten zeigte jedoch eine maximale P-Wellen Amplitude bereits im Vorhofeingang, sodass auch ohne diesen zusätzlichen Rückzug eine sichere Platzierung in der SVC erreicht werden kann.

Eine P-Wellen-Veränderung ist jedoch kein spezifisches Phänomen des RA, sondern abhängig vom Abstand der detektierenden Elektrode – also des Drahtendes – zur perikardialen Umschlagsfalte. Auch bei intraperikardialer, aber atrialer oder

extravasaler Fehllage konnten P-Wellen-Veränderungen beobachtet werden (Schummer et al., 2003, Schummer et al., 2004). Eine Unterscheidung zwischen venöser und arterieller Katheterlage ist mit der EKG-Methode daher nicht sicher möglich.

1.5.3 Transösophageale Echokardiographie

Als Goldstandard zur Verifizierung einer korrekten Position der ZVK-Spitze gilt die TEE (Ender et al., 2009, Yoshimura et al., 2016), da im bikavalen Schallfenster (mittösophageale Position, 90-110°) eine direkte Visualisierung des RA, des RA-SVC-Übergangs und des proximalen Anteils der SVC möglich ist. Die Position eines eingebrachten ZVK kann auf diese Weise direkt visualisiert werden (siehe Abb. 1).

Limitationen dieser Methode bestehen – neben der Unpraktikabilität im klinischen Alltag – in ihrer verfahrensimmanenten Invasivität und den damit verbundenen Risiken, etwa Verletzungen von Zähnen, Schleimhäuten, Pharynx und Ösophagus.

Nach aktuellen Richtlinien der American Society of Anesthesiologists (ASA) zur Anwendung der TEE in Anästhesie und Intensivmedizin und den darauf basierenden Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin (DGAI) stellt die alleinige Lagekontrolle eines ZVK keine Indikation zur Anwendung der TEE dar (Greim et al., 2011, American Society of Anesthesiologists, 2010). Insbesondere in operativen Disziplinen wie der Herzchirurgie, in denen aufgrund anderer Indikationen ohnehin eine TEE-Anwendung erfolgt, kann die Technik jedoch genutzt werden, um die Position der Katheterspitze zu verifizieren.



Abb 1: TEE bikavale Einstellung, erkennbar ist die ZVK-Spitze in der SVC, proximal des RA-SVC-Übergangs;
TEE: transösophageale Echokardiographie, **SVC:** Vena cava superior, **RA:** rechter Vorhof

1.5.4 Transthorakale Echokardiographie

Eine vollständig nicht-invasive Methode stellt die transthorakale Echokardiographie (TTE) dar. Unterschiedliche Schallfenster ermöglichen eine Visualisierung von Zielstrukturen wie dem RA, der Venae cavae inferior und superior, deren Darstellbarkeit jedoch interindividuell stark variiert (Nguyen, 2016, Park et al., 2014). Daneben lassen sich während der ZVK-Anlage Führungsdraht und Katheter darstellen und ermöglichen eine intraprozedurale Navigation und Lokalisation der ZVK-Spitze (Lanza et al., 2006).

Die hohe Schallreflexion und der lange Verlauf in den dargestellten Ebenen ermöglichen bei subxiphoidaler Anlotung nahezu immer die Darstellung des Führungsdrahtes. Mit vorsichtigen Verschiebe- (*sliding*) und Kippmanövern (*tilting*) des Schallkopfes können weitere Ultraschallebenen der *region of interest* ins Bild gebracht (AIUM, 1999) und die relevanten Strukturen bis zur Darstellung von Draht und Katheter durchgefächert werden. Ein akzidentelles Abbiegen des Drahtes, in den meisten Fällen in die Vv. brachiocephalicae und weiterführend in die Vv. subclaviae, kann vor Einführen des Katheters rechtzeitig bemerkt und eine Neuplatzierung über SVC in Richtung RA vorgenommen werden (Smit et al., 2018). Bei Auftreten von

Herzrhythmusstörungen kann ein zu tiefes Verschieben des Drahtes in den RA als Ursache visuell detektiert und rasch behoben werden.

Neben der Darstellung des Führungsdrahtes kann die rasche Applikation eines Flüssigkeits-Bolus und die Darstellung einer Verwirbelung (*flush sign*) in der proximalen SVC und im RA als präziser bettseitiger Screening-Test zur Identifizierung und Verifizierung einer korrekten Position der ZVK-Spitze dienen (Weekes et al., 2014, Korsten et al., 2018). In der Studie ‚*Saline Flush Test*‘ von Gekle et al. (2015) mit 81 eingeschlossenen Patientinnen und Patienten erfolgte mittels US und *flush sign* gegenüber CXR eine um 37 Minuten raschere ZVK-Lagekontrolle (8,8 min vs. 45,8 min). Die ähnlich konzipierte ‚*Bubble Study*‘ von Duran-Gehring et al. (2015) mit 50 Patientinnen und Patienten ergab eine zeitliche Reduktion um 24 Minuten im Vergleich zwischen US und CXR (5,0 min vs. 28,2 min).

Alonso-Quintela et al. nutzten bei 51 ZVK-Anlagen auf einer pädiatrischen Intensivstation die TTE zur Bestimmung der Katheterspitze. Für die Unterscheidung einer intra- oder extraatrialen Position in der SVC stimmten die Ergebnisse von TTE und CXR in 94% der Fälle überein, in der Bestimmung einer Malposition außerhalb der SVC in 92% (Alonso-Quintela et al., 2015).

Eine Metaanalyse und systematisches Review von Doyle et al. (2022) untersuchte die Validität von TTE in der Bestimmung der Position der ZVK-Spitze. In 8 Studien wurden insgesamt 421 Neonaten auf der Kinderintensivstation eingeschlossen; das durchschnittliche Alter der Kinder lag bei 38,6 Wochen. CXR diente als Referenzmethode. Die Autoren fanden für die Genauigkeit der TTE als Methode zur Bestimmung der Katheterspitze eine gepoolte Sensitivität von 95,2% (95%-CI: 91,9–97,4%) und eine Spezifität von 71,4% (95%-CI: 59,4–81,6%).

Die POCUS-Leitlinien der ESPNIC empfehlen explizit die Anwendung von *point of care* Ultraschall bei Neugeborenen und Kindern zur Bestimmung der Position der ZVK-Spitze. Kathetermanipulationen können minimiert und die Strahlenbelastung bei Verzicht auf röntgenologische Lagekontrollen reduziert werden (Singh et al., 2020).

Neben der Lagekontrolle bietet die Sonographie die Möglichkeit der unmittelbaren Detektion möglicher punktionsbedingter Komplikationen. In verschiedenen Metaanalysen hat sich die Überlegenheit des pleuralen US gegenüber der CXR bei der Detektion eines Pneumothorax erwiesen. Ebrahimi et al. (2014) schlossen 28

Studien in ihre Metaanalyse ein. Sensitivität und Spezifität des pleuralen US zur Detektion eines Pneumothorax betrugen 0,87 (95%-CI: 0,81–0,92) bzw. 0,99 (95%-CI: 0,98–0,99) gegenüber Werten der Röntgendiagnostik von 0,46 (95%-CI: 0,36–0,56) bzw. 1,0 (95%-CI: 0,99–1,0).

Die Dauer bis zur Detektion eines punktionsbedingten Pneumothorax verkürzt sich bei Anwendung der Sonographie im Vergleich zur Röntgenaufnahme deutlich. Kann der pleurale US direkt postprozedural bettseitig erfolgen, ist ein CXR – mit Anforderung, Durchführung und Interpretation durch die radiologische Abteilung – deutlich zeit-, ressourcen- und kostenintensiver. In ihrer Studie zu ZVK-Anlagen in der Notaufnahme zeigten Duran-Gehring et al. (2015), dass die pleurale US-Untersuchung 24 Minuten (95%-CI: 12,7–35,4 min) schneller war als die Röntgenuntersuchung – und bis zur finalen Befundung durch einen Radiologen sogar 294 Minuten schneller (95%-CI: 203,5–384,5 min). Eine große Metaanalyse von Ablordeppey et al. (2017) mit 1.553 Katheteranlagen aus 15 Studien zeigte eine nahezu 100% Sensitivität und Spezifität des US in der Detektion von Pneumothoraces. Die Zeit bis zur Verifizierung der Katheterlage konnte im Mittel um 58,3 Minuten im Vergleich zur Röntgenuntersuchung verkürzt werden.

Pittiruti et al. vertreten in ihren 2024 im *European Journal of Pediatrics* veröffentlichten Empfehlungen eine systematische, „globale“ Anwendung von US während der verschiedenen Schritte der ZVK-Anlage bei Neugeborenen und Kindern. Dies beinhaltet die sonographische Evaluierung und Auswahl der Gefäße, die US-gestützte Punktion, die intraprozedurale Navigation von Führungsdraht und Katheter (*tip navigation*), die Lagekontrolle der ZVK-Spitze (*tip location*) und die Detektion möglicher punktionsbedingter Komplikationen. CXR soll auf Basis der aktuellen Datenlage zum *Point-of-Care*-US während der ZVK-Anlage bei Neugeborenen und Kleinkindern keine Rolle mehr spielen (Pittiruti et al., 2024).

1.5.5 TTE-Protokolle

Auf Grundlage ihrer Metaanalysen zur US-gesteuerten *tip navigation* und *tip location* entwickelte die italienische Arbeitsgruppe um Pittiruti et al. standardisierte Protokolle zur Anwendung von TTE (Barone et al., 2022, Greca et al., 2023, Zito Marinosci et al., 2023). Das „Neo-ECHOTIP“-Protokoll beschreibt die schrittweise, strukturierte Nutzung der TTE zur periprozeduralen Navigation und Lokalisation der ZVK-Spitze

während der ZVK-Anlage bei Neugeborenen und Säuglingen (Barone et al., 2022), das „ECHOTIP-Ped“-Protokoll bei Kindern (Zito Marinosci et al., 2023).

Beide Protokolle dienen als Grundlage zur Entwicklung des Studienprotokolls unserer eigenen Untersuchung.

1.6 Arbeitshypothese und Fragestellungen

1.6.1 Ziel

Ziel dieser prospektiven Beobachtungsstudie ist es, die diagnostische Genauigkeit der TTE zur Positionierung der zentralvenösen Katheterspitze bei kinderherzchirurgischen Patientinnen und Patienten zu untersuchen. Die TEE dient als Referenzmethode (Goldstandard). Der überwiegende Anteil früherer Studien mit einem pädiatrischen Patientenkollektiv verwendete die CXR als Referenz (Park et al., 2014, Katheria et al., 2013, Neumann et al., 2024). Im Gegensatz zur TEE (siehe Abb. 1) ist im CXR jedoch keine direkte Visualisierung der Katheterspitze in der SVC möglich. Keine bisher veröffentlichte Studie zur TTE-gesteuerten ZVK-Anlage bei Kindern verwendete die TEE als Referenzmethode, um die Genauigkeit der TTE-gesteuerten Katheterpositionierung zu evaluieren.

1.6.2 Hypothese

Die Hypothese dieser Studie lautet, dass mithilfe der TTE in mindestens 90% der Fälle bei Kindern mit herzchirurgischen Eingriffen eine korrekte Positionierung der zentralvenösen Katheterspitze am kavoatrialen Übergang gelingt, überprüft durch die TEE als Referenzmethode.

Wir postulieren, dass sich die TTE als geeignetes Verfahren zur Verifizierung einer korrekten Position der ZVK-Spitze erweist.

Als nicht-invasives Verfahren geht sie, im Vergleich zum Goldstandard TEE, mit keinerlei Risiken einher und ist im Vergleich zur Röntgendiagnostik frei von Strahlenbelastung. Darüber hinaus lassen sich Kosten, potenzielle Komplikationen und der zeitliche Aufwand für die Lagekontrolle deutlich reduzieren.

2. Material und Methoden

2.1 Setting und Design der Studie

Unsere Studie führten wir im Universitären Herzzentrum des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf (UKE), Hamburg, Deutschland, am Zentrum für Anästhesiologie und Intensivmedizin in der Klinik und Poliklinik für Anästhesiologie durch. Als monozentrische, prospektive Beobachtungsstudie konzipiert, erstreckte sich der Zeitraum der Datenerhebung von November 2021 bis Januar 2024.

Ein positives Ethikvotum wurde vor Studienbeginn von der zuständigen Ethik-Kommission der Ärztekammer Hamburg am 03.08.2021 erteilt (Studienregistrierungsnummer: 2021-100616-BO-ff). Die Studie wurde im Deutschen Register Klinischer Studien (DRKS) am 08.03.2022 registriert (Studienregistrierungsnummer: SDRKS00028271).

Die Verarbeitung personenbezogener Daten erfolgte gemäß der Datenschutz-Grundverordnung der Europäischen Union (DSGVO) und des Bundesdatenschutzgesetzes (BDSG). Leitfaden für die Durchführung der Studie war die Deklaration von Helsinki von 1964, die Erklärung des Weltärztebundes zu den ethischen Richtlinien zur medizinischen Forschung am Menschen, in ihrer aktuellen Fassung von 2013 (World Medical Association, 2013). Planung, Durchführung, Dokumentation und Auswertung entsprachen den Vorgaben der Guten Klinischen Praxis (*GCP, Good Clinical Practice*) (ICH, 2016) und werden gemäß der STROBE-Richtlinien (*Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology*) (von Elm et al., 2008) berichtet.

2.2 Patientinnen und Patienten

2.2.1 Einschlusskriterien

In die Studie wurden 150 Kinder im Alter von 0 bis 14 Jahren eingeschlossen, die für einen elektiven kardiochirurgischen Eingriff unter Allgemeinanästhesie am Universitären Herzzentrum des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf geplant waren. Voraussetzung war eine zwingende operationsbedingte Indikation zur Anlage eines ZVK sowie die Durchführung einer intraoperativen TEE-Untersuchung.

2.2.2 Ausschlusskriterien

Es wurden alle Kinder mit anatomischen Varianten oder postoperativen Zuständen, die eine Untersuchung mittels TTE und TEE deutlich beeinträchtigen oder unmöglich machen, aus der Studie ausgeschlossen. Dazu zählten kongenitale venöse Malformationen, Doppelanlagen, Diskontinuitäten oder Fehlmündungen der SVC außerhalb des RA, sowie postoperative Zustände nach Fontan- oder Glenn-Operation mit teilweiser bzw. vollständiger Mündung der SVC in die rechte Pulmonalarterie.

Ebenso wurden Kinder ausgeschlossen, bei denen ein elektiver Eingriff geplant war, der eine Veränderung der venösen Verhältnisse herbeiführt (z. B. Glenn- oder Fontan-Operationen), da in diesen Fällen keine Vergleichbarkeit der prä- und postoperativen Befunde zur Lagekontrolle der ZVK-Spitze gewährleistet ist.

Bei unvollständigen Datensätzen, z.B. durch fehlende Dokumentation in der elektronischen Patientenakte, wurden die Patientinnen und Patienten ebenfalls ausgeschlossen.

2.2.3 Studieneinschluss

Für die Studie in Frage kommende Patientinnen und Patienten wurden durch ein Screening der Operationspläne identifiziert. Einige Tage vor dem Eingriff, mindestens jedoch am Vortag, erhielten die Kinder und Eltern und/oder Erziehungsberechtigten ein anästhesiologisches Aufklärungsgespräch über den Eingriff. Im Anschluss erfolgte eine ausführliche Aufklärung über die Studie durch eine/n mit den Abläufen vertraute/n Ärztin/Arzt aus der Abteilung für Anästhesiologie.

Neben dem persönlichen Gespräch wurden den Eltern schriftliche Informationsmaterialien ausgehändigt, die die Studieninhalte ausführlich erläuterten. Zusätzlich erhielten Jugendliche sowie bereits verständige Kinder sprachlich angepasste Informationsblätter. Eine Einwilligung der Erziehungsberechtigten wurde jeweils schriftlich eingeholt.

2.3 Studienablauf

Der Einschluss von pädiatrischen Patientinnen und Patienten im Rahmen herzchirurgischer Eingriffe bot den Vorteil, dass neben der für die jeweilige Operation

notwendigen Instrumentierung keine weiteren invasiven Maßnahmen speziell für die Studie erforderlich waren. Sowohl die Anlage eines ZVK als auch die Durchführung einer TEE werden in unserer Klinik routinemäßig bei herzchirurgischen Eingriffen durchgeführt.

Die TEE dient intraoperativ zur Überprüfung der kardialen Funktion, Detektion und Beschreibung von Pathologien wie z.B. Malformationen, Septumdefekten oder Klappendysfunktionen, zur Lagekontrolle eingebrachter Katheter und Devices, sowie zur Beurteilung des Operationsverlaufs und -erfolgs.

Sämtliche Datenerhebungen wurden gemäß dem Ablauf des Studienprotokolls vorgenommen. Jedem Datensatz wurde eine individuelle Identifikationsnummer (ID) zugewiesen, die im Rahmen der anonymisierten Datenauswertung der eindeutigen Zuordnung diene.

2.3.1 Anästhesiologisches Management

Vor Einleitung der Allgemeinanästhesie wurde ein Basismonitoring etabliert, bestehend aus Pulsoxymetrie, EKG, nichtinvasiver Blutdruckmessung und cerebraler Nahinfrarotspektroskopie (NIRS).

Anschließend erfolgte die Einleitung der Allgemeinanästhesie bei nicht vorhandenem Venenzugang inhalativ. Über eine dichtsitzende Maske inhalierten die Kinder ein Gemisch aus hochdosiertem Sevofluran und 100%igem Sauerstoff mit einem maximalen Flow von 18 l/min. Unter vorsichtiger assistierter Maskenbeatmung wurde eine rasche Narkosevertiefung erreicht. Anschließend erfolgte die Anlage eines peripheren Venenzugangs, üblicherweise durch eine/n zweite/n Ärztin/Arzt gegebenenfalls unter Zuhilfenahme eines Ultraschallgerätes mit hochauflösendem Linearschallkopf („*hockey stick*“). Nach Etablierung des Zugangs wurde die balancierte Anästhesie durch die Gabe von Sufentanil (1 µg/kg) sowie Cis-Atracurium (0,15–0,2 mg/kg) ergänzt.

Bei Kindern mit bereits präinduktiv liegendem Venenzugang oder bei größeren Kindern erfolgte alternativ eine intravenöse Einleitung. Die verwendeten Medikamente (siehe Tabelle 1) wurden individuell an Alter, Größe, Gewicht und die klinische Situation des Kindes angepasst.

