Retrospektive Analyse des Potentials der virtuellen Realität für die Operationsplanung anhand der CT-Bildgebung bei Kindern mit kongenitalen thorakalen Malformationen

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. med.)

der Medizinischen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

Bonn

Donatas Zalepugas

aus Kaliningrad

2026

Angefertigt mit der Genehmigung
der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Prof. Dr. med. Joachim Schmidt
2. Gutachter: Prof. Dr. Hemmen Sabir

Tag der mündlichen Prüfung: 07.07.2026

Aus der Klinik für Thoraxchirurgie

Inhaltsverzeichnis

	Abkürzungsverzeichnis	4
1.	**Deutsche Zusammenfassung**	5
1.1	Einleitung	5
1.2	Material und Methoden	8
1.3	Ergebnisse	14
1.4	Diskussion	16
1.5	Zusammenfassung	21
1.6	Literaturverzeichnis der deutschen Zusammenfassung	23
2.	**Veröffentlichungen**	25
3.	**Erklärung zum Eigenanteil**	26
4.	**Danksagung**	29

Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
CI	Konfidenzintervall
CPAM	Congenital Pulmonary Airway Malformation
CT	Computertomografie
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
HMD	Head-Mounted Display
KTM	kongenitale thorakale Malformation
PACS	Picture Archiving and Communication System
SD	Standardabweichung
VR	Virtuelle Realität

1. Deutsche Zusammenfassung

1.1 Einleitung

Kongenitale thorakale Malformationen (KTM) sind angeborene Fehlbildungen des kindlichen Thorax, die vor allem das Lungenparenchym, die Atemwege und die zugehörigen Gefäßstrukturen betreffen. Obwohl es sich um seltene Erkrankungen handelt, besitzen sie eine hohe klinische Relevanz, da sie bereits im Neugeborenen- und Säuglingsalter zu relevanten respiratorischen Symptomen führen können oder im weiteren Verlauf komplikationsträchtig sind (Annunziata et al., 2019; Pederiva et al., 2023). Für Ärztinnen und Ärzte in der pädiatrischen Versorgung stellen KTM häufig eine diagnostische Herausforderung dar, da sie sich initial unspezifisch präsentieren und meist im Rahmen pränataler oder früh-postnataler Bildgebung auffallen (Cancemi et al., 2024; Schwerk et al., 2016). Zu den wichtigsten Entitäten der kongenitalen thorakalen Malformationen zählen die kongenitale pulmonale Atemwegsfehlbildungen, pulmonale Sequestrationen, bronchogene Zysten, bronchiale Atresien sowie Formen der kongenitalen lobären Überblähung (Annunziata et al., 2019; Pederiva et al., 2023). Pulmonale Sequestrationen sind angeborene Lungenareale ohne Verbindung zum Bronchialsystem, die ihre arterielle Blutversorgung atypischerweise aus dem systemischen Kreislauf beziehen. Bronchiale Atresien sind angeborene Unterbrechungen eines Bronchus, die zu einer Mukus gefüllten Blindendigung mit nachfolgender Überblähung des distal gelegenen Lungenabschnitts führen. (Lee et al., 2010; Bush 2001). Diese Erkrankungen unterscheiden sich in ihrer Embryogenese, ihrer anatomischen Ausprägung und ihrem klinischen Verlauf, weisen jedoch teilweise überlappende radiologische Merkmale auf. Dies erschwert insbesondere für nicht spezialisierte Behandler die eindeutige Einordnung (Annunziata et al., 2019; Cancemi et al., 2024).

Im klinischen Alltag werden KTM häufig bereits pränatal mittels Ultraschalluntersuchung oder Magnetresonanztomografie vermutet (Newman, 2022, Pederiva et al., 2023). Postnatal erfolgt die weitere bildgebende Abklärung in der Regel interdisziplinär unter Einbeziehung von Pädiatrie, Radiologie, Kinderchirurgie und Thoraxchirurgie (Annunziata et al., 2019). Für Hausärzte und niedergelassene Kinderärzte besteht dabei eine zentrale

Rolle in der Langzeitbetreuung, der Einschätzung von Symptomen sowie der Beratung der Eltern. Fragen nach der Notwendigkeit, dem Zeitpunkt und dem Umfang einer operativen Therapie werden häufig bereits früh gestellt und erfordern eine verständliche und fundierte Entscheidungsgrundlage (Pederiva et al., 2023). Bei symptomatischen Kindern ist die operative Resektion der etablierte Therapieansatz. (Annunziata et al., 2019). Aber auch bei asymptomatischen Patientinnen und Patienten wird ein operatives Vorgehen häufig empfohlen, um das Risiko wiederkehrender Infektionen, respiratorischer Verschlechterung oder struktureller Veränderungen des Lungengewebes zu reduzieren (Lamberti et al., 2023; Pederiva 2023). Darüber hinaus wird in der Literatur ein potenzieller Zusammenhang zwischen bestimmten kongenitalen Lungenmalformationen und malignen Entartungen diskutiert, was neben wiederkehrenden Infektionen auch als Argument für eine frühzeitige operative Sanierung herangezogen wird (Pederiva et al., 2025; Muntean et al., 2021).

Die präoperative Planung dieser Eingriffe basiert maßgeblich auf bildgebenden Verfahren (Annunziata et al., 2019). Die Computertomografie hat sich postnatal als diagnostischer Goldstandard etabliert, da sie eine hohe räumliche Auflösung und eine zuverlässige Darstellung der anatomischen Verhältnisse erlaubt (Lee et al., 2010). Um die Strahlenexposition bei Neugeborenen und Säuglingen zu minimieren, werden jedoch niedrig dosierte CT-Protokolle eingesetzt (Mon et al., 2018). Diese führen zwangsläufig zu einer reduzierten Bildqualität, was die Interpretation insbesondere bei komplexen oder niedrig-volumigen Befunden erschwert (Mon et al., 2018; Style et al., 2020).

In der klinischen Routine erfolgt die Auswertung der CT-Daten überwiegend anhand zweidimensionaler Schnittbilder auf einem Monitor. Für die korrekte Beurteilung der räumlichen Ausdehnung einer Malformation, ihrer Beziehung zu gesunden Lungenarealen, zu Gefäßstrukturen oder zum Mediastinum ist jedoch eine mentale dreidimensionale Rekonstruktion durch den Untersucher erforderlich (Lee et al., 2010). Diese kognitive Leistung ist erfahrungsabhängig und kann insbesondere bei seltenen Krankheitsbildern oder bei weniger erfahrenen Behandlern limitiert sein (Hermelijn et al., 2021).

In den letzten Jahren haben technologische Entwicklungen neue Möglichkeiten der medizinischen Bildvisualisierung eröffnet (Sadeghi et al., 2020). Moderne Systeme der virtuellen Realität erlauben es, CT-Datensätze als dreidimensionale Volumenmodelle immersiv darzustellen. Dabei können anatomische Strukturen in Echtzeit betrachtet, rotiert und aus unterschiedlichen Perspektiven analysiert werden (Boedecker et al., 2021). Für den Betrachter entsteht ein unmittelbarer räumlicher Eindruck der individuellen Anatomie, ohne dass diese aus einzelnen zweidimensionalen Schnittbildern abstrahiert werden muss (Sadeghi et al., 2020). Erste Studien aus der Erwachsenen- und Viszeralchirurgie zeigen, dass eine solche immersive 3D-Visualisierung die präoperative Planung beeinflussen und zu einer Anpassung der operativen Strategie führen kann, insbesondere bei komplexen anatomischen Situationen (Bakhuis et al., 2023). Für die pädiatrische thoraxchirurgische Versorgung liegen bislang jedoch nur begrenzte systematische Daten vor, obwohl gerade hier die anatomischen Verhältnisse klein, variabel, häufig schwer abgrenzbar und klinisch hochrelevant sind (Annunziata et al., 2019). Im Kontext der zunehmenden Digitalisierung des Gesundheitswesens wird die VR-basierte 3D-Bildgebung auch als Bestandteil eines sogenannten digitalen Zwillings diskutiert. Darunter versteht man eine patientenspezifische digitale Repräsentation anatomischer Strukturen, die auf realen klinischen Daten basiert (Sadeghi et al., 2020).

