

Aus der Abteilung für Kinderkardiologie und Pädiatrische Intensivmedizin

Klinik der Universität München

Direktor: Prof. Dr. Nikolaus Haas



**Evaluation eines Trainingsprogramms zum Erlernen von
Herzkatheter-Interventionen basierend auf 3D-gedruckten
Herzmodellen**

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin

an der Medizinischen Fakultät der

Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Alisa Mansour

aus

Rheine

2023

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. Nikolaus Haas

Mitberichterstatter: Prof. Dr. Christian Hagl
Prof. Dr. Florian Hoffmann
Prof. Dr. Martin Fischer

Mitbetreuung durch die
promovierte Mitarbeiterin: PD Dr. Anja Lehner

Dekan: Prof. Dr. med. Thomas Gudermann

Tag der mündlichen Prüfung: 15.06.2023

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	7
Abstract	9
Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis	14
1. Einleitung	15
1.1 Angeborene Herzfehler.....	15
1.1.1 Interventionelle Therapie der angeborenen Herzfehler	16
1.1.2 Normale Herzanatomie.....	18
1.1.3 Anatomie und Therapie der angeborenen Herzfehler	18
1.1.3.1 Ventrikelseptumdefekt (VSD).....	20
1.1.3.2 Vorhofseptumdefekt (ASD).....	21
1.1.3.3 Persistierender Ductus arteriosus (PDA).....	22
1.1.3.4 Pulmonalklappenstenose (PS).....	22
1.1.3.5 Aortenklappenstenose (AS).....	23
1.1.3.6 Aortenisthmusstenose (ISTA).....	24
1.2 Prinzipielle Verwendung von Modellen.....	25
1.3 Verwendung von Modellen in der Medizin.....	25
1.4 3D-Modelle und 3D-Druck	26
1.5 Hinleiten zur Fragestellung	27
2. Material und Methoden	28
2.1 Entwicklung der 3D-Modelle.....	28
2.1.1 Modelle 1. Generation	30
2.1.2 Modelle 2. Generation	33
2.1.3 Modelle 3. Generation	34
2.1.4 3D-Druck.....	36
2.2 Hands-on Trainingskurse.....	38
2.2.1 Prinzipieller Ablauf eines Kurses	38
2.2.2 Ablauf und Teilnehmende der einzelnen Kurse.....	39
2.2.2.1 A1.....	39
2.2.2.2 B1.....	39
2.2.2.3 B2.....	41
2.2.2.4 B3.....	42
2.2.2.5 B4.....	42
2.2.2.6 B5.....	42
2.2.2.7 C1	42

2.3	Teilnehmende	43
2.4	Entwicklung des Trainingsmanuals	43
2.5	Entwicklung des Fragebogens.....	43
2.5.1	A1	44
2.5.2	B1	44
2.5.3	B2 – 5	45
2.5.4	C1	45
2.6	Exkurs Äthiopien.....	46
2.7	Evaluation	51
3.	Ergebnisse	53
3.1	Hands-on Kurse.....	53
3.2	Teilnehmende	53
3.3	Kurse	55
3.3.1	A1	56
3.3.2	B1	57
3.3.2.1	Erwartung der Teilnehmenden und abschließende Bewertung	57
3.3.3	B1 - B5.....	60
3.3.3.1	Allgemeine Bewertung der Herzmodelle.....	60
3.3.3.2	Eignung der 3D-gedruckten Herzmodelle als Lehrmodell	63
3.3.3.3	Eignung der Modelle als Simulationsmodell	68
3.3.3.4	Eignung der 3D-gedruckten Herzmodelle als Lehrform.....	73
3.3.4	B2 – 5 Zusatzfragen	78
3.3.5	C1	83
3.3.5.1	Fragen an die unerfahrenen Teilnehmenden.....	83
3.3.5.2	Fragen an die mäßig erfahrenen und erfahrenen Teilnehmenden	83
3.3.6	Freitextkommentare	84
4.	Diskussion.....	86
4.1	Diskussion über Modelle allgemein	86
4.1.1	Diskussion über Modelle außerhalb der Medizin.....	87
4.1.2	Diskussion über Modelle in der Medizin	87
4.2	Bedeutung für die Kinderkardiologie.....	89
4.3	Diskussion der Methodik.....	90
4.4	Studienlimitationen	91
4.5	Exkurs Äthiopien.....	92
4.6	Schlussfolgerung	92
	Literaturverzeichnis	94
5.	Anhang A: Zusammenfassung des Fragebogens	99

6.	Danksagung	102
7.	Affidavit	103
8.	Lebenslauf.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.	Publikationsliste	104
10.	Publikation	106

Zusammenfassung

Hintergrund

Die Katheterintervention im frühen Kindesalter spielt aufgrund stetiger Fortschritte der interventionellen Kardiologie eine immer größer werdende Rolle bei der Behandlung von angeborenen Herzfehlern. Dabei erfordert die Durchführung einer derartigen Intervention eine langwierige Ausbildung zum Erwerb der praktischen Fertigkeiten und ein detailliertes Verständnis der angeborenen Herzfehler. Ebenso wichtig wie der Einsatz von Modellen und der Durchführung der Simulationen ist deren Evaluation. Für eine gezielte Weiterentwicklung der Modelle und des Trainingsablaufs ist eine Bewertung durch die Teilnehmenden essenziell. Eine Fragebogenevaluation ermöglicht die subjektive Einschätzung der Teilnehmenden hinsichtlich ihrer Zufriedenheit, der praktischen Fertigkeiten nach der Übung sowie der Vermittlung von Verbesserungsvorschlägen oder Wünschen. Ziel dieser Arbeit war es, bewerten zu können, inwieweit die neu entwickelten 3D-Modelle angeborener Herzfehler das Verständnis der anatomischen Gegebenheiten erleichtern, ein einfaches Erlernen der Herzkathetertechnik ermöglichen und eine Trainingsmöglichkeit darstellen können.

Methodik

Die 3D-Modelle wurden in einem Prozess verschiedener Herstellungsmethoden entwickelt. Für eine realitätsgetreue Nachbildung wurden archivierte CT-Daten von Patient*innen mit angeborenen Herzfehlern mit einer 3D-Software bearbeitet und anschließend mit einem 3D-Drucker (Keyence Agilista, 3200 W) gedruckt. Insgesamt wurden Modelle des gesunden Herzens sowie des persistierenden Ductus arteriosus (PDA), des Vorhofseptumdefekts (ASD), des Ventrikelseptumdefekts (VSD), der Pulmonalklappenstenose (PS), der Aortenklappenstenose (AS) und der Aortenisthmusstenose (ISTA) hergestellt. Die Modelle konnten im Rahmen von Simulationskursen begutachtet und die Behandlung der Herzfehler im Herzkatheterlabor unter realen Bedingungen getestet werden. Teilgenommen haben sowohl Studierende als auch angehende und fertige Kinderkardiolog*innen mit keiner, wenig oder viel Erfahrung in der Intervention. Im Anschluss an die Übung wurde jeweils ein anonymisierter Evaluationsbogen ausgeteilt. Die Teilnahme war freiwillig. Der Fragebogen enthielt Fragen zu den Modellen, der Eignung der Modelle für den Erwerb praktischer Fähigkeiten und das Erlernen einzelner Schritte der Katheterintervention sowie den Zukunftsaussichten und der Einschätzung der Übungsmodalität. Mithilfe

offener Fragen konnten zudem Verbesserungsvorschläge und Anmerkungen registriert werden, mit denen die Modelle und der Kursablauf stetig weiterentwickelt wurden.

Ergebnisse

Das Feedback zu den Simulationskursen und den gedruckten 3D-Modellen war insgesamt sehr positiv. Alle Teilnehmenden gaben an, dass sie Übungen am Modell grundsätzlich hilfreich finden und sich in der Zukunft weitere Hands-on Kurse beziehungsweise mehr Übungen am Modell wünschen. Die Teilnehmenden gaben ebenfalls an, dass die Modelle realitätsnah sind und dabei helfen, die Anatomie zu verstehen. Die Teilnehmenden aller Erfahrungsstufen waren sich zudem einig, dass sie durch die Übung am 3D-gedruckten Herzmodell mehr Sicherheit bei der Intervention am Patienten bekommen würden. Im Rahmen der freien Kommentare ist die Realitätsnähe und die gute Lernatmosphäre besonders aufgefallen. Verbesserungsbedarf besteht demnach vor allem bei der Gruppengröße und dem Zeitmanagement.

Diskussion

Insgesamt zeigte sich ein großes Interesse aller Teilnehmenden an den neuen 3D-Modellen und deren praktischem Einsatz zur Aus- und Weiterbildung im Herzkatheterlabor. Besonders für die Studierenden ohne Erfahrung im Herzkatheterlabor oder junge Assistenzärzt*innen in Weiterbildung stellt es eine gute Gelegenheit dar, den Aufbau und die Funktionsweise einer Katheterintervention erklärt zu bekommen und nachvollziehen zu können. Die Visualisierung der Anatomie angeborener Herzfehler kann durch die realitätsnahe Darstellung der 3D-Modelle gefördert werden. Anhand der Evaluation zeigt sich die hohe Akzeptanz der Teilnehmenden gegenüber praktischen Übungen und der Verwendung von 3D-Modellen zu Ausbildungszwecken.

Schlussfolgerung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Simulationstraining die klassische Ausbildungsform nicht ersetzt, es kann den Lernprozess aber erleichtern und erheblich unterstützen. Besonders für angehende Kinderkardiolog*innen bietet es daher einen geeigneten Raum, um sich mit den Instrumenten vertraut zu machen, die praktischen

Fertigkeiten zu verinnerlichen und Sicherheit bei der Intervention am Patienten zu bekommen.

Abstract

Background

Cardiac catheterization in early childhood is constantly becoming more important through steady development and progress in treating children with congenital heart diseases. Such complex interventions require ongoing education and training to internalize practical skills as well as cultivating a detailed understanding of the heart's defects. For constant development and optimization of the models and the setup of hands-on training courses, feedback from participants is essential. Evaluation through questionnaires enables a subjective assessment in terms of satisfaction, practical skills after the exercise and communication of suggestions for improvement. This thesis aims to evaluate to what extent newly developed 3D-models of congenital heart diseases, as type of training, can simplify and support the understanding of anatomic features of congenital heart defects and learning of catheterization techniques.

Methods

3D-heart models were developed sequentially with various methods. To achieve realistic models, archived CT-data of patients with congenital heart defects were edited through a 3D-software and printed using a 3D-printer (Keyence Agilista, 3200 W). Overall, models of a healthy heart, a heart with persistent ductus arteriosus (PDA), secundum atrial septal defect (ASD), ventricular septal defect (VSD), pulmonary valve stenosis (PS), aortic valve stenosis (AS) and an aortic isthmus stenosis (CoA) were fabricated. As part of a series of hands-on training courses the models could be examined in detail and tested in real life conditions. Both students and cardiologists with varying levels of experience in catheterization participated in the hands-on training. At the end of each course an anonymous questionnaire was handed out. Participation in the evaluation was voluntarily. The questionnaire contained items concerning the structure of the models, the suitability of models to learn practical skills and steps of catheter interventions as well as visions for the future and assessment of this type of training. With the use of open questions proposals, proposals for improvement and comments could be registered to help refine the models and the setup of the course.

Results

Overall Feedback regarding the hands-on courses was positive. All participants stated that training on models in general is helpful and that they wish to attend further hands-on courses and training on models in the future. Also, all agreed that the models were very realistic and can be helpful to get a better understanding of the anatomy. The participants within all levels of experience agreed that training on models would provide more security when treating patients in the catheterization laboratory (cath lab). Free text comments showed especially the realism and positive learning environment to be remarkable. There is however need for improvement in group size and time management.

Discussion

In general, a growing interest in the newly developed 3D-printed models and their use for practical hands-on training in a cath lab was noticed. Especially for students or young doctors in training without any experience it proposes a good opportunity to get to know the cath lab and the complex procedure of heart catheterization. Visualization of the anatomy of congenital heart diseases was promoted by the realistic presentation of the 3D-models. Evaluation showed high acceptance for the practical training and use of 3D-models for education purposes by all participants.

Conclusion

Simulation based training will not be able to substitute the classic form of education, it can however ease and support the learning process. Especially cardiologists in training can familiarize with the instruments needed, internalize practical skills and gain security and self-consciousness in an appropriate environment before treating patients in a catheterization laboratory.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prävalenz der angeborenen Herzfehler in Deutschland	15
Abbildung 2: Anatomie des normalen Herzens.....	18
Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Ventrikelseptumdefekts	20
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Vorhofseptumdefekts.....	21
Abbildung 5: Schematische Darstellung eines persistierenden Ductus arteriosus	22
Abbildung 6: Schematische Darstellung einer Pulmonalklappenstenose	23
Abbildung 7: Schematische Darstellung einer Aortenklappenstenose	24
Abbildung 8: Schematische Darstellung einer Aortenisthmusstenose.....	24
Abbildung 9: Modellentwicklung im zeitlichen Verlauf	28
Abbildung 11: Schematische Darstellung des Pulmonalklappenstenose-Modells 1. Generation.....	31
Abbildung 10: Schematische Darstellung des Venenmodells 1. Generation.....	31
Abbildung 12: Das Modell der Pulmonalklappenstenose 1. Generation.....	32
Abbildung 13: Modell des arteriellen Systems 1. Generation	32
Abbildung 14: Das Venenmodell 1. Generation in der Durchleuchtung.....	33
Abbildung 15: Pulmonalklappenstenose-Modell 2. Generation unter Durchleuchtung	34
Abbildung 16: Modelle 3. Generation.....	35
Abbildung 17: Modell des linken Herzens.....	35
Abbildung 18: Modell 3. Generation während der Ballondilatation	36
Abbildung 19: Prinzip des 3D-Drucks	37
Abbildung 20: 3D-Druck eines Herzmodells	37
Abbildung 21: Prozess der Nachbearbeitung	38
Abbildung 22: Auswahl verwendeter Drähte und Katheter	40
Abbildung 23: Kunststoff-Babypuppe im Herzkatheterlabor	41
Abbildung 24: PDA-Modell 2. Generation unter Röntgendurchleuchtung.....	46
Abbildung 26: Hands-on-Übung in Zweiergruppen.....	48
Abbildung 25: Schritt-für-Schritt Anleitung	47
Abbildung 27: Modell der Pulmonalklappenstenose in der Durchleuchtung.....	48
Abbildung 28: Äthiopische Ärzt*innen im Herzkatheterlabor	49
Abbildung 29: Hands-on Übung am 3D-Modell 3. Generation.....	50
Abbildung 30: Durchschnittliche Anzahl an Wiederholungen der Kurse A1-B5.	55
Abbildung 31: Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden des Kurses B1 ..	57
Abbildung 32: Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden des Kurses B1 ..	58
Abbildung 33: Realitätsnähe der Modelle	60
Abbildung 34: Einfache Handhabung der Modelle.....	61
Abbildung 35: Allgemeine Bewertung der Modelle	62
Abbildung 36: Verstehen des Prozedere	63
Abbildung 37: Umgang mit den Katheterinstrumenten	64
Abbildung 38: Verständnis der Anatomie.....	65
Abbildung 39: Selbstständige Übung und Wiederholung.....	66

Abbildung 40: Eignung der 3D-gedruckten Herzmodelle als Lehrmodell	67
Abbildung 41: Einführen einer Schleuse und eines Führungsdrahtes	68
Abbildung 42: Wechseln des Katheters	69
Abbildung 43: Führen des Katheters zur Stelle der Intervention	70
Abbildung 44: Dilatation mittels Ballonkatheter.....	71
Abbildung 45: Eignung als Simulationsmodell	72
Abbildung 46: Übungen am Modell sind grundsätzlich hilfreich.....	73
Abbildung 47: Mehr Möglichkeiten zur Übung und Wiederholung	74
Abbildung 48: Mehr Sicherheit durch Modelle anderer Fachbereiche	75
Abbildung 49: Mehr Sicherheit bei der Intervention durch Hands-on Training ..	76
Abbildung 50: Eignung als Lehrform.....	77
Abbildung 51: Anatomischen Strukturen des menschlichen Herzens	78
Abbildung 52: Realistische Proportionen der Modelle	79
Abbildung 53: Die Qualität der Verarbeitung der Modelle ist gut.....	80
Abbildung 54: Nutzen der Modelle in der Ausbildungszeit.....	81
Abbildung 55: Nutzen der Modelle für Berufseinsteiger.....	82
Abbildung 56: Positives Feedback der Kurse A1 – C1	84
Abbildung 57: Verbesserungsvorschläge der Kurse A1 – C1	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung der angeborenen Herzfehler	19
Tabelle 2: Übersicht der Modelle in den Generationen 1 - 3	29
Tabelle 3: Antwortmöglichkeiten und numerische Codierung der Likert-Skala	51
Tabelle 4: Übersicht der Kurse und Teilnehmenden.....	54
Tabelle 5: Durchschnittliche Anzahl an Wiederholungen der Kurse A1 – B1	55
Tabelle 6: Antworten der Teilnehmenden des Kurses A1.....	56
Tabelle 7: Antworten der Teilnehmenden des Kurses B1 vor und nach dem Kurs	57
Tabelle 8: Antworten der Teilnehmenden des Kurses B1 vor und nach dem Kurs	59
Tabelle 9: Realitätsnähe der Modelle	60
Tabelle 10: Einfache Handhabung der Modelle.....	61
Tabelle 11: Allgemeine Bewertung der Modelle	62
Tabelle 12: Verständnis für das Prozedere fördern	63
Tabelle 13: Umgang mit den Katheterinstrumenten	64
Tabelle 14: Verständnis der Anatomie.....	65
Tabelle 15: Selbstständige Übung und Wiederholung.....	66
Tabelle 16: Eignung der 3D-gedruckten Herzmodelle als Lehrmodell.....	67
Tabelle 17: Einführen einer Schleuse und eines Führungsdrahtes	68
Tabelle 18: Wechseln des Katheters	69
Tabelle 19: Führen des Katheters zur Stelle der Intervention.....	70
Tabelle 20: Dilatation einer Klappe oder Gefäßstenose mittels Ballonkatheter.	71
Tabelle 21: Eignung der 3D-gedruckten Herzmodelle als Simulationsmodell ...	72
Tabelle 22: Übungen am Modell sind grundsätzlich hilfreich.....	73
Tabelle 23: Mehr Möglichkeiten zur Übung und Wiederholung	74
Tabelle 24: Mehr Sicherheit durch Modelle anderer Fachbereiche	75
Tabelle 25: Mehr Sicherheit bei der Intervention durch Hands-on Training.....	76
Tabelle 26: Eignung des Hands-on-Trainings als Lehrform.....	77
Tabelle 27: Anatomische Strukturen des menschlichen Herzens.....	78
Tabelle 28: Realistische Proportionen der Modelle	79
Tabelle 29: Die Qualität der Verarbeitung der Modelle ist gut.....	80
Tabelle 30: Nutzen der Modelle in der Ausbildungszeit.....	81
Tabelle 31: Nutzen der Modelle für Berufseinsteiger.....	82
Tabelle 32: Auswertung der unerfahrenen Teilnehmenden (n = 2)	83
Tabelle 33: Auswertung der mäßig erfahrenen Teilnehmenden (n = 3)	84

Abkürzungsverzeichnis

ACLS	Advanced Cardiac Life Support
AEPC	Association for European Paediatric and Congenital Cardiology
AHF / CHD	angeborene Herzfehler / congenital heart defect
AKH	Allgemeines Krankenhaus Wien
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
AS	Aortenklappenstenose
ASD	Atriumseptumdefekt / Vorhofseptumdefekt
CT	Computertomografie
DGPK	Deutsche Gesellschaft für Pädiatrische Kardiologie und angeborene Herzfehler e.V.
EUROCAT	European Surveillance of Congenital Anomalies
GIZ	Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
HK	Herzkatheter
IDHK e.V.	Interessengemeinschaft Das herzkranke Kind e.V.
ISNPCHD	International Society for Nomenclature of Paediatric and Congenital Heart Disease
ISTA / CoA	Aortenisthmusstenose
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität München
PDA	Persistierender Ductus arteriosus
PS	Pulmonalklappenstenose
SBME	Simulation Based Medical Education
SDI	soziodemografischer Index
TOF	Fallot Tetralogie
VSD	Ventrikelseptumdefekt

1. Einleitung

1.1 Angeborene Herzfehler

Angeborene Herzfehler oder auch ‚congenital heart defects‘ (AHF / CHD) sind definiert als eine grobe, strukturelle Abnormalität des Herzens oder der großen Gefäße, die zu einer funktionellen Einschränkung führen kann (1). AHF sind mit Abstand die häufigsten angeborenen Fehlbildungen, was in den Daten der European Surveillance of Congenital Anomalies (EUROCAT) deutlich wird (2, 3). Die Prävalenz der angeborenen Herzfehler liegt durchschnittlich bei etwa 9,1 pro 1000 Lebendgeburten weltweit (4). Eine Metaanalyse von 260 Studien konnte zudem eine Zunahme der Prävalenz zwischen 1970 und 2017 feststellen (5). Die häufigsten AHF sind in absteigender Reihenfolge der Ventrikelseptumdefekt (VSD), der Atriumseptumdefekt (ASD, Vorhofseptumsdefekt), der Persistierende Ductus arteriosus (PDA), die Pulmonalklappenstenose (PS) und die Fallot Tetralogie (TOF). Der größte Zuwachs der AHF zeigte sich in beiden Metaanalysen bei den „mild CHD“, also den einfachen AHF wie dem VSD, ASD und PDA. Auffällig ist außerdem die unterschiedliche Prävalenz der Kontinente. Demnach hat Afrika mit 1,9 - 2,315 / 1000 Lebendgeburten die niedrigste Prävalenz weltweit. (4, 5) In Deutschland beträgt die Prävalenz der AHF 1,08 %, auch hier treten die Septumfehlbildungen (VSD: 48,9 %, ASD: 17,0%), gefolgt von der PS (6,1%) und dem PDA (4,3%) am häufigsten auf (6). Die globale Mortalität der AHF ist seit 1990 um 34 % gesunken, dennoch starben 2017 weltweit 261247 Menschen an den Folgen eines AHF, 69 % während des 1. Lebensjahres und die Mehrheit davon aus Ländern mit niedrigem soziodemographischem Index (SDI) (7).

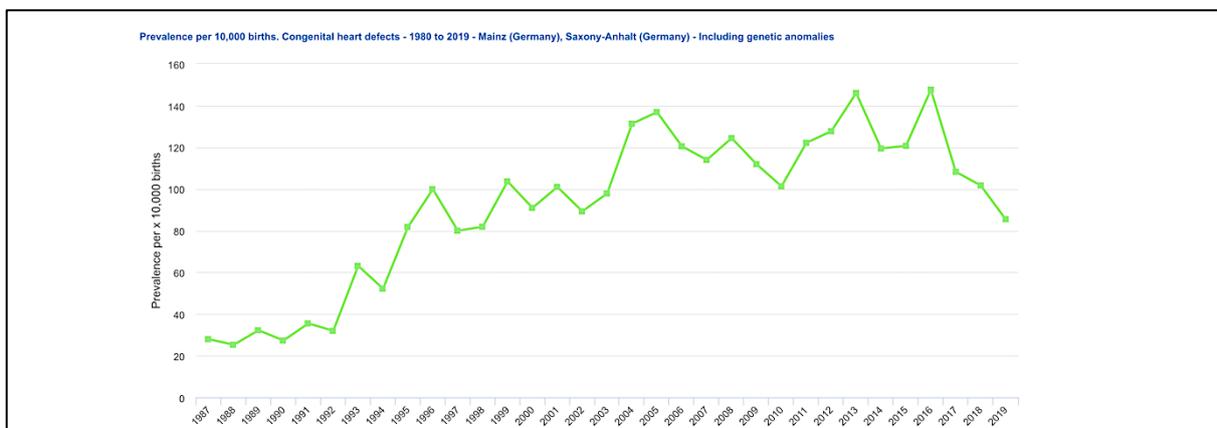


Abbildung 1: Prävalenz der angeborenen Herzfehler in Deutschland

Quelle: EUROCAT (3).

1.1.1 Interventionelle Therapie der angeborenen Herzfehler

Seit der Etablierung der Herzkatheteruntersuchung können angeborene Herzfehler, insbesondere die einfachen Formen, zunehmend interventionell behandelt werden. Durch den stetigen Fortschritt können zudem immer mehr Fehlbildungen auf diesem Weg korrigiert werden (8, 9). Diese Entwicklung erfordert eine Anpassung der Ausbildung angehender Kinderkardiolog*innen (10) sowie ein kontinuierliches Aufrechterhalten der Fähigkeiten (11). Unabhängig von der weiteren Spezialisierung sollte jeder im Bereich der Kinderkardiologie ein Verständnis für das Konzept und den Stellenwert interventioneller Katheterbehandlungen aufweisen und bei einem Minimum an Herzkatheterinterventionen involviert gewesen sein (12). Für die spezielle Ausbildung in der Intervention ist das theoretische Verständnis für das Prozedere und die sichere Ausführung der praktischen Fähigkeiten wesentlicher Bestandteil (12).

Die Art und der Zeitpunkt der Behandlung angeborener Herzfehler ist abhängig von der Größe des Defekts und dessen Einfluss auf die Hämodynamik. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, Katheterinterventionen in allen Altersstufen und Körpergrößen durchführen zu können. Angeborene Herzfehler mit einem initialen Links-Rechts-Shunt können die Entstehung einer pulmonalen Hypertonie und damit ein Eisenmenger-Syndrom verursachen. Das Risiko ist am größten bei einem nicht behandelten ASD, VSD oder PDA (13). Die Entstehung einer pulmonalen Hypertonie mit der Eisenmenger-Reaktion als Endstadium tritt bei einem VSD oder großen PDA häufiger auf als bei einem ASD. Um dies zu vermeiden, sollten besonders die VSDs frühzeitig verschlossen werden. (14) Ein Verschluss des ASD sollte im frühen Kindesalter mit vier bis fünf Jahren beziehungsweise bei der Diagnosestellung erwogen werden, um der Entstehung von sekundären Komplikationen wie der pulmonalen Hypertonie und dem Eisenmenger-Syndrom vorzubeugen (15, 16).

Das Grundprinzip der Untersuchung im Herzkatheter (HK) umfasst die Punktion des Gefäßes mit einer Punktionskanüle, dem Vorschieben eines Führungsdrahtes in das Gefäß und anschließender Entfernung der Kanüle und Einführen einer Schleuse über den Führungsdraht. Nun kann anhand des Drahtes ein Katheter eingeführt werden. Unter Röntgendurchleuchtung wird die Kontrastmittelangiographie genutzt, um den Katheter zur Stelle der Intervention zu führen.

Ein wichtiger Schritt ist der Wechsel des Katheters über den Führungsdraht. Dabei wird der Katheter entfernt, ohne dass sich der Führungsdraht in seiner Position

verändert, und im Anschluss ein anderer Katheter über den Führungsdraht vorgeschoben.

Es existieren verschiedene Arten von Kathetern. Die Wahl des Katheters hängt von den anatomischen Gegebenheiten und der Art der Intervention ab. Zu diagnostischen Zwecken können anhand der Kontrastmittelangiographie die Gefäße und die Herzanatomie beurteilt werden. Druckmessungen erlauben zudem die Beurteilung des Ausmaßes einer pulmonalen Hypertonie.

Bei der interventionellen Therapie angeborener Herzfehler ist das Grundprinzip identisch zu der diagnostischen HK-Untersuchung. Zusätzlich zur Diagnostik können mit speziellen Instrumenten Defekte der Herzanatomie therapiert werden. Dabei ist je nach Defekt sowohl ein venöser als auch arterieller Zugang notwendig. Das jeweilige Verschlusssystem wird über einen Katheter zur Stelle der Intervention gebracht und kann, nachdem es richtig positioniert wurde, vom Katheter gelöst werden.

Für die Behandlung eines Septumdefektes kann ein sogenannter Occluder verwendet werden. Occluder sind eine Art Schirmchen-Verschluss, wodurch der Defekt des Septums abgedichtet wird.

Die Behandlung einer Stenose, wie bei der Pulmonal-, Aorten, oder Isthmusstenose, erfordert eine Aufweitung durch einen Ballonkatheter. Dieser wird über den Führungsdraht über die Stenose hinaus vorgeschoben. Die Position kann durch röntgendichte Markierungen am oberen und unteren Ende des Ballons verifiziert werden. Die Dilatation erfolgt über einen Indeflator. Dabei wird der Ballon druckkontrolliert und unter Röntgendurchleuchtung mit einer Natriumchloridlösung gefüllt. Dadurch entfaltet sich der Ballon und die Engstelle wird gleichmäßig dilatiert. Ist der Zieldruck erreicht, kann die Flüssigkeit wieder abgelassen und der Katheter entfernt werden.

Für den Verschluss eines Persistierenden Ductus arteriosus wird ein Coil in den Ductus eingebracht. Ein Coil ist eine kleine Metallspirale, die nach dem Einsetzen den Ductus verschließt.

Eine genaue Beschreibung der jeweils notwendigen Schritte und der verwendeten Systeme ist unter 1.1.3. beschrieben.

1.1.2 Normale Herzanatomie

Das gesunde Herz besteht aus zwei Vorhöfen (Atrium dextrum und sinistrum) und zwei Herzkammern (Ventriculus dexter und sinister), die von einem Herzbeutel (Perikard) umgeben sind. Die Herzbinnenräume werden durch die Herzscheidewand in eine linke und eine rechte Herzhälfte geteilt. Die Herzscheidewand besteht aus zwei Teilen, der Vorhofscheidewand (Septum interatriale) und der Kammerscheidewand (Septum interventriculare). Das Herz besitzt außerdem vier Herzklappen, die den Blutfluss regulieren. Zwischen Vorhof und Kammer befindet sich jeweils eine Segelklappe (Atrioventriculärklappe), rechts die Trikuspidalklappe und links die Mitralklappe. Zwischen Ventrikel und Ausstrombahn befinden sich die Aortenklappe (links) und die Pulmonalklappe (rechts), welche auch als Taschenklappe bezeichnet werden. In seiner Lage im Thorax zeigt die Herzspitze (Apex cordis) nach links-unten-ventral, während die Herzbasis nach rechts-oben-dorsal zeigt. Der Standard der Lehre ist nach wie vor die Präparation des Organs an einem Leichenspender, obwohl sich zeigt, dass es virtuelle, 3-Dimensionale Alternativen gibt, die außerdem das Potential haben, das Verständnis für abnormale Anatomien zu vermitteln (17).

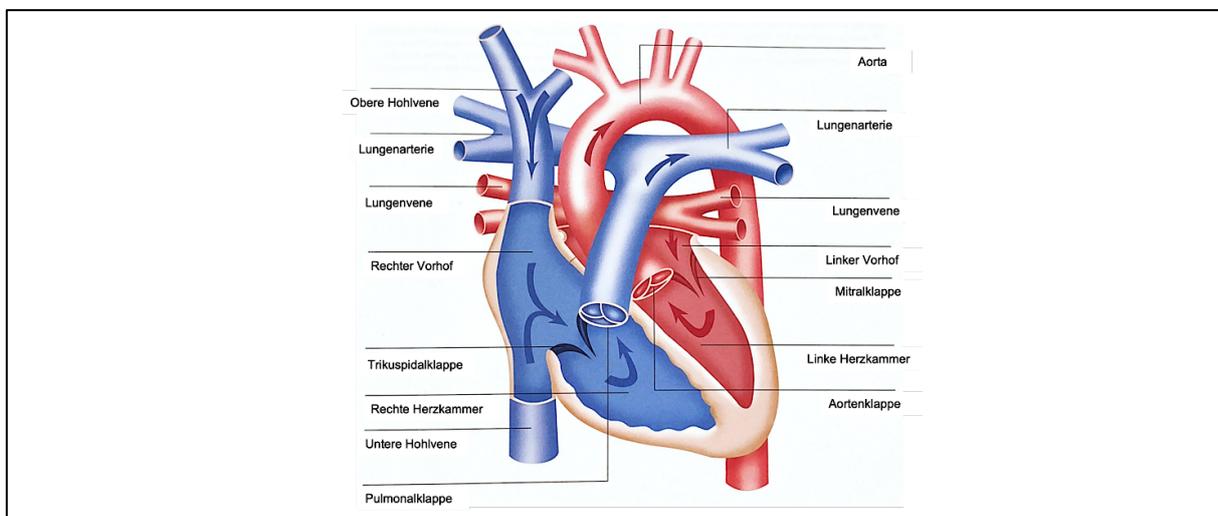


Abbildung 2: Anatomie des normalen Herzens

Quelle: Interessengemeinschaft Das herzkrankte Kind e.V., S.23 (18).

1.1.3 Anatomie und Therapie der angeborenen Herzfehler

Das Herz-Kreislaufsystem lässt sich aufteilen in einen großen Körperkreislauf und einen kleinen Lungenkreislauf. Im Körperkreislauf wird das Blut vom linken Ventrikel über die Aortenklappe in die Aorta und dadurch bis in die Kapillaren der Organe gepumpt. Anschließend fließt das Blut über das venöse System in die Vena cava

superior und inferior bis in den rechten Vorhof zurück. Im Körperkreislauf wird einerseits der Körper mit Sauerstoff und Nährstoffen versorgt, andererseits werden Stoffwechselmetabolite und Gase abtransportiert. Der Lungenkreislauf beginnt im rechten Ventrikel. Das Blut fließt über die Pulmonalklappe in die Pulmonalarterien und durch die Lunge, bevor es über die Pulmonalvenen in den linken Vorhof gelangt. Der Lungenkreislauf hat die Funktion des Gasaustausches, um das Blut zu oxygenieren. Eine weitere Aufteilung des Kreislaufsystems ist die Unterteilung in Hochdruck- und Niederdrucksystem. Das rechte Herz (Vorhof und Ventrikel) ist dem Niederdrucksystem zugeordnet, während das linke Herz zu dem Hochdrucksystem gehört. Durch die deutlich unterschiedlichen Druckverhältnisse kommt es bei Fehlern der Herzanatomie zur Umkehrung des Blutflusses in einem Teil des Systems. Man spricht in diesem Fall von einer Shuntverbindung. Bei einem Rechts-Links-Shunt gelangt sauerstoffarmes Blut zurück in den Körperkreislauf und mischt das sauerstoffreiche Blut zu Mischblut. Es entsteht eine Zyanose, da das Gewebe nicht mehr mit ausreichend Sauerstoff versorgt wird. Eingeteilt werden die Herzfehler demnach auch danach, ob ein zyanotischer oder nicht-zyanotischer Herzfehler vorliegt beziehungsweise ein Rechts-Links-Shunt oder ein Links-Rechts-Shunt auftritt.

Tabelle 1: Einteilung der angeborenen Herzfehler

zyanotisch	nicht zyanotisch
<ul style="list-style-type: none"> • Fallot-Tetralogie • Transposition der großen Arterien • Trikuspidalatresie • Hypoplastisches Linksherzsyndrom • Ebstein Anomalie 	<ul style="list-style-type: none"> • Ventrikelseptumdefekt (VSD) • Persistierendes Foramen ovale (PFO) • Vorhofseptumdefekt (ASD) • Persistierender Ductus arteriosus (PDA) • Aortenisthmusstenose (ISTA) • Pulmonalklappenstenose (PS) • Aortenklappenstenose (AS)

Die relevanteste hämodynamische Folge des Links-Rechts-Shunts ist neben der Volumenbelastung langfristig die Entwicklung einer pulmonalen Hypertonie und der daraus resultierenden Eisenmenger-Reaktion (19). Die veränderten Druckverhältnisse bewirken eine irreversible Umkehr des Shunts zu einem Rechts-Links-Shunt und somit einer Zyanose.

1.1.3.1 Ventrikelseptumdefekt (VSD)

Das Septum interventrikulare besteht aus einem membranösen (Pars membranacea) und einem muskulösen (Pars muscularis) Anteil. Es trennt die linke und rechte Herzkammer voneinander und ermöglicht so eine Trennung zwischen Lungen- und Körperkreislauf auf Ebene der Ventrikel. Ein Ventrikelseptumdefekt ist durch die International Society for Nomenclature of Paediatric and Congenital Heart Disease (ISNPCHD) definiert als ein angeborener Herzfehler, bei dem ein Loch oder ein Durchgang zwischen den Herzkammern besteht (20). Abbildung 3 stellt die anatomischen Gegebenheiten und die Hämodynamik des Ventrikelseptumdefekts schematisch dar. Bei einem relevanten VSD kommt es zu einem Links-Rechts-Shunt. Der interventionelle Verschluss eines VSD wurde erstmals 1988 beschrieben (21). Aufgrund der guten Erfolgsrate und geringen Komplikationen stellt dieser Ansatz zunehmend eine Alternative zum operativen Standard dar (22-25). Das interventionelle Vorgehen beinhaltet das Einbringen eines Schirmchenverschlusses über die Leistenvene, welcher über den rechten Vorhof, den rechten Ventrikel und durch das Ventrikelseptum hindurch in den linken Ventrikel geführt wird. Dort wird das Schirmchen entfaltet und der Katheter so weit zurückgezogen, dass das Schirmchen richtig über dem Defekt positioniert ist. Im nächsten Schritt wird der Verschluss von dem Katheter gelöst und der Katheter wieder entfernt.

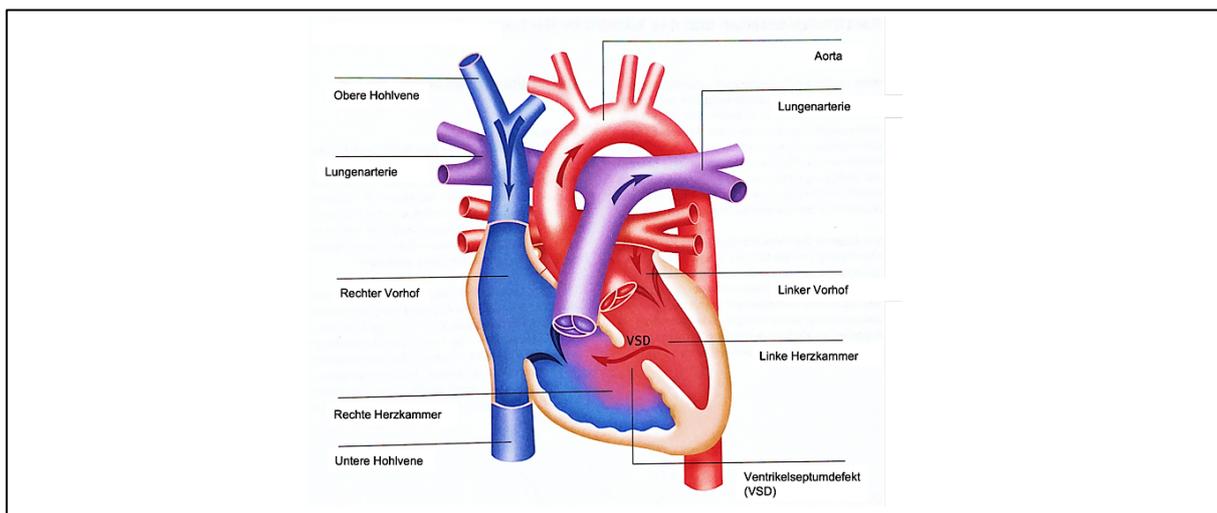


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Ventrikelseptumdefekts

Quelle: Interessengemeinschaft Das herzkranken Kind e.V., S.125 (18).

1.1.3.2 Vorhofseptumdefekt (ASD)

Der ASD stellt eine angeborene Herzfehlbildung dar, bei der eine Verbindung zwischen den Vorhofkammern besteht (20). Der ASD kann dabei weiter unterteilt werden in einen ASD I (Ostium-primum-Typ) und einen ASD II (Ostium-secundum-Typ), außerdem kann der seltenere Sinus venosus-Typ vorkommen (26). Beim ASD I wächst das Septum primum nicht vollständig mit dem Endokardkissen zusammen und es bleibt das Foramen primum bestehen, wohingegen der ASD II einen unzureichenden Verschluss des Foramen Secundum bedeutet (27). Der ASD II ist mit 75-80% deutlich häufiger als der ASD I, welcher ca. 15% der Vorhofseptumdefekte ausmacht (28). Bei dem am häufigsten vorkommenden ASD Typ II ist der Defekt im Septum zentral gelegen und bietet daher die Möglichkeit des interventionellen Verschluss (29). ASDs mit einem geringen Durchmesser (<5mm) verschließen sich häufig innerhalb der ersten zwei Lebensjahre spontan, auch größere Defekte bis 9 mm können sich in selteneren Fällen spontan verschließen, während ein Spontanverschluss nach dem zweiten Lebensjahr sehr unwahrscheinlich ist und damit eine Intervention oder Operation notwendig wird (30). Bei dem interventionellen Verschluss eines ASD wird ein Schirmchenverschluss über die Leistenvene in den rechten Vorhof, durch die Vorhofscheidewand hindurch, in den linken Vorhof geschoben. Dort wird das Schirmchen entfaltet und mitsamt dem Katheter zurückgezogen, sodass sich der Verschluss vor dem Defekt positioniert. Nun wird der Occluder vom Katheter gelöst.

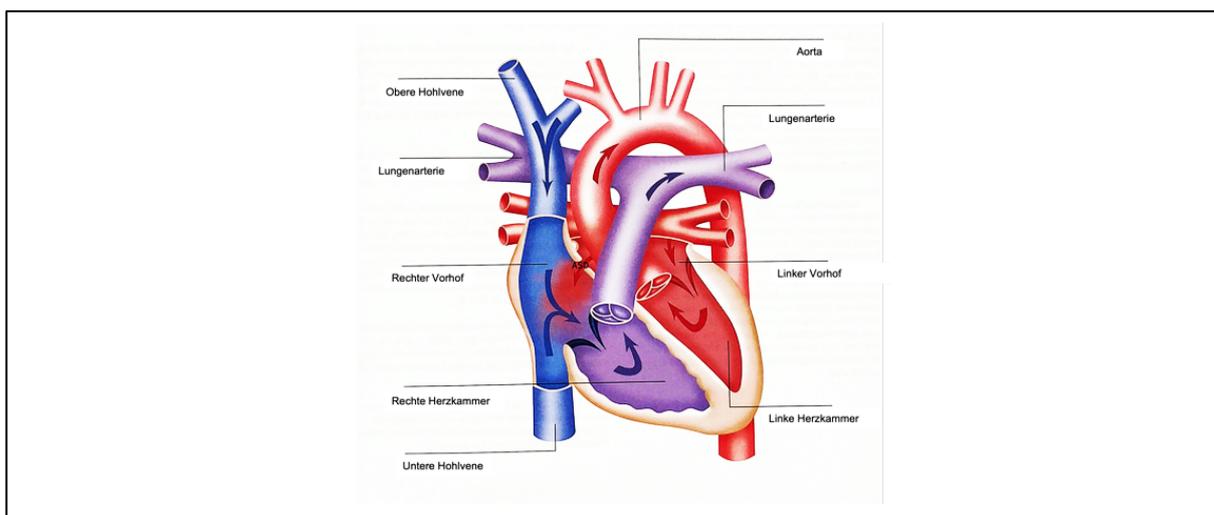


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Vorhofseptumdefekts

Quelle: Interessengemeinschaft Das herzkrankte Kind e.V., S.47 (18).

1.1.3.3 Persistierender Ductus arteriosus (PDA)

Der Ductus arteriosus ist pränatal eine wichtige Verbindung zwischen deszendierender Aorta und Truncus pulmonalis zur Umgehung des Lungenkreislaufs. Nach der Geburt obliteriert der Ductus innerhalb der ersten zehn Lebenstage. Bleibt der Ductus arteriosus über das normale Alter des Spontanverschlusses hinweg offen ist es per Definition ein persistierender Ductus arteriosus, welcher meist distal gegenüber des Abgangs der linken A. subclavia abgeht und in die Mündung der proximalen linken Pulmonalarterie in den Truncus pulmonalis eingeht (20). Der Verschluss des PDA erfolgt bei Neugeborenen zunehmend interventionell, bei älteren Kindern ist es bereits die Methode der ersten Wahl (31). Für die Behandlung des PDA ist es erforderlich sowohl über das venöse als auch das arterielle System zu katheterisieren. Das Coil wird dabei über die Aorta in den Ductus eingeführt. Über das rechte Herz und somit über die Pulmonalarterie wird Kontrastmittel gespritzt, um das ganze angiographisch darzustellen.

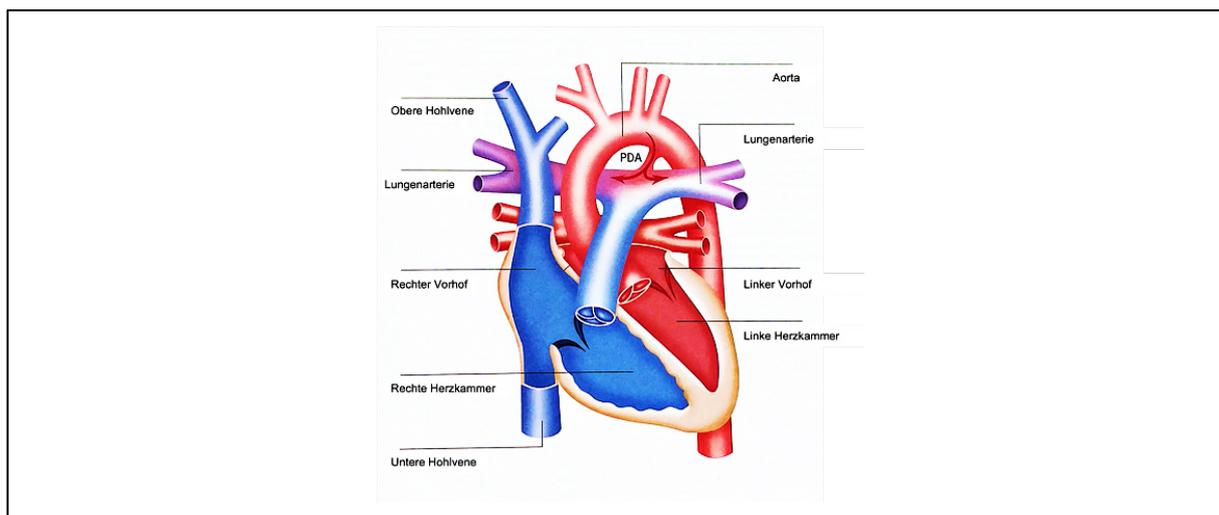


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines persistierenden Ductus arteriosus

Quelle: Interessengemeinschaft Das herzkranke Kind e.V., S. 97 (18).