Tab 1: Dosierungen der verwendeten Medikamente zur Narkoseinduktion

Neugeborene + Säuglinge <6 Monate	Midazolam 0,1–0,2 mg/kg; Sufentanil 1 µg/kg; (+ ggf. Esketamin 0,5–1 mg/kg); Cis-Atracurium 0,15–0,2 mg/kg
Kind >6 Monate hämodynamisch stabil	Midazolam 0,1 mg/kg; Sufentanil 1 µg/kg; Propofol 2–3 mg/kg; Cis-Atracurium 0,15–0,2 mg/kg
Kind >6 Monate hämodynamisch instabil	Sufentanil 1µg/kg; Etomidate 0,3 mg/kg <i>alternativ</i> Midazolam 0,1 mg/kg; Esketamin 1–2 mg/kg; Cis-Atracurium 0,15–0,2 mg/kg
RSI-Indikation	<i>wie bei hämodynamisch instabilem Kind</i> 1 mg/kg Rocuronium als Relaxanz

Anschließend erfolgte die endotracheale Intubation – bei Kindern mit einem Körpergewicht unter 10 kg in der Regel nasotracheal, meist mit einem ungeblockten Vygon®-Tubus (VYGON Germany GmbH, 52070 Aachen, Deutschland), alternativ mit einem geblockten Microcuff-Tubus (Avanos Medical, Inc., Alpharetta, GA 30004, USA). Ältere Kinder erhielten einen oralen Microcuff-Tubus (Avanos Medical).

Nach Überprüfung der Tubuslage mittels Kapnografie und Auskultation wurde die Allgemeinanästhesie als balancierte Narkose fortgesetzt. Die Medikamentendosierungen betrugen standardmäßig:

- Remifentanyl 0,8–1 µg/kg/h
- Dexmedetomidin 0,1–0,5 µg/kg/h, initialer Bolus 1 µg/kg über 60 Minuten
- Sevofluran 0,5 MAC (entsprechend 1,0–1,2 Vol.-% expiratorisch)
- intraoperativ Zufuhr von Sevofluran mit inspiratorisch 1,0 Vol.-% über die Herzlungenmaschine (HLM)

Nach Einleitung der Narkose und der Intubation der Kinder wurde eine größenadaptierte TEE-Sonde in den Ösophagus eingeführt.

Unmittelbar im Anschluss wurde die Instrumentierung ergänzt und umfasste:

- zwei großlumige periphere Venenzugänge
- eine arterielle Kanüle zur invasiven Blutdruckmessung, bevorzugt in der A. radialis (links oder rechts), in Einzelfällen in der A. femoralis (links oder rechts), größenadaptiert:

- Arrow™ Arterial Line 24G/2,5 cm, 24G/5 cm, 22G/5 cm (Arrow International LLC, subsidiary of Teleflex Incorporated, Morrisville, NC 27560, USA);
- Vygon® LeaderCath 20G/5 cm (VYGON)
- einen Blasenkatheter mit Temperatursonde, ggf. rektaler Temperatursonde bei kleinlumigen Blasenkathetern ohne Temperaturmessung
- NIRS-Elektroden (Masimo™, Masimo Corp., Irvine, CA 92618, USA) zur Ableitung der regionalen Sauerstoffsättigung frontal-cerebral und über dem Nierenlager (links oder rechts)
- bilaterale EEG-Elektroden (SedLine®, Masimo™) ab ca. 15 kg Körpergewicht
- einen zentraler Venenkatheter, US-gestützte Anlage
- ggf. 6 F oder 8 F Schleuse mit Sideport (Terumo Medical Corp., Elkton, MD 21921, USA) ab ca. 30 kg Körpergewicht

Im Sinne eines (*Ultra-*) *Fast-Track*-Konzeptes wurde bei allen Kindern eine frühzeitige Extubation, möglichst noch im OP-Saal, angestrebt. In diesen Fällen wurde auf eine Nachrelaxierung verzichtet, am OP-Ende die Remifentanyl-Infusion beendet und das Sevofluran mit hohem Flow ausgewaschen. Nach Extubation und Transfer auf die Intensivstation wurde anschließend die Dexmedetomidin-Infusion beendet. War eine Extubation im OP-Saal nicht möglich oder nicht vorgesehen, wurde die Narkose mittels Dexmedetomidin- und Propofol-Perfusor (2–4 mg/kg/h) während des Transportes auf die Intensivstation fortgesetzt.

Zur postoperativen Analgesie erfolgte am Operationsende die intravenöse Gabe von Piritramid (0,1 mg/kg) und Metamizol (15 mg/kg). Bei Vorliegen von Kontraindikationen wurde Paracetamol intravenös verabreicht (unter 10 kg Körpergewicht: 7,5 mg/kg , ab 10 kg Körpergewicht: 15 mg/kg).

2.3.2 US-gestützte ZVK-Anlage

Zur ultraschallgestützten Punktion der VJI erfolgte zunächst die Desinfektion des Punktionsareals und die sterile Abdeckung gemäß klinikinternem Standard. Die Punktion (siehe Abb. 2 und 3) wurde entweder in der sogenannten *out-of-plane*- oder *in-plane*-Technik durchgeführt, jeweils unter Verwendung eines Linearschallkopfes (7–15 MHz, „hockey stick“, Philips EPIQ CVx; Philips Medical Systems DMC GmbH, Hamburg, Deutschland).

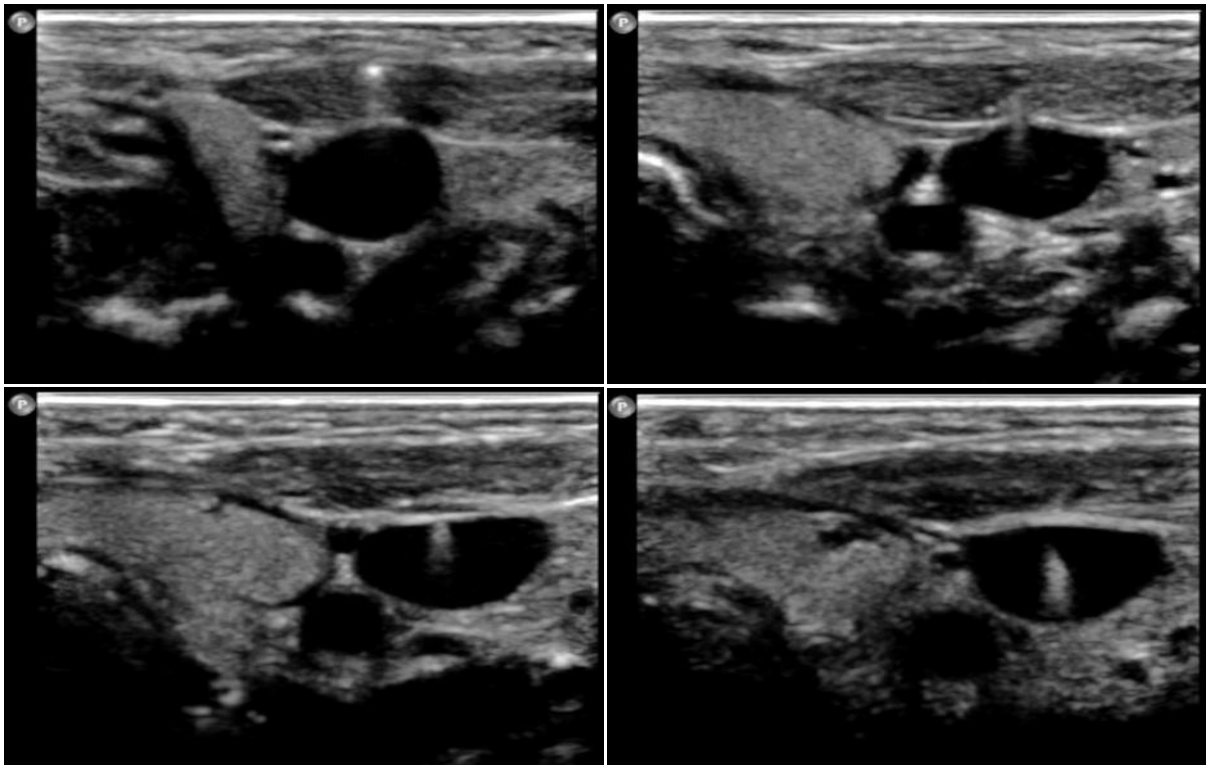


Abb 2: US-gestützte Punktion der SVC rechts, 7-15 MHz Linearschallkopf „hockey stick“, out-of-plane-Technik, in sequenzieller Darstellung ist die quer angeschnittene Nadelspitze jeweils als helle Schallreflexion über bzw. nach Eintritt in der SVC sichtbar; **US:** Ultraschall, **SVC:** Vena cava superior

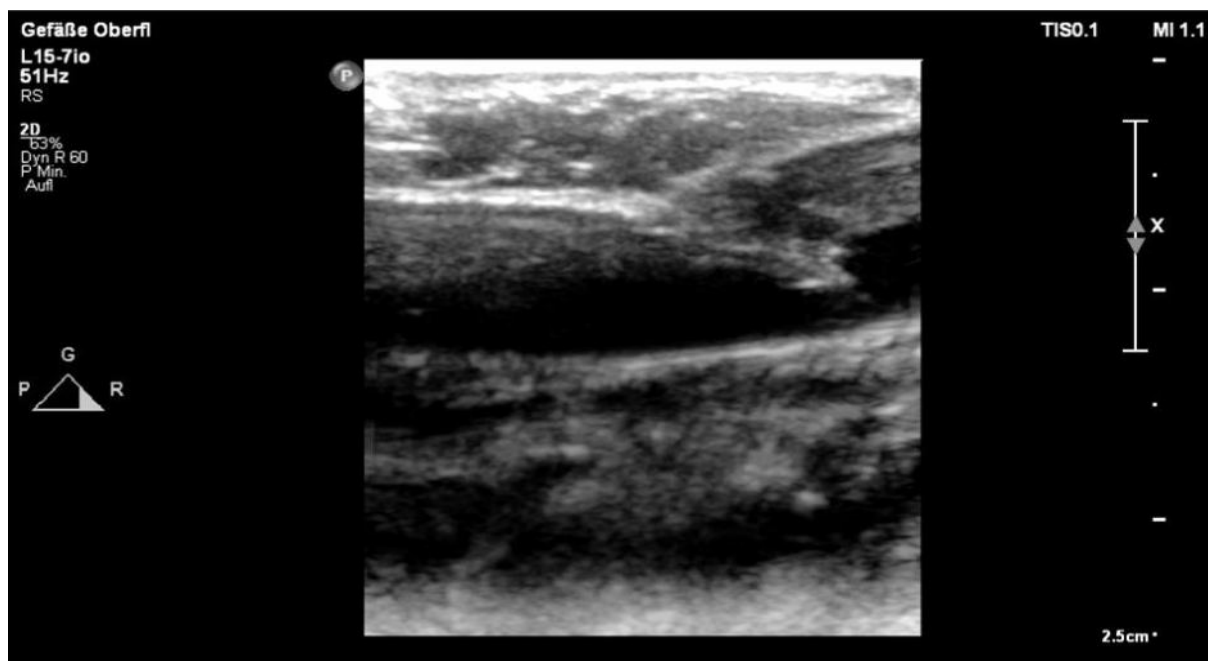


Abb 3: US-gestützte Punktion der SVC rechts, 7-15 MHz Linearschallkopf „hockey stick“, in-plane-Technik, erkennbar ist die helle Schallreflexion der längs angeschnittenen Punktionsnadel beim Eintritt in die SVC; **US:** Ultraschall, **SVC:** Vena cava superior

Zur Venenpunktion war der angeschrägte Nadelschliff (*bevel*), das heißt der Austrittsort des Drahtes aus der Punktionsnadel, jeweils nach ventral (*bevel up position*) ausgerichtet. Die Orientierung der J-förmig gebogenen Drahtspitze (*J-Tip*) am Austrittspunkt aus der Nadel und während des Vorschubs zeigte bei den Punktionen der VJI jeweils nach medial.

Bei Neugeborenen und Säuglingen mit einem Körpergewicht unter 3 kg kam ein ZVK mit 4 Fr Außendurchmesser (*outer diameter*, OD) und 13 cm Länge zum Einsatz (Arrow™ Pediatric Three-Lumen CVC, 4 Fr (1,5 mm) OD x 13 cm, Draht 0,46 mm OD x 45 cm).

Bei Kindern zwischen 3 kg und 30 kg benutzten wir einen ZVK mit 5,5 Fr OD und 13 cm Länge (Arrow™ Pediatric Three-Lumen CVC, 5,5 Fr (1,9 mm) OD x 13 cm, Draht 0,46 mm OD x 45 cm).

Kinder und Teenager mit einem Körpergewicht über 30 kg erhielten einen ZVK mit 7 Fr OD und 30 cm Länge, äquivalent zur standardmäßigen Anwendung bei Erwachsenen in unserer Klinik (Braun ProSet Certofix Trio S730, Katheter: 7 Fr x 30 cm, Draht: 0,89 mm OD x 70 cm).

2.3.3 Untersuchungsablauf der TTE und TEE

Sämtliche Untersuchungen erfolgten gemäß einem festgelegten Protokoll zur Erfassung der TTE- und TEE-Aufnahmen, wie im Folgenden beschrieben.

Nach Einbringen des Seldinger-Drahtes und Verifikation der venösen Lage mittels Linearschallkopf führte ein zweiter Anästhesist/ eine zweite Anästhesistin die Lagekontrolle von Führungsdraht und ZVK mithilfe der TTE und TEE durch.

Die Durchführung sowohl der TTE als auch der TEE erfolgte jeweils am selben Gerät (Philips EPIC CVx) durch Umschalten auf die entsprechenden Schallköpfe bzw. Echosonden.

Die TEE-Bilder akquirierten wir, abhängig von Größe und Gewicht des Kindes, mit drei unterschiedlichen Sonden, alle aus der Philips EPIQ CVx Serie.

- Körpergewicht <2,5 kg: 8–3 MHz, S8-3t, Philips EPIC CVx
- Körpergewicht 2,5–50 kg: 7–3 MHz, S7-3t, Philips EPIC CVx
- Körpergewicht >50 kg: 2–8 MHz, X8-2t, Philips EPIC CVx

Zur Erhebung der TTE-Bilder verwendeten wir einen Sektorschallkopf mit einer Frequenz von 1–5 MHz (X5-1, Philips EPIQ CVx).

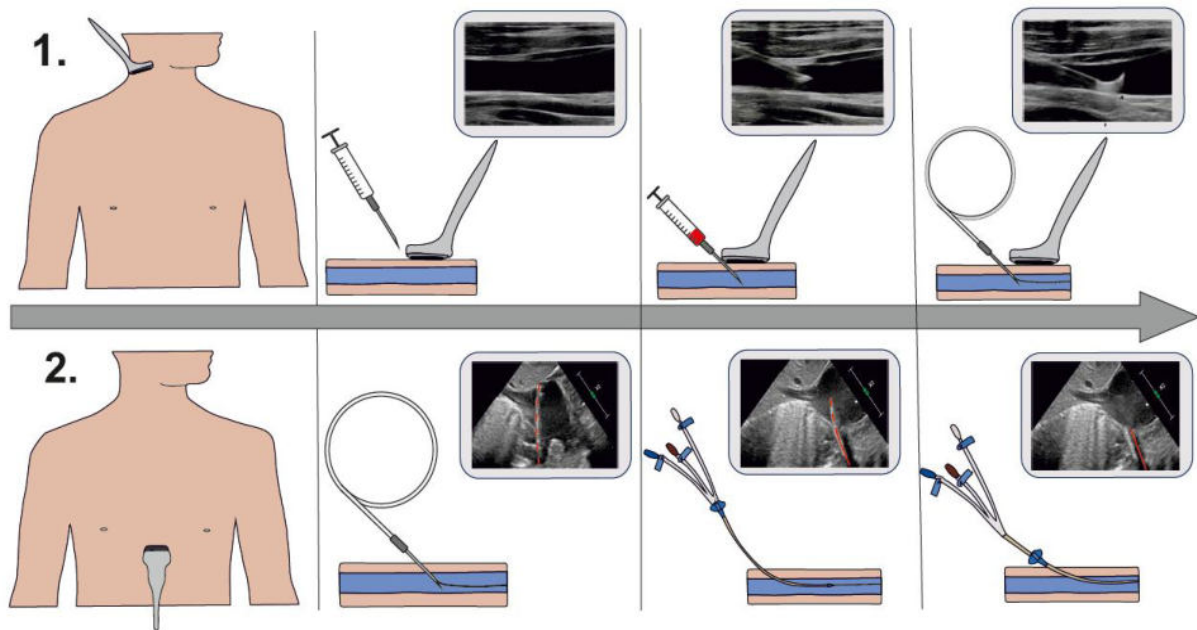


Abb 4: (1) US-gesteuerte Punktion der rechten SVC mittels Linearschallkopf („hockey stick“), anschließend Vorschub des Führungsdrahtes und Ultraschallkontrolle der intravaskulären Drahtlage
(2) zeitgleiche Lagekontrolle des Führungsdrahtes (rot gestrichelte Linie) mittels TTE in subxiphoidaler Anlotung, einliegend in der SVC und RA. Vorschub des ZVK (rote Linie) über den Draht, anschließend Drahrückzug. Bei initial zu tiefer Einlage des ZVK im RA erfolgt anschließend ein Rückzug und Positionierung der ZVK-Spitze am RA-SVC-Übergang
US: Ultraschall, **SVC:** Vena cava superior, **RA:** rechter Vorhof
(Quelle: Thomsen et al., 2025)

Schritt 1:

Mittels TTE unter Verwendung eines 1–5-MHz-Sektorschallkopfes (Philips EPIQ CVx) wurde im Langachsenblick in subxiphoidaler Position zunächst der Übergang der SVC in den RA (RA-SVC-Übergang) dargestellt (siehe Abb. 5). Anschließend erfolgte die sonographische Überprüfung der korrekten Position des eingeführten Seldinger-Drahtes (siehe Abb. 6).

Schritt 2:

Anschließend erfolgte die TEE. Dabei wurde im bikavalen Blick (90°–110°, mittösophageal) der RA-SVC-Übergang dargestellt und der Führungsdraht identifiziert (siehe Abb. 7).

Schritt 3:

Nach Verschieben des ZVK über den Seldinger-Draht erfolgte die TTE-gesteuerte Positionierung der ZVK-Spitze (*tip navigation*) in die SVC mit einem Abstand zwischen ZVK-Spitze und RA-SVC-Übergang von 1–4 cm. Die Lokalisierung der ZVK-Spitze (*tip location*) erfolgte neben der direkten sonographischen Darstellung in der proximalen SVC (siehe Abb. 8) durch eine anschließende Bolusapplikation von wenigen Millilitern Natriumchlorid-Lösung (NaCl) über das distale ZVK-Lumen. Im Echobild wurde dadurch eine Verwirbelung (*swirl*) im RA erzeugt, das sogenannte *flush sign* (siehe Abb. 9 und 10), welches eine zusätzliche Positionsbestätigung der ZVK-Spitze ermöglichte.