Ein solcher digitale Zwilling könnte nicht nur die chirurgische Planung verbessern, sondern auch die interdisziplinäre Kommunikation sowie die ärztliche Beratung von Eltern und weiterbehandelnden Ärztinnen und Ärzten unterstützen (Boedecker et al., 2021; Bakhuis et al., 2023). Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Arbeit retrospektiv den Nutzen einer immersiven VR-basierten 3D-Visualisierung von CT-Datensätzen für die Operationsplanung bei Kindern mit kongenitalen thorakalen Malformationen. Ziel ist es, den Mehrwert dieser Technologie im Vergleich zur konventionellen zweidimensionalen CT-Bildbetrachtung systematisch zu analysieren und ihre potenzielle Bedeutung für Diagnostik, Operationsplanung und klinische Entscheidungsfindung nachvollziehbar darzustellen – auch über die Grenzen hochspezialisierter Zentren hinaus.

1.2 Material und Methoden

Studiendesign

Der vorliegenden Arbeit liegt eine retrospektive, monozentrische Vergleichsstudie zugrunde, in der die präoperative chirurgische Planung bei Kindern mit kongenitalen thorakalen Malformationen anhand zweier unterschiedlicher Bildbetrachtungsmethoden analysiert wurde. Verglichen wurden die konventionelle zweidimensionale CT-Bildauswertung an einem Standardmonitor und eine immersive dreidimensionale Visualisierung derselben CT-Datensätze in einer virtuellen Realität (VR) durch regelmäßig mit dem Erkrankungsbild konfrontierte Behandler unterschiedlicher Erfahrungsstufen.

Die Studie wurde als retrospektives Assessment bereits operierter Fälle konzipiert. Ziel war es, den Einfluss der jeweiligen Visualisierungsmethode auf diagnostische Einschätzungen, anatomische Beurteilungen sowie auf die antizipierte operative Strategie systematisch zu untersuchen. Die Auswertungen erfolgten unabhängig vom ursprünglichen klinischen Entscheidungsprozess.

Patientenkollektiv

In die Studie wurden Kinder eingeschlossen, die zwischen 2020 und 2023 aufgrund des Verdachts auf eine kongenitale thorakale Malformation operativ versorgt wurden. Die operative Behandlung sowie die Datenerhebung erfolgten in der Klink für Thoraxchirurgie des Universitätsklinikums Bonn, vormals Sektion Thoraxchirurgie der Klinik und Poliklinik für Allgemein-, Viszeral-, Thorax- und Gefäßchirurgie des Universitätsklinikums Bonn. Voraussetzung für den Einschluss war das Vorliegen einer präoperativen CT-Untersuchung in diagnostisch verwertbarer Qualität sowie eine histopathologische Sicherung der Diagnose nach operativer Resektion.

Ausgeschlossen wurden Fälle mit zusätzlichen thorakalen oder abdominellen Begleitpathologien, die die Bildinterpretation wesentlich hätten verfälschen können, wie beispielsweise Zwerchfellhernien oder relevante anatomische Variationen. Das Kollektiv bestand ausschließlich aus neonatalen und frühkindlichen Patientinnen und Patienten. Als neonatal gelten Kinder innerhalb der ersten 28 Lebenstage, als frühkindlich Kinder bis einschließlich zum vollendeten 24. Lebensmonat.

Untersucherkollektiv

Die retrospektiven Assessments wurden durch Chirurginnen und Chirurgen unterschiedlicher Erfahrungsstufen durchgeführt, um potenzielle Effekte der Visualisierungsmethode unabhängig vom Ausbildungsstand bewerten zu können. Das Untersucherkollektiv setzte sich aus Assistenzärztinnen und Assistenzärzten mit geringer bis mittlerer thoraxchirurgischer Erfahrung sowie aus Fach- und Oberärzten mit langjähriger klinischer Expertise zusammen.

Alle beteiligten Untersucherinnen und Untersucher waren nicht in die ursprüngliche Diagnostik, Indikationsstellung oder operative Versorgung der analysierten Fälle eingebunden und hatten keinen Zugriff auf die klinischen Originalentscheidungen.

Bilddaten und Pseudonymisierung

Die präoperativen CT-Datensätze wurden aus dem klinikinternen Picture Archiving and Communication System (PACS) exportiert und vollständig pseudonymisiert. Personenbezogene Daten wurden vor Beginn der Analyse entfernt, sodass zu keinem Zeitpunkt Rückschlüsse auf einzelne Patientinnen und Patienten möglich waren. Die Verarbeitung und Speicherung der Daten erfolgten ausschließlich innerhalb der gesicherten IT-Infrastruktur des Universitätsklinikums.

Konventionelle CT-Bildauswertung

Die konventionelle Bildauswertung erfolgte anhand der axialen CT-Schnittbilder in Graustufendarstellung an einem Standardarbeitsplatzrechner. Die Navigation durch die Bilddatensätze erfolgte mithilfe von Maus und Tastatur. Den Untersucherinnen und Untersucher standen die in der klinischen Routine üblichen Funktionen wie Scrollen durch die Schnittebenen, Zoom und Fensterung zur Verfügung (siehe Abbildung 1).