1.1.3.4 Pulmonalklappenstenose (PS)

Die Pulmonalklappenstenose ist definiert als eine Verengung oder Behinderung des Blutflusses, welche als valvuläre Stenose bei Säuglingen, Kindern und Erwachsenen auftreten kann, aber auch als kritische hochgradige Stenose bei Neugeborenen zu einer Hypoplasie des rechten Ventrikels führen kann (20). Das Verfahren zur Behandlung einer Pulmonalklappenstenose wird Ballonvalvuloplastie genannt. Diese Technik wurde zuerst 1982 beschrieben (32). Die Katheterintervention bietet eine

sichere Alternative zu dem operativen Ansatz in der Therapie der Pulmonalklappenstenose und wird seitdem vorrangig angewendet (33).

Die interventionelle Behandlung der Pulmonalklappenstenose erfordert einen Ballonkatheter. Dieser kann von außen mit einer NaCl-Lösung gefüllt und somit dilatiert werden. Der Ballonkatheter wird über die Leistenvene in den rechten Vorhof, den rechten Ventrikel und schließlich bis in die Pulmonalarterie vorgeschoben. Nun wird der Katheter so positioniert, dass die Markierungen, welche unter Durchleuchtung sichtbar sind und den Anfang und das Ende des Ballons signalisieren, zentral über der Stenose zu liegen kommen. Im nächsten Schritt wird der Ballon über den Indeflator dilatiert. Unter Durchleuchtung lässt sich der Fortschritt beurteilen und am Indeflator der verwendete Druck ablesen. Anschließend erfolgen die Deflation und die Entfernung des Katheters.

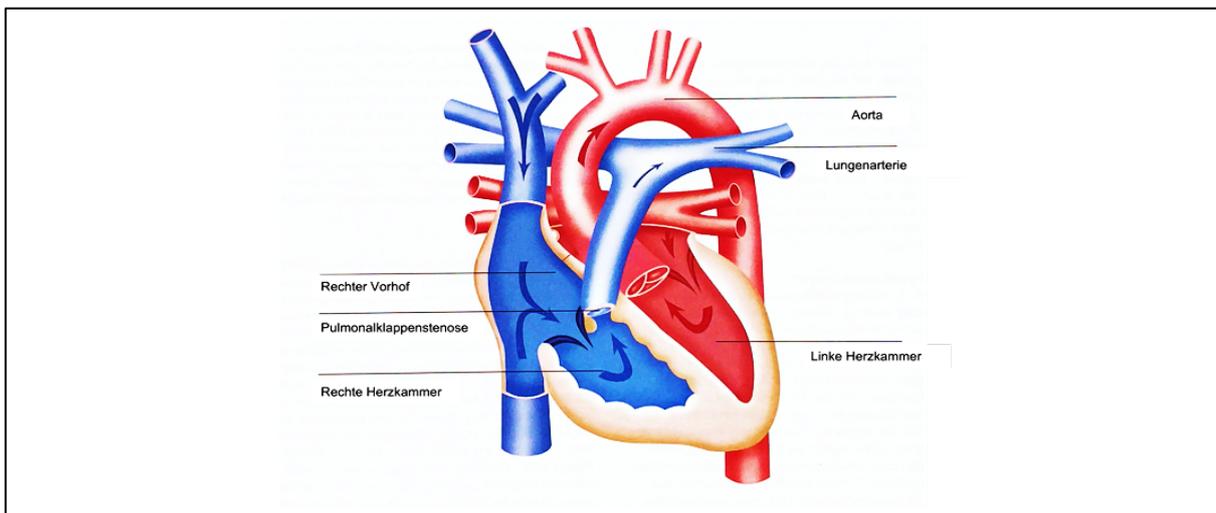


Abbildung 6: Schematische Darstellung einer Pulmonalklappenstenose

Quelle: Interessengemeinschaft Das herzkrankte Kind e.V., S.107 (18).

1.1.3.5 Aortenklappenstenose (AS)

Die kongenitale Aortenklappenstenose wird von der DGPK-Leitlinie definiert als eine Enge im Bereich der Aortenklappe. Diese kann zum einen durch eine Verschmelzung von Klappensegeln und zum anderen durch eine Fehlanlage bedingt sein. (34) Ebenso wie bei der Behandlung der Pulmonalklappenstenose, kann auch die Aortenklappenstenose interventionell durch Ballonvalvuloplastie behandelt werden. Hierbei wird der Ballonkatheter über die Leistenarterie bis über die Aortenklappe hinaus vorgeschoben und entsprechend positioniert. Nun kann der Ballon dilatiert werden und die stenosierte Aortenklappe aufweiten. Diese Behandlung erfolgt allerdings nicht kurativ, sondern hat das Ziel, den Klappenersatz hinauszuzögern (34).

Dennoch ist die interventionelle Therapie ein wichtiger Baustein in der Behandlung der kongenitalen Aortenklappenstenose.

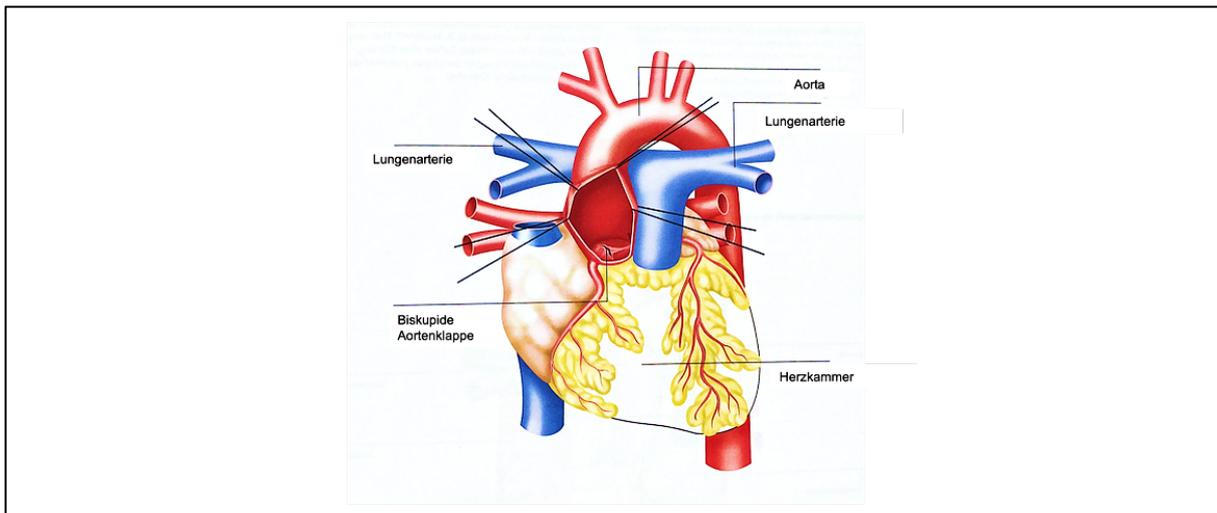


Abbildung 7: Schematische Darstellung einer Aortenklappenstenose

Quelle: Interessengemeinschaft Das herzkranken Kind e.V., S.35 (18)

1.1.3.6 Aortenisthmusstenose (ISTA)

Die Aortenisthmusstenose beschreibt eine Enge des Aortenbogens zwischen dem Abgang der linken A. subclavia und des Ductus arteriosus, dessen Durchmesser weniger als 40% der Aorta ascendens ausmacht (20). Die erste erfolgreiche Ballondilatation fand in 1982 statt (35). Seit dem hat das Verfahren besonders bei Kindern und Jugendlichen an Bedeutung gewonnen (36). Die Ballondilatation erfolgt druckkontrolliert anhand des Ballonkatheters und des Indeflators. Die Aorta wird dabei retrograd über die Leistenarterie sondiert (37). Anschließend ist eine schrittweise Aufdehnung bis auf den 2-3 fachen Stenosedurchmesser empfohlen (38).

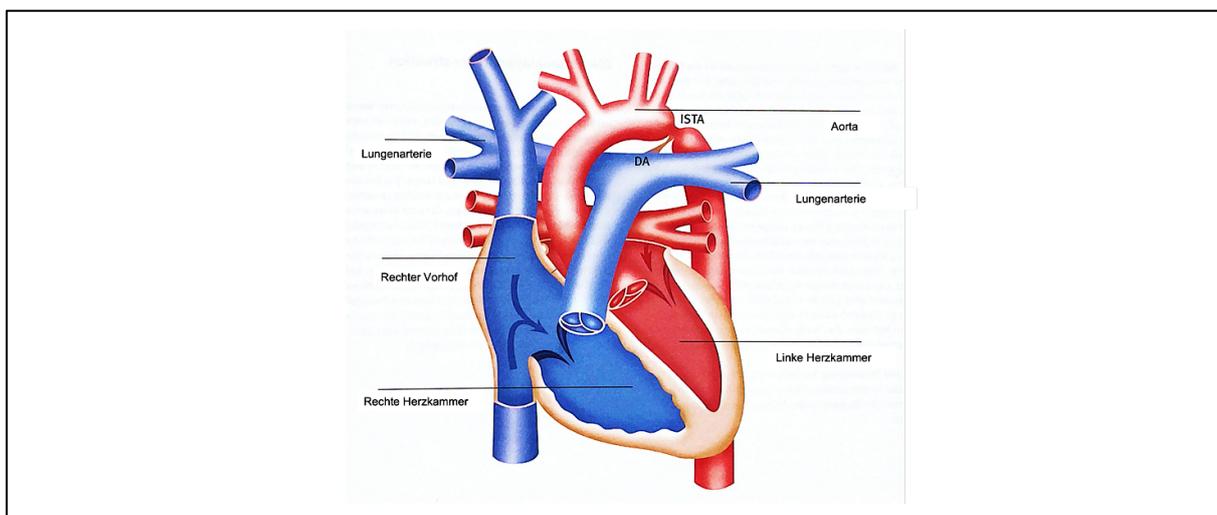


Abbildung 8: Schematische Darstellung einer Aortenisthmusstenose

Quelle: Interessengemeinschaft Das herzkranken Kind e.V., S.33 (18)

1.2 Prinzipielle Verwendung von Modellen

Modelle unterschiedlicher Art werden zu Ausbildungszwecken bereits vielseitig eingesetzt. Besonders in der Luft- und Raumfahrt ist das Simulationstraining am Modell seit Langem Standard, um die Qualität und die Fähigkeiten der Pilot*innen auf hohem Niveau zu bewahren. Das Simulationstraining als Ergänzung während der Ausbildung wird dabei von den Teilnehmenden akzeptiert und zeigte zudem, dass ein Training in individueller Geschwindigkeit den größten Effekt hat (39).

Modelle können zum einen dabei helfen einen strukturellen Aufbau zu demonstrieren und zu verinnerlichen, das dreidimensionale Verständnis fördern und zudem eine Simulation praktischer Handlungen ermöglichen. Je nach Zweck des Modells kann der Fokus dabei beispielsweise auf der Visualisierung, der Haptik oder der Möglichkeit, praktische Handlungen nachzuahmen, liegen.

1.3 Verwendung von Modellen in der Medizin

Die Verwendung von Modellen in der Medizin gewinnt einen zunehmenden Stellenwert. Bereits in der vorklinischen Phase des Medizinstudiums werden Modelle genutzt, um den Studierenden sowohl Anatomie als auch Physiologie (40) näher zu bringen. In der klinischen Phase werden Modelle verwendet, um praktische Fähigkeiten zu vermitteln. Sogenannte ‚Skills-Labs‘ oder ‚Simulationszentren‘ werden seit einiger Zeit in die curriculare Ausbildung eingegliedert und sollen die praktische Ausbildung der Studierenden unterstützen (41). Fähigkeiten wie das Legen einer Magensonde, venöse Blutabnahmen und das Legen von Venenverweilkanülen können an 3D-Modellen geübt werden. Aus kostengünstigen und einfachen Materialien können dabei bereits hilfreiche Simulationsmodelle entstehen, an denen Technik und Handhabung von Instrumenten wie dem Endoskop gezielt trainiert werden können (42). Es existieren andererseits aber auch fortgeschrittene Simulatoren zum Erlernen von Laparoskopien, welche die Haptik und das visuelle Bild simulieren (43).

In der Medizin ist das Simulator-Training besonders im Bereich der Notfallmedizin etabliert. Besonders die Abläufe der ACLS (Advanced Cardiac Life Support) können effektiv an Simulationsmodellen trainiert werden (44). Realitätsgetreue Simulationen von Szenarien im Schockraum, bei denen an einer Simulationspuppe trainiert wird, sichern zudem die interdisziplinäre Kommunikation, festigen die Abläufe und erhöhen damit die Qualität der Patientenversorgung (45).

1.4 3D-Modelle und 3D-Druck

3D-gedruckte Herzmodelle, auf Basis von CT-Daten, haben das Potential eine bessere präoperative Planung, Lehre und die Entwicklung neuer medizinischer Instrumente zu ermöglichen (46). Besonders in der Chirurgie finden die Modelle bereits vielfältig Verwendung zur präoperativen Planung, der Weiterbildung von Chirurgen durch Simulationstraining und intraoperativer Orientierung (47). In der Neurochirurgie werden die Modelle nicht nur für die Planung sondern auch erfolgreich für die praktische Ausbildung der Chirurgen genutzt (48).

Im Bereich der angeborenen Herzfehler werden 3D-gedruckte Herzmodelle bisher hauptsächlich für die Planung und Simulation von komplexen chirurgischen Eingriffen verwendet, weniger häufig auch für die Planung interventioneller Eingriffe (49). Es gibt jedoch Berichte über den erfolgreichen Einsatz individueller 3D-gedruckter Herzmodelle für die präoperative Planung von Herzkatheterinterventionen und die Wahl passender Verschlussysteme (50). Der Einsatz solcher Modelle für die Ausbildung von Kinderkardiolog*innen im Herzkatheterlabor ist bisher kaum beschrieben.

3D-gedruckte Herzmodelle bieten zusätzlich weitere Vorteile in der Patientenversorgung. Sie können unter anderem die Kommunikation zwischen Ärzt*innen und Patient*innen beziehungsweise Eltern von Kindern mit angeborenen Herzfehlern verbessern und das Verständnis für die Fehlbildungen fördern (51, 52). Der aktuelle Stellenwert der 3D-gedruckten Modelle ist jedoch eher unterstützend, da es noch einige limitierende Faktoren gibt, wie eine Übersichtsarbeit über den Nutzen von 3D-Modellen in der Kinderherzchirurgie zeigt (53).

1.5 Hinleiten zur Fragestellung

Diese wissenschaftliche Arbeit beinhaltet die Entwicklung und Evaluation von 3D-Modellen des gesunden und normalen Herzens sowie von Herzen mit angeborenen Herzfehlern. Parallel zu der Entwicklung der 3D-gedruckten Herzmodelle wurde außerdem ein Hands-on Training etabliert, um Studierende und Ärzt*innen in der Aus- und Weiterbildung zu unterstützen. Für die Bewertung und Weiterentwicklung dieser neuen Ausbildungsform ist daher eine kontinuierliche Evaluation erforderlich.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen daher Fragebögen erstellt, ausgewertet und die realitätsnahe Ausbildung anhand der Modelle dadurch evaluiert werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, die neu entwickelten 3D-gedruckten Herzmodelle anhand der Bewertungen der Teilnehmenden zu evaluieren. Da es in der Ausbildung der Kinderkardiologie bisher keine derartigen Modelle gibt, stellt sich die Frage, in welchem Ausmaß die Modelle genutzt werden können. Dabei ist zum einen das anatomische und pathophysiologische Verständnis von Bedeutung und zum anderen die Aneignung praktischer Fähigkeiten.

Die folgenden Fragestellungen sollen im Rahmen dieser Dissertation untersucht werden:

1. Wie bewerten die Teilnehmenden die Modelle hinsichtlich der Realitätsnähe und Handhabung?
2. Wie bewerten die Teilnehmenden die Eignung der Modelle hinsichtlich der Übung der einzelnen Katheterinterventionsschritte?
3. Wie bewerten die Teilnehmenden die Eignung der Modelle hinsichtlich des Einsatzes als Simulationsmodell für Katheterinterventionen?
4. Gibt es Unterschiede in der Bewertung zwischen den bereits erfahrenen Kinderkardiolog*innen und Berufsanfänger*innen? Also zwischen Lehrenden und Lernenden?
5. Werden die 3D-Herzmodelle durch die Teilnehmenden akzeptiert?
6. Inwieweit können Unerfahrene durch das Hands-on-Training am 3D-Modell das Konzept der Katheterintervention verstehen und erlernen?

2. Material und Methoden

Die 3D-Herzmodelle wurden gemeinschaftlich als Bestandteil zweier Doktorarbeiten entwickelt. Die Hands-on Kurse wurden zusammen geplant und durchgeführt. Das Training diente einerseits der Testung der Modelle, andererseits der Etablierung einer neuen Ausbildungseinheit. In dieser Dissertation soll die Bewertung durch die Teilnehmenden im Rahmen des Fragebogens evaluiert werden. Die Beurteilung des Ausbildungsformats und des Trainingseffekts ist Bestandteil einer anderen Doktorarbeit.

2.1 Entwicklung der 3D-Modelle

Die Entwicklung der Modelle von der Planung bis hin zum endgültigen 3D-gedruckten Herzmodell erfolgte in mehreren aufeinander aufbauenden Schritten. Abbildung 9 gibt einen Überblick der Entwicklungsstufen.

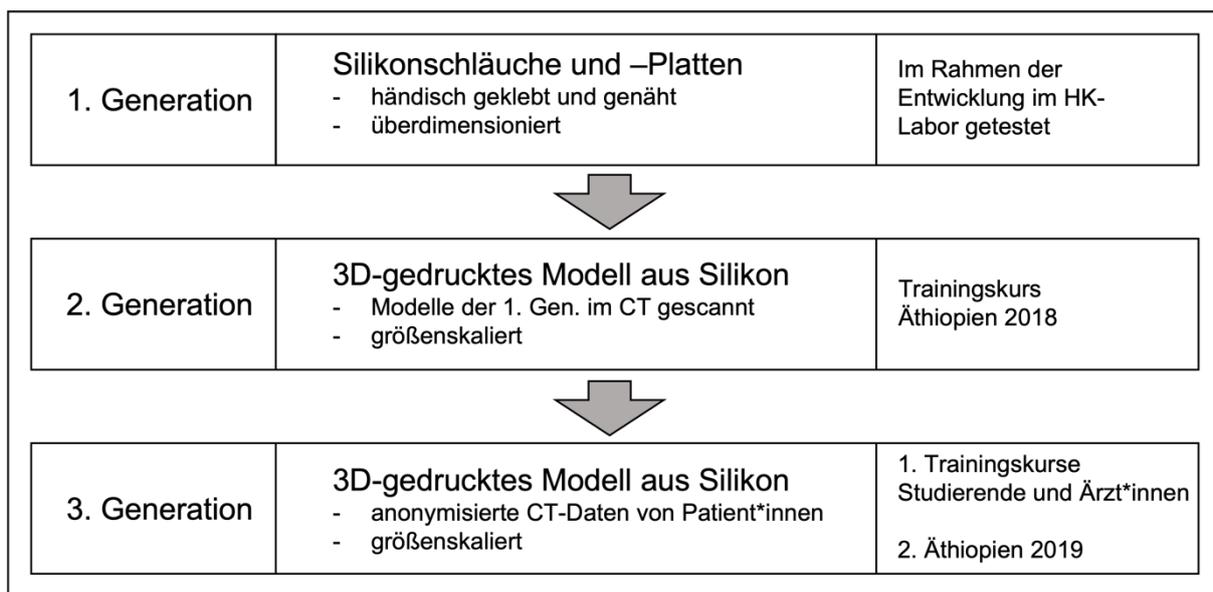


Abbildung 9: Modellentwicklung im zeitlichen Verlauf

Zu Anfang sollte ein stark vereinfachtes Modell aus handelsüblichen Materialien entwickelt werden. Es sollte die wichtigsten anatomischen Strukturen aufweisen und im Herzkatheterlabor unter Röntgendurchleuchtung einsetzbar sein. So entstanden in der 1. Generation Modelle der häufigsten AHF, des Venen- und Arteriensystems und des stark vereinfachten gesunden Herzens aus Silikonschläuchen und -platten verschiedenen Durchmessers und unterschiedlicher Stärke. Die Modelle 1. Generation

wurden in einem Testdurchlauf im Herzkatheterlabor des Klinikums der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München getestet. Sie kamen nie bei einem Trainingskurs mit Teilnehmenden zum Einsatz und wurden daher auch nicht bewertet. Nach Anschaffung eines 3D-Druckers durch die Abteilung für Kinderkardiologie und pädiatrische Intensivmedizin des Klinikums der LMU wurde die Möglichkeit genutzt, die Modelle weiterzuentwickeln. Die Modelle 1. Generation wurden dazu mittels Computertomografie gescannt und mit Hilfe eines Softwareprogramms bearbeitet. Anschließend konnten sie aus einem speziellen Silikongummi mit dem 3D-Drucker gedruckt werden. Das brachte den Vorteil, dass Undichtigkeiten, wie z.B. kleine Löcher an den Nähten, verschlossen werden konnten und die Größe proportional verändert werden konnte. In dieser Generation wurden nicht gleich alle Modelle der vorherigen Generation weiterentwickelt, da der Druckvorgang langwierig und kostenaufwendig ist. Vorrangig wurde das Modell der Pulmonalklappenstenose, der Aortenklappenstenose und des persistierenden Ductus arteriosus genutzt. Die Erkenntnisse der Modellentwicklung 2. Generation konnten im Anschluss auf die restlichen Modelle übertragen werden.

Anschließend an die 3D-gedruckten Herzmodelle auf Grundlage der selbstgebauten Modelle folgten die Modelle der 3. Generation. Um noch realistischere und anatomisch korrekte Modelle zu entwickeln basierten die Modelle dieser Generation auf bereits vorhandenen, archivierten CT-Daten von Patient*innen mit angeborenen Herzfehlern. Die Daten wurden im Rahmen klinisch indizierter Untersuchungen gewonnen und vollständig anonymisiert verwendet. Die CT-Daten konnten analog zu denen der 2. Generation überarbeitet und ebenfalls aus Silikongummi dreidimensional gedruckt werden.

Tabelle 2: Übersicht der Modelle in den Generationen 1 - 3

1. Generation	Vereinfachtes Übungsmodell Venenmodell Arterienmodell Pulmonalklappenstenose Aortenklappenstenose Persistierender Ductus arteriosus
2. Generation	Pulmonalklappenstenose Aortenklappenstenose

	Persistierender Ductus arteriosus
3. Generation	Gesundes Herz Aortenklappenstenose Pulmonalklappenstenose Aortenisthmusstenose Persistierender Ductus arteriosus Vorhofseptumdefekt Ventrikelseptumdefekt

2.1.1 Modelle 1. Generation

Die Modellentwicklung begann mit einem Modell, welches stark vereinfacht war. Es bestand aus einem Zylinder mit jeweils einem Loch in den Seitenwänden. Oben und unten war jeweils ein Silikonschlauch befestigt. Ziel war es, ein Modell zu gestalten, welches aus einfachen, günstigen und weltweit vorhandenen Materialien bestand, sodass es nachgebaut und leicht repariert werden kann.

Der Aufbau der weiteren Modelle orientierte sich an den wichtigsten anatomischen Merkmalen eines gesunden Herz-Kreislaufsystems. Das Modell des venösen Systems beinhaltete den rechten Vorhof, die Vena cava superior (mit V. brachiocephalica, Vv. subclaviae, V. jugularis communis und V. azygos) und die Vena cava inferior mit den großen Zuläufen (Vv. iliacae communes, Vv. renales, Vv. hepaticae), wie es in Abbildung 10 schematisch dargestellt ist. Das arterielle System bestand aus dem linken Ventrikel, der Aorta und den großen Abgängen (Truncus brachiocephalicus, Aa. subclaviae, Aa. carotides, Aa. renales, Aa. iliacae communes und Aa. iliacae internae). Als Material bot sich zum einen Polyvinylchlorid und zum anderen Silikon an. Silikonschläuche und -platten erwiesen sich als deutlich einfacher in der Verarbeitung, da man das Material besser aneinanderkleben bzw. mit chirurgischen Fäden zusammennähen konnte. Gefertigt wurden die Gefäße an den Modellen also aus Silikonschläuchen verschiedenen Durchmessers, für die Herzräume wurden Silikonplatten in verschiedenen Stärken genutzt.

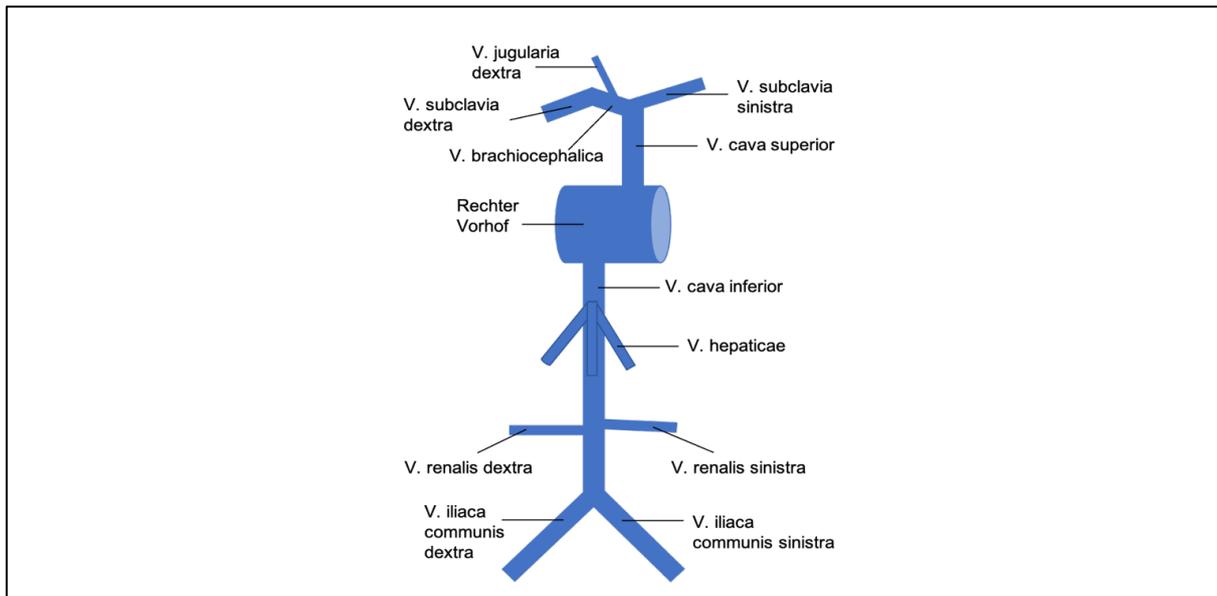


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Venenmodells 1. Generation

Im nächsten Schritt wurden auch Modelle mit angeborenen Herzfehlern aus den Silikonplatten und -schläuchen gefertigt. Beispielsweise ein Modell mit Pulmonalklappenstenose. Bei diesem Modell bestand das Herz aus zwei Herzzimmern (rechter Vorhof und Ventrikel), welche durch einen Zylinder aus Silikonplatten gestaltet wurden. Die Trikuspidalklappe bestand aus einer Silikonscheibe mit einem Loch in der Mitte. Für die Pulmonalklappenstenose wurde eine Silikonscheibe mit sehr kleinem Loch verwendet. Die Pulmonalarterien und der Lungenkreislauf wurden vereinfacht als Schlaufe dargestellt, um Raum für die spätere Katheterisierungsübung zu schaffen. Der Zugang erfolgte über verschieden große Silikonschläuche, welche die V. cava inferior darstellen sollten, in den rechten Vorhof. Abbildung 11 zeigt schematisch den Aufbau des Modells.

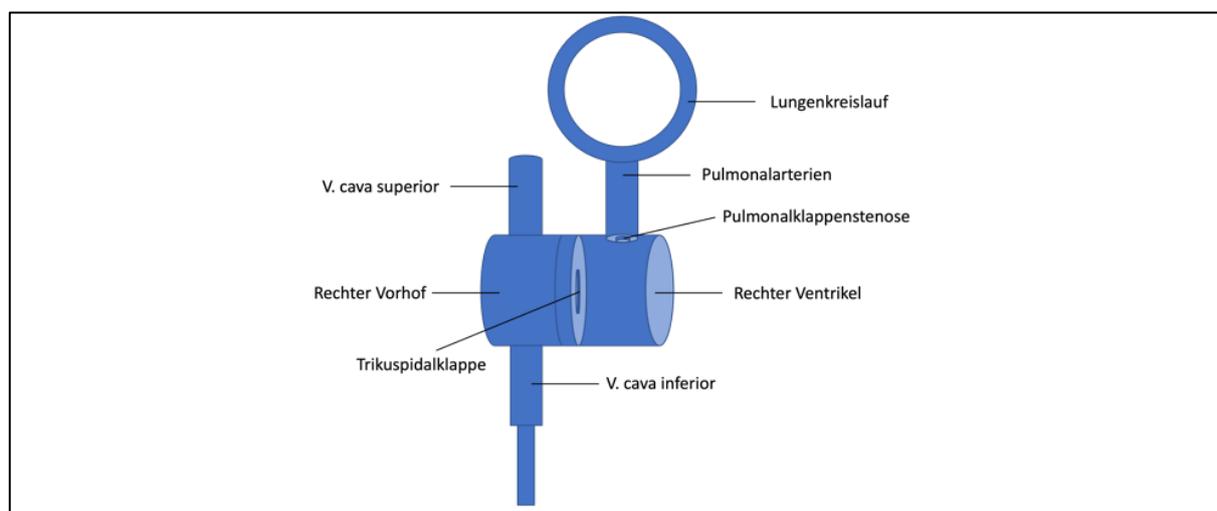


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Pulmonalklappenstenose-Modells 1. Generation

Der Bau der Modelle 1. Generation war in der überdimensionierten Form gut möglich. Für die kleineren Herzmodelle in der Größe von Kleinkindern sind Silikonschläuche mit passend kleinem Durchmesser kaum vorhanden und nicht mehr praktikabel in der Verarbeitung. Die Modelle der 1. Generation wurden im Rahmen der Entwicklung im Herzkatheterlabor unter Röntgendurchleuchtung getestet und anschließend weiterentwickelt. Sie kamen nicht als Simulationsmodell bei einem Trainingskurs zum Einsatz und wurden daher auch nicht bewertet.

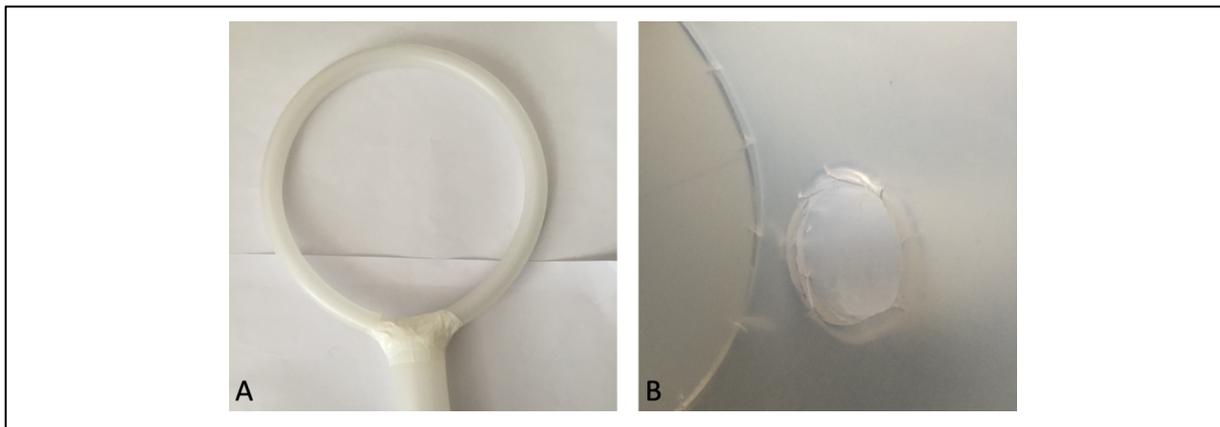


Abbildung 12: Das Modell der Pulmonalklappenstenose 1. Generation

Das Modell wurde aus Silikonschläuchen und -platten von Hand gefertigt. A) Außenansicht des Modells, welches mit Klebeband stabilisiert wurde. B) Innenansicht eines Gefäßabgangs, welcher mit Nähten fixiert wurde.

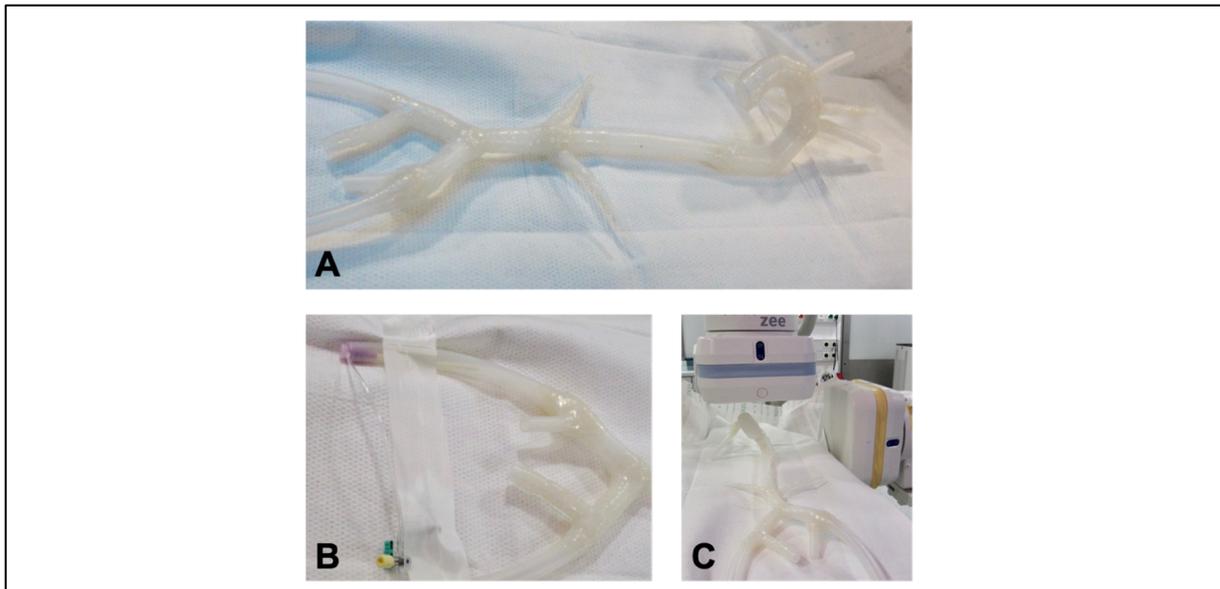


Abbildung 13: Modell des arteriellen Systems 1. Generation

A) Gesamtansicht des Modells. B) Modell mit eingesetzter Schleuse, auf dem Tisch fixiert. C) Das Modell kann im Herzkatheterlabor unter Röntgendurchleuchtung betrachtet werden.

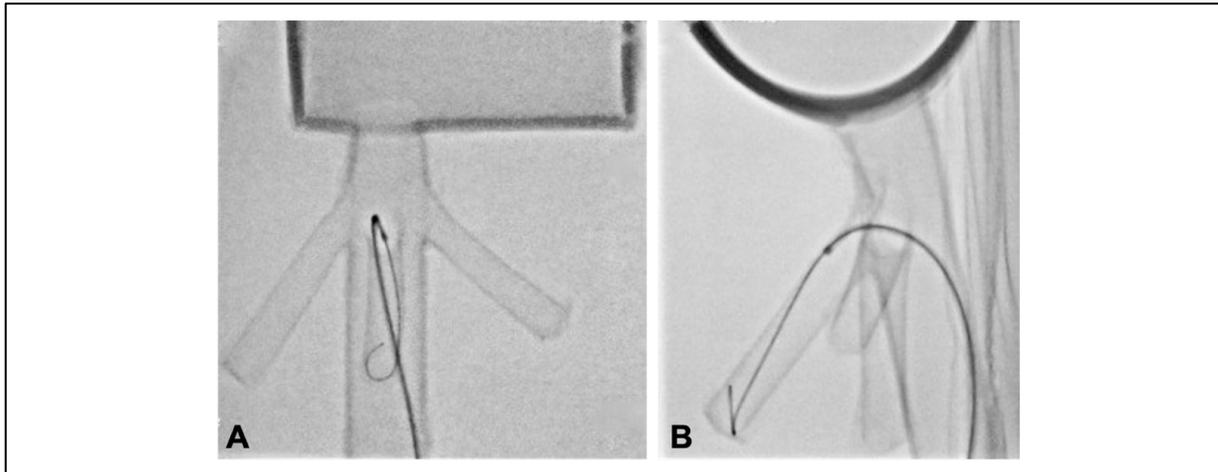


Abbildung 14: Das Venenmodell 1. Generation in der Durchleuchtung

Die dargestellten Lebervenen werden mit einem Führungsdraht und Katheter sondiert.
A) Posterior-anteriore Ansicht. B) Laterale Ansicht.

2.1.2 Modelle 2. Generation

Für die Weiterentwicklung der Modelle wurde ein 3D-Drucker verwendet. Ein Problem der Modelle 1. Generation stellten die Undichtigkeiten an den Verbindungsstellen der einzelnen Silikonteile dar. Außerdem waren die Modelle überproportioniert. Das Ziel der Modelle 2. Generation war es, die Lücken zu schließen und die Größe der Modelle skalieren zu können. Dadurch sollte eine realistischere Simulationssituation geschaffen werden.

Die selbstgebauten Modelle der 1. Generation wurden zudem erneut in ihrer Form überarbeitet. So wurde das Herz beispielsweise nicht mehr als Zylinder, sondern spitzer zulaufend gestaltet. Anschließend wurden die Modelle mittels Computertomografie gescannt. Die dadurch generierten Dateien konnten anschließend mit einem Softwareprogramm bearbeitet werden und die Stellen, an denen die Modelle Lücken aufwiesen, manuell vor dem 3D-Druck verschlossen werden. Zudem war es möglich die Größe der Modelle vor dem Druckvorgang zu skalieren. Im nächsten Schritt wurden die Modelle aus einem flüssigen Silikonmaterial schichtweise gedruckt. So ließen sich ebenfalls undichte Stellen vermeiden.

Die Modelle der zweiten Generation, insbesondere die Modelle der Pulmonalklappenstenose (s. Abbildung 15) und des persistierenden Ductus arteriosus kamen bei dem Exkurs in Äthiopien 2018 zum Einsatz.



Abbildung 15: Pulmonalklappenstenose-Modell 2. Generation unter Durchleuchtung

Posterior-anteriore Ansicht. A) Der Führungsdraht wird in Projektion auf den dargestellten rechten Vorhof eingeführt. B) Führungsdraht nach Überwindung der angedeuteten Trikuspidalklappe in der richtigen Position, auf Höhe der Pulmonalarterie. Der vorgeschobene Katheter befindet sich auf Höhe des rechten Ventrikels. C) Der Ballonkatheter ist in der richtigen Position mittig über der Pulmonalklappenstenose und wird inflatiert, um die dargestellte Pulmonalklappe zu dilatieren.

2.1.3 Modelle 3. Generation

Für die finale Version wurden die selbstgebauten Modelle nicht mehr als Vorlage genommen. Stattdessen wurden für die Modelle der 3. Generation anonymisierte CT-Datensätze von Patient*innen der Abteilung für Kinderkardiologie und pädiatrische Intensivmedizin des Klinikums der LMU München verwendet, welche im Rahmen von klinisch indizierten Untersuchungen gewonnen wurden. Die Dateien wurden analog zu denen der 2. Generation mit Hilfe eines Softwareprogrammes bearbeitet und mit dem 3D-Drucker schichtweise aus flüssigem Silikon gedruckt. Der Prozess des 3D-Drucks wird unter 2.1.4 ausführlich beschrieben. Hier war es ebenfalls möglich, die Dateien vor dem Druck an die Größe der Herzen von Kindern in verschiedenen Altersstufen anzupassen. Auf diese Art und Weise entstanden detaillierte, realitätsgetreue Herzmodelle von gesunden Herzen verschiedener Altersstufen und der häufigsten angeborenen Herzfehler. Abbildung 16 zeigt die Herzmodelle des gesunden Herzens in den verschiedenen Altersstufen. Das Modell des erwachsenen Herzens entsprach

dabei dem Ausgangswert, das Herz eines Jugendlichen entsprach 80% dessen und das Herz eines Kleinkindes 55%.

Die Modelle der 3. Generation wurden bei allen weiteren Simulationstrainingskursen eingesetzt und stetig weiterentwickelt. Dabei wurden Details entsprechend der Rückmeldung der Teilnehmenden überarbeitet. Das Grundprinzip der Modellherstellung und der Form blieb aber gleich.

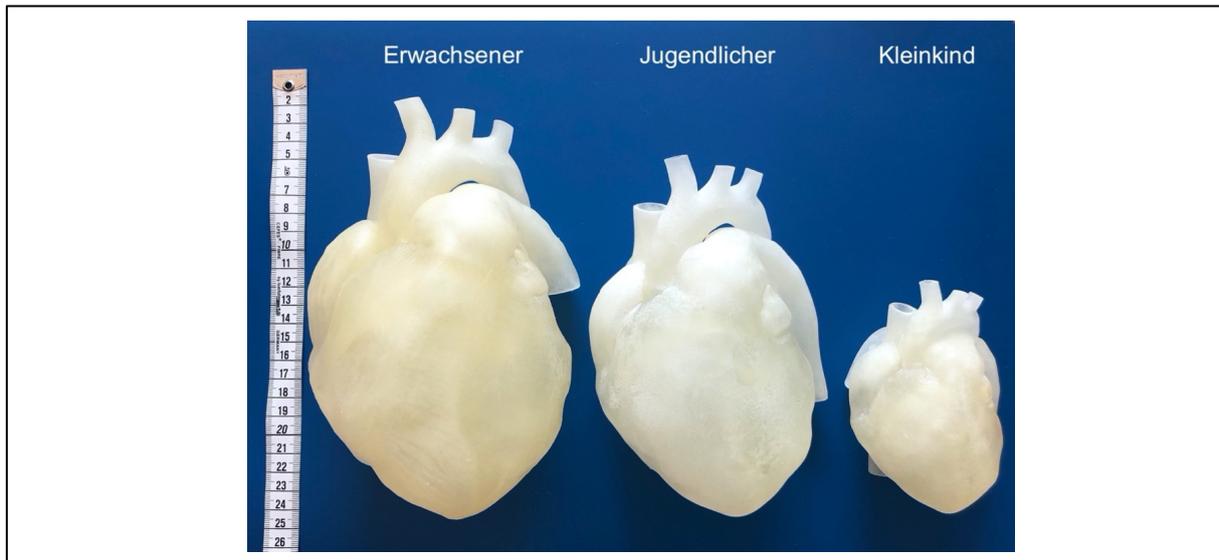


Abbildung 16: Modelle 3. Generation

Die Modelle entsprechen der Größe eines Erwachsenenherzens (100%), eines Jugendlichen (80%) und eines Kleinkindes (55%). Diese Abbildung ist Bestandteil der gemeinsamen Publikation im GMS Journal for Medical Education (04/2022) (54).

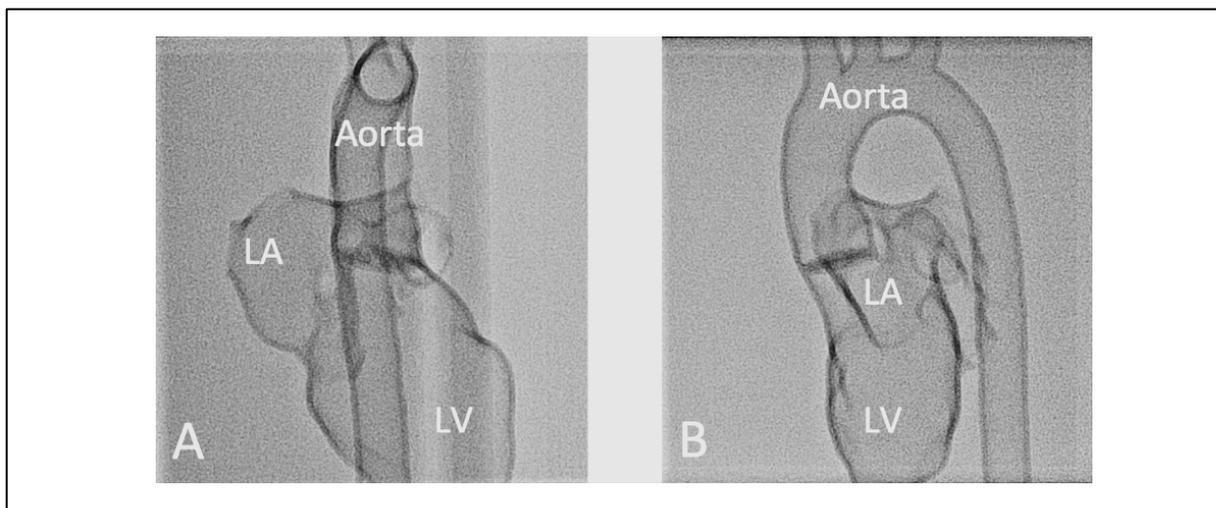


Abbildung 17: Modell des linken Herzens

Darstellung des Modells des linken Herzens in der Röntgendurchleuchtung. LA = linker Vorhof, LV = linker Ventrikel. A) Posterior-anteriore Ansicht. B) Laterale Ansicht.

Diese Abbildung ist Bestandteil der gemeinsamen Publikation im GMS Journal for Medical Education (04/2022) (54).