Schritt 4:

Nach der TTE-gesteuerten ZVK-Positionierung wurde die Lage der ZVK-Spitze mithilfe der TEE als Referenzmethode im bikavalen Blick überprüft. Etwaige Fehllagen wurden dokumentiert und durch Rückzug oder Vorschub des ZVK korrigiert.

Schritt 5:

Nach dem operativen Verschluss des Thorax und Ende der Operation wurde die Position der ZVK-Spitze erneut mittels TEE überprüft und dokumentiert. Mögliche Lageveränderungen der ZVK-Spitze, etwa infolge intraoperativer Manipulation oder im Rahmen der Umlagerung des Kindes, sollten hierdurch detektiert und ausgeschlossen werden.



Abb 5: Schritt 1a TTE subxiphoidale Einstellung; RA: rechter Vorhof, schwarze Pfeile: SVC, weiße Pfeile: RA-SVC-Übergang



Abb 6: Schritt 1b TTE subxiphoidale Einstellung; Seldinger Draht über die SVC im RA

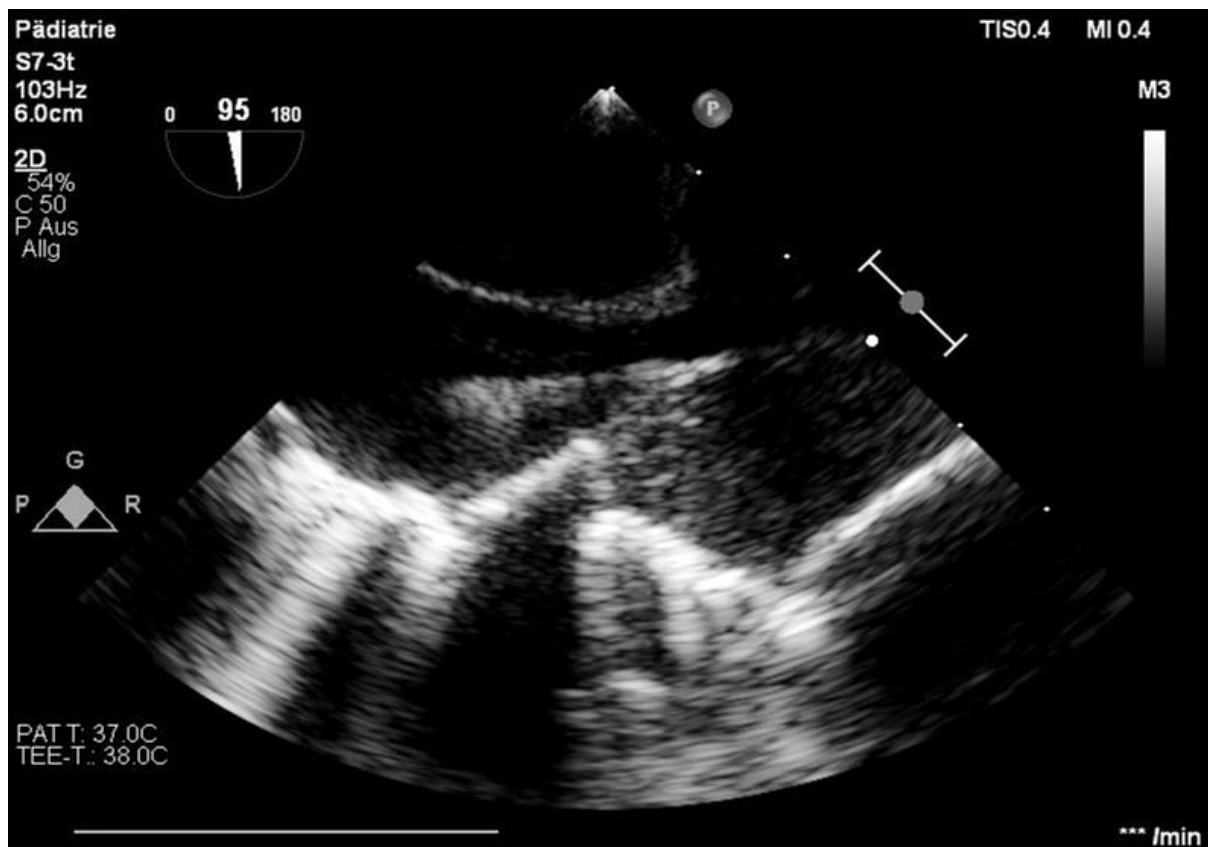


Abb 7: Schritt 2 TEE bikavale Einstellung; Seldinger-Draht in SVC und RA

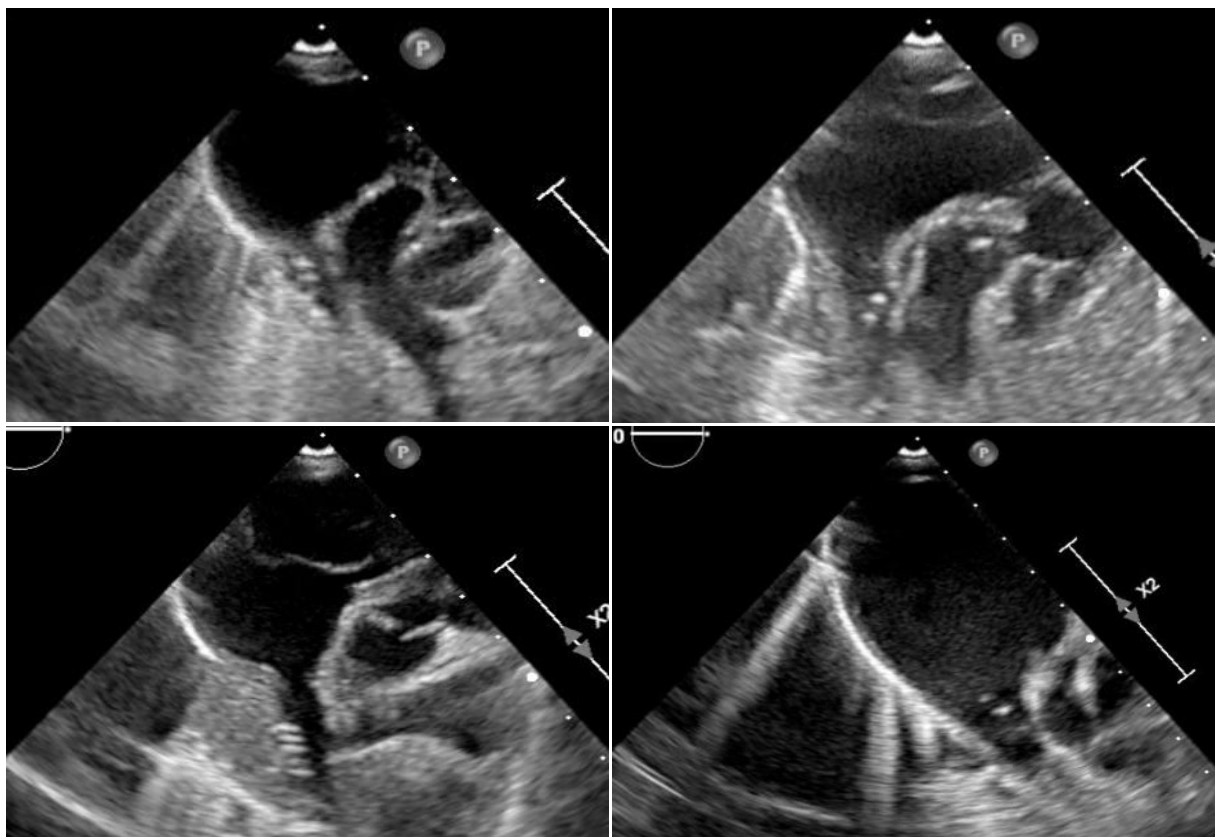


Abb 8: Schritt 3a TTE subxiphoidale Einstellung von 4 verschiedenen Kindern; erkennbar ist jeweils als Doppel-/Mehrfachstruktur die Spitze des ZVK in der SVC, im letzten Bild noch direkt am RA-SVC-Übergang kurz vor Rückzug in die SVC

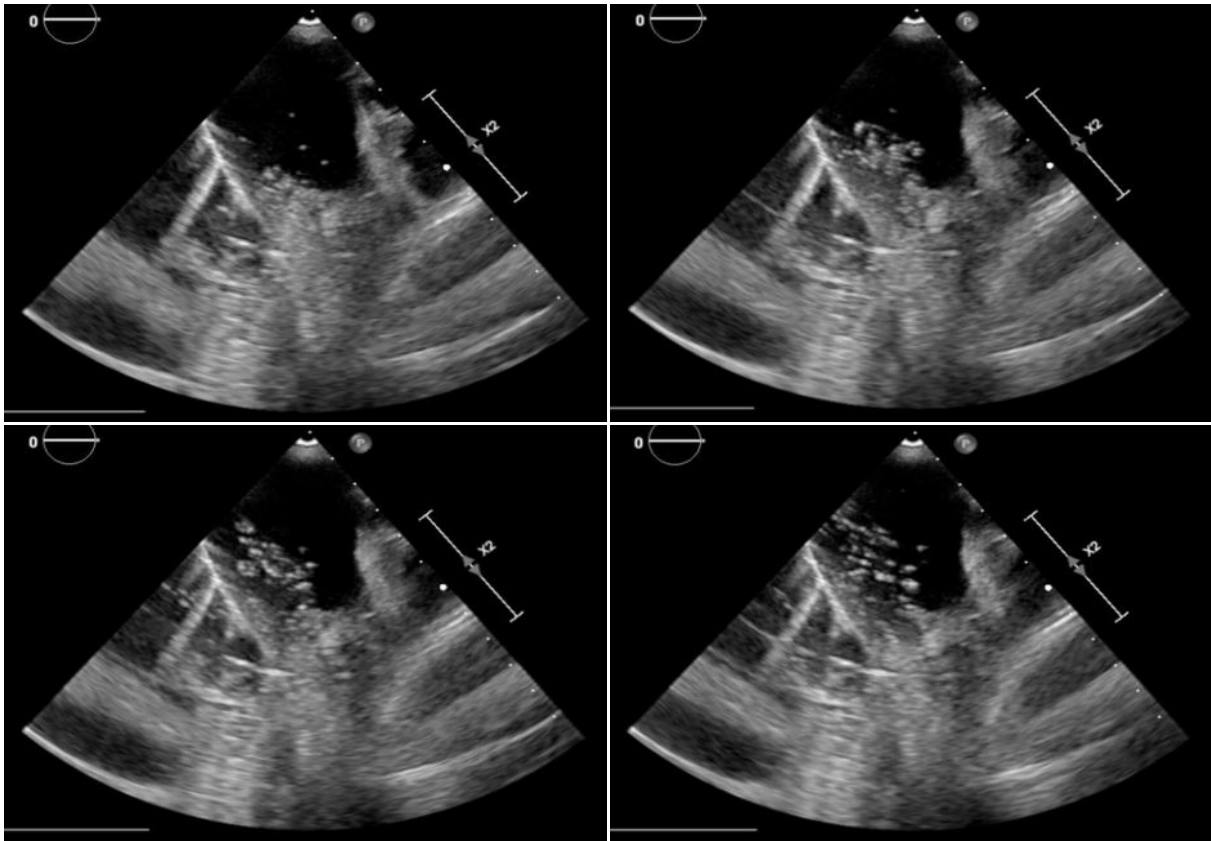


Abb 9: Schritt 3b TTE subxiphoidale Einstellung; Detektion der korrekten Position der ZVK-Spitze: nach Applikation eines NaCl-Bolus über den in der SVC einliegenden ZVK ist in der sequenziellen Darstellung im RA ein sog. „flush sign“ erkennbar

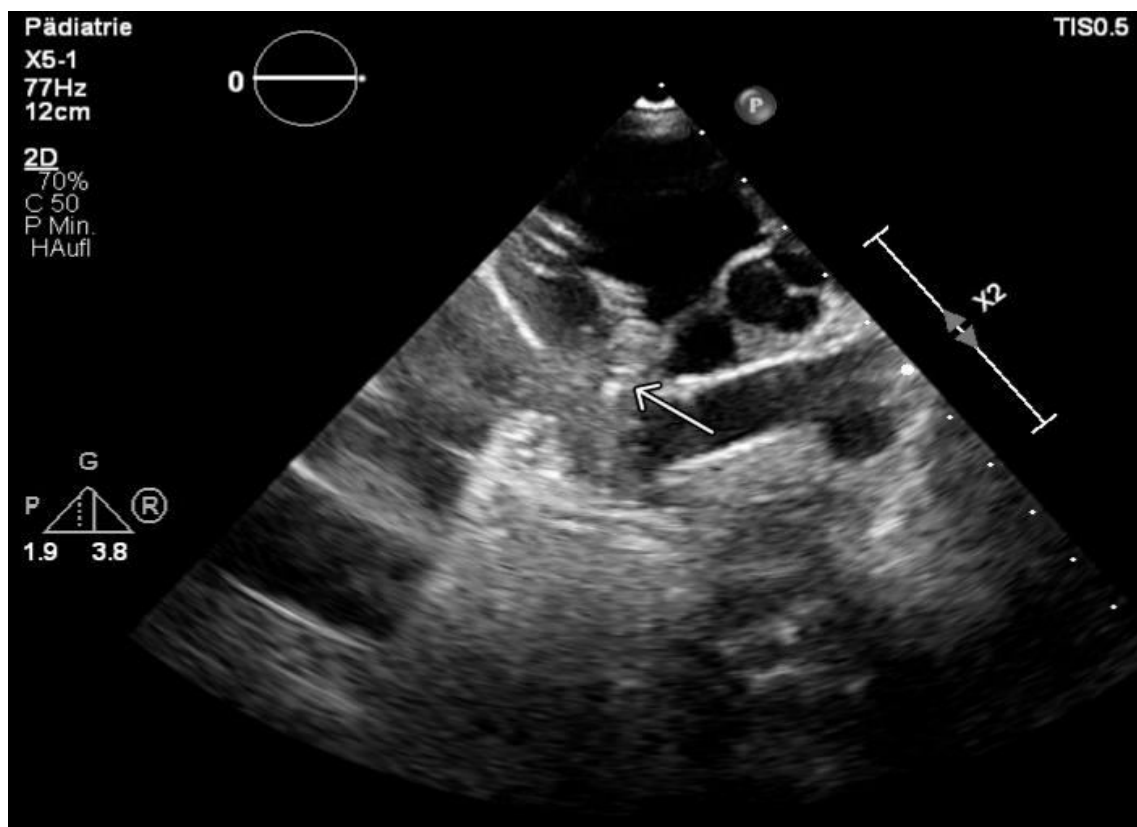


Abb 10: Schritt 3b TTE subxiphoidale Einstellung; erkennbar ist die ZVK-Spitze (weißer Pfeil) im Bereich der SVC und das sog. „flush sign“ nach Applikation eines NaCl-Bolus mit Ausbreitung in RA

2.3.4 Auswertung der Thorax-Röntgenbilder

Nach der Verlegung auf die Kinderintensivstation wurde in den ersten postoperativen Stunden standardmäßig eine Röntgenaufnahme des Thorax durchgeführt. Die radiologische Aufnahme erfolgte liegend im anterior-posterioren Strahlengang. Das CXR diente der Überprüfung der Lage von ZVK-Spitze, Thoraxdrainagen, Schrittmachersonden sowie dem Ausschluss möglicher Komplikationen wie der Ausbildung eines Pneumo- oder Hämatothorax.

Die Abteilung für Radiologie hinterlegte einen schriftlichen Befund in der elektronischen Patientenakte, in dem routinemäßig die ZVK-Position beschrieben wurde.

Zusätzlich wurden die Röntgenaufnahmen im Rahmen dieser Studie mit dem digitalen Bildauswertungsprogramm Sectra UniView® (Sectra SA, Linköping, Schweden) analysiert, welches in unserer Klinik als Standardprogramm zur röntgenologischen Diagnostik etabliert ist. Gemessen und dokumentiert wurde der vertikale Abstand der ZVK-Spitze zur Carina.

Die Beschreibung der ZVK-Position durch die befundenden Kolleginnen und Kollegen der Radiologie wurde anschließend mit den zuvor in TTE und TEE erhobenen Befunden verglichen.

Die Tiefenposition des ZVK, beschrieben durch die entsprechende Längenmarkierung des Katheters auf Hautniveau, wurde postoperativ täglich kontrolliert und in der elektronischen Patientenakte erfasst. Anhand dieser täglichen Dokumentation überprüften wir bis zur Entlassung von der Intensivstation bzw. bis zur Entfernung des ZVK, ob es postoperativ zu einer Veränderung der Tiefenposition gekommen war, z.B. durch Rückzug infolge eines im radiologischen Befund als zu tief liegend beschriebenen Katheters.

2.4 Endpunkte

2.4.1 Primärer Endpunkt

Primärer Endpunkt dieser Studie war der Anteil der Fälle mit korrekt platzierter zentralvenöser Katheterspitze, TTE-gesteuert positioniert.

Eine korrekte Position definierten wir wie folgt:

- Die Spitze des ZVK war in der TEE in der SVC darstellbar mit einem Abstand zwischen der ZVK-Spitze und dem RA-SVC-Übergang von 1–4 cm.
- Die ZVK-Spitze lag kranial des RA-SVC-Übergangs und nicht im RA.

2.4.2 Sekundäre Endpunkte

Sekundäre Endpunkte der Studie waren die Anteile der Fälle, in denen

- in der TTE der RA-SVC-Übergang identifiziert werden konnte.
- in der TTE der Seldinger-Draht darstellbar war.
- in der TTE die ZVK-Spitze identifiziert werden konnte.
- in der TEE der RA-SVC-Übergang identifiziert werden konnte.
- in der TEE der Seldinger-Draht darstellbar war.
- in der TEE die ZVK-Spitze identifiziert werden konnte.

2.4.3 Explorative Endpunkte

Unmittelbar postoperativ wurde bei allen Kindern ein CXR auf der Intensivstation durchgeführt. Explorativ erfasst wurde in der Studie

- der Anteil der Fälle, in denen im CRX eine inkorrekte Position der ZVK-Spitze beschrieben wurde.
- der Abstand zwischen ZVK-Spitze und der Carina im CXR.

2.4.4 Subgruppenanalyse

Zusätzlich wurde eine Subgruppenanalyse nach Altersklassen durchgeführt. Hierfür wurde die Analysekohorte in 6 Subgruppen (SG) unterteilt, die jeweils getrennt im Hinblick auf den primären Endpunkt sowie die sekundären und explorativen Endpunkte ausgewertet wurden:

- Subgruppe 1: Neugeborene (0–90 Tage)
- Subgruppe 2: Säuglinge (91–365 Tage)
- Subgruppe 3: Kleinkinder (1–2 Jahre)
- Subgruppe 4: Vorschulkinder (2–5 Jahre)
- Subgruppe 5: Schulkinder (5–12 Jahre)
- Subgruppe 6: Teenager (≥ 12 Jahre)

2.5 Statistische Analyse

Die statistische Auswertung erfolgte mit der Software *Microsoft Excel*, Version 16.89.1 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) sowie dem Statistikprogramm *R*, Version 4.3.2 (The R Foundation for Statistical Computing, Wien, Österreich).

