

Aus der Abteilung für Kinderkardiologie und Pädiatrische Intensivmedizin  
Klinik der Universität München  
Direktor: Prof. Dr. Nikolaus Alexander Haas



***Entwicklung eines 3D-Modells zum Training von  
Herzkatheteruntersuchungen bei angeborenen Herzfehlern***

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin  
an der Medizinischen Fakultät  
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Barbara Sophie Brunner

aus

Linz an der Donau

2024

---

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität zu München

Berichterstatter: Prof. Dr. Nikolaus Alexander Haas

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

Mitbetreuung durch die  
promovierte Mitarbeiterin: PD Dr. Anja Lehner

Dekan: Prof. Dr. med. Thomas Gudermann

Tag der mündlichen Prüfung: 22.02.2024



*meiner Familie*

---

*Über alles hat der Mensch Gewalt,  
nur nicht über sein Herz.*

*(Friedrich Hebbel)*

---

Die in der vorliegenden Arbeit enthaltenen Abbildungen

sind im Rahmen eines gemeinsamen Projektes mit

**Frau Alisa Thierij**

entstanden und können demnach, mit gegenseitiger  
Genehmigung, in beiden Arbeiten abgelichtet sein.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>6</b>
<b>Zusammenfassung:.....</b>	<b>8</b>
<b>Abstract (English): .....</b>	<b>9</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>10</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>16</b>
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>18</b>
1.1 Die Herzkatheter-Untersuchung.....	18
1.1.1 Herzkatheter-Eingriffe im Allgemeinen.....	18
1.1.2 Was ist eine Herzkatheter-Untersuchung?.....	18
1.1.3 Unterscheidung zwischen diagnostischer und interventioneller Herzkatheter-Untersuchung .....	18
1.1.4 Formen der diagnostischen Herzkatheter-Untersuchung.....	19
1.1.5 Die interventionelle Herzkatheter-Untersuchung.....	19
1.1.6 Herzkatheter-Untersuchung beim Kind .....	20
1.2 Angeborene Herzfehler .....	20
1.2.1 Allgemeines.....	20
1.2.2 Spektrum der angeborenen Herzfehler .....	21
1.3 Die Modelle und Zielsetzung der Arbeit .....	26
<b>2. Material und Methoden .....</b>	<b>27</b>
2.1 Der Grundgedanke.....	27
2.2 Entwicklung von 3D-gedruckten Modellen in drei Generationen.....	27
2.2.1 Modelle der ersten Generation.....	28
2.2.2 Modelle der zweiten Generation.....	31
2.2.3 Modelle der dritten Generation .....	33
2.3 Der Herzkatheter-Kurs – Trainingsmodule und Teilnehmer.....	36
2.4 Statistik.....	37
<b>3. Ergebnisse .....</b>	<b>38</b>
3.1 Trainingskurse.....	38
3.2 Ablauf des Herzkatheter-Kurses in Trainingsmodulen .....	39
3.2.1 Trainingsmodul 1 – Theoretische Einführung.....	39
3.2.2 Trainingsmodul 2 – Positionieren und Zentrieren der Herzmodelle .....	42
3.2.3 Trainingsmodul 3 – Die Instrumente .....	45
3.2.4 Trainingsmodul 4 – Das Handling mit den Instrumenten .....	48
3.2.5 Trainingsmodul 5 – Training am Modell .....	51
3.2.6 Trainingsmodul 6 – Die Ballondilatation .....	53
3.3 Darstellung des Ablaufs eines HK-Kurses am LMU Klinikum .....	56
3.4 Durchleuchtungszeiten.....	58
3.4.1 Studentenkurs .....	58
3.4.2 Ärztekurs .....	60
3.4.3 Entwicklung der Durchleuchtungszeiten im Rahmen der Trainingskurse .....	64

---

3.4.4	Kursübergreifender Vergleich der prozentualen Veränderung pro Teilnehmer mit mehreren Durchläufen.....	66
<b>4.</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>67</b>
4.1	Lehre .....	68
4.2	Herzkatheteruntersuchung und angeborene Herzfehler .....	68
4.3	Simulationstraining in der Pädiatrie.....	69
4.3.1	Vorteile von derartigen Simulationstrainings im Herzkatheterlabor.....	69
4.3.2	Durchleuchtungszeiten.....	70
4.4	Äthiopien .....	70
<b>5.</b>	<b>Schlussfolgerung .....</b>	<b>72</b>
	<b>Publikationsliste .....</b>	<b>73</b>
	<b>Danksagung .....</b>	<b>74</b>
	<b>Affidavit .....</b>	<b>75</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>76</b>

## Zusammenfassung:

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines realitätsnahen Trainingsmoduls zum Erlernen der einzelnen Schritte von diagnostischen und interventionellen Herzkatheter-Eingriffen bei der Therapie von angeborenen Herzfehlern und im Zuge dessen die Etablierung eines neuen Aus- und Weiterbildungskonzepts in der Pädiatrischen Kardiologie.

Durch die Verwendung von Herzmodellen unterschiedlicher Größen, basierend auf anonymisierten CT-Datensätzen von pädiatrischen Patienten kann eine adäquate Realitätsnähe der Simulation erreicht werden. Es wurden jeweils Modelle mit einer normalen Herzanatomie sowie mit den häufigsten Herzfehlern entwickelt, zu denen neben dem Vorhofseptumdefekt, dem Ventrikelseptumdefekt und dem persistierendem Ductus arteriosus auch die Aortenisthmusstenose, die Aortenklappenstenose und die Pulmonalklappenstenose zählen.

Im Zuge des Projekts fanden national und international schließlich mehrere Hands-on-Trainingskurse statt. Um eine stetige Verbesserung der Trainingseinheiten zu erzielen, wurden die 3D-gedruckten Herzmodelle kontinuierlich einerseits anhand der Rückmeldungen durch die Teilnehmer und andererseits anhand der Lernkurven im Sinne einer Verkürzung der benötigten Durchleuchtungszeiten bei den Simulationsdurchläufen reevaluiert und modifiziert.

Es konnte gezeigt werden, dass durch Optimierung des Modells und kontinuierliches Training eine Reduktion der Durchleuchtungszeit erzielt werden kann. Die Auswertung der Fragenbögen unter den Teilnehmern aller Erfahrungsstufen zeigte zudem eine hohe Akzeptanz dieser Ausbildungsform. In diesem Zusammenhang ist auf die Doktorarbeit von Alisa Thierij zu verweisen. Damit reiht sich dieses Modell und die damit verbundenen Ergebnisse in die bereits bekannte Erfahrung zur Beurteilung derartiger Simulationsmöglichkeiten ein.

Diese neue Trainingsform bietet zukünftig wertvolle Möglichkeiten in der Aus- und Weiterbildung junger, im Herzkatheter-Labor tätiger, Kollegen und bietet Potential, sich als fester Bestandteil in der interventionellen (Kinder-) Kardiologie zu etablieren.

Modelle weiterer Herzfehler sind in Planung. Langfristiges Ziel ist die Entwicklung eines flüssigkeitsgefüllten, pulsatilen 3D-gedruckten Herzmodells, anhand dessen weitere Herzkatheter-Techniken wie beispielsweise die Durchführung intrakardialer Druckmessungen und Angiographien erlernt werden können. Durch ein derartiges Modell wird zudem sowohl das visuelle als auch das haptische Feedback weiter verbessert.

Die Ergebnisse der Studie wurden bereits erfolgreich im Journal for Medical Education eingereicht und publiziert.

## **Abstract (English):**

The aim of the project is the development of a new concept for training paediatric cardiologists to perform the most important steps of diagnostic and interventional cardiac catheter interventions in the therapy of congenital heart defects.

Realistic training conditions are ensured using 3D printed heart models based on anonymous CT scans of paediatric patients. Models chosen for the trainings include the physiologic anatomy as well as the most common congenital heart defects such as atrial septal defect, ventricular septal defect and persistent ductal arteriosus, as well as aortic isthmus stenosis, aortic stenosis and pulmonary stenosis.

Several hands-on training sessions took place nationally and internationally. In order to constantly improve the training units as well as the newly developed 3D-printed heart models, every simulation unit was re-evaluated and modified at the end of each session. The evaluation included feedback from participants based on a questionnaire. This questionnaire focuses on the training schedule and the models as well as on the progress of the required fluoroscopy times during the simulation process at the same time.

Finally, the results of this project could demonstrate a reduction in fluoroscopy time through continuous training. The evaluation of the questionnaires among the participants of all experience levels further showed a high acceptance of this new training method. In this context, the thesis written by Alisa Thierij is part of the project. This model and training course as well as its results are in concordance with the experience by other models published in this topic of simulation based education and training.

All in all, this new form of training offers valuable future opportunities for young colleagues training and working in the cardiac catheterisation laboratory. This type of training is very likely to become an important part in the education and training of interventional (paediatric) cardiology.

Further models of cardiac defects are in the planning stage. One long-term goal is to develop a fluid-filled, pulsatile 3D printed heart model that can be used for training further cardiac catheterisation techniques such as performing intra-cardiac pressure measurements and angiographies. This method offers several benefits, such as the enhancement of haptic and visual feedback.

The results of the study have already successfully been submitted to the Journal for Medical Education and are already published.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Materialfindung: Modelle der ersten Generation aus Plastik: Darstellung eines Herzens aus a) Plastikzitrone. b) Plastikbirne. c) Plastikosterei. d) Plastikkartoffel mit jeweils abgehendem Kunststoffschlauch, der Aorta entsprechend..... 27

Abbildung 2: Schematische Skizze eines Modells einer Pulmonalklappenstenose der ersten Generation: Darstellung der rechten Herzhälfte als Zylinder mit zentral liegender Trennplatte, der Trikuspidalklappe entsprechend. Darstellung des Abgangs des Truncus pulmonalis über eine Pulmonalklappenstenose sowie Darstellung der Abgänge von V. cava superior und inferior.... 28

Abbildung 3: Schematische Skizze eines Modells einer kombinierten Aortenklappen- und Aortenisthmusstenose der ersten Generation: Darstellung des linken Ventrikels als Zylinder mit Abgang der Aorta über eine Aortenklappenstenose sowie Darstellung einer Aortenisthmusstenose zwischen Aortenbogen und Aorta descendens..... 29

Abbildung 4: a-c) Modell einer Pulmonalklappenstenose der ersten Generation aus Silikonschläuchen und -platten (entsprechend der obigen Skizzierung, siehe Abbildung 2): Darstellung der rechten Herzhälfte als Zylinder mit zentral liegender Trennplatte, der Trikuspidalklappe entsprechend. Darstellung des Truncus pulmonalis Abgangs über eine Pulmonalklappenstenose sowie Darstellung der Abgänge von V. cava superior und inferior. a) Ansicht des gesamten Modells ohne schematische Darstellung des Aortenbogens. b) Ansicht des Modells von links mit schematischer Darstellung des Aortenbogens. c) Ansicht des Modells von rechts mit schematischer Darstellung des Aortenbogens. .... 29

Abbildung 5: a-d) Kombiniertes Modell einer Aortenklappen- und Aortenisthmusstenose der ersten Generation aus Silikonschläuchen mit Abgängen der Aorta (von links nach rechts: Truncus brachiocephalicus mit Aufteilung in A. subclavia dextra und A. carotis dextra, A. carotis sinistra sowie A. subclavia sinistra, Aa. renales) bis hin zur Bifurkation in Aa. iliaca externa mit Abgängen (Aa. iliaca interna). a) Ansicht des Modells von seitlich bis zur Bifurkation mit Darstellung der Aa. iliaca externa. b) Ansicht von seitlich bis zur Aorta descendens mit Abgängen (von links nach rechts: Truncus brachiocephalicus mit Aufteilung in A. subclavia dextra und A. carotis dextra, A. carotis sinistra sowie A. subclavia sinistra). c) Ansicht von vorne bis zur Aorta descendens mit Abgängen. (von links nach rechts: Truncus brachiocephalicus mit Aufteilung in A. subclavia dextra und A. carotis dextra, A. carotis sinistra sowie A. subclavia sinistra). d) Ansicht des gesamten Modells von seitlich bis zur Bifurkation mit Darstellung der Aa. iliaca externa mit Abgängen (Aa. iliaca interna). .... 30

Abbildung 6: a-d) Modelltestung im HK-Labor: Modell einer kombinierten Aortenklappen- und Aortenisthmusstenose der ersten Generation aus Silikonschläuchen: Physiologische Darstellung des arteriellen Systems a) Ansicht von vorne bis inklusive Bifurkation mit Darstellung der linken Herzhälfte als Zylinder und Abgang der Aorta mit einzelnen Abgängen (von oben nach unten: Aa. splenicae, Aa. renales, Bifurkation mit Aufteilung in Aa. iliaca externa). b) Darstellung der Aortenbifurkation mit Aufteilung in Aa. iliaca externa sowie Darstellung der Aa. iliaca interna als Abgänge und Darstellung der angebrachten Schleuse nach Punktion der A. iliaca externa. c) Ansicht des Modells von seitlich mit Aortenbogen und Abgängen bis hin zur Bifurkation. d) Ansicht des gleichen Modells von unten auf dem HK-Tisch liegend unter der Röntgenanlage. (Mit gegenseitiger Genehmigung sind die Abbildungen auch in der Arbeit von Alisa Thierij abgelichtet).  
..... 30

- Abbildung 7: a-e) Modell des arteriellen Systems der ersten Generation aus Silikonschläuchen und -platten unter Durchleuchtung. a) Durchleuchtung des linken Ventrikels von seitlich mit Darstellung des Drahtes über die Aortenklappenstenose in die Aorta reichend. b) Durchleuchtung des linken Ventrikels von vorne mit Darstellung des Drahtes über die Aortenstenose in die Aorta reichend. c+d) Durchleuchtung des Aortenbogens von seitlich mit Darstellung des Drahtes. e) Durchleuchtung des Aortenbogens mit Darstellung der Abgänge..... 31
- Abbildung 8: a-b) Modell der zweiten Generation: 3D-gedrucktes Modell der Pulmonalklappenstenose nach Fertigstellung vor der Auswaschung und vor dem Ablösen des Stützmaterials aus Silikon: Darstellung der rechten Herzhälfte als Zylinder mit spitz zulaufendem Ende und Abgängen entsprechend Abb. 2. (Abgänge: A. cava superior und inferior, Abgang Truncus pulmonalis über die Pulmonalklappenstenose mit Aufteilung in Aa. pulmonales) a) Ansicht von oben. b) Ansicht von seitlich. .... 32
- Abbildung 9: Modell der zweiten Generation: 3D-gedrucktes Modell der Pulmonalklappenstenose bei Auswaschen und Ablösen des Stützmaterials aus Silikon. a) Auswaschen des Modells. b) Modelldarstellung während des Auswaschens: Darstellung der rechten Herzhälfte als Zylinder mit spitz zulaufendem Ende und Abgängen entsprechend Abb. 2. (Abgänge: A. cava superior und inferior, Abgang Truncus pulmonalis über die Pulmonalklappenstenose mit Aufteilung in Aa. pulmonales). c) Ablösen des Stützmaterials aus Silikon. (Mit gegenseitiger Genehmigung sind die Abbildungen auch in der Arbeit von Alisa Thierij abgelichtet)..... 32
- Abbildung 10: Modell der zweiten Generation: 3D-gedrucktes Modell der Pulmonalklappenstenose nach Ablösen Stützmaterials aus Silikon. Darstellung der rechten Herzhälfte als Zylinder mit spitz zulaufendem Ende und Abgängen (von links nach rechts: Abgang Truncus pulmonalis über die Pulmonalklappenstenose mit Aufteilung in die Aa. pulmonales, A. cava superior und inferior. a+b) Ansicht von vorne und seitlich. c) Ansicht von vorne nach Anbringen eines Silikonschlauchs der Aorta entsprechend, bei Modelltestung im HK-Labor. ... 32
- Abbildung 11: a-d) Anfertigung eines 3D-Modells der dritten Generation mittels Software-Programm: Persistierender Ductus arteriosus. a) Ansicht von vorne. b) Ansicht von seitlich mit Pfeil zur Markierung des Persistierenden Ductus arteriosus. c) Darstellung der anatomischen Verhältnisse mit Ansicht von innen. d) Darstellung des Persistierenden Ductus arteriosus mit Größenangabe. .... 33
- Abbildung 12: a-f) Anfertigung eines 3D-Modells der dritten Generation mittels Software-Programm: Pulmonalklappenstenose a+b) Ansicht von vorne. c) Darstellung der anatomischen Verhältnisse im Inneren des Modells. d) Ansicht von hinten. e) Darstellung der Pulmonalklappenstenose mit Größenangabe. .... 34
- Abbildung 13: Anfertigung eines 3D-Modells der dritten Generation mittels Software-Programm: Linkes Herz mit Aortenklappenstenose. a) Darstellung des linken Herzens von vorne. b) Darstellung des linken Herzens mit Fokus auf die Aortenklappenstenose. c) Darstellung der anatomischen Verhältnisse des linken Herzens als Innenansicht. d) Darstellung der Aortenklappenstenose mit Größenangabe..... 34
- Abbildung 14: Anfertigung eines 3D-Modells der dritten Generation mittels Software-Programm: Aortenisthmusstenose. a) Darstellung von vorne. b) Darstellung der anatomischen Verhältnisse als Innenansicht. c) Darstellung des Modells mit Aortenisthmusstenose von seitlich. d) Darstellung der Aortenisthmusstenose mit Größenangabe..... 35

- Abbildung 15: Anfertigung eines 3D-Modells der dritten Generation mittels Software-Programm: Vorhofseptumdefekt. a) Ansicht von vorne. b) Darstellung der anatomischen Verhältnisse als Innenansicht. c) Darstellung des Vorhofseptumdefekts mit Größenangabe. .... 35
- Abbildung 16: Anfertigung eines 3D-Modells der dritten Generation mittels Software-Programm: Ventrikelseptumdefekt. a) Ansicht von seitlich. b+c) Darstellung der anatomischen Verhältnisse als Innenansicht..... 35
- Abbildung 17: 3D-gedruckte Modelle in verschiedenen Größen entsprechend des Herzens 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. Bildquelle: Brunner BS et al. 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..... 36
- Abbildung 18: Geräte im HK-Labor. 1: Empfänger, 2: Bildschirm, 3: beweglicher Tisch, 4: Röntgenröhre. ....39
- Abbildung 19: Steuerungsboard, um den Tisch entsprechend zu bewegen. 1: Griff, um den Tisch zu bewegen: kopfwärts/fußwärts/hinweg/hinzu. 2: Griff, um die Röntgenröhre zu bewegen: näher an das Objekt hin/weiter vom Objekt weg. 3: Griff, um den Tisch zu bewegen: deckenwärts/bodenwärts..... 40
- Abbildung 20: a-b) Demonstration der Tischbewegung nach a) kopfwärts und b) fußwärts. .... 40
- Abbildung 21: a-b) Demonstration: Bewegung der Röntgenröhre näher an das Objekt bzw. weiter weg vom Objekt. a) näher = kleinerer Objekt-Empfänger-Abstand = vergrößertes Bild = kleinerer Ausschnitt b) weiter weg = größerer Objekt-Empfänger-Abstand = verkleinertes Bild = größerer Ausschnitt. .... 41
- Abbildung 22: a-c) 3D-gedrucktes Modell eines physiologischen Herzens der Größe eines Neugeborenen-Herzens entsprechend. a) Ansicht von vorne. b) Ansicht von der linken Seite. c) Ansicht von der rechten Seite..... 42
- Abbildung 23: Demonstration der richtigen Platzierung von Patienten auf dem Untersuchungstisch. In diesem Fall Positionieren der Puppe auf dem HK-Tisch nach dem Einsetzen des 3D-gedruckten Herzens..... 42
- Abbildung 24: a) Richtige Positionierung des Tisches durch Bewegung nach deckenwärts und Heranfahren der Röhren. b) Erste Durchleuchtungskontrolle zur Evaluierung der Platzierung von Herz und Puppe bei noch nicht richtiger Position des Kopfes und damit Überlagerung der darzustellenden Strukturen..... 43
- Abbildung 25: a-b) Darstellung der Puppe auf dem HK-Tisch a) vor und b) nach der richtigen Positionierung des Kopfes zur Seite. Bildquelle: Brunner BS et al. 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. .... 43
- Abbildung 26: a-b) Durchleuchtungskontrolle zur Evaluierung der Positionierung des Kopfes a) vor und b) nach der richtigen Positionierung des Kopfes zur Seite. Bildquelle: Brunner BS et al. 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. ....	43
Abbildung 27: a-b) Durchleuchtungskontrolle zur Positionierung des Armes a) vor und b) nach der richtigen Positionierung des Armes nach oben. ....	44
Abbildung 28: a-d) Die verschiedenen Herzkatheter: a) Koronarkatheter. b) Multipurpose-Katheter. c) Pigtail-Katheter. d) Ballonkatheter. Mit gegenseitiger Genehmigung sind die Abbildungen auch in der Arbeit von Alisa Thierij abgelichtet). ....	45
Abbildung 29: Schematische Darstellung: a) Passage eines vorgeformten Multipurpose-Katheters in den rechten Vorhof und rechten Ventrikel mittels Führungsdraht. b) Darstellung des Katheters im rechten Vorhof nach Drehen des Katheters in Richtung der Trikuspidalklappe. c) Verschieben des Katheters über die Trikuspidalklappe in den rechten Ventrikel. ....	46
Abbildung 30: Schematische Darstellung: Passage eines vorgeformten Multipurpose-Katheters aus dem rechten Vorhof über den rechten Ventrikel in die Pulmonalarterie mittels Führungsdraht. a) Darstellung des Katheters nach Passage der Trikuspidalklappe von dem rechten Vorhof in den rechten Ventrikel und Verschieben in Richtung der Pulmonalklappe. b) Darstellung des Katheters im rechten Ventrikel mit Verschieben des Führungsdrahtes über die Pulmonalklappe in die Pulmonalarterie. c) Darstellung des Katheters in der Pulmonalarterie nach Passage der Pulmonalklappe nach Verschieben des Katheters und Zurückziehen des Führungsdrahtes. ...	46
Abbildung 31: Schematische Darstellung der Passage eines Pigtail-Katheters über die Aortenklappe in den linken Ventrikel mittels Führungsdraht. a) Darstellung des Katheters in der Aorta ascendens. b) Darstellung des Katheters in der Aorta ascendens mit Verschieben des Führungsdrahtes über die Aortenklappe in den linken Ventrikel. c) Darstellung des Katheters im linken Ventrikel nach Verschieben des Katheters über die Aortenklappe. ....	47
Abbildung 32: Einführschleusen, bestehend aus abnehmbarem hämostatischem Ventil, 3-Wege-Hahn und Dilatator. ....	47
Abbildung 33: a-b) Darstellung der unterschiedlichen Drahtenden. a) weiches Ende. b) hartes Ende. ....	48
Abbildung 34: a-c) Das Handling mit der Schleuse: a) Fixieren der Einführschleuse auf dem HK-Tisch. b) Entfernen des hämodynamischen Ventils aus der Einführschleuse. c) Einführschleuse nach Entfernen des Ventils. ....	49
Abbildung 35: a) Darstellung der Einführhilfe beim Einfädeln des Drahtes. b) Einführhilfe mit eingefädeltm Draht. c) Darstellung von Draht und Einführhilfe nach Einbringen in die Einführschleuse. ....	49
Abbildung 36: a-c) Aufrollen des Drahtes in mehreren Schritten. ....	49
Abbildung 37: a) Spülen des Katheters. b) Zusammenführen von Draht und Katheter. c) Einfädeln des Drahtes. ....	50
Abbildung 38: a) Katheter mit eingefädeltm Draht. b) Katheter in Schleuse einführen. c) Katheter schieben, Draht halten. ....	50
Abbildung 39: a) Darstellung von Katheter und Draht nach Einführen in Schleuse. b) Resultat nach Verschieben des Drahtes. ....	50
Abbildung 40: a) Draht mit Daumen und Zeigefinger halten. b) Katheter mit dem kleinen Finger und dem Ringfinger ziehen. Bildquelle: Brunner BS et al. 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.....	50
Abbildung 41: a) Positionieren und Zentrieren des Modells. b) Draht vorschieben in den rechten Vorhof, Katheter nachschieben. ....	51
Abbildung 42: a) Vorschieben des Drahtes in die V. cava superior, Katheter nachschieben. b) Resultat. ....	51
Abbildung 43: a) Darstellung des Katheters im RA. b) Vorschieben des Katheters über die TK in den RV.....	52
Abbildung 44: a) Drehen von Draht und Katheter. b) Vorschieben des Katheters über die PK in die Pulmonalarterie.....	52
Abbildung 45: a) Vorschieben von Draht und Katheter bis zur Aortenklappe. b) Resultat. ....	53
Abbildung 46: a) Sondieren der Klappe. b) Einbringen von Draht und Katheter in den linken Ventrikel.....	53
Abbildung 47: a) Ballonkatheter in zusammengefaltetem Zustand sowie bei b) maximaler Füllung mit Kochsalzlösung. Die beiden Punkte auf dem Katheter beschreiben den Bereich des Ballons, zwischen dem der maximale Ballondurchmesser gewährleistet ist.....	54
Abbildung 48: Ballonkatheter, der im Bereich einer Engstelle (hier dargestellt durch das Gummi) entfaltet wird. a) Darstellung des Ballonkatheters im unentfalteten Zustand. b) Mit zunehmendem Druck und zunehmender Füllung entfaltet sich der Ballon im Verlauf immer mehr, bis er schließlich c) komplett entfaltet ist und die Engstelle komplett aufgedehnt ist. ....	55
Abbildung 49: a+b) Vorschieben von Draht und Katheter über die Aorta descendens bis vor die Aortenisthmusstenose mit Drehen des Drahtes. c) Passieren der Aortenisthmusstenose. ....	56
Abbildung 50: a) Vorschieben von Draht und Katheter bis vor die Aortenklappe nach Passieren der Aortenisthmusstenose. b) Vorschieben von Draht und Katheter über die Aortenklappe bis in den linken Ventrikel und Aufdehnen des Ballonkatheters im Bereich der Aortenisthmusstenose. c) Maximal entfalteter Ballonkatheter mit Aufdehnen der Engstelle. ....	56
Abbildung 51: Durchleuchtung eines 3D-gedruckten Herzmodells mit physiologischer Herzanatomie des linken Herzens in zwei Ebenen. (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. Bildquelle: Brunner BS et al. 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. ....	57
Abbildung 52: Ballondilatation von Stenosen im 3D-gedruckten Herzmodell unter Durchleuchtung (AS = Aortenklappenstenose, PS = Pulmonalklappenstenose, LV = linker Ventrikel, LA = linker Vorhof, RV = rechter Ventrikel, RA = rechter Vorhof). A: Durchleuchtungsaufnahme des 3D-gedruckten Herzmodells einer AS mit inflatiertem Dilatationsballon. B: Durchleuchtungsaufnahme des 3D-gedruckten Herzmodells einer PS mit inflatiertem Dilatationsballon. Bildquelle: Brunner BS et al. 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.....	57