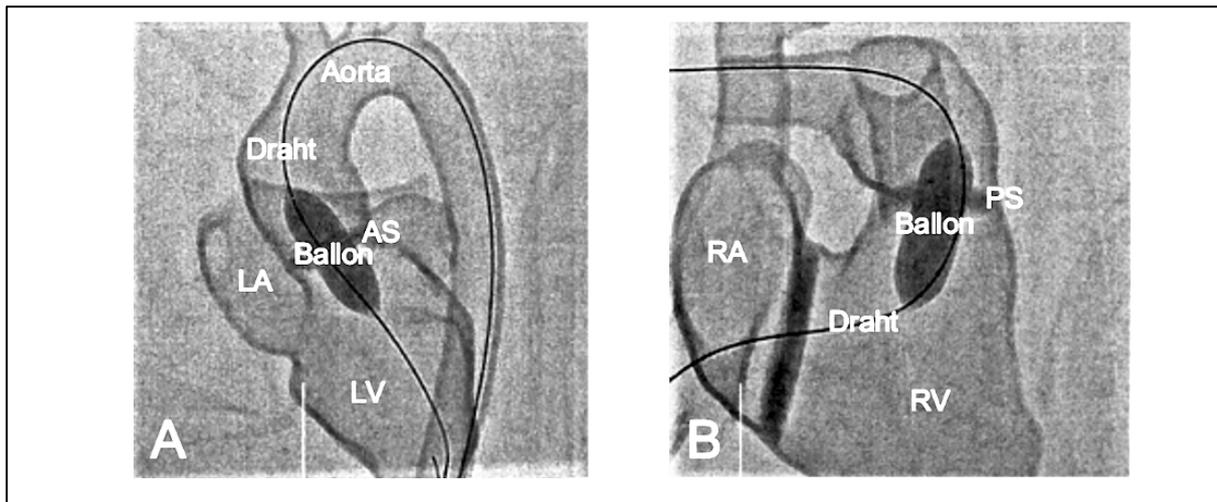


Abbildung 18: Modell 3. Generation während der Ballondilatation

LA = linker Vorhof, LV = linker Ventrikel, AS = Aortenklappenstenose, RA = rechter Vorhof, RV = rechter Ventrikel, PS = Pulmonalstenose, Ballon = Ballonkatheter. A) Dilatation einer Modell-Aortenklappenstenose. B) Dilatation einer Modell-Pulmonalstenose.

Diese Abbildung ist Bestandteil der gemeinsamen Publikation im GMS Journal for Medical Education (04/2022) (54).

2.1.4 3D-Druck

Die Modelle der 2. und 3. Generation wurden unter Verwendung eines 3D-Druckers, Agilista 3200W 3D-Drucker (Keyence Corp.), gefertigt. Der 3D-Druck erfolgte im Polyjet-Verfahren mit einem weichen Silikongummi (AR-G1L, Keyence Corp.) und einem wasserlöslichen Stützmaterial (AR-S1, Keyence Corp.). Eine genaue Beschreibung der Modellherstellung wird von Grab et al. beschrieben (55).

Die CT-Dateien wurden mit Hilfe einer medizinischen 3D-Software (Materialise Mimics Innovation Suite, Materialise NV) bearbeitet. Durch Segmentierung des Blutvolumens wurden virtuelle 3D-Modelle des intrakardialen und intravaskulären Volumens generiert, die anschließend gedruckt werden konnten.

Während des Drucks wird das flüssige Material bei der Vorwärtsbewegung aus dem Druckerkopf gegeben und bei der Rückwärtsbewegung von einer Walze geglättet und anschließend durch eine UV-Lampe ausgehärtet. Das Silikongummi und Stützmaterial kommen dabei aus zwei verschiedenen Öffnungen, was einen präzisen und schnellen Druck gewährleistet. Abbildung 19 verdeutlicht schematisch den Druckvorgang.

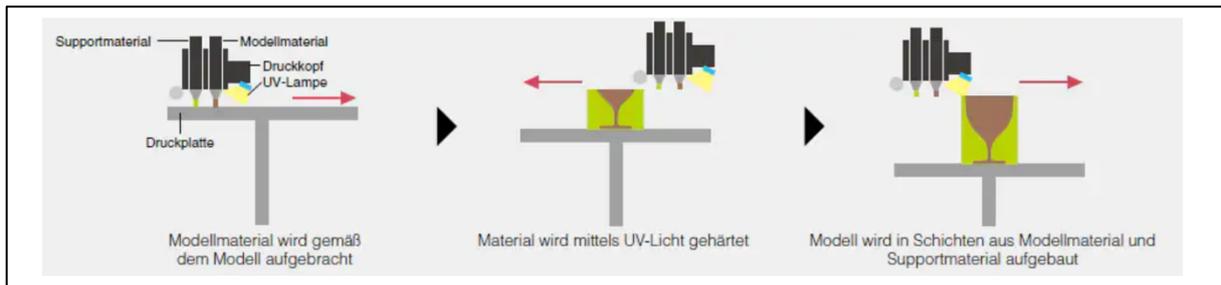


Abbildung 19: Prinzip des 3D-Drucks

Quelle: Keyence (56)

In Abbildung 20 ist zur Veranschaulichung das PS-Modell der 2. Generation während des Druckvorgangs dargestellt. Zu erkennen ist das hellere Stützmaterial und das dunklere Silikongummi.

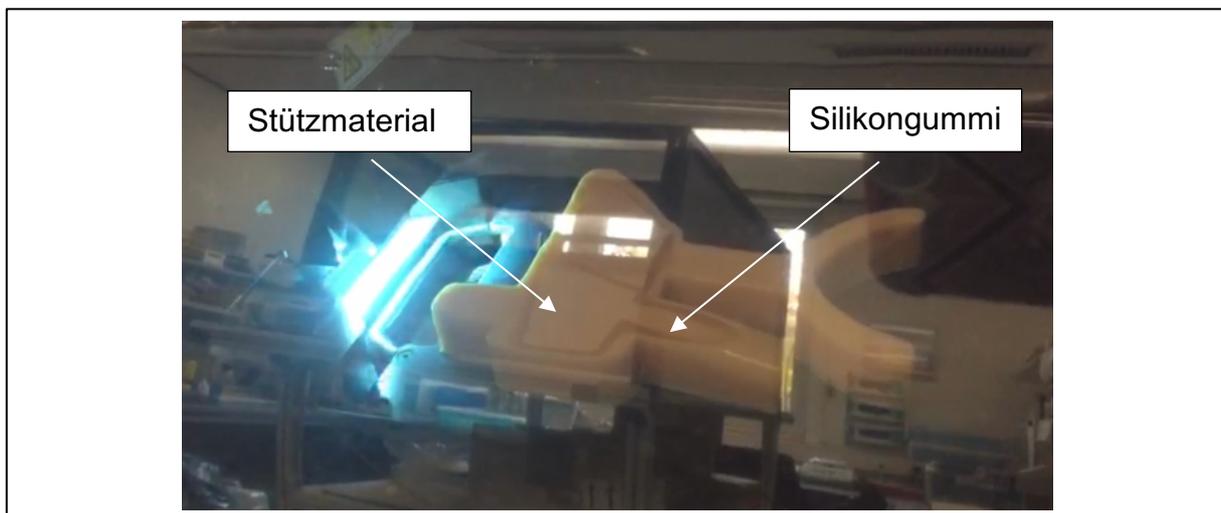


Abbildung 20: 3D-Druck eines Herzmodells

Das Modell der Pulmonalklappenstenose 2. Generation während des Druckvorgangs. Zu erkennen ist das hellere Stützmaterial und das dunklere Silikongummi.

Anschließend an den 3D-Druck folgte die Nachbearbeitung der Modelle. Dabei wurden die Modelle in ein Wasserbad gelegt, sodass sich das Stützmaterial auflöst und entfernt werden konnte. Übrig blieb dann das fertige Modell mit sondierbaren Hohlräumen.



Abbildung 21: Prozess der Nachbearbeitung

Pulmonalklappenstenose-Modell der 2. Generation in der Nachbearbeitung. Im Wasserbad löst sich das Stützmaterial vom Silikongummi und kann entfernt werden.

2.2 Hands-on Trainingskurse

2.2.1 Prinzipieller Ablauf eines Kurses

Die Hands-on-Kurse fanden jeweils in dem klinikeigenen Herzkatheterlabor statt. Der Aufbau des Kurses setzte sich zusammen aus einer theoretischen Einführung, der praktischen Übung und der Evaluation. Das Ausmaß der einzelnen Bestandteile variierte je nach Vorerfahrung der Teilnehmenden. Je weniger Vorerfahrung vorhanden war, desto ausführlicher wurden der theoretische Teil und die Demonstration der praktischen Übungen ausgelegt. Ziel war es, den Teilnehmenden die Grundlagen zu vermitteln, die sie für die praktische Ausführung der Simulation brauchten. Die praktische Übung wurde bei allen Kursen jeweils in Gruppen zu zweit ausgeführt. Die Aufgaben verteilten sich auf eine Person, die interveniert und eine zweite Person, die dabei assistiert. Es wurde jeweils rotiert, sodass sich die Aufgaben abwechselten. Normalerweise wird für die HK-Untersuchung Kontrastmittel verwendet. Beim Hands-on-Training an den 3D-gedruckten Silikonmodellen ist dies nicht notwendig, da die Konturen des Silikonmodells, unter anderem aufgrund fehlender Weichteilüberlagerung, auch unter reiner Röntgendurchleuchtung sichtbar sind. Während des Simulationstrainings im Herzkatheterlabor war stets ein Supervisor anwesend und es wurde auf ausreichenden Selbstschutz durch Bleischürzen und Abstand zur Röntgenröhre entsprechend der ALARA-Prinzipien (As Low As

Reasonably Achievable) geachtet. Jeder Kurs wurde durch eine freiwillige Evaluation mittels Fragebogen bewertet.

Für den Kurs A1 wurden die Modelle der 2. Generation verwendet. Für alle darauffolgenden Kurse wurden die Modelle 3. Generation genutzt, wobei zwischen den Kursen Details nachgebessert wurden.

2.2.2 Ablauf und Teilnehmende der einzelnen Kurse

2.2.2.1 A1

Der erste Kurs fand im Rahmen des Exkurses in Äthiopien statt. Am 28.10.2018 und 29.10.2018 konnten insgesamt fünf Ärzte des Ayder Referral Hospital in Mekelle die Modelle 2. Generation testen. Zum Einsatz kamen die Modelle der Pulmonalklappenstenose und des persistierenden Ductus arteriosus. In Äthiopien sind die PS und der PDA die am häufigsten vorkommenden angeborenen Herzfehler. Die Ausbildung der äthiopischen Ärzt*innen fokussierte sich daher auf die eigenständige Behandlung dieser Herzfehler und somit der Versorgung möglichst vieler Patient*innen.

Zu Beginn konnte das Modell rundum begutachtet werden und die Anatomie der Herzfehler wurde erörtert. Der Ablauf der Intervention wurde Schritt-für-Schritt besprochen und schriftlich festgehalten. In diesem Kurs wurde zusätzlich erklärt, wie man anhand der Röntgendurchleuchtung die Größe des Defekts, also des PDA beziehungsweise der PS, ausmessen kann, um so beispielsweise die Größe des benötigten PDA-Verschlussystems zu bestimmen. Die einzelnen Schritte wurden von einem erfahrenen interventionellen Kinderkardiologen demonstriert und konnten anschließend von den Teilnehmenden beliebig oft wiederholt werden. Dieser Kurs wurde im Nachhinein über einen per E-Mail versendeten Fragebogen im Word-Format von allen Teilnehmenden ausgefüllt und zurückgeschickt.

2.2.2.2 B1

Der zweite Hands-on-Kurs fand am 09.03.2019 im Klinikum der LMU München statt. Es nahmen insgesamt neun Studierende sowie zwei Assistenzärztinnen in Weiterbildung teil.

Bei diesem Kurs nahmen nur Personen teil, die noch nie eine HK-Untersuchung durchgeführt haben und auch kein Vorwissen zur Herzkatheterintervention besaßen. Dementsprechend wurde für diesen Kurs ein ausführlicher Theorieteil vorbereitet.

Anhand eines dafür einwickelten Trainingsmanuals für HK-Untersuchungen wurde folgendes besprochen:

1. Genereller Aufbau eines HK-Labors mit Fokus auf den beweglichen Tisch, die Röntgenröhre und dazugehöriges technisches Equipment
2. Richtige Lagerung auf dem beweglichen Tisch und Zentrierung des zu durchleuchtenden Bereichs
3. Projektion des Herzens in verschiedenen Ebenen
4. Wiederholung der Anatomie und Hämodynamik
5. Besprechung des verwendeten Materials, beispielsweise Drähte und Katheter

Daraufhin wurde allen Teilnehmenden im HK-Labor die praktische Handhabung der Geräte erklärt und demonstriert. Die Teilnehmenden hatten anschließend Zeit sich mit der Bewegung des Tisches und dem verwendeten Material vertraut zu machen.

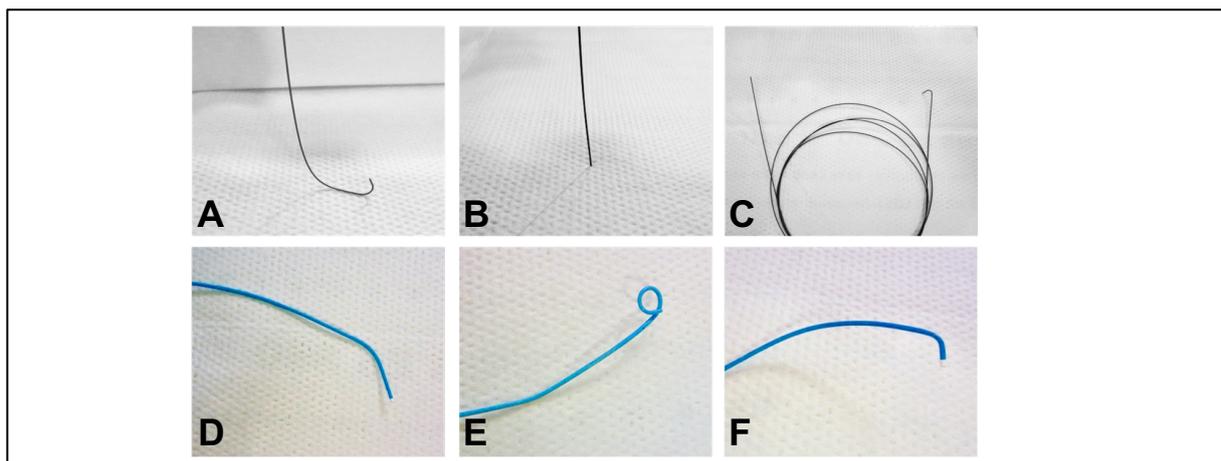


Abbildung 22: Auswahl verwendeter Drähte und Katheter

A) Gebogenes, weiches Ende des Führungsdrahtes. B) Hartes Ende des Führungsdrahtes. C) Führungsdraht in Schlaufen. D) Multipurpose-Katheter. E) Pigtail-Katheter. F) Koronar-Katheter.

Im HK-Labor wurde dann die richtige Lagerung anhand einer lebensgroßen Kunststoff-Babypuppe auf dem Untersuchungstisch demonstriert. In diese Puppe war das 3D-gedruckte Herzmodell eines gesunden Herzens in Größe eines Kleinkindes eingesetzt. In der Durchleuchtung konnten so die Zentrierung und die Projektion in den zwei Ebenen verdeutlicht werden.

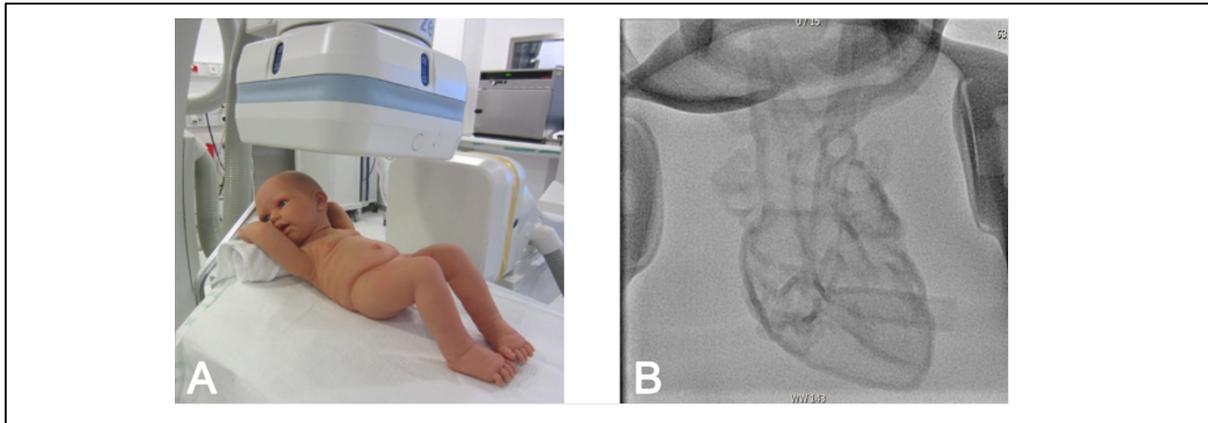


Abbildung 23: Kunststoff-Babypuppe im Herzkatheterlabor

Herzkatheterlabor des Klinikums der LMU München während des Kurses B1. A) Kunststoff-Babypuppe auf dem Untersuchungstisch. B) Unter Durchleuchtung sieht man das Modell des gesunden Herzens 3. Generation in der Kunststoff-Babypuppe.

Diese Abbildung ist Bestandteil der gemeinsamen Publikation im GMS Journal for Medical Education (04/2022) (54).

Im nächsten Schritt wurde das genaue Vorgehen der Herzkatheterintervention erörtert. An den Modellen des ASD, der AS, der ISTA und des PDA wurden die grundlegenden Schritte erläutert. Diese umfassten das Einführen des Führungsdrahts, das Einbringen des Katheters über den Führungsdraht, die Steuerung des Katheters zum Ort der Intervention und das Wechseln des Drahts bzw. Katheters mit dem dazugehörigen Schlaufen legen. Zudem wurde die Inflation und Deflation des Ballonkatheters außerhalb des Modells geübt und die Verschlussysteme für die Intervention demonstriert. Anschließend konnten die Interventionen am Modell des gesunden Herzens, der PS und des PDA in Zweiergruppen durchgeführt werden.

Die Evaluation erfolgte bei diesem Kurs in zwei Teilen. Ein erster Teil zur Selbsteinschätzung und Erwartungshaltung an den Kurs wurde zu Anfang des Kurses ausgefüllt. Der zweite Teil, welcher die Einschätzung der erlernten Fähigkeiten und die persönliche Meinung zur Eignung des Kurses abfragte, wurde am Ende des Kurses bearbeitet.

2.2.2.3 B2

Am 26.03.2019 nahmen zwei Teilnehmer an dem Kurs in dem Klinikum der LMU München teil. Bei diesem Kurs konnte direkt mit der Demonstration und anschließenden Durchführung der Übungen begonnen werden, da beiden Teilnehmern die theoretischen Grundlagen bekannt waren. Es nahmen ein Assistenzarzt und ein Facharzt der Abteilung für Kinderkardiologie und pädiatrische Intensivmedizin des LMU Klinikums teil. Es wurden die Interventionen an der PS und

dem PDA jeweils zusammen durchgeführt. Die Position des Operateurs hat dabei gewechselt, sodass jeder Teilnehmer beide Interventionen ausführen konnte.

2.2.2.4 B3

Am 19.12.2019 wurde ein weiterer Workshop für Ärzt*innen des Ayder Referral Hospital in Mekelle organisiert, sodass sie erneut am Hands-on-Kurs teilnehmen konnten. Es nahmen sieben Personen teil, die in der Erwachsenenkardiologie und Kinderkardiologie des Krankenhauses tätig waren und die Intervention bei Kindern mit angeborenen Herzfehlern lernen wollten. Zwei Teilnehmende waren bereits bei dem ersten Workshop im Oktober 2018 anwesend. Bei dem Kurs 2019 wurden die Modelle 3. Generation verwendet (s. Abbildung 16). Es wurde erneut Schritt-für-Schritt besprochen, wie die Interventionen ablaufen und die Teilnehmenden hatten anschließend Gelegenheit die Schritte an den Modellen zu üben.

2.2.2.5 B4

Am 13.01.2020 konnte der erste Kurs im Allgemeinen Krankenhaus (AKH) Wien stattfinden. Es nahmen vier Personen teil, die Klinikdirektorin der kinder-kardiologischen Abteilung, ein Oberarzt, ein Facharzt für Kinderkardiologie und eine Assistenzärztin. Zwei der Teilnehmenden hatten keine praktische Erfahrung, aber besaßen die theoretischen Grundlagen, sodass auch hier auf die theoretische Einführung verzichtet wurde. Es kamen die Modelle des PDA, der PS, der ISTA und der AS zum Einsatz.

2.2.2.6 B5

Einen Monat später am 21.02.2020 konnte erneut ein Kurs am AKH Wien stattfinden. Es nahmen zwei Assistenzärzte in Weiterbildung teil. Es wurden zuerst die theoretischen Grundlagen erklärt, bevor die Schritte der Intervention durchgesprochen wurden und anschließend abwechselnd an den Modellen der PS, des PDA, der AS und der ISTA geübt werden konnte.

2.2.2.7 C1

Am 26. und 27.09.2021 nahmen insgesamt fünf Personen an dem Hands-on Kurs im LMU Klinikum teil. Darunter waren eine Studierende, drei Assistenzärzt*innen und ein Facharzt. Zwei der Teilnehmenden hatten keine Vorerfahrung, drei Teilnehmende wenig Vorerfahrung, weshalb auch bei diesem Kurs eine ausführliche theoretische Einführung anhand des Trainingsmanuals analog zum Kurs B1 erfolgte. Es wurde das

Modell des gesunden Herzens zur Übung der grundlegenden Schritte und die Modelle der AS, ISTA, PS zur Übung der Ballondilatation eingesetzt.

2.3 Teilnehmende

Die Kurse richteten sich sowohl an erfahrene als auch unerfahrene Teilnehmende, gemessen an ihrer Erfahrung in der Katheterintervention. Je nach Vorerfahrung wurde der Ablauf bzw. der Fokus des Kurses angepasst, damit alle Teilnehmenden die Möglichkeit hatten, die praktische Simulation korrekt auszuführen und bewerten zu können. Es nahmen sowohl Studierende als auch Ärzt*innen in unterschiedlichen Weiterbildungsstufen teil. Die Teilnehmenden setzten sich zusammen aus Studierenden der LMU München, ärztlichen Mitarbeiter*innen der Abteilung für Kinderkardiologie und pädiatrische Intensivmedizin des Klinikums der LMU München, ärztlichen Mitarbeiter*innen der Abteilung für Kinderkardiologie des AKH Wien sowie den Ärzt*innen des Exkurses im Ayder Referral Hospital der Universität Mekelle in Äthiopien.

2.4 Entwicklung des Trainingsmanuals

Begleitend zur Entwicklung der Hands-on Trainingskurse wurde ein Skript gefertigt, welches die Grundlagen einer HK-Untersuchung sowie die Schritte zur Diagnostik und Intervention bei angeborenen Herzfehlern thematisiert. Ausgeteilt und erörtert wurde dieses Skript zu Beginn des Kurses. Dadurch sollte insbesondere den unerfahrenen Studierenden und Ärzt*innen in Weiterbildung der Einstieg in die theoretischen Grundlagen des Kurses erleichtert werden.

2.5 Entwicklung des Fragebogens

Zur Evaluation des Hands-on-Kurses wurde ein Fragebogen entwickelt. Die Teilnahme und die Evaluation des Kurses und der Modelle waren freiwillig und anonymisiert. Im Folgenden ist der allgemeine Aufbau des Fragebogens beschrieben. Der spezifische Aufbau der Evaluation einzelner Kurse ist ab 2.4.1 erläutert.

Zur Einordnung der Erfahrungsstufe sollte zunächst beantwortet werden, wie oft eine Katheterintervention durch die Teilnehmenden selbstständig durchgeführt wurde. Als Antwortmöglichkeit konnte ausgewählt werden zwischen ‚nie‘, ‚unregelmäßig, selten‘, und ‚regelmäßig, oft‘.

Die Modelle und der Kurs wurden anhand von Bewertungsfragen evaluiert. Die Beantwortung der Bewertungsfragen erfolgte anhand einer Likert-Skala mit Werten von 1 (trifft voll zu) bis 5 (trifft gar nicht zu). Evaluiert wurden die 3D-gedruckten Herzmodelle in Bezug auf ihre Realitätsnähe und der Handhabung. Außerdem wurde bewertet, inwieweit die Modelle zum Erlernen von Katheterinterventionsschritten wie dem Einführen einer Schleuse und Führungsdraht, dem Wechsel eines Katheters, dem Führen des Katheters zur Stelle der Intervention, der Dilatation eines Ballons und der Dilatation einer Stenose geeignet sind. Des Weiteren wurde die Eignung der Modelle als Lehrmodell zum besseren Verständnis des Prozedere einer HK-Untersuchung, dem Umgang mit den Katheterinstrumenten, dem Verständnis der Herzanatomie und der selbstständigen Übung und Wiederholung bewertet. Zuletzt sollte beurteilt werden, ob der Simulationskurs als Lehrform geeignet ist und welche Vorteile sich möglicherweise ergeben. Abschließend beinhaltete jeder Fragebogen zwei Freitextkommentare, in denen eine persönliche Rückmeldung gegeben werden konnte, was den Teilnehmenden besonders gut gefallen hat und was verbessert werden sollte.

2.5.1 A1

Der Fragebogen des Kurses A1 war identisch zu dem Fragebogen der Kurse B2-5. Er wurde jedoch auf englisch übersetzt und erst nach dem Kurs per E-Mail im Word-Format verschickt und ausgefüllt zurückgesendet. Da der Kurs A1 als einziger Kurs die Modelle der 2. Generation bewertet, werden die Ergebnisse separat ausgewertet.

2.5.2 B1

Bei dem Kurs am 09.03.2019 für Studierende und Assistenzärzt*innen wurde der Fragebogen bereits zu Anfang des Kurses ausgeteilt. Bei diesem Kurs sollten die Fragen teilweise vor und nach dem Kurs beantwortet werden, um eine Entwicklung der Selbsteinschätzung bewerten zu können.

Der Vergleich zwischen der Erwartung an den Kurs und der finalen Evaluation wird separat nur für diesen Kurs ausgewertet. Die Bewertungsfragen, die am Ende des Kurses beantwortet wurden und identisch mit denen der Kurse B2 – 5 sind, gehen in die Gesamtbewertung B1 – 5 mit ein. Vor dem Kurs sollte die Erwartungshaltung an den praktischen Kurs erfasst werden. Dazu wurden insgesamt zwei Fragenblöcke mit sieben Bewertungsfragen zum Erlernen von Katheterinterventionsschritten und der

Erwartung an die Modelle gestellt. Nach dem Kurs sollte bewertet werden, inwieweit die einzelnen Schritte erlernt werden konnten. Zusätzlich wurden allgemeine Fragen zu den Modellen gestellt. Der zweite Teil des Fragebogens enthielt vier Fragenblöcke mit 14 Bewertungsfragen.

2.5.3 B2 – 5

Bei den Kursen B2 – 5 hatten die Teilnehmenden verschiedene Erfahrungsstufen. Aus diesem Grund wurde hier nicht der Vergleich zwischen der Erwartung vor dem Kurs und der Evaluation nach dem Kurs abgefragt. Stattdessen war die Evaluation auf die Beantwortung des Fragebogens am Ende des Kurses beschränkt und es kamen fünf Bewertungsfragen hinzu. Somit enthielt der Fragebogen vier Fragenblöcke mit 19 Bewertungsfragen.

Die Fragen zu den 3D-gedruckten Herzmodellen im Allgemeinen enthielten zusätzlich die Bewertung der anatomischen Richtigkeit, der realistischen Proportionierung und der Qualität der Verarbeitung. Zur Eignung des Simulationstrainings als Lehrform wurden zusätzliche Aussagen bewertet. Zum einen, ob die Teilnehmenden sich im Nachhinein mehr Training am Modell während ihrer Ausbildung gewünscht hätten, Zum anderen, ob sich die Teilnehmenden vorstellen können, dass besonders Berufseinsteiger von derartigen Modellen zum Erlernen der HK-Technik profitieren.

2.5.4 C1

Für den Kurs C1 wurde der Fragebogen vollständig überarbeitet. Er beinhaltete die Abfrage der Erfahrungsstufe in Abhängigkeit davon, ob die Teilnehmenden bereits bei einer HK-Untersuchung assistiert haben oder nicht. Vor dem Kurs wurde außerdem abgefragt, welche Inhalte die Teilnehmenden in dem Kurs vermittelt bekommen wollen. Nach dem Kurs sollte je nach Erfahrungsstufe ein zweiter Teil beantwortet werden. Außerdem wurde zum Schluss anhand von Freitextkommentaren nach Verbesserungsvorschlägen zu den 3D-gedruckten Modellen und den Kursen allgemein gefragt. Für die Teilnehmenden ohne Vorerfahrung wurde anhand von acht Bewertungsfragen abgefragt, was sie in dem theoretischen und praktischen Teil des Kurses gelernt haben. Den Teilnehmenden mit Vorerfahrung wurden neun Bewertungsfragen zum Vergleich des Hands-on Trainings zur realen HK-Untersuchung gestellt.

2.6 Exkurs Äthiopien

Der Exkurs entstand durch die Zusammenarbeit mit dem gemeinnützigen Verein Ethiopia-Witten, ein von Ärzten gegründeter Verein mit dem Ziel der Entwicklungshilfe in Äthiopien, besonders der Region Tigray im Norden des Landes. Das Ayder Referral Hospital, die Universitätsklinik der Stadt Mekelle, hat seit 2015 ein Herzkatheterlabor, welches mit der Unterstützung des Vereins neu errichtet wurde. Die äthiopischen Ärzt*innen haben teilweise Erfahrung in der HK-Untersuchung von Erwachsenen, jedoch wenig Erfahrung mit der Intervention bei angeborenen Herzfehlern. Ziel des Projekts ist es daher, den äthiopischen Ärzt*innen beizubringen, wie sie im Herzkatheterlabor Kinder mit angeborenen Herzfehlern interventionell behandeln können.

Im Juli 2018 fand ein erster Workshop unter der Leitung des Direktors der Abteilung für Kinderkardiologie und pädiatrische Intensivmedizin des Klinikums der LMU München statt, bei dem das 3D-gedruckte Herzmodell des PDA genutzt wurde. Der Kurs beinhaltete die theoretischen Grundlagen zur Messung der Ductusgröße anhand der Röntgenangiografie und das praktische Vorgehen zum interventionellen Verschluss eines PDA. Die erfahrensten äthiopischen Ärzte konnten am Ende des Kurses unter Anleitung insgesamt zwölf Kinder mit PDA erfolgreich behandeln. Die Modelle wurden anschließend verbessert und ein Fragebogen wurde entwickelt.

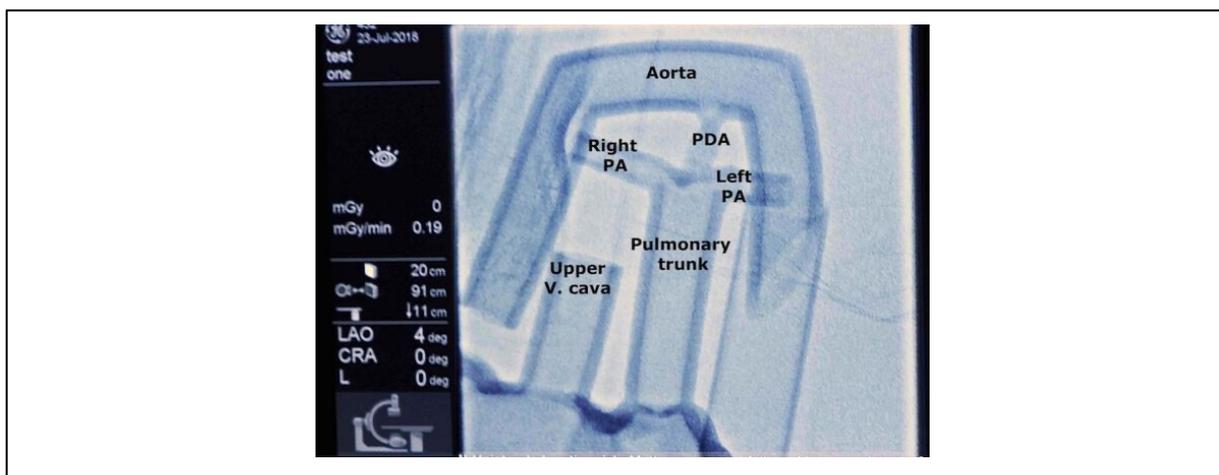


Abbildung 24: PDA-Modell 2. Generation unter Röntgendurchleuchtung.

Das 3D-gedruckte Modell des PDA während des Workshops in Mekelle, Äthiopien. PDA = persistierender Ductus arteriosus, Right PA = rechte Pulmonalarterie, Left PA = linke Pulmonalarterie, Pulmonary trunk = Pulmonalarterienstamm, Upper V. cava = V. cava superior.

Ein zweiter Hands-on-Kurs fand von 28.10. - 29.10.2018 statt. Hierbei wurden die überarbeiteten Modelle des PDA und der PS 2. Generation verwendet. Der Ablauf der Intervention wurde für die Behandlung eines PDA und einer PS anhand der Modelle Schritt-für-Schritt besprochen und an dem Modell demonstriert. Die Schritte wurden außerdem auf Plakaten festgehalten, um sie besser einprägen zu können und eine selbstständige Wiederholung zu ermöglichen. Die Behandlungstechnik wurde jeweils zu zweit geübt. Die Aufgaben haben jeweils rotiert, sodass jeder die Möglichkeit hatte den Eingriff mehrmals zu trainieren und aber auch die Rolle des Assistenten oder Assistentin zu übernehmen.



Abbildung 25: Schritt-für-Schritt Anleitung

Herzkatheterlabor des Ayder Referral Hospital der Universität Mekelle, Äthiopien während des zweiten Workshops (Kurs A1). Den Teilnehmenden werden die einzelnen Schritte zur Katheterintervention durch einen erfahrenen interventionellen Kinderkardiologen (Direktor der Abteilung für Kinderkardiologie und pädiatrische Intensivmedizin des LMU Klinikums München) erläutert und anschließend demonstriert.



Abbildung 27: Hands-on-Übung in Zweiergruppen

Herzkatheterlabor des Ayder Referral Hospital der Universität Mekelle, Äthiopien während des zweiten Workshops (Kurs A1). Die Teilnehmenden üben die einzelnen Schritte der Katheterintervention zur Dilatation einer Stenose in Zweiergruppen anhand des 3D-Modells der Pulmonalklappenstenose 2. Generation.

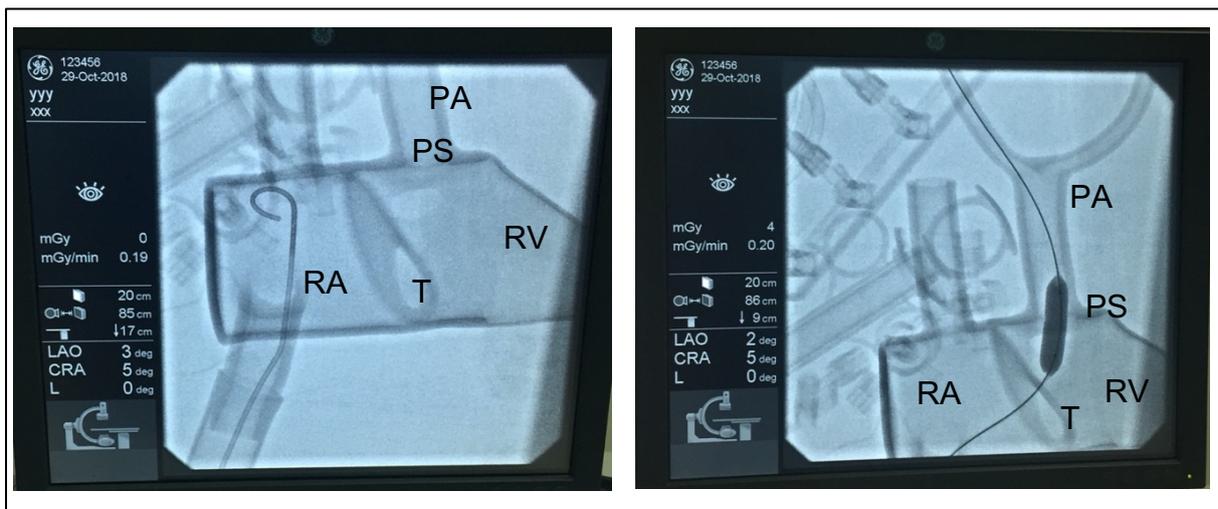


Abbildung 26: Modell der Pulmonalklappenstenose in der Durchleuchtung

Zweiter Workshop im Ayder Referral Hospital der Universität Mekelle, Äthiopien. Pulmonalklappenstenose-Modell der 2. Generation in der Durchleuchtung. RA = rechter Vorhof, T = Trikuspidalklappe, RV = rechter Ventrikel, PA = Pulmonalarterie, PS = Pulmonalklappenstenose. A) Pigtail-Katheter im rechten Vorhof des PS-Modells. B) Ballonkatheter nach Überwindung der dargestellten Trikuspidalklappe in richtiger Position über der Pulmonalklappenstenose des PS-Modells in der Inflation.

Die äthiopischen Ärzt*innen des Ayder Referral Hospital hatten bereits Patient*innen mit einem PDA oder einer PS vorselektiert. Diese wurden vom Team der Abteilung für Kinderkardiologie und pädiatrische Intensivmedizin des Klinikums Großhadern erneut visitiert und untersucht. So wurden insgesamt fünf Kinder ausgewählt, bei denen eine Herzkatheterintervention notwendig und möglich war. Unter strenger Supervision konnten nach dem Workshop diese Patient*innen erfolgreich von den erfahrensten äthiopischen Ärzt*innen behandelt werden. Dabei wurde bei drei Kindern die Pulmonalklappenstenose mittels Ballonkatheter geweitet und bei zwei Kindern der persistierende Ductus arteriosus mit entsprechendem Verschlusssystem verschlossen. Die Modelle wurden zur weiteren selbstständigen Übung vor Ort belassen.



Abbildung 28: Äthiopische Ärzt*innen im Herzkatheterlabor

Herzkatheterlabor des Ayder Referral Hospital der Universität Mekelle, Äthiopien während des zweiten Workshops (Kurs A1). Die erfahrensten äthiopischen Ärzt*innen, welche zuvor am Hands-on-Kurs teilgenommen haben, behandeln unter Supervision ein Kind mit Pulmonalklappenstenose im Herzkatheterlabor.

Im Rahmen eines durch die Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ) geförderten Klinikpartnerschaftsprojekts zwischen der Abteilung für Kinderkardiologie und pädiatrische Intensivmedizin des LMU Klinikums und dem Ayder Referral Hospital der Universität der Stadt Mekelle, Äthiopien, wurden die 3D-gedruckten Herzmodelle bei einem dritten Workshop in Mekelle eingesetzt. Dieser fand vom 16. Bis 20. Dezember 2019 statt. Für diesen Kurs kam das mittlerweile entwickelte 3D-gedruckte Herzmodelle der Pulmonalklappenstenose 3. Generation zum Einsatz. Das Modell war in der Größe eines Erwachsenen, eines Jugendlichen

und eines Kleinkindes vorhanden, welche bis auf die Größe jeweils identisch waren. Analog zu den vorherigen Workshops wurde die Katheterintervention zur Aufweitung einer Pulmonalklappenstenose zuerst theoretisch und schrittweise besprochen, bevor die Ärzte die Gelegenheit hatten die Behandlung an den Modellen beliebig oft zu üben.

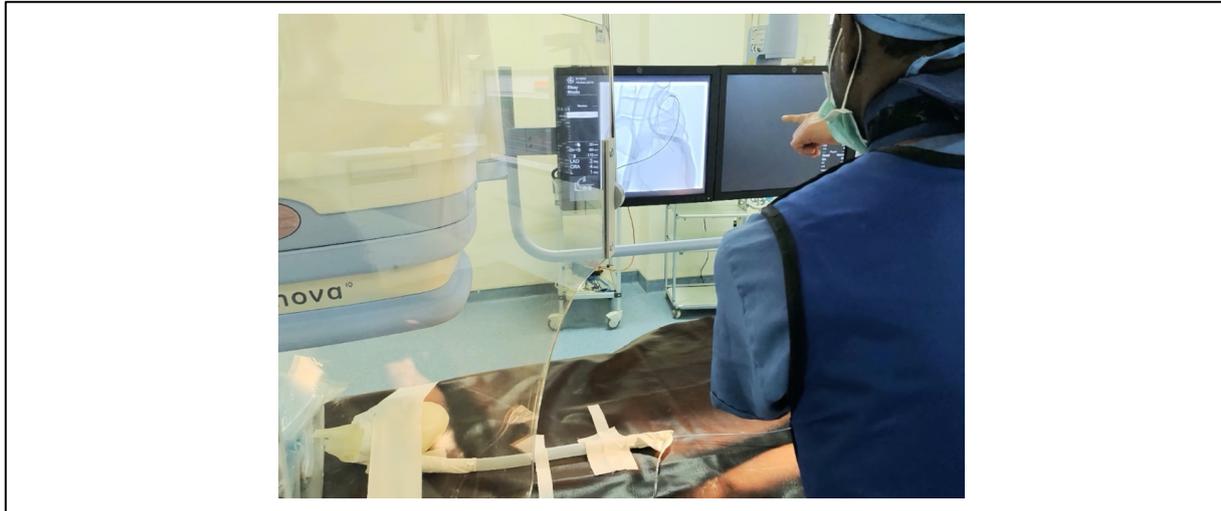


Abbildung 29: Hands-on Übung am 3D-Modell 3. Generation

Herzkatheterlabor des Ayder Referral Hospital der Universität Mekelle, Äthiopien während des dritten Workshops (Kurs B3). Die Teilnehmenden üben die Schritte der Katheterintervention in Zweiergruppen am 3D-gedruckten Modell der 3. Generation.

Das Projekt ist ursprünglich für zwei Jahre und vier weitere Workshops dieser Art geplant. Aufgrund des Bürgerkrieges in Äthiopien und der Covid-19-Pandemie mussten die Workshops bis auf weiteres entfallen und werden so bald wie möglich nachgeholt.

2.7 Evaluation

Die Auswertung der Evaluation erfolgte unter Verwendung von Microsoft Excel. Die Ergebnisse der Evaluation repräsentieren die subjektive Bewertung der Teilnehmenden. Im Rahmen des bereits beschriebenen Fragebogens konnten die Teilnehmenden in anonymisierter Form die Modelle bewerten. Die Beantwortung der Fragen erfolgte weitgehend anhand von single-choice Fragen mit einer Likert-Skala.

Tabelle 3: Antwortmöglichkeiten und numerische Codierung der Likert-Skala

Trifft voll zu	1
Trifft teils zu	2
Teils, teils	3
Trifft wenig zu	4
Trifft gar nicht zu	5

Für die Evaluation wurden die Teilnehmenden entweder im Gesamten betrachtet oder nach ihrer Erfahrung in Unerfahrene, mäßig Erfahrene und Erfahrene unterteilt. Die Einteilung in Erfahrungsstufen erfolgte anhand einer Frage im Fragebogen, bei der angegeben werden sollte, wie oft die Teilnehmenden selbstständig Herzkatheterinterventionen durchführen. Daraus ergab sich folgende Zuordnung:

1. Unerfahrene: keine Erfahrung im Herzkatheterlabor, nie eine HK-Untersuchung selbstständig durchgeführt
2. Mäßig Erfahrene: mäßig Erfahrung im Herzkatheterlabor, wenige HK-Untersuchungen selbstständig durchgeführt
3. Erfahrene: viel Erfahrung im Herzkatheterlabor, regelmäßig selbstständige Durchführung von HK-Untersuchungen

Für die Auswertung wurden zudem die Antworten der Likert-Skala teilweise zusammengefasst, um eine Zustimmung (,trifft voll zu' und ,trifft teils zu'), Neutralität (teils, teils) und eine Ablehnung (,trifft wenig zu' und ,trifft gar nicht zu') zu beschreiben. Die persönliche Rückmeldung durch die Freitextkommentare wurde qualitativ ausgewertet.

Bei dem ersten Kurs (A1), welcher im Ayder Referral Hospital in Mekelle, Äthiopien am 30.10.2018 stattfand, wurde das Modell der 2. Generation verwendet. Hierfür wurden die Modelle aus Silikonschläuchen im CT gescannt und anschließend mit dem 3D-Drucker gedruckt (s. Abbildung 20). Bis zu dem nächsten Kurs am 09.03.2019 wurden die Modelle grundlegend verändert. Es wurden nicht mehr die Modelle aus Silikonschläuchen als Ausgangsmodell, sondern archivierte CT-Datensätze von Patient*innen mit angeborenen Herzfehlern, die im Rahmen klinisch indizierter Untersuchungen gewonnen wurden, verwendet. Aus diesem Grund wurde die Bewertung des Kurses A1 separat analysiert.

Der Kurs B1 ist der erste Kurs, bei dem ausschließlich unerfahrene Personen teilgenommen haben. Aus diesem Grund ging dem praktischen Hands-on Kurs ein ausführlicher theoretischer Einführungsteil voraus und es bot sich die Möglichkeit, die Erwartungshaltung der unerfahrenen Teilnehmenden mit der Bewertung am Ende des Kurses zu vergleichen. Dieser Teil der Evaluation wurde ebenfalls separat ausgewertet.

Die Antworten der Bewertungsfragen am Ende des Kurses, welche identisch mit denen der Kurse B2 – 5 waren, wurden bei der Gesamtauswertung B1 – 5 berücksichtigt.

Die Zusatzfragen der Kurse B2 – 5 wurden separat ausgewertet, da hier der Fragebogen identisch war und primär die Einschätzung der mäßig erfahrenen und erfahrenen Teilnehmenden relevant ist.

Der Kurs C1 wurde separat ausgewertet. Für diesen Kurs wurde der Fragebogen vollständig überarbeitet und weiterentwickelt. Die Fragen wurden an die Erfahrungsstufe angepasst, um spezifischere Ergebnisse zu erzielen.

3. Ergebnisse

3.1 Hands-on Kurse

Seit Beginn der Modellentwicklung fanden insgesamt sieben Kurse statt, bei denen die Modelle praktisch getestet werden konnten. Zwei Kurse fanden im Ayder Referral Hospital der Universität Mekelle, Äthiopien, drei Kurse in dem Klinikum der LMU München und zwei Kurse in dem Allgemeinen Krankenhaus in Wien statt. Es nahmen Teilnehmende unterschiedlicher Erfahrungsstufen und Funktionen teil. Die Kurse fanden jeweils in dem hauseigenen Herzkatheterlabor statt.

Die Modelle erster Generation wurden lediglich im Testdurchlauf und als Grundlage für die Weiterentwicklung verwendet. Bei einem Kurs wurden die Modelle zweiter Generation verwendet. Die Modelle dritter Generation kamen bei sechs Kursen zum Einsatz. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der stattgefundenen Trainingskurse und einen Überblick über die Anzahl der Teilnehmenden, deren Erfahrungsstufe und der verwendeten Modellgeneration.