2.5.1 Basischarakteristika der Patientinnen und Patienten

Die demografischen und klinischen Basischarakteristika der Patientinnen und Patienten wurden als absolute Anzahl (Prozent) für kategoriale Daten und als Median (einschließlich des 25. und 75. Perzentils) für kontinuierliche Daten dargestellt.

2.5.2 Analyse des primären Endpunkts

Der primäre Endpunkt – der Anteil an Kindern, bei denen die TTE zu einer korrekten Positionierung der Katheterspitze am RA-SVC-Übergang führte – wurde als absolute Zahl und Prozentsatz mit einem 95%-Konfidenzintervall (95%-CI) angegeben.

2.5.3 Analyse der sekundären Endpunkte

Die sekundären Endpunkte umfassen den Anteil der Kinder mit erfolgreicher Visualisierung der Zielstrukturen, des Führungsdrahtes und der ZVK-Spitze in der TTE und TEE. Diese wurden als absolute Anzahl (Prozent) dargestellt.

2.5.4 Analyse der explorativen Endpunkte

Der Anteil der Kinder mit röntgenologisch als inkorrekt beschriebener ZVK-Spitze wurde als absolute Anzahl (Prozent) angegeben. Der Abstand zwischen ZVK-Spitze und Carina im CXR wurde als Median (einschließlich des 25. und 75. Perzentils)

dargestellt. Die Analyse erfolgte sowohl in der gesamten Analysekohorte als auch separat für die altersabhängigen Subgruppen.

2.5.5 Subgruppenanalyse

Für die altersabhängigen Subgruppen erfolgte die Darstellung der primären und sekundären Endpunkte als absolute Anzahl (Prozent).

2.5.6 Fallzahlberechnung

Für die Berechnung der Stichprobengröße wurde angenommen, dass die TTE-gestützte Kontrolle der Katheterspitze in 90% der Fälle zu einer korrekten Positionierung führt. Um eine absolute Präzision von $\pm 5\%$ bei einem Konfidenzniveau von 95% zu erreichen, wurde eine Stichprobengröße von 139 Kindern ermittelt.

Unter Berücksichtigung einer erwarteten Drop-out-Rate von 10% wurde die geplante Rekrutierungszahl auf 155 Patientinnen und Patienten erhöht.

3. Ergebnisse

3.1 Datenerhebung und Ausschluss

Insgesamt wurden 155 Kinder rekrutiert. 5 Kinder mussten aus der Studie ausgeschlossen werden.

Bei zwei Kindern konnte auf Grund hämodynamischer Instabilität während der Einleitung keine TEE durchgeführt und somit das Studienprotokoll nicht korrekt eingehalten werden.

Zwei Kinder wurden aus anatomischen Gründen aus der Studie ausgeschlossen. Ein Patient wies eine ausgeprägte Trichterbrust bei voroperiertem Situs auf, sodass keine TTE durchgeführt werden konnte, bei einer weiteren Teilnehmerin lag ein Situs inversus totalis vor.

In einem weiteren Fall musste während der ZVK-Anlage ungeplant eine TEE durchgeführt werden. Dies hätte die Ergebniserhebung des primären Endpunktes beeinflusst.

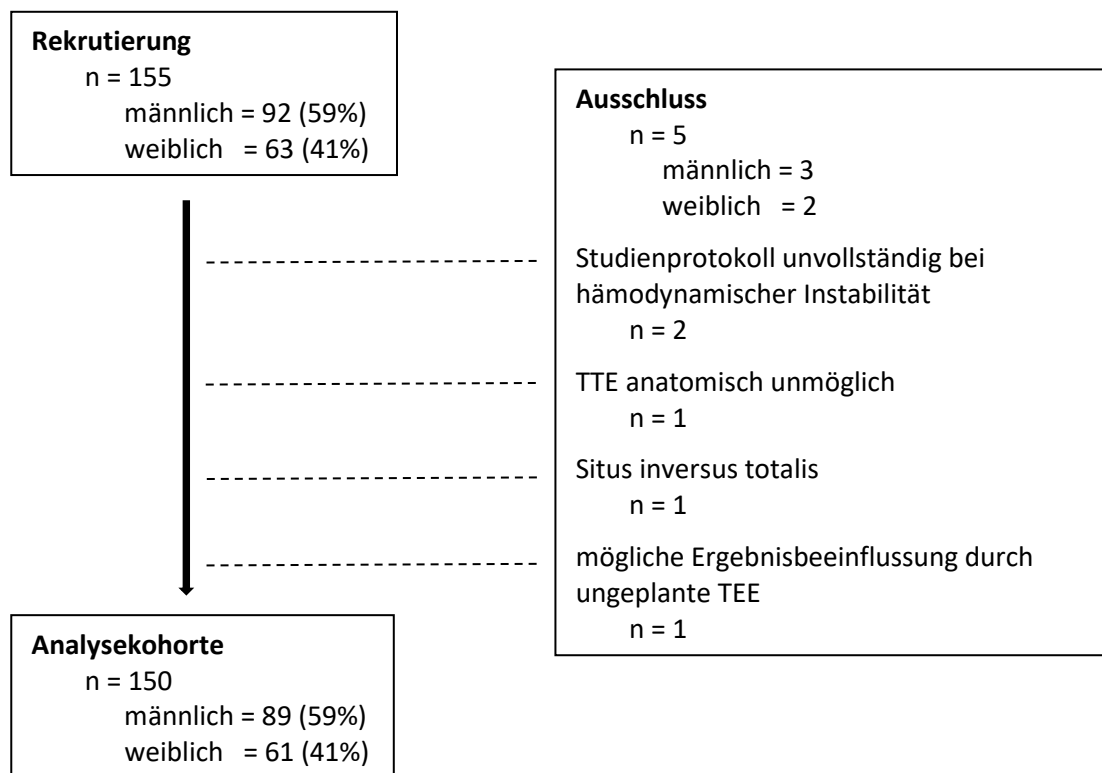


Abb 11: Flussdiagramm zur Datenerhebung: Rekrutierung, Ausschluss und Analysekohorte

3.2 Analysekohorte

Insgesamt wurden 150 Kinder in die Auswertung eingeschlossen, davon waren 89 männlich (59%) und 61 weiblich (41%).

Das mediane Alter der Kinder betrug 1,06 (0,34; 4,74) Jahre.

Die mediane Körpergröße lag bei 0,75 (0,6; 1,06) m, das mediane Körpergewicht bei 9 (5,0; 17,0) kg.

Tab. 2 zeigt die Patientencharakteristika sowie den Anteil der eingeschlossenen Kinder der unterschiedlichen Subgruppen (SG) innerhalb der gesamten Analysekohorte von 150 Kindern.

Tab 2: Patientencharakteristika

Gesamt	n = 150
SG 1: Neugeborene (0–90 Tage), <i>n</i>	28 (18,7%)
SG 2: Säuglinge (91–365 Tage), <i>n</i>	45 (30,0%)
SG 3: Kleinkinder (1–2 Jahre), <i>n</i>	15 (10,0%)
SG 4: Vorschulkinder (2–5 Jahre), <i>n</i>	27 (18,0%)
SG 5: Schulkinder (5–12 Jahre), <i>n</i>	25 (16,7%)
SG 6: Teenager (≥ 12 Jahre), <i>n</i>	10 (6,7%)
Männlich, <i>n</i>	89 (59,3%)
Weiblich, <i>n</i>	61 (40,7%)
Alter, Jahre	1,06 (0,34; 4,74)
Größe, Meter	0,75 (0,60; 1,06)
Gewicht, kg	9 (5,0; 17,0)

Kategoriale Daten werden als absolute Zahl (Prozentsatz) dargestellt, kontinuierliche Daten als Median (25. Perzentile, 75. Perzentile). **n**: absolute Zahl, **SG**: Subgruppe

3.3 Primärer Endpunkt

In 136/150 Fällen (90,7%; 95%-CI: 85–94%) gelang bei der TTE-gesteuerten ZVK-Anlage eine in der TEE bestätigte korrekte Positionierung der ZVK-Spitze. Die Hypothese der Studie, eine korrekte Platzierung des ZVK mittels TTE-gesteuerter Anlage in ≥ 90% der Fälle zu erreichen, konnte bestätigt werden.

In 14/150 Fällen (9,3%) wurde nach TTE-gesteuerter Anlage in der TEE eine Fehllage detektiert und anschließend korrigiert.

Bei 8/14 Kindern (57,1%; 5,3% aller Kinder) lag die ZVK-Spitze zu tief im RA, im Median um 1 cm.

Bei 6/14 Kindern (42,9%; 4,0% aller Kinder) lag die ZVK-Spitze zu kranial (>4 cm oberhalb des RA-SVC-Übergangs) in der SVC und wurde im Median um 1 cm vorgeschoben.

Der Anteil der Kinder, bei denen die TTE-gesteuerte Anlage zu einer korrekten Positionierung der ZVK-Spitze führte, war am höchsten bei Neugeborenen (0–3 Monate, 96,4%) und am niedrigsten bei Jugendlichen (13–14 Jahre, 70,0%).

In 8/136 Fällen (5,9%) mit korrekter initialer Positionierung (1–4 cm kranial des RA-SVC-Übergangs) erfolgte auf Wunsch der Chirurginnen und Chirurgen eine Lagekorrektur (Vorschub um 0,5–1 cm bzw. Rückzug um 1–2 cm). In die statistische Auswertung gingen diese als TTE-gesteuert initial korrekt platzierte Fälle ein.

3.4 Sekundäre Endpunkte

3.4.1 Transthorakale Echokardiographie

Bei allen 150 Kindern (100%) war die Einstellung des subxiphoidalen Blickes in der TTE mit Darstellung von RA und SVC möglich. In der TTE konnte in 144/150 der Fälle (96,0%) der RA-SVC-Übergang eindeutig identifiziert werden.

Die Darstellung des Seldinger-Drahtes in der proximalen SVC gelang in 149/150 Fällen (99,3%).

In 101/150 Fällen (67,3%) konnte die ZVK-Spitze direkt visualisiert und identifiziert werden. Die indirekte Identifizierung der ZVK-Spitze über die Detektion eines *swirls* (*flush sign*) in der proximalen SVC gelang in 148/150 Fällen (98,7%).

3.4.2 Transösophageale Echokardiographie

Bei allen 150 Kindern (100%) konnte in der TEE der bikavale Blick eingestellt werden. In 149/150 Fällen (99,3%) wurde der RA-SVC-Übergang eindeutig identifiziert.

Der Seldinger-Draht war in allen 150 Fällen (100%) in der TEE darstellbar.

In allen 150 Fällen (100%) war eine Identifizierung der ZVK-Spitze in der SVC möglich.

3.5 Subgruppenanalyse

Tabelle 3 und Abbildung 12 zeigen die nach Altersgruppen geordneten Ergebnisse der TTE-gesteuerten ZVK-Anlage als Prozentsatz der jeweiligen Subgruppenstärke (n).

Tab 3: Subgruppenanalyse der TTE-gesteuerten ZVK-Anlage

	total	SG 1	SG 2	SG 3	SG 4	SG 5	SG 6
n	150	28	45	15	27	25	10
subxiphoidaler Blick einstellbar	150/150 100%	28/28 100%	45/45 100%	15/15 100%	27/27 100%	25/25 100%	10/10 100%
RA-SVC-Übergang identifiziert	144/150 96,0%	28/28 100%	43/45 95,6%	15/15 100%	27/27 100%	24/25 96,0%	7/10 70,0%
Führungsdraht identifiziert	149/150 99,3%	28/28 100%	45/45 100%	15/15 100%	27/27 100%	25/25 100%	9/10 90,0%
ZVK-Spitze direkt identifiziert	101/150 67,3%	23/28 82,1%	36/45 80,0%	12/15 80,0%	18/27 66,7%	10/25 40,0%	2/10 20,0%
flush sign, ZVK-Spitze indirekt identifiziert	148/150 98,7%	28/28 100%	45/45 100%	15/15 100%	27/27 100%	25/25 100%	8/10 80,0%
korrekte Lage der ZVK-Spitze	136/150 90,7%	27/28 96,4%	41/45 91,1%	14/15 93,3%	24/27 88,9%	23/25 92,0%	7/10 70,0%

SG: Subgruppe, RA: rechter Vorhof, SVC: Vena cava superior

Ab einem Alter von 5 Jahren sank die Darstellbarkeit des RA-SVC-Übergangs in der TTE auf 96,0% bei Schulkindern bzw. auf 70,0% bei Teenagern. Die Darstellung des Führungsdrahtes gelang in SG 1–5 zu 100%, lediglich in der Gruppe der Teenager war sie in einem von 10 Fällen nicht möglich.

Die deutlichste Altersabhängigkeit zeigte sich in der direkten Darstellbarkeit der ZVK-Spitze in der TTE. Ließ sich bei jüngeren Kindern die ZVK-Spitze jeweils in $\geq 80\%$ direkt identifizieren (Neugeborene: 82,1%; Säuglinge: 80,0%; Kleinkinder: 80,0%), sank die Darstellbarkeit in der TTE mit zunehmendem Alter in den drei älteren Subgruppen (Vorschulkinder: 66,7%; Schulkinder: 40,0%, Teenager 20,0%).

Eine indirekte Identifizierung der ZVK-Spitze durch Detektion eines *flush signs* in der TTE gelang hingegen in allen Subgruppen deutlich häufiger, in SG 1–5 zu 100%, lediglich in der Gruppe der Teenager nur in 8 von 10 Fällen.

Eine korrekte TTE-gesteuerte Platzierung der ZVK-Spitze war in den Subgruppen 1-5 (Neugeborene bis Schulkinder) im Mittel in 92,4% der Fälle möglich. Erst ab der

Subgruppe der Teenager (>13 Jahre) sank – korrelierend mit der altersabhängigen Abnahme der direkten Darstellbarkeit in der TTE – die Rate korrekter Platzierungen der ZVK-Spitze auf 70,0%.

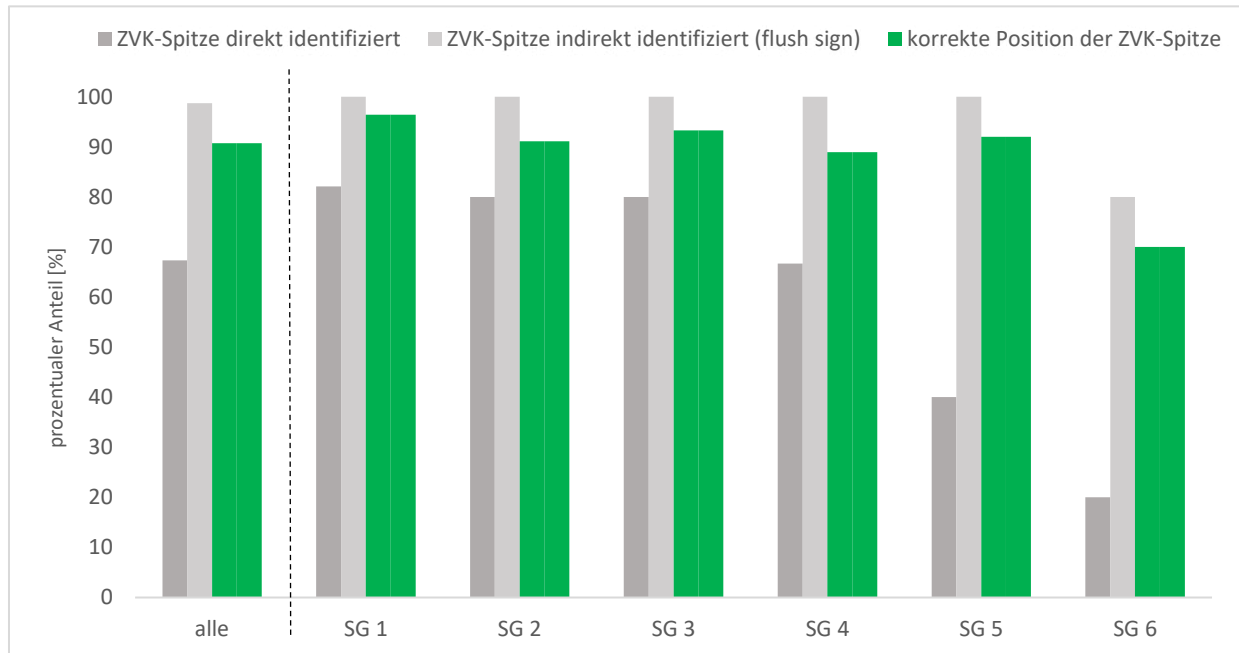


Abb 12: Prozentualer Anteil aller Kinder im Gesamtkollektiv und in den altersabhängigen Subgruppen (SG) mit korrekt platzierter ZVK-Spitze, direkter Identifizierung der ZVK-Spitze im TTE, indirekter Identifizierung der ZVK-Spitze im TTE durch schnelle Applikation eines NaCl-Bolus (*flush sign*)

3.6 Explorative Endpunkte – Auswertung der Thorax-Röntgenbilder

Bei 3 Kindern fehlte die postoperative Thorax-Röntgenaufnahme, sodass insgesamt 147 Datensätze in die Auswertung eingingen.

In 136/147 Fällen (92,5%) lag postoperativ röntgenologisch eine korrekte Position des ZVK vor.

In 11/147 Fällen (7,5%) wurde eine Fehllage beschrieben:

- 7/147 Kinder (4,8%): Projektion der ZVK-Spitze in die rechte Vorhofebene
- 4/147 Fällen (2,7%) sonstige Fehllagen:
 - ZVK in querverlaufender Vene, a.e. V. brachiocephalica sinistra, Spitze horizontal im oberen Mediastinum
 - ZVK umgeschlagen in V. brachiocephalica dextra
 - ZVK umgeschlagen in V. brachiocephalica sinistra
 - ZVK im Zusammenfluss V. brachiocephalica dextra/VJI dextra

Der mediane Abstand der ZVK-Spitze zur Carina bei als korrekt liegend befundenen Röntgenaufnahmen betrug 0,8 (0,4; 1,4) cm. In den Fällen einer als inkorrekt beschriebenen Position betrug der mediane Abstand der ZVK-Spitze zur Carina 1,1 (0,5; 1,8) cm. In keinem Fall erfolgte postoperativ eine Lagekorrektur auf der Intensivstation.