Abbildung 53: Modelltestung im Rahmen des Trainingskurses für Studierende im HK-Labor, Klinikum Großhadern: Ergebnisse und Vergleich der DL-Zeiten der drei Übungsrunden am anatomisch korrekten Modell (Durchlauf 1 und 2) sowie am Modell der Pulmonalklappenstenose (Durchlauf 3).....	58
Abbildung 54: Vergleich der benötigten mittleren DL-Zeiten der drei Durchgänge im Rahmen des Studentenkurses im Klinikum Großhadern, gemessen in Sekunden.....	59
Abbildung 55: Modelltestung im Rahmen eines Kurses für Ärzte im HK-Labor, Klinikum Großhadern: Ergebnisse und Vergleich der DL-Zeiten der zwei Übungsrunden am Modell der Pulmonalklappenstenose. ....	60
Abbildung 56: Vergleich der benötigten mittleren DL-Zeit der zwei Durchgänge im Rahmen des Ärztekurses im Klinikum Großhadern, gemessen in Sekunden.....	61
Abbildung 57: Modelltestung im Rahmen eines Kurses für Ärzte im HK-Labor, Allgemeines Krankenhaus der Stadt Wien: Ergebnisse und Vergleich der DL-Zeiten der Übungsrunde am Modell der Pulmonalklappenstenose mit Darstellung des Mittelwertes (rote Linie). ....	61
Abbildung 58: Modelltestung sowie Durchgang am Patienten im Rahmen eines Kurses für Ärzte im HK-Labor, Ayder Referral Hospital, Mekelle: Ergebnisse und Vergleich der DL-Zeiten der zwei Übungsrunden am Modell der Pulmonalklappenstenose sowie am Patienten mit Pulmonalklappenstenose. ....	62
Abbildung 59: Modelltestung im Rahmen eines Kurses für Ärzte im HK-Labor, Ayder Referral Hospital, Mekelle: Ergebnisse und Vergleich der DL-Zeiten der vier Übungsrunden am Modell der Pulmonalklappenstenose eines „Adult Hearts“.....	64
Abbildung 60: Modelltestung im Rahmen eines Kurses für Ärzte im HK-Labor, Ayder Referral Hospital, Mekelle: Ergebnisse und Vergleich der DL-Zeiten der vier Übungsrunden am Modell der Pulmonalklappenstenose eines „Medium Hearts“.....	65
Abbildung 61: Modelltestung im Rahmen eines Kurses für Ärzte im HK-Labor, Ayder Referral Hospital, Mekelle: Ergebnisse und Vergleich der DL-Zeiten der vier Übungsrunden am Modell der Pulmonalklappenstenose eines „Small Hearts“.....	65
Abbildung 62: Kursübergreifender Vergleich der prozentualen Veränderung pro Teilnehmer mit mehreren Durchläufen verglichen mit einer prozentualen Veränderung von 0, der Baseline entsprechend. ....	65

## Abkürzungsverzeichnis

AHF	angeborene Herzfehler
AI	Aortenklappeninsuffizienz
AK	Aortenklappe
ALS	Advanced Life Support
AS	Aortenklappenstenose
ASD	Vorhofseptumdefekt
AVSD	atrioventrikulärer Septumdefekt
CMP	Kardiomyopathie
CT	Computertomographie
DL	Durchleuchtung
EPALS	European Pediatric Advanced Life Support
EPILS	European Pediatric Immediate Life Support
GIZ	Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
HK	Herzkatheter
HLHS	hypoplastisches Linksherz-Syndrom
HMV	Herzminutenvolumen
HOCM	hypertrophe obstruktive Kardiomyopathie
HZV	Herzzeitvolumen
ILS	Immediate Life Support
ISTA	Aortenisthmusstenose
KHK	koronare Herzkrankheit
KM	Kontrastmittel
LA	linkes Atrium
LV	linker Ventrikel
MI	Myokardinfarkt
MRT	Magnetresonanztomographie
NGOs	Non-Governmental Organisations
NLS	Neonatal Life Support
O2	Sauerstoff
OP	Operation
OPs	Operationen
PA	Pulmonalarterie
PDA	persistierender Ductus arteriosus

---

PFO	persistierendes Foramen ovale
PGE	Prostaglandin E
PHT	pulmonale Hypertonie
PK	Pulmonalklappe
PS	Pulmonalklappenstenose
RA	rechtes Atrium
RV	rechter Ventrikel
TK	Trainingskurs
TN	Teilnehmer
VSD	Ventrikelseptumdefekt

# 1. Einleitung

## 1.1 Die Herzkatheter-Untersuchung

### 1.1.1 Herzkatheter-Eingriffe im Allgemeinen

Den medizinischen Fortschritten ist es zuzuschreiben, dass sowohl die Untersuchungsmethoden als auch die Eingriffe ständig präzisiert und die dafür benötigten Instrumente laufend verbessert werden. Die Anzahl der Herzkatheter (HK)-Eingriffe steigt in Deutschland seit Jahren erheblich an. Dies gilt auch für den Bereich der Pädiatrischen Kardiologie. Es ist ein Wandel eingetreten, weg von den rein diagnostischen, die Anatomie und Hämodynamik evaluierenden Eingriffen hin zu interventionellen Verfahren, anhand derer angeborene Herzfehler (AHF) behandelt werden können. (1, 2) Trotz modernster technischer Ausstattung der HK-Labore hat sich an der praktischen Ausbildung jedoch nicht viel geändert. Nach wie vor geschieht diese im Wesentlichen durch Lernen an Patienten unter fachgerechter Anleitung erfahrener Ärzte. Die Untersuchungen an sich werden immer komplexer und anspruchsvoller, weshalb sie gerade für junge Mediziner eine große Herausforderung darstellen. (3, 4) Da es sich bei der Medizin um eine Disziplin handelt, die viele Erfahrungswerte erfordert, ist es sinnvoll und zeitgemäß, die praktische Ausbildung im HK-Labor zu überdenken und neu zu gestalten. (5)

Es ist daher erstrebenswert, eine Trainingsmöglichkeit zu entwickeln, bei der einerseits das Patientenwohl geschützt und andererseits die Routine der interventionell tätigen Kollegen gesteigert werden kann. Mit der Entwicklung realer Herzmodelle zum Training und zur Therapie von AHF ist eine Lösung für diese Problematik vorstellbar.

### 1.1.2 Was ist eine Herzkatheter-Untersuchung?

Bei einer HK-Untersuchung handelt es sich um ein minimal-invasives Verfahren zur Diagnostik und Therapie von krankhaften Veränderungen des Herzens, des Herzmuskels sowie der Herzkranzgefäße und der Herzklappen, bei der die jeweiligen Bereiche sehr präzise angesteuert und bildlich dargestellt werden. (6-8) Es können während der Untersuchung für Analysezwecke zusätzlich auch Blut- und Gewebeproben entnommen, Kontrastmittel (KM) appliziert sowie Röntgenbilder aufgezeichnet und über den Bildschirm analysiert werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, für die Bestimmung von Temperatur, Druck oder Sauerstoffgehalt ( $O_2$ ) kleine Messgeräte mit dem Katheter einzuführen. (9-11) Die im Zuge der Untersuchung ermittelten Messwerte liefern aussagekräftige Parameter zur Beurteilung der Funktion und Perfusion des Herzens, des Blutflusses sowie des Herzzeitvolumens (HZV) bzw. des Herzminutenvolumens (HMV). Damit können oxymetrische Parameter, Druckverhältnisse, Shunt-Volumina, Klappenöffnungsflächen und Klappeninsuffizienzen sowie Widerstände im Kreislauf erfasst werden. (12-16) Die diagnostische HK-Untersuchung dient der Bestimmung anatomischer und hämodynamischer Verhältnisse. (17)

### 1.1.3 Unterscheidung zwischen diagnostischer und interventioneller Herzkatheter-Untersuchung

Dient die HK-Untersuchung lediglich der Verschaffung von diagnostischer Klarheit bei fraglichen Befunden, der Aufdeckung von Struktur- oder Funktionsveränderungen sowie der Beschaffung

zusätzlicher, für eine bevorstehende Operation (OP) erforderlicher Informationen, spricht man von der diagnostischen HK-Untersuchung. Ihr gegenüber steht die interventionelle HK-Untersuchung. Unter diesem Begriff werden die therapeutischen Eingriffe subsummiert, die entweder auf den vollständigen Ersatz einer OP abzielen oder präoperativ sowie postoperativ ergänzend zum Einsatz kommen. (18)

Während HK-Untersuchungen früher rein diagnostischen Zwecken dienten, gewinnt der interventionelle Aspekt heutzutage immer mehr an Bedeutung. (19) Diese Entwicklung ist auch in der Kinderkardiologie ersichtlich, da Katheterinterventionen in diesem Bereich bereits 60-80 % aller HK-Eingriffe ausmachen. (20, 21) Durch diese weniger invasive Behandlungsform können Operationen (OPs) am offenen Herzen vielfach umgangen werden, was aufgrund der niedrigeren Komplikationsrate zur Steigerung der Patientensicherheit sowie zur Optimierung des Gesamtergebnisses führt. (22)

#### **1.1.4 Formen der diagnostischen Herzkatheter-Untersuchung**

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten der diagnostischen HK-Untersuchung. Je nach Fragestellung, Befundermittlung und Untersuchungsziel kommt entweder die Linksherzkatheterisierung oder die Rechtsherzkatheterisierung zum Einsatz, wobei auch eine Kombination beider Methoden möglich und im Bereich der Kinderkardiologie Routine ist. Die Wahl des Zuganges hängt von verschiedenen Faktoren ab, unter anderem auch von den anatomischen Gegebenheiten der Patienten. (7, 23-26)

##### **1.1.4.1 Diagnostische Rechtsherzkatheter-Untersuchung**

Die Rechtsherzkatheterisierung erfolgt anterograd und transvenös, wobei hier der Katheter über eine große Vene zum rechten Ventrikel (RV) vorgeschoben wird. Dadurch gewinnt man aufschlussreiche Kenntnisse über das rechte Herz, die Pulmonalarterien (PA) sowie die Hohlvenen. Im Rahmen der Untersuchung können sowohl das Herzzeitvolumen (HZV), die Druckwerte im RV und in den PA als auch die O<sub>2</sub>-Sättigung sowie die Temperaturwerte im kleinen Kreislauf ermittelt werden. (23, 24, 27, 28) Der gemessene Druck an der Katheterspitze distal des Ballons entspricht somit nur noch dem in den (Lungen-)Venen vorherrschenden Druck bzw. dem des linken Vorhofs (LA). (13, 23, 28-30)

##### **1.1.4.2 Diagnostische Linksherzkatheter-Untersuchung**

Die häufiger zum Einsatz kommende Linksherzkatheterisierung erfolgt retrograd und transarteriell, wobei in diesem Fall der Katheter durch eine periphere Arterie über die Aorta in den linken Ventrikel (LV) eingeführt wird. (13, 25, 31-34). Zum Einsatzgebiet der diagnostischen Linksherzkatheter-Untersuchung zählen neben dem akuten Myokardinfarkt (MI), der koronaren Herzkrankheit (KHK) und den Kardiomyopathien (CMP) vor allem auch AHF und Herzklappenfehler. (6, 13, 31, 35-37)

#### **1.1.5 Die interventionelle Herzkatheter-Untersuchung**

Der Linksherzkatheter wird interventionell am häufigsten zur Ballondilatation der Koronarien bei einem akuten MI oder zur Therapie einer Atherosklerose angewandt, während die interventionelle Rechtsherzkatheterisierung bei Herzklappenerkrankungen und -dysfunktionen, bei pulmonaler Embolie oder Vorhofseptumdefekten (ASD) bzw. AHF zum Einsatz kommt. (6, 13, 23, 25, 26, 31, 33, 35, 38)

### 1.1.6 Herzkatheter-Untersuchung beim Kind

Ebenso haben in der Pädiatrischen Kardiologie sowohl diagnostische als auch interventionelle HK-Untersuchungen Einzug gefunden. (2)

Im Jahr 1966 führte William Rashkind erstmals eine Ballonatrioseptostomie durch. Kurze Zeit später, im Jahr 1967, erfolgte der erste Ductusverschluss durch Werner Porstmann. Mit der im Jahr 1982 erstmals beschriebenen erfolgreichen Durchführung der Ballonvalvuloplastie einer Pulmonalstenose durch Jean S. Kan erzielte die Pädiatrische interventionelle Kardiologie letztlich neue Errungenschaften. Heutzutage stellen interventionelle Vorgehensweisen die Therapie der Wahl bei einer Vielzahl von AHF dar. Sie gelten in diesem Zusammenhang unter anderem bei Eingriffen wie der Dilatation verengter Herzklappen oder anderer Engstellen sowie bei dem Verschluss des persistierenden Ductus arteriosus (PDA) durch Schirmchen oder Coils als Standardverfahren. (39, 40)

Nichtinvasive Bildgebungsmethoden, zu denen beispielsweise die Echokardiographie, die Magnetresonanztomographie (MRT) oder die Computertomographie (CT) zählen, nehmen einen immer wichtigeren Stellenwert in der Diagnostik ein, sodass die Bedeutung der diagnostischen HK-Untersuchung abzunehmen scheint. Aufgrund der Möglichkeit einer direkten und präzisen Darstellung der intrakardialen Bereiche spielt die diagnostische HK-Untersuchung allerdings nach wie vor eine wesentliche Rolle bei der Abklärung unklarer Befunde. (30)

## 1.2 Angeborene Herzfehler

### 1.2.1 Allgemeines

AHF stellen mit einer Prävalenz von etwa 1 % aller Lebendgeburten nach wie vor die häufigste angeborene Organmalformation beim Neugeborenen dar. (41-44)

In einer im Jahr 2018 veröffentlichten Studie konnten Bibi S. et al. zeigen, dass die Prävalenz von AHF im Zeitraum von 1930-1934 bis zum Jahr 1995 von 0,6/1000 auf 9,1/1000 Lebendgeburten angestiegen ist und sich seitdem stabil auf diesem Niveau eingependelt hat. Demnach sind in Deutschland etwa 6500 Säuglinge pro Jahr betroffen. (45) Das Spektrum der AHF ist vielfältig und reicht von einfachen Defekten ohne relevante Auswirkungen auf die klinische Herzfunktion bis hin zu schweren, teilweise lebensbedrohlichen Fehlbildungen. (46)

Ätiologisch spielen laut einer Studie von Hussein S. et al. aus dem Jahr 2014 bei der Entstehung von AHF neben Umweltfaktoren auch genetische Faktoren eine Rolle. Der Studie zufolge sind von den hereditären Ursachen 6 % der Fälle auf eine Chromosomenanomalie, 25 % auf Störungen einzelner Gene und 20-30 % auf multifaktorielle Ursachen zurückzuführen. Weiters sind bei der Entstehung kongenitaler Fehlbildungen auch Umweltfaktoren relevant. In etwa der Hälfte der Fälle bleibt die Ursache hingegen unbekannt. (47)

## 1.2.2 Spektrum der angeborenen Herzfehler

AHF umfassen ein großes Spektrum an Erkrankungen, die sich in folgende Untergruppen einteilen lassen. (48)

1. Links-Rechts-Shunts
  - a. Ventrikelseptumdefekt (VSD)
  - b. Vorhofseptumdefekt (ASD)
  - c. atrioventrikulärer Septumdefekt (AVSD)
  - d. persistierender Ductus arteriosus (PDA)
2. Rechts-Links-Shunt
  - a. Fallot'sche Tetralogie
  - b. Transposition der großen Arterien
3. AHF mit Ausflussbehinderung
  - a. Aortenklappenstenose (AS)
  - b. Aortenisthmusstenose (ISTA)
  - c. Pulmonalklappenstenose (PS)
4. Seltene zyanotische Herzfehler
  - a. hypoplastisches Linksherz-Syndrom
  - b. Pulmonalatresie mit intaktem Ventrikelseptum
  - c. Trikuspidalatresie
  - d. Truncus arteriosus communis
  - e. Morbus Ebstein
  - f. totale Lungenvenenfehlmündung

Im Folgenden werden die wichtigsten AHF mit Links-Rechts-Shunt (VSD, ASD, AVSD, PDA) und Ausflussbehinderungen (AS, ISTA, PS) behandelt, da diese einerseits anhand von 3D-gedruckten Modellen gut nachzustellen und andererseits für Trainingskurse am Modell besonders gut geeignet sind.

### 1.2.2.1 Vorhofseptumdefekt

Mit einer Prävalenz von 10-20 % stellt der ASD einen sehr häufigen AHF dar. In einer Studie zur „Prävalenz angeborener Herzfehler bei Neugeborenen in Deutschland“, kurz PAN-Studie, stellte der ASD mit einem relativen Anteil von 18 % insgesamt den zweithäufigsten AHF dar. (44, 49) Es handelt sich dabei um eine Fehlbildung der Herzscheidewand auf Vorhofebene mit daraus resultierender Shuntverbindung zwischen LA und RA. (50)

Je nach Lage werden generell folgende fünf Typen von ASD unterschieden: (50-52)

- ASD vom Sekundumtyp (ASD II): In 70 % der Fälle handelt es sich bei einem Vorhofseptumdefekt um einen ASD II, der somit die häufigste Form der Vorhofseptumdefekte darstellt und zentral im Foramen ovale liegt.
- ASD vom Primumtyp (ASD I): Hierbei handelt es sich aufgrund der Nähe zu den Atrioventrikularklappen um einen atrioventrikulären Septumdefekt, der insgesamt 20 % aller Fälle ausmacht.
- Sinus-venosus-Defekt: Es wird zwischen einem oberen und einem unteren Defekt unterschieden, wobei diese jeweils an den Einmündungen in das RA liegen.
- Sinus-coronarius-Defekt: Dies ist die seltenste Form des ASD, der Sinus coronarius öffnet sich dabei sowohl in das RA als auch in das LA, wodurch über den Sinus coronarius Blut vom LA in das RA fließen kann.
- Persistierendes Foramen ovale (PFO): Postpartal sollte es zu einer physiologischen Verschmelzung des Septum primum und secundum kommen, in 25 % der Fälle bleibt dieser Verschluss allerdings aus, sodass das Bild eines sogenannten PFO entsteht. Übersteigt der rechtsatriale Druck den Druck im LA, wie es beim Valsalva-Manöver, Tauchen oder bei pulmonaler Hypertonie der Fall sein kann, öffnet sich das Foramen ovale ventilartig, sodass es zur Verschleppung von Thromben aus dem RA in das LA und folglich zu paradoxen Embolien kommen kann.

Kleinere ASD bleiben aufgrund des meist asymptomatischen Verlaufes im Kindesalter häufig unentdeckt und präsentieren sich bei ausbleibendem Spontanverschluss im Erwachsenenalter oft erst durch Komplikationen. (53, 54) Von hämodynamischer Relevanz sind ASD bei Erwachsenen ab einer Größe von etwa 9 mm, wenn es aufgrund der Größe des Defekts und des Druckverhältnisses auf Vorhofebene zu einem bedeutsamen Links-Rechts-Shunt kommt. Mittel der Wahl zur Diagnostik eines ASD stellt die Echokardiographie dar. Ein ASD wird meist im Vorschulalter behandelt, zu den Indikationen für einen Verschluss zählen: (54, 55)

- Zeichen einer Rechtsherzbelastung bzw. -vergrößerung im EKG
- klinische Zeichen einer Herzinsuffizienz
- Prävention von paradoxen Embolien und zerebralen Schlaganfällen
- Durchflussverhältnis Lungen-/Körpervolumen von über 30 % (QP:QS > 1,5:1)
- Frauen im gebärfähigen Alter mit Kinderwunsch (Embolierisiko)

Der Verschluss des ASD kann entweder operativ oder katheterinterventionell erfolgen. Letzteres kommt vor allem für den Verschluss des PFO sowie des ASD II zum Einsatz. Durch den hohen Widerstand sind die Lungen häufig nicht mehr ausreichend perfundiert, der Blutfluss in das LA ist dementsprechend abhängig vom Rechts-Links-Shunt. (50, 52, 53, 56-58)

### 1.2.2.2 Ventrikelseptumdefekt

Der VSD gilt mit einer Prävalenz von über 40 % als häufigster AHF. (59) Pathogenetisch liegt ihm eine Hemmungsfehlbildung der Herzscheidewand zugrunde, wodurch eine interventrikuläre Verbindung entsteht. Das Septum gliedert sich in einen größeren muskulären und einen kleineren membranösen Anteil. Je nachdem, wo sich der Defekt befindet, unterscheidet man verschiedene VSD-Typen, wobei der perimembranöse etwa 70 % aller Kammerscheidewanddefekte ausmacht. Unter normalen Druckverhältnissen handelt es sich beim VSD um einen Links-Rechts-Shunt mit daraus resultierender Mehrdurchblutung der Lungen und entsprechender Volumenbelastung des LV, wobei die Hämodynamik einerseits von der Größe des VSD und andererseits von den Widerständen in den Blutkreisläufen abhängt. Dabei gilt der Durchmesser der Aortenwurzel als Anhaltspunkt bei der Größeneinteilung des VSD. Ein mittelgroßer VSD misst beim Neugeborenen 50-100 % des Durchmessers der Aortenwurzel. Defekte mit Messwerten < 50 % werden als kleine, jene mit Werten > 100 % werden als große VSD bezeichnet. In Relation zu der Defektgröße kommt es in weiterer Folge zur Druck- und Volumenbelastung des Lungenkreislaufes sowie des RV, wodurch es schließlich zur sogenannten Eisenmenger-Reaktion kommt. Dabei handelt es sich um eine Shunt-Umkehr mit daraus resultierendem, zyanotischem Rechts-Links-Shunt über dem Herzfehler. VSD sind grundsätzlich größenstabil, in einigen Fällen kommt es zu einer spontanen Größenregredienz bis hin zum Spontanverschluss. Zu den Indikationen für einen therapeutischen Verschluss des Herzfehlers zählen symptomatische VSD, eine beginnende pulmonale Hypertonie (PHT) oder sekundäre Aortenklappenveränderungen. (50, 52, 60-63)

### 1.2.2.3 Persistierender Ductus arteriosus

Ein PDA ist charakterisiert durch einen postnatal ausbleibenden Verschluss der pränatal physiologischen Kurzschlussverbindung (Rechts-Links-Shunt) zwischen Pulmonalarterienbifurkation und Aorta descendens und zählt etwa 10 % aller AHF. Aufgrund der Druckumkehr postnatal kommt es hämodynamisch zu einer Shuntumkehr mit resultierendem Links-Rechts-Shunt, sodass O<sub>2</sub>-reiches Blut dem Druckgefälle entsprechend von der Aorta in die PA und in weiterer Folge über den Lungenkreislauf ins LA und in den LV zurück sowie in die Aorta ascendens fließt. Während kleine Defekte meist von keiner hämodynamischen Relevanz sind, führen mittlere bis große Shuntverbindungen häufig zu einer Volumenbelastung von Lungenkreislauf und LV. Dadurch kann es zur Entwicklung einer PHT kommen. Die Intervention im HK-Labor mit Schirmchen-Systemen oder Coils stellt in der Behandlung des PDA die Methode der Wahl dar. Normalerweise erfolgt der Verschluss bei nicht herzinsuffizienten Patienten im Vorschulalter, wenn ein Spontanverschluss beinahe ausgeschlossen werden kann. Generell geht man davon aus, dass es lediglich bei 10 % aller Fälle zu einem Spontanverschluss des PDA jenseits des dritten Lebensmonats kommt. (31, 50, 52, 58, 64)

### 1.2.2.4 Aortenisthmusstenose

Eine ISTA ist als aortale Einengung am Übergangsbereich des distalen Aortenbogens in die absteigende Aorta definiert und stellt in etwa 3-5 % aller AHF dar. (65, 66)

Im Hinblick auf die Pathogenese der ISTA sind zwei Theorien gängig: Zum einen wird davon ausgegangen, dass die Entstehung der ISTA vor allem auf einer verminderten Durchblutung des Aortenbogens und der Isthmusregion während der Embryonalzeit beruht, da einige Herzfehler tatsächlich zu einer intrauterinen Minderperfusion der genannten Bereiche führen, die in weiterer Folge hypoplastisch bleiben. Zum anderen wird davon

ausgegangen, dass ein Zusammenhang zwischen der Entstehung einer ISTA und dem Verschluss des offenen Ductus arteriosus besteht. Diese Theorie basiert darauf, dass es häufig direkt nach dem Ductusverschluss zur klinischen Manifestation der ISTA kommt, wenn es durch eine Kontraktion der verbliebenen Gewebereste des Ductus arteriosus in der Aorta zur Stenosierung kommt. Während früher eine prä- und postduktale ISTA als infantile und adulte Form unterschieden wurde, ist diese Einteilung mittlerweile obsolet. Die Stenose liegt in der Regel juxtaduktal, also direkt gegenüber der Ductusmündung. (67)

Hämodynamisch und klinisch differenziert man zwischen einer lebensbedrohlichen kritischen ISTA und einer nicht-kritischen Form. Erstere ist dadurch charakterisiert, dass die Durchblutung der unteren Körperhälfte nur bei offenem Ductus arteriosus gewährleistet werden kann. Über den PDA gelangt Blut vom RV in die untere Körperhälfte, dementsprechend ist die O<sub>2</sub>-Sättigung in den Beinen reduziert. Die nicht-kritische ISTA zeichnet sich durch eine hohe Blutdruckamplitude zwischen der oberen hypertonen und der unteren häufig hypotonen Körperhälfte aus. Daraus resultiert eine chronische linksventrikuläre Druckbelastung sowie ein brachiozephaler Hypertonus, zudem kann es zum arteriosklerotischen Gefäßumbau kommen. (68)

Die Indikationen zur Behandlung einer ISTA sind in den Leitlinien der Fachgesellschaften festgehalten. (69-71) Die erstmalige Behandlung einer ISTA mittels Ballonangioplastie erfolgte im Jahr 1979. (69, 72) Sie wird besonders bei jungen Patienten mit Restenose durchgeführt. (69, 73) Ziel dabei ist es, die ISTA schrittweise zu dilatieren, bis der Durchmesser des Ballons etwa das 2,5- bis 3-Fache der Isthmusstenose beträgt. Diese katheterinterventionelle Behandlung der ISTA stellt die Therapie der Wahl bei pädiatrischen und erwachsenen Patienten dar, wohingegen sie bei Neugeborenen aufgrund der hohen Restenosierungsrate nicht zur Standardtherapie zählt. (67)

### 1.2.2.5 Aortenklappenstenose

In etwa 3-5 % aller AHF handelt es sich um die kongenitale Form der AS. Darunter versteht man eine Einengung des linksventrikulären Ausflusstraktes basierend auf einer Entwicklungsstörung des primitiven LV samt Ausflusstrakten während der Frühschwangerschaft. AS können sowohl angeboren als auch erworben sein. Je nach Lokalisation der Stenose werden drei Formen unterschieden: (12, 74-76)

- Valvuläre AS: Mit einem Anteil von 75 % gilt sie als häufigste Form der kongenitalen AS und ist meist mit einer bikuspiden Aortenklappe (AK) assoziiert, kann aber auch mit anderen Anomalien wie ISTA, VSD oder Ductus arteriosus apertus einhergehen.
- Subvalvuläre AS: Die subvalvuläre Form zählt etwa 20 % der angeborenen AS und lässt sich in folgende Unterformen gliedern:
  - Subvalvuläre AS durch fibriöse Membranen: bedingt durch eine außergewöhnliche Anlage des linksventrikulären Ausflusstrakts oder assoziiert mit Vitien wie VSD, PDA bzw. ISTA
  - Subvalvuläre AS durch tunnelförmige fibromuskuläre Wulste: bedingt durch eine Hypoplasie des Aortenklappenrings sowie der aufsteigenden Aorta, gegebenenfalls auch bedingt durch andere linksventrikuläre Anomalien
  - Subvalvuläre AS bedingt durch eine hypertrophe obstruktive Kardiomyopathie (HOCM): bedingt durch eine resultierende Vorwölbung des Ventrikelseptums in den linksventrikulären Ausflusstrakt
- Supraventrikuläre AS: Sie stellt mit weniger als 5 % die seltenste Unterform dar und geht mit einer Stenose oberhalb einer anatomisch unauffälligen AK einher.