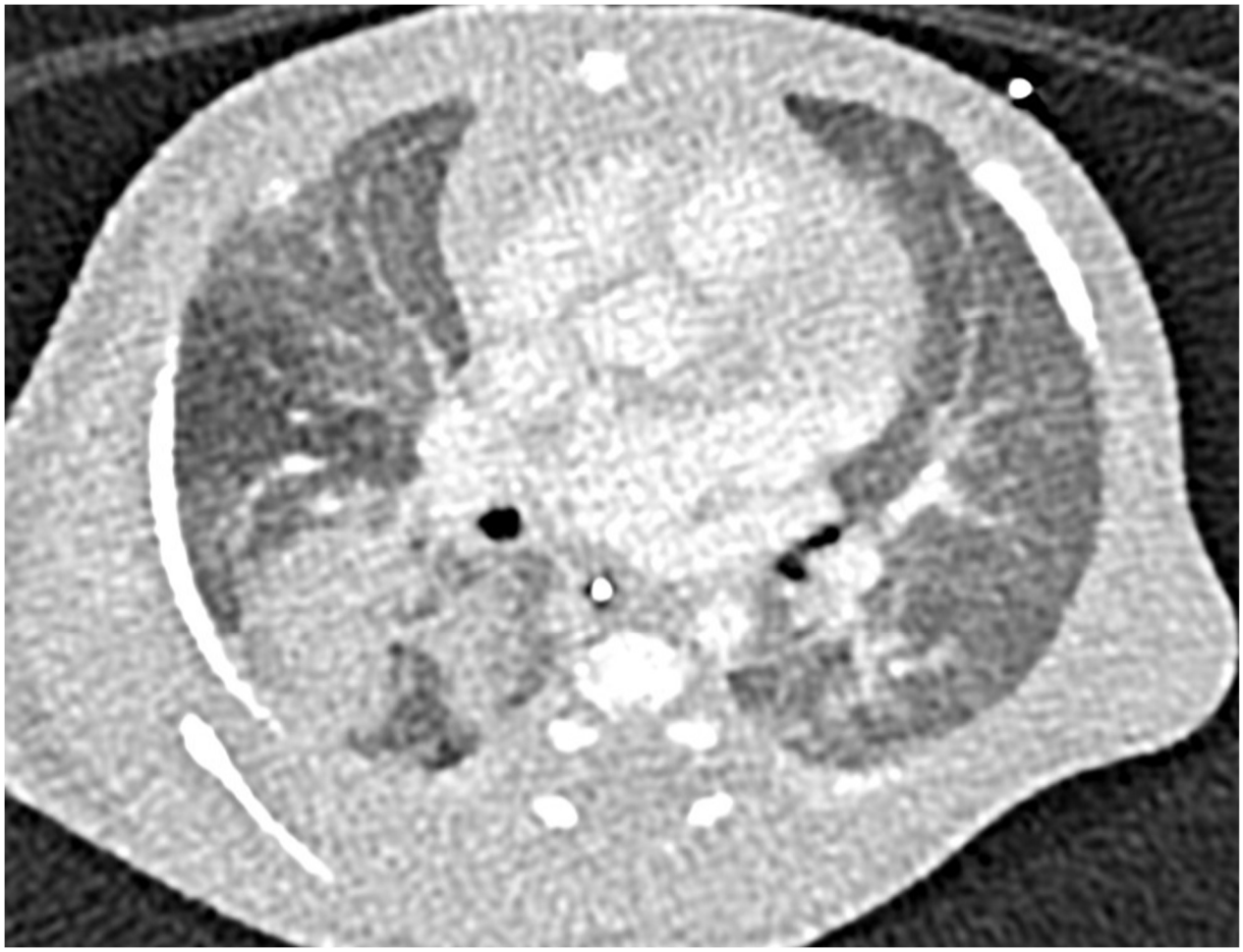

Abb. 1: Beispiel einer konventionellen axialen CT-Schnittbilddarstellung in Graustufen zur präoperativen Beurteilung einer kongenitalen thorakalen Malformation.

Virtuelle Realität und 3D-Visualisierung

Für die VR-basierte Analyse wurden die identischen CT-Datensätze als dreidimensionale Volumenrekonstruktionen in einer immersiven virtuellen Umgebung dargestellt. Die Visualisierung erfolgte mithilfe eines Head-Mounted-Displays, verinfacht als VR-Brille zu bezeichnen. Die Bilddaten wurden auf einem klinikinternen Server verarbeitet und in Echtzeit an das VR-System gestreamt. Der technische Workflow der Datenverarbeitung, einschließlich der Überführung der CT-DICOM-Datensätze in die immersive VR-Umgebung sowie der Interaktion mittels Head-Mounted-Display, ist schematisch in der Originalpublikation dargestellt (Abbildung 1 der Publikation).

Die Darstellung ermöglichte eine freie räumliche Betrachtung der anatomischen Strukturen. Die Untersucherinnen und Untersucher konnten das 3D-Modell rotieren, skalieren, farbanpassen und durch unterschiedliche Blickwinkel analysieren. Zur besseren Differenzierung von luftgefüllten Arealen, parenchymatösen Strukturen und Gefäßanteilen wurde eine standardisierte Farb- und Dichtezuordnung verwendet, die allen Untersucherinnen und Untersuchern in gleicher Form zur Verfügung gestellt wurde (siehe Abbildung 2).

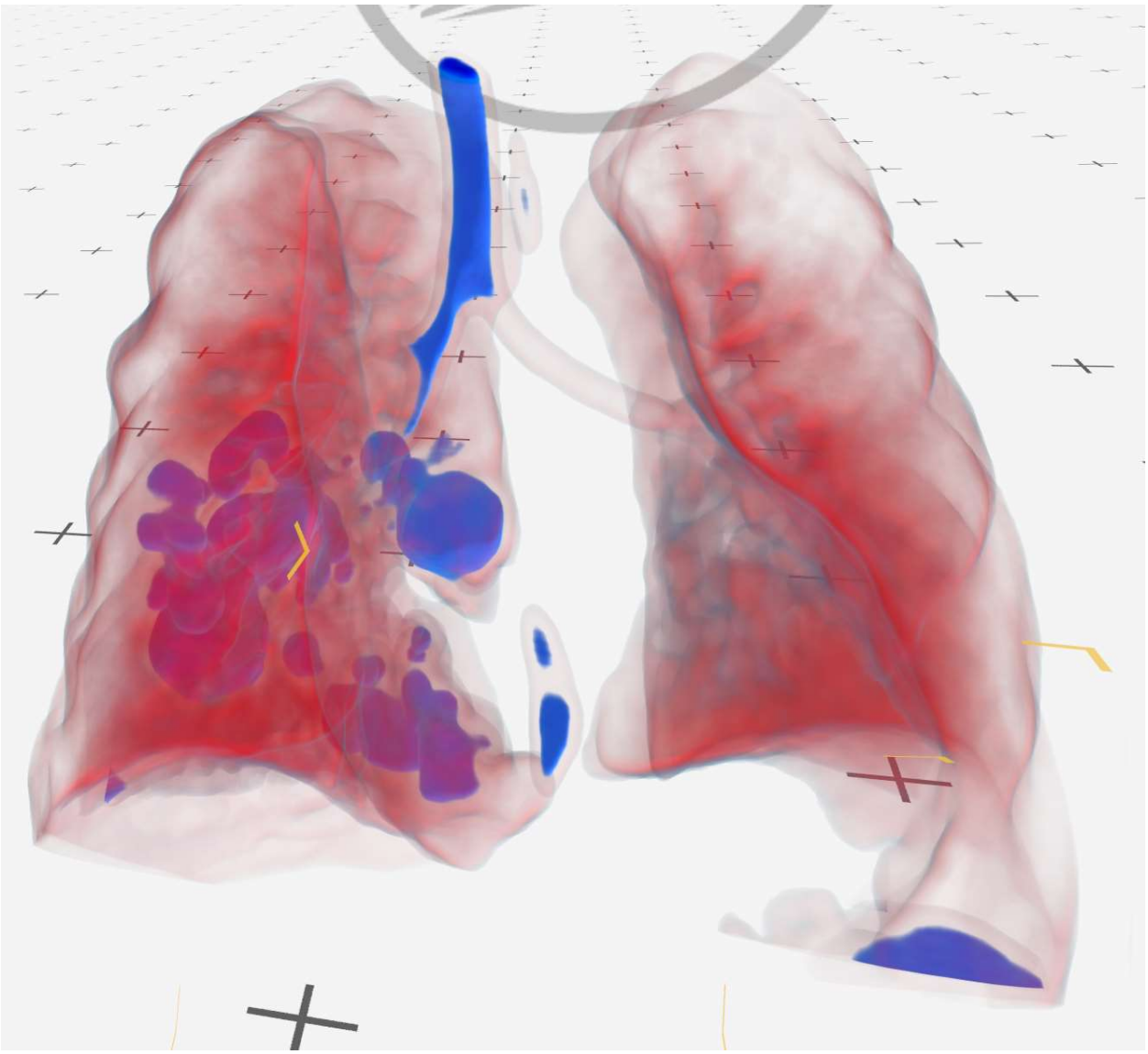

Abb. 2: Beispiel einer immersiven VR-basierten dreidimensionalen Volumenvisualisierung eines CT-Datensatzes.