Tab 4: Auswertung der Thorax-Röntgenbilder

	total	SG 1	SG 2	SG 3	SG 4	SG 5	SG 6
n	147	28	44	15	26	24	10
Korrekte Lage der ZVK-Spitze (Referenz CXR)	136/147 92,5%	25/28 89,3%	39/44 88,6%	15/15 100%	26/26 100%	22/24 91,7%	9/10 90%
ZVK-Spitze im CXR in Projektion auf RA	7/147 4,8%	2/28 4,8%	3/44 6,8%	0/15 0%	0/26 0%	1/24 4,2%	1/10 10%
Medianer Abstand der ZVK-Spitze zur Carina im CXR	0,8 (0,4; 1,4)	0,6 (0,2;1,3)	0,7 (0,3;1,1)	0,8 (0,3;1,2)	1,1 (0,6;1,8)	1,1 (0,4;2,3)	1,1 (0,9;1,7)
Korrekte Lage der ZVK-Spitze (Referenz TEE)	136/150 90,7%	27/28 96,4%	41/45 91,1%	14/15 93,3%	24/27 88,9%	23/25 92,0%	7/10 70,0%

Auswertung der Röntgenbilder nach TTE-gesteuerter ZVK-Anlage, geordnet nach altersabhängigen Subgruppen (SG); Vergleich der Referenzmethoden TEE und Röntgen des Thorax (CXR); Angabe des medianen Abstands der ZVK-Spitze zur Carina im CXR in cm (25.;75. Perzentile). **RA:** rechter Vorhof

Die alterskorrelierte Auswertung der Thorax-Röntgenbilder (siehe Tabelle 4) zeigte teilweise Diskrepanzen gegenüber den Ergebnissen der TEE als Referenzmethode bei der Bewertung durch die befundenden Radiologen, ob eine korrekte ZVK-Lage vorliegt. In den unteren Altersgruppen 1 und 2 schätzt das CXR gegenüber der TEE die korrekte Lage niedriger (SG 1: 89,3 vs. 96,4%; SG 2: 88,6 vs. 91,1%), in den mittleren Gruppen 3 und 4 deutlich höher (SG 3: 100 vs. 93,3%; SG 4: 100 vs. 88,9%), in Gruppe 5 gleich (SG 5: 91,7 vs. 92,0%) und Gruppe 6 gleichsinnig vermindert, aber deutlich höher ein als in der TEE (SG 6: 90,0 vs. 70,0%).

In Abbildung 13 sind die prozentualen Anteile der Kinder mit korrekt platzierter ZVK-Spitze im Gesamtkollektiv und in den Subgruppen, bewertet durch die beiden zugrunde gelegten Referenzmethoden, TEE und CXR, graphisch gegeneinander aufgeführt.

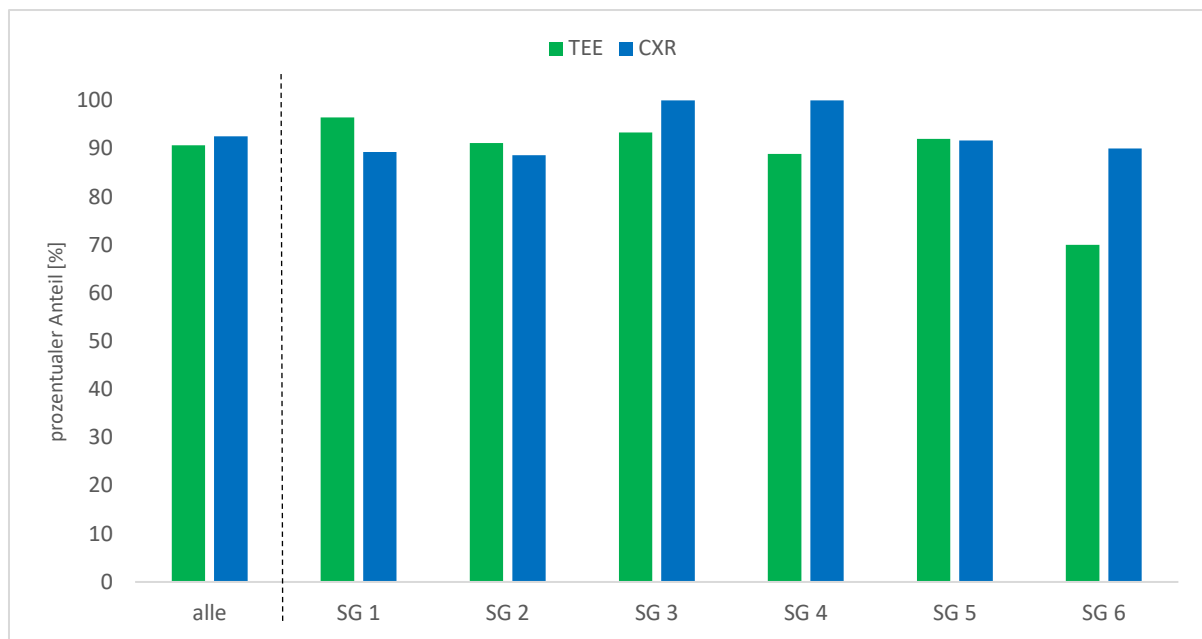


Abb 13: Prozentualer Anteil aller Kinder im Gesamtkollektiv und in den altersabhängigen Subgruppen (SG) mit als korrekt platziert gewerteter ZVK-Spitze im Vergleich der Referenzmethoden TEE und Röntgen des Thorax (CXR)

4. Diskussion

4.1 Ergebnisinterpretation

4.1.1 Primärer Endpunkt

Die TTE-gesteuerte ZVK-Anlage führte in 91% der Fälle (136/150) zu einer korrekten Positionierung der ZVK-Spitze. Die Hypothese der Studie, eine korrekte Platzierung des ZVK mittels TTE-gesteuerter Anlage in über 90% der Fälle zu erreichen, konnte bestätigt werden.

Generell bieten Kinder ein ausgezeichnetes Schallfenster zur Darstellung von RA und SVC in der TTE. In der unmittelbaren Vorgängerstudie am UKE von Thomsen et al., die den Nutzen einer zusätzlichen TTE-Untersuchung während einer US-gestützten ZVK-Anlage klar bestätigt, gelang in lediglich einem von 217 Fällen keine Einstellung des subxiphoidalen Blickes (Thomsen et al., 2023). Diese Ergebnisse konnten wir bestätigen. In unserer Studie gelang bei Durchführung der TTE sogar in 100% die subxiphoidale Einstellung, eine direkte Darstellung des RA-SVC-Übergangs in 96% der Fälle. Zu einem nahezu gleichen Ergebnis kamen Neumann et al., welche in einer Beobachtungsstudie mit 90 Kindern (medianes Alter: 11,5 Monate) in 86 von 90 Fällen (95,6%) die Katheterspitze per TTE visualisieren konnten. In 94,4% lag eine korrekte Position vor. Im Gegensatz zu unserer Studie verwendeten die Untersucher jedoch mehrere Schallfenster bei der TTE und nutzten das CXR als Referenzmethode (Neumann et al., 2024).

4.1.2 Sekundäre Endpunkte

In der Erhebung der sekundären Endpunkte erfassten wir systematisch die Visualisierbarkeit von Zielstrukturen, des Führungsdrahts und der Katheterspitze in TTE und TEE.

Wir fanden eine gute Darstellbarkeit des RA-SVC-Übergangs in 96% aller Untersuchungen. Der Seldinger-Draht ließ sich sogar in 99,3% in der TTE darstellen. Eine abweichende Fehllage in anderen Gefäßen konnte so bereits während des Anlageprozesses bemerkt und korrigiert werden.

Die von uns bei allen Punktionen angewandte Ausrichtung des Nadelschliffs nach ventral/medial (*bevel up position*) und die Ausrichtung des *J-Tip* des Führungsdrahtes nach medial erleichterten den Vorschub des Drahtes von der VJI in die SVC. Mehrere Studien bestätigten den Einfluss der *J-Tip*-Orientierung auf den Vorschub des Drahtes in Richtung SVC. So fanden sich in zwei Untersuchungen höhere Erfolgsraten bei kaudaler gegenüber kranialer Ausrichtung des *J-Tip* während der ZVK-Anlage über die rechte SCV (Park et al., 2005, Tripathi et al., 2005).

Optimalerweise lässt sich die Spitze des ZVK direkt visualisieren. Dies erwies sich jedoch als schwieriger als die Darstellung der umgebenden anatomischen Strukturen. In unserer Untersuchung ließ sich in der TTE die Katheterspitze nur in 2/3 der Fälle im subxiphoidalen Blick *direkt* darstellen. Zusätzlich jedoch war in 98,7% der Fälle eine *indirekte* Identifizierung der ZVK-Spitze durch Darstellung des *swirls (flush sign)* nach rascher Injektion eines NaCl-Bolus möglich.

Die in der TEE detektierten Fehllagen bezogen sich ausschließlich auf die Position der ZVK-Spitze als zu tief im RA (8/150 Fälle, 5,3%) bzw. zu kranial in der SVC liegend (6/150 Fälle, 4,0%). Die erfasste Rate an Fehllagen deckt sich mit Angaben aus vorangegangenen Studien, die in ihrer Methodik und Definition unkorrekter Lagen jedoch variieren (Alonso-Quintela et al., 2015, Baehner et al., 2021, Thomsen et al., 2023, Neumann et al., 2024).

Wir konnten in unserer Untersuchung eine gute TTE-Darstellbarkeit von Zielstrukturen (SVC, RA-SVC-Übergang), Draht und ZVK-Spitze zeigen. Dies ist zwingende Voraussetzung zur Nutzung der Methode für die intraprozedurale *tip navigation* und *tip location*.

4.1.3 Explorative Endpunkte – Thorax-Röntgen

Die Subgruppenanalyse zeigte teilweise Unterschiede in der Bewertung einer korrekten ZVK-Lage. In den beiden jüngsten Altersgruppen (Neugeborene und Säuglinge), wurden röntgenologisch häufiger Fehllagen beschrieben. Die diagnostischen Beschreibungen der befundenden Radiologen in den betreffenden Fällen verorteten die Spitze des ZVK – bei Lage kaudal der Carina – jeweils als zu tief vorgeschoben und in den RA projiziert. In der TEE zeigten sich die ZVK-Spitzen jedoch jeweils in korrekter Position in der SVC, knapp kranial des RA-SVC-Übergangs.

In den Subgruppen 3 bis 6 (Kinder ab einem Jahr bis ins Teenageralter) wurde die ZVK-Spitze dagegen in rund 6% der Fälle radiologisch häufiger als korrekt beurteilt, als dies durch die TEE-Kontrolle bestätigt werden konnte.

Hier zeigen sich die Grenzen des Röntgenverfahrens zur genauen ZVK-Lagebestimmung. Im Gegensatz zur Echokardiographie lässt sich der RA-SV-Übergang im CXR nicht sicher bestimmen. Durch Überlagerung mediastinaler Strukturen in der Projektion lassen sich auch bei guter Darstellbarkeit der Herzsilhouette oft keine genauen Abgrenzungen von RA und SVC vornehmen. Orientierung bietet die Carina, die im CXR nahezu immer detektierbar ist und als zuverlässige Landmarke zur radiologischen Einschätzung der Katheterspitzenposition dient (Rutherford et al., 1994; Yoon et al., 2005). Jedoch birgt eine alleinige Beurteilung der ZVK-Lage in Bezug auf die Carina das Risiko von Fehleinschätzungen – wie auch in unserer Studie beobachtet.

Eine radiologische Beschreibung der ZVK-Position als formal unkorrekt bei vermeintlicher Projektion auf den RA hat jedoch keine größere klinische Relevanz, wenn daraufhin ein leichter Rückzug in eine Position sicher in die SVC erfolgt. In unserer Untersuchung wurde in den 8 Fällen einer zu tiefen Lage im RA ein Rückzug durch die Radiologinnen und Radiologen empfohlen; tatsächlich wurde in keinem dieser Fälle während des Aufenthalts auf der Kinderintensivstation eine Korrektur durchgeführt. Im Gegensatz zum Rückzug stellt der nachträgliche Vorschub eines liegenden ZVK aus hygienischen Gründen niemals eine Option dar und ist obsolet.

Deutlich relevanter sind andere Faktoren wie die erhöhte Strahlenbelastung und der erheblich größere apparative, personelle und organisatorische Aufwand zur Durchführung eines CXR im Gegensatz zum US. Den praktisch entscheidendsten Faktor bildet die beschriebene verkürzte Dauer bis zur vollständigen Diagnostik der Lagekontrolle unter Anwendung ultraschallgeschützter Methoden.

Die kumulierte Strahlenbelastung, auch wenn sie in der Einzelaufnahme sehr gering ist, erhöht das karzinogene Lebenszeitrisiko, v.a. bei chronisch kranken Kindern mit einer antizipierten noch häufigen Notwendigkeit von Röntgenuntersuchungen im Verlauf des Lebens. Kinder, die einer diagnostischen Strahlenexposition ausgesetzt waren, haben ein höheres Lebenszeitrisiko für Krebserkrankungen als Personen, die im Erwachsenenalter exponiert wurden (IRCP, 2013). Die Strahlenschutzkommission

empfiehlt bei Kindern, jede Indikation kritisch zu hinterfragen und unnötige strahlenexponierende Untersuchungen zu vermeiden (SSK, 2022).

4.2 Altersabhängigkeit, Subgruppenanalyse

4.2.1 Altersabhängige Darstellbarkeit in der TTE

Die Auswertung der Subgruppen zeigte eine Altersabhängigkeit der Darstellbarkeit der ZVK-Spitze in der TTE mit deutlicher Abnahme ab dem Vorschulalter bis hin zur Gruppe der Teenager. Gleichsam sank der Anteil korrekter Platzierungen mit zunehmendem Alter mit der höchsten Rate bei Neugeborenen (96,4%) und der niedrigsten bei Teenagern (70,0%).

Eine wesentliche Ursache liegt in den anatomischen Veränderungen mit zunehmendem Alter. Bei kleinen Kindern ist die Thoraxwand dünner, sodass sie einfach von Ultraschallwellen durchdrungen werden kann (vgl. Park et al., 2014). Mit Zunahme der Körpergröße vergrößert sich der Abstand zwischen der Ultraschallsonde und den Zielstrukturen, was die Visualisierbarkeit negativ beeinträchtigt.

Nach der Geburt besteht physiologisch annähernd eine Horizontalstellung der Rippen, die sich im Laufe des Wachstums bis zum Adoleszenzalter zu einer Steilstellung der Rippen in dorsoventraler Ausrichtung verändert. Säuglings- und Kleinkindthoraces weisen eine hohe Compliance und Deformierbarkeit auf. Mit Zunahme des Alters und des Wachstums nimmt der Grad der Ossifikation im Thoraxbereich und damit deren Festigkeit zu. Ebenso steigt die Festigkeit abdomineller Strukturen und der Bauchdecke, was zu einer Verringerung der „Eindrückbarkeit“ des Epigastriums beim Platzieren der Ultraschallsonde in subxiphoidaler Ausrichtung führt. In unserer Untersuchung zeigte sich daher mit zunehmendem Alter eine eingeschränkte Angulationsfreiheit der Sonde, wodurch eine optimale Anlotung der Zielregion (RA-SVC-Übergang) im Teenageralter zunehmend erschwert war.

Eine Studie an Erwachsenen zur postprozeduralen ZVK-Lagekontrolle mittels TTE zeigte jedoch, dass auch bei Erwachsenen in subkostaler Anlotung ein ausreichendes Schallfenster zur Visualisierung von RA, SVC und RA-SVC-Übergang möglich ist. In lediglich 3/111 Fällen (2,7%) konnte keine Einstellung in subkostaler Position vorgenommen werden (Corradi et al., 2022).

4.2.2 Nutzung weiterer Schallfenster

In unserer Untersuchung wurde die TTE ausschließlich in subxiphoidaler Anlotung durchgeführt. Bei eingeschränkter Visualisierbarkeit der Zielstrukturen in einzelnen Einstellungen, bedingt durch individuelle Patientenfaktoren und den unterschiedlichen Erfahrungsstand der TTE-Anwender, kann die Verwendung verschiedener zusätzlicher Schallfenster von Nutzen sein.

In zwei prospektiven Beobachtungsstudien von Kim et al. bei ZVK-Anlagen über die VJI und SCV konnten unter Verwendung eines Mikrokonvexschallkopfes über ein supraklavikuläres Schallfenster Führungsdraht und ZVK-Spitze in der SVC dargestellt werden (Kim et al., 2016, Kim et al., 2015).

Eine Studiengruppe in Bonn nutzte die Kombination aus vier verschiedenen Schallkopfpositionen (parasternal kraniokaudal, parasternal transversal, Fossa jugularis, subkostal). In 25/27 Fällen (92,6%) war eine korrekte, radiographisch bestätigte Identifizierung und Positionierung der ZVK-Spitze möglich (Baehner et al., 2021). Eine Fortsetzungsstudie zeigte eine gute Visualisierung der ZVK-Spitze in 86 von 90 Fällen (95,6%) in kombinierter Anwendung der 4 Schallfenster. Im Vergleich war in über 85,6% der Fälle die beste Darstellbarkeit von RA und SVC in subkostaler Anlotung gegeben (Neumann et al., 2024).

In einer Untersuchung in Kiel an erwachsenen Patientinnen und Patienten wurde neben der subkostalen auch eine transhepatische Anlotung der TTE durchgeführt. Es ließen sich zwar nicht der RA-SVC-Übergang und die ZVK-Spitze selbst, jedoch in 91/94 Fällen (96,8%) sicher der Führungsdraht visualisieren. Bei Rückzug und Verschwinden der Drahtspitze aus dem jeweiligen Schallfenster wurde durch Messung der eingeführten Drahtlänge die Positionierung der ZVK-Spitze vorgenommen, welche im postinterventionellen Röntgen bestätigt werden konnte (Zick et al., 2020).

Corradi et al. (2022) verglichen in einem weiteren erwachsenen Kollektiv die Validität zweier TTE-Schallfenster mit einer TEE-Untersuchung. Ebenso wie in unserer Studie an Kindern erwies sich eine subkostale Anlotung als valide Methode zur Verifizierung einer korrekten ZVK-Spitze in der proximalen SVC. Im Gegensatz dazu zeigte sich die apikale Anlotung deutlich unterlegen und eignete sich nicht als verlässliche Methode zum Ausschluss von Katheterfehlagen.

4.3. Referenzmethoden

4.3.1 Thorax-Röntgen

Standard im klinischen Alltag zur Lageverifizierung eines ZVK ist nach wie vor die Röntgenaufnahme des Thorax. So bezieht sich auch die überwiegende Mehrzahl der vorangegangenen Studien zur TTE-gesteuerten Positionierung der ZVK-Spitze auf das Thorax-Röntgen als Referenzmethode zur Lageverifizierung (Park et al., 2014, Alonso-Quintela et al., 2015, Oliveira et al., 2020, Neumann et al., 2024).