3.2 Teilnehmende

Insgesamt nahmen 36 Personen an den Hands-on Kursen und der anschließenden anonymen Evaluation teil. Die Bewertungen kamen von insgesamt zehn Studierenden der LMU München, neun Assistenzärzt*innen, drei Fachärzten, einem Oberarzt und einer Klinikdirektorin einer kinderkardiologischen Abteilung, sowie zwölf Ärzt*innen aus dem Ayder Referral Hospital der Universität Mekelle, Äthiopien.

Die Teilnehmenden konnten anhand ihrer Erfahrung im Herzkatheterlabor eingeteilt werden. Insgesamt nahmen 25 unerfahrene, acht mäßig erfahrene und drei erfahrene Personen an den Hands-on Kursen und der Evaluation des Kurses und der 3D-gedruckten Herzmodelle teil.

Tabelle 4: Übersicht der Kurse und Teilnehmenden

Kurs	Datum	Ort	Teilnehmer-ID	Erfahrungsstufe	Modell
A1	28. - 29.10.18	Ayder Referral Hospital	1	mäßig erfahren	2. Generation
			2	mäßig erfahren	
			3	mäßig erfahren	
			4	unerfahren	
			5	unerfahren	
B1	09.03.19	LMU Klinikum	6	unerfahren	3. Generation
			7	unerfahren	
			8	unerfahren	
			9	unerfahren	
			10	unerfahren	
			11	unerfahren	
			12	unerfahren	
			13	unerfahren	
			14	unerfahren	
			15	unerfahren	
			16	unerfahren	
B2	26.03.19	LMU Klinikum	17	unerfahren	3. Generation
			18	erfahren	
B3	19.12.19	Ayder Referral Hospital	19	mäßig erfahren	3. Generation
			20	mäßig erfahren	
			21	mäßig erfahren	
			22	unerfahren	
			23	unerfahren	
			24	unerfahren	
B4	13.01.20	AKH Wien	26	unerfahren	3. Generation
			27	erfahren	
			28	erfahren	
			29	unerfahren	
B5	21.02.20	AKH Wien	30	unerfahren	3. Generation
			31	mäßig erfahren	
C1	26. - 27.09.2021	LMU Klinikum	32	unerfahren	3. Generation
			33	unerfahren	
			34	mäßig erfahren	
			35	unerfahren	
			36	unerfahren	

3.3 Kurse

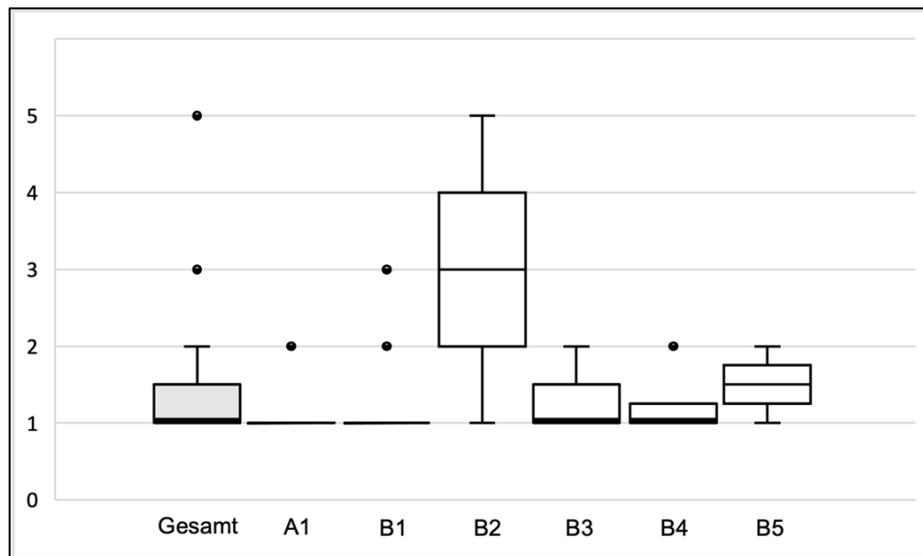


Abbildung 30: Durchschnittliche Anzahl an Wiederholungen der Kurse A1 – B5

Die Abbildung zeigt die Mediane aller Teilnehmenden (n = 31) der Kurse A1 – B5 und der einzelnen Kurse A1 – B5. 1 = 0-5x, 2 = 6-10x, 3 = 11-15x, 4 = 16-20x, 5 => 20x.

Tabelle 5: Durchschnittliche Anzahl an Wiederholungen der Kurse A1 – B1

Kurs	Anzahl TN	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	26	19	5	1	0	1	1
A1	5	4	1	0	0	0	1
B1	11	9	1	1	0	0	1
B2	2	1	0	0	0	1	3
B3	7	5	2	0	0	0	1
B4	4	3	1	0	0	0	1
B5	2	1	1	0	0	0	1,5

1= 0-5x, 2 = 6-10x, 3 = 11-15x, 4 = 16-20x, 5 => 20x

Die einzelnen Übungen konnten im Durchschnitt 0- bis 5-mal (Median = 1) durchgeführt werden.

3.3.1 A1

- I. Die Modelle sind sehr realitätsnah
- II. Die Handhabung ist einfach
- III. Das Prozedere verstehen
- IV. Umgang mit den Katheterinstrumenten
- V. Anatomie besser verstehen
- VI. Übung und Wiederholung möglich
- VII. Schleuse und Führungsdraht einführen
- VIII. Einen Katheter wechseln
- IX. Erreichen der Interventionsstelle
- X. Dilatation einer Stenose
- XI. Übungen am Modell sind grundsätzlich hilfreich
- XII. Ich wünsche mir mehr Möglichkeiten des Hands-on-Trainings
- XII. Berufseinsteiger können von dem Hands-on-Training profitieren
- XIV. Mehr Sicherheit bei Interventionen durch das Hands-on-Training

Tabelle 6: Antworten der Teilnehmenden des Kurses A1

Frage-Nr.	Anzahl TN	1	2	3	4	5	Median
I	5	3	2	0	0	0	1
II	5	4	1	0	0	0	1
III	5	5	0	0	0	0	1
IV	5	5	0	0	0	0	1
V	5	1	3	1	0	0	2
VI	5	5	0	0	0	0	1
VII	5	4	1	0	0	0	1
VIII	5	3	2	0	0	0	1
IX	5	5	0	0	0	0	1
X	5	2	2	1	0	0	2
XI	5	5	0	0	0	0	1
XII	5	5	0	0	0	0	1
XII	5	5	0	0	0	0	1
XIV	5	5	0	0	0	0	1

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

3.3.2 B1

3.3.2.1 Erwartung der Teilnehmenden und abschließende Bewertung

- I. Einführen einer Schleuse und eines Führungsdrahts
- II. Wechsel des Drahts und Katheters
- III. Führen des Katheters zur Stelle der Intervention
- IV. Dilatation eines Ballons
- V. Dilatation einer Klappe oder Gefäßstenose mittels Ballonkatheter

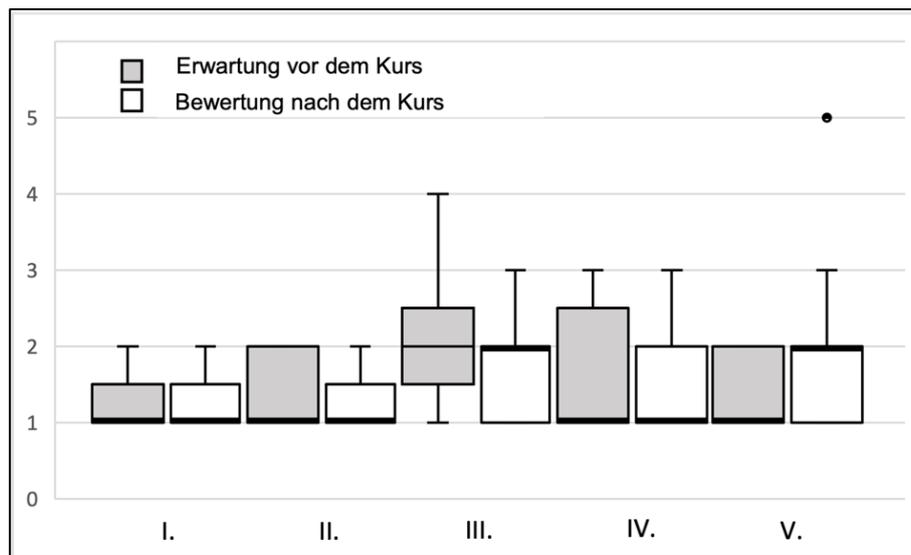


Abbildung 31: Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden des Kurses B1
Das Diagramm visualisiert die Mediane und die Verteilung der Antworten des Kurses B1 zu den Fragen I - V anhand der fünfstufigen Likert-Skala.

Tabelle 7: Antworten der Teilnehmenden des Kurses B1 vor und nach dem Kurs

Frage		Anzahl	1	2	3	4	5	Median
I.	vor dem Kurs	11	8	3	0	0	0	1
	nach dem Kurs	11	8	3	0	0	0	1
II.	vor dem Kurs	11	7	4	0	0	0	1
	nach dem Kurs	11	8	3	0	0	0	1
III.	vor dem Kurs	11	3	5	2	1	0	2
	nach dem Kurs	11	4	6	1	0	0	2
IV.	vor dem Kurs	11	7	1	3	0	0	1
	nach dem Kurs	11	6	4	1	0	0	1
V.	vor dem Kurs	11	6	5	0	0	0	1
	nach dem Kurs	10	4	4	4	0	1	2

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Alle Teilnehmenden hatten die Erwartung, dass sie lernen, einen Führungsdraht einzuführen (n= 11; ,trifft voll zu' / ,trifft teils zu') und einen Katheter anhand des Drahts

wechseln zu können (n=11; ‚trifft voll zu‘ / ‚trifft teils zu‘). Diese Erwartung hat sich nach dem Kurs bestätigt. Den Draht am Ende des Kurses zur Stelle der Intervention führen zu können hat eine Person nicht erwartet, dennoch gaben nach dem Kurs alle Teilnehmenden an, es zumindest teilweise gelernt zu haben. Auch die Dilatation eines Ballons haben am Ende fast alle Teilnehmenden erfolgreich erlernt (n= 10; ‚trifft voll zu‘ / ‚trifft teils zu‘), wobei sich drei Personen vorher unsicher waren (n = 3; ‚teils, teils‘). Die Dilatation einer Stenose mittels Ballonkatheter konnten sich alle Teilnehmenden vor dem Kurs vorstellen zu erlernen (n = 11; ‚trifft voll zu‘ / ‚trifft teils zu‘), nach dem Kurs gaben fünf Teilnehmende an, es nur teilweise (n = 4; ‚teils, teils‘) oder gar nicht gelernt zu haben (n = 1; ‚trifft gar nicht zu‘).

	Vor dem Kurs:	Nach dem Kurs:
VI.	Übungen am Modell sind grundsätzlich hilfreich.	Ich halte diese Übung am Modell für hilfreich.
VII.	Modelle in anderen Fachgebieten haben mir bereits geholfen, mehr Sicherheit vor der Intervention am Patienten zu bekommen	Ich kann mir vorstellen, dass ich durch das Üben am 3D-Modell mehr Sicherheit bei der Intervention am Patienten habe.

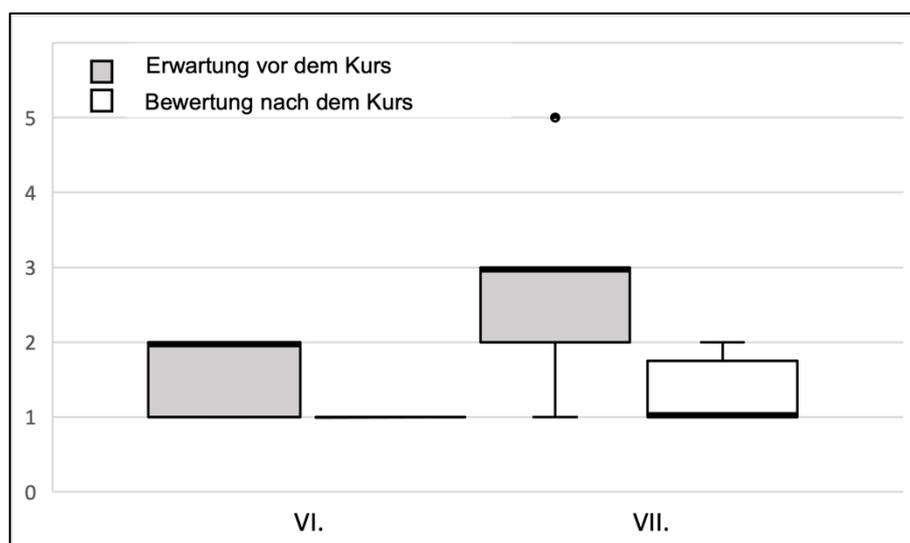


Abbildung 32: Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden des Kurses B1

Das Diagramm visualisiert die Mediane und die Verteilung der Antworten des Kurses B1 zu den Fragen VI - VII anhand der fünfstufigen Likert-Skala.

Tabelle 8: Antworten der Teilnehmenden des Kurses B1 vor und nach dem Kurs

Frage		Anzahl	1	2	3	4	5	Median
VI.	vor dem Kurs	11	5	6	0	0	0	2
	nach dem Kurs	10	10	0	0	0	0	1
VII.	vor dem Kurs	11	1	3	5	0	2	3
	nach dem Kurs	10	7	3	0	0	0	1
1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu								

Vor dem Kurs gaben 45,5 % der Teilnehmenden an, dass sie Übungen grundsätzlich hilfreich finden (1 = ‚trifft voll zu‘), die restlichen Teilnehmenden (54,5 %) stimmten ebenfalls zu (2 = ‚trifft teils zu‘). Nach dem Kurs gaben 100% der der Teilnehmenden an, dass sie die Übung des Hands-on Trainings als hilfreich erachten (1 = ‚trifft voll zu‘).

36,4 % (1 = ‚trifft voll zu‘ und 2 = ‚trifft teils zu‘) der Teilnehmenden stimmte vor dem Kurs zu, dass Übungen anderer Fachbereiche bereits geholfen haben, mehr Sicherheit bei der Intervention am Patienten zu bekommen. 18,2 % (5 = ‚trifft gar nicht zu‘) stimmten dem nicht zu, die restlichen 45,5 % (3 = ‚teils, teils‘) waren unentschieden. Nach dem Kurs stimmten 100% (1 = ‚trifft voll zu‘ und 2 = ‚trifft teils zu‘) der Teilnehmenden zu, dass sie sich vorstellen können durch diese Übung am 3D-Modell mehr Sicherheit bei der Intervention am Patienten zu bekommen.

3.3.3 B1 - B5

3.3.3.1 Allgemeine Bewertung der Herzmodelle

I. Die Modelle sind realitätsnah:

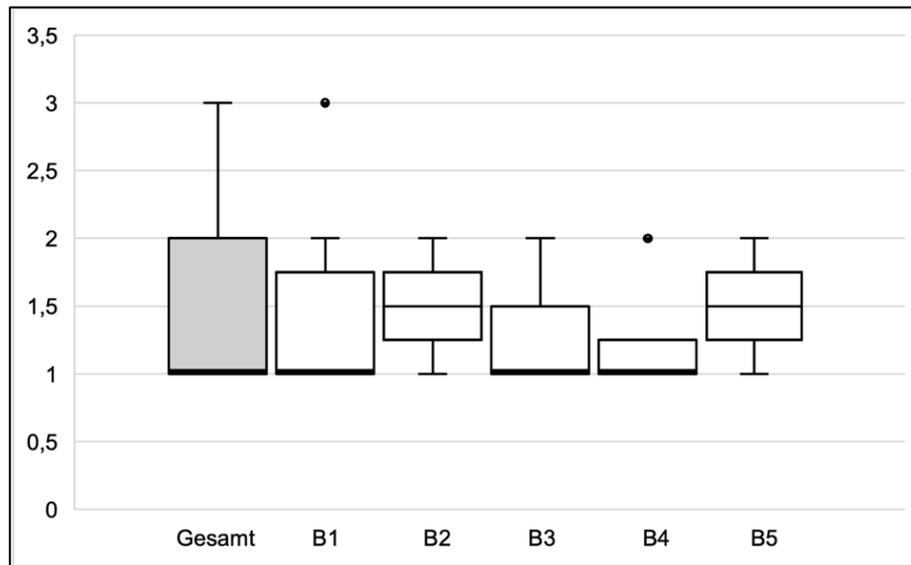


Abbildung 33: Realitätsnähe der Modelle

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 25) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage I anhand der fünfstufigen Likert-Skala.

Tabelle 9: Realitätsnähe der Modelle

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	25	17	7	1	0	0	1
B1	10	7	2	1	0	0	1
B2	2	1	1	0	0	0	1,5
B3	7	5	2	0	0	0	1
B4	4	3	1	0	0	0	1
B5	2	1	1	0	0	0	1,5

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden der Kurse B1 – B5 gaben mehrheitlich an, dass die 3D-gedruckten Herzmodelle realitätsnah sind (68%, trifft voll zu; 28%, trifft teils zu). Zu dieser Frage gab es keine ablehnende Haltung.

II. Die Handhabung der Modelle ist einfach / Die Übungen ließen sich gut durchführen:

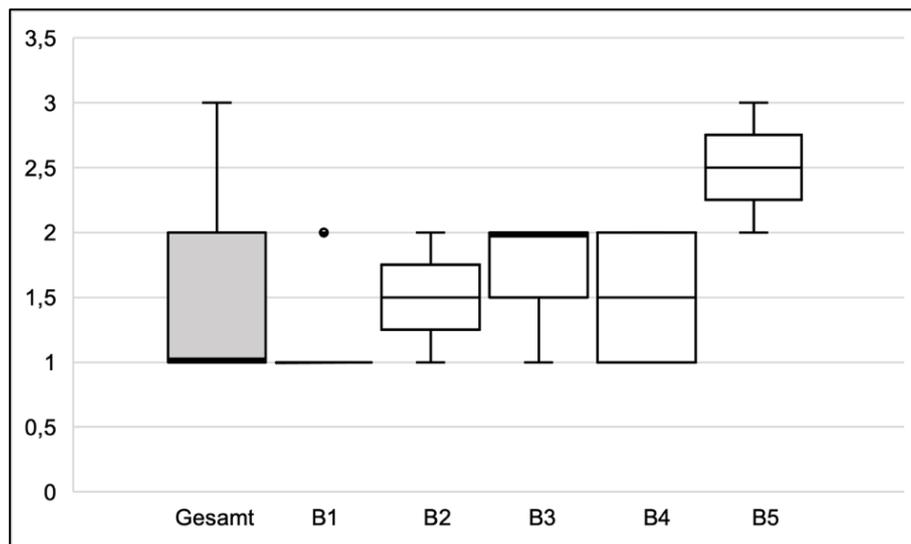


Abbildung 34: Einfache Handhabung der Modelle

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 26) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage II anhand der fünfstufigen Likert-Skala.

Tabelle 10: Einfache Handhabung der Modelle

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	26	14	11	1	0	0	1
B1	11	9	2	0	0	0	1
B2	2	1	1	0	0	0	1,5
B3	7	2	5	0	0	0	2
B4	4	2	2	0	0	0	1,5
B5	2	0	1	1	0	0	2,5

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden der Kurse B1 – B5 gaben insgesamt an, dass die Modelle einfach in der Handhabung seien (53,8%, trifft voll zu; 42,3%, trifft teils zu).

III. Unterteilung nach Erfahrungsstufen:

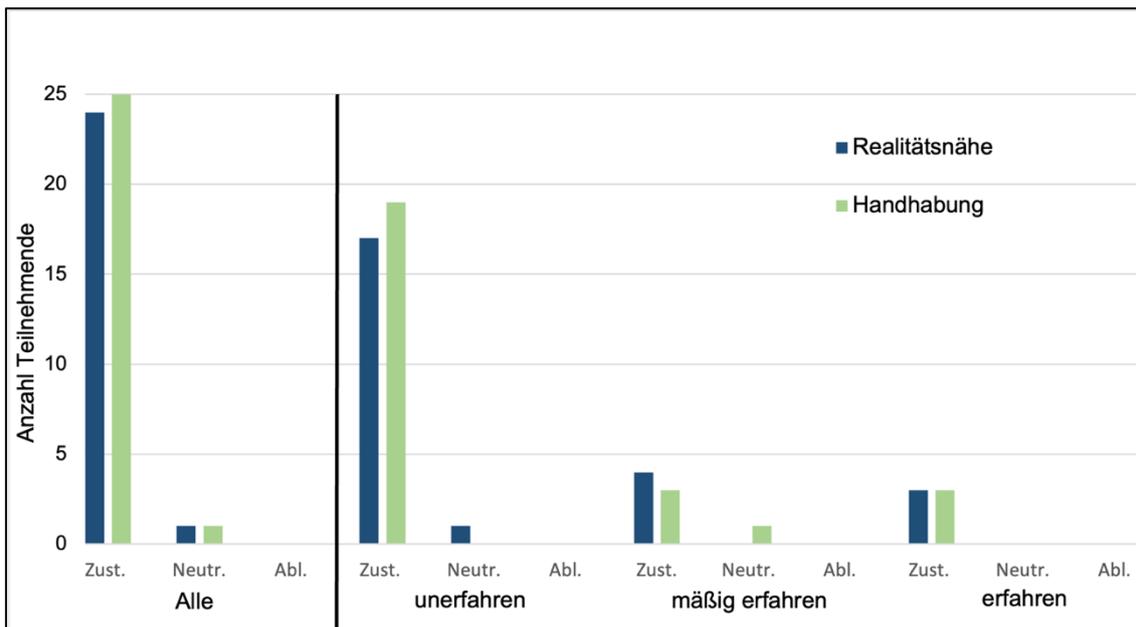


Abbildung 35: Allgemeine Bewertung der Modelle

Die Abbildung zeigt die absolute Anzahl an Antworten aller Teilnehmenden und unterteilt nach Erfahrungsstufen zu den Fragen I und II. Die Antwortmöglichkeiten wurden anhand der fünfstufigen Likert-Skala zusammengefasst, um eine Zustimmung, Neutralität oder Ablehnung zu charakterisieren.

Tabelle 11: Allgemeine Bewertung der Modelle

Erfahrungsstufe	Frage	Anzahl	Zustimmung		Neutral		Ablehnung	
			absolut	(%) relativ	absolut	(%) relativ	absolut	(%) relativ
Alle	I.	25	24	96	1	4	0	0
	II.	26	25	96	1	4	0	0
unerfahren	I.	18	17	94	1	6	0	0
	II.	19	19	100	0	0	0	0
mäßig erfahren	I.	4	4	100	0	0	0	0
	II.	4	3	75	1	25	0	0
erfahren	I.	3	3	100	0	0	0	0
	II.	3	3	100	0	0	0	0

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu
 Zustimmung = 1 & 2, Neutralität = 3, Ablehnung = 4 & 5

In der Unterteilung nach Erfahrungsstufen lässt sich festhalten, dass die Teilnehmenden aller Erfahrungsstufen zustimmen, dass die Modelle realitätsnah und einfach zu handhaben sind.

3.3.3.2 Eignung der 3D-gedruckten Herzmodelle als Lehrmodell

I. Das Verständnis für das Prozedere der besprochenen Herzkatheterinterventionen fördern:

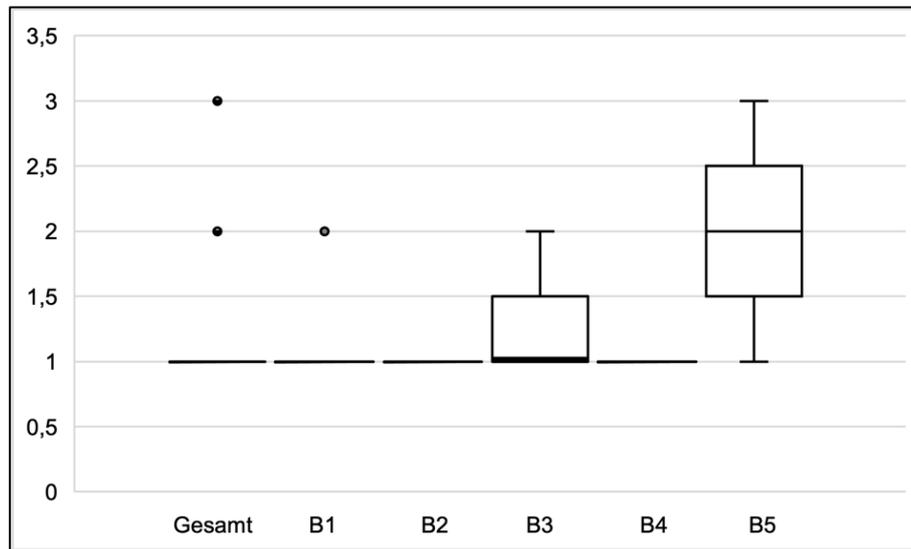


Abbildung 36: Verstehen des Prozedere

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 26) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage I anhand der fünfstufigen Likert-Skala.

Tabelle 12: Verständnis für das Prozedere fördern

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	26	21	4	1	0	0	1
B1	11	9	2	0	0	0	1
B2	2	2	0	0	0	0	1
B3	7	5	2	0	0	0	1
B4	4	4	0	0	0	0	1
B5	2	1	0	1	0	0	2

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich zu, dass die Modelle dabei helfen, das Prozedere der Herzkatheterinterventionen zu verstehen und nachzuvollziehen (80,8% ‚trifft voll zu‘; 15,4% ‚trifft teils zu‘). Es gab keine ablehnende Haltung zu dieser Fragestellung.

II. Erlernen des Umgangs mit den Katheterinstrumenten:

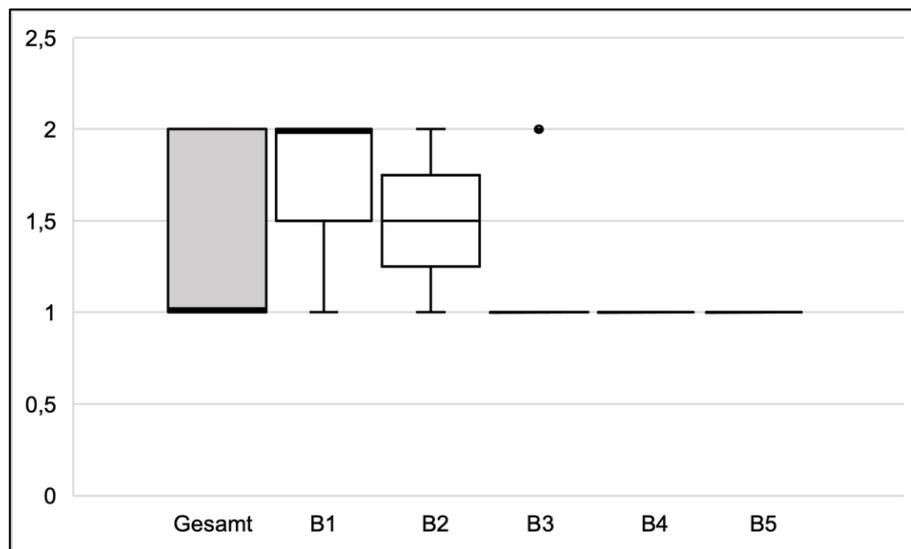


Abbildung 37: Umgang mit den Katheterinstrumenten

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 26) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage II anhand der fünfstufigen Likert-Skala.

Tabelle 13: Umgang mit den Katheterinstrumenten

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	26	16	10	0	0	0	1
B1	11	3	8	0	0	0	2
B2	2	1	1	0	0	0	1,5
B3	7	6	1	0	0	0	1
B4	4	4	0	0	0	0	1
B5	2	2	0	0	0	0	1

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich zu, dass die Modelle dabei helfen, den Umgang mit den im Herzkatheter verwendeten Katheterinstrumenten zu erlernen (61,5% ‚trifft voll zu‘; 38,5% ‚trifft teils zu‘). Es gab keine ablehnende Haltung zu dieser Fragestellung.

III. Verstehen der Anatomie:

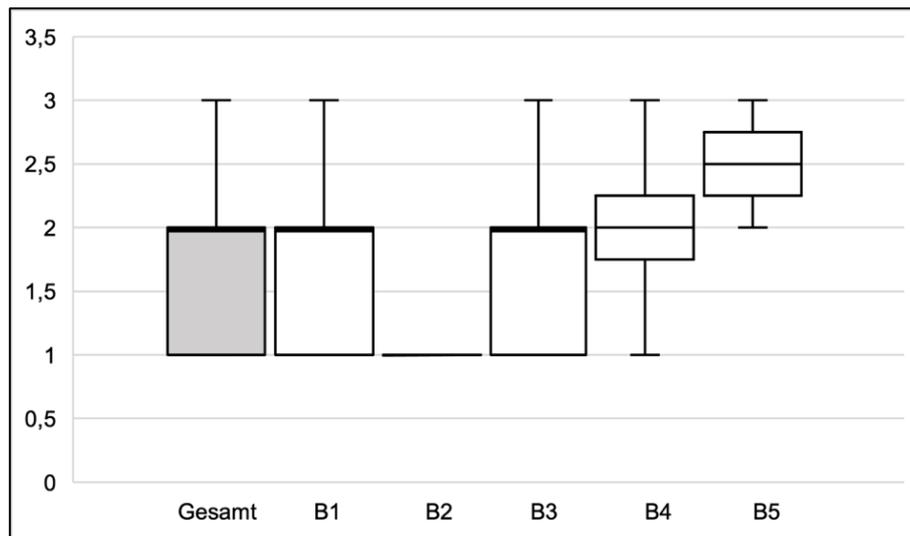


Abbildung 38: Verständnis der Anatomie

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 26) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage III anhand der fünfstufigen Likert-Skala.

Tabelle 14: Verständnis der Anatomie

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	26	10	11	5	0	0	2
B1	11	4	5	2	0	0	2
B2	2	2	0	0	0	0	1
B3	7	3	3	1	0	0	2
B4	4	1	2	1	0	0	2
B5	2	0	1	1	0	0	2,5

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich zu, dass die Modelle dabei helfen, die Anatomie des Herzens und der angeborenen Herzfehler zu verstehen (38,5% ‚trifft voll zu‘; 42,3% ‚trifft teils zu‘). 19,2% der Teilnehmenden hielten die Modelle dazu nur teilweise geeignet (‚teils, teils‘). Es gab keine ablehnende Haltung zu dieser Fragestellung.

IV. Selbstständige Übung und Wiederholung:

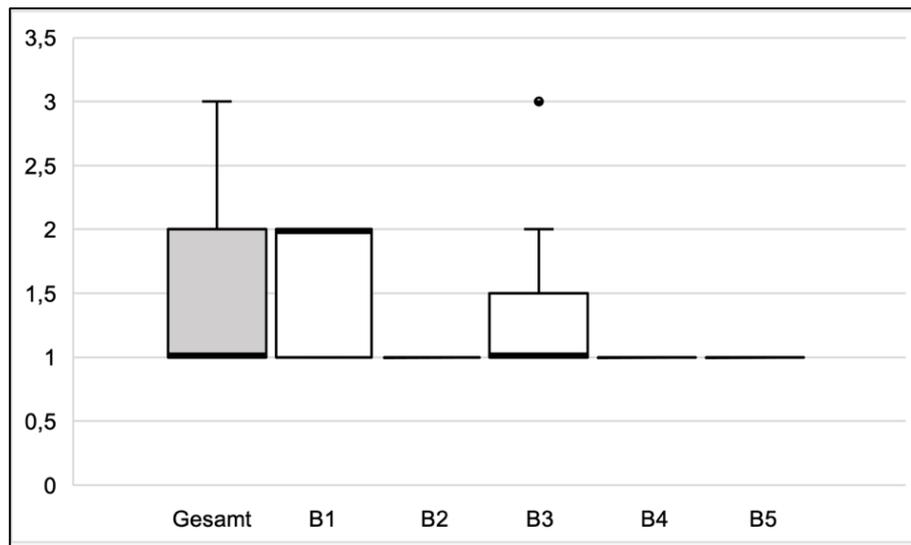


Abbildung 39: Selbstständige Übung und Wiederholung

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 26) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage IV anhand der fünfstufigen Likert-Skala.

Tabelle 15: Selbstständige Übung und Wiederholung

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	26	18	7	1	0	0	1
B1	11	5	6	0	0	0	2
B2	2	2	0	0	0	0	1
B3	7	5	1	1	0	0	1
B4	4	4	0	0	0	0	1
B5	2	2	0	0	0	0	1

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich zu, dass die Modelle dazu geeignet sind die Übungen selbstständig durchzuführen und zu wiederholen (69,2% ‚trifft voll zu‘; 26,9% ‚trifft teils zu‘). Es gab keine ablehnende Haltung zu dieser Fragestellung.

V. Unterteilung nach Erfahrungsstufen:

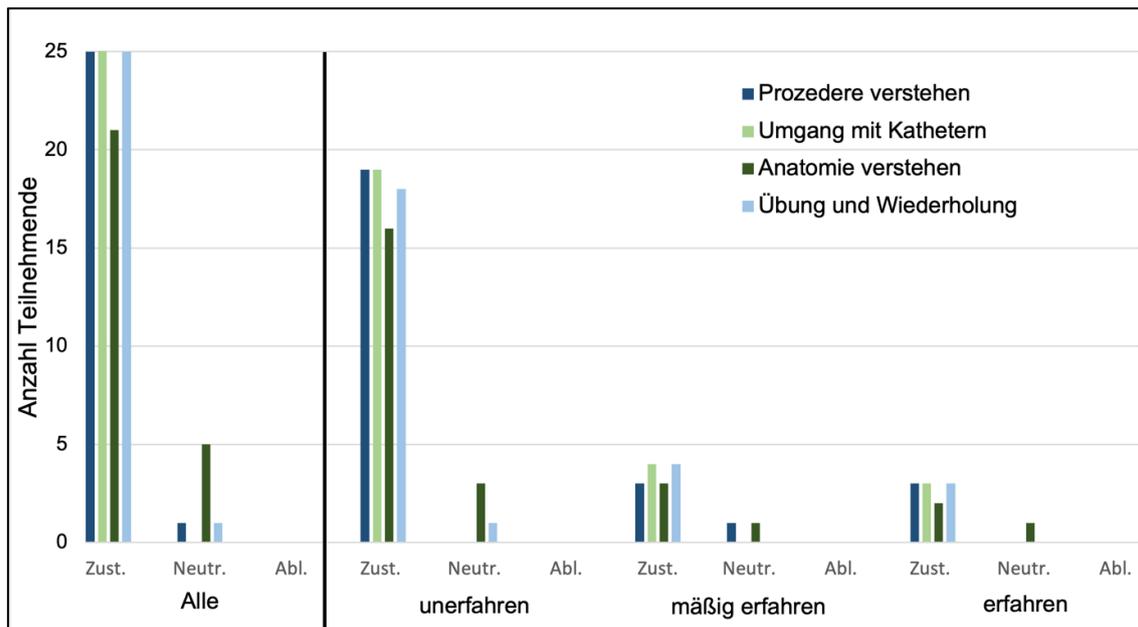


Abbildung 40: Eignung der 3D-gedruckten Herzmodelle als Lehrmodell

Die Abbildung zeigt die absolute Anzahl an Antworten aller Teilnehmenden und unterteilt nach Erfahrungsstufen zu den Fragen I – IV. Die Antwortmöglichkeiten wurden anhand der fünfstufigen Likert-Skala zusammengefasst, um eine Zustimmung, Neutralität oder Ablehnung zu charakterisieren.

Tabelle 16: Eignung der 3D-gedruckten Herzmodelle als Lehrmodell

Erfahrungsstufe	Frage	Anzahl	Zustimmung		Neutral		Ablehnung	
			absolut	(%) relativ	absolut	(%) relativ	absolut	(%) relativ
Alle	I.	26	25	96	1	4	0	0
	II.	26	26	100	0	0	0	0
	III.	26	21	81	5	19	0	0
	IV.	26	25	96	1	4	0	0
unerfahren	I.	19	19	100	0	0	0	0
	II.	19	19	100	0	0	0	0
	III.	19	16	84,2	3	15,8	0	0
	IV.	19	18	94,7	1	5,3	0	0
mäßig erfahren	I.	4	3	75	1	25	0	0
	II.	4	4	100	0	0	0	0
	III.	4	3	75	1	25	0	0
	IV.	4	4	100	0	0	0	0
erfahren	I.	3	3	100	0	0	0	0
	II.	3	3	100	0	0	0	0
	III.	3	2	66,7	1	33,3	0	0
	IV.	3	3	100	0	0	0	0

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu
Zustimmung = 1 & 2, Neutralität = 3, Ablehnung = 4 & 5

3.3.3.3 Eignung der Modelle als Simulationsmodell

I. Einführen einer Schleuse und eines Führungsdrahts

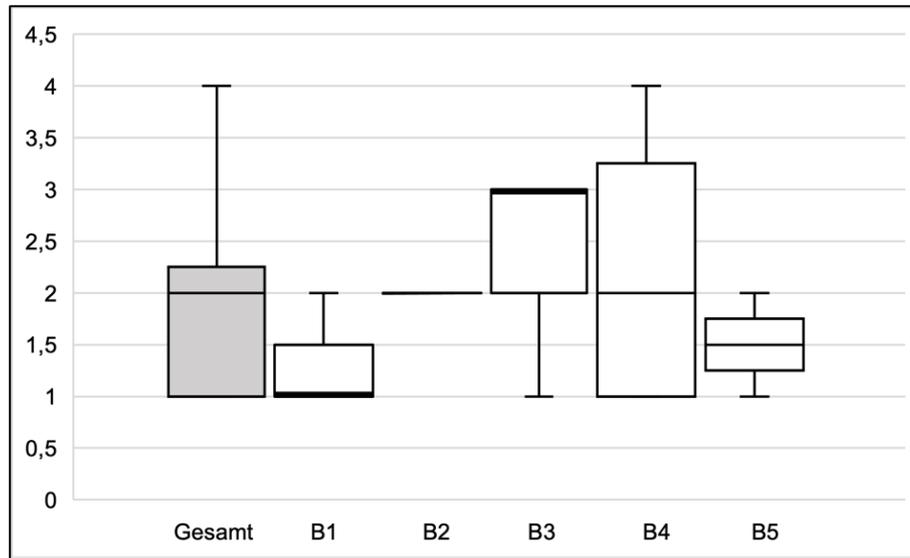


Abbildung 41: Einführen einer Schleuse und eines Führungsdrahtes

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 26) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage I anhand der fünfstufigen Likert-Skala.

Tabelle 17: Einführen einer Schleuse und eines Führungsdrahtes

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	26	12	8	5	1	0	2
B1	11	8	3	0	0	0	1
B2	2	0	2	0	0	0	2
B3	7	1	2	4	0	0	3
B4	4	2	0	1	1	0	2
B5	2	1	1	0	0	0	1,5

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich zu, dass die Modelle dazu geeignet sind das Einführen einer Schleuse und eines Führungsdrahts zu erlernen (46,2% ‚trifft voll zu‘; 30,8% ‚trifft teils zu‘). 19,2% fanden die Modelle nur teilweise geeignet, um diesen Schritt zu erlernen (‚teils, teils‘). Es gab eine ablehnende Haltung zu dieser Fragestellung (3,8% ‚trifft weniger zu‘).

II. Wechseln eines Katheters

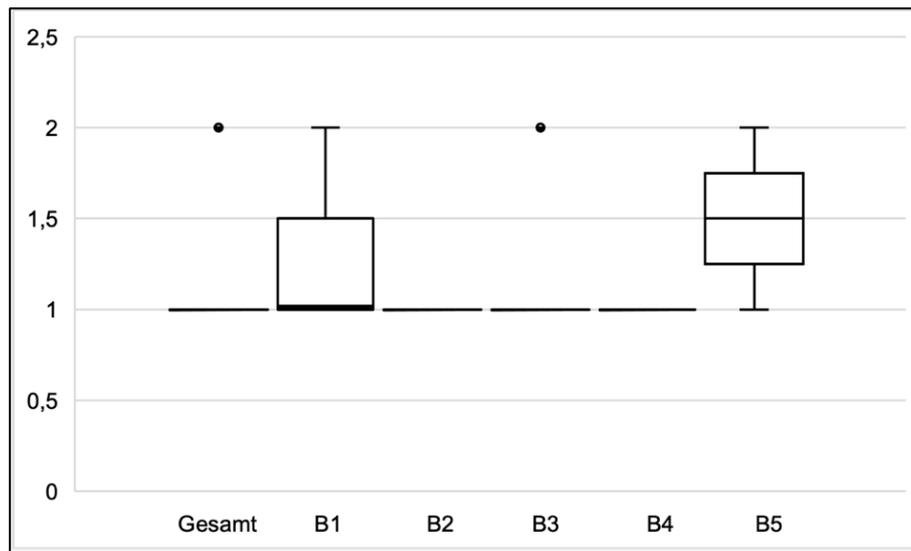


Abbildung 42: Wechseln des Katheters

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 26) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage II anhand der fünfstufigen Likert-Skala.

Tabelle 18: Wechseln des Katheters

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	26	21	5	0	0	0	1
B1	11	8	3	0	0	0	1
B2	2	2	0	0	0	0	1
B3	7	6	1	0	0	0	1
B4	4	4	0	0	0	0	1
B5	2	1	1	0	0	0	1,5

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich zu, dass die Modelle dazu geeignet sind das Vorgehen beim Wechsel eines Katheters zu erlernen (80,8% ‚trifft voll zu‘; 19,2% ‚trifft teils zu‘). Es gab keine ablehnende Haltung zu dieser Fragestellung.

III. Führen des Katheters zur Stelle der Intervention

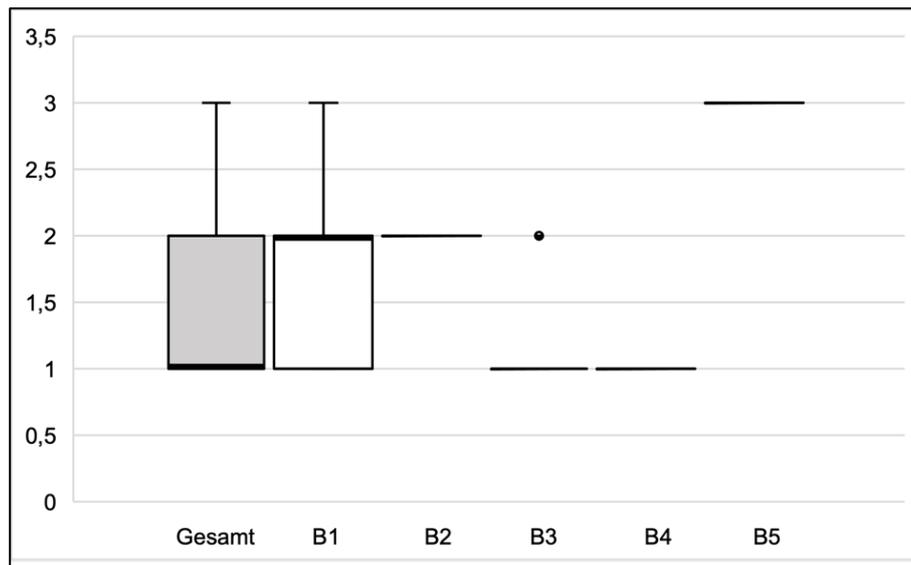


Abbildung 43: Führen des Katheters zur Stelle der Intervention

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 26) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage III anhand der fünfstufigen Likert-Skala.

Tabelle 19: Führen des Katheters zur Stelle der Intervention

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	26	14	9	3	0	0	1
B1	11	4	6	1	0	0	2
B2	2	0	2	0	0	0	2
B3	7	6	1	0	0	0	1
B4	4	4	0	0	0	0	1
B5	2	0	0	2	0	0	3

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich zu, dass die Modelle geeignet sind zu erlernen, wie ein Katheter zur Stelle der Intervention geführt werden kann (53,8% ‚trifft voll zu‘; 34,6% ‚trifft teils zu‘). 11,5% fanden die Modelle nur teilweise geeignet, um diesen Schritt zu erlernen (‚teils, teils‘). Es gab keine ablehnende Haltung zu dieser Fragestellung.

IV. Dilatation einer Klappe oder Gefäßstenose mittels Ballonkatheter

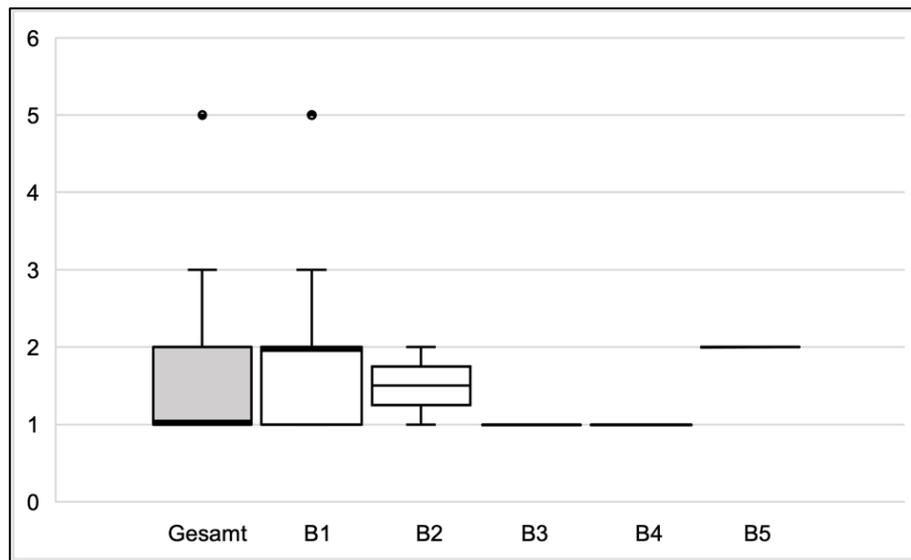


Abbildung 44: Dilatation mittels Ballonkatheter

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 25) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage IV anhand der fünfstufigen Likert-Skala.