Funktionell grenzt man zudem die sogenannte kritische AS bei Neugeborenen ab, die aufgrund der ausgeprägten Einengung des Lumens auch als Knopflochstenose bezeichnet wird. Charakteristisch dafür sind myxomatös verdickte Klappensegel sowie ein hypoplastischer Klappenring. Aufgrund der Schwere der Stenose ist ein PDA zur Aufrechterhaltung des Systemkreislaufes lebensnotwendig. Eine postnatale Notfalltherapie zur Aufrechterhaltung der Perfusion mittels Prostaglandin E (PGE) zur primären Stabilisierung ist unabdingbar. Der Übergang in ein hypoplastisches Linksherz-Syndrom (HLHS) bei eingeschränkter, intrauteriner Entwicklung des LV samt Ausflussbahn ist fließend. (76, 77)

Eine sichere Diagnosestellung gelingt meist echokardiographisch durch die genaue Darstellung des AK-Apparates und die differentialdiagnostische Abgrenzung anderer Obstruktionen. (77) Neben der Beurteilung der Klappensegelanzahl und -symmetrie sowie der Linksherzfunktion und -hypertrophie erfolgt zusätzlich zur Messung des AK-Ringes auch die Aufdeckung einer möglichen AK-Insuffizienz (AI). Bei der AS handelt es sich im Normalfall um eine progrediente Erkrankung. Therapeutisch strebt man eine interventionelle oder operative Vorgehensweise zur Beseitigung oder Reduktion der Stenose an, wobei vor allem bei der valvulären AS eine Ballonvalvuloplastie die Methode der Wahl darstellt. Dadurch wird oft eine beachtliche Klappenfunktion erreicht, sodass eine Klappen-OP über viele Jahre hinausgezögert werden kann. Die Erfolgsrate der Ballonvalvuloplastie bei den beiden anderen Formen ist weniger vielversprechend. (76, 77)

### 1.2.2.6 Pulmonalklappenstenose

Bei der PS handelt es sich mit einer Prävalenz von 10 % ebenso um einen häufigen AHF. In 6 % der Fälle tritt die angeborene PS isoliert auf, häufiger kommt sie jedoch als begleitende Anomalie bei anderen kongenitalen Vitien vor. (44) Sie kann mit genetischen oder chromosomalen Erkrankungen in Verbindung stehen, pathogenetisch liegt ihr eine Fehlentwicklung des sich entwickelnden Ausflusstraktes oder eine intrauterine Endokarditis vor.

Die Einteilung erfolgt in Analogie zur AS:

- Valvuläre PS: Sie stellt mit einem Anteil von 90 % die häufigste Form der PS im Kindesalter dar und beruht auf einer Verschmelzung der Kommissuren, wobei die Pulmonalklappe (PK) meist verdickt und die Klappenöffnung eingeschränkt ist. Der PK-Ring ist im Regelfall normal groß, während der Truncus pulmonalis poststenotisch erweitert ist. Eine Sonderform stellt die sogenannte dysplastische PK dar, die durch eine Verdickung der Klappensegel aufgrund von myxomatösen Auf- und Einlagerungen gekennzeichnet ist. Die poststenotische Dilatation ist hier, wenn überhaupt, nur gering ausgeprägt, der Klappenring an sich ist meist hypoplastisch. (78)
- Subvalvuläre PS: Die subvalvuläre PS beruht auf einer hypertrophen und verstärkt kontraktilen Muskulatur der rechtsventrikulären Ausflussbahn mit daraus resultierender Einengung des Lumens und ist häufig mit einem VSD assoziiert.
- Supravalvuläre PS: Sie kann sowohl isoliert als auch multiple einerseits zentral im Truncus pulmonalis vorkommen oder als periphere PS in den Lungenarterienästen auftreten. Es besteht eine Assoziation mit dem Auftreten einer valvulären PS, einem VSD oder einer Fallot'schen-Tetralogie. (78)

Durch die PS entsteht eine Ausflussbehinderung des RV mit daraus resultierender Hypertrophie der rechten Herzkammer. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass rechtsventrikuläre Druckspitzendruckwerte von über 200 mmHg häufig lange Zeit problemlos toleriert werden und

die Aufrechterhaltung des HZV unter Ruhebedingungen vorerst sichergestellt ist. Eine adäquate Steigerung unter Belastung oder bei rechtsventrikulärer Insuffizienz bleibt jedoch aus. Letztlich kann die Druckerhöhung in eine Endokardfibrose münden. (78, 79)

Bei der sogenannten kritischen PS ist die Perfusion der Lungen ductusabhängig, weshalb zur Sicherstellung der Lungenperfusion bei Neugeborenen die Verabreichung von PGE indiziert ist. Bei einem PFO, einem vorliegendem ASD oder einem VSD bei stark ausgeprägter PS kann es druckbedingt zur Entwicklung eines zyanotischen Rechts-Links-Shunts kommen. Echokardiographisch gilt es wiederum, die Lokalisation der PS zu bestimmen, die Klappenmorphologie sowie den PK-Ring samt Truncus pulmonalis und Lungenarterien zu beurteilen sowie die Druckgradienten und rechtsventrikuläre Hypertrophie zu bewerten. Therapeutisch kann wiederum interventionell oder operativ vorgegangen werden, als Indikationen gelten:

- klinische Symptomatik: Dyspnoe unter Belastung, Synkopen, Leistungsabfall
- sichtbare Erregungsrückbildungsstörungen im EKG
- Druckgradient in Ruhe > 50 mmHg
- Druckgradient unter Belastung > 70 mmHg

Vor allem beim Vorliegen einer isolierten valvulären PS hat sich eine katheterinterventionelle Ballonvalvuloplastie etabliert. Hierbei besteht die Möglichkeit einer ergänzenden Stentimplantation wie es bei einer supralvalvulären PS häufig der Fall ist. Die PS weist nach Behandlung eine gute Prognose auf. (50, 52, 63, 78, 80, 81)

### 1.3 Die Modelle und Zielsetzung der Arbeit

Alle genannten AHF charakterisieren etwa 80 % aller AHF und stellen klassische Indikationen für interventionelle HK-Eingriffe dar, wodurch heutzutage OPs am offenen Herzen häufig umgangen werden können. (2, 82, 83) Es handelt sich dabei um sogenannte „einfache Herzfehler“, die standardisiert behandelt werden können.

Übergeordnetes Ziel dieser Studie war es, 3D-gedruckte Modelle zum Training von HK-Untersuchungen bei AHF zu entwickeln. Grundvoraussetzung hierfür war, ein Modell zu konstruieren, welches den grundlegenden Erfordernissen einer realitätsgetreuen HK-Untersuchung entspricht. Das Modell sollte dementsprechend aus einem röntgenstrahlendurchlässigen und zugleich wasserdichten Material bestehen, zudem aber auch strapazierfähig und wiederverwendbar sein. Die Modelle wurden im Rahmen der Studie in mehreren Schritten modifiziert und bis zu einer dritten Generation weiterentwickelt. Durch die präzise Darstellung der anatomischen Strukturen soll eine realitätsgetreue Simulation einer HK-Untersuchung stets gewährleistet sein. Anhand dieser Modelle sollte untersucht werden, ob es möglich ist, in realitätsnaher Umgebung sowohl theoretische Grundlagen als auch praktische Fertigkeiten und das Verständnis für die Interventionen zu fördern. Zudem sollte geprüft werden, ob es möglich ist, HK-Interventionen in weiterer Folge mit verkürzter Röntgenbelastung auch an Patienten durchzuführen. Zur Evaluierung der Modelle sollten die benötigten DL-Zeiten (in Sekunden) der einzelnen TN innerhalb der jeweiligen Gruppen erfasst und eine mögliche zeitliche Verbesserung der verschiedenen Darbietungen durch wiederholtes Training vermerkt werden. Anschließend sollte ein gruppenübergreifender Vergleich der Baseline (Traingingsdurchgang 0) mit dem Endpunkt (Trainingsdurchgang 2) erfolgen, um eine insgesamt Tendenz bezüglich der benötigten DL-Zeiten (in Sekunden) aufzuzeigen.

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Der Grundgedanke

Der ursprüngliche Grundgedanke der Doktorarbeit war die Entwicklung und Simulation eines Herz-Kreislaufsystems aus möglichst einfachen und kostengünstigen, vielerorts verfügbaren Materialien, um anhand dieser Low-Budget-Modelle die für eine HK-Untersuchung notwendigen Fertigkeiten einfach und kostengünstig an Dritte weiterzuvermitteln. Anlass für diesen Ansatz ist eine seit dem Jahr 2018 bestehende Kooperation zwischen der Abteilung für Pädiatrische Kardiologie und Intensivmedizin des Klinikums Großhadern der Ludwig-Maximilians-Universität München und dem Ayder Referral Hospital der Universität Mekelle in Äthiopien. In der anfänglichen Materialfindungsphase wurden Modelle der ersten Generation aus Plastikobst und -gemüse hergestellt (siehe Abb.1).

Materialfindungsphase:

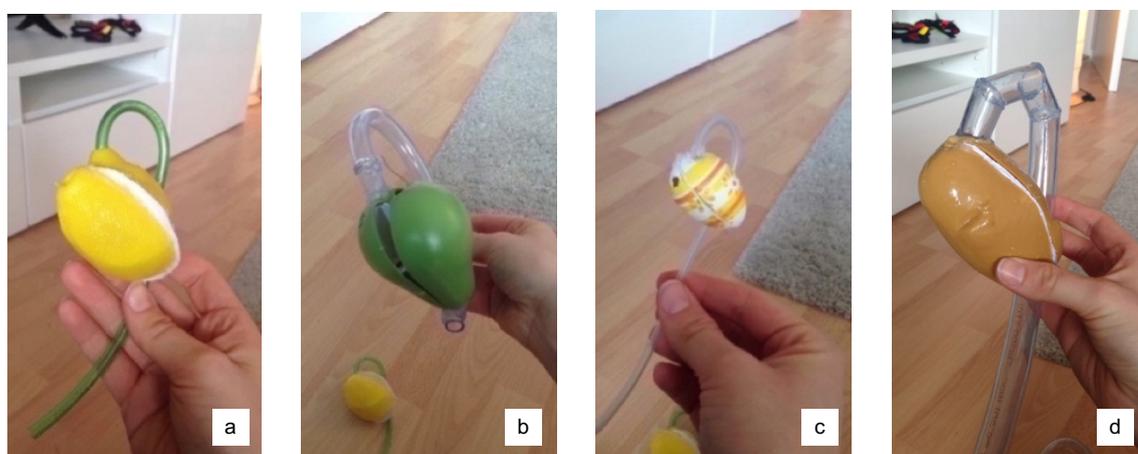


Abbildung 1: Materialfindung: Modelle der ersten Generation aus Plastik: Darstellung eines Herzens aus a) Plastikzitrone. b) Plastikbirne. c) Plastikosterei. d) Plastikkartoffel mit jeweils abgehendem Kunststoffschlauch, der Aorta entsprechend.

Im Verlauf wurden die Modelle schließlich ständig modifiziert und bis hin zu einer dritten Generation weiterentwickelt und schließlich in verschiedenen nationalen und internationalen Krankenhäusern im Rahmen von Simulationstrainings eingesetzt.

### 2.2 Entwicklung von 3D-gedruckten Modellen in drei Generationen

Zur Gewährleistung einer realistischen Darstellung diagnostischer und interventioneller Katheterverfahren basieren letztlich alle Herzmodelle auf CT-Bildern pädiatrischer Patienten und wurden in einem flexiblen, röntgendichten Material 3D-gedruckt. Das verwendete silikonähnliche Material weist in der Röntgenaufnahme eine hohe Transparenz mit gut sichtbaren Konturen auf, wodurch das Verständnis für die Handhabung der Katheterinstrumente und die Auswirkung verschiedener Bewegungen verbessert sowie die Orientierung im Modell vereinfacht wird. Zur Herstellung der 3D-gedruckten Herzmodelle werden spezielle Bildverarbeitungs- und additive Herstellungstechnologien verwendet, mit deren Hilfe aus CT- und MRT-Bildern realistische Herzmodelle nachgebildet werden können. (84-92)

Die Modelle wurden jeweils nach bzw. während der Erprobungsphase im HK-Labor laufend evaluiert und modifiziert, sodass sie letztlich in mehreren Entwicklungsschritten kontinuierlich optimiert wurden. Grob lassen sich drei Generationen unterscheiden. Innerhalb der Generationen basieren die Veränderungen auf Feinheiten, weshalb darauf nicht weiter eingegangen werden soll.

Die für die Herzmodelle verwendeten, anonymisierten CT-Daten der pädiatrischen Patienten wurden im Rahmen klinisch indizierter Untersuchungen gewonnen. Die verschiedenen entwickelten Herzmodelle repräsentieren zum einen die normale Herz-Kreislauf-Physiologie sowie die häufigsten AHF wie ASD, VSD, PDA, ISTA, AS und PS. Alle Herzmodelle wurden in unterschiedlichen Größen entsprechend den unterschiedlichen Altersstufen hergestellt.

### 2.2.1 Modelle der ersten Generation

Aufbauend auf den ersten Versuchsmodellen aus unterschiedlichsten Materialien wurden die tatsächlichen Modelle der ersten Generation anhand von geometrischen Formen aus einfachen Silikonschläuchen und -platten konstruiert. Ziel dieser übergroßen und stark vereinfachten Modelle war es, anhand der Modelle mit den für eine HK-Untersuchung erforderlichen Grundlagen wie dem Einführen des Führungsdrahtes, der Bewegung des Katheters im Modell und der Darstellung der verwendeten Instrumente im Röntgenbild vertraut zu werden. Zunächst wurden Skizzierungen der Modelle angefertigt. Ein Modell der PS besteht in dieser Generation aus einem Quader aus einer Silikonplatte (rechte Herzhälfte), in welchen mittig eine Trennwand mit einer runden Öffnung (entsprechend der Trikuspidalklappe als Trennung zwischen RA und RV) eingebaut wurde. Von einer Seite der Trennwand geht ein Silikon Schlauch ab, welcher mit einem Stück Silikonplatte verengt wurde (stenosierte PK). Jeweils ober- und unterhalb des Quaders sind Silikonschläuche angebracht, welche die V. cava superior und inferior darstellen (siehe Abb. 2). Auf ähnliche Weise sind auch alle weiteren Herzmodelle der ersten Generation entstanden. Als Beispiel sei hier noch die Skizze einer AS angefügt (siehe Abb.3).

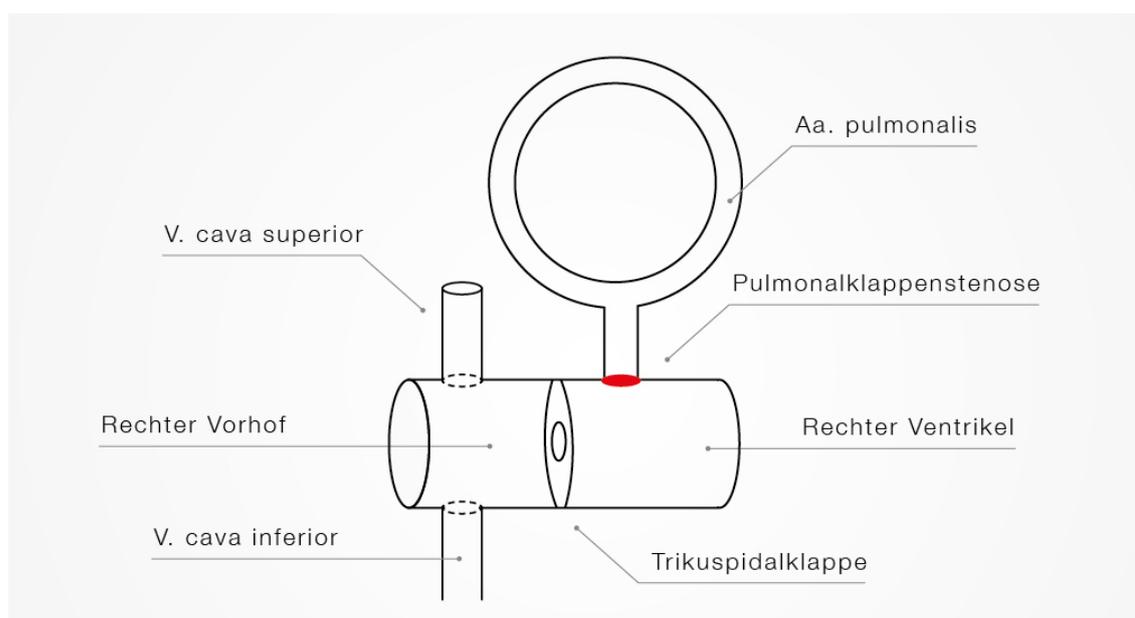


Abbildung 2: Schematische Skizze eines Modells einer Pulmonalklappenstenose der ersten Generation: Darstellung der rechten Herzhälfte als Zylinder mit zentral liegender Trennplatte, der Trikuspidalklappe

entsprechend. Darstellung des Abgangs des Truncus pulmonalis über eine Pulmonalklappenstenose sowie Darstellung der Abgänge von V. cava superior und inferior.

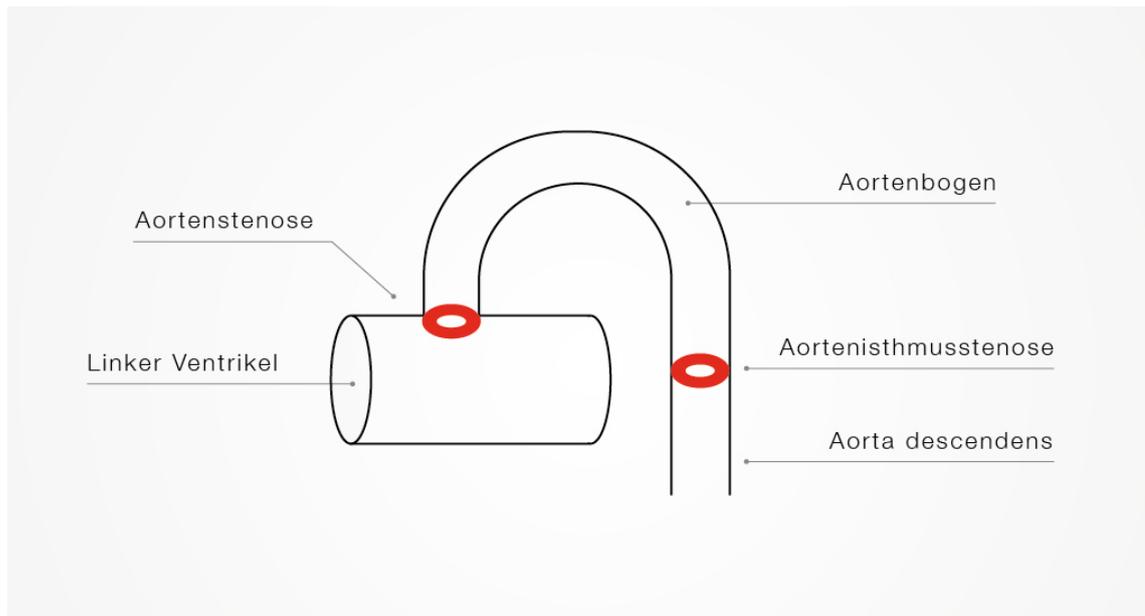


Abbildung 3: Schematische Skizze eines Modells einer kombinierten Aortenklappen- und Aortenisthmusstenose der ersten Generation: Darstellung des linken Ventrikels als Zylinder mit Abgang der Aorta über eine Aortenklappenstenose sowie Darstellung einer Aortenisthmusstenose zwischen Aortenbogen und Aorta descendens.

Nach der Optimierung und Fertigstellung der einzelnen Skizzierungen wurden die Modelle aus den besagten Silikonschläuchen und -platten hergestellt, bevor anschließend eine Evaluierung der Herzmodelle der ersten Generation im HK-Labor erfolgte. (Abb. 4 bis Abb. 7).

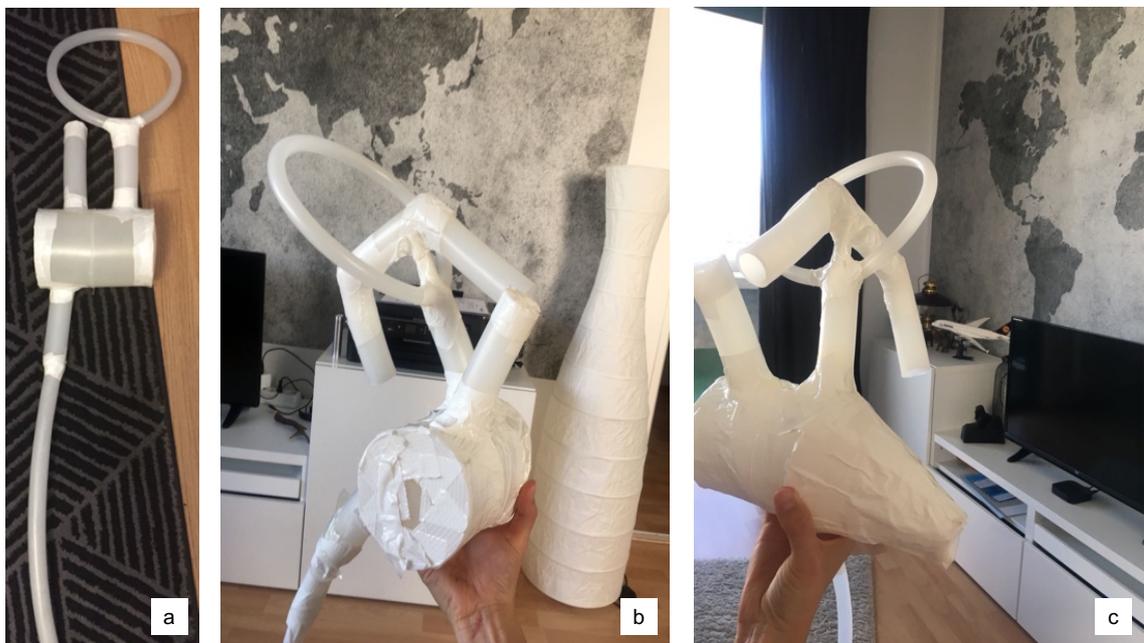


Abbildung 4: a-c) Modell einer Pulmonalklappenstenose der ersten Generation aus Silikonschläuchen und -platten (entsprechend der obigen Skizzierung, siehe Abbildung 2): Darstellung der rechten Herzhälfte als Zylinder mit zentraler liegender Trennplatte, der Trikuspidalklappe entsprechend. Darstellung des Truncus pulmonalis Abgangs über eine Pulmonalklappenstenose sowie Darstellung der Abgänge von V. cava superior und inferior. a) Ansicht des gesamten Modells ohne schematische Darstellung des Aortenbogens.

b) Ansicht des Modells von links mit schematischer Darstellung des Aortenbogens. c) Ansicht des Modells von rechts mit schematischer Darstellung des Aortenbogens.

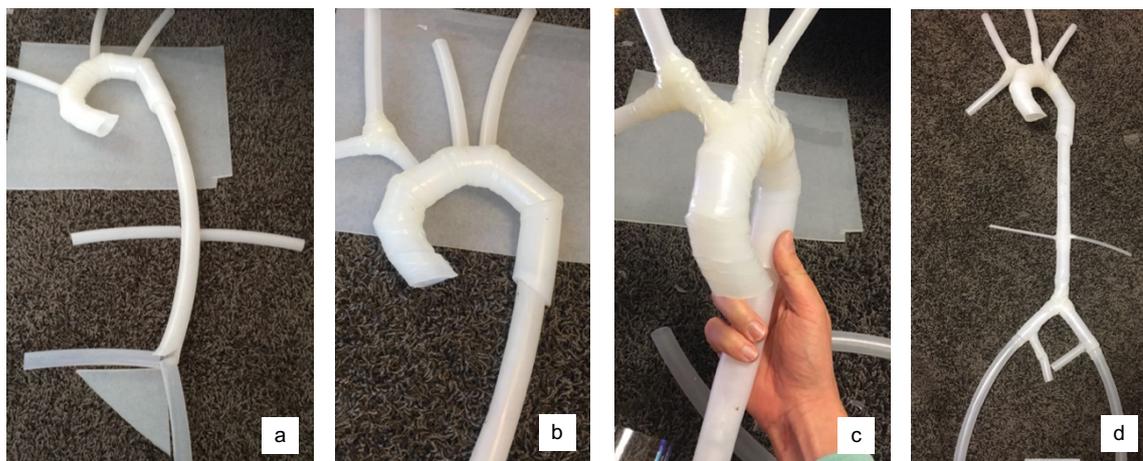


Abbildung 5: a-d) Kombiniertes Modell einer Aortenklappen- und Aortenisthmusstenose der ersten Generation aus Silikonschläuchen mit Abgängen der Aorta (von links nach rechts: Truncus brachiocephalicus mit Aufteilung in A. subclavia dextra und A. carotis dextra, A. carotis sinistra sowie A. subclavia sinistra, Aa. renales) bis hin zur Bifurkation in Aa. iliaca externa mit Abgängen (Aa. iliaca externa). a) Ansicht des Modells von seitlich bis zur Bifurkation mit Darstellung der Aa. iliaca externa. b) Ansicht von seitlich bis zur Aorta descendens mit Abgängen (von links nach rechts: Truncus brachiocephalicus mit Aufteilung in A. subclavia dextra und A. carotis dextra, A. carotis sinistra sowie A. subclavia sinistra). c) Ansicht von vorne bis zur Aorta descendens mit Abgängen. (von links nach rechts: Truncus brachiocephalicus mit Aufteilung in A. subclavia dextra und A. carotis dextra, A. carotis sinistra sowie A. subclavia sinistra). d) Ansicht des gesamten Modells von seitlich bis zur Bifurkation mit Darstellung der Aa. iliaca externa mit Abgängen (Aa. iliaca interna).



Abbildung 6: a-d) Modelltestung im HK-Labor: Modell einer kombinierten Aortenklappen- und Aortenisthmusstenose der ersten Generation aus Silikonschläuchen: Physiologische Darstellung des

arteriellen Systems a) Ansicht von vorne bis inklusive Bifurkation mit Darstellung der linken Herzhälfte als Zylinder und Abgang der Aorta mit einzelnen Abgängen (von oben nach unten: Aa. splenicae, Aa. renales, Bifurkation mit Aufteilung in Aa. iliacae externae). b) Darstellung der Aortenbifurkation mit Aufteilung in Aa. iliacae externae sowie Darstellung der Aa. iliacae internae als Abgänge und Darstellung der angebrachten Schleuse nach Punktion der A. iliaca externa. c) Ansicht des Modells von seitlich mit Aortenbogen und Abgängen bis hin zur Bifurkation. d) Ansicht des gleichen Modells von unten auf dem HK-Tisch liegend unter der Röntgenanlage. (Mit gegenseitiger Genehmigung sind die Abbildungen auch in der Arbeit von Alisa Thierij abgelichtet).