Eine Vielzahl von Studien demonstrierte eine gute Übereinstimmung von TTE und CXR zur Detektion einer korrekt oder inkorrekt platzierten ZVK-Spitze, wie eine Metaanalyse von Smit et al. (2018) zeigte.

Trotz breiter klinischer Anwendung weist das Verfahren jedoch deutliche Limitationen auf. Röntgenologisch lassen sich die Begrenzungen von SVC und insbesondere des RA-SVC-Übergangs nicht sicher definieren, weshalb die Bestimmung der Position der ZVK-Spitze häufig unpräzise ist und einer hohen Interobserver-Variabilität unterliegt (Vesely, 2003). Üblicherweise dient die Carina als Referenzpunkt. Weitere radiologische Landmarken sind z.B. der rechte Hauptbronchus oder die Vertebraalkörper (Hirschl et al., 2020). Jedoch erweisen sich diese Landmarken oft als unzuverlässig. Eine computertomographische Untersuchung zeigte eine erhebliche Variabilität in der Länge des unteren Drittels der SVC und deren Beziehung zu benachbarten Strukturen (Claasz und Chorley, 2007).

Bei nicht akkurat anterior-posterior verlaufendem Strahlengang, bedingt durch Drehung der Patienten, v.a. bei bettseitigen Aufnahmen, kann es zudem zu einer Verdrehung der abgebildeten anatomischen Strukturen und infolgedessen zu Fehlinterpretationen und diagnostischen Fehlern in der radiologischen Beurteilung kommen. In über der Hälfte aller Aufnahmen auf neonatologischen Intensivstationen kommt es zu Rotationen bei der Akquise von Röntgenbildern des Thorax (Marais et al., 2023).

Mit der zusätzlichen Auswertung der Röntgenbilder in unserer Studie als explorativer Endpunkt konnten wir zeigen, dass sich das CXR gegenüber der TEE, vor allem bei Kindern <1 Jahr, als deutlich unzuverlässigere Methode zur Lagekontrolle erweist. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen früherer Studien. Wirsing et al. untersuchten anhand von 212 ZVK-Anlagen die Validität von Thorax-

Röntgenaufnahmen zur Lagekontrolle im Vergleich zu TEE-Untersuchungen. Die Spezifität der radiologischen Detektion atrialer Fehllagen schwankte zwischen 44 und 94%, abhängig vom Erfahrungslevel der befundenden Radiologen (Wirsing et al., 2008).

4.3.2 Transösophageale Echokardiographie

Als Referenzmethode zur Bewertung einer korrekt platzierten ZVK-Spitze diene in unserer Studie die TEE. Im Gegensatz zum CXR lassen sich in der TEE RA, SVC und der RA-SVC-Übergang *direkt* darstellen, ebenso die Position der ZVK-Spitze (Andropoulos et al., 1999, Ender et al., 2009).

Als sekundäre Endpunkte erfassten wir die TEE-Visualisierbarkeit von Zielstrukturen, Führungsdraht und Katheter. In allen 150 Fällen ließ sich der bikavale Blick einstellen und der Führungsdraht darstellen. In lediglich 1/150 Fällen (0,7%) war die Identifizierung des RA-SVC-Übergangs nicht möglich. Jedoch war die ZVK-Spitze bei allen 150 Kindern der Analysekohorte darstellbar, sodass wir die TEE als valide Referenzmethode nutzen konnten.

Die Invasivität und die methodenimmanenten Risiken der TEE schließen eine breite klinische Anwendung allein zur ZVK-Lageverifizierung ohne weitere diagnostische Indikation jedoch aus.

Dies ist die erste uns bekannte Studie zur TTE-gesteuerten ZVK-Anlage bei Kindern, in der die TEE als Referenzmethode zur Überprüfung einer korrekten Katheterspitze verwendet wurde. Ähnlich konzipierte Studien mit TEE als Goldstandard finden sich bisher nur bei Erwachsenen. Corradi et al. evaluierten die Validität einer TTE-Lagekontrolle der ZVK-Spitze über unterschiedliche Schallfenster bei 111 Patienten vor herzchirurgischen Eingriffen. Als Referenzmethode diene die TEE. Bei einer ausschließlich landmarkengestützten Punktion wurde die TTE im Gegensatz zu unserer Studie nicht zur *tip navigation*, sondern ausschließlich zur postprozeduralen *tip location* genutzt. Die TTE über ein subkostales Schallfenster erbrachte eine Übereinstimmung mit der TEE von 79% bei der Detektion von ZVK-Fehllagen (Corradi et al., 2022).

4.4 Limitationen und Ausblick

Limitationen unserer Studie liegen in der relativ kleinen Studienpopulation von 150 Kindern und dem monozentrischen Design der Studie. Bei Erhebung der einzelnen Messreihen durch wenige, aber unterschiedliche Anästhesistinnen und Anästhesisten mit unterschiedlicher Expertise in der Anwendung der Echokardiographie, unterliegt die Studie einem Einfluss von Interobserver-Variabilität. Multizentrische Untersuchungen mit einem insgesamt größeren Studienkollektiv könnten die gefundenen Ergebnisse verifizieren. Bei Durchführung mit weniger und äquivalent erfahrenen Anwendern können Einflussfaktoren in der Datenerhebung, wie ein zunehmender Trainingseffekt der Anwender im Verlauf der Studie, minimiert werden.

Die ZVK-Anlagen in unserer Studie wurden ausschließlich bei Kindern unter Allgemeinanästhesie in einem elektiven Setting durchgeführt. Unter diesen kontrollierten Bedingungen gestalteten sich die venöse Punktion und Durchführung der TTE einfach, was die Ergebnisse begünstigt haben könnte. Es ist anzunehmen, dass sich unter anderen klinischen Bedingungen, wie der ZVK-Anlage bei wachen Kindern oder im Notfallsetting, die TTE-gestützte Anlage deutlich schwieriger gestaltet.

Unsere Studie beschränkte sich auf Kinder bei herzchirurgischen Eingriffen, bei denen aus medizinischen Indikationen eine perioperative TEE durchgeführt wurde, wodurch eine unmittelbare Verifikation der ZVK-Lage als Referenz gegenüber der TTE-gesteuerten Anlage erfolgen konnte. Bei anderen Eingriffen ohne Indikation für eine TEE ist diese als Referenzmethode nicht anwendbar.

Im Hinblick auf die festgestellte Altersabhängigkeit bei der Darstellbarkeit der ZVK-Spitze und der Rate korrekter Katheterplatzierungen ergibt sich die Frage nach der Validität der Methode im höheren Kindes- und Erwachsenenalter. Hier bedarf es weiterer Untersuchungen mit Einschluss von mehr Patientinnen und Patienten in den entsprechenden Altersbereichen zur Überprüfung der Validität der TTE. Zudem bietet sich Raum für weitere Untersuchungen mit der Verwendung zusätzlicher Schallfenster als der in unserer Studie verwendeten Anlotung allein von subxiphoidal.

4.5 Fazit

In unserer Studie führte eine TTE-gesteuerte ZVK-Anlage bei kinderherzchirurgischen Eingriffen in 91% der Fälle zu einer korrekten Positionierung der ZVK-Spitze.

Auf Grundlage der bestehenden Evidenz (vgl. Singh et al., 2020) zur Nutzung der TTE und Anwendung eines strukturierten Protokolls (vgl. Zito Marinosci et al., 2023) konnten wir zeigen, dass die TTE-gesteuerte ZVK-Anlage bei Säuglingen und Kindern ein sicheres Verfahren zur korrekten Platzierung eines ZVK darstellt. Sie erweist sich als hilfreiche Methode zur Vermeidung von Katheterfehlagen und punktionsbedingten Komplikationen.

Neben der bereits etablierten breiten klinischen Anwendung ultraschallgestützter Punktionstechniken stellt die Verwendung der TTE ein schnelles, ubiquitär verfügbares Hilfsmittel dar. Als Teil einer „globalen Anwendung“ des US während der ZVK-Anlage bei Kindern, analog zu den Empfehlungen von Pittiruti et al. (2024), ermöglicht die direkte Darstellung von Zielstrukturen, Draht und Katheterspitze in der TTE eine intraprozedurale *tip navigation* und *tip location*.

Im Gegensatz zur Lageverifizierung per CXR, deren Durchführung und Auswertung erst nach abgeschlossener ZVK-Anlage erfolgen kann, bietet die Anwendung der TTE die zeitlich unmittelbare Möglichkeit der Lagekontrolle. Als sicheres, risikofreies Verfahren können Strahlenbelastungen durch Verzicht auf ein Röntgen des Thorax zur Lagekontrolle vermieden werden. Neben der Zeitersparnis bei der Lagekontrolle ist die Anwendung der TTE im Vergleich zum Röntgen zudem ökonomisch sinnvoll.

Voraussetzung für die effektive Anwendung ist die sichere Beherrschung der Technik durch die Anwender.

Vor allem bei Neugeborenen und kleinen Kindern erweist sich die TTE-gesteuerte Anlage als hilfreiche Methode. Auch außerhalb der Kardiochirurgie kann die Anwendung bei Kindern in Betracht gezogen werden.

5. Zusammenfassung

Kinder, die sich einer größeren Operation unterziehen müssen oder kritisch krank sind, benötigen häufig die Anlage eines zentralvenösen Katheters (ZVK). Zur Vermeidung schwerer anlagebedingter Komplikationen wie Herzrhythmusstörungen, strukturellen Herzverletzungen oder Herzbeuteltamponaden, ist eine korrekte Position der Katheterspitze in der Vena cava superior (SVC) oberhalb des cavoatrialen Überganges von immenser Bedeutung. Die transthorakale Echokardiographie (TTE) kann zur korrekten Positionierung der Katheterspitze verwendet werden. Die Genauigkeit der TTE bei der Beurteilung der Position der zentralvenösen Katheterspitze ist Gegenstand der vorliegenden Studie. Als Referenzmethode hierfür diente die transösophageale Echokardiographie (TEE), die im Gegensatz zum Thorax-Röntgen (CXR) eine direkte Visualisierung der ZVK-Spitze in der SVC ermöglicht.

Die Hypothese der Studie war, dass bei kinderherzchirurgischen Eingriffen die TTE-gesteuerte ZVK-Anlage in $\geq 90\%$ der Fälle zu einer korrekten Position der ZVK-Spitze unter Verwendung der TEE als Referenzmethode gelingt.

In der monozentrischen, prospektiven Beobachtungsstudie wurden 150 Kinder im Alter von 0 bis 14 Jahren untersucht, die sich einer elektiven herzchirurgischen OP unterzogen. Die TTE-gesteuerte Platzierung der ZVK-Spitze führte bei 136/150 Kindern (90,7%, 95%-CI: 85–94%) zu einer korrekten Positionierung.

Die direkte Darstellung der ZVK-Spitze in der TTE lag im Gesamtkollektiv bei 67,3% (101/150). Eine indirekte Identifizierung der ZVK-Spitze über die Detektion eines *swirls* (*flush sign*) in der proximalen SVC gelang in 98,7% (148/150) der Fälle.

Es zeigte sich eine deutliche Altersabhängigkeit. Der Anteil mit korrekt platzierter ZVK-Spitze war bei Kindern im Alter von 0–3 Monaten am höchsten (96,4%), im Alter von 13–14 Jahren am niedrigsten (70,0%).

Im Gegensatz zum CRX, welches im klinischen Alltag immer noch als Standardverfahren zur Lageverifizierung nach ZVK-Anlagen dient, geht die TTE nicht mit einer Strahlenbelastung einher, ist leicht erlernbar und ubiquitär verfügbar. Im Vergleich zum CXR führt die TTE als präzises bettseitiges Verfahren zu einer deutlichen zeitlichen Reduktion bis zum Ergebnis der Lageverifizierung und ist zudem ökonomisch sinnvoll.

Größere Studienpopulationen und die Anwendung weiterer Schallfenster als die hier allein verwendete subxiphoidale Anlotung bieten Raum für weitere Untersuchungen.

Vor allem bei Neugeborenen und kleinen Kindern erweist sich die TTE-gesteuerte ZVK-Anlage als hilfreiche Methode zur korrekten Platzierung der ZVK-Spitze. Auf die Durchführung einer zusätzlichen Röntgenaufnahme kann verzichtet werden. Die Anwendung der TTE lässt sich auch auf Kinder bei Eingriffen außerhalb der Kardiochirurgie übertragen.

Summary

Children who need to undergo major surgery or are critically ill often require the insertion of a central venous catheter (CVC). To avoid serious complications such as cardiac arrhythmias, structural heart damage, or cardiac tamponade, it is immensely important that the catheter tip is correctly positioned in the superior vena cava (SVC) above the cavoatrial junction. Transthoracic echocardiography (TTE) can be used to ensure correct positioning of the catheter tip. The accuracy of TTE in assessing the position of the central venous catheter tip is the subject of this study. Transesophageal echocardiography (TEE) served as the reference method for this, which, unlike chest X-ray (CXR), allows direct visualization of the CVC tip in the SVC.

The hypothesis of the study was that in pediatric cardiac surgery, TTE-guided CVC placement would result in correct positioning of the CVC tip in $\geq 90\%$ of cases when using TEE as the reference method.

In the single-center, prospective observational study, 150 children aged 0 to 14 years who underwent elective cardiac surgery were enrolled and examined. TTE-guided placement of the CVC tip resulted in correct positioning in 136/150 children (90.7%, 95% CI: 85–94%).

Direct visualization of the CVC tip in TTE was achieved in 67.3% (101/150) of the total cohort. Indirect identification of the CVC tip via detection of a swirl (flush sign) in the proximal SVC was successful in 98.7% (148/150) of cases.

There was a clear age dependency. The proportion with correctly placed CVC tips was highest in children aged 0–3 months (96.4%) and lowest in those aged 13–14 years (70.0%).

In contrast to chest X-rays, which are still the standard procedure for verifying the position of CVCs in everyday clinical practice, TTE does not involve radiation exposure, is easy to learn, and is widely available. Compared to CXR, TTE is a precise bedside procedure that significantly reduces the time required to verify the position and is also economically sensible.

Larger study populations and the use of additional ultrasound windows in addition to the subxiphoidal sound window used here, offer scope for further studies.

Especially in newborns and small children, TTE-guided CVC placement has proven to be a helpful method for correctly positioning the CVC tip and reducing misplacement. Additional X-ray diagnostics are thereby made redundant. The use of TTE can also be extended to children undergoing procedures outside of cardiac surgery.

6. Abkürzungsverzeichnis

ASA.....	American Society of Anesthesiologists
CI.....	Konfidenzintervall
CRBSI.....	<i>catheter-related bloodstream infection</i> , katheterassoziierte Blutstrominfektion
CVC.....	<i>central venous catheter</i> , Zentraler Venenkatheter
CXR.....	<i>chest X-ray</i> , Thorax-Röntgen
Fr.....	French
FV.....	<i>femoral vein</i> , Vena femoralis
ID.....	<i>identifier</i> , Identifikationsnummer
MAC.....	minimale alveoläre Konzentration
mSv.....	Millisievert
NaCl.....	Natriumchlorid
OD.....	<i>outer diameter</i> , Außendurchmesser
RA.....	<i>right atrium</i> , rechter Vorhof
SG.....	<i>subgroup</i> , Subgruppe
SCV.....	<i>subclavian vein</i> , Vena subclavia
SVC.....	<i>superior vena cava</i> , Vena cava superior
TEE.....	transösophageale Echokardiographie
TTE.....	transthorakale Echokardiographie
UKE.....	Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
US.....	Ultraschall
VJI.....	Vena jugularis interna
ZVK.....	zentraler Venenkatheter

7. Literaturverzeichnis

- ABLORDEPPEY, E. A., DREWRY, A. M., BEYER, A. B., THEODORO, D. L., FOWLER, S. A., FULLER, B. M. & CARPENTER, C. R. 2017. Diagnostic Accuracy of Central Venous Catheter Confirmation by Bedside Ultrasound Versus Chest Radiography in Critically Ill Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Crit Care Med*, 45, 715-724.
- AGHDASSI, S. J. S., HANSEN, S., DIAZ, L. A. P., GROPMANN, A., SAYDAN, S., GEFFERS, C., GASTMEIER, P., PIENING, B. & BEHNKE, M. 2024. Healthcare-Associated Infections and the Use of Antibiotics in German Hospitals: Results of the Point Prevalence Survey of 2022 and Comparison With Earlier Findings. *Deutsches Ärzteblatt International*, 121, 277.
- AIUM 1999. AIUM technical bulletin. Transducer manipulation. American Institute of Ultrasound in Medicine. *J Ultrasound Med*, 18, 169-75.
- ALBRECHT, K., BREITMEIER, D., PANNING, B., TRÖGER, H. D. & NAVE, H. 2006. The carina as a landmark for central venous catheter placement in small children. *Eur J Pediatr*, 165, 264-6.
- ALEXANDROU, E., SPENCER, T. R., FROST, S. A., MIFFLIN, N., DAVIDSON, P. M. & HILLMAN, K. M. 2014. Central venous catheter placement by advanced practice nurses demonstrates low procedural complication and infection rates--a report from 13 years of service*. *Crit Care Med*, 42, 536-43.
- ALONSO-QUINTELA, P., OULEGO-ERROZ, I., RODRIGUEZ-BLANCO, S., MUÑIZ-FONTAN, M., LAPÉÑA-LÓPEZ-DE ARMENTIA, S. & RODRIGUEZ-NUÑEZ, A. 2015. Location of the Central Venous Catheter Tip With Bedside Ultrasound in Young Children: Can We Eliminate the Need for Chest Radiography?*. *Pediatric Critical Care Medicine*, 16, e340-e345.
- AMERICAN SOCIETY OF ANESTHESIOLOGISTS 2010. Practice guidelines for perioperative transesophageal echocardiography. An updated report by the American Society of Anesthesiologists and the Society of Cardiovascular Anesthesiologists Task Force on Transesophageal Echocardiography. *Anesthesiology*, 112, 1084-96.
- AMERICAN SOCIETY OF ANESTHESIOLOGISTS 2020. Practice Guidelines for Central Venous Access 2020: An Updated Report by the American Society of Anesthesiologists Task Force on Central Venous Access: *. *Anesthesiology*, 132, 8-43.
- ANDROPOULOS, D. B., STAYER, S. A., BENT, S. T., CAMPOS, C. J., BEZOLD, L. I., ALVAREZ, M. & FRASER, C. D. 1999. A controlled study of transesophageal echocardiography to guide central venous catheter placement in congenital heart surgery patients. *Anesthesia & Analgesia*, 89, 65-70.
- ANNECKE, T. 2022. Perioperatives Monitoring. In: LARSEN, R., ANNECKE, T. & FINK, T. (eds.) *Anästhesie*. München: Urban & Fischer.
- ASLAMY, Z., DEWALD, C. L. & HEFFNER, J. E. 1998. MRI of Central Venous Anatomy: Implications for Central Venous Catheter Insertion. *Chest*, 114, 820-826.
- BAEHNER, T., ROHNER, M., HEINZE, I., SCHINDLER, E., WITTMANN, M., STRASSBERGER-NERSCHBACH, N., KIM, S. C. & VELTEN, M. 2021. Point-of-Care Ultrasound-Guided Protocol to Confirm Central Venous Catheter Placement in Pediatric Patients Undergoing Cardiothoracic Surgery: A Prospective Feasibility Study. *J Clin Med*, 10.
- BARONE, G., PITTIRUTI, M., BIASUCCI, D. G., ELISEI, D., IACOBONE, E., LA GRECA, A., ZITO MARINOSCI, G. & D'ANDREA, V. 2022. Neo-ECHOTIP: A structured protocol for ultrasound-based tip navigation and tip location during placement of central venous access devices in neonates. *The Journal of Vascular Access*, 23, 679-688.
- BEHNKE, M., AGHDASSI, S. J., HANSEN, S., DIAZ, L. A. P., GASTMEIER, P. & PIENING, B. 2017. The Prevalence of Nosocomial Infection and Antibiotic Use in German Hospitals. *Dtsch Arztebl International*, 114, 851-857.
- BEZZIO, S., SCOLFARO, C., BROGLIA, R., CALABRESE, R., MIGNONE, F., ABRUZZESE, P. A., AIDALA, E., VALORI, A., GRASSITELLI, S., RIZZO, A., IANNANDREA, S. & TOVO, P. A. 2009. Prospective incidence study of bloodstream infection in infants and children with central venous catheters after cardiac surgery in Italy. *Infect Control Hosp Epidemiol*, 30, 698-701.
- BISOGLI, S., DINI, C., OLIVINI, N., CIOFI, D., GIUSTI, F., CAPRILLI, S., GONZALEZ LOPEZ, J. R. & FESTINI, F. 2014. Perception of venipuncture pain in children suffering from chronic diseases. *BMC Res Notes*, 7, 735.
- BODENHAM CHAIR, A., BABU, S., BENNETT, J., BINKS, R., FEE, P., FOX, B., JOHNSTON, A. J., KLEIN, A. A., LANGTON, J. A., MCLURE, H. & TIGHE, S. Q. 2016. Association of