Vor Beginn der VR-Analyse erhielten alle Teilnehmer eine strukturierte Einführung in die Bedienung des Systems um Bedienungsfehler zu minimieren und eine vergleichbare Ausgangsbasis hinsichtlich der Bedienfähigkeit sicherzustellen.

Ablauf der Assessments und Wash-out-Phase

Jede Untersucherin und jeder Untersucher bewerteten sämtliche Fälle sowohl in der konventionellen 2D-CT-Ansicht als auch in der VR-basierten 3D-Darstellung. Um Erinnerungs- und Wiedererkennungseffekte zu minimieren, wurde zwischen den beiden Bewertungsphasen ein zweimonatiges Intervall (Wash-out-Phase) eingehalten. Zudem wurde die Reihenfolge der Fälle innerhalb der jeweiligen Bewertungsblöcke randomisiert.

Während der Assessments erfolgte eine strukturierte Datenerhebung anhand eines standardisierten Fragebogens. Zusätzlich wurde die für jede Fallbewertung benötigte Zeit erfasst.

Erhobene Parameter

Im Rahmen der retrospektiven Operationsplanung wurden unter anderem folgende Parameter beurteilt:

- Erkennbarkeit der Malformation
- Einschätzung der führenden Diagnose
- Beurteilung der anatomischen Lokalisation und Ausdehnung der Malformation
- Vorliegen eines Mediastinalshifts
- Antizipiertes Resektionsausmaß und Vorhersage der Prozedur

Die individuellen Bewertungen der Studienteilnehmer wurden im Anschluss mit dem radiologischen Befund, dem Operationsbericht sowie der histopathologischen Diagnose verglichen.

Statistische Auswertung

Die Fragebogendaten wurden in kategoriale Variablen überführt und als absolute und relative Häufigkeiten dargestellt.

Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test wurde zur Analyse zweier verbundener Stichproben verwendet. Kontinuierliche Variablen werden – je nach Verteilung – als Mittelwert ± Standardabweichung beziehungsweise als Median und Spannweite angegeben und mittels zweiseitigem Student-t-Test oder Mann-Whitney-U-Test analysiert, sofern angemessen.

Kategoriale Variablen wurden abhängig von der Datenstruktur mithilfe des McNemar-Tests oder des Chi-Quadrat-Tests verglichen.

Effektstärken (Cohen’s d beziehungsweise Cramér’s V) sowie 95%-Konfidenzintervalle wurden – sofern zutreffend – berichtet. Aufgrund des explorativen Charakters dieser Machbarkeitsstudie erfolgte keine formale Korrektur für multiples Testen. Diese Limitation wird entsprechend berücksichtigt. Zur Beurteilung der Interrater-Reliabilität wurde Cohen’s Kappa-Koeffizient berechnet.

Die statistische Analyse erfolgte mit Microsoft Excel (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) sowie mit MedCalc Statistical Software, Version 23.1.3 (MedCalc Software Ltd., Ostend, Belgium). Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt.

Ethik

Die vorliegende Arbeit basiert auf einer retrospektiven Analyse bereits erhobener klinischer Bild- und Behandlungsdaten von pädiatrischen Patientinnen und Patienten mit kongenitalen thorakalen Malformationen. Die Auswertung erfolgte ausschließlich an pseudonymisierten Datensätzen. Zu keinem Zeitpunkt waren Rückschlüsse auf einzelne Patientinnen oder Patienten möglich.

Die zugrundeliegenden Computertomografiedaten sowie die zugehörigen klinischen Informationen wurden im Rahmen der regulären Patientenversorgung erhoben. Es

erfolgte keine zusätzliche Bildgebung, Intervention oder Belastung der Patientinnen und Patienten im Rahmen dieser wissenschaftlichen Untersuchung.

Die Studie wurde unter Berücksichtigung der ethischen Grundsätze der revidierten Deklaration von Helsinki des Weltärztebundes sowie der einschlägigen nationalen datenschutzrechtlichen Bestimmungen durchgeführt. Nach Vorlage des Vorhabens bei der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn wurde ein positives Ethikvotum (Nr. 2024–316-BO) ausgestellt.

1.3 Ergebnisse

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse basieren auf der bereits publizierten Originalarbeit von Zalepugas et al., auf die für detaillierte tabellarische und grafische Darstellungen verwiesen wird.

Insgesamt wurden 14 pädiatrische Patientinnen und Patienten mit histologisch gesicherter kongenitaler thorakaler Malformation in die Auswertung eingeschlossen. Hiervon waren 13 neonatale und ein frühkindlicher Patient. Acht Untersucherinnen und Untersucher (vier Assistenzärzte und vier erfahrene Fachärzte) beurteilten alle Fälle sowohl mittels konventioneller zweidimensionaler CT-Bildbetrachtung als auch mittels immersiver VR-basierter 3D-Visualisierung. Daraus ergaben sich 112 gepaarte Bewertungen pro Modalität und insgesamt 224 Einzelbewertungen (Zalepugas et al., Tabelle 1).

Die Detektion pathologischer thorakaler Befunde gelang in beiden Visualisierungsmodalitäten vollständig. Sowohl die konventionelle CT-Auswertung als auch die VR-basierte Analyse erreichten eine Sensitivität von 100 % (112/112), ohne dass sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Verfahren zeigte (McNemar-Test, $p = 1{,}000$; Zalepugas et al., Tabelle 2).

Bei der differenzierten diagnostischen Einordnung anhand des histopathologischen Referenzstandards zeigte sich jedoch ein Vorteil der VR-basierten Analyse. Die diagnostische Genauigkeit lag hier bei 82,1 % gegenüber 73,2 % bei der konventionellen CT-Auswertung. Dieser Unterschied war statistisch signifikant ($p = 0{,}021$). In 13 Fällen erfolgte eine korrekte Klassifikation ausschließlich in der VR-Analyse, während dies

lediglich in drei Fällen ausschließlich mittels konventioneller CT gelang (Zalepugas et al., Tabelle 2).

Im Vergleich zum radiologischen Referenzstandard zeigte sich ebenfalls eine höhere Übereinstimmung in der VR-Gruppe (96,9 % vs. 90,6 %), wobei dieser Unterschied keine statistische Signifikanz erreichte ($p = 0,109$).

Die Beurteilung anatomischer Detailaspekte war zwischen beiden Modalitäten insgesamt vergleichbar. Dennoch zeigte die VR-basierte Visualisierung Vorteile bei der Erkennung komplexer Befunde. Eine multilobäre Beteiligung wurde in 29 % der VR-basierten Bewertungen identifiziert, verglichen mit 21 % in der konventionellen CT-Auswertung. Eine mediastinale Verlagerung wurde mittels VR in 36 % der Fälle beschrieben, gegenüber 29 % bei konventioneller Bildbetrachtung (Zalepugas et al., Abbildung 3).

Auch hinsichtlich der präoperativen Operationsplanung ergaben sich Unterschiede zwischen den beiden Visualisierungsmodalitäten. In der VR-basierten Analyse wurde häufiger eine Lobektomie empfohlen (57 %) als bei der konventionellen CT-Auswertung (50 %). Dieser Unterschied war statistisch signifikant ($p = 0,046$; Zalepugas et al., Tabelle 3).