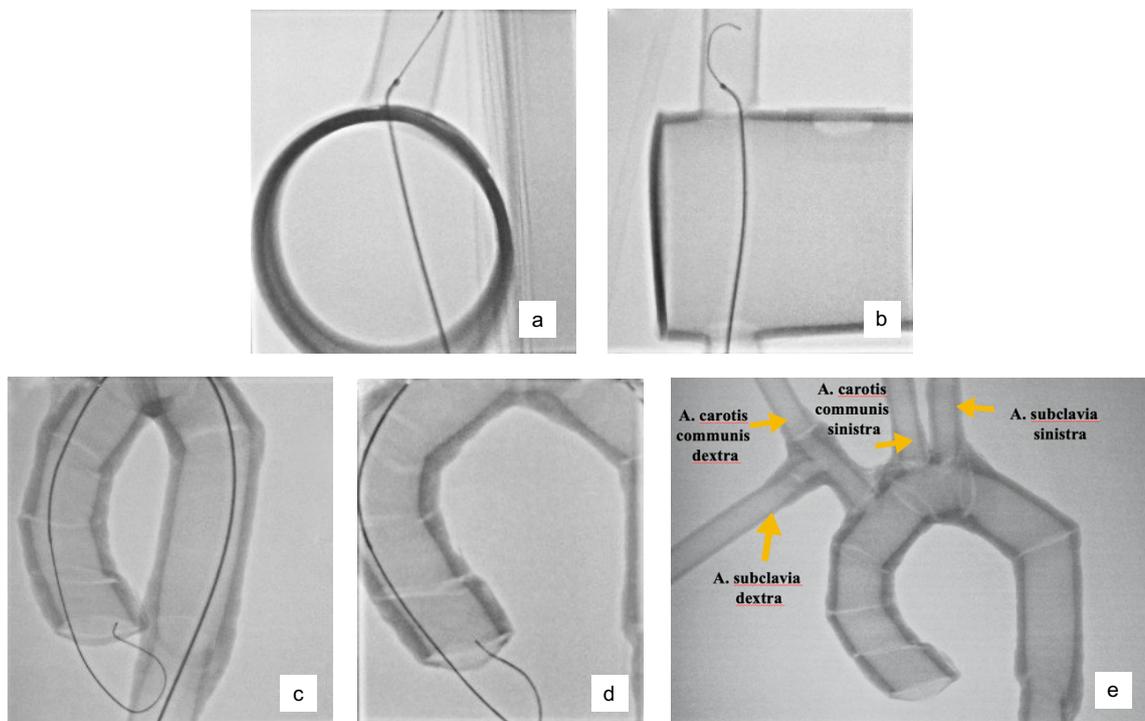


Abbildung 7: a-e) Modell des arteriellen Systems der ersten Generation aus Silikonschläuchen und -platten unter Durchleuchtung. a) Durchleuchtung des linken Ventrikels von seitlich mit Darstellung des Drahtes über die Aortenklappenstenose in die Aorta reichend. b) Durchleuchtung des linken Ventrikels von vorne mit Darstellung des Drahtes über die Aortenstenose in die Aorta reichend. c+d) Durchleuchtung des Aortenbogens von seitlich mit Darstellung des Drahtes. e) Durchleuchtung des Aortenbogens mit Darstellung der Abgänge.

## 2.2.2 Modelle der zweiten Generation

Anhand von anonymisierten 3D-Datensätzen verschiedener Modelle sind schließlich die Modelle der zweiten Generation entstanden, die vor allem der besseren Repräsentation anatomischer Verhältnisse dienen. Aus den CT-Datensätze der Patienten wurden mit der speziellen Software Materialise Mimics Innovation Suite der Firma Materialise virtuelle 3D-Modelle generiert. Schließlich wurden die Modelle 3D gedruckt und ausgewaschen (siehe Abb. 8-10). Anschließend erfolgte wiederum eine Evaluierung der Modelle im HK-Labor. Nach einer weiteren Modifizierung der Modelle erfolgte erstmalig ein modellbasiertes Simulationstraining im Ayder Referral Hospital der Universität Mekelle in Äthiopien, um unseren äthiopischen Kollegen die Grundzüge der HK-Untersuchung näherzubringen.



Abbildung 8: a-b) Modell der zweiten Generation: 3D-gedrucktes Modell der Pulmonalklappenstenose nach Fertigstellung vor der Auswaschung und vor dem Ablösen des Stützmaterials aus Silikon: Darstellung der rechten Herzhälfte als Zylinder mit spitz zulaufendem Ende und Abgängen entsprechend Abb. 2. (Abgänge: A. cava superior und inferior, Abgang Truncus pulmonalis über die Pulmonalklappenstenose mit Aufteilung in Aa. pulmonales) a) Ansicht von oben. b) Ansicht von seitlich.



Abbildung 9: Modell der zweiten Generation: 3D-gedrucktes Modell der Pulmonalklappenstenose bei Auswaschen und Ablösen des Stützmaterials aus Silikon. a) Auswaschen des Modells. b) Modelldarstellung während des Auswaschens: Darstellung der rechten Herzhälfte als Zylinder mit spitz zulaufendem Ende und Abgängen entsprechend Abb. 2. (Abgänge: A. cava superior und inferior, Abgang Truncus pulmonalis über die Pulmonalklappenstenose mit Aufteilung in Aa. pulmonales). c) Ablösen des Stützmaterials aus Silikon. (Mit gegenseitiger Genehmigung sind die Abbildungen auch in der Arbeit von Alisa Thierij abgelichtet).

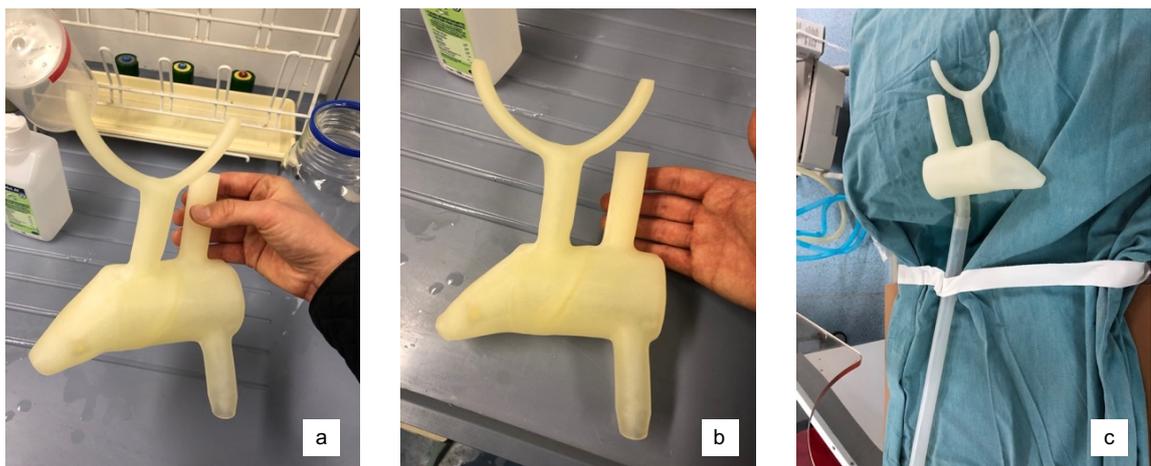


Abbildung 10: Modell der zweiten Generation: 3D-gedrucktes Modell der Pulmonalklappenstenose nach Ablösen Stützmaterials aus Silikon. Darstellung der rechten Herzhälfte als Zylinder mit spitz zulaufendem Ende und Abgängen (von links nach rechts: Abgang Truncus pulmonalis über die Pulmonalklappenstenose mit Aufteilung in die Aa. pulmonales, A. cava superior und inferior. a+b) Ansicht von vorne und seitlich. c) Ansicht von vorne nach Anbringen eines Silikonschlauchs der Aorta entsprechend, bei Modelltestung im HK-Labor.

### 2.2.3 Modelle der dritten Generation

Im Rahmen der dritten Generation wurden nun aus CT-Daten pädiatrischer Patienten mit AHF Modelle entwickelt, die hinreichend der Anatomie des Menschen bzw. der Anatomie von AHF entsprechen. Mittels einer 3D-Software (Materialise Mimics Innovation Suite der Firma Materialise) wurden durch Segmentierung des Blutvolumens in den CT-Dateien zunächst virtuelle 3D-Modelle des intrakardialen und intravaskulären Volumens generiert. (siehe Abb. 11 bis Abb. 16). Basierend darauf wurde jeweils ein Hohlmodell erstellt, sodass die 3D-Herzen für das Training mit Kathetern und Drähten über die hohlen Gefäße zugänglich waren. Weiters wurden die Strukturen und die Oberfläche der Modelle, zum Beispiel durch Glättungsoperationen, an die Trainingsziele und das Teilnehmerniveau angepasst. Für den 3D-Druck im Polyjet-Verfahren auf dem Agilista 3200W der Marke Keyence wurde ein weiches Silikongummi (AR-G1L, Keyence) verwendet, welches zusammen mit einem Supportmaterial (AR-S1, Keyence) im additiven Fertigungsverfahren gedruckt wurde. (93) Der Prozess der 3D-Modellerstellung von der Datenakquise bis zum 3D-Druck wurde von Grab et al. im Detail beschrieben. (94)

Neben dem Modell eines anatomisch korrekten Herzens mit normaler Herz-Kreislaufphysiologie wurden Modelle mit folgenden, oben bereits beschriebenen, AHF entwickelt: ASD, VSD, PDA, ISTA, AS und PS. Alle Modelle konnten durch digitale Bearbeitung, größenbasierend auf einem adulten Herzen, in skalierter Größe (juveniles Herz 80 %, Herz eines Neugeborenen 55 %) gedruckt werden. (siehe Abb.17) Durch die verschiedenen Herzmodelle in unterschiedlichen Größen kann die Haptik ideal trainiert werden.

#### Persistierender Ductus arteriosus

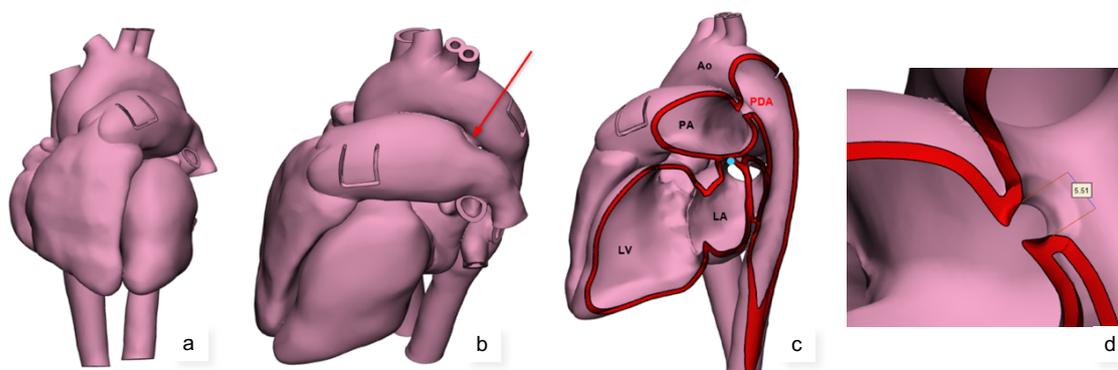


Abbildung 11: a-d) Anfertigung eines 3D-Modells der dritten Generation mittels Software-Programm: Persistierender Ductus arteriosus. a) Ansicht von vorne. b) Ansicht von seitlich mit Pfeil zur Markierung des Persistierenden Ductus arteriosus. c) Darstellung der anatomischen Verhältnisse mit Ansicht von innen. d) Darstellung des Persistierenden Ductus arteriosus mit Größenangabe.

### Pulmonalklappenstenose

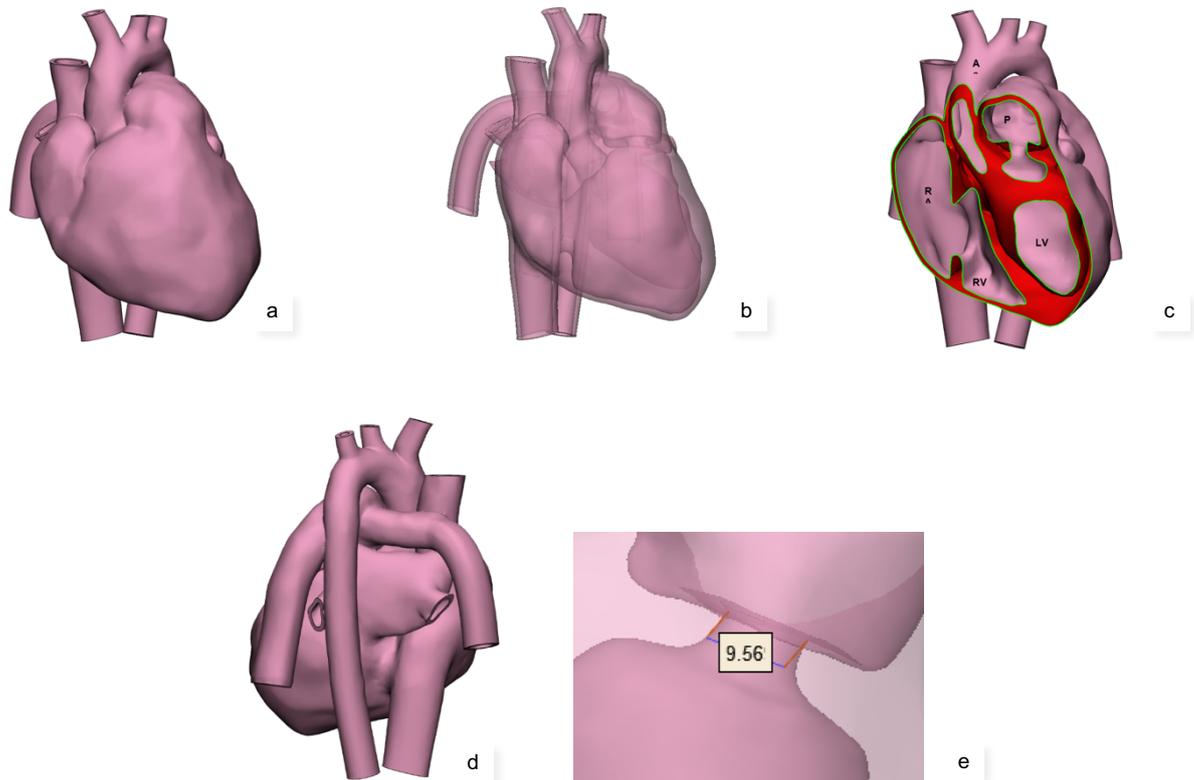


Abbildung 12: a-f) Anfertigung eines 3D-Modells der dritten Generation mittels Software-Programm: Pulmonalklappenstenose a+b) Ansicht von vorne. c) Darstellung der anatomischen Verhältnisse im Inneren des Modells. d) Ansicht von hinten. e) Darstellung der Pulmonalklappenstenose mit Größenangabe.

### Aortenklappenstenose

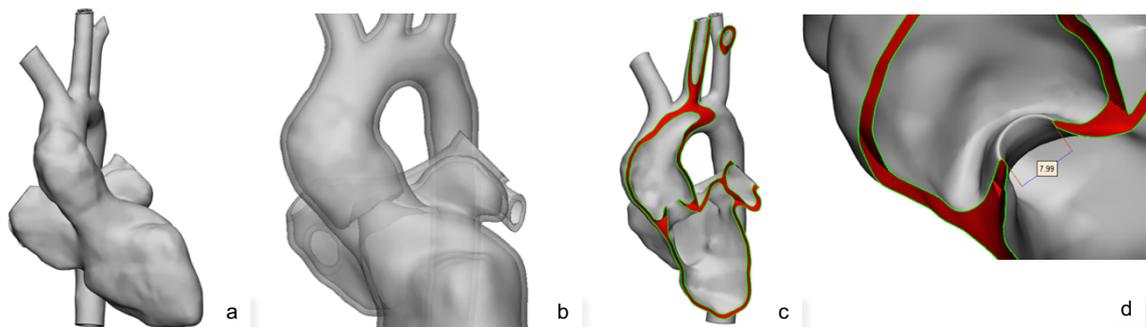


Abbildung 13: Anfertigung eines 3D-Modells der dritten Generation mittels Software-Programm: Linkes Herz mit Aortenklappenstenose. a) Darstellung des linken Herzens von vorne. b) Darstellung des linken Herzens mit Fokus auf die Aortenklappenstenose. c) Darstellung der anatomischen Verhältnisse des linken Herzens als Innenansicht. d) Darstellung der Aortenklappenstenose mit Größenangabe.

### Aortenisthmusstenose

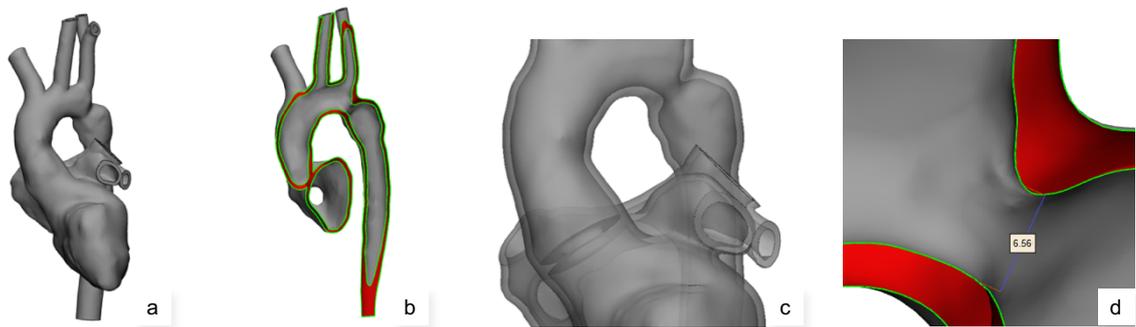


Abbildung 14: Anfertigung eines 3D-Modells der dritten Generation mittels Software-Programm: Aortenisthmusstenose. a) Darstellung von vorne. b) Darstellung der anatomischen Verhältnisse als Innenansicht. c) Darstellung des Modells mit Aortenisthmusstenose von seitlich. d) Darstellung der Aortenisthmusstenose mit Größenangabe.

### Vorhofseptumdefekt

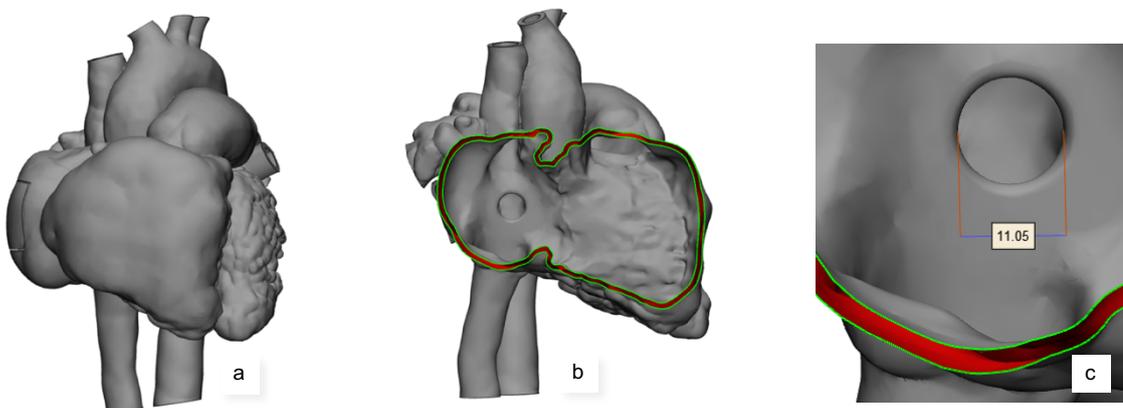


Abbildung 15: Anfertigung eines 3D-Modells der dritten Generation mittels Software-Programm: Vorhofseptumdefekt. a) Ansicht von vorne. b) Darstellung der anatomischen Verhältnisse als Innenansicht. c) Darstellung des Vorhofseptumdefekts mit Größenangabe.

### Ventrikelseptumdefekt

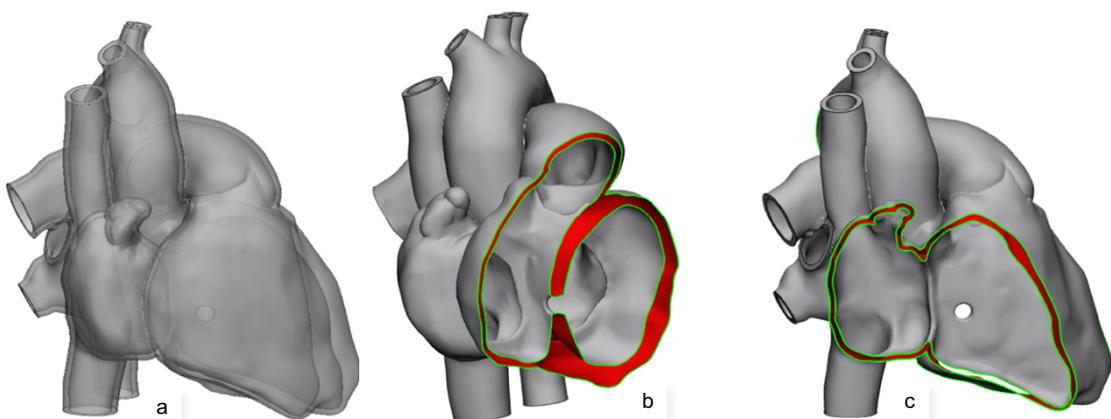


Abbildung 16: Anfertigung eines 3D-Modells der dritten Generation mittels Software-Programm: Ventrikelseptumdefekt. a) Ansicht von seitlich. b+c) Darstellung der anatomischen Verhältnisse als Innenansicht.

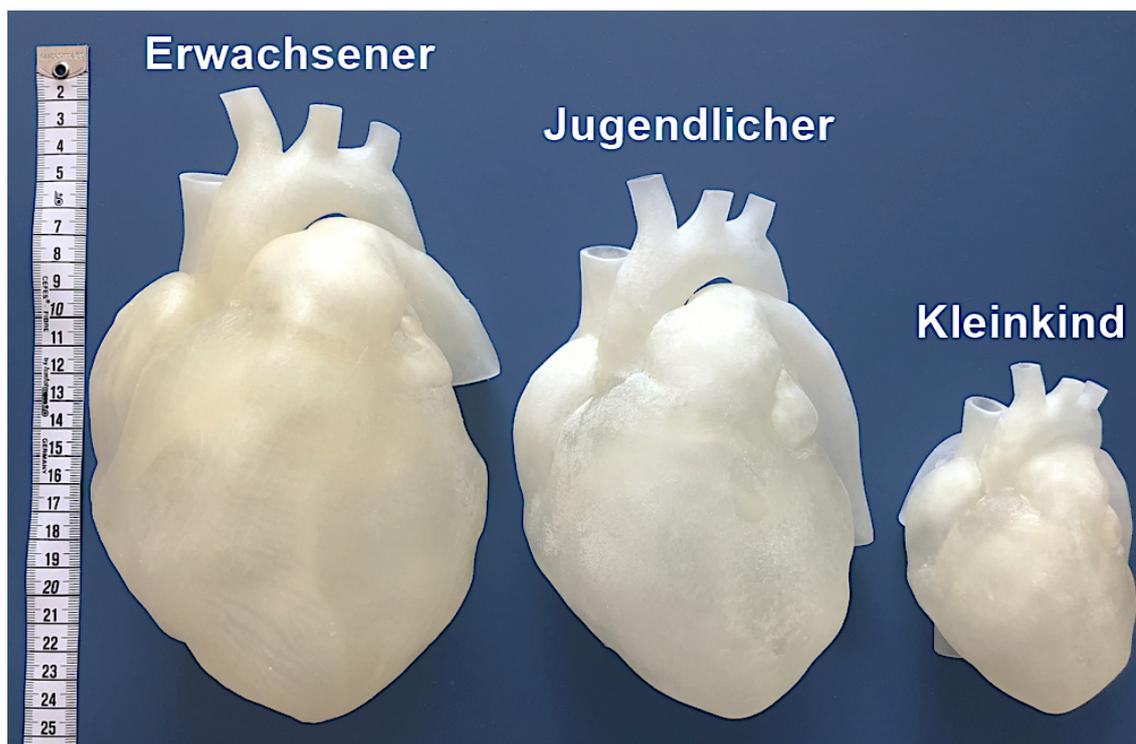


Abbildung 17: 3D-gedruckte Modelle in verschiedenen Größen entsprechend des Herzens eines Erwachsenen, eines Jugendlichen und eines Kleinkindes im Vergleich. Die Herzmodelle für das Hands-on Training wurden mit einem 3D-Drucker (Agilista 3200W, Keyence Corp.) im additiven Fertigungsverfahren aus Silikongummi gedruckt. Bildquelle: Brunner BS et al. 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.

### 2.3 Der Herzkatheter-Kurs – Trainingsmodule und Teilnehmer

Anhand der Trainingskurse (TK) im HK-Labor sollte untersucht werden, ob es möglich ist, die einzelnen Untersuchungsschritte und diagnostischen Verfahren realitätsnah abzubilden und sich dann durch praktisches Training Fertigkeiten anzueignen, um in weiterer Folge bestmöglich für das Arbeiten an Patienten vorbereitet zu sein. Die Modelle kamen in verschiedenen Kliniken im Rahmen der TK zum Einsatz. Dabei fanden alle Kurse im jeweiligen klinikinternen HK-Labor statt, um eine möglichst realitätsgetreue Umgebung zu schaffen. Die einzelnen TK orientierten sich in Bezug auf den Aufbau und die Schwierigkeitsstufe an den theoretischen und praktischen Vorkenntnissen der jeweiligen TN. Somit waren sie für TN verschiedener Ausbildungsstufen geeignet. Die durchgeführten TKs waren jeweils für Studenten, Assistenzärzte oder erfahrene Kinderkardiologen ausgelegt. Die Rekrutierung der TN erfolgte in Eigenregie im nahen Freundes- und Bekanntenkreis. Der TK für Studierende umfasste dementsprechend hauptsächlich TN aus dem 10. humanmedizinischen Semester der LMU München, die TK für Assistenzärzte und erfahrene Kinderkardiologen setzten sich jeweils aus Kollegen des LMU Klinikums Großhadern sowie des Allgemeinen Krankenhauses der Stadt Wien zusammen. Der oben genannte TK für Studierende war der insgesamt erste Kurs an den 3D-gedruckten Herzmodellen seit den ursprünglichen TK im Ayder Referral Hospital in Äthiopien. Der Kurs erfolgte im klinikinternen HK-Labor der LMU München und umfasste insgesamt 11 Studierende ohne jegliches Vorwissen. Aufgrund des zeitlich limitierten Rahmens der TK wurde die TN-Anzahl in den Folgekursen auf maximal fünf TN beschränkt und somit als TN-Zielzahl festgelegt. Aufgrund des alltäglichen

Klinikaufgebotes konnte bei den Kursen für Ärzte bedauerlicherweise zum Teil keine Wiederholung der HK-Durchgänge stattfinden, weshalb in der statistischen Auswertung letztlich lediglich ein Vergleich der Mittelwerte der benötigten DL-Zeiten möglich war. Zudem war die geplante Auslegung weiterer TK ab März 2020 aufgrund der strengen CoVid19-Beschränkungen nicht mehr möglich, alle geplanten Kurse mussten abgesagt bzw. auf einen späteren Zeitpunkt verlegt werden.

Der Fokus der jeweiligen HK-Kurse lag im Erlernen der einzelnen Untersuchungsschritte und dem richtigen Umgang mit den Instrumenten sowie im Erlangen des Grundverständnisses für eine HK-Untersuchung im Allgemeinen. Die Dauer der einzelnen Kurse betrug im Durchschnitt sechs Stunden:

1. Theoretische Einführung zum Erlangen des Grundverständnisses (60 min)
2. Gefäßpunktion mittels Seldinger-Technik (30 min)
3. Einbringen von Schleuse und Führungsdraht (30 min)
4. Richtige Auswahl der entsprechenden Katheter (30 min)
5. Richtiges Handling mit den Instrumenten und Wiederholen der einzelnen Schritte (30 min)
6. Simulation einer kompletten HK-Untersuchung mit Behandlung der einzelnen AHF (180 min)

Auf ähnliche Weise erfolgte der Ablauf der HK-Kurse im Ayder Referral Hospital in Mekelle, mit dem Unterschied, dass es sich hierbei um mehrtätige Trainingseinheiten gehandelt hat und am Ende bereits Interventionen an pädiatrischen Patienten, unter Supervision von erfahrenen Kollegen, durchgeführt wurden. Da derartige Kurse mit einer erhöhten Strahlenbelastung der Auszubildenden einhergehen, muss selbstverständlich auf einen ausreichenden Strahlenschutz geachtet werden. (95-97)

## 2.4 Statistik

Die statistische Auswertung erfolgte mithilfe von Prof. Dr. Nikolaus Haas und Frau M.Sc. Leonie Arnold.