- Anaesthetists of Great Britain and Ireland: Safe vascular access 2016. *Anaesthesia*, 71, 573-85.
- BRASS, P., HELLMICH, M., KOLODZIEJ, L., SCHICK, G. & SMITH, A. 2015a. Ultrasound guidance versus anatomical landmarks for subclavian or femoral vein catheterization. Vol. 2017. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. John Wiley and Sons Ltd.
- BRASS, P., HELLMICH, M., KOLODZIEJ, L., SCHICK, G. & SMITH, A. F. 2015b. Ultrasound guidance versus anatomical landmarks for internal jugular vein catheterization. *Cochrane Database of Systematic Reviews*.
- BUTTY, Z., GOPWANI, J., MEHTA, S. & MARGOLIN, E. 2016. Horner's syndrome in patients admitted to the intensive care unit that have undergone central venous catheterization: a prospective study. *Eye (Lond)*, 30, 31-3.
- CAMPORESI, A., DIOTTO, V. & PEDERIVA, F. 2023. A worldwide survey on the variability in checking the tip position of pediatric central venous catheter. *Pediatric Anesthesia*, 33.
- CARUSO, L. J., GRAVENSTEIN, N., LAYON, A. J., PETERS, K. & GABRIELLI, A. 2002. A Better Landmark for Positioning a Central Venous Catheter. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, 17, 331-334.
- CHEN, Y. J., CHUNG, S. C. & LIU, Y. C. 2018. Delayed Malposition of Central Venous Catheter Induced Mediastinum Hematoma With Innominate Vein Perforation. *Asian J Anesthesiol*, 56, 66-69.
- CHUI, J., SAEED, R., JAKOBOWSKI, L., WANG, W., ELDEYASTY, B., ZHU, F., FOCHESTO, L., LAVI, R. & BAINBRIDGE, D. 2018. Is Routine Chest X-Ray After Ultrasound-Guided Central Venous Catheter Insertion Choosing Wisely?: A Population-Based Retrospective Study of 6,875 Patients. *Chest*, 154, 148-156.
- CITLA SRIDHAR, D., ABOU-ISMAIL, M. Y. & AHUJA, S. P. 2020. Central venous catheter-related thrombosis in children and adults. *Thrombosis Research*, 187, 103-112.
- CLAASZ, A. A. & CHORLEY, D. P. 2007. A Study of the Relationship of the Superior Vena Cava to the Bony Landmarks of the Sternum in the Supine Adult: Implications for Magnetic Guidance Systems. *Journal of the Association for Vascular Access*, 12, 138-139.
- CORRADI, F., GUARRACINO, F., SANTORI, G., BRUSASCO, C., TAVAZZI, G., VIA, G., MONGODI, S., MOJOLI, F., BIAGINI, R. U. D., ISIRDI, A., DAZZI, F., ROBBA, C., VETRUGNO, L., FORFORI, F., BOLOGNA, M. L., CARDU, A., CROCETTI, L., CUNDARI, F., DEL FRATE, E., FERRARI, S., LAFFI, A., MARRUCCI, E., MONFRONI, M., PIAGNANI, C., TADDEI, E., TECCHI, L., TEMPINI, S., TOGNARELLI, D., VULLO, C. & GROUP, U. R. 2022. Ultrasound localization of central vein catheter tip by contrast-enhanced transthoracic ultrasonography: a comparison study with trans-esophageal echocardiography. *Critical Care*, 26, 113.
- COSTELLO, J. M., MORROW, D. F., GRAHAM, D. A., POTTER-BYNOE, G., SANDORA, T. J. & LAUSSEN, P. C. 2008. Systematic intervention to reduce central line-associated bloodstream infection rates in a pediatric cardiac intensive care unit. *Pediatrics*, 121, 915-23.
- COTOGNI, P., PITTIRUTI, M., BARBERO, C., MONGE, T., PALMO, A. & BOGGIO BERTINET, D. 2013. Catheter-related complications in cancer patients on home parenteral nutrition: a prospective study of over 51,000 catheter days. *JPEN J Parenter Enteral Nutr*, 37, 375-83.
- DARLING, J. C., NEWELL, S. J., MOHAMDEE, O., UZUN, O., CULLINANE, C. J. & DEAR, P. R. 2001. Central venous catheter tip in the right atrium: a risk factor for neonatal cardiac tamponade. *J Perinatol*, 21, 461-4.
- DE JONGE, R. C., POLDERMAN, K. H. & GEMKE, R. J. 2005. Central venous catheter use in the pediatric patient: mechanical and infectious complications. *Pediatr Crit Care Med*, 6, 329-39.
- DE SOUZA, T. H., BRANDAO, M. B., NADAL, J. A. H. & NOGUEIRA, R. J. N. 2018. Ultrasound guidance for pediatric central venous catheterization: a meta-analysis. *Pediatrics*, 142.
- DESAI, S. N., DASAR, S. K. & MITHALI, V. 2017. Malposition of the Central Venous Catheter: A Diagnostic Dilemma. *Indian J Crit Care Med*, 21, 235-237.
- DÖBEL, K. U. & BRAUN, U. 1999. Bilateraler Hydrothorax mit Hydromediastinum nach akzidenteller Katheterdislokation. *Der Anaesthesist*, 48, 900-903.
- DOYLE, S. C., BERGIN, N. M., YOUNG, R., ENGLAND, A. & MCENTEE, M. F. 2022. Diagnostic accuracy of ultrasound for localising peripherally inserted central catheter tips in infants in the neonatal intensive care unit: a systematic review and meta-analysis. *Pediatr Radiol*, 52, 2421-2430.
- DURAN-GEHRING, P. E., GUIRGIS, F. W., MCKEE, K. C., GOGGANS, S., TRAN, H., KALYNYCH, C. J. & WEARS, R. L. 2015. The bubble study: ultrasound confirmation of central venous catheter placement. *The American Journal of Emergency Medicine*, 33, 315-319.
- DZIERZEGA, M., OSSOWSKA, M., CHMIEL, D., WIECZOREK, A. & BALWIERZ, W. 2014. The malposition of central venous catheters in children. *Pol J Radiol*, 79, 275-8.

- EBRAHIMI, A., YOUSEFIFARD, M., MOHAMMAD KAZEMI, H., RASOULI, H. R., ASADY, H., MOGHADAS JAFARI, A. & HOSSEINI, M. 2014. Diagnostic Accuracy of Chest Ultrasonography versus Chest Radiography for Identification of Pneumothorax: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Tanaffos*, 13, 29-40.
- ENDER, J., ERDOES, G., KROHMER, E., OLTHOFF, D. & MUKHERJEE, C. 2009. Transesophageal Echocardiography for Verification of the Position of the Electrocardiographically-Placed Central Venous Catheter. *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia*, 23, 457-461.
- GARCIA, E. G., WIJDICKS, E. F. & YOUNGE, B. R. 1994. Neurologic complications associated with internal jugular vein cannulation in critically ill patients: a prospective study. *Neurology*, 44, 951-2.
- GEFFERS, C. & GASTMEIER, P. 2009. Häufigkeit und Vermeidbarkeit nosokomialer Infektionen in der Intensivmedizin. *Intensiv-News*, 4, 20-21.
- GEKLE, R., DUBENSKY, L., HADDAD, S., BRAMANTE, R., CIRILLI, A., CATLIN, T., PATEL, G., D'AMORE, J., SLESINGER, T. L., RAO, C., MODAYIL, V. & NELSON, M. 2015. Saline Flush Test: Can Bedside Sonography Replace Conventional Radiography for Confirmation of Above-the-Diaphragm Central Venous Catheter Placement? *J Ultrasound Med*, 34, 1295-9.
- GIBSON, F. & BODENHAM, A. 2013. Misplaced central venous catheters: applied anatomy and practical management. *British Journal of Anaesthesia*, 110, 333-346.
- GIORDANO, P., SARACCO, P., GRASSI, M., LUCIANI, M., BANOV, L., CARRARO, F., CROCOLI, A., CESARO, S., ZANAZZO, G. A. & MOLINARI, A. C. 2015. Recommendations for the use of long-term central venous catheter (CVC) in children with hemato-oncological disorders: management of CVC-related occlusion and CVC-related thrombosis. On behalf of the coagulation defects working group and the supportive therapy working group of the Italian Association of Pediatric Hematology and Oncology (AIEOP). *Ann Hematol*, 94, 1765-76.
- GOUDIE, A., DYNAN, L., BRADY, P. W. & RETTIGANTI, M. 2014. Attributable cost and length of stay for central line-associated bloodstream infections. *Pediatrics*, 133, e1525-32.
- GRECA, A. L., IACOBONE, E., ELISEI, D., BIASUCCI, D. G., D'ANDREA, V., BARONE, G., ZITO MARINOSCI, G. & PITTIRUTI, M. 2023. ECHOTIP: A structured protocol for ultrasound-based tip navigation and tip location during placement of central venous access devices in adult patients. *The Journal of Vascular Access*, 24, 535-544.
- GREIM, C., SCHMIDT, C., SCHIRMER, U., VAN AKEN, H. & ROEWER, N. 2011. Aktuelle Empfehlungen zum perioperativen Einsatz der transösophagealen Echokardiographie in der Anästhesiologie. *Anästh Intensivmed*, 52, 73-76.
- GRUNERT, J.-H. 2019. Dosisbegriffe und Dosimetrie in der Röntgendiagnostik. *Strahlenschutz für Röntgendiagnostik und Computertomografie: Grundkurs und Spezialkurse*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- HANSEN, E., KUTZ, N., KEYL, C. & TAEGER, K. 1998. [Control of central venous catheter position by ECG recording with the guide wire]. *Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther*, 33, 110-3.
- HELLERSTEIN, H. K., PRITCHARD, W. H. & LEWIS, R. L. 1949. Recording of Intracavity Potentials Through a Single Lumen, Saline Filled Cardiac Catheter. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*, 71, 58-61.
- HIRSCHL, J. R., GADEPALLI, S. K., DERSTINE, B. A., HOLCOMBE, S. A., SMITH, E. A., WANG, S. C., EHRLICH, P. F. & JARBOE, M. D. 2020. CT validation of SVC-RA junction location for pediatric central line placement: is vertebral bodies below the carina accurate? *Pediatr Surg Int*, 36, 1055-1060.
- HODZIC, S., GOLIC, D., SMAJIC, J., SIJERCIC, S., UMIHANIC, S. & UMIHANIC, S. 2014. Complications Related to Insertion and Use of Central Venous Catheters (CVC). *Med Arch*, 68, 300-3.
- ICH. 2016. *INTERNATIONAL COUNCIL FOR HARMONISATION OF TECHNICAL REQUIREMENTS FOR PHARMACEUTICALS FOR HUMAN USE. 2016 Integrated addendum to ICH E6(R1): guideline for good clinical practice E6(R2). Step 4 version dated 9 November 2016* [Online]. ICH. Available: https://database.ich.org/sites/default/files/E6_R2_Addendum.pdf [Accessed 06 January 2025].
- IRCP 2013. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Radiological protection in paediatric diagnostic and interventional radiology. *ICRP publication*, 121, 1-63.
- JENSSEN, C., BRKLJACIC, B., HOCKE, M., IGNEE, A., PISCAGLIA, F., RADZINA, M., SIDHU, P. S. & DIETRICH, C. F. 2016. EFSUMB Guidelines on Interventional Ultrasound (INVUS), Part VI - Ultrasound-Guided Vascular Interventions. *Ultraschall Med*, 37, 473-476.
- KATHERIA, A. C., FLEMING, S. E. & KIM, J. H. 2013. A randomized controlled trial of ultrasound-guided peripherally inserted central catheters compared with standard radiograph in neonates. *Journal of Perinatology*, 33, 791-794.

- KIM, S.-C., GRÄFF, I., SOMMER, A., HOEFT, A. & WEBER, S. 2016. Ultrasound-guided Supraclavicular Central Venous Catheter Tip Positioning via the Right Subclavian Vein using a Microconvex Probe. *The Journal of Vascular Access*, 17, 435-439.
- KIM, S.-C., HEINZE, I., SCHMIEDEL, A., BAUMGARTEN, G., KNUEFERMANN, P., HOEFT, A. & WEBER, S. 2015. Ultrasound confirmation of central venous catheter position via a right supraclavicular fossa view using a microconvex probe: An observational pilot study. *European Journal of Anaesthesiology | EJA*, 32, 29-36.
- KONO, H., SHAKO, D., SATO, Y. & KAWASAKI, T. 2022. Iatrogenic Thoracic Duct Injury via the Right Internal Jugular Vein: A Case Report. *J Med Cases*, 13, 253-256.
- KORSTEN, P., MAVROPOULOU, E., WIENBECK, S., ELLENBERGER, D., PATSCHAN, D., ZEISBERG, M., VASKO, R., TAMPE, B. & MÜLLER, G. A. 2018. The "rapid atrial swirl sign" for assessing central venous catheters: Performance by medical residents after limited training. *PLoS One*, 13, e0199345.
- LANZA, C., RUSSO, M. & FABRIZZI, G. 2006. Central venous cannulation: are routine chest radiographs necessary after B-mode and colour Doppler sonography check? *Pediatr Radiol*, 36, 1252-6.
- LAU, C. S. & CHAMBERLAIN, R. S. 2016. Ultrasound-guided central venous catheter placement increases success rates in pediatric patients: a meta-analysis. *Pediatr Res*, 80, 178-84.
- LORENTE, L., HENRY, C., MARTÍN, M. M., JIMÉNEZ, A. & MORA, M. L. 2005. Central venous catheter-related infection in a prospective and observational study of 2,595 catheters. *Crit Care*, 9, R631-5.
- MADDALI, M. M., AL ALIYANI, K. R. S., ARORA, N. R. & SATHIYA, P. M. 2022. Central Venous Catheter Tip Malposition After Internal Jugular Vein Cannulation in Pediatric Patients With Congenital Heart Disease. *J Cardiothorac Vasc Anesth*, 36, 2483-2487.
- MALE, C., JULIAN, J. A., MASSICOTTE, P., GENT, M., MITCHELL, L. & FOR THE, P. S. G. 2005. Significant association with location of central venous line placement and risk of venous thrombosis in children. *Thromb Haemost*, 94, 516-521.
- MARAIS, J., VENKATAKRISHNA, S. S. B., CALLE-TORO, J. S., GOUSSARD, P., EBER, E. & ANDRONIKOU, S. 2023. Patient rotation chest X-rays and the consequences of misinterpretation in paediatric radiology. *Paediatric Respiratory Reviews*, 47, 41-50.
- MCGEE, D. C. & GOULD, M. K. 2003. Preventing complications of central venous catheterization. *N Engl J Med*, 348, 1123-33.
- MILLER, J. W., VU, D. N., CHAI, P. J., KREUTZER, J. H., JOHN, J. B., VENER, D. F. & JACOBS, J. P. 2013. Upper body central venous catheters in pediatric cardiac surgery. *Paediatr Anaesth*, 23, 980-8.
- MOORE, K. J., GREENCORN, D., SMITH, N., LANGLEY, J. M. & KULKARNI, K. 2022. Mechanical complications of central venous catheters in children: A cohort study. *Infect Control Hosp Epidemiol*, 43, 1634-1640.
- NAGASHIMA, G., KIKUCHI, T., TSUYUZAKI, H., KAWANO, R., TANAKA, H., NEMOTO, H., TAGUCHI, K. & UGAJIN, K. 2006. To reduce catheter-related bloodstream infections: is the subclavian route better than the jugular route for central venous catheterization? *J Infect Chemother*, 12, 363-5.
- NEUMANN, C., BREIL, M., SCHILD, A., SCHENK, A., JAKOBS, P., MIKUS, M. & SCHINDLER, E. 2024. Central venous catheter tip positioning using ultrasound in pediatric patients-A prospective observational study. *Paediatr Anaesth*, 34, 551-558.
- NGUYEN, J. 2016. Ultrasonography for Central Catheter Placement in the Neonatal Intensive Care Unit-A Review of Utility and Practicality. *Am J Perinatol*, 33, 525-30.
- NIEDNER, M. F., HUSKINS, W. C., COLANTUONI, E., MUSCHELLI, J., HARRIS, J. M., 2ND, RICE, T. B., BRILLI, R. J. & MILLER, M. R. 2011. Epidemiology of central line-associated bloodstream infections in the pediatric intensive care unit. *Infect Control Hosp Epidemiol*, 32, 1200-8.
- NOTHEISEN, T., EICHHOLZ, R., ARMBRUSTER, W., WEBER, S. & GREIM, C. 2016. Nadelspitzennavigation 2.0. *Aktuelle Techniken für Gefäßpunktionen und ultraschallgesteuerte Regionalanästhesie. Anästh Intensivmed*, 57, 112-119.
- NOWAK, J. E., BRILLI, R. J., LAKE, M. R., SPARLING, K. W., BUTCHER, J., SCHULTE, M. & WHEELER, D. S. 2010. Reducing catheter-associated bloodstream infections in the pediatric intensive care unit: Business case for quality improvement. *Pediatric Critical Care Medicine*, 11, 579-587.
- OLIVEIRA, L., PILZ, L., TOGNOLO, C. M., BISCHOFF, C., BECKER, K. A., OLIVEIRA, G. G., NEVES, P. J. F., FACHIN, C. G., AGULHAM, M. A. & DIAS, A. 2020. Comparison between ultrasonography and X-ray as evaluation methods of central venous catheter positioning and their complications in pediatrics. *Pediatr Surg Int*, 36, 563-568.