Die mittlere Bearbeitungszeit pro Fall war bei der VR-basierten Analyse signifikant höher als bei der konventionellen CT-Auswertung. Für die VR-Analyse betrug die mittlere Evaluationszeit 203,2 ± 117,4 s, gegenüber 124,1 ± 69,7 s bei der konventionellen Bildbetrachtung ($p < 0,001$). Zudem zeigte sich in der VR-Gruppe eine größere Streuung der Bearbeitungszeiten (Spannweite 55–683 s vs. 36–260 s; Zalepugas et al., Abbildung 4).

Darüber hinaus konnte für die VR-basierte Analyse eine signifikante negative Korrelation zwischen Bearbeitungszeit und Fallreihenfolge festgestellt werden ($\rho = –0,54$; $p = 0,04$), was auf einen Lerneffekt im Umgang mit der VR-Technologie hinweist. Ein entsprechender Zusammenhang zeigte sich für die konventionelle CT-Auswertung nicht (Zalepugas et al., Abbildung 4).

Die Interrater-Übereinstimmung variierte je nach Bewertungsparameter. Für diagnostische Fragestellungen zeigte sich in der VR-Gruppe insgesamt eine höhere

Übereinstimmung zwischen den Untersucherinnen und Untersuchern als in der konventionellen CT-Gruppe, während für anatomische Detailfragen in beiden Untersuchungsmodalitäten überwiegend eine moderate Übereinstimmung bestand (Zalepugas et al., Tabelle 4).

Eine vollständige Darstellung aller statistischen Kennwerte, einschließlich Effektstärken und Konfidenzintervalle, ist der Originalpublikation von Zalepugas et al. zu entnehmen.

1.4 Diskussion

Die vorliegende retrospektive Analyse untersucht den Einfluss einer immersiven VR-basierten 3D-Visualisierung niedrig dosierter CT-Datensätze auf Diagnostik und präoperative Operationsplanung bei Kindern mit kongenitalen thorakalen Malformationen im Vergleich zur konventionellen zweidimensionalen CT-Bildbetrachtung (Zalepugas et al., 2025). Kongenitale thorakale Malformationen sind klinisch relevante, aber heterogene und teils seltene Erkrankungen, deren zuverlässige präoperative Charakterisierung für Therapieentscheidung und Resektionsplanung entscheidend ist (Annunziata et al., 2019; Pederiva et al., 2023). Die präoperative Bildgebung erfolgt postnatal häufig mittels CT, wobei aus Strahlenschutzgründen bei Neugeborenen und Säuglingen Niedrigdosisprotokolle eingesetzt werden, die die Bildqualität und damit die Interpretationssicherheit limitieren können (Mon et al., 2018; Style et al., 2020).

Vor diesem Hintergrund adressiert die Studie eine klinisch relevante Wissenslücke, ob immersive 3D-Visualisierung als patientenspezifische, interaktive Darstellung („digitaler Zwilling“) die chirurgische Einschätzung gegenüber konventionellen 2D-Schnittbildern verbessern kann (Sadeghi et al., 2020; Zalepugas et al., 2025).

Einordnung der diagnostischen Ergebnisse

Ein zentrales Ergebnis war, dass beide Visualisierungsmodalitäten pathologische Befunde zuverlässig detektierten, sich jedoch Unterschiede vor allem bei der differenzierten diagnostischen Zuordnung zeigten (Zalepugas et al., 2025). Dieser Befund passt zur klinischen Erfahrung, dass die bloße Erkennung einer Läsion bei KTM häufig

gelingt, die präzise Entitätszuordnung jedoch durch überlappende Bildmorphologien erschwert sein kann (Annunziata et al., 2019; Cancemi et al., 2024). Gerade die Abgrenzung zwischen Entitäten wie CPAM (Congenital Pulmonary Airway Malformation), Sequestration, bronchialer Atresie oder Mischformen ist bildmorphologisch anspruchsvoll und in der Literatur als relevante diagnostische Herausforderung beschrieben (Lee et al., 2010; Cancemi et al., 2024).

Die beobachtete höhere diagnostische Genauigkeit in VR gegenüber 2D-CT anhand des histopathologischen Referenzstandards spricht dafür, dass die immersive räumliche Darstellung die mentale 3D-Rekonstruktion entlastet und dadurch die Charakterisierung komplexer Läsionsmuster unterstützen kann (Zalepugas et al., 2025; Sadeghi et al., 2020). Ein solcher Effekt ist plausibel, da konventionelle 2D-Schnittbilder eine erfahrungsabhängige kognitive Rekonstruktion der räumlichen Anatomie erfordern, die bei seltenen Krankheitsbildern und geringer Fallroutine limitiert sein kann (Hermelijn et al., 2021).

Anatomische Beurteilung und räumliches Verständnis

Die insgesamt vergleichbare Genauigkeit der anatomischen Lokalisation zwischen VR und konventioneller CT deutet darauf hin, dass wesentliche Lageinformationen grundsätzlich auch aus 2D-Schnittbildern gewonnen werden können (Zalepugas et al., 2025). Gleichzeitig zeigte VR in der Studie eine höhere Erkennungsrate komplexer Konstellationen wie multilobärer Beteiligung und mediastinaler Verlagerung, was klinisch relevant ist, da solche Befunde Zugangsweg, Resektionsausmaß und perioperative Risikoeinschätzung beeinflussen können (Zalepugas et al., 2025; Annunziata et al., 2019). Dass gerade diese räumlich komplexen Aspekte von einer 3D-Visualisierung profitieren, ist konsistent mit der Annahme, dass immersive Darstellungen die native räumliche Beziehung von Läsion, Lappenanatomie, Mediastinum und Gefäßstrukturen intuitiver erfassbar machen (Sadeghi et al., 2020; Boedecker et al., 2021). Für KTM ist dies besonders bedeutsam, weil die Anatomie kleinvolumig, variabel und in Niedrigdosis-CTs häufig schwer abgrenzbar ist, wodurch die kognitive Last der Interpretation steigt (Mon et al., 2018; Style et al., 2020).

Einfluss auf die operative Strategie

Von besonderer praktischer Bedeutung ist, dass die VR-basierte Beurteilung in der Studie häufiger zu einer Lobektomie-Empfehlung führte als die konventionelle 2D-Auswertung (Zalepugas et al., 2025). Diese Verschiebung kann als Hinweis interpretiert werden, dass VR subtile Ausdehnungen über segmentale Grenzen hinaus sichtbarer macht und dadurch ein aus onkologisch-/infektiologischer Sicht „sichereres“ Resektionsausmaß wahrscheinlicher gewählt wird (Zalepugas et al., 2025; Pederiva et al., 2023). Ein ähnlicher Mechanismus wurde auch in der erwachsenen Thoraxchirurgie beschrieben, in der VR-Planung in einem relevanten Anteil der Fälle zu wesentlichen Modifikationen des Operationsplans führten (Bakhuis et al., 2023). Gerade bei kongenitalen Lungenmalformationen wird in der Literatur diskutiert, dass wiederkehrende Infektionen, strukturelle Veränderungen und – je nach Entität – ein potenzielles Risiko maligner Transformation als Argumente für ein suffizientes operatives Vorgehen herangezogen werden (Lamberti et al., 2023; Muntean et al., 2021; Pführtena et al., 2025). Vor diesem Hintergrund ist eine präzise präoperative Bestimmung von Ausdehnung und Resektionsgrenzen klinisch relevant, um sowohl Unter- als auch Übertherapie zu vermeiden (Pederiva et al., 2023; De Winter & De Groot, 2024). In der vorliegenden Studie kann jedoch nicht beurteilt werden, ob die VR-bedingten Planänderungen zu besseren klinischen Outcomes führen, da postoperative Endpunkte nicht Bestandteil des retrospektiven Studiendesigns waren (Zalepugas et al., 2025).