Die DL-Zeiten wurden für die einzelnen Kurse als absolute Werte pro Teilnehmer und Durchgang als Balkendiagramme dargestellt. Für den teilnehmerstarken Kurs mit Studierenden am Klinikum Großhadern wurden die einzelnen Durchgänge mit einem Friedman-Test verglichen. Als post hoc Test wurde ein gepaarter Wilcoxon Rangsummentest mit Bonferroni Korrektur verwendet. Die Zeiten der Teilnehmenden in wurden durch Ermangelung eines zweiten Durchgangs mit dem Mittelwert als Referenz im Balkendiagramm dargestellt. Um kursübergreifende Veränderungen in der DL-Zeit messen zu können, wurden der erste und zweite Durchgang von jedem Teilnehmenden mit mehreren Durchgängen pro Kurs verwendet. Die Differenz zwischen der Durchleuchtungszeit aus Durchgang 1 und Durchgang 2 wurde in die prozentuale Veränderung umgerechnet. Mit einem Ein-Stichproben-t-Test wurde die prozentuale Veränderung pro Teilnehmer mit einer prozentualen Veränderung von 0 verglichen, um zu testen, ob Teilnehmende sich bzgl. Ihrer DL-Zeiten signifikant verändert haben.

Die Analysen wurden durchgeführt in Excel Version 16.66.1 (22101101) Microsoft 2022 und R Version 4.2.2 (R Core Team 2022).

## 3. Ergebnisse

### 3.1 Trainingskurse

Eingangs wurden bereits im Rahmen der Modellentwicklung etwa zehn TK im HK-Labor für Kinderkardiologen mit unterschiedlichen Erfahrungswerten sowie für Studenten durchgeführt, um einerseits die entwickelten Herzmodelle an sich zu reevaluieren und andererseits, um die Eignung der Modelle für das Erlernen der nötigen Schritte und haptischer Fertigkeiten zu testen. Nach mehrmaliger Reevaluierung und Weiterentwicklung der neuen 3D-Modelle haben im Jahr 2018 bereits vier TK stattgefunden, aufgeteilt auf zwei Kurse im LMU Klinikum und zwei Kurse im Allgemeinen Krankenhaus der Stadt Wien. Insgesamt nahmen 19 Medizinstudenten und Ärzte an den TK teil. Darunter waren 14 Anfänger ohne Erfahrung im HK-Labor, zwei Assistenzärzte in Weiterbildung mit mäßiger Erfahrung und drei fertig ausgebildete Kinderkardiologen mit hohen Erfahrungswerten im HK-Labor. Die Evaluation der neu entwickelten 3D-Modelle und des Simulationstrainings ermöglichte eine Beurteilung über den Nutzen und die Akzeptanz als neue Ausbildungsform. Als Kriterien wurden einerseits der persönliche Fortschritt und andererseits die subjektive Bewertung der TN verwendet. Bei jedem Übungsversuch im Kurs wurde dazu die benötigte DL-Zeit jedes TN dokumentiert. Folgend wird im Ergebnisteil einerseits die Verkürzung der DL-Zeiten angeführt und andererseits wird der Ablauf des HK-Kurses in Trainingsmodulen dargestellt.

Die gesamte Literatur aus Punkt 4.1. Ablauf des HK-Kurses in Trainingsmodulen stammt aus dem von uns eigenständig verfassten Skript „Trainingsmanual Herzkatheteruntersuchungen“, welches ebenso im Zuge bzw. als Teil der Doktorarbeit entstanden ist.

Es konnte gezeigt werden, dass sich die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten 3D-gedruckten Herzmodelle für Trainingszwecke in Bezug auf Diagnostik und Therapie von AHF bewährt haben. Die wasserdichten, röntgenstrahlendurchlässigen Modelle sind strapazierfähig und langlebig sowie aufgrund ihrer Leichtigkeit und Handlichkeit in den jeweiligen HK-Laboren vielerorts problemlos einsetzbar. Durch die präzise Darstellung der anatomischen Strukturen ist eine realitätsgetreue Simulierung einer HK-Untersuchung stets gewährleistet. Die für eine HK-Untersuchung benötigten Instrumente können aufbewahrt und problemlos wiederverwendet werden, wodurch der Lerneffekt in Bezug auf das Handling mit den OP-Instrumenten nochmals maximiert wird. Die statistische Auswertung bestätigt eine Reduktion der benötigten DL-Zeiten durch mehrmaliges Wiederholen von gleichbleibenden Übungssequenzen, ebenso kann dadurch ein höheres Maß an Selbstvertrauen und Sicherheit in Bezug auf die praktischen Fertigkeiten erzielt werden.

## 3.2 Ablauf des Herzkatheter-Kurses in Trainingsmodulen

### 3.2.1 Trainingsmodul 1 – Theoretische Einführung

Eingangs erfolgte zum besseren Verständnis des Prinzips einer HK-Untersuchung jeweils eine den Vorkenntnissen und Erfahrungswerten der TN entsprechende theoretische Einführung zum allgemeinen Aufbau eines HK-Labors, zur Handhabung der verschiedenen Geräte sowie zur Orientierung am Röntgenbildschirm. Anhand des speziell für die Kurse verfassten Skripts „Trainingsmanual Herzkatheteruntersuchungen“ wurden zunächst die Grundlagen der HK-Untersuchung sowie die Pathophysiologie und Hämodynamik des gesunden Herzens sowie der AHF gemeinsam erarbeitet, bevor der Kurs im HK-Labor der jeweiligen Klinik fortgesetzt wurde. Eingangs wurde den TN die Bedienung und Einstellung der Geräte wie beispielsweise des beweglichen Tisches und der Röntgenröhre demonstriert (siehe Abb. 18 bis Abb. 20).

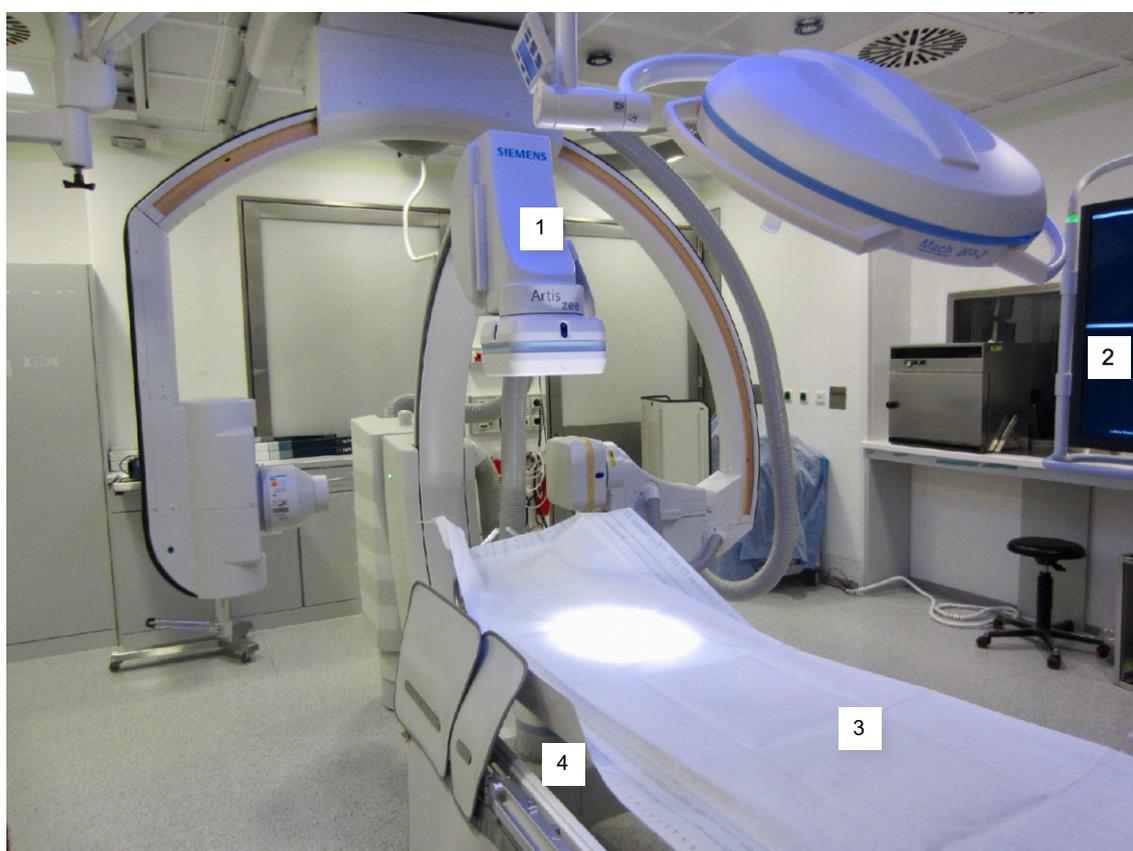


Abbildung 18: Geräte im HK-Labor. 1: Empfänger, 2: Bildschirm, 3: beweglicher Tisch, 4: Röntgenröhre.

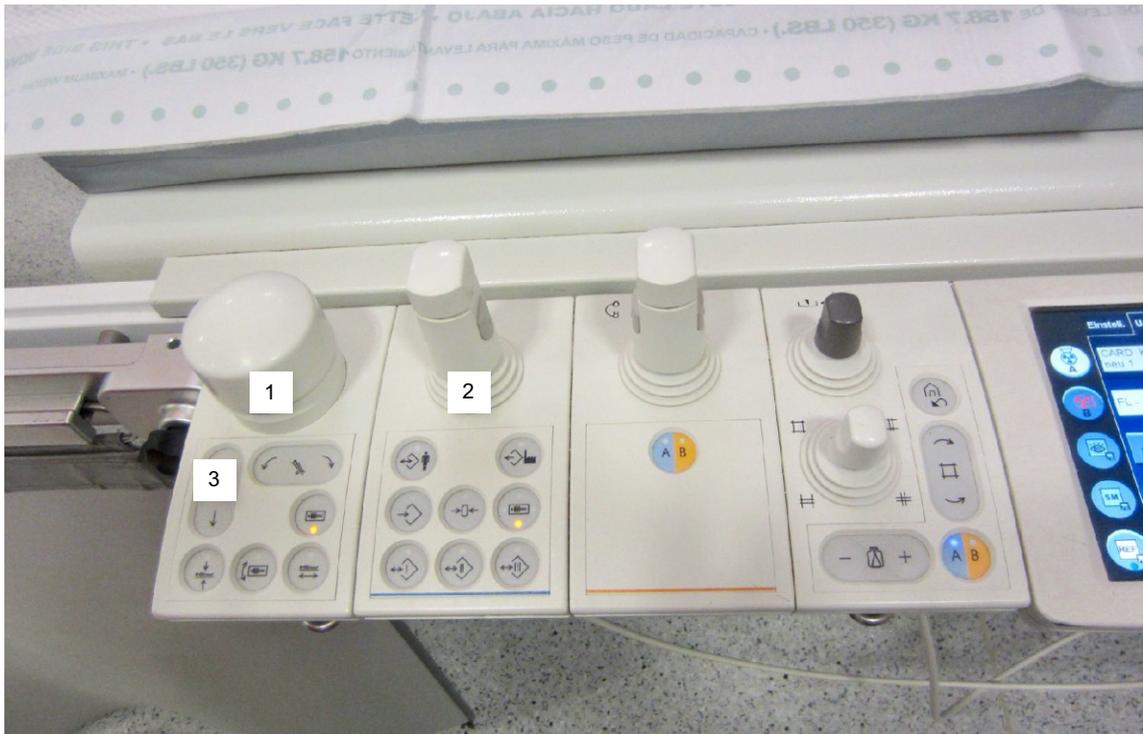


Abbildung 18: Steuerungsboard, um den Tisch entsprechend zu bewegen. 1: Griff, um den Tisch zu bewegen: kopfwärts/fußwärts/hinweg/hinzu. 2: Griff, um die Röntgenröhre zu bewegen: näher an das Objekt hin/weiter vom Objekt weg. 3: Griff, um den Tisch zu bewegen: deckenwärts/bodenwärts.



Abbildung 19: a-b) Demonstration der Tischbewegung nach a) kopfwärts und b) fußwärts.

Die von den Röntgenröhren gesendeten Strahlen werden von einem Bildwandler aufgenommen und umgewandelt und schließlich auf dem Monitor wiedergegeben. Je größer die Entfernung zwischen Bildwandler und Patienten ist, desto mehr Strahlung muss erzeugt werden. Aus diesem Grund ist es erstrebenswert, den Bildwandler nahe an die Patienten hinzuführen (siehe Abb. 21).

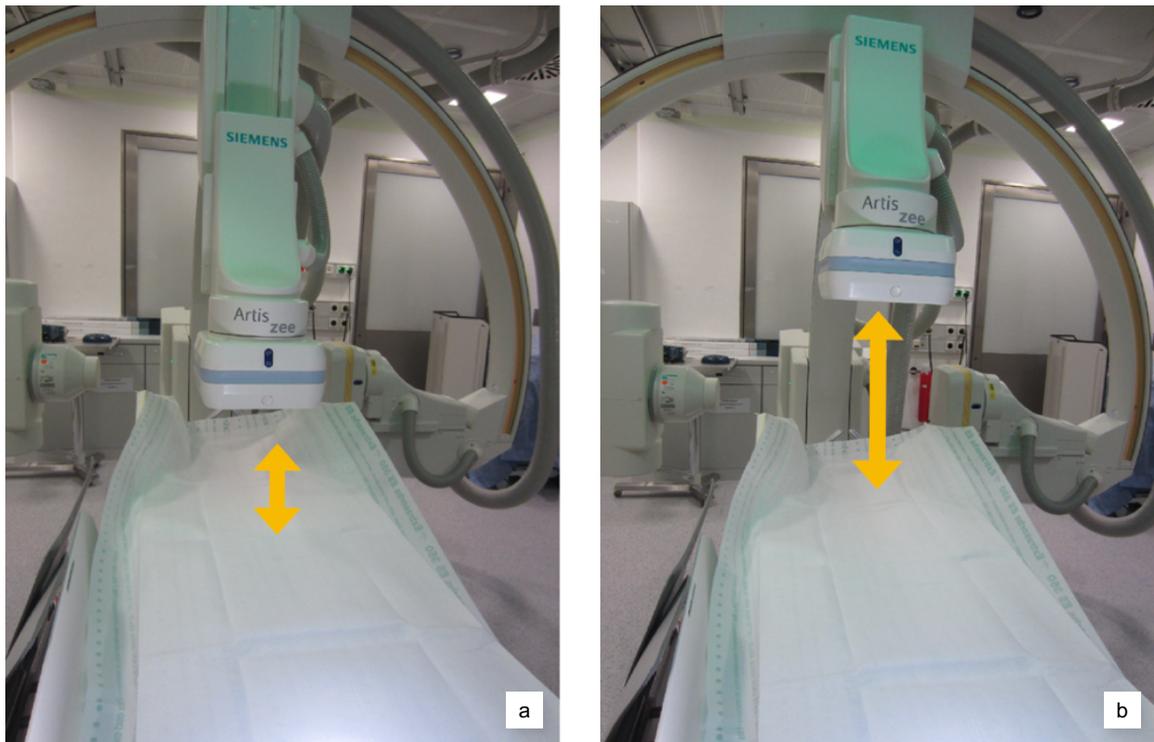


Abbildung 20: a-b) Demonstration: Bewegung der Röntgenröhre näher an das Objekt bzw. weiter weg vom Objekt. a) näher = kleinerer Objekt-Empfänger-Abstand = vergrößertes Bild = kleinerer Ausschnitt b) weiter weg = größerer Objekt-Empfänger-Abstand = verkleinertes Bild = größerer Ausschnitt.

### 3.2.2 Trainingsmodul 2 – Positionieren und Zentrieren der Herzmodelle

Zum Verständnis und zur Visualisierung der topografischen Anatomie in den zwei Ebenen der Durchleuchtung wurde das 3D-Modell des gesunden Säuglings-Herzens in eine lebensgroße Kunststoff-Babypuppe eingesetzt und auf dem HK-Tisch platziert (siehe Abb. 22 und Abb. 23). Somit konnte die radiologische Darstellung verdeutlicht werden (siehe Abb. 24 bis Abb. 27).

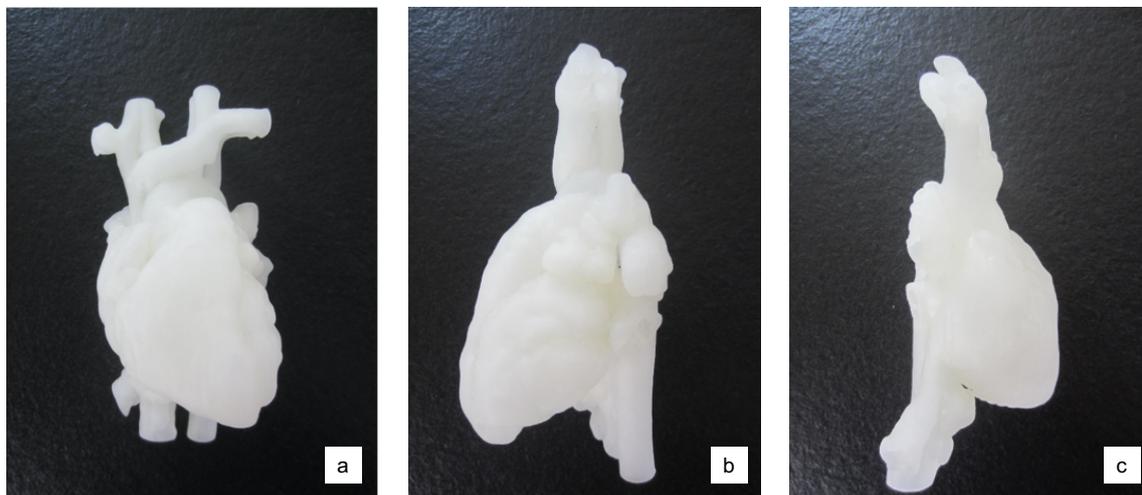


Abbildung 21: a-c) 3D-gedrucktes Modell eines physiologischen Herzens der Größe eines Neugeborenen-Herzens entsprechend. a) Ansicht von vorne. b) Ansicht von der linken Seite. c) Ansicht von der rechten Seite.



Abbildung 22: Demonstration der richtigen Platzierung von Patienten auf dem Untersuchungstisch. In diesem Fall Positionieren der Puppe auf dem HK-Tisch nach dem Einsetzen des 3D-gedruckten Herzens.

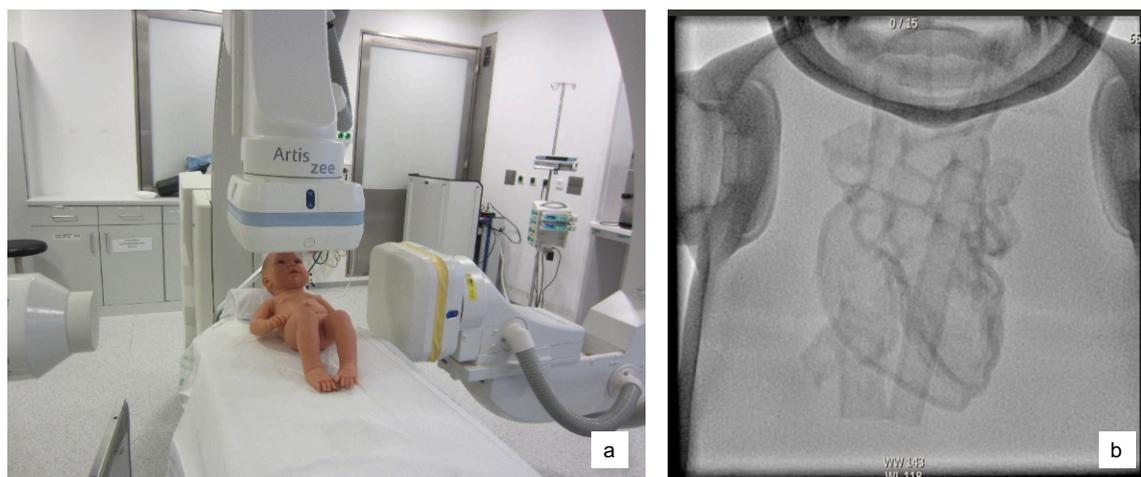


Abbildung 23: a) Richtige Positionierung des Tisches durch Bewegung nach deckenwärts und Heranfahren der Röhren. b) Erste Durchleuchtungskontrolle zur Evaluierung der Platzierung von Herz und Puppe bei noch nicht richtiger Position des Kopfes und damit Überlagerung der darzustellenden Strukturen.



Abbildung 24: a-b) Darstellung der Puppe auf dem HK-Tisch a) vor und b) nach der richtigen Positionierung des Kopfes zur Seite. Bildquelle: Brunner BS et al. 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.



Abbildung 25: a-b) Durchleuchtungskontrolle zur Evaluierung der Positionierung des Kopfes a) vor und b) nach der richtigen Positionierung des Kopfes zur Seite. Bildquelle: Brunner BS et al. 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.*



*Abbildung 26: a-b) Durchleuchtungskontrolle zur Positionierung des Armes a) vor und b) nach der richtigen Positionierung des Armes nach oben.*

### 3.2.3 Trainingsmodul 3 – Die Instrumente

Als nächstes Modul erfolgte die Erklärung der verschiedenen Instrumente, die man zur Durchführung einer HK-Untersuchung benötigt.

#### 3.2.3.1 Die verschiedenen Katheter

Ein HK ist im Wesentlichen ein langer, dünner und innen hohler Kunststoffschlauch, der im Prinzip einen direkten Zugang zum Herzen darstellt. (98) Die verschiedenen HK unterscheiden sich in Länge, Form und Durchmesser, wodurch entsprechend der zu untersuchenden Herzabschnitte und -gefäße der geeignete Katheter gewählt werden kann. Typische Beispiele sind in Abbildung 28 dargestellt. Je dicker der verwendete Katheter, desto einfacher gelingt das Vorschieben anderer Katheter, Drähte oder Stents. (99)

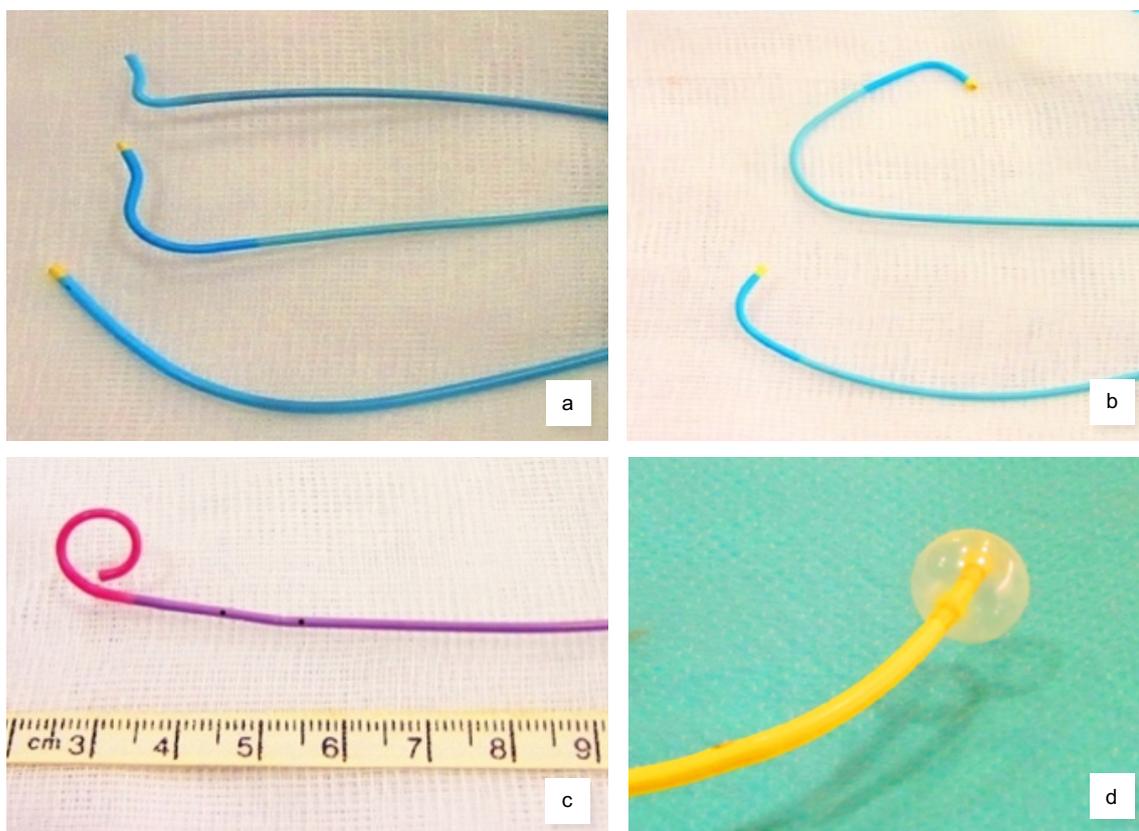


Abbildung 27: a-d) Die verschiedenen Herzkatheter: a) Koronarkatheter. b) Multipurpose-Katheter. c) Pigtail-Katheter. d) Ballonkatheter. (Mit gegenseitiger Genehmigung sind die Abbildungen auch in der Arbeit von Alisa Thierij abgelichtet).

In den Abbildungen 29 bis 31 wird schließlich gezeigt, wie mit den Kathetern die einzelnen Abschnitte des Herzens sondiert werden.

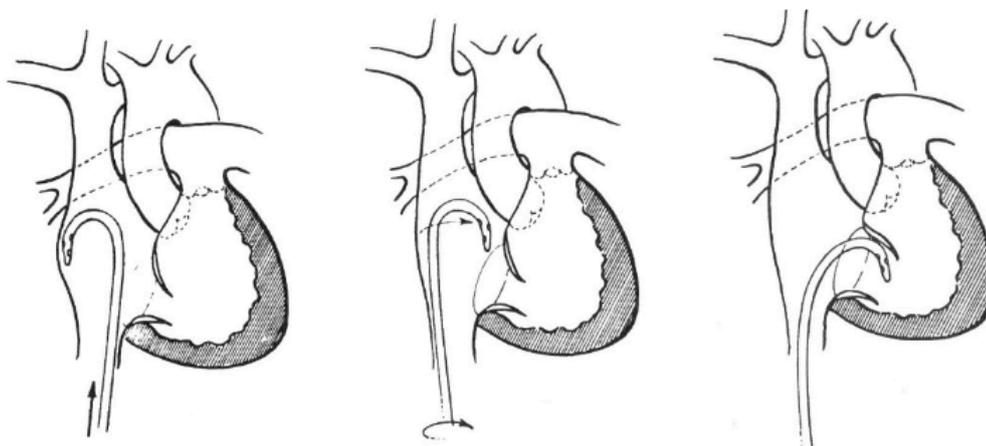


Abbildung 28: Schematische Darstellung: a) Passage eines vorgeformten Multipurpose-Katheters in den rechten Vorhof und rechten Ventrikel mittels Führungsdraht. b) Darstellung des Katheters im rechten Vorhof nach Drehen des Katheters in Richtung der Trikuspidalklappe. c) Vorschieben des Katheters über die Trikuspidalklappe in den rechten Ventrikel.

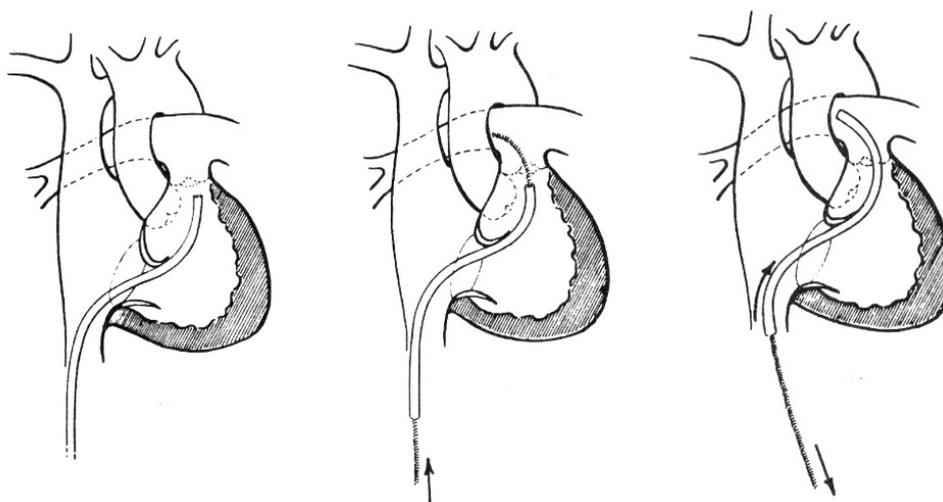


Abbildung 29: Schematische Darstellung: Passage eines vorgeformten Multipurpose-Katheters aus dem rechten Vorhof über den rechten Ventrikel in die Pulmonalarterie mittels Führungsdraht. a) Darstellung des Katheters nach Passage der Trikuspidalklappe von dem rechten Vorhof in den rechten Ventrikel und Vorschieben in Richtung der Pulmonalklappe. b) Darstellung des Katheters im rechten Ventrikel mit Vorschieben des Führungsdrahtes über die Pulmonalklappe in die Pulmonalarterie. c) Darstellung des Katheters in der Pulmonalarterie nach Passage der Pulmonalklappe nach Vorschieben des Katheters und Zurückziehen des Führungsdrahtes.