- PARIENTI, J. J., MONGARDON, N., MÉGARBANE, B., MIRA, J. P., KALFON, P., GROS, A., MARQUÉ, S., THUONG, M., POTTIER, V., RAMAKERS, M., SAVARY, B., SEGUIN, A., VALETTE, X., TERZI, N., SAUNEUF, B., CATTOIR, V., MERMEL, L. A. & DU CHEYRON, D. 2015. Intravascular Complications of Central Venous Catheterization by Insertion Site. *N Engl J Med*, 373, 1220-9.
- PARK, H. P., JEON, Y., HWANG, J. W., HAN, S. H., BAHK, J. H. & OH, Y. S. 2005. Influence of orientations of guidewire tip on the placement of subclavian venous catheters. *Acta Anaesthesiol Scand*, 49, 1460-3.
- PARK, Y. H., LEE, J. H., BYON, H. J., KIM, H. S. & KIM, J. T. 2014. Transthoracic echocardiographic guidance for obtaining an optimal insertion length of internal jugular venous catheters in infants. *Paediatr Anaesth*, 24, 927-32.
- PITTIRUTI, M., ANNETTA, M. G. & D'ANDREA, V. 2024. Point-of-care ultrasound for vascular access in neonates and children. *European Journal of Pediatrics*, 183, 1073-1078.
- PITTIRUTI, M., BERTOLLO, D., BRIGLIA, E., BUONONATO, M., CAPOZZOLI, G., DE SIMONE, L., LA GRECA, A., PELAGATTI, C. & SETTE, P. S. 2012. The Intracavitary ECG Method for Positioning the Tip of Central Venous Catheters: Results of an Italian Multicenter Study. *The Journal of Vascular Access*, 13, 357-365.
- PRICE, V. E., CARCAO, M., CONNOLLY, B., CHAIT, P., DANEMAN, A., TEMPLE, M., STAIN, A. M., SUNG, L., AL-TRALBOSI, H. & BLANCHETTE, V. S. 2004. A prospective, longitudinal study of central venous catheter-related deep venous thrombosis in boys with hemophilia. *J Thromb Haemost*, 2, 737-42.
- REY, C., ÁLVAREZ, F., DE LA RUA, V., MEDINA, A., CONCHA, A., DÍAZ, J. J., MENÉNDEZ, S., ARCOS, M. L. & MAYORDOMO-COLUNGA, J. 2009. Mechanical complications during central venous cannulations in pediatric patients. *Intensive Care Medicine*, 35, 1438-1443.
- REYES, J. A., HABASH, M. L. & TAYLOR, R. P. 2012. Femoral central venous catheters are not associated with higher rates of infection in the pediatric critical care population. *Am J Infect Control*, 40, 43-7.
- ROSSETTI, F., PITTIRUTI, M., LAMPERTI, M., GRAZIANO, U., CELENTANO, D. & CAPOZZOLI, G. 2015. The intracavitary ECG method for positioning the tip of central venous access devices in pediatric patients: results of an Italian multicenter study. *J Vasc Access*, 16, 137-43.
- RUESCH, S., WALDER, B. & TRAMÈR, M. R. 2002. Complications of central venous catheters: Internal jugular versus subclavian access—A systematic review. *Critical Care Medicine*, 30, 454-460.
- RUPP, S. M., APFELBAUM, J. L., BLITT, C., CAPLAN, R. A., CONNIS, R. T., DOMINO, K. B., FLEISHER, L. A., GRANT, S., MARK, J. B., MORRAY, J. P., NICKINOVICH, D. G. & TUNG, A. 2012. Practice guidelines for central venous access: a report by the American Society of Anesthesiologists Task Force on Central Venous Access. *Anesthesiology*, 116, 539-73.
- RUTHERFORD, J. S., MERRY, A. F. & OCCLESHAW, C. J. 1994. Depth of central venous catheterization: an audit of practice in a cardiac surgical unit. *Anaesth Intensive Care*, 22, 267-71.
- SAUGEL, B., SCHEEREN, T. W. L. & TEBOUL, J. L. 2017. Ultrasound-guided central venous catheter placement: a structured review and recommendations for clinical practice. *Crit Care*, 21, 225.
- SAXENA, P., SHANKAR, S., KUMAR, V. & NAITHANI, N. 2015. Bilateral chylothorax as a complication of internal jugular vein cannulation. *Lung India*, 32, 370-4.
- SCHUMMER, W., HERRMANN, S., SCHUMMER, C., FUNKE, F., STEENBECK, J., FUCHS, J., UHLIG, T. & REINHART, K. 2003. Intra-atrial ECG is not a reliable method for positioning left internal jugular vein catheters. *Br J Anaesth*, 91, 481-6.
- SCHUMMER, W., SCHUMMER, C. & REINHOLD, L. 2002. Differenzialdiagnose linksthorakaler Venenkatheter am Beispiel einer persistierenden linken oberen Hohlvene. *Der Anaesthesist*, 51, 726-730.
- SCHUMMER, W., SCHUMMER, C., SCHELENZ, C., BRANDES, H., STOCK, U., MÜLLER, T., LEDER, U. & HÜTTEMANN, E. 2004. Central venous catheters--the inability of 'intra-atrial ECG' to prove adequate positioning. *Br J Anaesth*, 93, 193-8.
- SCHUMMER, W., SCHUMMER, C., SCHELENZ, C., SCHMIDT, P., FRÖBER, R. & HÜTTEMANN, E. 2005. Optimierte Positionierung zentraler Venenkatheter durch eine modifizierte Anwendung der intravasalen Elektrokardiographie. *Der anaesthesist*, 10, 983-990.
- SELDINGER, S. I. 1953. Catheter replacement of the needle in percutaneous arteriography; a new technique. *Acta Radiol (Stockh)*, 39, 368-76.
- SINGH, Y., TISSOT, C., FRAGA, M. V., YOUSEF, N., CORTES, R. G., LOPEZ, J., SANCHEZ-DE-TOLEDO, J., BRIERLEY, J., COLUNGA, J. M., RAFFAJ, D., DA CRUZ, E., DURAND, P., KENDERESSY, P., LANG, H. J., NISHISAKI, A., KNEYBER, M. C., TISSIERES, P., CONLON, T. W. & DE LUCA, D. 2020. International evidence-based guidelines on Point of

- Care Ultrasound (POCUS) for critically ill neonates and children issued by the POCUS Working Group of the European Society of Paediatric and Neonatal Intensive Care (ESPNIC). *Crit Care*, 24, 65.
- SLONIM, A. D., KURTINES, H. C., SPRAGUE, B. M. & SINGH, N. 2001. The costs associated with nosocomial bloodstream infections in the pediatric intensive care unit. *Pediatric Critical Care Medicine*, 2, 170-174.
- SMIT, J. M., RAADSEN, R., BLANS, M. J., PETJAK, M., VAN DE VEN, P. M. & TUINMAN, P. R. 2018. Bedside ultrasound to detect central venous catheter misplacement and associated iatrogenic complications: a systematic review and meta-analysis. *Crit Care*, 22, 65.
- SMITHERMAN, A. B., ALEXANDER, T., CONNELLY, M., SNAVELY, A. C., WESTON, B. W., LILES, E. A. & STEINER, M. J. 2015. The incidence of catheter-associated venous thrombosis in noncritically ill children. *Hosp Pediatr*, 5, 59-66.
- SSK. 2022. *Empfehlung der Strahlenschutzkommission (SSK), Bildgebende Diagnostik bei Kindern, verabschiedet in der 321. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 22./23. September 2022* [Online]. Available: https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse/DE/2022/2022-09-22_Empf_Bildgebende_Diagnostik_Kind.pdf?__blob=publicationFile&v=16 [Accessed 04.06.2025].
- STRIEBEL, H. W. 2019. Zentraler Venenkatheter. In: STRIEBEL, H. W. (ed.) *Die Anästhesie*. 4th ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- TAKEMOTO, C. M., SOHI, S., DESAI, K., BHARAJ, R., KHANNA, A., MCFARLAND, S., KLAUS, S., IRSHAD, A., GOLDENBERG, N. A., STROUSE, J. J. & STREIFF, M. B. 2014. Hospital-associated venous thromboembolism in children: incidence and clinical characteristics. *J Pediatr*, 164, 332-8.
- THOMSEN, K. K., FRITZ, M., ZÖLLNER, C., KESSLER, T., SAUGEL, B. & SCHULTE-UENTROP, L. 2025. Transthoracic Echocardiography for Central Venous Catheter Tip Positioning in Children: An Observational Study Using Transesophageal Echocardiography as Reference Method. *Paediatr Anaesth*, 35, 310-315.
- THOMSEN, K. K., KRAUSE, L., BREITFELD, P., KOUZ, K., HERRMANN, J., CHINDRIS, V., SAUGEL, B. & SCHULTE-UENTROP, L. 2023. Additionally using transthoracic echocardiography during ultrasound-guided jugular central venous catheter placement and the odds of catheter misplacement in children: A before-and-after study. *Paediatr Anaesth*, 33, 89-90.
- TIMSIT, J. F., BOUADMA, L., MIMOZ, O., PARIENTI, J. J., GARROUSTE-ORGEAS, M., ALFANDARI, S., PLANTEFEVE, G., BRONCHARD, R., TROCHE, G., GAUZIT, R., ANTONA, M., CANET, E., BOHE, J., HERRAULT, M. C., SCHWEBEL, C., RUCKLY, S., SOUWEINE, B. & LUCET, J. C. 2013. Jugular versus femoral short-term catheterization and risk of infection in intensive care unit patients. Causal analysis of two randomized trials. *Am J Respir Crit Care Med*, 188, 1232-9.
- TRIPATHI, M., DUBEY, P. K. & AMBESH, S. P. 2005. Direction of the J-Tip of the Guidewire, in Seldinger Technique, Is a Significant Factor in Misplacement of Subclavian Vein Catheter: A Randomized, Controlled Study. *Anesthesia & Analgesia*, 100, 21-24.
- TROIANOS, C. A., HARTMAN, G. S., GLAS, K. E., SKUBAS, N. J., EBERHARDT, R. T., WALKER, J. D. & REEVES, S. T. 2011. Guidelines for performing ultrasound guided vascular cannulation: recommendations of the American Society of Echocardiography and the Society of Cardiovascular Anesthesiologists. *J Am Soc Echocardiogr*, 24, 1291-318.
- TSCHIRSCHWITZ, B., FRIEDRICH, S. & NOWAK, A. 2022. Akute respiratorische Insuffizienz bei akzidentellem Infusiothorax durch Fehllage eines zentralvenösen Katheters. *Anaesthesiologie & Intensivmedizin*, 63.
- VEGAS, A., WELLS, B., BRAUM, P., DENAULT, A., MILLER HANCE, W. C., KAUFMAN, C., PATEL, M. B. & SALVATORI, M. 2025. Guidelines for Performing Ultrasound-Guided Vascular Cannulation: Recommendations of the American Society of Echocardiography. *Journal of the American Society of Echocardiography*, 38, 57-91.
- VESELY, T. M. 2003. Central Venous Catheter Tip Position: A Continuing Controversy. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 14, 527-534.
- VON ELM, E., ALTMAN, D. G., EGGER, M., POCOCK, S. J., GÖTZSCHE, P. C. & VANDENBROUCKE, J. P. 2008. The Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology (STROBE) statement: guidelines for reporting observational studies. *J Clin Epidemiol*, 61, 344-9.
- WALL, C., MOORE, J. & THACHIL, J. 2016. Catheter-related thrombosis: A practical approach. *Journal of the Intensive Care Society*, 17, 160-167.

- WEEKES, A. J., JOHNSON, D. A., KELLER, S. M., EFUNE, B., CAREY, C., ROZARIO, N. L. & NORTON, H. J. 2014. Central vascular catheter placement evaluation using saline flush and bedside echocardiography. *Acad Emerg Med*, 21, 65-72.
- WEIL, B. R., LADD, A. P. & YODER, K. 2010. Pericardial effusion and cardiac tamponade associated with central venous catheters in children: an uncommon but serious and treatable condition. *J Pediatr Surg*, 45, 1687-92.
- WILSON, M. Z., RAFFERTY, C., DEETER, D., COMITO, M. A. & HOLLENBEAK, C. S. 2014. Attributable costs of central line-associated bloodstream infections in a pediatric hematology/oncology population. *American Journal of Infection Control*, 42, 1157-1160.
- WILSON, R. G. & GAER, J. A. 1988. Right atrial electrocardiography in placement of central venous catheters. *Lancet*, 1, 462-3.
- WIRSING, M., SCHUMMER, C., NEUMANN, R., STEENBECK, J., SCHMIDT, P. & SCHUMMER, W. 2008. Is traditional reading of the bedside chest radiograph appropriate to detect intraatrial central venous catheter position? *Chest*, 134, 527-533.
- WORLD MEDICAL ASSOCIATION 2013. World Medical Association Declaration of Helsinki: ethical principles for medical research involving human subjects. *Jama*, 310, 2191-4.
- YESILBAS, O., SEVKETOGLU, E., KIHTIR, H. S., TALIP PETMEZCI, M., AKCAY, N., KOCOGLU BARLAS, U. & PALABIYIK, F. 2018. Use of Bedside Ultrasonography and Saline Flush Technique for Evaluation of Central Venous Catheter Placement in Children. *Artif Organs*, 42, 1157-1163.
- YOON, S. Z., SHIN, J. H., HAHN, S., OH, A. Y., KIM, H. S., KIM, S. D. & KIM, C. S. 2005. Usefulness of the carina as a radiographic landmark for central venous catheter placement in paediatric patients. *Br J Anaesth*, 95, 514-7.
- YOSHIMURA, M., NAKANISHI, T., SAKAMOTO, S. & TORIUMI, T. 2016. Confirmation of optimal guidewire length for central venous catheter placement using transesophageal echocardiography. *Journal of Clinical Anesthesia*, 35, 58-61.
- ZICK, G., EIMER, C., RENNERT, J., BECHER, T., KOTT, M., SCHÄDLER, D., WEILER, N. & ELKE, G. 2020. Sonographische Visualisierung des Führungsdrahtes und Positionierung des zentralen Venenkatheters. *Der Anaesthesist*, 69, 489-496.
- ZINGG, W., CARTIER, V., INAN, C., TOUVENEAU, S., THERIAULT, M., GAYET-AGERON, A., CLERGUE, F., PITTET, D. & WALDER, B. 2014. Hospital-wide multidisciplinary, multimodal intervention programme to reduce central venous catheter-associated bloodstream infection. *PLoS One*, 9, e93898.
- ZITO MARINOSCI, G., BIASUCCI, D. G., BARONE, G., D'ANDREA, V., ELISEI, D., IACOBONE, E., LA GRECA, A. & PITTIRUTI, M. 2023. ECHOTIP-Ped: A structured protocol for ultrasound-based tip navigation and tip location during placement of central venous access devices in pediatric patients. *The Journal of Vascular Access*, 24, 5-13.

8. Erklärung des Eigenanteils

Die Arbeit wurde in der Klinik und Poliklinik für Anästhesiologie am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf unter Betreuung von Prof. Bernd Saugel durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte in Zusammenarbeit mit Dr. Leonie Schulte-Uentrop, leitende Oberärztin der Klinik, und Dr. Kristen Thomsen, Assistenzärztin in der Klinik, hauptsächlich tätig im Bereich Forschung in der Anästhesiologie.

Die Aufklärung der Eltern und Erziehungsberechtigten der Kinder und das Einholen der Einverständniserklärungen erfolgte zu gleichen Teilen durch mich und die jeweils am Tag der Aufklärung in der Prämedikationsambulanz tätigen Kolleginnen und Kollegen aus der Klinik für Anästhesiologie.

Die Durchführung der TTE und TEE und die dazugehörige Datenerhebung erfolgte in gleichen Teilen durch mich und Dr. Kristen Thomsen, in wenigen Fällen durch Dr. Till Kessler, den verantwortlichen Oberarzt der Klinik im Bereich Kinderkardioanästhesie.

Die Auswertung der Ultraschallschleifen und Röntgenbilder sowie die abschließende Zusammenstellung kompletter Datensätze wurden durch mich durchgeführt.

Die statistische Auswertung erfolgte im größten Anteil durch Dr. Kristen Thomsen, nach ihrer Anleitung in einigen Fragestellungen und Berechnungen durch mich.

Die Analyse und Auswertung der Datensätze und sämtlicher wissenschaftlicher Quellen sowie deren Interpretation im wissenschaftlichen Kontext erfolgte durch mich.

Ich versichere, die vorliegende Dissertation selbständig verfasst und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Aus dieser Studie ist bisher folgende Veröffentlichung hervorgegangen, wobei die Erstautorenschaft bei Dr. Kristen Thomsen liegt:

THOMSEN, K. K., FRITZ, M., ZÖLLNER, C., KESSLER, T., SAUGEL, B. & SCHULTE-
UENTROP, L. 2025. Transthoracic Echocardiography for Central Venous
Catheter Tip Positioning in Children: An Observational Study Using
Transesophageal Echocardiography as Reference Method. *Paediatr Anaesth*,
35, 310-315.

9. Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe, insbesondere ohne entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- und Beratungsdiensten, verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe. Das gilt insbesondere auch für alle Informationen aus Internetquellen.

Soweit beim Verfassen der Dissertation KI-basierte Tools („Chatbots“) verwendet wurden, versichere ich ausdrücklich, den daraus generierten Anteil deutlich kenntlich gemacht zu haben. Die „Stellungnahme des Präsidiums der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) zum Einfluss generativer Modelle für die Text- und Bilderstellung auf die Wissenschaften und das Förderhandeln der DFG“ aus September 2023 wurde dabei beachtet.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Datum

Unterschrift

10. Danksagungen

An dieser Stelle befand sich in der dem Prüfungsverfahren zugrunde liegenden Fassung eine persönliche Danksagung. Diese wurde für die (elektronische) Veröffentlichung entfernt.