Bedeutung für unterschiedliche Erfahrungsstufen und Teamkonsistenz

Die höhere Interrater-Übereinstimmung in der VR-Gruppe bei diagnostischen Fragestellungen spricht dafür, dass immersive 3D-Visualisierung zu einer stärkeren Standardisierung der Wahrnehmung beitragen kann (Zalepugas et al., 2025). Dies ist im klinischen Alltag relevant, weil KTM selten sind und Entscheidungen häufig interdisziplinär getroffen werden, wodurch ein gemeinsames anatomisches Verständnis die Kommunikation zwischen Radiologie, Pädiatrie und (Kinder- bzw. Thorax-)Chirurgie erleichtern kann (Annunziata et al., 2019; Pederiva et al., 2023). Für weniger erfahrene Operateurinnen und Operateure kann VR als „kognitiver Verstärker“ wirken, indem die Notwendigkeit der mentalen 3D-Rekonstruktion reduziert und die räumliche Exploration erleichtert wird (Sadeghi et al., 2020; Zalepugas et al., 2025). Zudem werden Nutzererleben und Usability in virtuellen Umgebungen durch Faktoren wie Alter und

Erfahrung beeinflusst, was bei Implementierung und Training berücksichtigt werden sollte (Lorenz et al., 2023).

Zeitaufwand und Lernkurve

Der signifikant höhere Zeitbedarf der VR-basierten Befundung stellt eine relevante Implementierungsbarriere dar, insbesondere in ressourcenlimitierten klinischen Settings (Zalepugas et al., 2025). Die in der Studie beobachtete Abnahme der Bearbeitungszeit mit zunehmender Fallreihenfolge weist jedoch auf einen Lerneffekt hin, der den initialen Mehraufwand perspektivisch reduzieren kann (Zalepugas et al., 2025). Auch in anderen chirurgischen Anwendungsfeldern wird beschrieben, dass immersive Planung initial zeitintensiver sein kann, der Mehrwert jedoch in besserer räumlicher Klarheit und potenziell sichererer Entscheidungsfindung gesehen wird (Boedecker et al., 2021; Reinschluessel et al., 2022). Für die klinische Bewertung ist daher entscheidend, ob der zusätzliche präoperative Aufwand durch Vorteile im OP-Ablauf oder durch verbesserte Ergebnisqualität kompensiert wird, was künftige Studien anhand objektiver Endpunkte untersuchen sollten (Bakhuis et al., 2023; Zalepugas et al., 2025).

Limitationen

Die retrospektive, monozentrische Anlage und die begrenzte Fallzahl schränken die Generalisierbarkeit der Ergebnisse ein und erlauben primär eine hypothesengenerierende Interpretation (Zalepugas et al., 2025). Zudem bildet die VR-Visualisierung zwar einen anatomischen „digitalen Zwilling“ ab, beinhaltet jedoch keine funktionelle Bildgebung oder biomechanische Simulation, sodass Aussagen zur postoperativen Lungenfunktion oder dynamischen Ventilation nicht möglich sind (Sadeghi et al., 2020; Newman, 2022). Weiterhin kann nicht ausgeschlossen werden, dass Novelty-Effekte, individuelle VR-Affinität und unterschiedliche Vorerfahrung die Bearbeitungszeiten und Entscheidungen beeinflusst haben (Lorenz et al., 2023; Zalepugas et al., 2025). Schließlich wurde keine formale Korrektur für multiples Testen vorgenommen, was die Interpretation einzelner Signifikanzen im explorativen Kontext vorsichtig werden lässt (Zalepugas et al., 2025).

Ausblick

Zur Validierung der Befunde sind prospektive, multizentrische Studien mit größeren Kohorten erforderlich, die neben diagnostischen Parametern auch klinische Endpunkte wie Operationsdauer, Komplikationsraten, Konversionsraten, Intensivverweildauer und Langzeitverlauf erfassen (Annunziata et al., 2019; Zalepugas et al., 2025). Ein besonders relevantes Entwicklungsfeld ist die Integration von VR-Workflows in bestehende „Smart-Hospital“-Infrastrukturen, in denen PACS-basierter Datentransfer, standardisierte Rekonstruktionspipelines und sichere In-house-Verarbeitung die Routineanwendung erleichtern können (Zalepugas et al., 2025; Sadeghi et al., 2022).

In diesem Kontext erscheint die Kopplung mit (semi-)automatisierten Segmentierungsverfahren beispielsweise durch Methoden aus der Künstlichen Intelligenz sinnvoll, um die Erstellung patientenspezifischer Modelle zu beschleunigen und die interindividuelle Variabilität der Modellaufbereitung zu reduzieren (Sadeghi et al., 2022; Reinschluessel et al., 2022).

Darüber hinaus bieten immersive 3D-Modelle ein hohes Potenzial für interdisziplinäre Fallbesprechungen, da sie ein gemeinsames räumliches Referenzsystem schaffen und komplexe Anatomie für verschiedene Fachdisziplinen simultan verständlich machen können (Zalepugas et al., 2025; Pederiva et al., 2023). Insbesondere in der pädiatrischen Versorgung, in der die Indikationsstellung häufig in Teams aus Pädiatrie, Radiologie und (Kinder- bzw. Thorax-) Chirurgie erfolgt, könnte eine VR-gestützte Visualisierung die Konsensfindung und die Dokumentation der Entscheidungsgrundlagen unterstützen (Annunziata et al., 2019; Hermelijn et al., 2021). Zusätzlich eröffnet VR ein didaktisches Einsatzfeld für strukturierte chirurgische Ausbildung, indem seltene Befundkonstellationen wiederholt exploriert und die räumliche Anatomie unabhängig von der Verfügbarkeit realer OP-Fälle trainiert werden kann (Sadeghi et al., 2022; Boedecker et al., 2021).

Ein weiterer klinisch relevanter Anwendungsbereich ist die Eltern- und Patientenaufklärung, da dreidimensionale, patientenspezifische Darstellungen die Verständlichkeit der Erkrankung und des geplanten Eingriffs erhöhen und damit Shared-Decision-Making unterstützen können (Pederiva et al., 2023; Boedecker et al., 2021).

Perspektivisch ist auch eine Verzahnung mit robotischen und navigationsgestützten Operationsverfahren denkbar, bei der patientenspezifische 3D-Modelle als präoperative

Roadmap dienen und intraoperative Orientierung unterstützen (Sadeghi et al., 2022; Zalepugas et al., 2025). Damit könnte sich VR von einem reinen Visualisierungstool zu einem Bestandteil patientenspezifischer, datengetriebener Präzisionschirurgie entwickeln, insbesondere, wenn Bilddaten, Segmentierung, Planung und intraoperative Assistenz in einem konsistenten digitalen Workflow zusammengeführt werden (Sadeghi et al., 2020; Sadeghi et al., 2022).