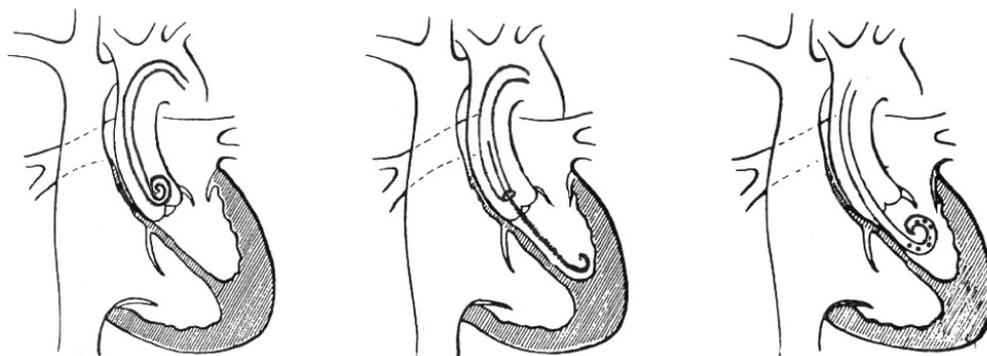


Abbildung 30: Schematische Darstellung der Passage eines Pigtail-Katheters über die Aortenklappe in den linken Ventrikel mittels Führungsdraht. a) Darstellung des Katheters in der Aorta ascendens. b) Darstellung des Katheters in der Aorta ascendens mit Verschieben des Führungsdrahtes über die Aortenklappe in den linken Ventrikel. c) Darstellung des Katheters im linken Ventrikel nach Verschieben des Katheters über die Aortenklappe.

### 3.2.3.2 Die Einführschleusen

Bei den sogenannten Einführschleusen handelt es sich im Wesentlichen um weiche Plastikröhrchen, die der Vermeidung von Blutungen dienen. Sie werden anhand der Seldinger-Technik eingebracht. Der seitlich an den Einführschleusen befindliche Schlauch dient der Entlüftung und Spülung (siehe Abb. 32).



Abbildung 31: Einführschleusen, bestehend aus abnehmbarem hämostatischem Ventil, 3-Wege-Hahn und Dilatator.

### 3.2.3.3 Die Drähte

Drähte dienen bei einer HK-Untersuchung als Leitstruktur. Sie besitzen jeweils ein weiches und ein hartes Ende (siehe Abb. 33).

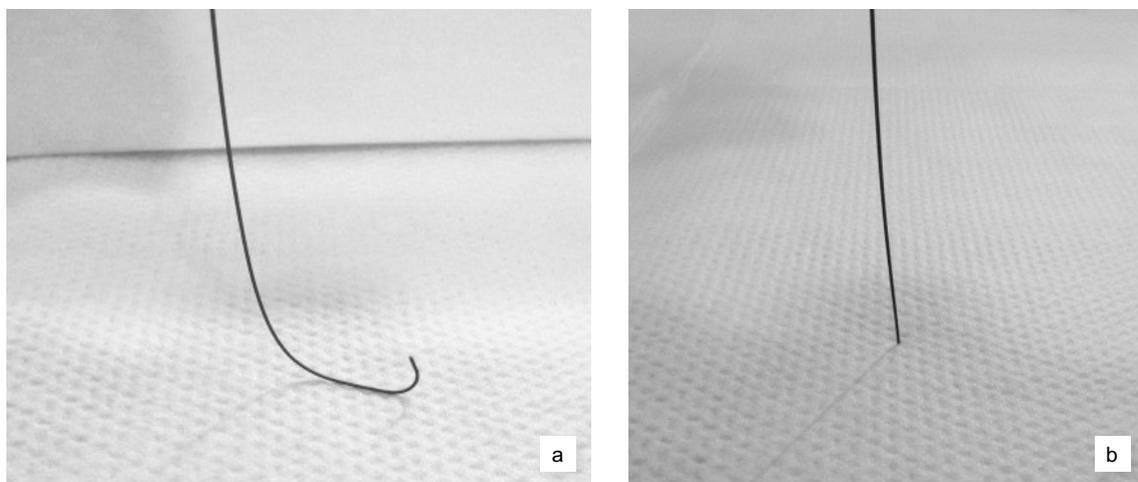


Abbildung 32: a-b) Darstellung der unterschiedlichen Drahtenden. a) weiches Ende. b) hartes Ende.

### 3.2.4 Trainingsmodul 4 – Das Handling mit den Instrumenten

Bevor die Modelle zum Einsatz gekommen sind, wurde den TN zuerst der Umgang mit den einzelnen Instrumenten nähergebracht. Schritt für Schritt wurde ihnen die richtige Handhabung erläutert.

Im ersten Schritt wird die Einführschleuse entsprechend positioniert. Anschließend muss das hämodynamische Ventil entfernt werden (siehe Abb. 34). Daraufhin wird der Draht in eine sogenannte Einführhilfe eingefädelt, um dann problemlos in die Einführschleuse eingeführt zu werden (siehe Abb. 35). Im nächsten Schritt kann zunächst der richtige Umgang mit dem Draht geübt werden, indem man wiederholt (siehe Abb. 36).

Kommt der Katheter schließlich zum Einsatz, erfolgt als erstes ein Spülen des Katheters mit anschließender Zusammenführung von Draht und Katheter, indem der Draht in den Katheter eingefädelt wird (siehe Abb. 37). Anschließend wird der Katheter samt Draht in die Einführschleuse eingebracht. Der Katheter kann nun problemlos vorgeschoben werden, wohingegen der Draht gehalten und somit an seiner Position fixiert wird (siehe Abb. 38). Es wird zudem gezeigt, wie der Draht richtig vorgeschoben werden kann (siehe Abb. 39). Im Folgenden wird außerdem veranschaulicht, wie ein Katheterwechsel abläuft (siehe Abb. 40).

### 3.2.4.1 Das Handling mit der Schleuse und dem Draht

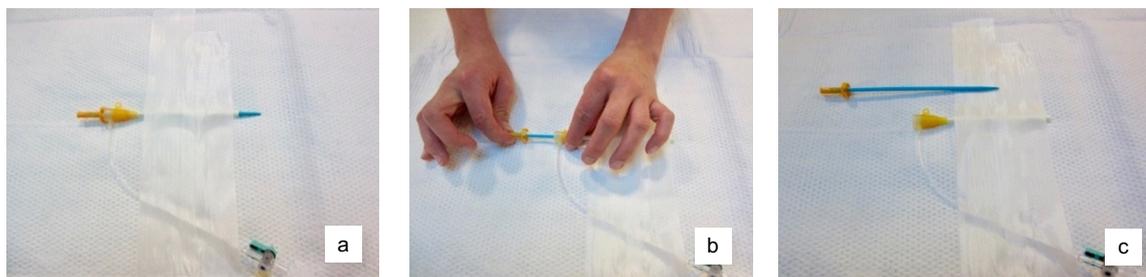


Abbildung 33: a-c) Das Handling mit der Schleuse: a) Fixieren der Einführschleuse auf dem HK-Tisch. b) Entfernen des hämodynamischen Ventils aus der Einführschleuse. c) Einführschleuse nach Entfernen des Ventils.

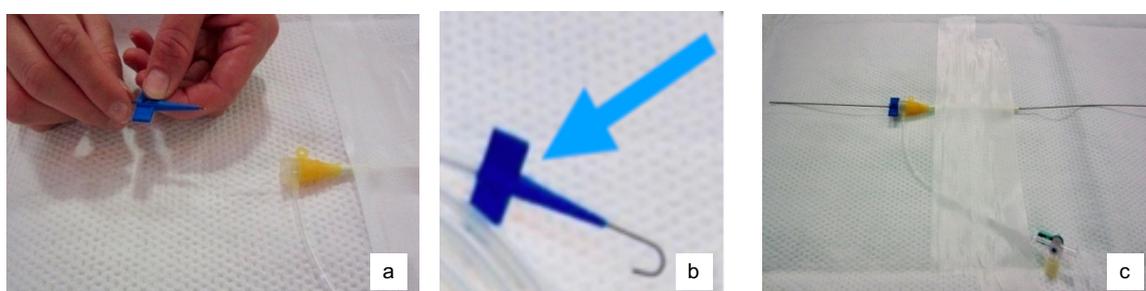


Abbildung 34: a) Darstellung der Einführhilfe beim Einfädeln des Drahtes. b) Einführhilfe mit eingefädeltm Draht. c) Darstellung von Draht und Einführhilfe nach Einbringen in die Einführschleuse.

### 3.2.4.2 Den Draht richtig aufrollen

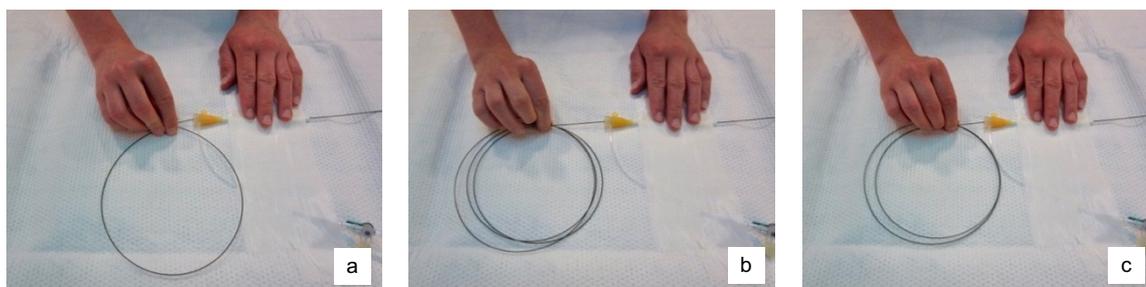


Abbildung 35: a-c) Aufrollen des Drahtes in mehreren Schritten.

### 3.2.4.3 Das Handling mit Draht und Katheter

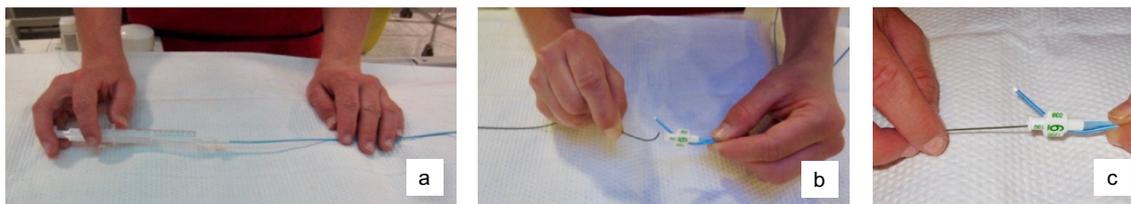


Abbildung 36: a) Spülen des Katheters. b) Zusammenführen von Draht und Katheter. c) Einfädeln des Drahtes.

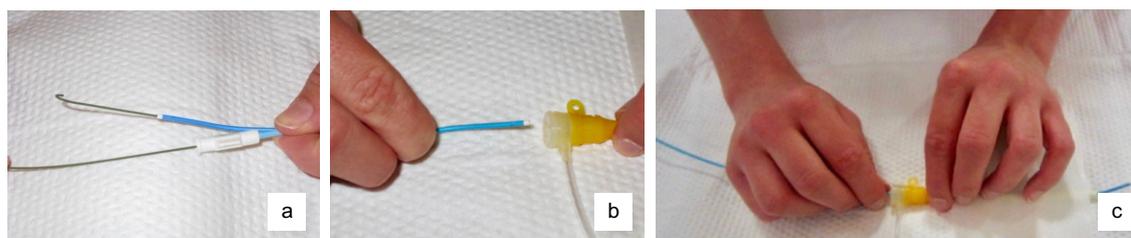


Abbildung 37: a) Katheter mit eingefädeltm Draht. b) Katheter in Schleuse einführen. c) Katheter schieben, Draht halten.

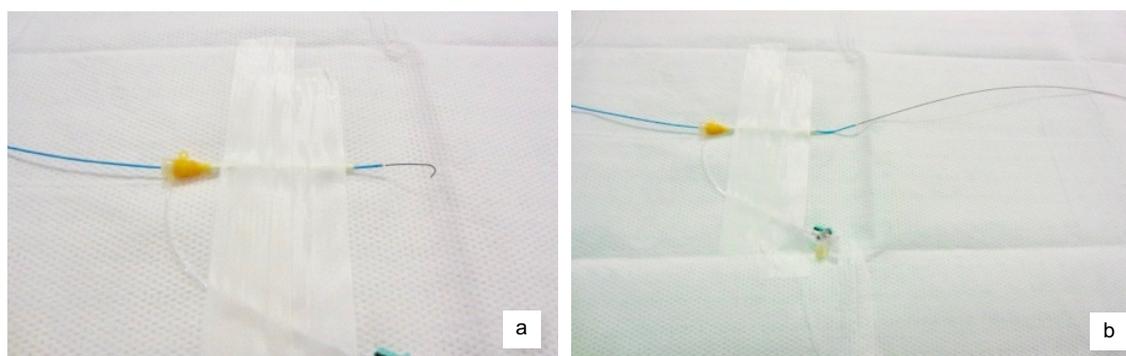


Abbildung 38: a) Darstellung von Katheter und Draht nach Einführen in Schleuse. b) Resultat nach Vorschieben des Drahtes.

### 3.2.4.4 Katheter wechseln

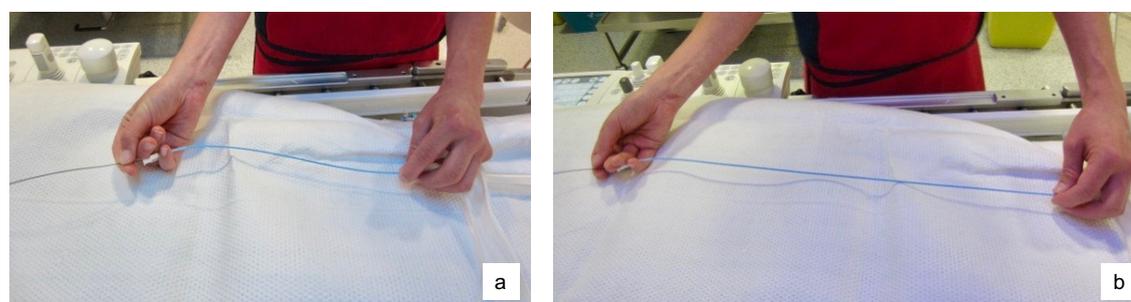


Abbildung 39: a) Draht mit Daumen und Zeigefinger halten. b) Katheter mit dem kleinen Finger und dem Ringfinger ziehen. Bildquelle: Brunner BS et al. 3D-printed heart models for hands-on training in pediatric cardiology – the future of modern learning and teaching? GMS J Med Educ. 2022. 39(2): Doc23. DOI. 10.3205/zma001544, URN; urn:nbn:de:0183-zma0015444.

### 3.2.5 Trainingsmodul 5 – Training am Modell

#### 3.2.5.1 Modell 1 – Das venöse System

Im Folgenden sind Darstellungen einer HK-Untersuchung im HK-Labor abgebildet. Es wird gezeigt, wie sowohl der Draht als auch der Katheter zunächst ins RA und anschließend in die V. cava superior vorgeschoben werden (siehe Abb. 41 und Abb. 42). Es wird zudem bildlich dargestellt, wie der Katheter vom RA über die TK in den RV und schließlich über die PK in die PA vorgeschoben wird (siehe Abb. 43 und Abb. 44).

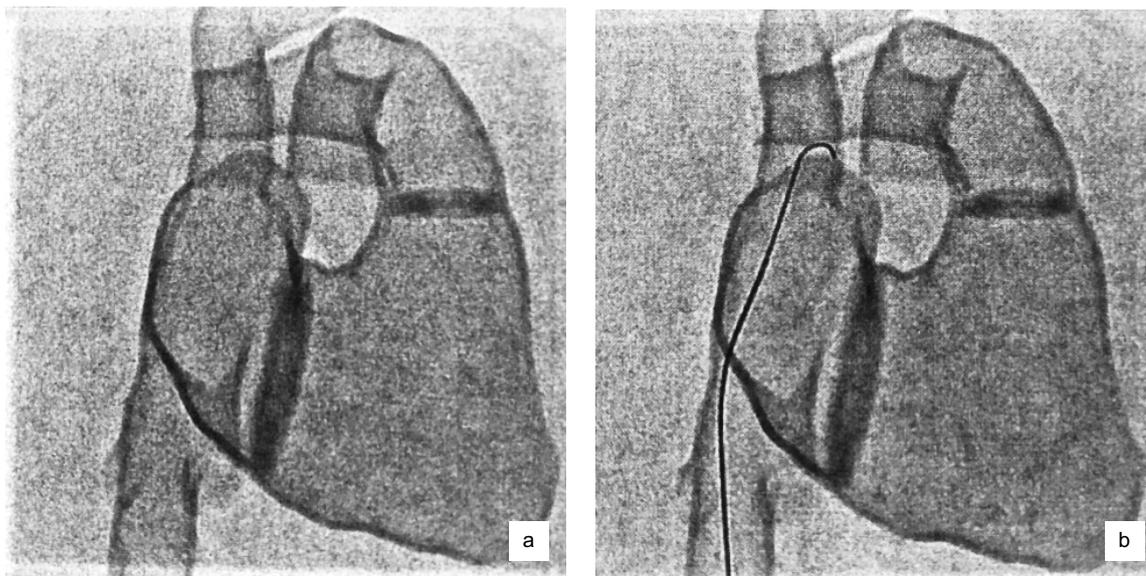


Abbildung 40: a) Positionieren und Zentrieren des Modells. b) Draht vorschieben in den rechten Vorhof, Katheter nachschieben.

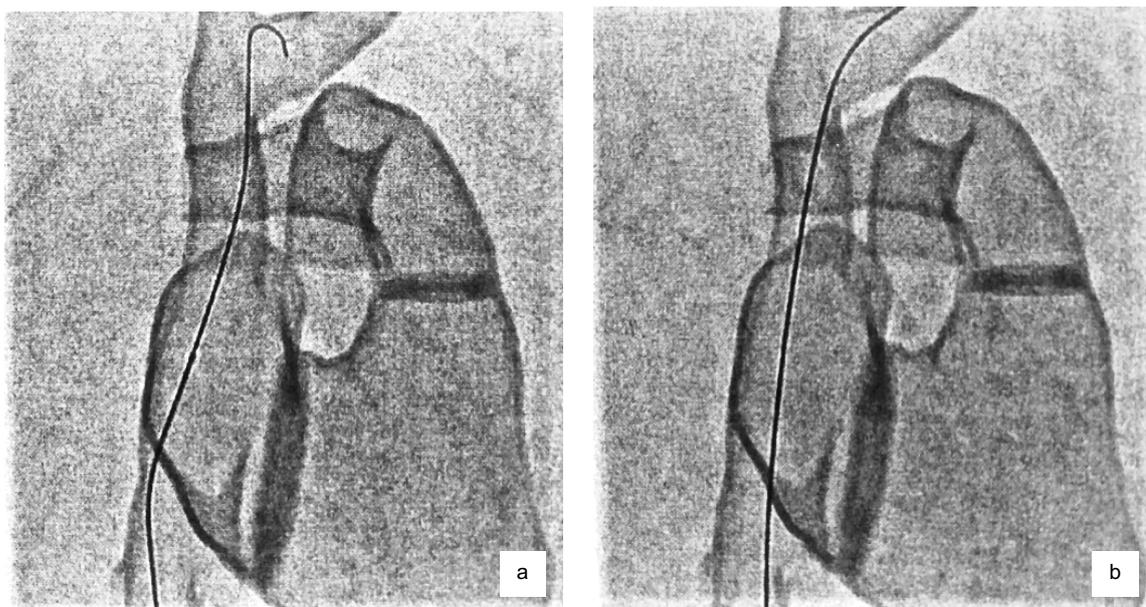


Abbildung 41: a) Vorschieben des Drahtes in die V. cava superior, Katheter nachschieben. b) Resultat.

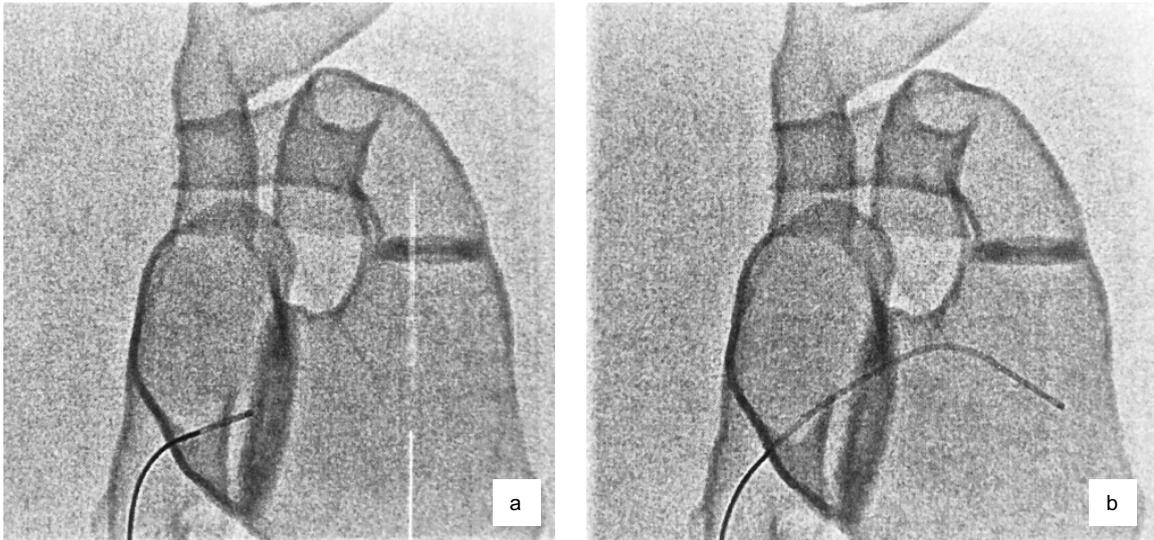


Abbildung 42: a) Darstellung des Katheters im RA. b) Vorschieben des Katheters über die TK in den RV.

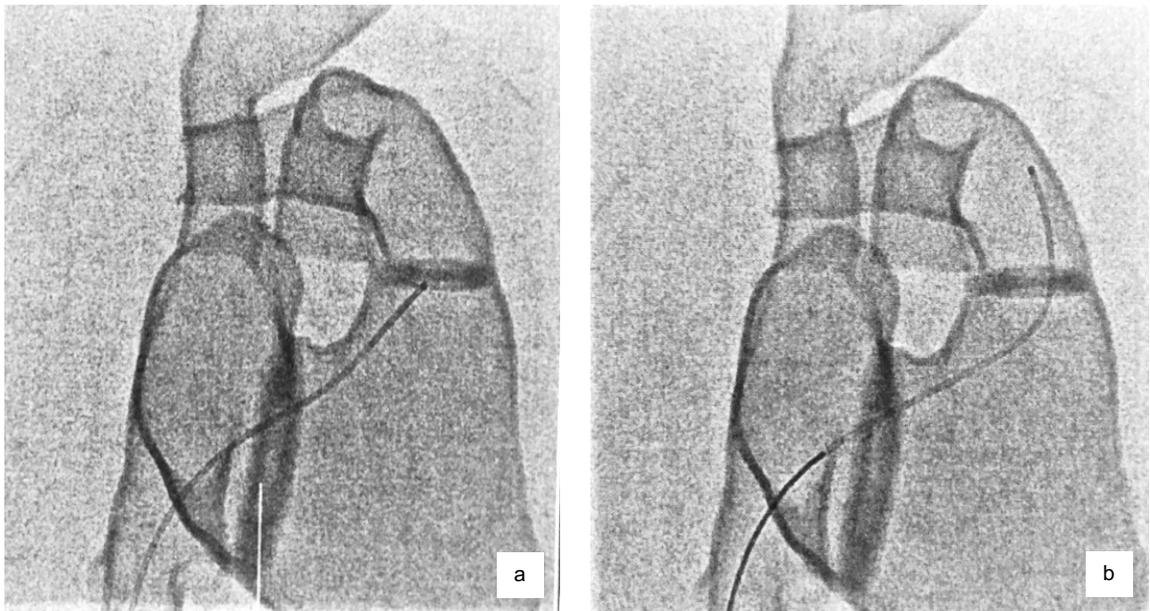


Abbildung 43: a) Drehen von Draht und Katheter. b) Vorschieben des Katheters über die PKin die Pulmonalarterie.

### 3.2.5.2 Modell 2 – Das arterielle System

Im Folgenden wird die retrograde Sondierung des Herzens dargestellt. Es wird gezeigt, wie sowohl der Draht als auch der Katheter von der Aorta kommend über die AK in den LV vorgeschoben werden (siehe Abb. 45 und Abb. 46).

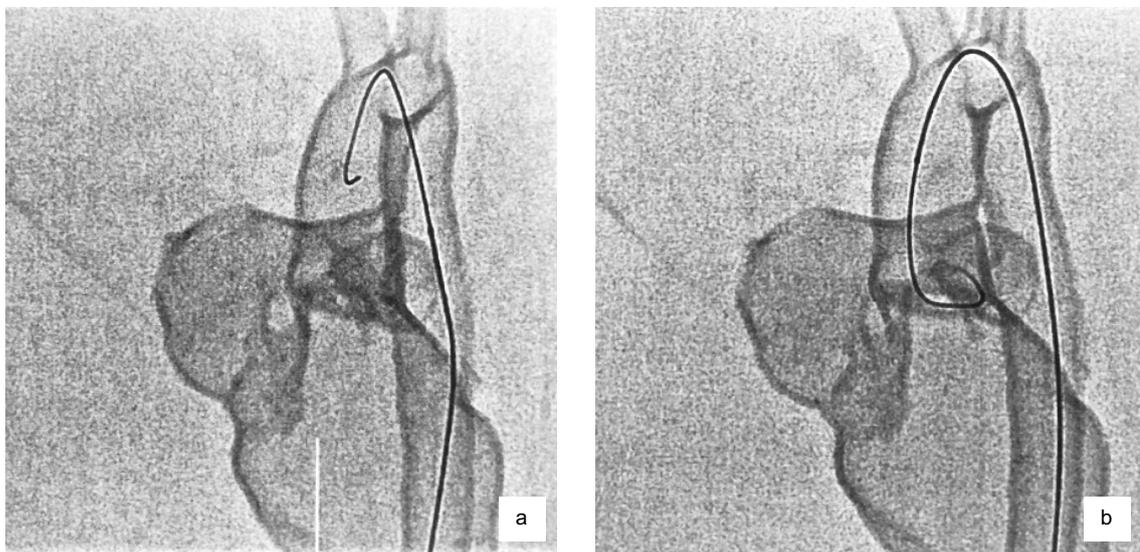


Abbildung 44: a) Vorschieben von Draht und Katheter bis zur Aortenklappe. b) Resultat.