Tabelle 20: Dilatation einer Klappe oder Gefäßstenose mittels Ballonkatheter

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	25	16	7	1	0	1	1
B1	10	4	4	1	0	1	2
B2	2	1	1	0	0	0	1,5
B3	7	7	0	0	0	0	1
B4	4	4	0	0	0	0	1
B5	2	0	2	0	0	0	2

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich zu, dass die Modelle geeignet sind zu erlernen, eine Herzklappe oder eine Stenose mittels Ballonkatheter dilatiert werden kann (64% ‚trifft voll zu‘; 28% ‚trifft teils zu‘). Ein Teilnehmender (4%) fand die Modelle nur teilweise geeignet, um diesen Schritt zu erlernen (‚teils, teils‘). Es gab eine ablehnende Haltung zu dieser Fragestellung (4% ‚trifft gar nicht zu‘).

V. Unterteilung nach Erfahrungsstufen

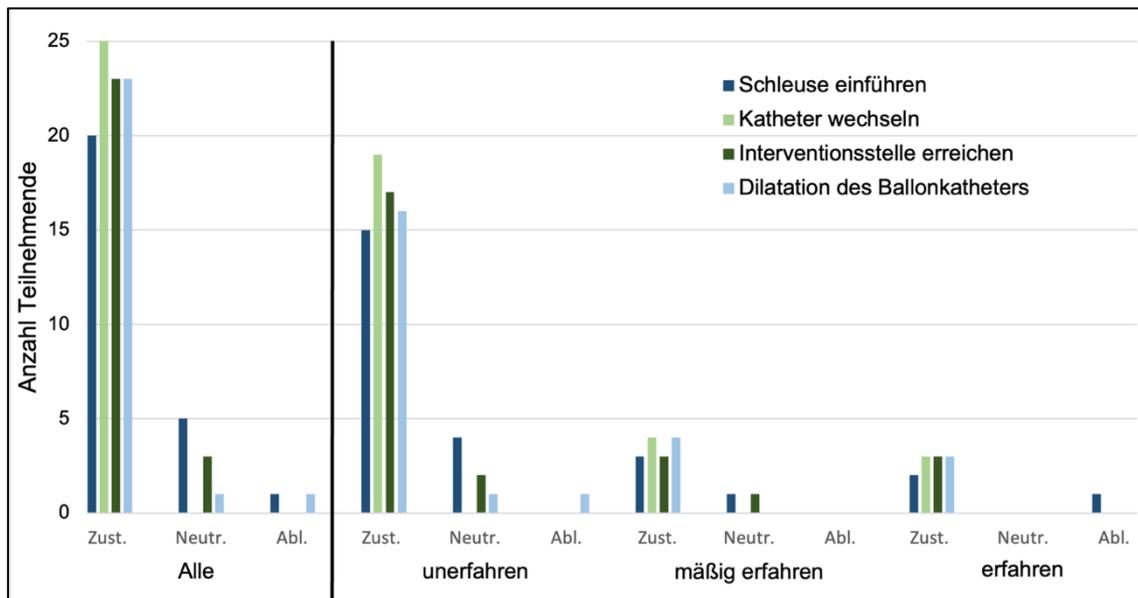


Abbildung 45: Eignung als Simulationsmodell

Die Abbildung zeigt die absolute Anzahl an Antworten aller Teilnehmenden und unterteilt nach Erfahrungsstufen zu den Fragen I – IV. Die Antwortmöglichkeiten wurden anhand der fünfstufigen Likert-Skala zusammengefasst, um eine Zustimmung, Neutralität oder Ablehnung zu charakterisieren.

Tabelle 21: Eignung der 3D-gedruckten Herzmodelle als Simulationsmodell

Erfahrungsstufe	Frage	Anzahl	Zustimmung		Neutral		Ablehnung	
			absolut	(%) relativ	absolut	(%) relativ	absolut	(%) relativ
Alle	I.	26	20	77	5	19	1	4
	II.	26	26	100	0	0	0	0
	III.	26	23	88	3	12	0	0
	IV.	25	23	92	1	4	1	4
unerfahren	I.	19	15	79	4	21	0	0
	II.	19	19	100	0	0	0	0
	III.	19	17	89,5	2	10,5	0	0
	IV.	18	16	88,9	1	5,6	1	5,6
mäßig erfahren	I.	4	3	75	1	25	0	0
	II.	4	4	100	0	0	0	0
	III.	4	3	75	1	25	0	0
	IV.	4	4	100	0	0	0	0
erfahren	I.	3	2	66,7	0	0	1	33,3
	II.	3	3	100	0	0	0	0
	III.	3	3	100	0	0	0	0
	IV.	3	3	100	0	0	0	0

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu
Zustimmung = 1 & 2, Neutralität = 3, Ablehnung = 4 & 5

3.3.3.4 Eignung der 3D-gedruckten Herzmodelle als Lehrform

I. Übungen am Modell sind grundsätzlich hilfreich.

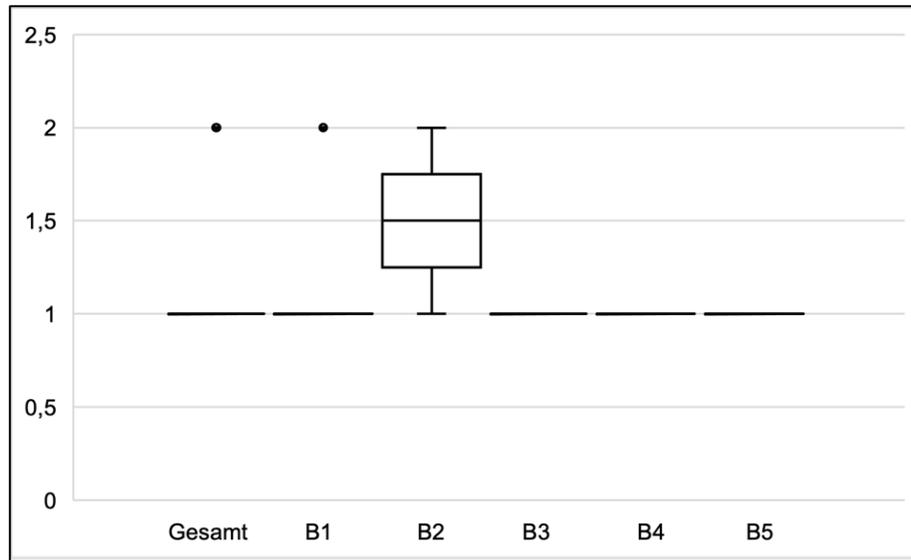


Abbildung 46: Übungen am Modell sind grundsätzlich hilfreich

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 26) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage I anhand der fünfstufigen Likert-Skala.

Tabelle 22: Übungen am Modell sind grundsätzlich hilfreich

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	26	24	2	0	0	0	1
B1	11	10	1	0	0	0	1
B2	2	1	1	0	0	0	1,5
B3	7	7	0	0	0	0	1
B4	4	4	0	0	0	0	1
B5	2	2	0	0	0	0	1

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Alle Teilnehmenden stimmten zu, dass die Übung an den Modellen grundsätzlich hilfreich ist (92,3% ‚trifft voll zu‘; 7,7% ‚trifft teils zu‘). Es gab keine ablehnende Haltung zu dieser Fragestellung.

II. Ich wünsche mir mehr Möglichkeiten vor der Intervention an Patienten am Modell üben und wiederholen zu können.

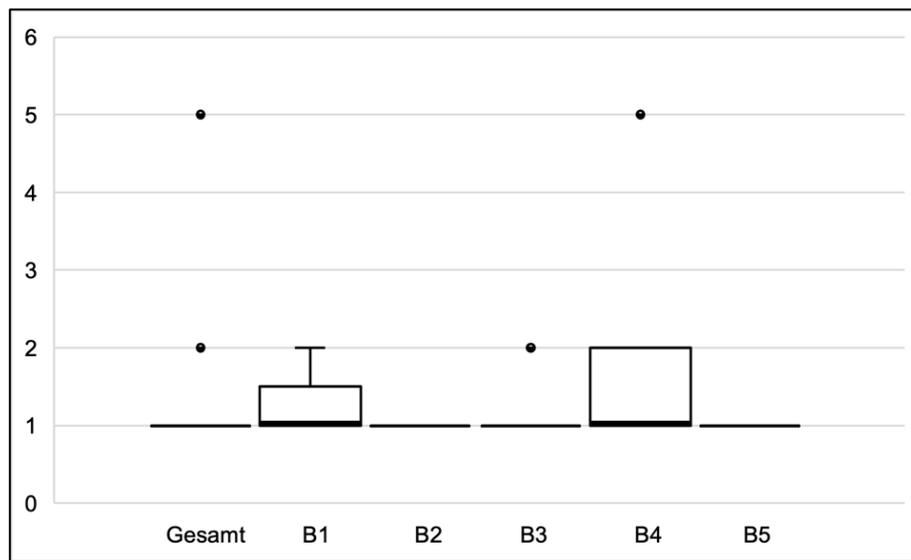


Abbildung 47: Mehr Möglichkeiten zur Übung und Wiederholung

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 26) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage II anhand der fünfstufigen Likert-Skala. Bewertet wurde, ob die Teilnehmenden sich in Zukunft mehr Möglichkeiten zur Übung und Wiederholung am 3D-gedruckten Herzmodell wünschen.

Tabelle 23: Mehr Möglichkeiten zur Übung und Wiederholung

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	26	21	4	0	0	1	1
B1	11	8	3	0	0	0	1
B2	2	2	0	0	0	0	1
B3	7	6	1	0	0	0	1
B4	4	3	0	0	0	1	1
B5	2	2	0	0	0	0	1

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich zu, dass sie sich in der Zukunft mehr Möglichkeiten wünschen, vor der Intervention am Patienten am Modell üben und wiederholen zu können (80,7% ‚trifft voll zu‘; 15,4% ‚trifft teils zu‘). Es gab eine ablehnende Haltung zu dieser Fragestellung (3,8% ‚trifft gar nicht zu‘).

III. Modelle in anderen Fachgebieten haben mir bereits geholfen, mehr Sicherheit vor der Intervention am Patienten zu bekommen.

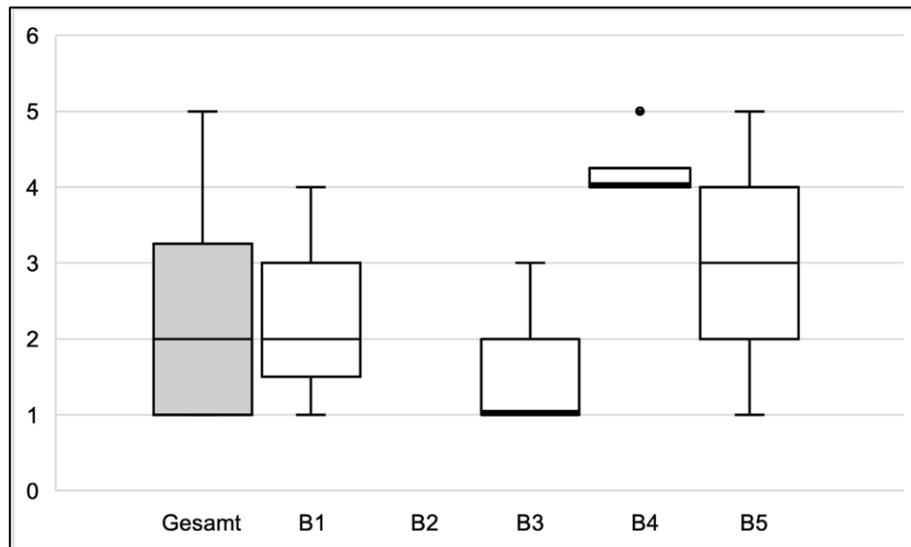


Abbildung 48: Mehr Sicherheit durch Modelle anderer Fachbereiche

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 24) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage III anhand der fünfstufigen Likert-Skala. Bewertet wurde, inwieweit Modelle anderer Fachbereiche bereits dabei geholfen haben, mehr Sicherheit vor der Intervention am Patienten zu bekommen.

Tabelle 24: Mehr Sicherheit durch Modelle anderer Fachbereiche

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	24	9	4	5	4	2	2
B1	11	3	4	3	1	0	2
B2	0	0	0	0	0	0	0
B3	7	5	0	2	0	0	1
B4	4	0	0	0	3	1	4
B5	2	1	0	0	0	1	3

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden stimmten insgesamt zu, dass ihnen die Übung am Modell in anderen Fachbereichen bereits geholfen hat, mehr Sicherheit vor der Intervention am Patienten zu bekommen (37,5% ‚trifft voll zu‘; 16,7% ‚trifft teils zu‘). Fünf Teilnehmenden (20,8%) haben Modelle anderer Bereiche bisher nur teilweise geholfen (‚teils, teils‘). Es gab insgesamt sechs ablehnende Haltungen zu dieser Fragestellung (16,7% ‚trifft weniger zu‘; 8,3% ‚trifft gar nicht zu‘).

IV. Ich kann mir vorstellen, durch das Üben am 3D-Herzmodell mehr Sicherheit bei der Intervention am Patienten zu bekommen.

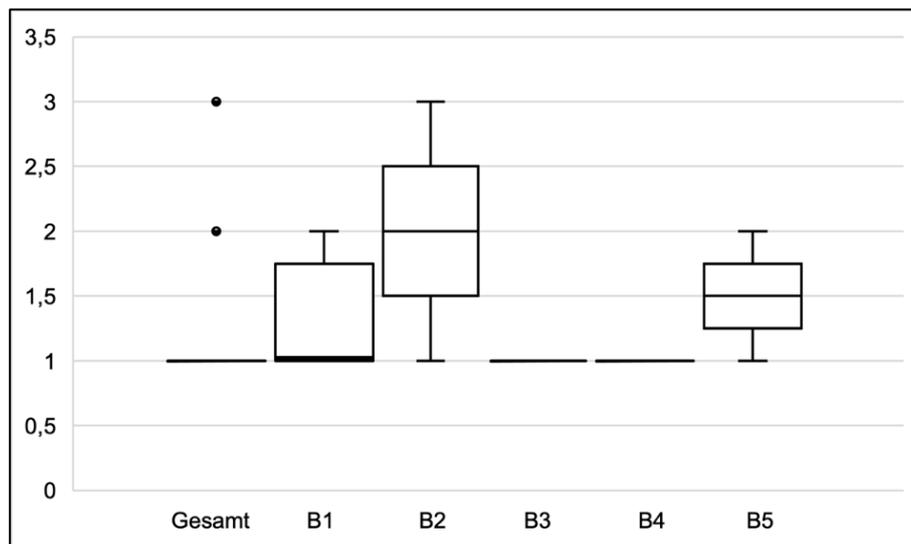


Abbildung 49: Mehr Sicherheit bei der Intervention durch Hands-on Training

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 25) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage IV anhand der fünfstufigen Likert-Skala. Bewertet wurde, inwieweit die Teilnehmenden sich vorstellen können, dass sie durch das Üben an 3D-gedruckten Herzmodellen mehr Sicherheit bei der Intervention am Patienten bekommen.

Tabelle 25: Mehr Sicherheit bei der Intervention durch Hands-on Training

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	25	20	4	1	0	0	1
B1	10	7	3	0	0	0	1
B2	2	1	0	1	0	0	2
B3	7	7	0	0	0	0	1
B4	4	4	0	0	0	0	1
B5	2	1	1	0	0	0	1,5

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich zu, dass sie sich vorstellen können, durch die Übung am 3D-Herzmodell mehr Sicherheit bei der Intervention am Patienten zu bekommen (80% ‚trifft voll zu‘; 16% ‚trifft teils zu‘). Ein Teilnehmender (4%) fand die Modelle nur teilweise geeignet (‚teils, teils‘). Es gab keine ablehnende Haltung zu dieser Fragestellung.

V. Unterteilung nach Erfahrungsstufen

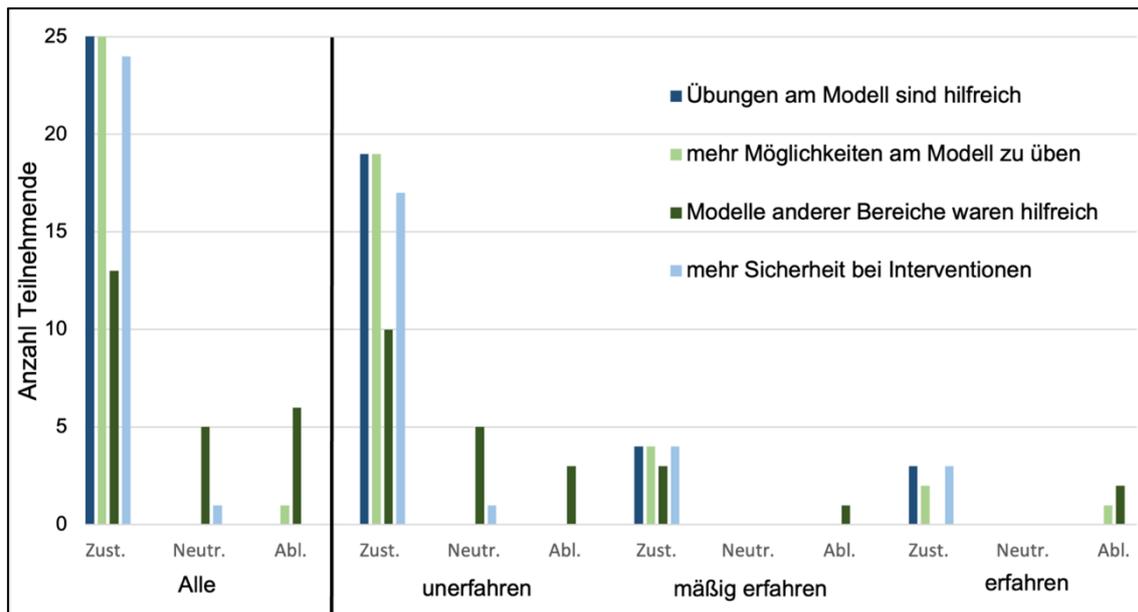


Abbildung 50: Eignung als Lehrform

Die Abbildung zeigt die absolute Anzahl an Antworten aller Teilnehmenden und unterteilt nach Erfahrungsstufen zu den Fragen I – IV. Die Antwortmöglichkeiten wurden anhand der fünfstufigen Likert-Skala zusammengefasst, um eine Zustimmung, Neutralität oder Ablehnung zu charakterisieren.

Tabelle 26: Eignung des Hands-on-Trainings als Lehrform

Erfahrungsstufe	Frage	Anzahl	Zustimmung		Neutral		Ablehnung	
			absolut	(%) relativ	absolut	(%) relativ	absolut	(%) relativ
Alle	I.	26	26	100	0	0	0	0
	II.	26	25	96	0	0	1	4
	III.	24	13	54,2	5	20,8	6	25
	IV.	25	24	96	1	4	0	0
unerfahren	I.	19	19	100	0	0	0	0
	II.	19	19	100	0	0	0	0
	III.	18	10	55,6	5	27,8	3	16,7
	IV.	18	17	94,4	1	5,6	0	0
mäßig erfahren	I.	4	4	100	0	0	0	0
	II.	4	4	100	0	0	0	0
	III.	4	3	75	0	0	1	25
	IV.	4	4	100	0	0	0	0
erfahren	I.	3	3	100	0	0	0	0
	II.	3	2	66,7	0	0	1	33,3
	III.	2	0	0	0	0	2	100
	IV.	3	3	100	0	0	0	0

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu
 Zustimmung = 1 & 2, Neutralität = 3, Ablehnung = 4 & 5

3.3.4 B2 – 5 Zusatzfragen

I. Aufweisen aller wichtigen anatomischen Strukturen

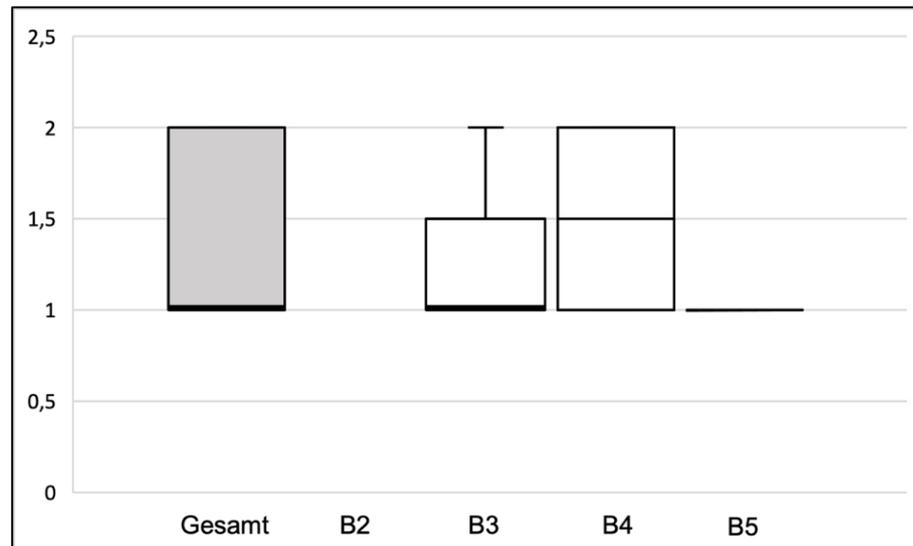


Abbildung 51: Anatomischen Strukturen des menschlichen Herzens

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 13) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage I anhand der fünfstufigen Likert-Skala. Bewertet wurde, inwieweit die Modelle die wichtigen anatomischen Strukturen des menschlichen Herzens aufweisen.

Tabelle 27: Anatomische Strukturen des menschlichen Herzens

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	13	9	4	0	0	0	1
B2	0	0	0	0	0	0	0
B3	7	5	2	0	0	0	1
B4	4	2	2	0	0	0	1,5
B5	2	2	0	0	0	0	1

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich zu, dass die Modelle alle wichtigen anatomischen Strukturen des menschlichen Herzens aufweisen (69,2% ‚trifft voll zu‘; 30,8% ‚trifft teils zu‘). Es gab keine ablehnende Haltung zu dieser Fragestellung.

II. Realistische Proportionen der Modelle

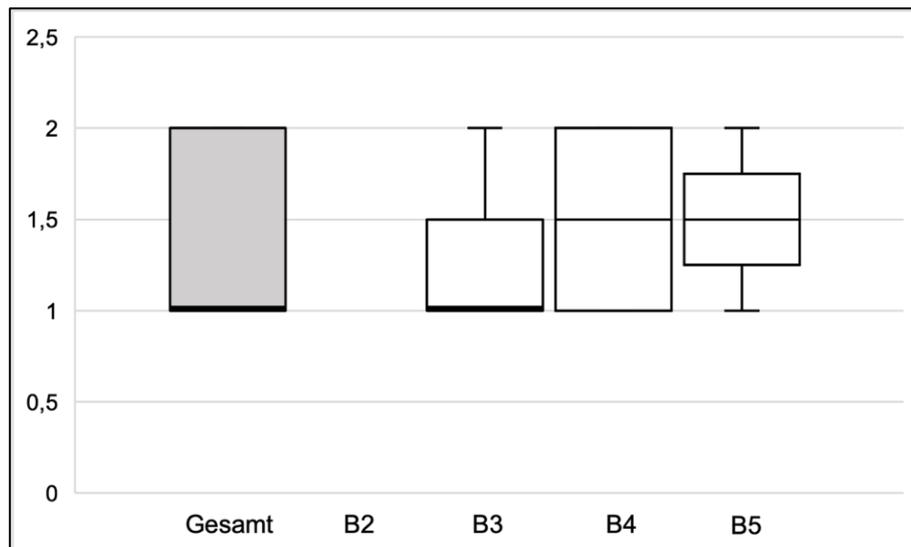


Abbildung 52: Realistische Proportionen der Modelle

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden ($n = 13$) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage II anhand der fünfstufigen Likert-Skala. Bewertet wurde, inwieweit die Proportionen der Modelle realitätsnah sind.

Tabelle 28: Realistische Proportionen der Modelle

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	13	8	5	0	0	0	1
B2	0	0	0	0	0	0	0
B3	7	5	2	0	0	0	1
B4	4	2	2	0	0	0	1,5
B5	2	1	1	0	0	0	1,5

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich zu, dass die Modelle realistische Proportionen aufweisen (61,5% ‚trifft voll zu‘; 38,5% ‚trifft teils zu‘). Es gab keine ablehnende Haltung zu dieser Fragestellung.

III. die Qualität der Verarbeitung der Modelle ist gut

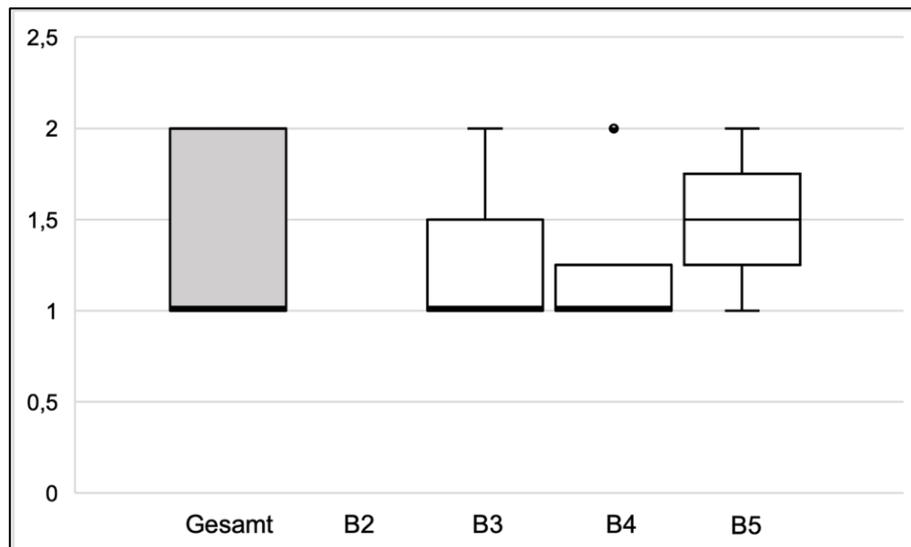


Abbildung 53: Die Qualität der Verarbeitung der Modelle ist gut

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 13) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage III anhand der fünfstufigen Likert-Skala. Bewertet wurde die Qualität, mit der die Modelle verarbeitet wurden.

Tabelle 29: Die Qualität der Verarbeitung der Modelle ist gut

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	13	9	4	0	0	0	1
B2	0	0	0	0	0	0	0
B3	7	5	2	0	0	0	1
B4	4	3	1	0	0	0	1
B5	2	1	1	0	0	0	1,5

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich zu, dass die Verarbeitung der Modelle eine gute Qualität aufweist (69,2% ‚trifft voll zu‘; 30,8% ‚trifft teils zu‘). Es gab keine ablehnende Haltung zu dieser Fragestellung.

IV. Im Nachhinein betrachtet hätte ich in meiner Ausbildungszeit ebenfalls gerne Modelle genutzt, um vor dem Herzkatheter-Eingriff am Patienten die einzelnen Schritte bereits mehrfach durchgeführt zu haben.

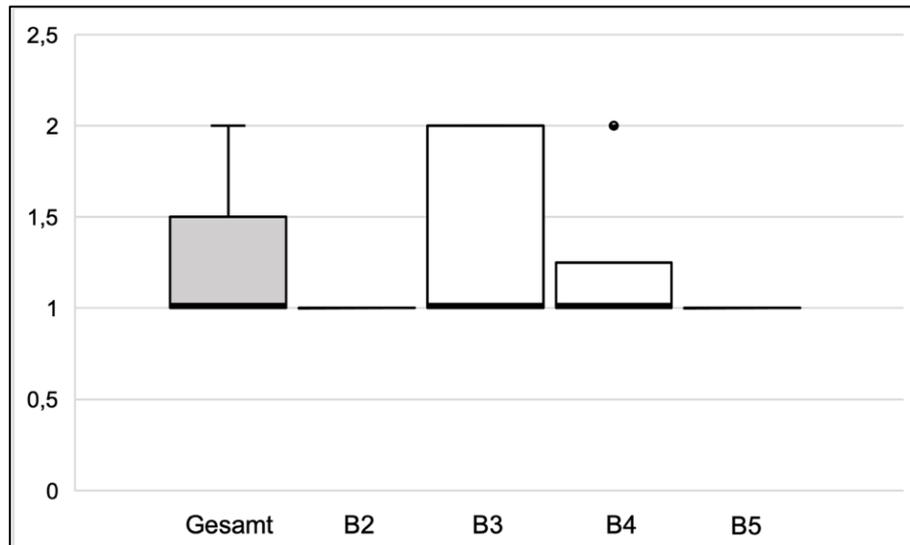


Abbildung 54: Nutzen der Modelle in der Ausbildungszeit

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 15) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage IV anhand der fünfstufigen Likert-Skala. Bewertet wurde, inwieweit die Teilnehmenden sich während ihrer Ausbildungszeit Modelle zum Üben eines Herzkatheter-Eingriffs gewünscht hätten.

Tabelle 30: Nutzen der Modelle in der Ausbildungszeit

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	15	11	4	0	0	0	1
B2	2	2	0	0	0	0	1
B3	7	4	3	0	0	0	1
B4	4	3	1	0	0	0	1
B5	2	2	0	0	0	0	1

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich zu, dass sie sich während ihrer eigenen Ausbildungszeit ebenfalls mehr Übungen am Modell gewünscht hätten (73,3% ‚trifft voll zu‘; 26,7% ‚trifft teils zu‘). Es gab keine ablehnende Haltung zu dieser Fragestellung.

V. Ich kann mir vorstellen, dass besonders Berufseinsteiger von derartigen Modellen zum Erlernen der Herzkatheter-Technik profitieren.

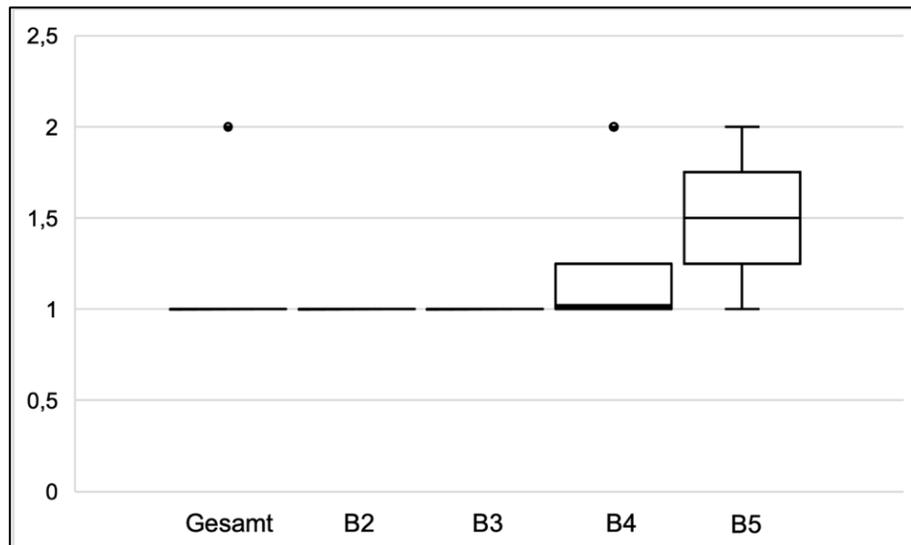


Abbildung 55: Nutzen der Modelle für Berufseinsteiger

Die Abbildung zeigt die mediane Verteilung der Antworten aller Teilnehmenden (n = 13) und der einzelnen Kurse B1 – B5 zu der Frage V anhand der fünfstufigen Likert-Skala. Bewertet wurde, inwieweit die Teilnehmenden sich vorstellen können, dass besonders Berufseinsteiger von der Übung am Modell profitieren.

Tabelle 31: Nutzen der Modelle für Berufseinsteiger

	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
Gesamt	13	12	1	0	0	0	1
B2	2	2	0	0	0	0	1
B3	7	7	0	0	0	0	1
B4	4	3	1	0	0	0	1
B5	2	1	1	0	0	0	1,5

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

Die Teilnehmenden stimmten mehrheitlich zu, dass sie die Übung am Modell besonders für Berufseinsteiger für geeignet halten (92,3% ‚trifft voll zu‘; 7,7% ‚trifft teils zu‘). Es gab keine ablehnende Haltung zu dieser Fragestellung.

3.3.5 C1

3.3.5.1 Fragen an die unerfahrenen Teilnehmenden

- I. Handhabung von Schleusen, Kathetern und anderen Instrumenten
- II. Vorbereitung auf die praktische Ausbildung im Herzkatheterlabor
- III. Wissen über die Herzanatomie und Anatomie angeborener Herzfehler
- IV. Berechnung der Hämodynamik
- V. Prinzip und Durchführung der Durchleuchtung
- VI. Umgang mit dem C-Bogen
- VII. Wunsch nach weiteren Hands-on-Kursen in der Zukunft
- VIII. Vorstellung über den Ablauf einer Herzkatheteruntersuchung

Tabelle 32: Auswertung der unerfahrenen Teilnehmenden (n = 2)

Frage	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
I	2	1	1	0	0	0	1,5
II	2	2	0	0	0	0	1
III	2	2	0	0	0	0	1
IV.	2	2	0	0	0	0	1
V.	2	1	0	1	0	0	2
VI.	2	2	0	0	0	0	1
VII.	2	1	1	0	0	0	1,5
VIII.	2	2	0	0	0	0	1

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

3.3.5.2 Fragen an die mäßig erfahrenen und erfahrenen Teilnehmenden

- I. Visuelle Ähnlichkeit der Modelle mit dem echten menschlichen Herzen
- II. Haptische Ähnlichkeit der Modelle mit dem echten menschlichen Herzen
- III. Genug Zeit die Technik, Methoden und Interventionen am Modell auszuprobieren
- IV. Verbesserung der Fähigkeiten im HK-Labor mithilfe des Kurses
- V. Übertragbarkeit der im Kurs erlernten Fähigkeiten auf die Arbeit im HK-Labor
- VI. Erhöhtes Sicherheitsgefühl bei der Arbeit im HK-Labor durch den Kurs
- VII. Der Kurs als Sinnvolle Ergänzung der Ausbildung von Studierenden/Ärzten, Ärztinnen

- VIII. Wunsch nach mehr Möglichkeiten für das Üben am Modell vor der Intervention am Patienten
- IX. Realitätsgetreue Darstellung der Herzanatomie in der Durchleuchtung

Tabelle 33: Auswertung der mäßig erfahrenen Teilnehmenden (n = 3)

Frage	Anzahl	1	2	3	4	5	Median
I	3	3	0	0	0	0	1
II	3	1	1	1	0	0	2
III	3	3	0	0	0	0	1
IV.	3	2	1	0	0	0	1
V.	3	2	1	0	0	0	1
VI.	3	2	1	0	0	0	1
VII.	3	3	0	0	0	0	1
VIII.	3	3	0	0	0	0	1
IX.	3	1	2	0	0	0	2

1 = trifft voll zu, 2 = trifft teils zu, 3 = teils, teils, 4 = trifft weniger zu, 5 = trifft gar nicht zu

3.3.6 Freitextkommentare

Im Rahmen der Freitextkommentare am Ende des Fragebogens konnten die Meinungen aller Teilnehmenden (n = 36) erfasst werden. Insgesamt wurden 71 Kommentare im Rahmen der Freitextfelder abgegeben. Die Kommentare wurden daraufhin sortiert in positive (n = 41) und konstruktive Rückmeldungen (n = 30). Zwölf Kommentare wurden in mehr als eine Kategorie einsortiert.

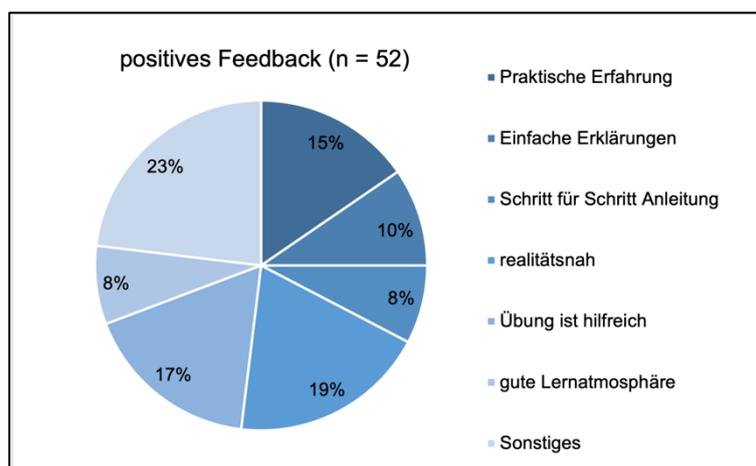


Abbildung 56: Positives Feedback der Kurse A1 – C1

Die Abbildung zeigt die Antworten der Teilnehmenden zu der Frage, was ihnen an dem Kurs und den Modellen gefallen hat.

Am häufigsten wurde die Realitätsnähe der Modelle und des Kurses im Herzkatheterlabor genannt (n = 10; 19%). Acht Kommentare (15%) hoben den hohen Anteil praktischer Übungen positiv hervor. Des Weiteren wurde die Tatsache hervorgehoben, dass eine Übung am Modell sehr hilfreich ist (n = 9, 17%), zum einen zu mehr Sicherheit bei der Intervention führen kann (n = 3) und zum anderen eine Übung ohne Patient*innen und ohne die Angst etwas Falsches zu machen durchgeführt werden kann (n = 6). Außerdem gefielen den Teilnehmenden die einfachen Erklärungen der Übungen und der Theorie (n = 5, 10%) sowie die Schritt-für-Schritt Anleitung (n = 4,8%). Zuletzt wurde auch die gute Lernatmosphäre während des Kurses erwähnt (n = 4,8%). Zwölf Kommentare (23%) ließen sich keiner Kategorie zuordnen.

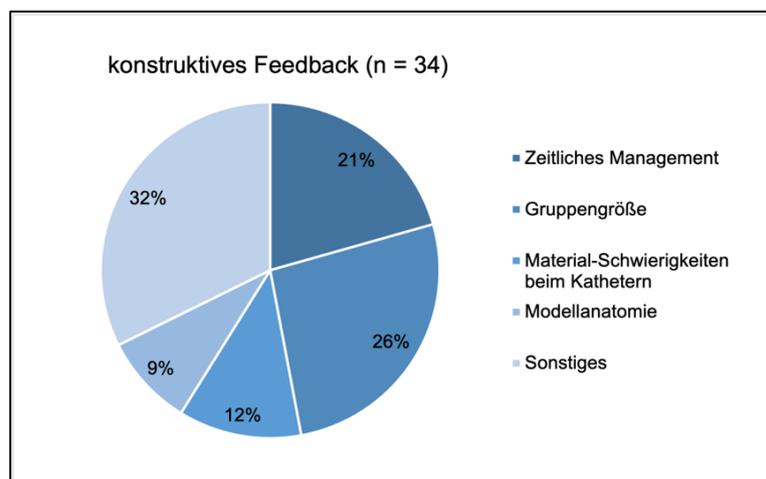


Abbildung 57: Verbesserungsvorschläge der Kurse A1 – C1

Die Abbildung zeigt die Antworten der Teilnehmenden zur Frage, was ihnen an dem Kurs und den Modellen weniger gut gefallen hat und was verbessert werden könnte.

Im Bereich der konstruktiven Kritik wurde am häufigsten die Gruppengröße der Kurse erwähnt (n = 9, 26%). Dabei wurde sich für zukünftige Kurse eine kleinere Teilnehmerzahl gewünscht. Außerdem wurde das zeitliche Management angesprochen (n = 7, 21%), wobei sich zum einen mehr Zeit für die Übung am Modell gewünscht wurde (n = 2) und zum anderen ein besseres Verhältnis von Pause zu Übungen bzw. eine reduzierte Übungsmenge (n = 3).

4. Diskussion

Angeborene Herzfehler sind die häufigsten angeborenen Fehlbildungen (2). Werden diese Herzfehler nicht angemessen behandelt kann es zu irreversiblen Veränderungen kommen, die zu einer lebenslangen Beeinträchtigung führen können (13). Der Behandlung dieser Anomalien kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Die einfachen AHF werden zunehmend interventionell behandelt.

Die Anatomie der AHF ist sehr anspruchsvoll und individuell. Je nach Anomalie und Zeitpunkt der Diagnose variiert zudem das Alter der Patient*innen und damit die Größenverhältnisse des Herzens. Für eine Behandlung im Herzkatheter ist daher die genaue Kenntnis der anatomischen Gegebenheiten essenziell. Der interventionelle Eingriff im Herzkatheterlabor erfordert außerdem sehr gute praktische Fähigkeiten im Umgang mit den Geräten und Materialien.

Die Ausbildung der Kinderkardiolog*innen im Herzkatheterlabor erfolgt klassischerweise direkt am Patienten. Angehende Kinderkardiolog*innen beobachten, assistieren und führen anschließend Teile der Untersuchung unter Anleitung selbst durch. In anderen Bereichen der Medizin, wie beispielsweise der minimalinvasiven, endoskopischen Chirurgie (57) oder der Erwachsenenkardiologie (58) werden bereits Simulationsmodelle genutzt, um praktische Fähigkeiten vor dem Eingriff am Patienten zu erlernen.

Bisher gibt es keine vergleichbaren Simulationsmodelle zum Erlernen einer Herzkatheteruntersuchung und der Behandlung von AHF. Daher sollte untersucht werden, wie die Teilnehmenden das Hands-on Training, die Modelle und den sich daraus ergebenden Nutzen evaluieren.

4.1 Diskussion über Modelle allgemein

Simulationen können anhand ihrer Komplexität unterschieden werden in ‚Low-Fidelity‘- und ‚High-Fidelity‘-Simulationen. Low-Fidelity-Simulationen sind Modelle mit einem geringen Maß an Details und Zusatzfunktionen. Solche Modelle können kostengünstige Variationen eines Simulators sein, an denen einzelne praktische Fähigkeiten erlernt werden können und somit bereits für Studierende im Ausbildungsprozess zur Verfügung stehen. Dadurch ermöglicht die Low-Fidelity-Simulation ein effektives Training spezifischer Aufgaben und eine vermehrte Evaluation und Bewertung des Trainingseffekts und ist im Bereich der Luftfahrt bereits etabliert (59).

High-Fidelity-Simulationen sind Übungen an Modellen mit einem hohen Maß an Genauigkeit und Realitätsnähe. Sie werden vor allem in der Anästhesie und der Notfallmedizin eingesetzt. Sie ermöglichen eine standardisierte Ausbildung ohne das Risiko jemandem zu schaden, fördern die Zusammenarbeit im Team und haben das Potential, Lerninhalte schneller und effektiver in individueller Geschwindigkeit zu vermitteln (60). Diese komplexen Simulationen sind den Low-Fidelity-Modellen nicht immer überlegen, was den Erwerb praktischer Fähigkeiten angeht, und bergen dadurch die Gefahr der Selbstüberschätzung bei der Übertragung auf reale Situationen (61).

Die 3D-gedruckten Herzmodelle und das Hands-on Training könnten aufgrund der wenigen Zusatzfunktionen als Low-Fidelity-Modell eingestuft werden. Neben dem Nutzen der Modelle als visuelle Stütze ist eine Übung einzelner praktischer Schritte der interventionellen Versorgung von angeborenen Herzfehlern sehr gut möglich. Einer der Vorteile einer Low-Fidelity-Simulation am Modell ist, dass sich die Teilnehmenden zunächst auf die zu erlernende praktische Aufgabe fokussieren können, ohne Ablenkung durch komplizierte Handlungsabläufe. Damit eignen sich solche Modelle besonders für Berufseinsteiger (100% Zustimmung) und unerfahrene Ärzt*innen im Herzkatheterlabor, bei denen es darum geht die Grundlagen einer Intervention zu erlernen. Aufgrund der besonderen haptischen Realitätsnähe und der normalen realistischen Darstellung durch die 3D-Modelle könnten sie auch als High-Fidelity-Modelle diskutiert werden.

4.1.1 Diskussion über Modelle außerhalb der Medizin

Außerhalb der Medizin haben sich Modelle und das damit verbundene Simulationstraining in risikoreichen Berufen bereits seit langem bewährt. Im Bereich der Luft- und Raumfahrt ist das Erlernen von komplexen Handlungsabläufen anhand eines Simulationstrainings standardisierter Bestandteil der Ausbildung und wird weltweit eingesetzt (59). Die praktische Übung im Setting einer Simulation kombiniert mit Echtzeittraining im Flugzeug, ist dabei effektiver als ein alleiniges Flugtraining (39).

4.1.2 Diskussion über Modelle in der Medizin

Im Bereich der Notfallmedizin zeigt sich besonders der Vorteil von simulationsbasiertem Training und Wiederholungen in regelmäßigen Intervallen, da sowohl unerfahrene als auch erfahrene Ärzt*innen darauf angewiesen sind, ihre

Kenntnisse und praktischen Fähigkeiten aufzufrischen (62). Das Trainieren von praktischen Fähigkeiten anhand von Modellen und Simulationen ist daher auch in bestimmten Bereichen der Medizin bereits etabliert. Simulationsbasiertes Training bietet dabei die Vorteile in einer risikoarmen Umgebung und mit realitätsgetreuem Equipment, zu lernen und zu wiederholen (63). Die Evaluation des Hands-on Trainings zeigte, dass eine selbstständige Übung und Wiederholung möglich ist und von den Teilnehmenden auch in Zukunft weiterhin erwünscht ist.

Seit der Einführung der neuen Approbationsordnung 2002 steht der praktischen Ausbildung im Studium eine zentrale Rolle zu (64). Im Bereich der Chirurgie gibt es bereits konkrete Ansätze, mehr praktische Übungen in die Ausbildung der Studierenden zu integrieren (65). Auch in der Inneren Medizin hat sich die Einführung von Skills-Labs als effektive und akzeptierte Methode erwiesen (66). Hermann-Werner et al. konnten in ihrer Studie zeigen, dass praktische Fähigkeiten wie das Legen einer Magensonde und einer Venenverweilkanüle im Skills-Lab effektiver und nachhaltiger trainiert werden konnten als mit der Methode ‚see one, do one, teach one‘ (67). Die Ergebnisse unserer Studie konnten die Akzeptanz der Teilnehmenden gegenüber dieser Ausbildungsform bestätigen. 54,2% der Teilnehmenden gaben an, dass ihnen Modelle in anderen Fachbereichen bereits geholfen haben. Zudem stimmten alle Teilnehmenden (100%) zu, dass sie Übungen am Modell grundsätzlich hilfreich finden. Die Auswertung des Kurses B1 zeigte, dass das Hands-on Training eine sinnvolle Ergänzung zur praktischen Ausbildung darstellen könnte. Grundsätzlich hielten alle Teilnehmenden Übungen am Modell für hilfreich (45% ‚trifft voll zu‘, 55% ‚trifft teils zu‘), das Hands-on Training speziell wurde von allen Teilnehmenden als sehr hilfreich erachtet (100% ‚trifft voll zu‘) und hätte darüber hinaus das Potenzial für mehr Sicherheit bei der Intervention am Patienten zu sorgen (70% ‚trifft voll zu‘, 30% ‚trifft teils zu‘).