1.5 Zusammenfassung

Kongenitale thorakale Malformationen stellen aufgrund ihrer anatomischen Vielfalt und der eingeschränkten Bildqualität niedrig dosierter CT-Untersuchungen im Säuglingsalter eine besondere Herausforderung für die präoperative chirurgische Beurteilung und Planung dar. Die konventionelle zweidimensionale Betrachtung von CT-Schnittbildern erfordert ein hohes Maß an räumlicher Vorstellungskraft und kann insbesondere bei komplexen oder Lungenlappen-übergreifenden Befunden zu Unsicherheiten in der diagnostischen Einschätzung und der Wahl der operativen Strategie führen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, retrospektiv zu untersuchen, welchen Einfluss eine immersive dreidimensionale Visualisierung von CT-Datensätzen in virtueller Realität auf die präoperative Operationsplanung bei Kindern mit kongenitalen thorakalen Malformationen hat. Hierzu wurden konventionelle 2D-CT-Bildbetrachtungen mit VR-basierten 3D-Rekonstruktionen systematisch verglichen.

Insgesamt wurden 14 operierte pädiatrische Patientinnen und Patienten retrospektiv analysiert. Acht Chirurginnen und Chirurgen unterschiedlicher Erfahrungsstufen bewerteten sämtliche Fälle sowohl in der konventionellen CT-Ansicht als auch mittels VR-basierter Visualisierung. Die Einschätzungen wurden anhand standardisierter Kriterien erhoben und mit den radiologischen Befunden, den intraoperativen Operationsberichten sowie den histopathologischen Ergebnissen verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass beide Visualisierungsmethoden eine vollständige Sensitivität hinsichtlich der Detektion pathologischer thorakaler Veränderungen aufweisen. Bei der differenzierten diagnostischen Zuordnung zeigte sich jedoch ein Vorteil zugunsten der

VR-basierten Analyse, insbesondere im Vergleich zum histopathologischen Referenzstandard. Auch in der anatomischen Beurteilung komplexer Befunde, wie multilobärer Beteiligungen oder mediastinaler Verlagerungen, ergaben sich Hinweise auf eine verbesserte räumliche Erfassung durch die immersive 3D-Darstellung. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit aktuellen Arbeiten zur VR-gestützten Operationsplanung in der Thorax- und auch in der Viszeralchirurgie (Sadeghi et al., 2020; Bakhuis et al., 2023).

Von besonderer klinischer Bedeutung ist der Einfluss der VR-Visualisierung auf die antizipierte operative Strategie. Die VR-basierte Planung führte häufiger zu einer korrekten Vorhersage des tatsächlich durchgeführten operativen Eingriffs und beeinflusste in mehreren Fällen die Einschätzung des erforderlichen Resektionsausmaßes. Dies unterstreicht das Potenzial der VR-Technologie als patientenspezifischen digitalen Zwilling, der individuelle anatomische Besonderheiten präzise abbildet und die Operationsplanung unterstützen kann.

Der höhere Zeitaufwand der VR-basierten Analyse stellt eine Limitation dar, zeigte jedoch eine deutliche Abnahme mit zunehmender Nutzung, was auf einen relevanten Lerneffekt hinweist. Zudem deutet die höhere Interrater-Übereinstimmung in der VR-Gruppe darauf hin, dass die immersive Visualisierung Unterschiede im Erfahrungsstand der Untersucher zumindest teilweise ausgleichen kann.

Zusammenfassend zeigt die vorliegende Arbeit, dass VR-basierte 3D-Visualisierungen von CT-Datensätzen eine wertvolle Ergänzung zur konventionellen Bildbetrachtung in der kinderthoraxchirurgischen Operationsplanung darstellen können. Insbesondere bei komplexen kongenitalen thorakalen Malformationen bietet die Technologie das Potenzial, die diagnostische Sicherheit und die Präzision der präoperativen Entscheidungsfindung zu verbessern. Prospektive Studien mit größeren Fallzahlen sind erforderlich, um diese Ergebnisse weiter zu validieren und den Einfluss auf klinische Outcome-Parameter zu untersuchen.

1.6 Literaturverzeichnis der deutschen Zusammenfassung

Annunziata F, Bush A, Borgia F, Raimondi F, Montella S, Poeta M. Congenital lung malformations: unresolved issues and unanswered questions. Front Pediatr. 2019;7:239.

Bakhuis W, Sadeghi AH, Moes I, Maat APWM, Siregar S, Bogers AJJC, Mahtab EAF. Essential surgical plan modifications after virtual reality planning in 50 consecutive segmentectomies. Ann Thorac Surg. 2023;115:1247–1255.

Boedecker C, Huettl F, Saalfeld P, Paschold M, Kneist W, Baumgart J. Using virtual 3D models in surgical planning: workflow of an immersive virtual reality application in liver surgery. Langenbecks Arch Surg. 2021;406:911–915.

Bush A. Congenital lung disease: a plea for clear thinking and clear nomenclature. Pediatr Pulmonol. 2001;32:328–337.

Cancemi G, Distefano G, Vitaliti G, Milazzo D, Terzo G, Belfiore G. Congenital lung malformations: a pictorial review of imaging findings and a practical guide for diagnosis. Children. 2024;11:638.

De Winter D, De Groot KM. Natural course of CPAM and pulmonary sequestration: to operate or not to operate, this is the question. Pediatr Pulmonol. 2024;59:2730–2737.

Hermelijn SM, Elders BBLJ, Ciet P, Wijnen RMH, Tiddens HAWM, Schnater JM. A clinical guideline for structured assessment of CT imaging in congenital lung abnormalities. Paediatr Respir Rev. 2021;37:80–88.

Lamberti R, Canali G, Romero A, Ghezzi M, Zuccotti GV, D'Auria E. Congenital pulmonary airway malformation: state of the art review. Pediatr Respir J. 2023;1:120–126.

Lee EY, Boiselle PM, Cleveland RH. Multidetector CT evaluation of congenital lung anomalies. Radiographics. 2010;30:1721–1738.

Lorenz M, Brade J, Klimant P, Heyde CE, Hammer N. Age and gender effects on presence, user experience and usability in virtual environments – first insights. PLoS One. 2023;18:e0283565.

Mon RA, Johnson KN, Ladino-Torres M, Heider A, Mychaliska GB, Treadwell MC. Diagnostic accuracy of imaging studies in congenital lung malformations. Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed. 2018;103:F333–F338.

Muntean A, Toganel R, Benedek T, Popoiu C, Simon S, Marginean O. Malignant transformation of congenital pulmonary airway malformation: a systematic review of reported cases. J Pediatr Surg. 2021;56:1735–1741.

Newman B. Magnetic resonance imaging for congenital lung malformations. Pediatr Radiol. 2022;52:312–322.

Pederiva F, Dalena P, Pasqua N, Bresesti I, Testa V, Zirpoli S, Gentilino V. Risk of malignant transformation and infections in congenital lung malformations in adults: a systematic review. Eur Respir Rev. 2025;34:240254.

Pederiva F, Rothenberg SS, Hall N, Ijsselstijn H, Wong KKY, von der Thüsen J, Ciet P, Achiron R, Pio d'Adamo A, Schnater JM. Congenital lung malformations. Nat Rev Dis Primers. 2023;9:60.

Reinschluessel AV, Muender T, Salzmann D, Döring T, Malaka R, Weyhe D. Virtual reality for surgical planning – evaluation based on two liver tumor resections. Front Surg. 2022;9:821060.

Sadeghi AH, Bakhuis W, Van Schaagen F, Oei FBS, Bekkers JA, Maat APWM. Immersive 3D virtual reality imaging in planning minimally invasive and complex adult cardiac surgery. Eur Heart J Digit Health. 2020;1:62–70.

Sadeghi AH, Mathari SE, Abjigitova D, Maat APWM, Taverne YJHJ, Bogers AJJC. Current and future applications of virtual, augmented, and mixed reality in cardiothoracic surgery. Ann Thorac Surg. 2022;113:681–691.