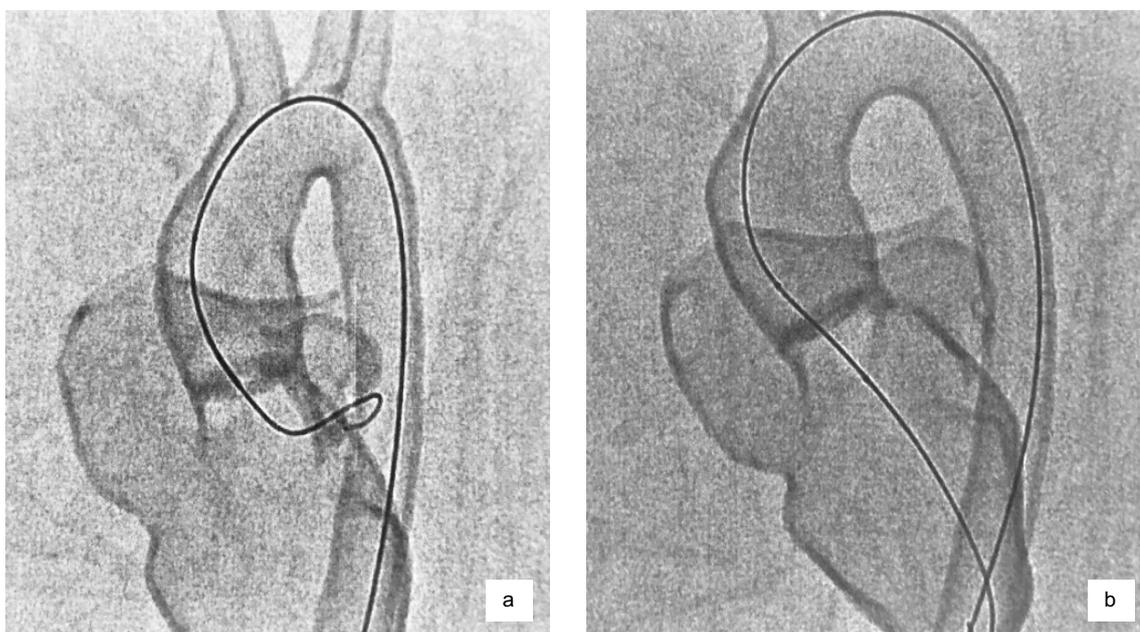


Abbildung 45: a) Sondieren der Klappe. b) Einbringen von Draht und Katheter in den linken Ventrikel.

### 3.2.6 Trainingsmodul 6 – Die Ballondilatation

Wie der Name schon vermuten lässt, ist ein Ballonkatheter dadurch definiert, dass an seinem Ende ein Ballon angebracht ist, der bei maximaler Füllung in seiner endgültigen Form genau vorgeschriebenen Maßangaben entspricht (siehe Abb. 47). Ein Ballon besteht in der Regel aus einem wenig nachgebendem PVC-Kunststoff und bleibt somit auch bei bestimmten Druckwerten größenstabil. Ballonkatheter unterscheiden sich in ihrer Beschaffenheit. Während weiche

Katheter dazu dienen, sich bestimmten Konturen anzupassen wie bei einem ASD, dienen stabile Ballonkatheter unter anderem einer Klappendehnung. Die Ballonlänge an sich beträgt je nach Einsatzgebiet meist 10, 20, 30 oder 40 mm.

### 3.2.6.1 Das Prinzip der Ballondilatation

In den vorangegangenen Abschnitten wurde das Prinzip einer HK-Untersuchung bereits erläutert, beim Einsatz einer Ballondilatation zur Behandlung verschiedener Herzvitien kommt nun der vorhin beschriebene Katheterwechsel zum Einsatz.

#### 3.2.6.1.1 Indeflatoren

Eingangs werden Standardkatheter und Führungsdraht über die großen Gefäße bis zum Herzen vorgeschoben. Danach wird der Katheter wieder entfernt, während der Draht belassen wird und als Führungsschiene für den Ballonkatheter dient. Der Ballonkatheter wird über den Draht vorgeschoben und in der entsprechenden Position unter Röntgenkontrolle auf die maximal zugelassene Größe aufgeblasen. Anschließend wird der Ballon wieder abgelassen, der Ballonkatheter wird zurückgezogen, während der Draht wiederum belassen wird. Nun kann über den Führungsdraht erneut ein entsprechender Katheter vorgeschoben werden, beispielsweise zur Blutdruckmessung oder Kontrastmittelgabe.

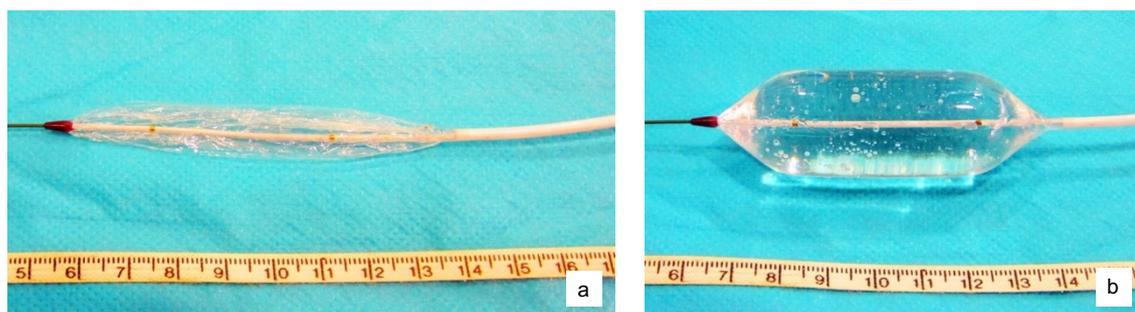


Abbildung 46: a) Ballonkatheter in zusammengefaltetem Zustand sowie bei b) maximaler Füllung mit Kochsalzlösung. Die beiden Punkte auf dem Katheter beschreiben den Bereich des Ballons, zwischen dem der maximale Ballondurchmesser gewährleistet ist.

Im Folgenden (siehe Abb. 48) wird der Entfaltungsprozess eines Ballonkatheters bildlich dargestellt. Es wird gezeigt, wie eine Gefäßengstelle, in diesem Fall durch das mittig platzierte, rote Gummiband veranschaulicht, aufgedehnt wird. Der im Bereich der Engstelle platzierte, eingangs unentfaltete, Ballonkatheter gewinnt durch zunehmenden Druck bzw. durch zunehmende Füllung an Volumen, bis er komplett entfaltet und die Engstelle aufgedehnt ist.

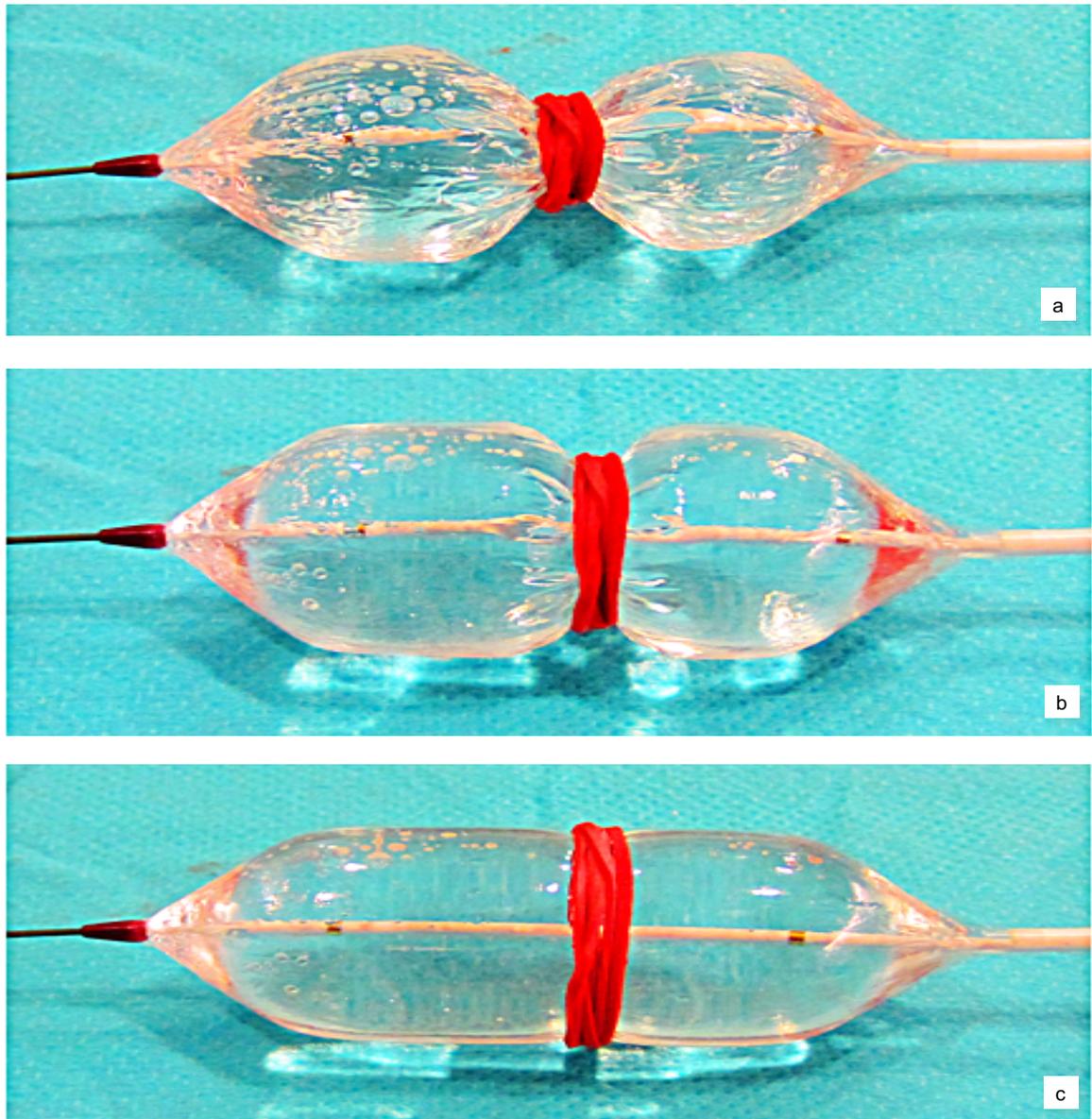


Abbildung 47: Ballonkatheter, der im Bereich einer Engstelle (hier dargestellt durch das Gummi) entfaltet wird. a) Darstellung des Ballonkatheters im unentfalteten Zustand. b) Mit zunehmendem Druck und zunehmender Füllung entfaltet sich der Ballon im Verlauf immer mehr, bis er schließlich c) komplett entfaltet ist und die Engstelle komplett aufgedehnt ist.

### 3.2.6.2 Ballondilatation am Beispiel einer ISTA

Im Folgenden wird die Ballondilatation einer ISTA bildlich dargestellt. Es wird gezeigt, wie im Zuge einer retrograden Sondierung zunächst sowohl Draht als auch Katheter über die Aorta descendens vorgeschoben werden und schließlich die ISTA passiert wird (siehe Abb. 49). Im nächsten Schritt werden Draht und Katheter über die AK bis in den LV vorgeschoben. Der Ballonkatheter wird nun so positioniert, dass er an der Stelle der ISTA zu liegen kommt und schließlich vorsichtig entfaltet werden kann, bis die ISTA schließlich aufgedehnt ist (siehe Abb. 50).



Abbildung 48: a+b) Vorschieben von Draht und Katheter über die Aorta descendens bis vor die Aortenisthmusstenose mit Drehen des Drahtes. c) Passieren der Aortenisthmusstenose.

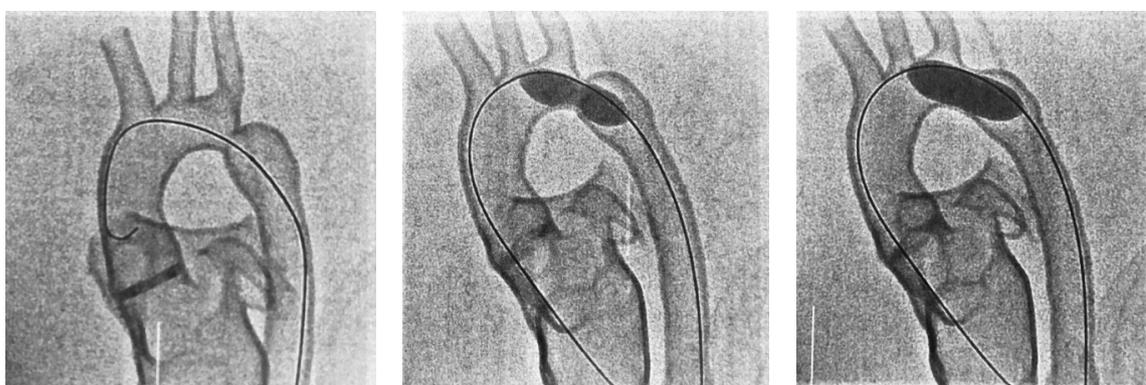


Abbildung 49: a) Vorschieben von Draht und Katheter bis vor die Aortenklappe nach Passieren der Aortenisthmusstenose. b) Vorschieben von Draht und Katheter über die Aortenklappe bis in den linken Ventrikel und Aufdehnen des Ballonkatheters im Bereich der Aortenisthmusstenose. c) Maximal entfalteter Ballonkatheter mit Aufdehnen der Engstelle.

### 3.3 Darstellung des Ablaufs eines HK-Kurses am LMU Klinikum

Vor jeder praktischen Übung erfolgte eine kurze Erklärung des Ablaufs und eine Erläuterung des Handlings mit den Instrumenten. Die einzelnen Schritte der HK-Untersuchung wurden anhand der 3D-gedruckten Modelle jeweils in Zweiergruppen abgehandelt. Dabei sollten sich die TN in ihrer Position als erster und zweiter Operateur abwechseln, sodass sie die Handgriffe beider Beteiligten verinnerlichen konnten.

Die erste Übung erfolgte an einem 3D-gedruckten Herzmodell des linken Herzens mit physiologischer Herzanatomie, welches in anterior-posteriorer (Abb. 51A) und lateraler (Abb. 51B) Ebene durchleuchtet werden sollte. Ziel dabei war die retrograde Sondierung des linken Herzens über die absteigende Aorta. Analog dazu wurde eine Übung an einem 3D-gedruckten Herzmodell mit physiologischer Anatomie des rechten Herzes durchgeführt. In diesem Fall sollte das rechte Herz antegrad über die untere Hohlvene sondiert werden. Anhand dieser Übung konnte den TN auch die intrakardiale Messung von Druckkurven, Sättigung und des Flows

nähergebracht werden. Im Vordergrund stand dabei besonders die Technik des Katheterwechsels und die Steuerung des Führungsdrahtes sowie des Katheters.

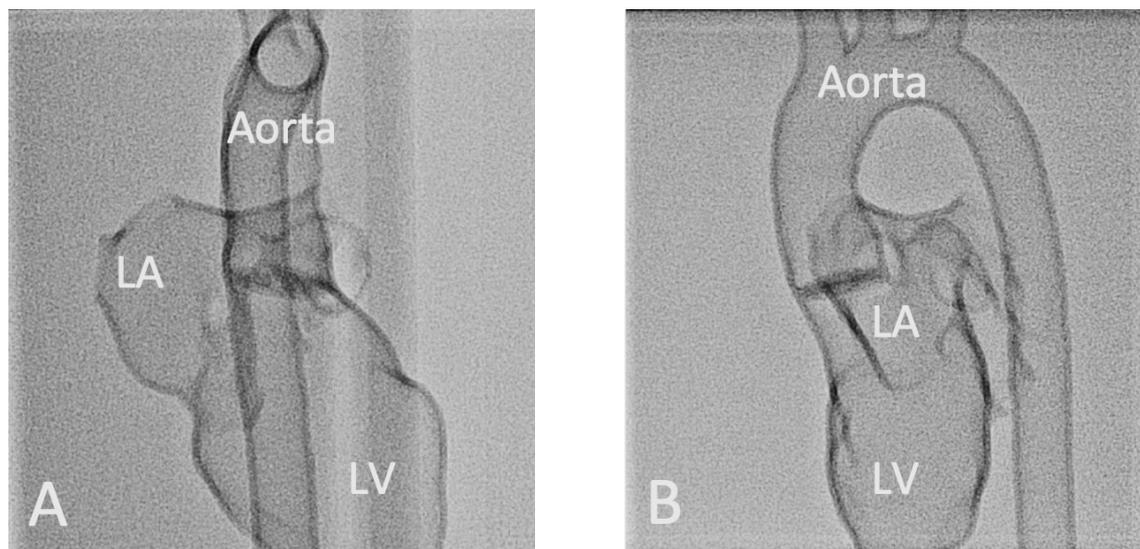


Abbildung 50: Durchleuchtung eines 3D-gedruckten Herzmodells mit physiologischer Herzanatomie des linken Herzens in zwei Ebenen. (LV = linker Ventrikel, LA = linker Vorhof). A: Darstellung des 3D-gedruckten Herzmodells in anterior-posteriorer Durchleuchtung. B: Darstellung des 3D-gedruckten Herzmodells in lateraler Durchleuchtung. Bildquelle: Brunner BS et al. 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.

Nachdem die TN mit den Modellen der physiologischen Herzanatomie vertraut gemacht wurden, kamen im nächsten Schritt die 3D-gedruckten Herzmodellen mit AHF zum Einsatz. Der Fokus lag auf Herzfehlern mit Stenosen, zu denen unter anderem die ISTA, AS (Abb. 52a) und PS (Abb. 52b) zählt. Anhand der Modelle sollten Interventionen mittels Ballonkatheter geübt werden.

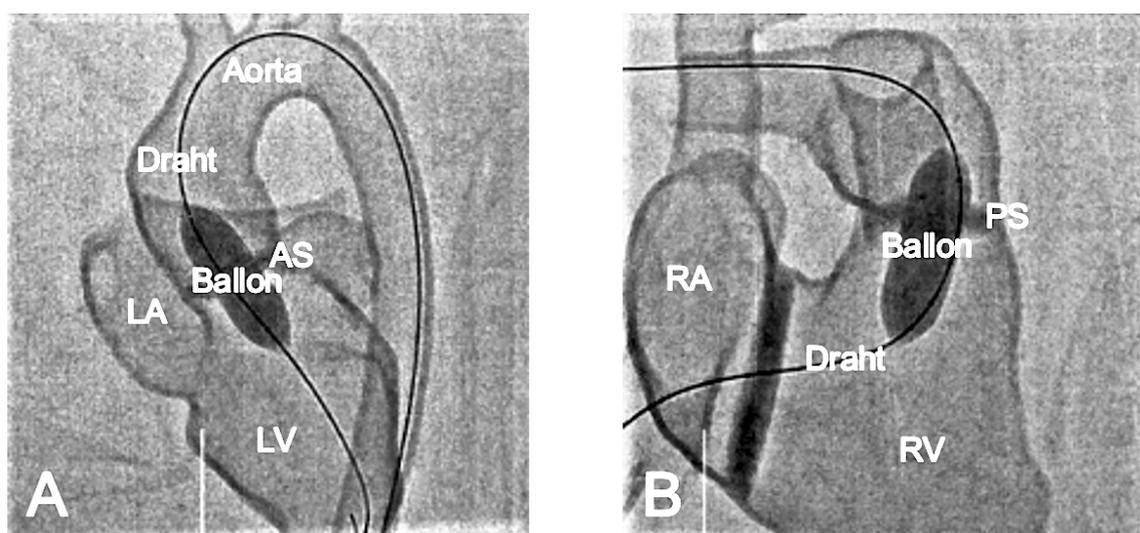


Abbildung 51: Ballondilatation von Stenosen im 3D-gedruckten Herzmodell unter Durchleuchtung (AS = Aortenklappenstenose, PS = Pulmonalklappenstenose, LV = linker Ventrikel, LA = linker Vorhof, RV = rechter Ventrikel, RA = rechter Vorhof). A: Durchleuchtungsaufnahme des 3D-gedruckten Herzmodells einer AS mit inflatiertem Dilatationsballon. B: Durchleuchtungsaufnahme des 3D-gedruckten Herzmodells einer PS mit inflatiertem Dilatationsballon. Bildquelle: Brunner BS et al. 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.

Zudem wurde das Vorgehen bei Herzfehlern mit Verbindung zwischen arteriellem und venösem System, wie dem ASD und dem PDA, ebenfalls schrittweise besprochen. Für den Verschluss des ASD werden Schirmchen (Okkluder) verwendet. Bei einem PDA können Schirmchen oder 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 testen.

### 3.4 Durchleuchtungszeiten

Bevor die Modelle den Ärzten des Ayder Referral Hospitals in Mekelle für Trainingszwecke zur Verfügung gestellt wurden, haben Studenten und Ärzte im LMU Klinikum Großhadern sowie im Allgemeinen Krankenhaus der Stadt Wien mit den Modellen trainiert.

#### 3.4.1 Studentenkurs

Am ersten TK nahmen elf Studenten, die keinerlei Vorkenntnisse und Erfahrungswerte im HK-Labor hatten, teil. Erst nach einer ausführlichen Einführung in die einzelnen Untersuchungsschritte sowie nach einer genauen Instruktion betreffend die Handhabung von Führungsdraht und Katheter, welcher von der V. cava inferior, also der unteren Hohlvene, über das RA und den RV in die PA vorgeschoben werden muss, konnten die TN mit der Simulation einer kompletten HK-Untersuchung beginnen. Jeder der TN musste insgesamt drei Übungsdurchgänge absolvieren, die dafür benötigten DL-Zeiten wurden aufgezeichnet. Die ersten zwei Versuche wurden am anatomisch korrekten Herzmodell durchgeführt, erst bei der dritten Übung kam das Modell mit PS zum Einsatz, wobei die größte Schwierigkeit somit darin bestand, Draht und Katheter an der PS vorbeizuführen (siehe Abb. 53).

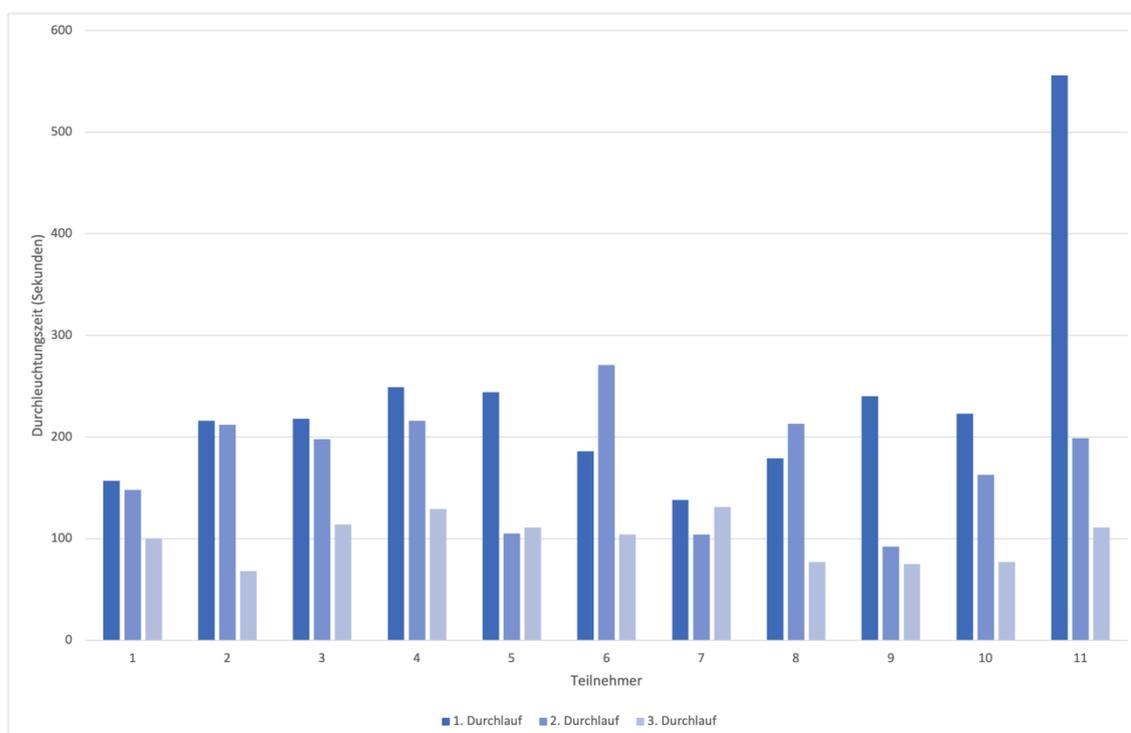


Abbildung 52: Modelltestung im Rahmen des Trainingskurses für Studierende im HK-Labor, Klinikum Großhadern: Ergebnisse und Vergleich der DL-Zeiten der drei Übungsrunden am anatomisch korrekten Modell (Durchlauf 1 und 2) sowie am Modell der Pulmonalklappenstenose (Durchlauf 3). Im post hoc Test zeigt sich, dass sich die DL-Zeit zwischen Durchgang 1 und Durchgang 3 ( $p < 0,01$ ) sowie zwischen

Durchgang 2 und Durchgang 3 ( $p = 0,02$ ) signifikant verbessert. Zwischen Durchgang 1 und 2 hat sich hingegen keine signifikante Verbesserung gezeigt ( $p = 0,25$ ).

Im Folgenden wird gezeigt, wie sich die benötigte mittlere DL-Zeit der drei Durchgänge verändert (siehe Abb. 54).

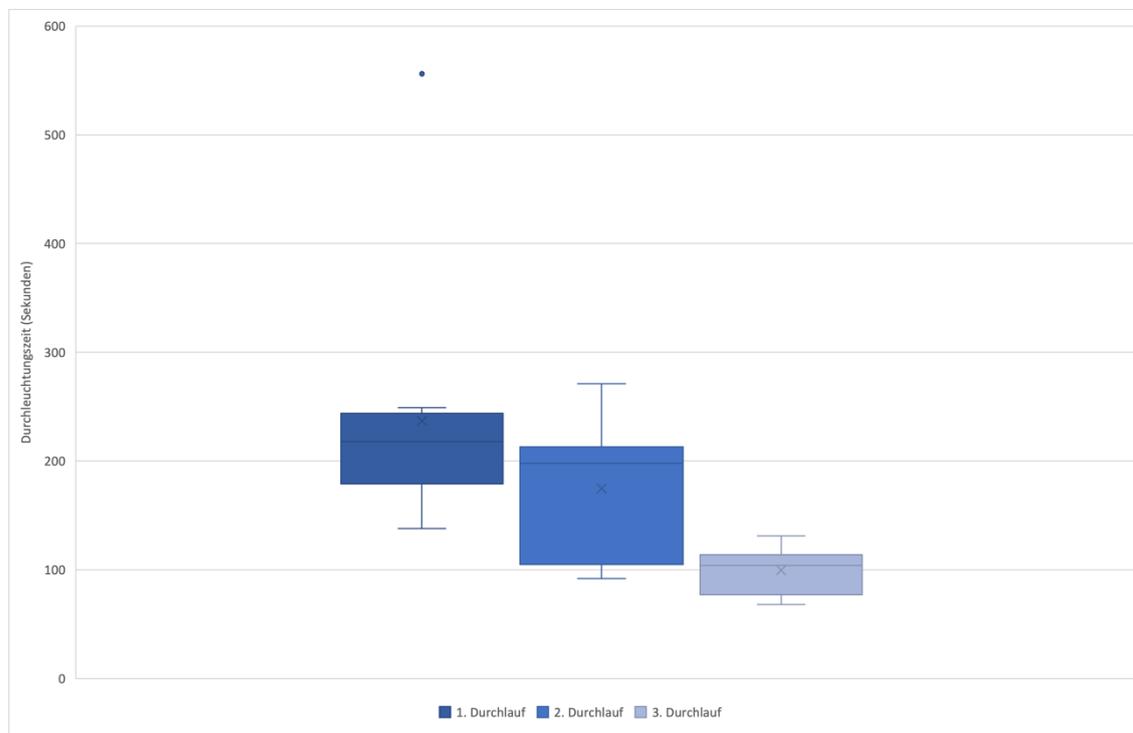


Abbildung 54: Vergleich der benötigten mittleren DL-Zeit der drei Durchgänge im Rahmen des Studentenkurses im Klinikum Großhadern, gemessen in Sekunden.