3D-Modelle dienen nicht nur praktischen Ausbildungszwecken, sondern unterstützen in vielen Fällen auch die Kommunikation von Ärzt*innen und Patient*innen, was unter anderem auch für eine individuelle Planung von Vorteil ist (51, 53, 68-70). Außerdem ergibt sich damit die Möglichkeit, das Maß an Selbstbewusstsein und schlussendlich auch die Patientensicherheit zu fördern (71).

Der 3D-Druck bietet zudem eine kostengünstigere Alternative mit dem Vorteil, dass die Modelle nach eigenem Bedarf gedruckt und angepasst werden können (72). Die Modelle können außerdem aus einer einzigen computertomografischen Datei

hergestellt und angepasst werden, sowohl hinsichtlich der anatomischen Strukturen als auch der Größenskalierung (73).

4.2 Bedeutung für die Kinderkardiologie

Aufgrund des verstärkten Fokus auf die Patientensicherheit gewinnt Simulation Based Medical Education (SBME) immer mehr an Bedeutung, ohne dabei den Stellenwert klinischer Erfahrungen zu mindern (74). Simulationen und klinische Arbeit können sich dabei synergistisch ergänzen; außerdem ist zu Beginn ein häufigeres Training notwendig als zur Aufrechterhaltung der praktischen Fähigkeiten (75). Auch in der Pädiatrie hat sich das simulationsbasierte Training bewiesen, um prozedurale Fähigkeiten vor allem im Bereich des Trauma- und Reanimationsmanagements zu festigen (76).

Die interventionelle Versorgung von Herzfehlern in der Kinderkardiologie ist ein Bereich der Medizin, in dem ein hohes Maß an Expertise erforderlich ist. Die medizinische Ausbildung in der interventionellen Kardiologie beinhaltet sowohl die Kenntnis und Handhabung der Materialien, die Grundlagen der Angiographie als auch die Reaktion auf mögliche Komplikationen und die Anpassung an veränderte Hämodynamik und ist damit sehr anspruchsvoll (10). Ein Hands-on-Training scheint dafür geeignet, die Funktionen verschiedener Katheter zu testen und die Steuerung der Katheter in einem risikoarmen Setting zu erlernen. Alle Teilnehmenden gaben an, dass das Hands-on Training gut geeignet ist, um den Umgang mit den Katheterinstrumenten zu erlernen (100%, A1 - B5).

Die Empfehlung der Association for European Paediatric and Congenital Cardiology (AEPC) zum Trainingsprogramm für interventionelle Kinderkardiologen beinhaltet drei Level, denen bestimmte theoretische und praktische Fähigkeiten zugeordnet sind (12). Bisher findet die praktische Ausbildung im Herzkatheterlabor im klassischen Modell direkt am Patienten statt. Mithilfe eines Hands-on-Trainings an 3D-gedruckten Herzmodellen könnten einzelne Bestandteile des Level I und II des empfohlenen Trainingsplans für interventionelle Kinderkardiologen in einem risikoarmen Setting beliebig oft wiederholt und trainiert werden. Als Lehr- und Simulationsmodell sind die 3D-gedruckten Herzmodelle von den Teilnehmenden aller Erfahrungsstufen positiv evaluiert worden, wodurch die Akzeptanz und Nachfrage nach solchen Modellen bestätigt wird. Die Zustimmung durch sowohl die unerfahrenen ‚Lernenden‘ und der erfahrenen ‚Lehrenden‘ zeigt das Potential dieser Ausbildungsform für die zukünftige

Weiterbildung von interventionellen Kinderkardiolog*innen. Zudem bestätigte die Auswertung des Kurses B1, dass es möglich ist, auch vollständig unerfahrenen Studierenden und Assistenzärzt*innen die Grundlagen der Intervention und die Handhabung der Katheterinstrumente im Rahmen eines Hands-on Trainings am Modell beizubringen.

Grundlegend für die Diagnostik und Intervention ist das Verständnis für die anatomischen Gegebenheiten des gesunden Herzens und des Herzens mit angeborenen Herzfehlern. Die 3D-gedruckten Herzmodelle aus Silikongummi visualisieren die Anatomie durch die Größenskalierung realitätsgetreu. Dass die Modelle realitätsnah sind (96% Zustimmung) und dazu beitragen die Anatomie zu verstehen (81% Zustimmung) hat sich in den Kursen B1 - B5 bestätigt. In den Zusatzfragen der Kurse B2 – B5 zeigte sich zudem, dass die Modelle alle wichtigen anatomischen Strukturen aufweisen und realistische Proportionen besitzen (100% Zustimmung). 3D-gedruckte Herzmodelle zur Darstellung von angeborenen Herzfehlern tragen signifikant dazu bei, eine umfassende Vorstellung und ein Verständnis der anatomischen Gegebenheiten zu fördern (77).

Ein weiterer Vorteil des Trainings am 3D-gedruckten Herzmodell ist die Möglichkeit, selbstständig üben und wiederholen zu können. Es muss jedoch auch beachtet werden, dass der Eigenschutz, besonders im Hinblick auf Strahlenschutz, beachtet wird. Studien hierzu konnten zeigen, dass die Strahlenbelastung für Patient*innen und Ärzt*innen durch das Training deutlich verkürzt werden konnte (78-80).

4.3 Diskussion der Methodik

Die Evaluation der einzelnen Modelle erfolgte anhand eines Fragebogens. Diese Art der Evaluation wird auch in ähnlichen Studien verwendet (77). Die abgegebenen Bewertungen entsprechen dabei der subjektiven Einschätzung der Teilnehmenden in Bezug auf das Ausbildungsformat.

Die Akzeptanz des Hands-on Trainings als Lehrform und die Eignung der Modelle als Lehr- und Simulationsmodell konnten anhand der 5-stufigen Likert-Skala eingeschätzt werden. Durch die Auswertung der Freitextkommentare konnten die Modelle und der Kursablauf zudem stetig weiterentwickelt und optimiert werden.

Der Fragebogen wurde in Papierform ausgeteilt, wodurch die Rücklaufquote 100% betraf. Es haben also alle Teilnehmenden den Fragebogen freiwillig ausgefüllt. Lediglich bei Kurs A1 wurde der Fragebogen erst im Nachhinein per E-Mail verschickt.

Der Effekt des zeitlichen Abstands zum Trainingskurs muss bei den Ergebnissen dieser Evaluation beachtet werden.

Der Fragebogen des Kurses B1 wurde speziell für die Kursgruppe mit unerfahrenen Studierenden und Ärzt*innen entwickelt. Die Fragenstellung, im Sinne einer Erwartung vor dem Kurs und einer Selbsteinschätzung nach dem Kurs, war bedingt sinnvoll. Zum einen war es interessant zu sehen, welche Erwartungshaltung die Teilnehmenden an den Kurs richten. Andererseits wäre eine identische Fragenstellung vor und nach dem Kurs von Vorteil gewesen, um einen möglichen signifikanten Unterschied in den Bewertungen, und damit einen Fortschritt der selbsteingeschätzten Fähigkeiten, statistisch nachweisen zu können.

Für den Kurs C1 wurde der Fragebogen anhand der Erfahrungswerte der vorherigen Kursevaluationen vollständig überarbeitet. Die Teilnehmenden der Kurse haben oft unterschiedliche Erfahrungsstufen. Daher ist der Fragebogen sowohl für unerfahrene als auch erfahrenere Teilnehmende geeignet und ermöglicht so eine einheitliche Auswertung der zukünftigen Kurse.

Um eine umfassende Bewertung über den Nutzen der 3D-gedruckten Herzmodelle und des Hands-on Kurses abgeben zu können, wäre ein direkter Vergleich mit einer Kontrollgruppe denkbar, wie es Sudikoff et. al für ihr Simulationstraining zur Atemwegssicherung beschreiben (81). Zur Beurteilung eines nachhaltigen Effekts des Trainingskurses ist zudem eine longitudinale Datenerhebung erforderlich.

4.4 Studienlimitationen

Aufgrund des starren 3D-Modells und der fehlenden Füllung ist eine reale Simulation der Hämodynamik nicht gegeben. Druckmessungen können an den 3D-Modellen daher nicht beigebracht werden. Die Angiographie der Gefäße kann ebenfalls nicht simuliert werden, ist für die Ausführung der Übung am Modell aus Silikon allerdings auch nicht notwendig, da die Konturen der Modelle und die Katheterinstrumente in der Durchleuchtung gut zu erkennen sind.

Ein weiterer limitierender Faktor bei der Durchführung des Hands-on Trainings war die verfügbare Zeit. Die einzelnen Übungen konnten im Durchschnitt weniger als fünfmal durchgeführt werden. Die Auswertung der Freitextkommentare lässt auf mögliche Gründe schließen. Die Teilnehmenden kritisierten vor allem die zu große Teilnehmerzahl und zu viel Lehrmaterial pro Kurs. Für weitere Kurse ist es daher

sinnvoll die Gruppengröße zu begrenzen und den Kurs auf mehrere Tage aufzuteilen, sodass die Übungen mehrfach unter Anleitung durchgeführt werden können.

Eine Evaluation der einzelnen Modelle war nicht möglich, da der Fragebogen sich stets auf alle Modelle bezog. Zur spezifischen Optimierung der einzelnen Modelle wäre eine detailliertere Evaluation sinnvoll.

4.5 Exkurs Äthiopien

Die Tatsache, dass in Afrika die Prävalenz von angeborenen Herzfehlern sehr niedrig ist (0,23%) lässt sich am ehestens durch die geringere Möglichkeit der Diagnostik und fehlende Dokumentation begründen, wohingegen in Asien die Prävalenz mit 0,93% eher hoch ist und unter anderem auf den steigenden sozioökonomischen Status und immer besseren Zugang zu medizinischen Behandlungen zurückzuführen ist (5).

Um einen nachhaltigen Effekt in der medizinischen Entwicklung von Ländern mit niedrigem sozioökonomischem Status zu erreichen ist sowohl medizinisches Equipment als auch medizinische Ausbildung und Schulung erforderlich. Am Beispiel der Stadt Mekelle in Äthiopien kann man erkennen, dass ein modernes Herzkatheterlabor allein nicht ausreicht. Es bedarf der regelmäßigen Schulung und Weiterbildung der Ärzt*innen vor Ort, um eine angemessene Versorgung der Bevölkerung zu erreichen. Die Ergebnisse der Hands-on Kurse in Mekelle zeigen eine weitreichende Akzeptanz und Zufriedenheit der äthiopischen Ärzte mit dieser Art der Fortbildung. Alle Teilnehmenden wünschten sich in Zukunft mehr solcher Kurse. Die Auswertung des Kurses A1, bei dem die Modelle der 2. Generation eingesetzt wurde, zeigt im Besonderen, dass auch einfache Modelle in Kombination mit einer Low-Fidelity-Simulation Potential haben können.

4.6 Schlussfolgerung

Insgesamt zeigt sich die Akzeptanz der Teilnehmenden aus allen Erfahrungsstufen gegenüber dieser Form der praktischen Ausbildung. Die Auswertung der Evaluation bestätigt, dass eine Low-Fidelity-Simulation am 3D-gedruckten Herzmodell bereits eine sinnvolle Ergänzung zum klassischen Weiterbildungsprogramm sein kann und den Lernprozess unterstützen und erleichtern kann. Es bietet einen geeigneten Raum, sich ohne das Risiko von negativen Konsequenzen mit den Instrumenten vertraut zu machen. Zudem können die 3D-gedruckten Herzmodelle die Visualisierung

anatomischer Verhältnisse von AHF fördern und die Kommunikation zwischen Ärzt*innen und Patient*innen erleichtern (82). Das Hands-on Training könnte als Ergänzung des Ausbildungsprogramms die Kommunikation im Team fördern, ein Aufrechterhalten der praktischen Fähigkeiten ermöglichen und schlussendlich die Patientensicherheit erhöhen.

Außerdem könnten die Modelle im Rahmen von Hands-on Trainingsprogrammen den Fortschritt medizinischer Versorgung in Entwicklungsländern unterstützen. Zukünftig könnten diese Modelle im Sinne einer High-Fidelity-Simulation weiterentwickelt werden. Durch eine Flüssigkeitsfüllung und Abdichtung der Hohlräume könnte eine Druckmessung ermöglicht werden. Bei Regulierung des Drucks könnten zudem Komplikationen und das entsprechende Vorgehen in solchen Situationen simuliert werden.

Ein weiteres mögliches Einsatzgebiet wäre der Nutzen der 3D-Modelle zum Testen von Katheterinstrumenten. Besonders im Bereich der Kinderkardiologie gibt es kaum geeignete Instrumente, die speziell an die Anforderungen der Behandlung von AHF angepasst sind. Eine häufige Komplikation der Katheterintervention ist die Embolisation. Die zur Bergung verwendeten Instrumente sind häufig nicht für diesen Zweck erprobt worden (83). Auch in anderen interventionellen Bereichen wie der Neuroradiologie werden Instrumente zur Bergung benötigt (84). Zur Standardisierung des Vorgehens bei dieser Komplikation können 3D-gedruckte Herzmodelle als Testobjekte dienen.

Die Entwicklung der 3D-gedruckten Herzmodelle und die Durchführung des parallel dazu entwickelten Hands-on Trainings erfolgte in Zusammenarbeit mit Barbara S. Brunner. Eine zusammenfassende Bewertung konnten wir im April 2022 bereits erfolgreich im Journal for Medical Education publizieren (54).

Literaturverzeichnis

1. Mitchell S, Korones S, Berendes H. Congenital heart disease in 56,109 births incidence and natural history. *Circulation*. 1971;43(3):323-32.
2. Dolk H, Loane M, Garne E. The prevalence of congenital anomalies in Europe. *Adv Exp Med Biol*. 2010;686:349-64.
3. EUROCAT. Prevalence charts and tables 2018 [Available from: [https://eu-rd-platform.jrc.ec.europa.eu/eurocat/eurocat-data/prevalence_en?%0-0\\$1-\\$-1-39,29,2,90,21,3,60,88,81,66,5,34,33,49,10,79,18,104,8,23,13,59,67,28,30,93,86,20,62,72,73,84,68,57,70,95%\\$Cprevalence_table\\$X0_-1-a\\$X0_9-pre](https://eu-rd-platform.jrc.ec.europa.eu/eurocat/eurocat-data/prevalence_en?%0-0$1-$-1-39,29,2,90,21,3,60,88,81,66,5,34,33,49,10,79,18,104,8,23,13,59,67,28,30,93,86,20,62,72,73,84,68,57,70,95%$Cprevalence_table$X0_-1-a$X0_9-pre)].
4. van der Linde D, Konings EE, Slager MA, Witsenburg M, Helbing WA, Takkenberg JJ, et al. Birth prevalence of congenital heart disease worldwide: a systematic review and meta-analysis. *J Am Coll Cardiol*. 2011;58(21):2241-7.
5. Liu Y, Chen S, Zühlke L, Black GC, Choy MK, Li N, et al. Global birth prevalence of congenital heart defects 1970-2017: updated systematic review and meta-analysis of 260 studies. *Int J Epidemiol*. 2019;48(2):455-63.
6. Lindinger A, Schwedler G, Hense H-W. Prevalence of congenital heart defects in newborns in Germany: Results of the first registration year of the PAN Study (July 2006 to June 2007). *Klinische Pädiatrie*. 2010;222(05):321-6.
7. Meghan S Zimmerman* AGCS, Craig A Sable,, Michelle Marie Echko LBW, Helen Elizabeth Olsen,, Hagos Tasew Atalay AA, Zulfiqar A Bhutta,, Jackie LeeAnne Boucher FC, Paolo Angelo Cortesi,, Manisha Dubey FF, Samer Hamidi, Simon I Hay,, Chi Linh Hoang CTH-H, Kathy J Jenkins,, et al. Global, regional, and national burden of congenital heart disease, 1990-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet Child Adolesc Health*. 2020;4(3):185-200.
8. Kim SH. Recent advances in pediatric interventional cardiology. *Korean J Pediatr*. 2017;60(8):237-44.
9. Kang SL, Benson L. Recent advances in cardiac catheterization for congenital heart disease. *F1000Res*. 2018;7:370.
10. Witsenburg M, Qureshi S, Carminati M, Gewillig M, Brzezinska-Rajszyz G, Szatmari A. Recommendations from the Association for European Paediatric Cardiology for training in diagnostic and interventional cardiac catheterisation. *Cardiology in the Young*. 2010;20(4):470-2.
11. Sheikh N. Pediatric Catheterization Protocol. *Mymensingh medical journal: MMJ*. 2015;24(3):638-48.
12. Butera G, Morgan GJ, Ovaert C, Anjos R, Spadoni I. Recommendations from the Association of European Paediatric Cardiology for training in diagnostic and interventional cardiac catheterisation. *Cardiology in the Young*. 2015;25(3):438-46.
13. Basit H, Wallen TJ, Sergent BN. Eisenmenger Syndrome: StatPearls Publishing, Treasure Island (FL); 2020 2020.
14. Vogel M, Berger F, Kramer A, Alexi-Meshkishvili V, Lange P. Incidence of secondary pulmonary hypertension in adults with atrial septal or sinus venosus defects. *Heart*. 1999;82(1):30-3.
15. Forlemu AN, Ajmal M, Saririan M. Atrial septal defect with Eisenmenger syndrome: a rare presentation. *Case reports in cardiology*. 2020;2020.
16. Rao PS. Consensus on timing of intervention for common congenital heart diseases: part I-cyanotic heart defects. *The Indian Journal of Pediatrics*. 2013;80(1):32-8.
17. Maresky H, Oikonomou A, Ali I, Ditkofsky N, Pakkal M, Ballyk B. Virtual reality and cardiac anatomy: Exploring immersive three-dimensional cardiac imaging, a pilot study in undergraduate medical anatomy education. *Clinical Anatomy*. 2019;32(2):238-43.
18. Interessengemeinschaft Das herzkrankte Kind e. V. I. Angeborene Herzfehler - Ein Begleitbuch für Patienten und Eltern. Mai 2019;2. Auflage.
19. Brida M, Gatzoulis MA. Pulmonary arterial hypertension in adult congenital heart disease. *Heart*. 2018;104(19):1568-74.

20. Franklin RC, Béland MJ, Colan SD, Walters HL, Aiello VD, Anderson RH, et al. Nomenclature for congenital and paediatric cardiac disease: the International Paediatric and Congenital Cardiac Code (IPCCC) and the Eleventh Iteration of the International Classification of Diseases (ICD-11). *Cardiology in the Young*. 2017;27(10):1872-938.
21. Lock J, Block P, McKay R, Baim D, Keane J. Transcatheter closure of ventricular septal defects. *Circulation*. 1988;78(2):361-8.
22. Carminati M, Butera G, Chessa M, De Giovanni J, Fisher G, Gewillig M, et al. Transcatheter closure of congenital ventricular septal defects: results of the European Registry. *European heart journal*. 2007;28(19):2361-8.
23. Haas NA, Kock L, Bertram H, Boekenkamp R, De Wolf D, Ditkivskyy I, et al. Interventional VSD-closure with the Nit-Occlud® Lê VSD-Coil in 110 patients: early and midterm results of the EUREVECO-registry. *Pediatric cardiology*. 2017;38(2):215-27.
24. Gorenflo M, Schirmer, K.R., Dewald, O. . Der isolierte Ventrikelseptumdefekt. DGPK 2019.
25. Morray BH. Ventricular Septal Defect Closure Techniques, Devices, and Outcomes. *Congenital Heart Disease Intervention, An Issue of Interventional Cardiology Clinics*, Ebook. 2018;8(1):1.
26. Christian Jux MV, Jens Scheewe, Jochen Weil Vorhofseptumdefekt DGPK. 2019.
27. Buijtendijk MFJ, Barnett P, van den Hoff MJB. Development of the human heart. *Am J Med Genet C Semin Med Genet*. 2020;184(1):7-22.
28. Celermajer DS. Atrial septal defects: even simple congenital heart diseases can be complicated. *European heart journal*. 2018.
29. Rao PS, Harris AD. Recent advances in managing septal defects: atrial septal defects. *F1000Research*. 2017;6.
30. Behjati-Ardakani M, Golshan M, Akhavan-Karbasi S, Hosseini S-M, Behjati-Ardakani M-A, Sarebanhassanabadi M. The clinical course of patients with atrial septal defects. *Iranian journal of pediatrics*. 2016;26(4).
31. Angelika Lindinger RK-F, Oliver Dewald Persistierender Ductus arteriosus DGPK. 2020.
32. Kan JS, White Jr RI, Mitchell SE, Gardner TJ. Percutaneous balloon valvuloplasty: a new method for treating congenital pulmonary-valve stenosis. *New England Journal of Medicine*. 1982;307(9):540-2.
33. Cuypers JAAE, Witsenburg M, van der Linde D, Roos-Hesselink JW. Pulmonary stenosis: update on diagnosis and therapeutic options. *Heart*. 2013;99(5):339-47.
34. Michel-Behnke I, Murin P, Sarikouch S. S2k-Leitlinie Pädiatrische Kardiologie: Kongenitale Aortenklappenstenose. Düsseldorf: dgpk; 2020.
35. Singer MI. Transluminal aortic balloon angioplasty for coarctation of the aorta in the newborn. *Am Heart J*. 1982;103:131-2.
36. Yang L, Chua X, Rajgor DD, Tai BC, Quek SC. A systematic review and meta-analysis of outcomes of transcatheter stent implantation for the primary treatment of native coarctation. *International journal of cardiology*. 2016;223:1025-34.
37. Burkhard-Meier C, Deutsch H, Hartmann I, Höpp H, Erdmann E. Die Behandlung der Aortenisthmusstenose beim Erwachsenen mit Ballondilatation und Stent-Implantation. *DMW-Deutsche Medizinische Wochenschrift*. 1998;123(12):361-5.
38. Nikolaus A. Haas CR, Rainer KozlikFeldmann, Robert Cesnjevar Aortenisthmusstenose DGPK. 2018.
39. Hays RT, Jacobs JW, Prince C, Salas E. Flight simulator training effectiveness: A meta-analysis. *Military psychology*. 1992;4(2):63-74.
40. Bintley HL, Bell A, Ashworth R. Remember to breathe: teaching respiratory physiology in a clinical context using simulation. *Adv Physiol Educ*. 2019;43(1):76-81.
41. Fichtner A. Lernen für die Praxis: Das Skills-Lab. *Simulation in der Medizin*: Springer; 2013. p. 105-14.

42. Ortmann M, Pflimlin E, Beilenhoff U. Einfach und effizient: Training von endoskopischen Techniken an selbstgebauten Dummies. *Endo-Praxis*. 2012;28(04):151-6.
43. Larsen CR, Oestergaard J, Ottesen BS, Soerensen JL. The efficacy of virtual reality simulation training in laparoscopy: a systematic review of randomized trials. *Acta obstetrica et gynecologica Scandinavica*. 2012;91(9):1015-28.
44. Wayne DB, Butter J, Siddall VJ, Fudala MJ, Linqvist LA, Feinglass J, et al. Simulation-based training of internal medicine residents in advanced cardiac life support protocols: a randomized trial. *Teaching and learning in medicine*. 2005;17(3):202-8.
45. Kuhnigk H, Kuhnigk R, Sefrin P, Roewer N. „Full-Scale“-Simulation in der präklinischen Notfallmedizin-Konzeption des Würzburger Anästhesie- und Notfallsimulators. *Der Notarzt*. 1999;15(06):129-33.
46. Noecker AM, Chen J-F, Zhou Q, White RD, Kopcak MW, Arruda MJ, et al. Development of patient-specific three-dimensional pediatric cardiac models. *Asaio Journal*. 2006;52(3):349-53.
47. Ganguli A, Pagan-Diaz GJ, Grant L, Cvetkovic C, Bramlet M, Vozenilek J, et al. 3D printing for preoperative planning and surgical training: a review. *Biomedical microdevices*. 2018;20(3):1-24.
48. Randazzo M, Pisapia JM, Singh N, Thawani JP. 3D printing in neurosurgery: a systematic review. *Surgical Neurology International*. 2016;7(Suppl 33):S801.
49. Anwar S, Singh GK, Miller J, Sharma M, Manning P, Billadello JJ, et al. 3D Printing is a Transformative Technology in Congenital Heart Disease. *JACC Basic Transl Sci*. 2018;3(2):294-312.
50. Lazkani M, Bashir F, Brady K, Pophal S, Morris M, Pershad A. Postinfarct VSD management using 3D computer printing assisted percutaneous closure. *Indian heart journal*. 2015;67(6):581-5.
51. Biglino G, Capelli C, Leaver L-K, Schievano S, Taylor AM, Wray J. Involving patients, families and medical staff in the evaluation of 3D printing models of congenital heart disease. *Communication & medicine*. 2016;12(2-3):157-69.
52. Biglino G, Capelli C, Wray J, Schievano S, Leaver L-K, Khambadkone S, et al. 3D-manufactured patient-specific models of congenital heart defects for communication in clinical practice: feasibility and acceptability. *BMJ open*. 2015;5(4):e007165.
53. Batteux C, Haidar MA, Bonnet D. 3D-printed models for surgical planning in complex congenital heart diseases: a systematic review. *Frontiers in pediatrics*. 2019;7:23.
54. Brunner BS TA, Jakob A, Tengler A, Grab M, Thierfelder N, Leuner CJ, Haas NA, Hopfner C. 3D-printed heart models for hands-on training in pediatric cardiology – the future of modern learning and teaching? *GMS J Med Educ*. 2022;39(2):Doc23.
55. Keyence. https://www.keyence.de/products/3d-printers/3d-printers/agilista-3100/models/agilista-3200w/?search_sl=1.
56. Keyence. <https://www.keyence.de/ss/products/3d-printer/agilista/3dprinter/principle/>.
57. Goodman AJ, Melson J, Aslanian HR, Bhutani MS, Krishnan K, Lichtenstein DR, et al. Endoscopic simulators. *Gastrointestinal endoscopy*. 2019;90(1):1-12.
58. Schmauss D, Schmitz C, Bigdeli AK, Weber S, Gerber N, Beiras-Fernandez A, et al. Three-dimensional printing of models for preoperative planning and simulation of transcatheter valve replacement. *The Annals of thoracic surgery*. 2012;93(2):e31-e3.
59. Allerton D. The impact of flight simulation in aerospace. *The Aeronautical Journal*. 2010;114(1162):747-56.
60. Fritz PZ, Gray T, Flanagan B. Review of mannequin-based high-fidelity simulation in emergency medicine. *Emergency Medicine Australasia*. 2008;20(1):1-9.
61. Massoth C, Röder H, Ohlenburg H, Hessler M, Zarbock A, Pöpping DM, et al. High-fidelity is not superior to low-fidelity simulation but leads to overconfidence in medical students. *BMC medical education*. 2019;19(1):1-8.
62. Greif R, Lockey AS, Conaghan P, Lippert A, De Vries W, Monsieurs KG. Ausbildung und Implementierung der Reanimation. *Notfall + Rettungsmedizin*. 2015;18(8):1016-34.
63. Maran NJ, Glavin RJ. Low-to high-fidelity simulation—a continuum of medical education? *Medical education*. 2003;37:22-8.

-
64. Approbationsordnung für Ärzte BdVv. Bonn: Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH, Drucksache 316/02., 2002.
65. Rüsseler M, Weber R, Braunbeck A, Flaig W, Marzi I, Walcher F. Training praktischer Fertigkeiten in der Chirurgie—Ein Ausbildungskonzept für Studierende. *Zentralblatt für Chirurgie*. 2010;135(03):249-56.
66. Nikendei C, Schilling T, Nawroth P, Hensel M, Ho A, Schwenger V, et al. Integrated skills laboratory concept for undergraduate training in internal medicine. *Deutsche medizinische Wochenschrift (1946)*. 2005;130(18):1133-8.
67. Herrmann-Werner A, Nikendei C, Keifenheim K, Bosse HM, Lund F, Wagner R, et al. “Best practice” skills lab training vs. a “see one, do one” approach in undergraduate medical education: an RCT on students’ long-term ability to perform procedural clinical skills. *PLoS one*. 2013;8(9):e76354.
68. Kiraly L, Tofeig M, Jha NK, Talo H. Three-dimensional printed prototypes refine the anatomy of post-modified Norwood-1 complex aortic arch obstruction and allow presurgical simulation of the repair. *Interactive cardiovascular and thoracic surgery*. 2016;22(2):238-40.
69. Hussein N, Honjo O, Barron DJ, Haller C, Coles JG, Yoo S-J. The incorporation of hands-on surgical training in a congenital heart surgery training curriculum. *The Annals of Thoracic Surgery*. 2020.
70. Yoo S-J, Spray T, Austin III EH, Yun T-J, van Arsdell GS. Hands-on surgical training of congenital heart surgery using 3-dimensional print models. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*. 2017;153(6):1530-40.
71. Al-Elq AH. Simulation-based medical teaching and learning. *Journal of family and Community Medicine*. 2010;17(1):35.
72. Nguyen D, Appelbaum J, Ali F, Shorofsky S, Dickfeld T, See V, et al. Three-Dimensional Printing in Cardiac Electrophysiology: Current Applications and Future Directions.
73. Hopfner C, Jakob A, Tengler A, Grab M, Thierfelder N, Brunner B, et al. Design and 3D printing of variant pediatric heart models for training based on a single patient scan. *3D printing in medicine*. 2021;7(1):1-11.
74. Lopreiato JO, Sawyer T. Simulation-based medical education in pediatrics. *Academic Pediatrics*. 2015;15(2):134-42.
75. Weinger MB. The pharmacology of simulation: a conceptual framework to inform progress in simulation research. *Simulation in Healthcare*. 2010;5(1):8-15.
76. Ojha R, Liu A, Rai D, Nanan R. Review of simulation in pediatrics: the evolution of a revolution. *Frontiers in pediatrics*. 2015;3:106.
77. Su W, Xiao Y, He S, Huang P, Deng X. Three-dimensional printing models in congenital heart disease education for medical students: a controlled comparative study. *BMC medical education*. 2018;18(1):178.
78. Katz A, Shtub A, Solomonica A, Poliakov A, Roguin A. Simulator training to minimize ionizing radiation exposure in the catheterization laboratory. *The international journal of cardiovascular imaging*. 2017;33(3):303-10.
79. Chambers CE, Awuor S. Reducing radiation dose: Equipment, procedure, and operator Perfecting the Trifecta. *Catheterization and cardiovascular interventions: official journal of the Society for Cardiac Angiography & Interventions*. 2018;92(7):1237-8.
80. Heidbuchel H, Wittkamp FH, Vano E, Ernst S, Schilling R, Picano E, et al. Practical ways to reduce radiation dose for patients and staff during device implantations and electrophysiological procedures. *Europace*. 2014;16(7):946-64.
81. Sudikoff SN, Overly FL, Shapiro MJ. High-fidelity medical simulation as a technique to improve pediatric residents’ emergency airway management and teamwork: a pilot study. *Pediatric emergency care*. 2009;25(10):651-6.
82. Sun Z, Lau I, Wong YH, Yeong CH. Personalized three-dimensional printed models in congenital heart disease. *Journal of Clinical Medicine*. 2019;8(4):522.
83. Haas NA, Happel C, Laser KT. Simple and safe percutaneous retrieval of an embolized coil by using a flexible 3-F microforceps—A technical case report. *International Journal of Cardiology*. 2014;174(1):e7-e10.

84. Kabbani MR, Smith A, Leider M. Endovascular coil retrieval using a TrevoProVue stentriever. *Journal of neurointerventional surgery*. 2015;7(5):e19-e.

5. Anhang A: Zusammenfassung des Fragebogens

Allgemeines:

1. Führen Sie selbstständig Herzkatheteruntersuchungen durch?

regelmäßig, oft unregelmäßig, selten nie

Fragen zu den Modellen

	0-5x	6-10x	11-15x	16-20x	>20x
Wie oft konnten Sie die einzelnen Schritte an den Modellen wiederholen?					

Allgemeine Fragen zu den Modellen:

Bewertung der Modelle	Trifft voll zu	Trifft teils zu	Teils, teils	Trifft weniger zu	Trifft gar nicht zu
Die Modelle sind realitätsnah.					
Die Handhabung der Modelle ist einfach.					

Eignung der Modelle als Lehrmodell:

Die 3D- Modelle eignen sich dazu, ...	Trifft voll zu	Trifft teils zu	Teils, teils	Trifft weniger zu	Trifft gar nicht zu
... das Prozedere der besprochenen Herzkatheterinterventionen zu verstehen.					
... den Umgang mit den Katheterinstrumenten zu erlernen.					
... die Anatomie der Herzfehler besser zu verstehen.					
... selbstständig zu üben und zu wiederholen.					

Eignung der Modelle zum Erlernen der Herzkatheterinterventionsschritte:

Meiner Meinung nach eignet sich das Üben an derartigen Modellen gut, um folgende Schritte zu erlernen:	Trifft voll zu	Trifft teils zu	Teils, teils	Trifft weniger zu	Trifft gar nicht zu
... eine Schleuse und den Führungsdraht einzuführen.					
... den Katheter bzw. Draht zu wechseln.					
... den Katheter durch das Herz zur Stelle der Intervention zu führen.					
... eine Klappen- oder Gefäßstenose durch Ballonkatheter zu dilatieren.					

Bewertung des Simulationstrainings als Lehrform:

	Trifft voll zu	Trifft teils zu	Teils, teils	Trifft weniger zu	Trifft gar nicht zu
Ich halte Übungen am Modell grundsätzlich für hilfreich.					
Ich wünsche mir mehr Möglichkeiten vor der Intervention an Patienten an Modellen üben und wiederholen zu können.					
Modelle in anderen Fachgebieten haben mir bereits geholfen, mehr Sicherheit vor der Intervention am Patienten zu bekommen.					
Ich kann mir vorstellen, durch das Üben am 3D-Herzmodell mehr Sicherheit bei der Intervention am Patienten zu bekommen.					

Zusatzfragen	Trifft voll zu	Trifft teils zu	Teils, teils	Trifft weniger zu	Trifft gar nicht zu
Die Modelle weisen alle wichtigen anatomischen Merkmale des menschlichen Herzens auf.					
Die Proportionen der Modelle sind realistisch.					
Die Verarbeitung der Modelle ist gut.					
Im Nachhinein betrachtet hätte ich in meiner Ausbildungszeit ebenfalls gerne Modelle genutzt, um vor dem Herzkatheter-Eingriff am Patienten die einzelnen Schritte bereits mehrfach durchgeführt zu haben.					
Ich kann mir vorstellen, dass besonders Berufseinsteiger von derartigen Modellen zum Erlernen der Herzkatheter-Technik profitieren.					

Folgendes fand ich gut an den Modellen:

Folgendes könnte an den Modellen verbessert werden:

6. Danksagung

Die vorliegende Promotionsarbeit wurde in der Abteilung für Kinderkardiologie und pädiatrische Intensivmedizin der Ludwig-Maximilians-Universität München unter der Leitung von Prof. Nikolaus Haas gefertigt.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Nikolaus Haas, für die Ermöglichung dieser Dissertation und die außerordentlich gute Betreuung und Anleitung.

Vielen Dank für die einzigartigen Erfahrungen, die ich im Rahmen dieser Arbeit sammeln durfte.

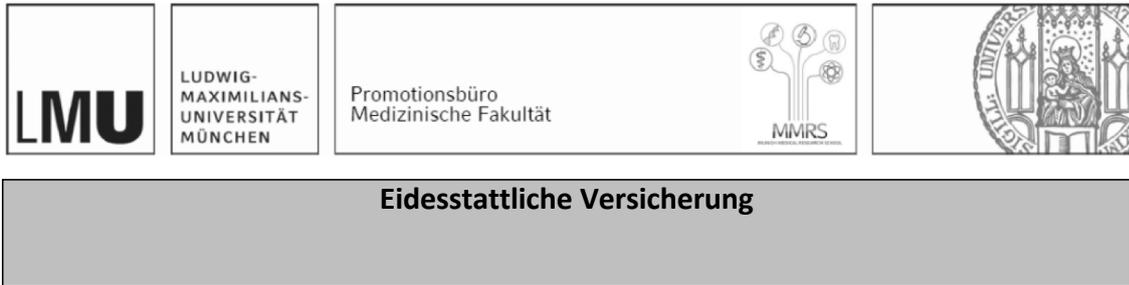
Außerdem danke ich allen, die diese Arbeit mitbetreut und vorangebracht haben, insbesondere Barbara S. Brunner und Carina Hopfner, für die tolle Zusammenarbeit, Unterstützung und die vielen produktiven Gespräche, ohne die diese Dissertation und die gemeinsame Publikation nicht möglich gewesen wären.

In diesem Sinne danke ich auch allen Teilnehmenden dieses Projektes für das Engagement und die wertvolle Evaluation als Kern dieser Dissertation.

Nicht zuletzt möchte ich Christian J. Leuner und dem Verein Ethiopia-Witten danken, für die Unterstützung bei dem Einsatz unserer Modelle während des Exkurses in Äthiopien und die sehr wertvollen Einblicke, die weit über das Medizinische hinaus gingen.

Meiner gesamten Familie, insbesondere meinen Eltern und meinem Verlobten Nabeel, möchte ich danken für die nie endende Geduld, das stundenlange Zuhören und die immerwährenden Ermutigungen während der Arbeit an dieser Dissertation und meines gesamten Studiums.

7. Affidavit



Eidesstattliche Versicherung

Mansour, Alisa

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel:

Evaluation eines Trainings-programms zum Erlernen von Herzkatheterinterventionen basierend auf 3D-gedruckten Herzmodellen

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

München, 20.06.2023

Ort, Datum

Alisa Mansour

Unterschrift Doktorandin

8. Publikationsliste

1. **3D-printed heart models for hands-on training in pediatric cardiology – the future of modern learning and teaching?** Brunner BS, Thierij A, Jakob A, Tengler A, Grab M, Thierfelder N, Leuner CJ, Haas NA, Hopfner C. *GMS J Med Educ.* 2022;39(2): Doc23. DOI: 10.3205/zma001544, URN: urn:nbn:de:0183-zma0015444
2. **Establishment of a 3-D Silicone model to facilitate realistic hands-on training for diagnostic and interventional pediatric cardiac catheterization.** Thierij A., Brunner B., Lehner A., Grab M., Thierfelder N., Fernandez S., Andre J., Haas N.A., 53 Annual Meeting of the Association for European Paediatric and Congenital Cardiology, Seville, Spain, Poster participation, 15.05.2019 – 18.05.2019
3. **Clinical implementation of a model-based training course to reduce the learning curve in interventional therapy of congenital heart defects.** Brunner B, Thierij A, Lehner A, Fernandez S, Jakob A, Leuner C et al. 53 Annual Meeting of the Association for European Paediatric and Congenital Cardiology, Seville, Spain, Poster participation, 15.05.2019 – 18.05.2019
4. **Design and 3D printing of variant pediatric heart models for training based on a single patient scan.** 3D printing in medicine, Hopfner, C., Jakob, A., Tengler, A., Grab, M., Thierfelder, N., Brunner, B., Thierij, A., Haas, N. A., *3D Print Med.* 2021 Aug 31;7(1):25. doi: 10.1186/s41205-021-00116-6. Erratum in *3D Print Med.* 2021 Nov 17;7(1):37. PMID: 34463879; PMCID: PMC8406574.
5. **Engineering on Anatomy to Avoid the Necessity of Invasive Imaging in Medical 3D Printing: Examples from Pediatric Cardiology.** Hopfner, C., Jakob, A., Tengler, A. I., Grab, M., Thierfelder, N., Brunner, B., Thierij, A., & Haas, N., 03 August 2020, available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-51075/v1>]

6. **Pädiatrie in Entwicklungsländern. Menstruationsbinden – Schlüssel für Bildung von Mädchen und Frauen in Äthiopien.** A. Thierij, B.S. Brunner, N. Haas. BVKJ, Nr. 3904, 02/2019

7. **Pädiatrie in Entwicklungsländern. Zwei Welten – eine Medizin.** B.S. Brunner, A.Thierij, N. Haas. BVKJ, Nr. 3905, 02/2019

9. Publikation

clinical skills

OPEN ACCESS

This is the English version.
The German version starts at p. 11.

article

3D-printed heart models for hands-on training in pediatric cardiology – the future of modern learning and teaching?

Abstract

Background: This project aims to develop a new concept in training pediatric cardiologists to meet the requirements of interventional cardiac catheterizations today in terms of complexity and importance. This newly developed hands-on training program is supposed to enable the acquisition of certain skills which are necessary when investigating and treating patients in a catheter laboratory.

Methods: Based on anonymous CT-scans of pediatric patients' digital 3D heart models with or without cardiac defects were developed and printed three-dimensionally in a flexible material visible under X-ray. Hands-on training courses were offered using models of a healthy heart and the most common congenital heart defects (CHD). An evaluation was performed by quantifying fluoroscopy times (FL-time) and a questionnaire.

Results: The acceptance of theoretical and practical contents within the hands-on training was very positive. It was demonstrated that it is possible to master various steps of a diagnostic procedure and an intervention as well as to practice and repeat them independently which significantly reduced FL-time. The participants stated that the hands-on training led to more confidence in interventions on real patients.

Conclusion: With the development of a training module using 3D-printed heart models, basic and advanced training in the field of diagnostic cardiac examinations as well as interventional therapies of CHD is possible. The learning effect for both, practical skills and theoretical understanding, was significant which underlines the importance of integrating such hands-on trainings on 3D heart models in education and practical training.

Keywords: 3D-printed models, simulation training, medical education,, pediatric cardiology, congenital heart defects, diagnostic and interventional cardiac catheterizations

Barbara S. Brunner¹
Alisa Thierij¹
Andre Jakob¹
Anja Tengler¹
Maximilian Grab²
Nikolaus Thierfelder²
Christian J. Leuner³
Nikolaus A. Haas¹
Carina Hopfner¹

1 LMU Klinikum, Department of Pediatric Cardiology and Pediatric Intensive Care, Munich, Germany

2 LMU Klinikum, Clinic and Polyclinic for Cardiac Surgery, Munich, Germany

3 Etiopia-Witten e.V., Witten, Germany

1. Introduction

With a prevalence of 1% of all live births, congenital heart defects (CHDs) remain the most common congenital anomalies worldwide with treatment often indicated in early childhood [1]. While cardiac catheterizations used to be done mainly for diagnostic purposes nowadays there are also numerous therapeutic options to treat heart defects either completely or partially [2]. These interventional cardiac catheters (CC) replace open-heart surgery in many cases and, thus, offer a less invasive form of treatment with satisfying therapeutic outcomes and increasing patient safety at the same time [3]. To ensure optimal results in these highly complex interventions it is necessary to gain experience by appropriate and highly effective education and further training opportunities for pediatric cardiologists. This principle is already firmly implemented in other training areas such as aerospace. Regular simulation training in a standardized learning environment prepares both, young and experienced, pilots in the best

possible way for various real-life (emergency) situations [4].

The high importance of constant repetition is also evident in emergency medicine, especially in resuscitation training [5]. Not only inexperienced but also experienced doctors consolidate their knowledge and practical skills through regular refresher courses. Therefore, regular standardized repetition of these training units is also recommended for experienced physicians and rescue workers and is mandatory in the Anglo-American regions [5].

Based on these considerations, a realistic simulation model for learning diagnostic CC-examinations was developed by our research group. In addition, the most frequent CHDs [6] were simulated using 3D-printed models to practice interventional CC. The aim of the study was to investigate whether a simulation training could be created promoting both, theoretical principles and practical skills, but also the understanding of the interventions by using the developed 3D printed models.

2. Project description

2.1. Model development

In several development steps the following models were continuously optimized: normal cardiovascular physiology and the most common CHDs: atrial septal defect (ASD), ventricular septal defect (VSD), persistent ductus arteriosus (PDA), aortic isthmus stenosis (ISTA) and aortic and pulmonary valve stenosis (AS, PS). The models used for the hands-on training were based on anonymized CT data of patients with CHD and children with healthy hearts which were obtained during clinically indicated examinations. Using a medical 3D software (Materialise Mimics Innovation Suite, Materialise NV), virtual 3D models of the intracardiac and intravascular volume were generated by segmenting the blood volume in the CT files. As a next step, an air-filled hollow model was created in each case so that the cardiac spaces in the 3D-printed models were accessible for training with catheters and wires via the hollow vessels. In addition, digital editing allowed to print an adult heart also in scaled sizes (adolescent heart 80%, neonatal heart 55%) (see figure 1). For 3D printing on an Agilista 3200W Polyjet 3D printer (Keyence Corp.), a soft silicone rubber (AR-G1L, Keyence Corp.) was used, which was printed together with a water-soluble support material (AR-S1, Keyence Corp.) [https://www.keyence.de/products/3d-printers/3d-printers/agilista-3100/models/agilista-3200w/?search_sl=1]. The process of 3D model creation from data acquisition to 3D printing was described in detail by Grab et al. [7].

2.2. Setup of the training environment

To create a realistic training environment the 3D-printed model of a healthy heart was inserted into a life-size plastic baby doll at the beginning of the hands-on training and placed in a realistic position on the CC table (see figure 2, section A). The next step included radiological imaging for better understanding and visualization of the topographical anatomy in the different projection directions (see figure 2, section B). The 3D-printed models of different CHDs were positioned on the CC table according to the actual position and location of the heart in the body.

2.3. Structure of the CC training modules

The training courses were designed for students, residents, and experienced pediatric cardiologists. The individual courses took place in the cath lab of the hospital and lasted about seven hours. The senior staff of the Department of Pediatric Cardiology and Pediatric Intensive Care at the LMU Klinikum Großhadern, provided instructions and support acting as supervisor for the participants. For participants without experience, a theoretical teaching unit was provided beforehand to explain the structure of a CC laboratory as an introduction to the principles of CC interventions. Based on a script developed especially for

the courses, the basics of cardiac examinations as well as the physiology and hemodynamics of the healthy heart and the CHDs were internalized together before continuing the hands-on training in the cardiac laboratory of the clinic.

After the participants familiarized their selves with the equipment including the movable table, the X-ray tube and the CC devices, e.g., the airlock of the introducer sheath, the guide wire handling and the different types of catheters and balloons, the practical part of the CC course followed. The exercise in the CC laboratory was always carried out considering radiation protection through appropriate protective clothing and distance to the spectators.