Style CC, Mehollin-Ray AR, Verla MA, Olutoye OO, Lau PE, Johnson BL. Accuracy of prenatal and postnatal imaging for management of congenital lung malformations. J Pediatr Surg. 2020;55:844–847.

2. Veröffentlichungen

Dieser Publikationsdissertation liegt die folgende, unabhängig begutachtete Veröffentlichung zugrunde:

Zalepugas D, Buermann J, Senkel S, Schmidt N, Ziegler AM, Kurz R, Schmidt J, Feodorovici P, Arensmeyer JC. The potential of real-time rendered-volume 3D imaging in immersive virtual reality for surgical planning in infants with congenital thoracic malformation. Comput Struct Biotechnol J 2025;28:480–486

https://doi.org/10.1016/j.csbj.2025.11.005

Die Publikation erschien als Open-Access-Artikel unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0 und erfüllt damit die Voraussetzungen zur Zweitveröffentlichung im Rahmen der Dissertation. Die in der vorliegenden Arbeit dargestellte deutsche Zusammenfassung stellt eine eigenständige wissenschaftliche Aufarbeitung der publizierten Ergebnisse dar und ist keine Übersetzung des Originalartikels.

3. Erklärung zum Eigenanteil

Die vorliegende Publikationsdissertation mit dem Titel „Retrospektive Analyse des Potentials der virtuellen Realität für die Operationsplanung anhand der CT-Bildgebung bei Kindern mit kongenitalen thorakalen Malformationen (KTM)“ wurde in der Klinik für Thoraxchirurgie des Universitätsklinikums Bonn unter der Betreuung von **Prof. Dr. med. Joachim Schmidt** (Erstbetreuer) und **Dr. med. Jan Christian Arensmeyer** (Zweitbetreuer) durchgeführt.

Planung und Konzeption der wissenschaftlichen Arbeit

Die Konzeption der Studie, die Formulierung der wissenschaftlichen Fragestellung sowie das Studiendesign als retrospektive Vergleichsanalyse zwischen konventioneller 2D-CT-Bildbetrachtung und immersiver 3D-VR-Visualisierung wurden von mir eigenständig entwickelt. Die grundsätzliche methodische Ausrichtung und klinische Relevanz der Arbeit wurden im Rahmen regelmäßiger Betreuungsgespräche mit den Betreuern diskutiert und weiter geschärft.

Datenerhebung und Datenaufbereitung

Die Identifikation der geeigneten Patientenkohorte, die Definition der Ein- und Ausschlusskriterien sowie die Zusammenstellung der retrospektiven Bilddaten (CT-Datensätze) erfolgten durch mich. Die Bilddaten wurden im klinischen PACS pseudonymisiert bereitgestellt. Die Überführung der anonymisierten DICOM-Datensätze in die VR-Umgebung sowie die Standardisierung der Visualisierungsparameter erfolgten nach vorher festgelegten Kriterien, die ich eigenständig ausgearbeitet habe.

Die Planung und Organisation der retrospektiven Assessments durch Chirurginnen und Chirurgen unterschiedlicher Erfahrungsstufen, einschließlich der Implementierung eines Wash-out-Intervalls zur Reduktion von Erinnerungs- und Beurteilungsbias, wurden durchgeführt.

Durchführung der Analysen

Die strukturierte Erhebung der Beurteilungen anhand standardisierter Fragebögen sowie die Erfassung der jeweiligen Bearbeitungszeiten wurden von mir koordiniert und dokumentiert. Die Zusammenführung der erhobenen Daten, deren Plausibilitätsprüfung sowie die Vorbereitung der Datensätze für die statistische Auswertung erfolgten eigenständig.

Statistische Auswertung und Interpretation

Die statistische Auswertung der erhobenen Daten wurde von mir selbstständig durchgeführt. Dies umfasste die Auswahl geeigneter statistischer Tests, die Berechnung der Kennzahlen sowie die Interpretation der Ergebnisse im Kontext der Fragestellung. Bei methodischen Fragestellungen zur statistischen Auswertung erfolgte eine beratende Rücksprache, die Verantwortung für die korrekte Anwendung und Interpretation der statistischen Verfahren lag jedoch vollständig bei mir.

Manuskripterstellung und Publikation

Die Erstellung des wissenschaftlichen Manuskripts, das der vorliegenden Publikationsdissertation zugrunde liegt, erfolgte federführend durch mich. Ich war Erstautor der Publikation und maßgeblich verantwortlich für die inhaltliche Ausarbeitung, Strukturierung, Interpretation der Ergebnisse sowie die finale Textfassung. Koautoren leisteten inhaltliche Beiträge in Form fachlicher Diskussionen, klinischer Einordnung und kritischer Durchsicht des Manuskripts.

Einsatz von KI-gestützten Sprachmodellen

Bei der Überarbeitung der Dissertationsschrift sowie des zugrundeliegenden Manuskripts wurde ein generatives Sprachmodell (ChatGPT, OpenAI) unterstützend eingesetzt, insbesondere zur Verbesserung von Sprachstil, Grammatik und Lesbarkeit. Nach Nutzung dieses Tools habe ich sämtliche entsprechenden Textpassagen kritisch überprüft, inhaltlich bewertet und gegebenenfalls angepasst. Die Verantwortung für den gesamten wissenschaftlichen Inhalt der Dissertation liegt uneingeschränkt bei mir.

Selbstständigkeitserklärung

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

4. Danksagung

Ich danke allen Koautorinnen und Koautoren der dieser Dissertation zugrundeliegenden Publikation für ihre fachliche Unterstützung sowie die stets konstruktive und kollegiale Zusammenarbeit.

Mein besonderer Dank gilt **Univ.-Prof. Dr. med. Joachim Schmidt** für die kontinuierliche wissenschaftliche Betreuung, die kritische Diskussion der Ergebnisse sowie für die langjährige Förderung meines wissenschaftlichen und klinischen Werdegangs in der Thoraxchirurgie und seine Rolle als prägender Mentor.

Dr. med. Jan Christian Arensmeyer danke ich für die engagierte methodische Begleitung der Arbeit, die wertvollen inhaltlichen Anregungen sowie die Unterstützung bei der Umsetzung und Interpretation der virtuellen Realität in der chirurgischen Operationsplanung.

Philipp Feodorovici danke ich für die technische und konzeptionelle Unterstützung im Bereich der VR-basierten Bildvisualisierung sowie für den fachlichen Austausch zur praktischen Implementierung der Technologie.

Dr. med. Jens Buermann danke ich für seine Mitwirkung bei der Auswertung der Studiendaten sowie für die verlässliche Unterstützung im klinischen Alltag.

Stefan Senkel danke ich für seine engagierte Beteiligung an der Datenauswertung und seine Unterstützung im Rahmen der retrospektiven Analyse.

Nele Schmidt danke ich für ihre sorgfältige Mitarbeit bei der Auswertung der erhobenen Daten und ihren Beitrag zur strukturierten Aufbereitung der Ergebnisse.

Dr. med. Anna-Maria Ziegler danke ich für ihre kinderchirurgische Expertise sowie für die wertvollen Hinweise zur klinischen Einordnung und Relevanz der Ergebnisse.

Dr. med. Ralf Kurz danke ich für die Unterstützung bei der Interpretation der kinderchirurgischen Befunde sowie für die konstruktive und kollegiale Zusammenarbeit.

Allen Beteiligten danke ich herzlich für die offene Zusammenarbeit und den fachlichen Austausch, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.