The correct positioning of the doll on the CC table and adequate sterile draping were practiced first. The next step was to attach the airlock to a tube leading to the 3D heart. Subsequently, the handling of the wire, lock and catheter was internalized in several steps.

For example, one exercise included insertion of the guide wire through the catheter (see figure 3, section A) and looping it correctly after finally removing it again (see figure 3, section B). The eleven participants practiced the individual steps of CC in groups of two using the 3D heart models. Each team was individually supported by the supervisor.

The first exercise was performed on a 3D-printed heart model of the left heart with physiological cardiac anatomy. For this purpose, it was scanned in the anterior-posterior (see figure 4, section A) and lateral (see figure 4, section B) planes to demonstrate the importance of adequate visualization. The aim was to retrogradely probe the left heart via the descending aorta. Similarly, an exercise was performed on a model with physiologically normal anatomy of the right heart. The participants also learned the intracardiac measurement of pressure curves, saturation, and flow during these exercises. Particular attention was paid to so-called “wire-skills”, such as the technique of changing the catheter and the control of the guide wire and the catheter.

Afterwards, the steps for interventional therapy of the most common CHDs were demonstrated. Special attention was given to the functioning of a balloon catheter and the associated deflator, as well as practicing the preparation of the balloons and in- and deflation (see figure 5). Umbrellas (occluders) are used to close the ASD. In the case of a PDA, shields or metal coils can be used. Both closure implants have a special technique for correct positioning and release by the guiding catheter. After the demonstration, the participants practiced the intervention steps and the positioning of the implants on the models.

2.4. Evaluation

To evaluate the newly developed 3D models and the simulation training itself, the personal progress and the subjective evaluation of the participants were surveyed.

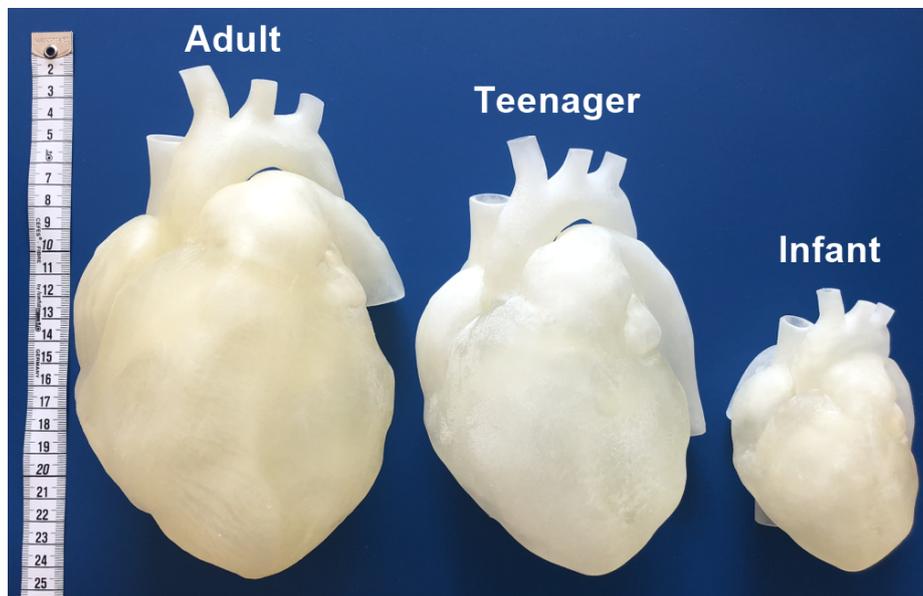


Figure 1: 3D-printed heart models in different sizes

The image shows 3D models of the heart in different sizes, i.e., of an adult, a teenager, and an infant. The heart models for the hands-on training were printed in an additive manufacturing process on a 3D-printer (Agilista 3200W, Keyence Corp.) using a flexible silicon rubber.

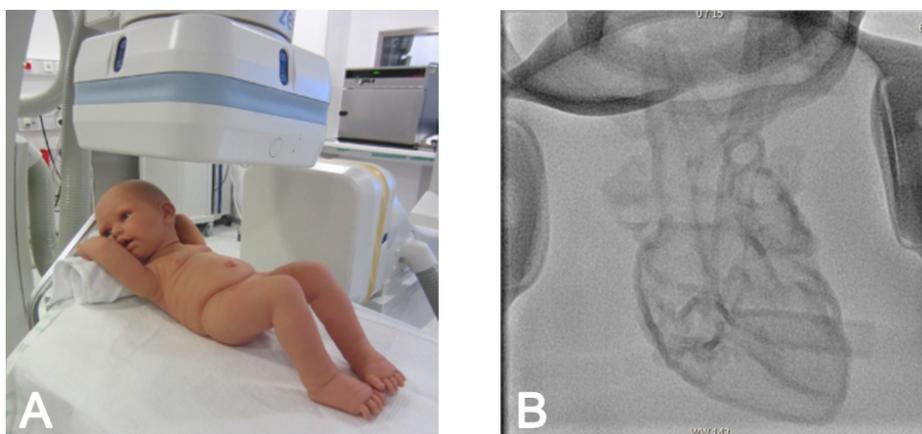


Figure 2: Baby doll with 3D-printed heart model inside the chest

A) The doll is positioned on the catherization table like a real patient.

B) The 3D-printed heart model of a healthy heart inside the doll can be seen under anterior-posterior fluoroscopy.

The entire statistical analysis was done using Microsoft Excel.

For example, the exercise on the model with and without PS focused on the time needed by the participants to advance the guide wire and catheter from the inferior vena cava via the right atrium and ventricle into the pulmonary artery. Each participant performed this exercise twice on the anatomically correct model. Afterwards, the

same exercise was performed on the model with PS, whereby the level of difficulty increased by the stenosis of the valve. These three runs were counted as one training session. The fluoroscopy times (FL-time) of these three runs were compared among each other. A reduction in FL-time during the training session corresponded to the personal progress of the participant. The significance

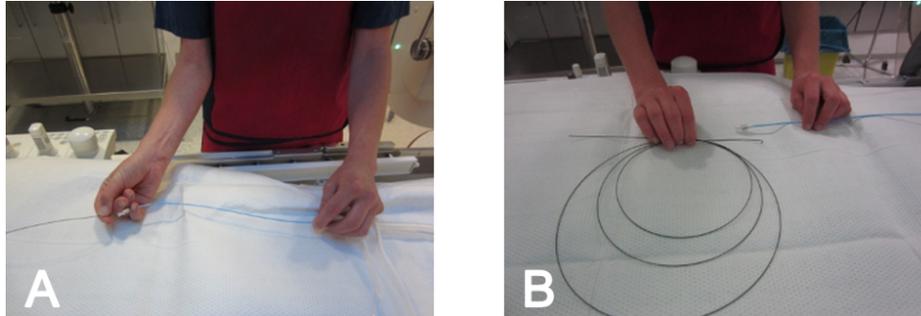


Figure 3: Demonstration of the correct handling of the guide wire

- A) It was demonstrated how the guide wire is inserted into the catheter and moved forward using one hand.
 B) It was demonstrated how the long wire can be folded into loops when outside of the catheter to ensure sterile handling.

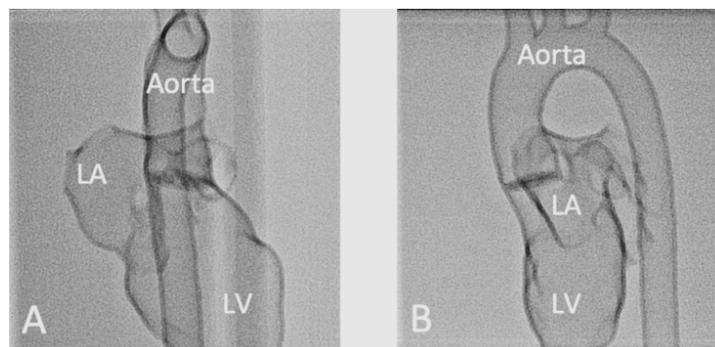


Figure 4: Influence of the projection levels on the anatomic representation during fluoroscopy of a 3D-printed left heart with physiological anatomy in two planes (Aorta = aortic arch, LV = left ventricle, LA = left atrium)

- A) Representation of a 3D-printed heart model in anterior-posterior fluoroscopy.
 B) Representation of a 3D-printed heart model in lateral fluoroscopy.

was tested using the sign-test with a significance level of 0.05.

At the end of each course, an anonymous questionnaire, specifically developed for the evaluation of the 3D models and the simulation training was filled in by each participant. The evaluation was based on a Likert scale with values ranging from one (strongly agree) to five (strongly disagree). A total of ten items was queried. The suitability of the 3D-printed heart models was assessed using four items for learning theoretical basics including diagnostic procedures and catheter intervention steps. Another four items were used to assess the suitability for learning the following learning contents: independent practice and repetition, better understanding of cardiac anatomy, understanding of the procedure of CC interventions, and learning how to use the catheterization devices. The assessment of the potential benefits of hands-on training, such as the opportunity for practice and patient safety, were considered based on the participants' experiences. The ratings "strongly agree" and "rather agree" were summarized to indicate agreement, and "rather disagree" and "strongly disagree" to indicate disagreement with

the method. Finally, the individual feedback of the participants was evaluated qualitatively by free text comments.

3. Results

Since the development of the 3D models in 2018, four courses have taken place, two courses at the LMU hospital and two courses at the General Hospital of the City of Vienna. 19 medical students and doctors participated in total. Among them there were 14 participants with no experience in the CC laboratory, two residents in training with moderate experience and three fully trained pediatric cardiologists with a high level of experience in the CC laboratory.

3.1. Fluoroscopy time

The FL-times presented here show the results of a course at the LMU hospital with eleven participants without knowledge and experience in the CC laboratory, as the assessment of the acquired skills in this homogeneous

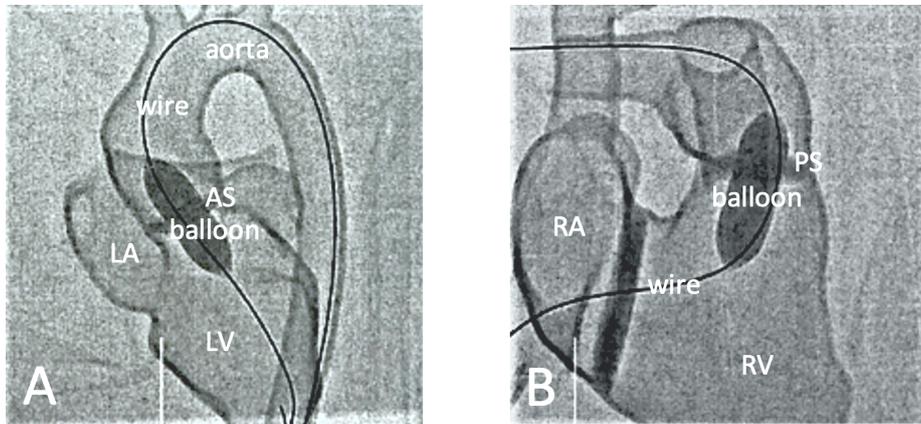


Figure 5: Fluoroscopic documentation of a balloon dilatation of a valvular stenosis within the 3D-printed heart model
A) Balloon dilatation of a valvular aortic stenosis. The inflated balloon is positioned at the level of the aortic valve. The long guide wire is inserted via the descending aorta with its tip lying in the left ventricle.
B) Balloon dilatation of a valvular pulmonary stenosis. The inflated balloon is positioned at the level of the pulmonary valve. The long guide wire is inserted via the vena cava inferior through the right atrium into the right ventricle with its tip lying in the right pulmonary artery.
 (Aorta = aortic arch, AS = aortic stenosis, PS = pulmonary stenosis, LV = left ventricle, LA = left atrium, RV = right ventricle, RA = right atrium).

group provides the best representation of the training effect.

The sequentially measured FL-times of the participants in three exercise rounds on the physiological (1st and 2nd round) and PS model (3rd round) were compared. The participants (n=11) showed a significant difference in the measured FL-times during the three repetitions (sign test: *p<0.05, ***p<0.001).

Figure 6 shows the distribution of the participants' (n=11) FL-times over three practice rounds. The median FL-time was reduced from 218 seconds in the first to 104 seconds in the third round despite the increase in task complexity using the PS model in the third round.

3.2. Questionnaires

The results presented in the following include the submitted questionnaires of all participants of all courses conducted so far. Overall, the exercise on the 3D-printed heart models was rated very positively by all participants (n=19, 84.2% "very good", 15.8% "good"). Most of the participants agreed that the cardiac intervention steps could be internalized using 3D-printed models.

3.2.1. Assessment issues

The following diagrams show the items from the questionnaire listed under 2.4 Evaluation. In the evaluation of learning specific steps of the cardiac examination on the 3D-printed heart model especially the correct handling of the wire and catheter exchange was assessed as a suitable learning unit by all participants within the framework of the course. The insertion of the sheath and

guide wire as well as the dilatation of stenoses were rated as less suitable or neutral or rejected by individual participants (see figure 7).

All participants agreed that the models were well suited for independent practice and for learning how to use the catheterization devices. There were no negative stands in this block of questions (see figure 8).

For a summarizing and final assessment of the hands-on training the participants were divided according to their experience in the CC laboratory. Participants from all experience levels (n=18) stated that there should be more opportunities to practice on 3D models in the future to achieve higher safety in patient interventions (see figure 9).

3.2.2. Free text comments

The evaluation of the free text comments enabled an assessment of the subjective evaluation by the participants (n=19). Four participants emphasized the closeness to reality of the models estimating the possibility of practicing "without fear of destroying something". Five participants particularly mentioned the simple and clear explanation of the exercises. Five participants also liked the structure of the courses, especially the linkage between theory and practice. The high proportion of practical exercises was noted positively by six participants. Participants of the largest group, which included eleven people, suggested a smaller group size (n=8) and better time management (n=5). Four comments offered criticism on the 3D-printed models. It was noted that the ASD and PDA were difficult to reach with the catheter inside the 3D-printed models due to the given anatomical structure.

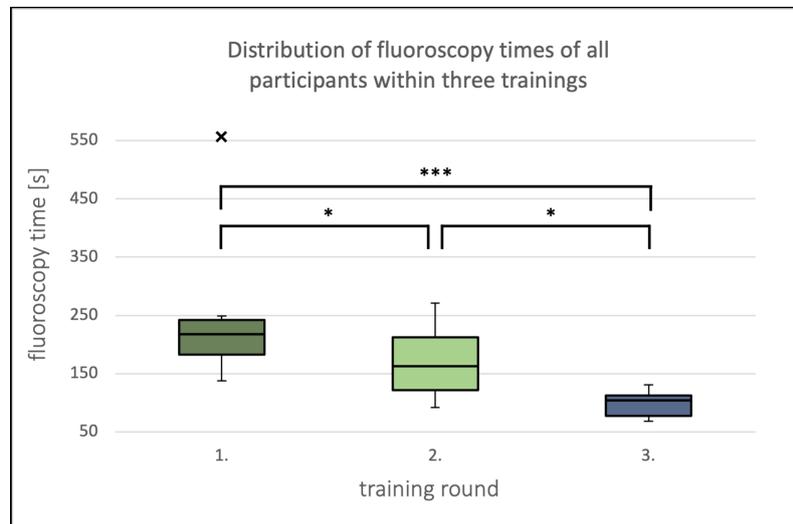


Figure 6: Development of the median distribution of fluoroscopy times of all participants (n=11) in three training rounds. The median fluoroscopy time could be reduced from 218 seconds in the beginning to 104 seconds at the end of the third training round. Attention needs to be paid to the fact that the 1st and 2nd round were performed on the model of a healthy heart whereas the same steps were performed on a model with valvular pulmonary stenosis in the 3rd round. Thus, the last round contained an additional difficulty because the wire and catheter had to be steered past the obstacle of the pulmonary valve stenosis. Nevertheless, a significant difference, i.e., decrease of fluoroscopy time, among these three rounds could be shown. (Sign test: * $p < 0,05$, *** $p < 0,001$).

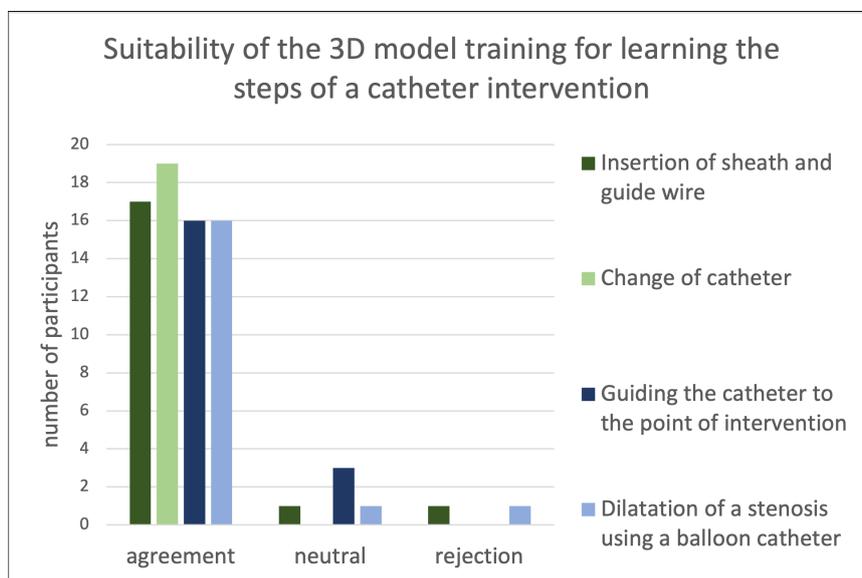


Figure 7: Responses of all participants (n=19) divided into approval and rejection regarding the suitability of 3D-printed heart models to learn the steps of a catheter intervention. Altogether the data showed a broad acceptance regarding the suitability of learning the steps of cardiac catheterization using 3D-printed heart models. All participants (n=19) agreed that changing a catheter can be trained on the models. Only few participants felt that the heart models were less suitable to learn how to insert a sheath and wire and to dilate a stenosis (n=18).

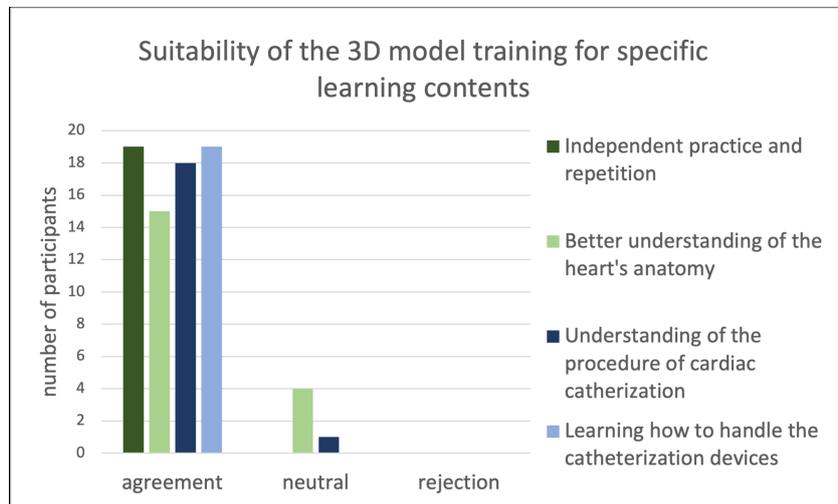


Figure 8: Responses of all participants (n=19) divided into approval and rejection regarding the suitability for certain learning contents

All participants (n=19) agreed that it is possible to practice and repeat independently as well as to learn the handling of catheterization devices. Only few participants felt that the training on 3D-printed heart models was less suited for understanding the anatomy of the heart and the procedure of catheter interventions. There were no rejections.

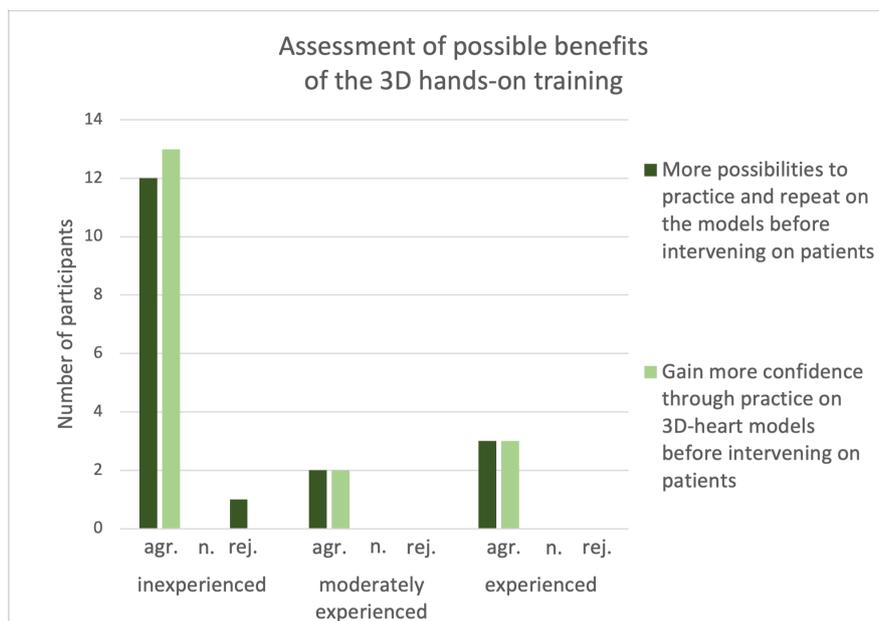


Figure 9: Assessment of possible benefits of the 3D hands-on training

The responses were divided by level of experience (inexperienced (n=14, one abstention), moderately experienced (n=2), experienced (n=3)). For the assessment of possible benefits of the 3D hands-on training the participants' level of experience was considered. Regardless of the level of experience all participants wished to have more possibilities to use this new method of training. All participants also agreed that the practice on 3D-printed heart models could lead to more confidence when intervening on patients.

In addition, the silicone rubber sometimes caused resistance due to friction between the catheter and the silicone model.

4. Discussion

In pediatrics, the establishment of simulation training has become increasingly important over the last two decades [8]. Nowadays, simulation-based training is a component of many pediatric residency programs worldwide, but predominant in the area of resuscitation and trauma management. Simulation training has proven to be particularly useful in consolidating procedural skills [9].

Throughout the studies of medicine, models and simulations are used throughout the training period to support teaching. In physiology, simulation models support the understanding and visualization of processes and interrelationships [10]. Since the amendment of the medical licensing regulations in 2002, learning practical skills has been an essential task during medical studies [11], [12]. For this purpose, training facilities, so-called "skill labs", have been established to teach practical, basic medical skills in small groups under standardized conditions [13]. The use of 3D-printed models in anatomy courses for medical students or medical staff does not only improve interest, but also medical training [14], [15].

3D-printed models have been used in other areas of medicine, such as pediatric cardiac surgery [16], neurosurgery [17], otorhinolaryngology [18] and colorectal surgery [19] and have been established as valuable planning and simulation aid. On the one hand, they support the basic understanding of anatomical features and cardiac anomalies [20]. On the other hand, they support doctor-patient communication through tangible visualization, which is particularly advantageous in the preoperative setting and for individual surgical planning in CHDs [21], [22], [23], [24], [25].

The 3D-printed models are a cheaper and more available alternative compared to other clinical simulators [26]. In addition, they can be produced in different scales, variances and as often as desired.

So far, the models have hardly been used for practical training by pediatric cardiologists. However, based on the results obtained during this study, it has been proven that 3D-printed models are highly suitable for training purposes in this field.

Within the scope of the course, it has been shown that the FL-time could be reduced by repeating a consistent exercise sequence several times. Further simulation courses using 3D-printed models and longitudinal data collection are necessary to assess the sustainability of the learning effect. Heidbuchel, Chambers and Katz were able to show in their respective studies that a reduction in radiation exposure could already be achieved in interventional (adult) cardiology through targeted training and special courses [27], [28], [29]. In the long term, a significant

reduction in radiation exposure for patients can be expected through regular basic and advanced training. The evaluation of the questionnaires showed that the participants were very satisfied overall with the training on the 3D-printed models. The participants from all levels of experience agreed that they would profit from such training opportunities in the future confirming the acceptance of this type of training. Training on a model provides space for making mistakes and for learning how to deal with difficult situations without directly exposing patients to risk [30]. Burkhardt and Ziv both emphasized the importance of such simulation possibilities in their studies [30], [31].

Regarding higher patient safety, the cardiologist's confidence in the execution of the intervention steps is also very important. A study from 2002 was able to show that virtual simulation training of laparoscopic interventions resulted in shorter operation times and significantly better performance of the surgeons [32]. This can most likely also be achieved by practicing in the CC laboratory on the 3D-printed heart model.

The fact that simulation training in pediatric cardiology is suitable to achieve the same results, was shown by the evaluation of the participants of all experience levels. Everyone has the chance to learn at their own pace gaining confidence in the individual intervention steps. The number and intensity of training sessions needed to offer a lasting effect is still unclear. Weinger explains the importance of more intensive training at the beginning of the learning curve pointing out that repetition units are still necessary to maintain the training effect [33]. In addition, simulation training and clinical work with patients could complement each other. However, hands-on training is linked to the availability of the CC laboratory and is associated with a higher radiation exposure of the trainee, which is why sufficient radiation protection must be ensured [27], [28], [29].

Based on the feedback of the participants, the heart models are continuously re-evaluated and revised. For example, the friction between the devices and the model was reduced in the short term by using silicone spray. In the long term, however, a fluid-filled, pulsatile 3D model is planned. This will enable further exercise possibilities such as intracardiac pressure measurements and angiographies using contrast agent. Visual and haptic feedback will also be improved. Models of other heart defects are already planned for training additional CC techniques. Due to the use of the models in the hospital's own CC laboratory and the resulting local flexibility it is possible to offer such training courses worldwide. An example is a clinic partnership project funded by GIZ between the Department of Pediatric Cardiology and Pediatric Intensive Care at the LMU Hospital Großhadern and the Ayder Referral Hospital in the city of Mekelle, Ethiopia. As part of the project, Ethiopian doctors without experience in catheterization are trained in the CC laboratory using the 3D-printed models. The progress of the practical skills is documented and evaluated during the project.

5. Conclusion

It was possible to develop a realistic training module for learning diagnostic and interventional cardiac examinations for therapy of the most common CHDs. The use of 3D-printed heart models of different sizes, corresponding to the age groups of patients, contributes to the resemblance of reality of the simulation. The effectiveness and practicability of the hands-on training was evaluated showing that practicing on the 3D-printed heart models was accepted and positively evaluated as a type of training by all participants. This training setup seems to be extremely beneficial for optimizing an individual learning curve offering the possibility to train in a risk-free setting, to gain confidence and, thus, to increase patient safety. For the future, this new kind of training offers numerous opportunities for education and training on the job, as well as the potential to be established as an integral part of interventional (pediatric) cardiology.

Notes

The authors Barbara S. Brunner and Alisa Thierij share the first authorship.

The results of this paper are part of the MD thesis of the two first authors and C. Hopfner.

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

References

- Lindinger A, Schwedler G, Hense H-W. Prevalence of congenital heart defects in newborns in Germany: Results of the first registration year of the PAN Study (July 2006 to June 2007). *Klin Pädiatr.* 2010;222(05):321-326. DOI: 10.1055/s-0030-1254155
- Kang SL, Benson L. Recent advances in cardiac catheterization for congenital heart disease. *F1000Research.* 2018;7(F1000 Faculty Rev):370. DOI: 10.12688/f1000research.13021.1
- Kim SH. Recent advances in pediatric interventional cardiology. *Korean J Pediatr.* 2017;60(8):237-244. DOI: 10.3345/kjp.2017.60.8.237
- Voelker W, Gauper FP. Simulatortraining in der inneren Medizin. In: St. Pierre M, Breuer G, editors. *Simulation in der Medizin.* Berlin, Heidelberg: Springer; 2018. p.337-355. DOI: 10.1007/978-3-662-54566-9_24
- Greif R, Lockey AS, Conaghan P, Lippert A, De Vries W, Monsieurs KG. Ausbildung und Implementierung der Reanimation. *Notfall Rettungsmed.* 2015;18(8):1016-1034. DOI: 10.1007/s10049-015-0092-y
- van der Linde D, Konings EE, Slager MA, Witsenburg M, Helbing WA, Takkenberg JJ, Roos-Hesselink JW. Birth prevalence of congenital heart disease worldwide: a systematic review and meta-analysis. *J Am Coll Cardiol.* 2011;58(21):2241-2247. DOI: 10.1016/j.jacc.2011.08.025
- Grab M, Hopfner C, Gesenhues A, König F, Haas NA, Hagl C, Curta A, Thierfelder N. Development and Evaluation of 3D-Printed Cardiovascular Phantoms for Interventional Planning and Training. *J Vis Exp.* 2021;(167):e62063. DOI: 10.3791/62063
- Lopreiato JO, Sawyer T. Simulation-based medical education in pediatrics. *Acad Pediatr.* 2015;15(2):134-142. DOI: 10.1016/j.acap.2014.10.010
- Ojha R, Liu A, Rai D, Nanan R. Review of simulation in pediatrics: the evolution of a revolution. *Front Pediatr.* 2015;3:106. DOI: 10.3389/fped.2015.00106
- Bintley HL, Bell A, Ashworth R. Remember to breathe: teaching respiratory physiology in a clinical context using simulation. *Adv Physiol Educ.* 2019;43(1):76-81. DOI: 10.1152/advan.00148.2018
- Rüsseler M, Weber R, Braunbeck A, Flaig W, Marzi I, Walcher F. Training praktischer Fertigkeiten in der Chirurgie-Ein Ausbildungskonzept für Studierende. *Zentralbl Chir.* 2010;135(03):249-256. DOI: 10.1055/s-0030-1247355
- Nikendei C, Schilling T, Nawroth P, Hensel M, Ho A, Schwenger V, Zeier M, Herzog W, Schellberg D, Katus HA, Dengler T, Stremmel W, Müller M, Jünger J. Integriertes Skills-Lab-Konzept für die studentische Ausbildung in der Inneren Medizin [Integrated skills laboratory concept for undergraduate training in internal medicine]. *Dtsch Med Wochenschr.* 2005;130(18):1133-1138. DOI: 10.1055/s-2005-866799
- Fichtner A. Lernen für die Praxis: Das Skills-Lab. In: St. Pierre M, Breuer G, editors. *Simulation in der Medizin.* Berlin, Heidelberg: Springer; 2013. p.105-114. DOI: 10.1007/978-3-642-29436-5_10
- Vukicevic M, Mosadegh B, Min JK, Little SH. Cardiac 3D printing and its future directions. *JACC Cardiovasc Imaging.* 2017;10(2):171-184. DOI: 10.1016/j.jcmg.2016.12.001
- Su W, Xiao Y, He S, Huang P, Deng X. Three-dimensional printing models in congenital heart disease education for medical students: a controlled comparative study. *BMC Med Educ.* 2018;18(1):178. DOI: 10.1186/s12909-018-1293-0
- Anwar S, Singh GK, Miller J, Sharma M, Manning P, Billadello JJ, Eghtesady P, Woodard PK. 3D Printing is a Transformative Technology in Congenital Heart Disease. *JACC Basic Transl Sci.* 2018;3(2):294-312. DOI: 10.1016/j.jacbts.2017.10.003
- Randazzo M, Pisapia JM, Singh N, Thawani JP. 3D printing in neurosurgery: a systematic review. *Surg Neurol Int.* 2016;7(Suppl 33):S801-S809. DOI: 10.4103/2152-7806.194059
- VanKoevering KK, Hollister SJ, Green GE. Advances in 3-dimensional printing in otolaryngology: a review. *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg.* 2017;143(2):178-183. DOI: 10.1001/jamaoto.2016.3002
- Papazarkadas X, Spartalís E, Patsouras D, Ioannidis A, Schizas D, Georgiou K, Dimitroulis D, Nikiteas N. The role of 3D printing in colorectal surgery: Current evidence and future perspectives. *In Vivo.* 2019;33(2):297-302. DOI: 10.21873/invivo.11475
- Loke YH, Harahsheh AS, Krieger A, Olivieri LJ. Usage of 3D models of tetralogy of Fallot for medical education: impact on learning congenital heart disease. *BMC Med Educ.* 2017;17(1):1-8. DOI: 10.1186/s12909-017-0889-0
- Biglino G, Capelli C, Leaver LK, Schievano S, Taylor AM, Wray J. Involving patients, families and medical staff in the evaluation of 3D printing models of congenital heart disease. *Commun Med.* 2016;12(2-3):157-169. DOI: 10.1558/cam.28455
- Kiraly L, Tofeig M, Jha NK, Talo H. Three-dimensional printed prototypes refine the anatomy of post-modified Norwood-1 complex aortic arch obstruction and allow presurgical simulation of the repair. *Interact Cardiovasc Thorac Surg.* 2016;22(2):238-240. DOI: 10.1093/icvts/ivv320

23. Batteux C, Haidar MA, Bonnet D. 3D-printed models for surgical planning in complex congenital heart diseases: a systematic review. *Front Pediatr.* 2019;7:23. DOI: 10.3389/fped.2019.00023
24. Hussein N, Honjo O, Barron DJ, Haller C, Coles JG, Yoo SJ. The incorporation of hands-on surgical training in a congenital heart surgery training curriculum. *Ann Thorac Surg.* 2020;S-0003-4975(20)32088-9.
25. Yoo SJ, Spray T, Austin III EH, Yun TJ, van Arsdell GS. Hands-on surgical training of congenital heart surgery using 3-dimensional print models. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2017;153(6):1530-1540. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2016.12.054
26. Nguyen D, Appelbaum J, Ali F, Shorofsky S, Dickfeld T, See V, Restrepo AJ. Three-Dimensional Printing in Cardiac Electrophysiology: Current Applications and Future Directions. *EPLabDigest.* 2021;21(5). Zugänglich unter/available from: <https://www.eplabdigest.com/three-dimensional-printing-cardiac-electrophysiology-current-applications-and-future-directions>
27. Heidebuchel H, Wittkamp FH, Vano E, Ernst S, Schilling R, Picano E, Mont L, Jais P, de Bono J, Pieorkowski C, Saad E, Femenia F. Practical ways to reduce radiation dose for patients and staff during device implantations and electrophysiological procedures. *Europace.* 2014;16(7):946-964. DOI: 10.1093/europace/eut409
28. Chambers CE, Awuor S. Reducing radiation dose: Equipment, procedure, and operator Perfecting the Trifecta. *Catheter Cardiovasc Interv.* 2018;92(7):1237-1238. DOI: 10.1002/ccd.28001
29. Katz A, Shtub A, Solomonica A, Poliakov A, Roguin A. Simulator training to minimize ionizing radiation exposure in the catheterization laboratory. *Int J Cardiovasc Imaging.* 2017;33(3):303-310. DOI: 10.1007/s10554-016-1009-7
30. Ziv A, Wolpe PR, Small SD, Glick S. Simulation-Based Medical Education: An Ethical Imperative. *Acad Med.* 2003;78(8):783-788. DOI: 10.1097/00001888-200308000-00006
31. Burkhart HM. Simulation in congenital cardiac surgical education: We have arrived. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2017;153(6):1528-1529. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2017.03.012
32. Seymour NE, Gallagher AG, Roman SA, O'Brien MK, Bansal VK, Andersen DK, Satava RM. Virtual reality training improves operating room performance: results of a randomized, double-blinded study. *Ann Surg.* 2002;236(4):458. DOI: 10.1097/0000658-200210000-00008
33. Weinger MB. The pharmacology of simulation: a conceptual framework to inform progress in simulation research. *Simul Healthc.* 2010;5(1):8-15. DOI: 10.1097/SIH.0b013e3181c91d4a

Corresponding author:

Prof. Dr. Nikolaus A. Haas, MD, PhD
LMU Klinikum, Department of Pediatric Cardiology and Pediatric Intensive Care, Marchioninistr. 15, D-81377 Munich, Germany, Phone: +49 (0)89/4400-73941, Fax: +49 (0)89/4400-73943
Nikolaus.Haas@med.uni-muenchen.de

Please cite as

Brunner BS, Thierij A, Jakob A, Tengler A, Grab M, Thierfelder N, Leuner CJ, Haas NA, Hopfner C. 3D-printed heart models for hands-on training in pediatric cardiology – the future of modern learning and teaching? *GMS J Med Educ.* 2022;39(2):Doc23. DOI: 10.3205/zma001544, URN: urn:nbn:de:0183-zma001544

This article is freely available from

<https://doi.org/10.3205/zma001544>

Received: 2021-05-02

Revised: 2021-10-05

Accepted: 2022-01-24

Published: 2022-04-14

Copyright

©2022 Brunner et al. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License. See license information at <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

3D-gedruckte Herzmodelle für Hands-on-Training in der Kinderkardiologie – das Lehrmodell der Zukunft?

Zusammenfassung

Zielsetzung: Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung eines neuen Aus- und Weiterbildungskonzepts in der Kinderkardiologie, um der zunehmenden Komplexität und dem Stellenwert interventioneller Eingriffe mittels Herzkatheter (HK) gerecht zu werden. Das neu entwickelte Hands-on Training soll den Erwerb entsprechender Fertigkeiten für die Durchführung der HK-Untersuchung an Patient*innen ermöglichen.

Methodik: Basierend auf anonymisierten CT-Bildern von pädiatrischen Patient*innen wurden digitale 3D-Herzmodelle entwickelt und in einem flexiblen, unter Röntgenstrahlung sichtbaren Material dreidimensional ausgedruckt. Es fanden Hands-on Trainingskurse statt, bei denen Modelle eines gesunden Herzens sowie der häufigsten angeborenen Herzfehler (AHF) zum Einsatz kamen. Eine Evaluation erfolgte anhand der Quantifizierung von Durchleuchtungszeiten (DL-Zeit) und eines Fragebogens.

Ergebnisse: Die Akzeptanz der theoretischen und praktischen Inhalte des Hands-on Trainings war sehr gut. Es hat sich gezeigt, dass sowohl das Erlernen diverser Schritte als auch selbstständiges Üben und Wiederholen und eine damit verbundene signifikante Verkürzung der benötigten DL-Zeit möglich sind. Die Teilnehmenden gaben an, dass das Hands-on Training zu mehr Sicherheit bei der Intervention an Patient*innen führen würde.

Schlussfolgerung: Mit der Entwicklung eines Trainingsmoduls unter dem Einsatz 3D-gedruckter Herzmodelle sind Aus- und Weiterbildung im Bereich diagnostischer HK-Untersuchungen sowie interventioneller Therapien von AHF möglich. Der signifikante Lerneffekt sowohl für die praktischen Fähigkeiten als auch für das theoretische Verständnis spricht für die Integration des Simulationstrainings an 3D-Herzmodellen in Aus- und Weiterbildung.

Schlüsselwörter: 3D-gedruckte Modelle, Simulationstraining, medizinische Aus- und Weiterbildung, Kinderkardiologie, angeborene Herzfehler, diagnostische und interventionelle Herzkatheteruntersuchungen

Barbara S. Brunner¹
Alisa Thierij¹
Andre Jakob¹
Anja Tengler¹
Maximilian Grab²
Nikolaus Thierfelder²
Christian J. Leuner³
Nikolaus A. Haas¹
Carina Hopfner¹

1 LMU Klinikum, Abteilung für Kinderkardiologie und pädiatrische Intensivmedizin, München, Deutschland

2 LMU Klinikum, Klinik und Poliklinik für Herzchirurgie, München, Deutschland

3 Etiopia-Witten e.V., Witten, Deutschland

1. Einleitung

Mit einer Prävalenz von 1% aller Lebendgeburten zählen angeborene Herzfehler (AHF) nach wie vor zu den häufigsten angeborenen Anomalien weltweit, wobei vielfach eine Behandlung im frühen Kindesalter indiziert ist [1]. Während Herzkatheteruntersuchungen früher hauptsächlich rein diagnostisch eingesetzt wurden, ergeben sich heutzutage auch zahlreiche therapeutische Möglichkeiten, um Herzfehler entweder komplett oder teilweise zu behandeln [2]. Diese interventionellen Herzkatheter (HK) ersetzen in vielen Fällen die Operation am offenen Herzen und bieten somit eine weniger invasive Behandlungsform mit gutem Therapieerfolg und gleichzeitig erhöhter Patientensicherheit [3]. Zur Gewährleistung optimaler Ergeb-

nisse bei diesen zum Teil hochkomplexen Eingriffen ist ein entsprechendes Training, daraus resultierende Erfahrung sowie im Idealfall eine hocheffektive Aus- und Weiterbildungsmöglichkeit für Ärzt*innen der Kinderkardiologie notwendig. Dieses Prinzip ist beispielsweise bereits in anderen Ausbildungsbereichen wie der Luft- und Raumfahrt fest implementiert. Durch regelmäßiges Simulationstraining in standardisierter Lernumgebung werden sowohl jüngere als auch erfahrene Pilot*innen bestmöglich auf ihr Berufsleben und diverse (Notfall-)Situationen vorbereitet [4].

Der hohe Stellenwert der ständigen Wiederholung wird vor allem auch in der Notfallmedizin, besonders beim Reanimationstraining, ersichtlich [5]. Nicht nur unerfahrene, sondern auch erfahrene Ärzt*innen festigen durch regelmäßige Auffrischkurse ihr Wissen und ihre praktischen Fertigkeiten. Daher wird eine regelmäßige

standardisierte Wiederholung dieser Trainingseinheiten auch für erfahrene Ärzt*innen und Rettungskräfte empfohlen und ist im angloamerikanischen Sprachraum Pflicht [5].

Basierend auf diesen Überlegungen wurde durch unsere Arbeitsgruppe zunächst ein realitätsgetreues Simulationsmodell zum Erlernen von diagnostischen HK-Untersuchungen entwickelt. Zusätzlich wurden die häufigsten AHF [6] anhand 3D-gedruckter Modelle simuliert, an denen interventionelle HK-Untersuchungen trainiert werden konnten. Anhand der in dieser Studie vorgestellten neu entwickelten 3D-Modelle sollte zudem untersucht werden, ob so ein Simulationstraining geschaffen werden kann, welches sowohl theoretische Grundlagen als auch praktische Fertigkeiten und das Verständnis für die Interventionen fördert.

2. Projektbeschreibung

2.1. Modellentwicklung

In mehreren Entwicklungsschritten wurden folgende Modelle kontinuierlich optimiert: Normale Herz-Kreislaufphysiologie sowie die häufigsten AHF: Vorhofseptumdefekt (ASD), Ventrikelseptumdefekt (VSD), Persistierender Ductus Arteriosus (PDA), Aortenisthmusstenose (ISTA) sowie Aorten- und Pulmonalstenose (AS, PS). Für die im Hands-on-Training genutzten Modelle wurden anonymisierte CT-Daten von Patient*innen mit AHF sowie herzgesunden Kindern verwendet, welche im Rahmen von klinisch indizierten Untersuchungen gewonnen wurden. Mittels einer medizinischen 3D-Software (Materialise Mimics Innovation Suite, Materialise NV) wurden durch Segmentierung des Blutvolumens in den CT-Dateien zunächst virtuelle 3D-Modelle des intrakardialen und intravaskulären Volumens generiert. Basierend darauf wurde jeweils ein luftgefülltes Hohlmodell erstellt, sodass die Herzräume in den 3D-gedruckten Modellen für das Training mit Kathetern und Drähten über die hohlen Gefäße zugänglich waren. Außerdem konnten die Modelle durch digitale Bearbeitung, größenbasierend auf einem Erwachsenenherzen, in skalierter Größe (Jugendliches Herz 80%, Herz eines Neugeborenen 55%) gedruckt werden (siehe Abbildung 1). Für den 3D-Druck im Polyjet-Verfahren auf einem Agilista 3200W 3D-Drucker (Keyence Corp.) wurde ein weiches Silikongummi (AR-G1L, Keyence Corp.) verwendet, welches zusammen mit einem wasserlöslichen Stützmaterial (AR-S1, Keyence Corp.) gedruckt wurde [https://www.keyence.de/products/3d-printers/3d-printers/agilista-3100/models/agilista-3200w/?search_sl=1]. Der Prozess der 3D-Modellerstellung von der Datenakquise bis zum 3D-Druck wurde von Grab et al. im Detail beschrieben [7].

2.2. Aufbau der Trainingsumgebung

Um eine realistische Trainingsumgebung zu schaffen, wurde zu Beginn des Hands-on-Trainings das 3D-gedruckte

Modell eines gesunden Herzens in eine lebensgroße Kunststoff-Babypuppe eingesetzt und realitätsgetreu auf dem HK-Tisch platziert (siehe Abbildung 2, Punkt A). Anschließend erfolgte die radiologische Darstellung zum besseren Verständnis und zur Visualisierung der topographischen Anatomie in den verschiedenen Projektionsrichtungen (siehe Abbildung 2, Punkt B). Die 3D-gedruckten Modelle mit den verschiedenen AHF wurden entsprechend der Position und Lage des Herzens im Körper auf dem HK-Tisch gelagert.

2.3. Ablauf HK-Trainingsmodule

Die durchgeführten Trainingskurse (TK) waren jeweils für Studierende, Assistenzärzt*innen oder erfahrene Kinderkardiolog*innen ausgelegt. Die einzelnen TK fanden jeweils in den klinikinternen HK-Laboren statt, die Dauer der Kurse umfasste etwa sieben Stunden. Anleitung und Betreuung erfolgten durch Prof. Dr. Nikolaus Haas, Direktor der Abteilung für Kinderkardiologie und pädiatrische Intensivmedizin des LMU Klinikums Großhadern, der den TN als Supervisor zur Seite stand. Für TN ohne Erfahrung erfolgte zur Einführung in das Prinzip der HK-Interventionen eine theoretische Lehrinheit zur Erläuterung des Aufbaus eines HK-Labors. Anhand eines speziell für die Kurse verfassten Skripts wurden die Grundlagen der HK-Untersuchung sowie die Physiologie und Hämodynamik des gesunden Herzens sowie der AHF gemeinsam erarbeitet, bevor der Kurs im klinikeigenen HK-Labor fortgesetzt wurde.

Nachdem den TN die Bedienung und Einstellung der Geräte wie z.B. des beweglichen Tisches und der Röntgenröhre demonstriert wurde, hatten sie die Möglichkeit, sich mit den verwendeten Materialien, z.B. der Schleuse, dem Führungsdraht und den verschiedenen Katheter-Typen vertraut zu machen, bevor der praktische Teil des HK-Kurses folgte. Die Übung im HK-Labor erfolgte stets unter Berücksichtigung des Strahlenschutzes durch entsprechende Schutzkleidung und Abstand der Zuschauenden. Hier wurde zuerst das richtige Positionieren der Puppe auf dem HK-Tisch sowie das adäquate sterile Abdecken geübt. Im nächsten Schritt erfolgte die Anlage der Schleuse an einem zum 3D-Herzen führenden Schlauch. Anschließend wurde das Handling mit Draht, Schleuse und Katheter in mehreren Schritten verinnerlicht.

So wurde beispielsweise gezeigt, wie der Führungsdraht durch den Katheter eingeführt (siehe Abbildung 3, Punkt A) und beim anschließenden Entfernen in Schlaufen gelegt wird (siehe Abbildung 3, Punkt B). Die elf Teilnehmenden übten in Zweiergruppen die einzelnen Schritte der Katheterintervention anhand der 3D-Herzmodelle. Jedes Team wurde individuell vom Supervisor betreut.

Die erste Übung erfolgte an einem 3D-gedruckten Herzmodell des linken Herzens mit physiologischer Herzanatomie. Dazu wurde es in anterior-posteriorer (siehe Abbildung 4, Punkt A) und lateraler (siehe Abbildung 4, Punkt B) Ebene durchleuchtet. Ziel dabei war die retrograde Sondierung des linken Herzens über die absteigende Aorta. Analog wurde eine Übung an einem Modell mit

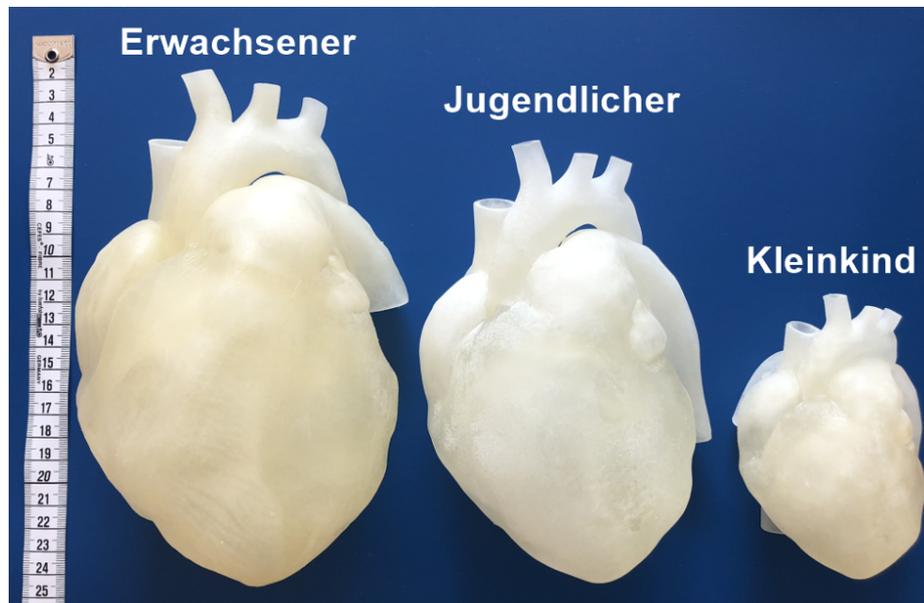


Abbildung 1: Größenvergleich der 3D-gedruckten Herzmodelle. Abgebildet sind Modelle in der Größe des Herzen eines Erwachsenen, eines Jugendlichen und eines Kleinkindes im Vergleich. Die Herzmodelle für das Hands-on-Training wurden mit einem 3D-Drucker (Agilista 3200W, Keyence Corp.) im Additiven Fertigungsverfahren aus Silikongummi gedruckt.

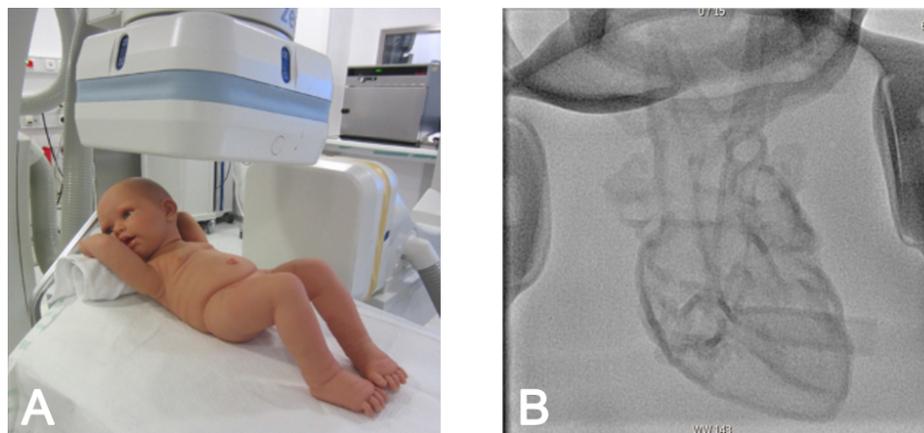


Abbildung 2: Kunststoff-Babypuppe mit innen liegendem 3D-gedrucktem Herzmodell.

- A) Die Modellpuppe auf dem Herzkatheter-Tisch positioniert wie ein realer Patient.
 B) unter anterior-posteriorer Durchleuchtung ist das 3-D gedruckte Herzmodell des gesunden Herzens in der Kunststoff-Babypuppe erkennbar.

physiologischer Anatomie des rechten Herzes durchgeführt. Den TN wurde anhand dieser Übung auch die intrakardiale Messung von Druckkurven, Sättigung und des Flows nähergebracht. Dabei wurde besonders auf sogenannte „wire-skills“, wie die Technik des Katheterwechsels und die Steuerung des Führungsdrahtes sowie des Katheters eingegangen.

Anschließend wurden den TN die Schritte für die interventionelle Therapie der häufigsten AHF demonstriert. Dabei wurde besonders auf die Funktionsweise eines Ballonkatheters und des zugehörigen Inflators eingegangen, sowie die In- und Deflation geübt (siehe Abbildung 5). Für den Verschluss des ASD werden Schirmchen (Okkluder) verwendet. Bei einem PDA können Schirmchen oder

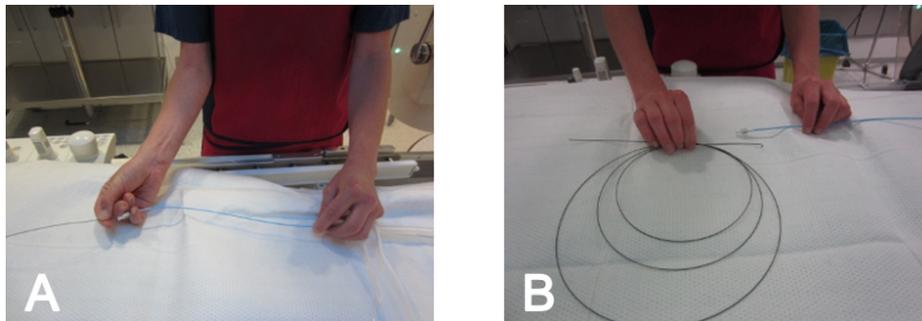


Abbildung 3: Demonstration der korrekten Handhabung des Führungsdrahtes.

- A) Den Teilnehmenden wurde demonstriert, wie der Führungsdraht in den Katheter eingeführt und einhändig vorgeschoben wird.
- B) Den Teilnehmenden wurde demonstriert, wie der lange Draht außerhalb des Katheters in Schlaufen gelegt wird, um eine sterile Handhabung zu ermöglichen.

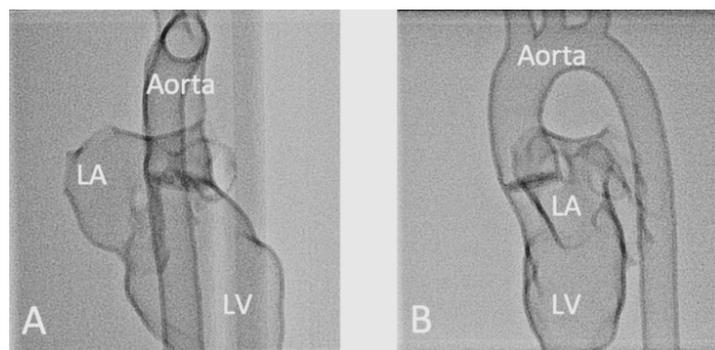


Abbildung 4: Einfluss der Projektionsebenen auf die anatomische Darstellung während der Durchleuchtung eines 3D-gedruckten Herzmodells mit physiologischer Herzanatomie des linken Herzens in zwei Ebenen. (Aorta = Aortenbogen, LV= linker Ventrikel, LA= linker Vorhof)

- A) Darstellung des 3D-gedruckten Herzmodells in anterior-posteriorer Durchleuchtung.
- B) Darstellung des 3D-gedruckten Herzmodells in lateraler Durchleuchtung.

Metallspiralen (Coils) eingesetzt werden. Beide Verschlussimplantate besitzen eine spezielle Technik zum richtigen Positionieren und Lösen des Führungskatheters. Anschließend an die Demonstration konnten die TN die Interventionsschritte und die Positionierung der Implantate an den Modellen üben.

2.4. Evaluation

Zur Evaluation der neu entwickelten 3D-Modelle und des Simulationstrainings wurde einerseits der persönliche Fortschritt und andererseits die subjektive Bewertung der TN abgefragt. Die gesamte statistische Auswertung erfolgte unter Verwendung von Microsoft Excel.

Bei der Übung am Modell mit und ohne PS wurde z.B. die Zeit in Sekunden gemessen, die von den jeweiligen TN benötigt wurde, um den Führungsdraht und Katheter von der unteren Hohlvene über den rechten Vorhof und Ventrikel in die Pulmonalarterie vorzuschieben. Jeder TN führte diese Übung zwei Mal am anatomisch korrekten

Modell aus. Anschließend wurde die gleiche Übung einmal am Modell mit PS durchgeführt, wobei der Anspruch durch das Überwinden der Stenose stieg. Diese drei Durchgänge wurden als eine Trainingseinheit gezählt. Die Durchleuchtungszeiten (DL-Zeit) dieser drei Übungsrunden wurden untereinander verglichen. Eine Verkürzung der DL-Zeit im Verlauf der Trainingseinheit entsprach dem persönlichen Fortschritt des TN. Die Signifikanz wurde anhand des Vorzeichentests mit einem Signifikanzlevel von 0,05 getestet.

Am Ende jedes Kurses wurde zudem von jedem TN ein anonymisierter Fragebogen ausgefüllt, der speziell für die Bewertung der 3D-Modelle und des Simulationstrainings entwickelt wurde. Die Bewertung erfolgte anhand einer Likert-Skala mit Werten von 1 (trifft voll zu) bis 5 (trifft gar nicht zu). Insgesamt wurden zehn Items abgefragt. Beurteilt wurde die Eignung der 3D-gedruckten Herzmodelle anhand von vier Items zum Erlernen theoretischer Grundlagen, zu denen diagnostische Verfahren

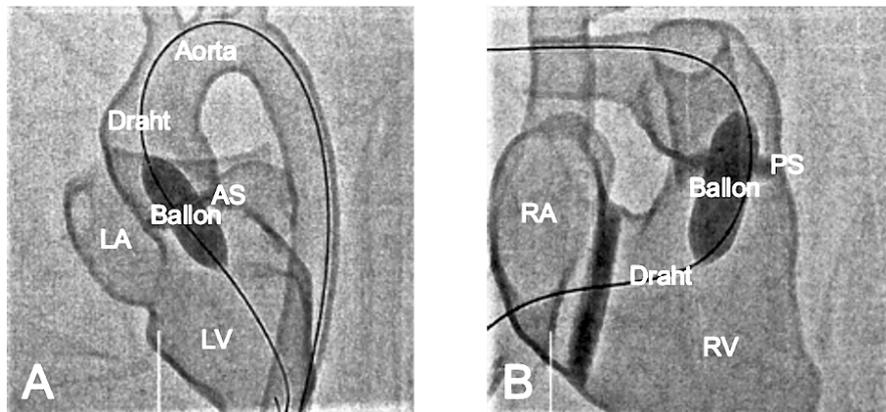


Abbildung 5: Fluoroskopische Dokumentation der Ballondilatation von Stenosen im 3D-gedruckten Herzmodell
A) Ballondilatation einer valvulären Aortenstenose. Der inflatierte Dilatationsballon ist im Bereich der Aortenklappe positioniert, der lange Führungsdraht kommt aus der deszendierenden Aorta und liegt mit der Spitze im linken Ventrikel.
B) Ballondilatation einer valvulären Pulmonalstenose. Der inflatierte Dilatationsballon ist im Bereich der Pulmonalklappe positioniert, der lange Führungsdraht kommt aus der Vena cava inferior über den rechten Vorhof in den rechten Ventrikel und liegt mit seinem Ende in der rechten Pulmonalarterie
 (Aorta = Aortenbogen, AS= Aortenstenose, PS= Pulmonalstenose, LV= linker Ventrikel, LA= linker Vorhof, RV= rechter Ventrikel, RA= rechter Vorhof)

und Katheterinterventionsschritte zählen. Anhand weiterer vier Items sollte die Eignung zum Erlernen folgender Lerninhalte bewertet werden: Selbstständiges Üben und Wiederholen, besseres Verständnis der Herzanatomie, Verständnis des Prozedere der HK-Interventionen und Erlernen des Umgangs mit den Katheterinstrumenten. Die Beurteilung der möglichen Vorteile des Hands-on-Trainings, wie Übungsmöglichkeiten und Patientensicherheit, wurden basierend auf den Erfahrungswerten der TN betrachtet. Zusammengefasst wurden darin jeweils die Bewertungen „trifft voll zu“ und „trifft eher zu“ um eine Zustimmung, sowie „trifft eher nicht zu“ und „trifft gar nicht zu“, um eine Ablehnung der Methode zu charakterisieren. Abschließend wurde die individuelle Rückmeldung der TN im Rahmen zweier Freitextkommentare qualitativ ausgewertet.

3. Ergebnisse

Seit der Entwicklung der neuen 3D-Modelle 2018 haben bereits vier TK stattgefunden, aufgeteilt auf zwei Kurse im LMU Klinikum und zwei Kurse im Allgemeinen Krankenhaus der Stadt Wien. Insgesamt nahmen 19 Studierende der Medizin und Ärzt*innen an den TK teil. Darunter waren 14 TN ohne Erfahrung im HK-Labor, zwei Assistenzärzte in Weiterbildung mit mäßiger Erfahrung und drei fertig ausgebildete Kinderkardiolog*innen mit hohen Erfahrungswerten im HK-Labor.

3.1. Durchleuchtungszeit

Die aufgezeigten DL-Zeiten beschränken sich auf die Ergebnisse eines Kurses am LMU Klinikum mit elf TN ohne Kenntnisse und Erfahrungswerte im HK-Labor, da die Beurteilung der erlernten Fertigkeiten in dieser homogenen Gruppe die beste Repräsentation des Trainingseffektes zeigt.

Die in den drei Übungsrunden am physiologischen (1. und 2. Runde) und PS-Modell (3. Runde) sequenziell gemessenen DL-Zeiten der TN wurden verglichen. Bei den TN (n=11) zeigte sich im Rahmen der drei Wiederholungen ein signifikanter Unterschied der gemessenen DL-Zeiten (Vorzeichentest: *p<0,05, ***p<0,001).

Abbildung 6 zeigt die Verteilung der DL-Zeiten der TN (n=11) über drei Übungsrunden. Die mediane DL-Zeit konnte trotz Anstieg der Aufgabenkomplexität durch den Einsatz des PS-Modells in der dritten Runde von anfangs 218 Sekunden auf 104 Sekunden in der dritten Runde reduziert werden.

3.2. Fragebögen

Für die im folgenden präsentierten Ergebnisse wurden die eingereichten Fragebögen der TN aller bisher durchgeführten Kurse einbezogen. Insgesamt wurde die Übung an den 3D-gedruckten Herzmodellen von allen TN (n=19) sehr positiv bewertet (84,2% „sehr gut“, 15,8% „gut“). Die TN stimmten überwiegend zu, dass die HK-Interventionsschritte anhand der 3D-gedruckten Modelle erlernt werden konnten.

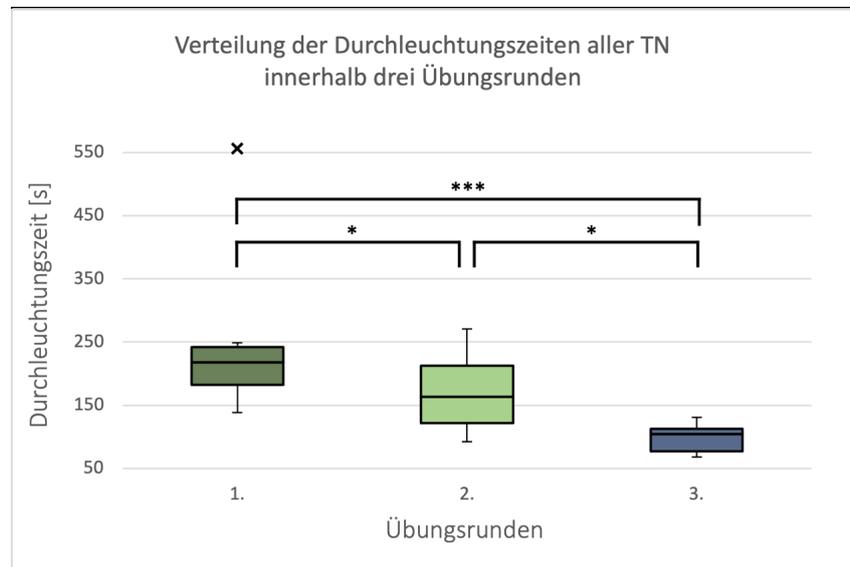


Abbildung 6: Entwicklung der medianen Verteilung der Durchleuchtungszeiten aller Teilnehmenden (n=11) im Verlauf von drei Übungsdurchgängen.

Die mediane Durchleuchtungszeit von eingangs 218 Sekunden konnte im dritten Übungsdurchgang auf 104 Sekunden reduziert werden. Hierbei ist zu beachten, dass die 1. und 2. Runde am Modell des gesunden Herzens durchgeführt wurde, während die gleichen Schritte in der 3. Runde am Modell der valvulären Pulmonalstenose durchgeführt wurden. Beim letzten Übungsdurchgang bestand somit die besondere Schwierigkeit, den Draht und Katheter an dem zusätzlichen Hindernis der Pulmonalstenose vorbeizuführen. Trotzdem zeigte sich ein signifikanter Unterschied im Vergleich der drei Runden. (Vorzeichenstest: * $p < 0,05$, *** $p < 0,001$)

3.2.1. Bewertungsfragen

Die folgenden Diagramme zeigen die unter 2.4 Evaluation aufgeführten Items aus dem Fragebogen. Bei der Bewertung zum Erlernen einzelner Schritte der HK-Untersuchung am 3D-gedruckten Herzmodell wurde besonders die Handhabung des korrekten Draht- bzw. Katheterwechsels von allen TN als eine geeignete Lerneinheit im Rahmen des Kurses beurteilt. Das Einführen von Schleuse und Führungsdraht sowie die Dilatation von Stenosen wurde von einzelnen TN als weniger geeignet oder neutral eingestuft oder abgelehnt (siehe Abbildung 7).

Ebenfalls sind sich alle TN einig, dass sich die Modelle gut dazu eignen, eigenständig zu üben sowie den Umgang mit den Katheterinstrumenten zu erlernen. In diesem Fragenblock gab es keine ablehnende Haltung (siehe Abbildung 8).

Im Rahmen der Auswertung der abgegebenen Bewertungen zur zusammenfassenden Beurteilung des Hands-on-Trainings wurden die TN entsprechend ihrer Erfahrungswerte im HK-Labor eingeteilt. TN aus allen Erfahrungsstufen (n=18) gaben dabei an, dass es in Zukunft mehr Möglichkeiten geben sollte, am 3D-Modell zu üben, um dadurch mehr Sicherheit bei der Intervention an Patient*innen erreichen zu können (siehe Abbildung 9).

3.2.2. Freitextkommentare

Die Auswertung der Freitextkommentare ermöglichte eine Einschätzung der subjektiven Bewertung durch die TN (n=19). Vier TN hoben die besondere Realitätsnähe der Modelle hervor. Ein Kommentar enthielt zudem die Information, dass „ohne Angst etwas zu zerstören“ geübt werden konnte. Fünf TN erwähnten besonders die einfache und verständliche Erklärung der Übungen. Ebenfalls fünf TN gefiel der Aufbau des TK, unter anderem aufgrund des Vorhandenseins von Theorie und Praxis und die aufeinander aufbauenden Übungen. Der hohe Anteil praktischer Übungen fiel sechs TN positiv auf.

Als Verbesserungsvorschläge wurden bei dem Kurs mit elf TN eine kleinere Gruppengröße (n=8) und besseres Zeitmanagement (n=5) angemerkt. Vier Kommentare boten Kritik zu den 3D-gedruckten Modellen. Unter anderem wurde angemerkt, dass ASD und PDA am 3D-gedruckten Modell aufgrund des anatomischen Aufbaus schwer mit dem Katheter zu erreichen seien. Außerdem komme es bei dem verwendeten Silikongummi zeitweise zu Widerstand durch Friktion zwischen Katheter und Silikonmodell.

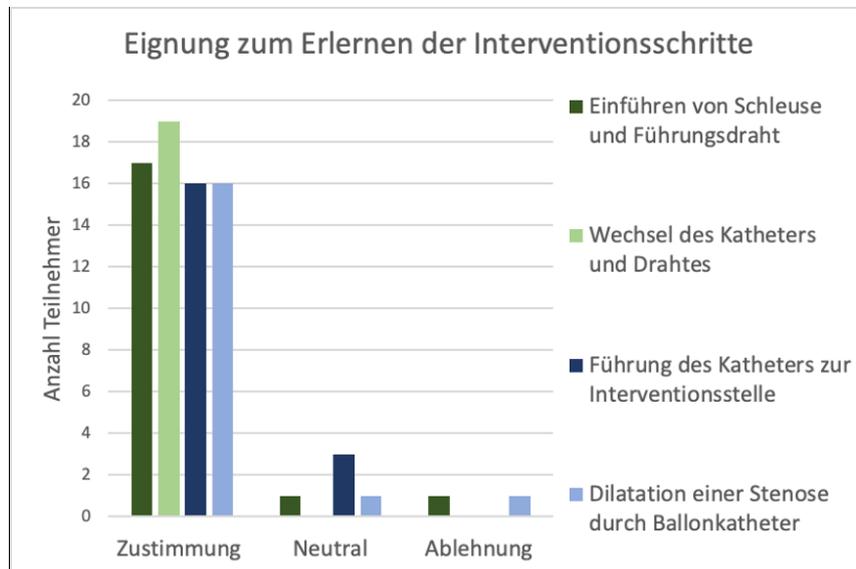


Abbildung 7: Antworten aller Teilnehmenden (n=19) unterteilt in Zustimmung und Ablehnung bezüglich der Eignung 3D-gedruckter Herzmodelle zum Erlernen von Interventionsschritten.

Insgesamt zeigte sich eine breite Akzeptanz zum Erlernen von HK-Schritten am 3D-gedruckten Herzmodell. Alle Teilnehmenden (n=19) stimmten zu, dass ein Wechsel des Katheters und Drahtes anhand der Modelle erlernt werden kann. Nur vereinzelt Teilnehmende empfanden die Herzmodelle als weniger geeignet für das Einführen von Schleuse und Draht und die Dilatation einer Stenose (n=18).

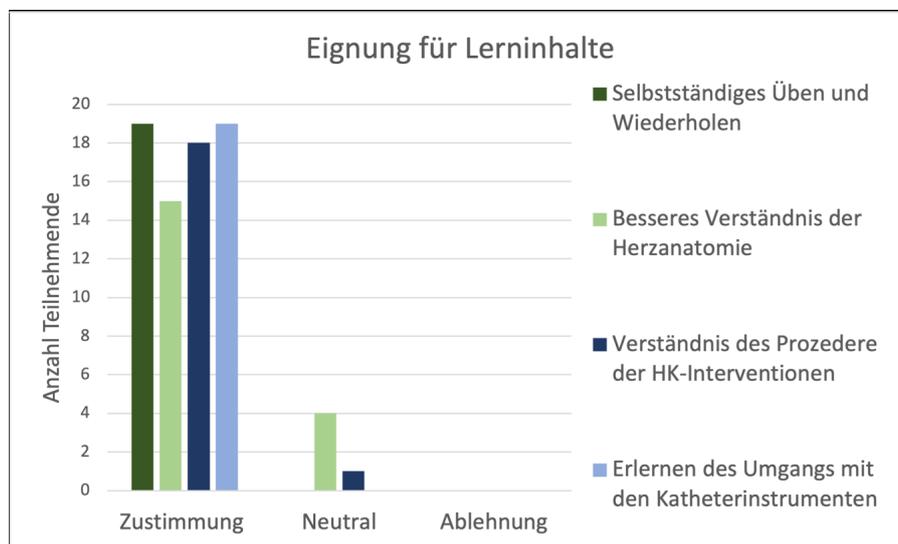


Abbildung 8: Antworten aller Teilnehmenden (n= 19) unterteilt in Zustimmung und Ablehnung bezüglich der Eignung für bestimmte Lerninhalte.

Alle Teilnehmenden (n= 19) stimmten zu, dass ein selbstständiges Üben und Wiederholen sowie das Erlernen des Umgangs mit Katheterinstrumenten möglich sind. Nur wenige Teilnehmende empfanden das Training am 3D-gedruckten Herzmodell als weniger geeignet, um die Herzanatomie und das Prozedere der HK-Interventionen zu verstehen, es gab keine ablehnende Haltung.

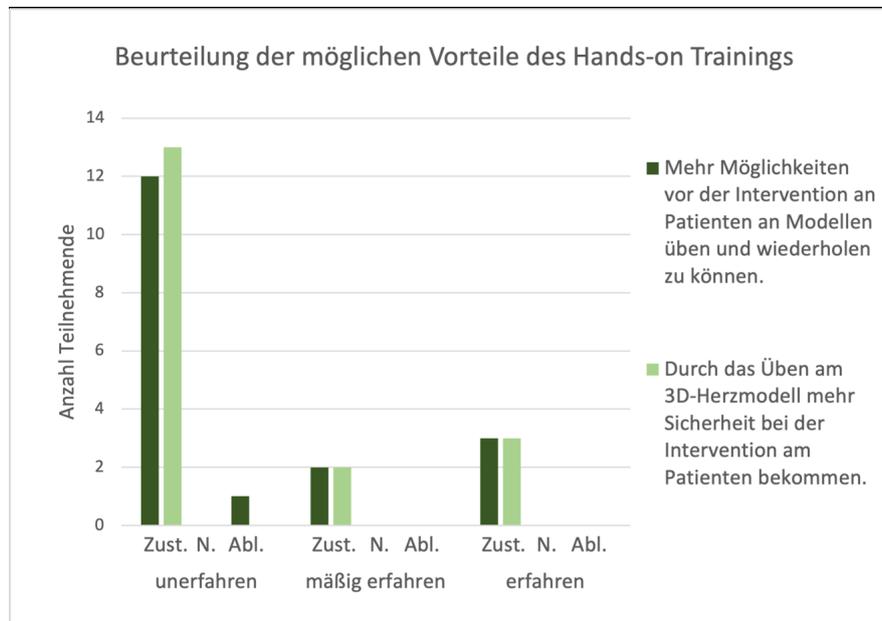


Abbildung 9: Beurteilung der möglichen Vorteile des Hands-on Trainings.

Unterteilung der Bewertung anhand von Erfahrungsstufen (unerfahren (n=14, eine Enthaltung), mäßig erfahren (n=2), erfahren (n=3)). Für die Beurteilung der möglichen Vorteile des Hands-on Trainings im HK-Labor wurde der Erfahrungsgrad der Teilnehmenden in die Bewertung einbezogen. Unabhängig von den Erfahrungsstufen wünschten sich alle Teilnehmenden mehr Möglichkeiten, diese neue Ausbildungsmethode zu nutzen. Alle Teilnehmenden stimmten außerdem zu, dass die Übung am 3D-Modell zu mehr Sicherheit bei der Intervention am Patienten führen könnte.

4. Diskussion

In der Pädiatrie hat die Etablierung von Simulationstrainings in den letzten zwei Jahrzehnten immer mehr an Bedeutung gewonnen [8]. Die simulationsbasierte Ausbildung ist mittlerweile Bestandteil vieler pädiatrischer Facharztausbildungsprogramme weltweit, jedoch überwiegend im Bereich des Reanimations- und Traumamanagements. Simulationstrainings haben sich dabei vor allem als sinnvoll erwiesen, um prozedurale Fertigkeiten zu festigen [9].

Im Medizinstudium werden während der gesamten Ausbildungszeit Modelle und Simulationen genutzt, um die Lehre zu unterstützen. In der Physiologie helfen Simulationsmodelle dem Verständnis und der Visualisierung von Prozessen und Zusammenhängen [10]. Seit der Novellierung der ärztlichen Approbationsordnung von 2002 kommt dem Erlernen praktischer Fertigkeiten im Zuge des Medizinstudiums eine wesentliche Rolle zu [11], [12]. Dafür wurden Trainingseinrichtungen, sogenannte "Skills labs", etabliert, um praktische, ärztliche Basisfertigkeiten in Kleingruppen unter standardisierten Bedingungen zu vermitteln [13]. Der Einsatz von 3D-gedruckten Modellen in Anatomiekursen für Medizinstudenten oder medizinisches Personal verbessert nicht nur das Interesse, sondern auch die medizinische Ausbildung [14], [15].

Auch in anderen Bereichen der Medizin, wie der Kinderherzchirurgie [16], Neuro- [17], HNO- [18] und kolorektalen Chirurgie [19], haben gedruckte 3D-Modelle bereits Einzug gefunden und sich als wertvolles Planungs- und Simulationshilfsmittel etabliert. Einerseits unterstützen sie das grundlegende Verständnis anatomischer Besonderheiten und kardialer Anomalien [20]. Andererseits fördern sie die Arzt-Patienten-Kommunikation anhand der greifbaren Veranschaulichung, was vor allem im präoperativen Setting und für die individuelle OP-Planung bei AHF von Vorteil ist [21], [22], [23], [24], [25].

Die im 3D-Druck-Verfahren hergestellten Modelle stellen hierbei eine kostengünstigere Alternative zu anderen klinischen Simulatoren dar und verfügen zudem über eine bessere Verfügbarkeit [26]. Außerdem können sie in unterschiedlicher Skalierung, Varianz und beliebig oft neu hergestellt werden.

Zur praktischen Ausbildung von Kinderkardiologen werden die Modelle bisher kaum verwendet. Anhand der im Zuge dieser Studie erzielten Ergebnisse konnte allerdings gezeigt werden, dass 3D-gedruckte Modelle für Trainingszwecke in diesem Bereich äußerst geeignet sind.

Im Rahmen des TK zeigte sich, dass durch mehrfaches Wiederholen einer gleichbleibenden Übungssequenz die DL-Zeit verringert werden konnte. Zur Beurteilung der Nachhaltigkeit des Lerneffekts sind weitere Simulations-

kurse an 3D-gedruckten Modellen und eine longitudinale Datenerhebung notwendig. Heidbuchel, Chambers und Katz konnten in ihren jeweiligen Studien zeigen, dass in der interventionellen (Erwachsenen-) Kardiologie bereits eine Reduktion der Strahlenbelastung durch gezieltes Training und spezielle Schulungen erlangt werden konnte [27], [28], [29]. Durch regelmäßig stattfindendes Training während der Aus- und Weiterbildung ist langfristig mit einer signifikanten Reduktion der Strahlenbelastung für die Patient*innen zu rechnen.

Die Auswertung der Fragebögen zeigte, dass die TN mit dem Training am 3D-gedruckten Modell insgesamt sehr zufrieden waren. Die TN aus allen Erfahrungsstufen waren sich außerdem einig, dass sie sich in Zukunft mehr solcher Übungsangebote wünschten, wodurch die Akzeptanz dieser Ausbildungsform bestätigt wurde. Mit der Aus- und Weiterbildung am Modell wird Raum geschaffen, in dem Fehler gemacht und die Reaktionen auf mögliche Konsequenzen trainiert werden können, ohne dass Patient*innen unmittelbar einem Risiko ausgesetzt werden [30]. Burkhardt und Ziv betonen in ihren Studien jeweils die Wichtigkeit derartiger Simulationsmöglichkeiten [30], [31].

In Hinblick auf eine höhere Patientensicherheit spielt außerdem die eigene Sicherheit in der Ausführung der Interventionsschritte eine große Rolle. Eine Studie von 2002 konnte bereits zeigen, dass virtuelles Simulationstraining von laparoskopischen Eingriffen eine kürzere Operationsdauer und signifikant bessere Leistungen der Operateure bewirkt [32]. Dies soll auch durch die Übung im HK-Labor am 3D-gedruckten Herzmodell erzielt werden.

Dass das Simulationstraining dazu geeignet ist, zeigt sich in den Bewertungen der TN aller Erfahrungsstufen. So hat jeder die Chance, in seiner eigenen Geschwindigkeit zu lernen und Sicherheit in den einzelnen Schritten zu erlangen. Unklar ist noch, in welchem Intervall das Training stattfinden muss, um einen anhaltenden Effekt zu bieten. Weininger erläutert, dass zu Beginn ein intensiveres Training stattfinden sollte und für den Erhalt des Trainingseffekts weiterhin Wiederholungseinheiten notwendig seien. Außerdem könnten sich das Simulationstraining und die klinische Arbeit an Patient*innen synergistisch ergänzen [33]. Das Hands-on Training ist allerdings an die Verfügbarkeit des HK-Labors gebunden und geht mit einer höheren Strahlenbelastung des Trainierenden einher, weshalb auf einen ausreichenden Strahlenschutz geachtet werden muss [27], [28], [29].

Anhand der Rückmeldungen durch die TN werden die Herzmodelle kontinuierlich reevaluiert und überarbeitet. So wurde die Friktion der Instrumente im Modell kurzfristig durch den Einsatz von Silikonspray reduziert. Langfristig ist jedoch ein flüssigkeitsgefülltes, pulsatile 3D-Modell geplant. Dadurch sind weitere Übungen, wie die intrakardiale Druckmessungen und Angiographien mittels Kontrastmittel möglich. Ebenfalls werden das visuelle und haptische Feedback verbessert. Es sind bereits Modelle weiterer Herzfehler geplant, an denen zusätzliche HK-Techniken erlernt werden können. Durch den Einsatz der

Modelle im klinikinternen HK-Labor besteht aufgrund der daraus resultierenden örtlichen Flexibilität zudem die Möglichkeit, derartige Trainingskurse weltweit abzuhalten. Als Beispiel dafür sei ein durch die GIZ gefördertes Klinikpartnerschaftsprojekt zwischen der Abteilung für Kinderkardiologie und pädiatrische Intensivmedizin des LMU Klinikums Großhadern und dem Ayder Referral Hospital der Stadt Mekelle, Äthiopien angeführt. Im Rahmen des Projekts werden äthiopische Ärzt*innen ohne Erfahrungswerte im HK-Labor anhand der 3D-gedruckten Modelle ausgebildet. Die Fortschritte der praktischen Fertigkeiten werden jeweils dokumentiert und im Verlauf ebenfalls ausgewertet.

5. Schlussfolgerung

Es konnte ein realitätsnahes Trainingsmodul zum Erlernen von diagnostischen und interventionellen HK-Untersuchungen zur Therapie der häufigsten AHF entwickelt werden. Die Verwendung von 3D-gedruckten Herzmodellen unterschiedlicher Größen, entsprechend den Altersgruppen der Patient*innen, trägt zur Realitätsnähe der Simulation bei. Die Effektivität und Praktikabilität des Hands-on Trainings wurde evaluiert und zeigte, dass die Übung an den 3D-gedruckten Herzmodellen als Ausbildungsform von allen Teilnehmenden akzeptiert und positiv bewertet wurde. Diese Ausbildungsform scheint äußerst vorteilhaft zur Optimierung einer individuellen Lernkurve und bietet zudem die Möglichkeit, in einem risikofreien Setting trainieren zu können, Sicherheit zu erlangen und somit eine erhöhte Patientensicherheit zu ermöglichen. Für die Zukunft bietet diese neue Trainingsform zahlreiche Möglichkeiten für die Aus- und Weiterbildung, sowie das Potenzial, sich als fester Bestandteil in der interventionellen (Kinder-)Kardiologie zu etablieren.

Anmerkungen

Die Autoren Barbara S. Brunner und Alisa Thierij teilen sich die Erstautorenschaft.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind Teil der Promotionsarbeiten der beiden Erstautorinnen und von C. Hopfner.

Interessenkonflikt

Die Autor*innen erklären, dass sie keinen Interessenkonflikt im Zusammenhang mit diesem Artikel haben.

Literatur

1. Lindinger A, Schwedler G, Hense H-W. Prevalence of congenital heart defects in newborns in Germany: Results of the first registration year of the PAN Study (July 2006 to June 2007). *Klin Pädiatr.* 2010;222(05):321-326. DOI: 10.1055/s-0030-1254155

2. Kang SL, Benson L. Recent advances in cardiac catheterization for congenital heart disease. *F1000Research*. 2018;7(F1000 Faculty Rev):370. DOI: 10.12688/f1000research.13021.1
3. Kim SH. Recent advances in pediatric interventional cardiology. *Korean J Pediatr*. 2017;60(8):237-244. DOI: 10.3345/kjp.2017.60.8.237
4. Voelker W, Gauper FP. Simulatortraining in der inneren Medizin. In: St. Pierre M, Breuer G, editors. *Simulation in der Medizin*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2018. p.337-355. DOI: 10.1007/978-3-662-54566-9_24
5. Greif R, Lockey AS, Conaghan P, Lippert A, De Vries W, Monsieurs KG. Ausbildung und Implementierung der Reanimation. *Notfall Rettungsmed*. 2015;18(8):1016-1034. DOI: 10.1007/s10049-015-0092-y
6. van der Linde D, Konings EE, Slager MA, Witsenburg M, Helbing WA, Takkenberg JJ, Roos-Hesselink JW. Birth prevalence of congenital heart disease worldwide: a systematic review and meta-analysis. *J Am Coll Cardiol*. 2011;58(21):2241-2247. DOI: 10.1016/j.jacc.2011.08.025
7. Grab M, Hopfner C, Gesenhues A, König F, Haas NA, Hagl C, Curta A, Thierfelder N. Development and Evaluation of 3D-Printed Cardiovascular Phantoms for Interventional Planning and Training. *J Vis Exp*. 2021;(167):e62063. DOI: 10.3791/62063
8. Lopreiato JO, Sawyer T. Simulation-based medical education in pediatrics. *Acad Pediatr*. 2015;15(2):134-142. DOI: 10.1016/j.acap.2014.10.010
9. Ojha R, Liu A, Rai D, Nanan R. Review of simulation in pediatrics: the evolution of a revolution. *Front Pediatr*. 2015;3:106. DOI: 10.3389/fped.2015.00106
10. Bintley HL, Bell A, Ashworth R. Remember to breathe: teaching respiratory physiology in a clinical context using simulation. *Adv Physiol Educ*. 2019;43(1):76-81. DOI: 10.1152/advan.00148.2018
11. Rüsseler M, Weber R, Braunbeck A, Flaig W, Marzi I, Walcher F. Training praktischer Fertigkeiten in der Chirurgie-Ein Ausbildungskonzept für Studierende. *Zentralbl Chir*. 2010;135(03):249-256. DOI: 10.1055/s-0030-1247355
12. Nikendei C, Schilling T, Nawroth P, Hensel M, Ho A, Schwenger V, Zeier M, Herzog W, Schellberg D, Katus HA, Dengler T, Stremmel W, Müller M, Jünger J. Integriertes Skills-Lab-Konzept für die studentische Ausbildung in der Inneren Medizin [Integrated skills laboratory concept for undergraduate training in internal medicine]. *Dtsch Med Wochenschr*. 2005;130(18):1133-1138. DOI: 10.1055/s-2005-866799
13. Fichtner A. Lernen für die Praxis: Das Skills-Lab. In: St. Pierre M, Breuer G, editors. *Simulation in der Medizin*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013. p.105-114. DOI: 10.1007/978-3-662-29436-5_10
14. Vukicevic M, Mosadegh B, Min JK, Little SH. Cardiac 3D printing and its future directions. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2017;10(2):171-184. DOI: 10.1016/j.jcmg.2016.12.001
15. Su W, Xiao Y, He S, Huang P, Deng X. Three-dimensional printing models in congenital heart disease education for medical students: a controlled comparative study. *BMC Med Educ*. 2018;18(1):178. DOI: 10.1186/s12909-018-1293-0
16. Anwar S, Singh GK, Miller J, Sharma M, Manning P, Billadello JJ, Egthesady P, Woodard PK. 3D Printing is a Transformative Technology in Congenital Heart Disease. *JACC Basic Transl Sci*. 2018;3(2):294-312. DOI: 10.1016/j.jacmts.2017.10.003
17. Randazzo M, Pisapia JM, Singh N, Thawani JP. 3D printing in neurosurgery: a systematic review. *Surg Neurol Int*. 2016;7(Suppl 33):S801-S809. DOI: 10.4103/2152-7806.194059
18. VanKoeveering KK, Hollister SJ, Green GE. Advances in 3-dimensional printing in otolaryngology: a review. *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg*. 2017;143(2):178-183. DOI: 10.1001/jamaoto.2016.3002
19. Papazarkadas X, Spartalis E, Patsouras D, Ioannidis A, Schizas D, Georgiou K, Dimitroulis D, Nikiteas N. The role of 3D printing in colorectal surgery: Current evidence and future perspectives. *In Vivo*. 2019;33(2):297-302. DOI: 10.21873/invivo.11475
20. Loke YH, Harahsheh AS, Krieger A, Olivieri LJ. Usage of 3D models of tetralogy of Fallot for medical education: impact on learning congenital heart disease. *BMC Med Educ*. 2017;17(1):1-8. DOI: 10.1186/s12909-017-0889-0
21. Biglino G, Capelli C, Leaver LK, Schievano S, Taylor AM, Wray J. Involving patients, families and medical staff in the evaluation of 3D printing models of congenital heart disease. *Commun Med*. 2016;12(2-3):157-169. DOI: 10.1558/cam.28455
22. Kiraly L, Tofeig M, Jha NK, Talo H. Three-dimensional printed prototypes refine the anatomy of post-modified Norwood-1 complex aortic arch obstruction and allow presurgical simulation of the repair. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*. 2016;22(2):238-240. DOI: 10.1093/icvts/ivv320
23. Batteux C, Haidar MA, Bonnet D. 3D-printed models for surgical planning in complex congenital heart diseases: a systematic review. *Front Pediatr*. 2019;7:23. DOI: 10.3389/fped.2019.00023
24. Hussein N, Honjo O, Barron DJ, Haller C, Coles JG, Yoo SJ. The incorporation of hands-on surgical training in a congenital heart surgery training curriculum. *Ann Thorac Surg*. 2020;S-0003-4975(20)32088-9.
25. Yoo SJ, Spray T, Austin III EH, Yun TJ, van Arsdell GS. Hands-on surgical training of congenital heart surgery using 3-dimensional print models. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2017;153(6):1530-1540. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2016.12.054
26. Nguyen D, Appelbaum J, Ali F, Shorofsky S, Dickfeld T, See V, Restrepo AJ. Three-Dimensional Printing in Cardiac Electrophysiology: Current Applications and Future Directions. *EPLabDigest*. 2021;21(5). Zugänglich unter/available from: <https://www.eplabdigest.com/three-dimensional-printing-cardiac-electrophysiology-current-applications-and-future-directions>
27. Heibuchel H, Wittkamp FH, Vano E, Ernst S, Schilling R, Picano E, Mont L, Jais P, de Bono J, Pieorkowski C, Saad E, Femenia F. Practical ways to reduce radiation dose for patients and staff during device implantations and electrophysiological procedures. *Europace*. 2014;16(7):946-964. DOI: 10.1093/europace/eut409
28. Chambers CE, Awuor S. Reducing radiation dose: Equipment, procedure, and operator Perfecting the Trifecta. *Catheter Cardiovasc Interv*. 2018;92(7):1237-1238. DOI: 10.1002/ccd.28001
29. Katz A, Shtub A, Solomonica A, Poliakov A, Roguin A. Simulator training to minimize ionizing radiation exposure in the catheterization laboratory. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2017;33(3):303-310. DOI: 10.1007/s10554-016-1009-7
30. Ziv A, Wolpe PR, Small SD, Glick S. Simulation-Based Medical Education: An Ethical Imperative. *Acad Med*. 2003;78(8):783-788. DOI: 10.1097/00001888-200308000-00006
31. Burkhart HM. Simulation in congenital cardiac surgical education: We have arrived. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2017;153(6):1528-1529. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2017.03.012
32. Seymour NE, Gallagher AG, Roman SA, O'Brien MK, Bansal VK, Andersen DK, Satava RM. Virtual reality training improves operating room performance: results of a randomized, double-blinded study. *Ann Surg*. 2002;236(4):458. DOI: 10.1097/0000658-200210000-00008

33. Weinger MB. The pharmacology of simulation: a conceptual framework to inform progress in simulation research. *Simul Healthc.* 2010;5(1):8-15. DOI: 10.1097/SIH.0b013e3181c91d4a

Korrespondenzadresse:

Prof. Dr. Nikolaus A. Haas, MD, PhD
LMU Klinikum, Abteilung für Kinderkardiologie und
pädiatrische Intensivmedizin, Marchioninistr. 15, 81377
München, Deutschland, Tel.: +49 (0)89/4400-73941,
Fax: +49 (0)89/4400-73943
Nikolaus.Haas@med.uni-muenchen.de

Bitte zitieren als

Brunner BS, Thierij A, Jakob A, Tengler A, Grab M, Thierfelder N, Leuner CJ, Haas NA, Hopfner C. 3D-printed heart models for hands-on training in pediatric cardiology – the future of modern learning and teaching? *GMS J Med Educ.* 2022;39(2):Doc23. DOI: 10.3205/zma001544, URN: urn:nbn:de:0183-zma0015444

Artikel online frei zugänglich unter

<https://doi.org/10.3205/zma001544>

Eingereicht: 02.05.2021

Überarbeitet: 05.10.2021

Angenommen: 24.01.2022

Veröffentlicht: 14.04.2022

Copyright

©2022 Brunner et al. Dieser Artikel ist ein Open-Access-Artikel und steht unter den Lizenzbedingungen der Creative Commons Attribution 4.0 License (Namensnennung). Lizenz-Angaben siehe <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.