Die mittlere DL-Zeit verringerte sich von 237 Sekunden im ersten Durchlauf auf 100 Sekunden in der dritten Runde. Allerdings hebt sich in der ersten Runde ein Datenwert sehr stark von den anderen Werten ab, sodass hierbei von einem statistischen Ausreißer die Rede ist. Aussagekräftiger ist deshalb wahrscheinlich ein Vergleich von Runde 2 und 3. Dabei erfuhr der mediane Wert von 175 Sekunden auf 100 Sekunden ebenfalls eine deutliche Reduzierung, obwohl die Aufgabenstellung in Runde 3 am Modell der PS, wie oben angeführt, wesentlich komplexer und schwieriger war.

Betrachtet man Abbildung 53, sticht ein Minimumwert von lediglich 68 Sekunden als bemerkenswerte Leistung heraus. Wie aus den Diagrammen ersichtlich, haben fast alle TN die wesentlich anspruchsvollere Runde 3 mit einem signifikanten Zeitgewinn abgeschlossen, sodass in der Tat auf einen positiven Lerneffekt geschlossen werden kann. (Friedman-Test: Chi-Quadrat (2) = 14,72,  $p < 0,001$ ,  $n = 11$ . Vorzeichentest: \* $p < 0,05$ , \*\*\* $p < 0,001$ ). Im post hoc Test hat sich gezeigt, dass sich die DL-Zeit zwischen Durchgang 1 und Durchgang 3 ( $p < 0,01$ ) sowie zwischen Durchgang 2 und Durchgang 3 ( $p = 0,02$ ) signifikant verbessert hat. Zwischen Durchgang 1 und Durchgang 2 hat sich hingegen keine signifikante Verbesserung gezeigt ( $p = 0,25$ ).

### 3.4.2 Ärztekurs

Am TK für Ärzte am LMU Klinikum Großhadern nahmen drei Personen teil, darunter ein junger Assistenzarzt, der erstmals mit der Arbeit in einem HK-Labor konfrontiert war. Das Training beschränkte sich dieses Mal ausschließlich auf das gedruckte 3D-Herzmodell mit PS (siehe Abb. 55).

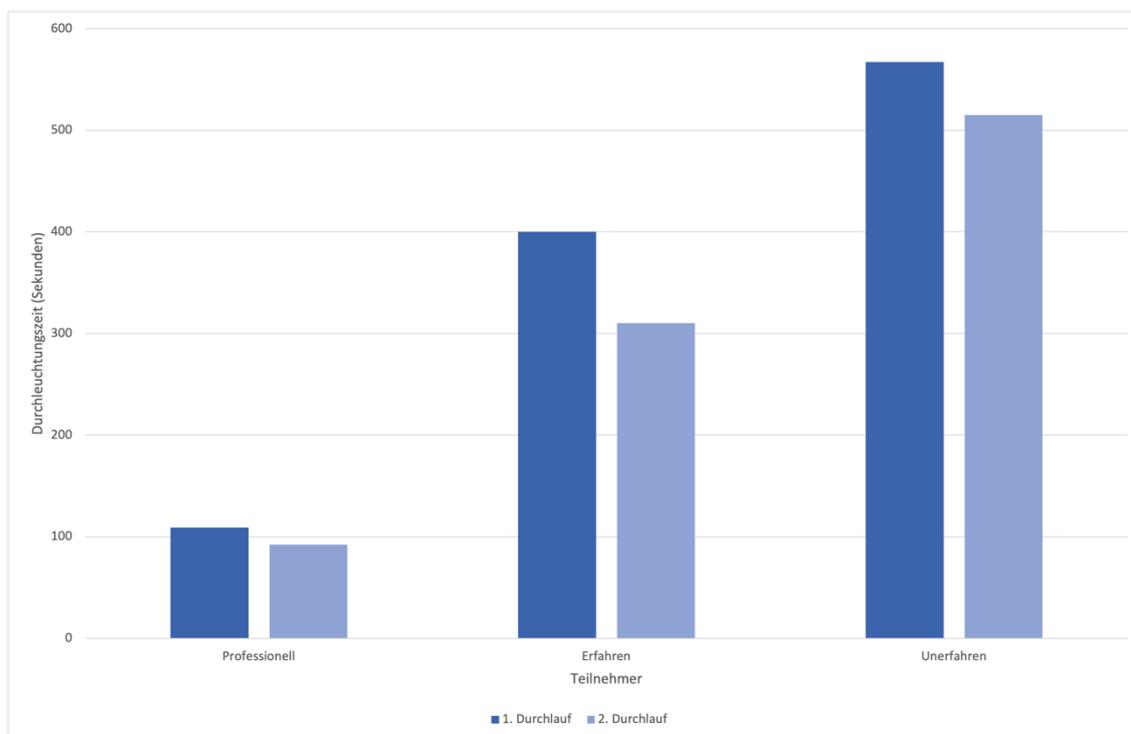


Abbildung 55: Modelltestung im Rahmen eines Kurses für Ärzte im HK-Labor, Klinikum Großhadern: Ergebnisse und Vergleich der DL-Zeiten der zwei Übungsrunden am Modell der Pulmonalklappenstenose.

Es ist eindeutig, dass in diesem Trainingskurs für Ärzte drei Teilnehmer mit höchst unterschiedlichen Kenntnissen und Fertigkeiten in der Handhabung von Führungsdraht und Katheter aufeinandertrafen. Mit großer Wahrscheinlichkeit hatte TN 3 ähnlich wie Student 11 noch nie Berührung mit dieser Materie. Er konnte sich in der zweiten Runde auch nicht wesentlich steigern, wahrscheinlich wäre für ihn eine Übung am anatomisch korrekten Herzmodell als Einstieg hilfreich gewesen, um sich mit der Situation zunächst vertraut zu machen. Interessanterweise weisen alle drei Ärzte keine wesentliche Veränderung bezüglich der DL-Zeiten von Runde 1 zu Runde 2 auf, TN 1 hat die beiden anderen bei weitem übertroffen, sodass bewiesen werden kann, dass dieser sicherlich über weitreichende Erfahrung im HK-Labor verfügt. Der mediane Wert von Runde 1 betrug 359 Sekunden, er konnte mit 306 Sekunden für Runde 2 nicht wesentlich verbessert werden (siehe Abb. 56). Da vier der sechs Datenwerte weit vom Mittelwert entfernt liegen, kann in diesem Fall von einer starken Streuung gesprochen werden.

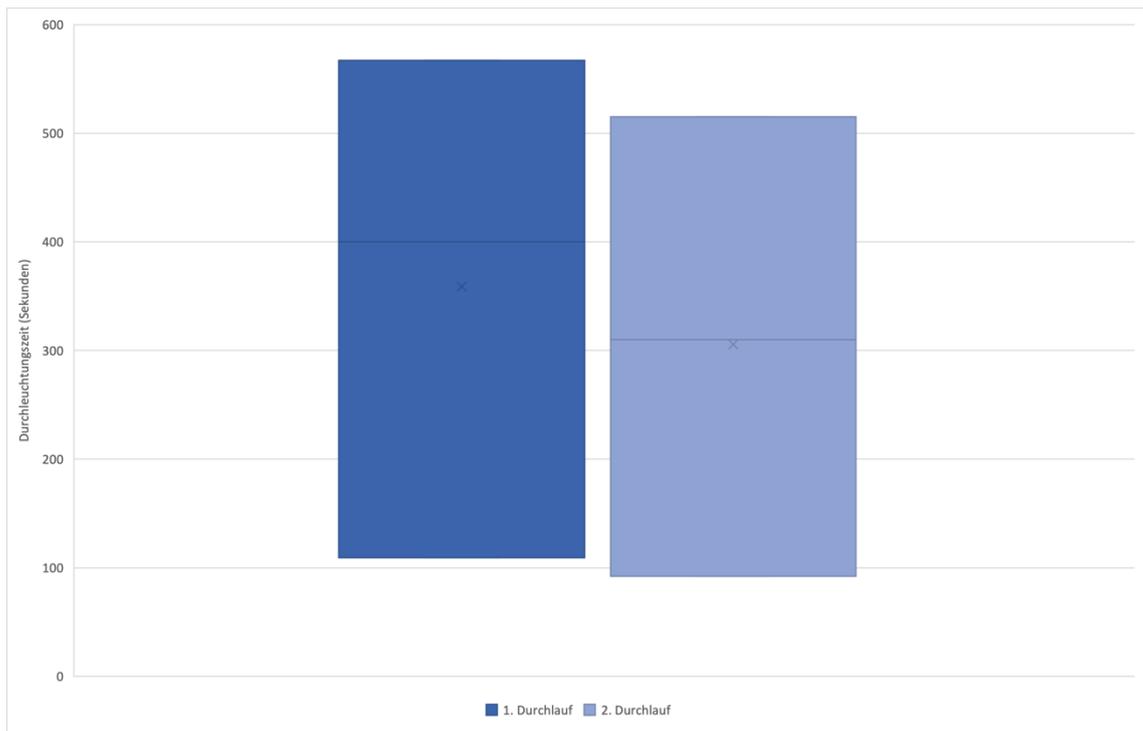


Abbildung 56: Vergleich der benötigten mittleren DL-Zeit der zwei Durchgänge im Rahmen des Ärztekurses im Klinikum Großhadern, gemessen in Sekunden.

Auch im Allgemeinen Krankenhaus der Stadt Wien kam unser Modell mit PS zum Einsatz (siehe Abb. 57).

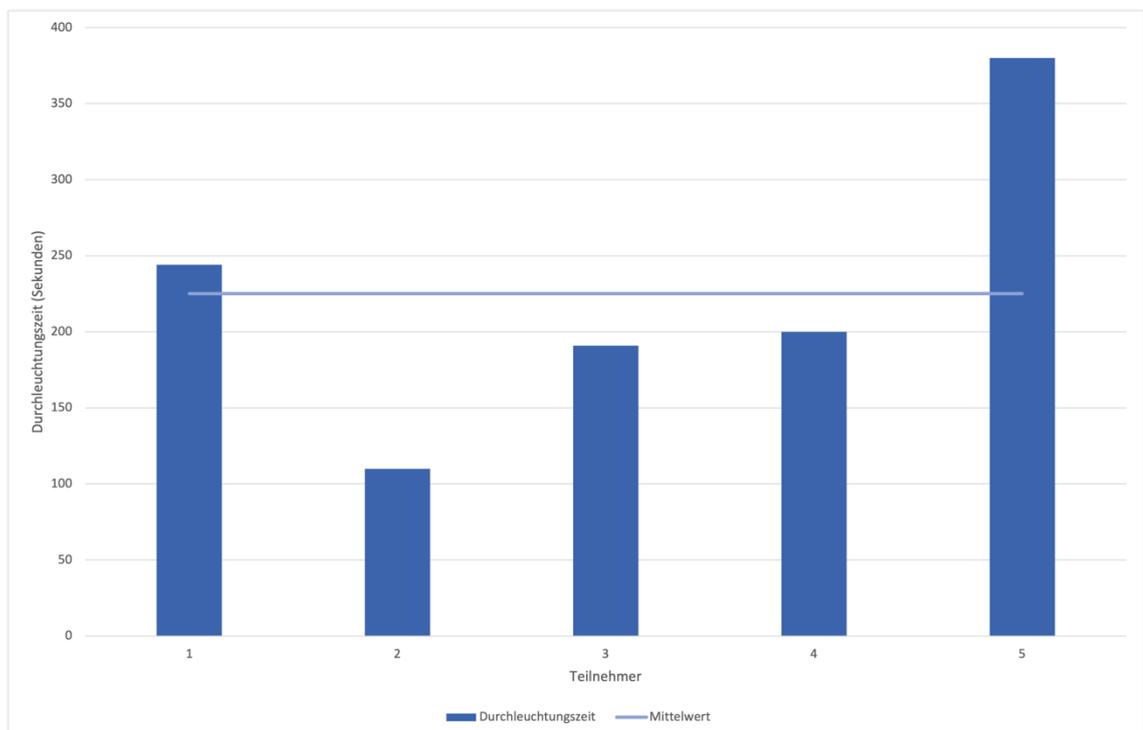


Abbildung 57: Modelltestung im Rahmen eines Kurses für Ärzte im HK-Labor, Allgemeines Krankenhaus der Stadt Wien: Ergebnisse und Vergleich der DL-Zeiten der Übungsrunde am Modell der Pulmonalklappenstenose mit Darstellung des Mittelwertes (blaue Linie).

Es ist zu erkennen, dass vier der fünf teilnehmenden Ärzte bereits über ausreichende Erfahrung im HK-Labor verfügten und für sie die Simulation deshalb auch keine sonderliche Herausforderung darstellte. TN 2 konnte die Untersuchung auf Anhieb in nur 110 Sekunden abschließen. Lediglich TN 5, ein im HK-Labor noch unerfahrener Assistenzarzt, hat im Vergleich zu seinen Kollegen mit einer DL-Zeit von 6 Minuten 20 Sekunden den medianen Wert von 3 Minuten 45 Sekunden deutlich überschritten. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass er sich im Zuge weiterer Durchläufe zeitlich sicher hätte steigern können.

Im Oktober 2018 fand schließlich ein Hand-On-Training mit den entwickelten Modellen im Ayder Referral Hospital der Stadt Mekelle in Äthiopien statt. Ziel des mehrtägigen Workshops war es, den dort tätigen ärztlichen Kollegen das kardiologische Untersuchungsverfahren der HK-Untersuchung näher zu bringen und sie anhand des 3D-Herzmodells mit PS schrittweise in den Ablauf einer HK-Untersuchung zu instruieren.

Basierend auf dem Wissen nach einer mehrtägigen theoretischen Einführungsphase bezüglich Funktion, Ablauf und Risiken einer HK-Untersuchung konnten die ersten beiden Ärzte des Ayder Referral Hospitals mit den praktischen Übungen beginnen. Nachdem sie jeweils zwei Simulationen einer kompletten HK-Untersuchung am Modell mit PS durchgeführt hatten, wurde im Anschluss erstmals eine HK-Untersuchung an Patienten mit PS ausgeführt (siehe Abb. 58).

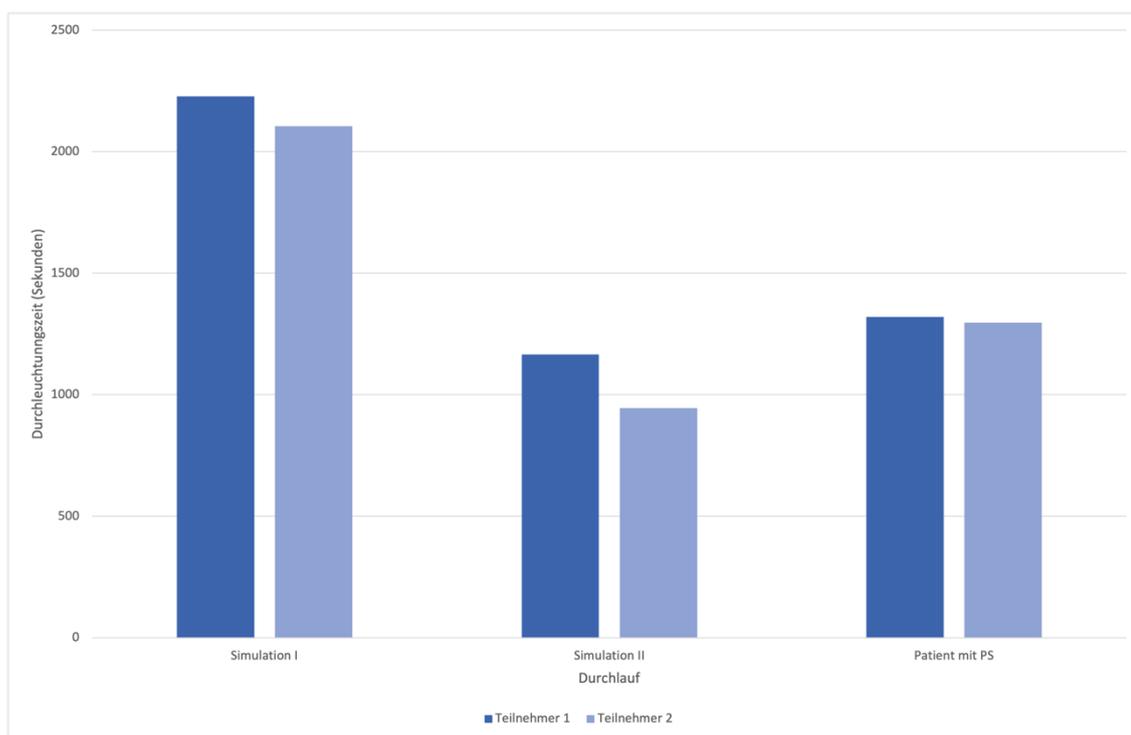


Abbildung 58: Modelltestung sowie Durchgang am Patienten im Rahmen eines Kurses für Ärzte im HK-Labor, Ayder Referral Hospital, Mekelle: Ergebnisse und Vergleich der DL-Zeiten der zwei Übungsrounden am Modell der Pulmonalklappenstenose sowie am Patienten mit Pulmonalklappenstenose.

Beide Ärzte konnten von Simulation I auf Simulation II sehr viel Zeit einsparen und auch die Untersuchung an dem Patienten mit PS konnte im Vergleich zur Simulation I in wesentlich kürzerer Zeit abgeschlossen werden. Klarerweise hat die Untersuchung an dem Patienten etwas mehr Zeit in Anspruch genommen als Simulation II, da der Wechsel vom Modell zum Patienten sicherlich mit einer größeren mentalen Anspannung verbunden war. Grundsätzlich kann man jedoch davon ausgehen, dass durch ständiges Training am Modell Professionalität und

Kompetenz gesteigert werden und sich damit auch die DL-Zeiten entsprechend verkürzen. Ein Indiz dafür stellen die laufend gemessenen Datenwerte dar. Unter anderem ist es den unterschiedlichen Rahmenbedingungen in Äthiopien zuzuschreiben, dass der Lernprozess dort wesentlich mehr Zeit in Anspruch nimmt. Aus diesem Grund wurde vereinbart, dass die Ärzte des Ayder Referral Hospitals über einen längeren Zeitraum in regelmäßigen Abständen mit den Modellen trainieren und dabei eine genaue Datenerhebung durchführen sollen. Es wurden dafür drei Modelle mit PS in skalierten Größen, entsprechend dem Herzen eines Neugeborenen bzw. Kleinkindes, eines Jugendlichen sowie eines Erwachsenen, in Äthiopien belassen. Zwei ausgewählte Ärzte der Klinik sollten in wöchentlichen Intervallen über einen Zeitraum von insgesamt zwölf Wochen eigenständig trainieren und in gewohnter Weise die DL-Zeiten aufzeichnen, um diese später analysieren zu können. Im Zuge dessen sollten die Modelle rotieren, sodass die Ärzte innerhalb der zwölf Wochen viermal am selben Herz trainieren. Durch den laufenden Wechsel der Modelle und der daraus resultierenden Wiederholungsabstände von mindestens zwei Wochen zwischen demselben Modell sollte gleichzeitig auch die reale Situation im Krankenhausalltag miteinbezogen werden. Es zeigten sich sowohl am Training an den Modellen als auch bei der Durchführung der HK-Untersuchung an Patienten vergleichbare Ergebnisse.

### 3.4.3 Entwicklung der Durchleuchtungszeiten im Rahmen der Trainingskurse

Da eine Strahlendosis bei HK-Untersuchungen leider nicht vermieden werden kann, ist es gerade bei pädiatrischen Patienten besonders wichtig, das Ausmaß der Strahlenbelastung auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Das Kinderherz stellt allein aufgrund der kleineren Größe eine zusätzliche Herausforderung bei der Durchführung von HK-Untersuchungen dar, weshalb vor allem die Trainingseinheiten am sogenannten „Small Heart“ Modell besonders intensiviert werden. Aus Abb. 61 geht hervor, dass beide Ärzte im Verlauf der Trainingsrunden eine persönliche Steigerung im Sinne einer Reduktion der DL-Zeit erzielen konnten, wobei Arzt 2 beim zweiten Trainingsdurchlauf scheinbar größere Schwierigkeiten gehabt haben dürfte. Der Wert weicht so stark von allen anderen Datenwerten ab, dass hier wiederum von einem statistischen Ausreißer die Rede ist, der für aussagekräftige Schlussfolgerungen nicht herangezogen werden kann. Interessant ist, dass sowohl bei Arzt 1 als auch bei Arzt 2 fast keine zeitliche Differenz zwischen der dritten und vierten Trainingsrunde vermerkt werden kann. Es kann daher angenommen werden, dass diese Werte am ehestens der Realität entsprechen.

Die Durchführung der HK-Untersuchung am „Medium Heart“ zeigt im Verlauf keine gleichmäßige Reduktion der DL-Zeiten (siehe Abb. 60). Obwohl die Ärzte insgesamt eine Reduktion der DL-Zeit erzielen konnten, hat bei beiden Trainingsrunde 4 mehr Zeit in Anspruch genommen als Runde 3. Zwischen den beiden Runden lagen dieses Mal drei Wochen, vielleicht wäre am Anfang eine Wiederholung in kürzeren Abständen erfolgreicher. Arzt 2 hat insgesamt nur dreimal trainiert, zwischen Training 1 und Training 3 lagen daher vier Wochen, er konnte sich aber trotzdem um 142 Sekunden verbessern.

Beim Training am „Adult Heart“ (siehe Abb. 59) kann die größte Verbesserung Arzt 1 für sich verzeichnen, während Arzt 2, ausgehend von einer zufriedenstellenden Leistung, diese mit relativ geringen zeitlichen Differenzen konstant durch alle vier Trainingsrunden halten konnte.

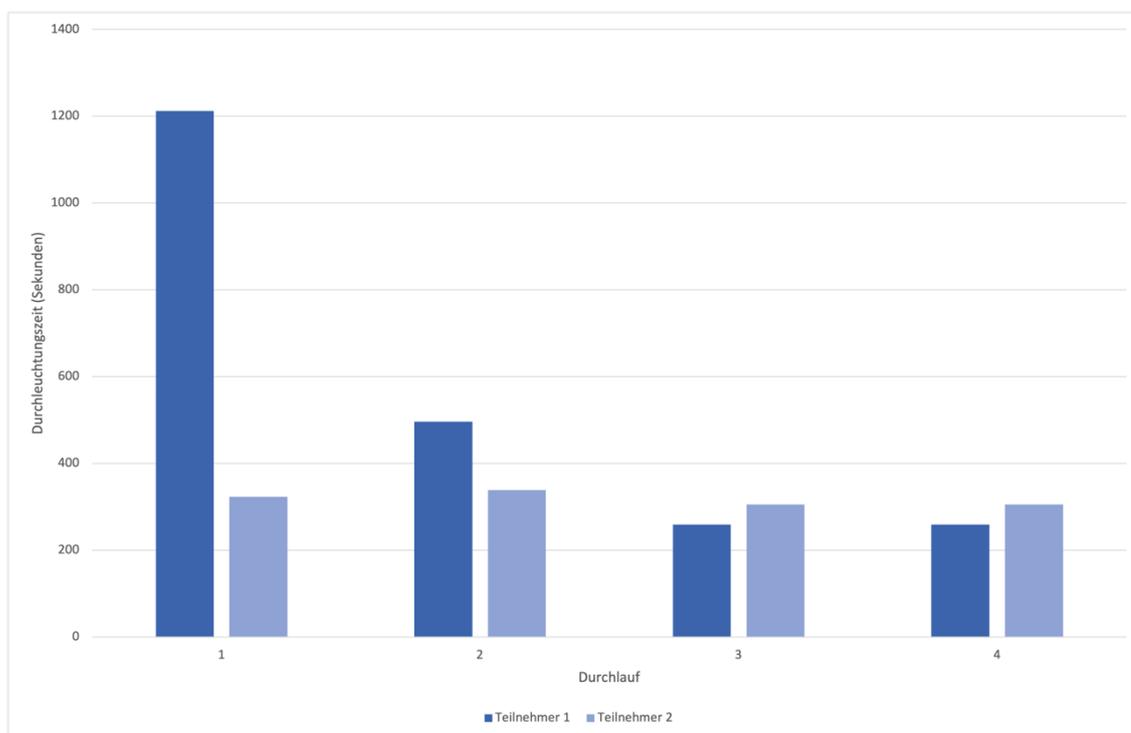


Abbildung 59: Modelltestung im Rahmen eines Kurses für Ärzte im HK-Labor, Ayder Referral Hospital, Mekelle: Ergebnisse und Vergleich der DL-Zeiten der vier Übungsrunden am Modell der Pulmonalklappenstenose eines „Adult Hearts“.

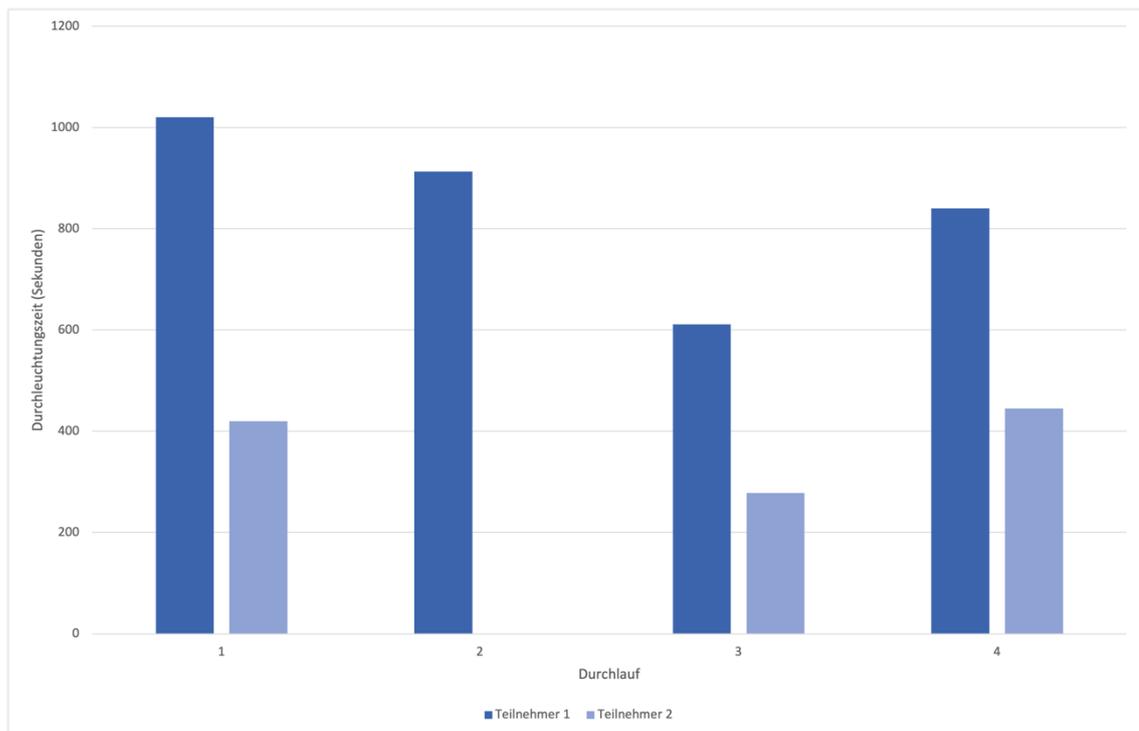


Abbildung 60: Modelltestung im Rahmen eines Kurses für Ärzte im HK-Labor, Ayder Referral Hospital, Mekelle: Ergebnisse und Vergleich der DL-Zeiten der vier Übungsrunden am Modell der Pulmonalklappenstenose eines „Medium Hearts“.

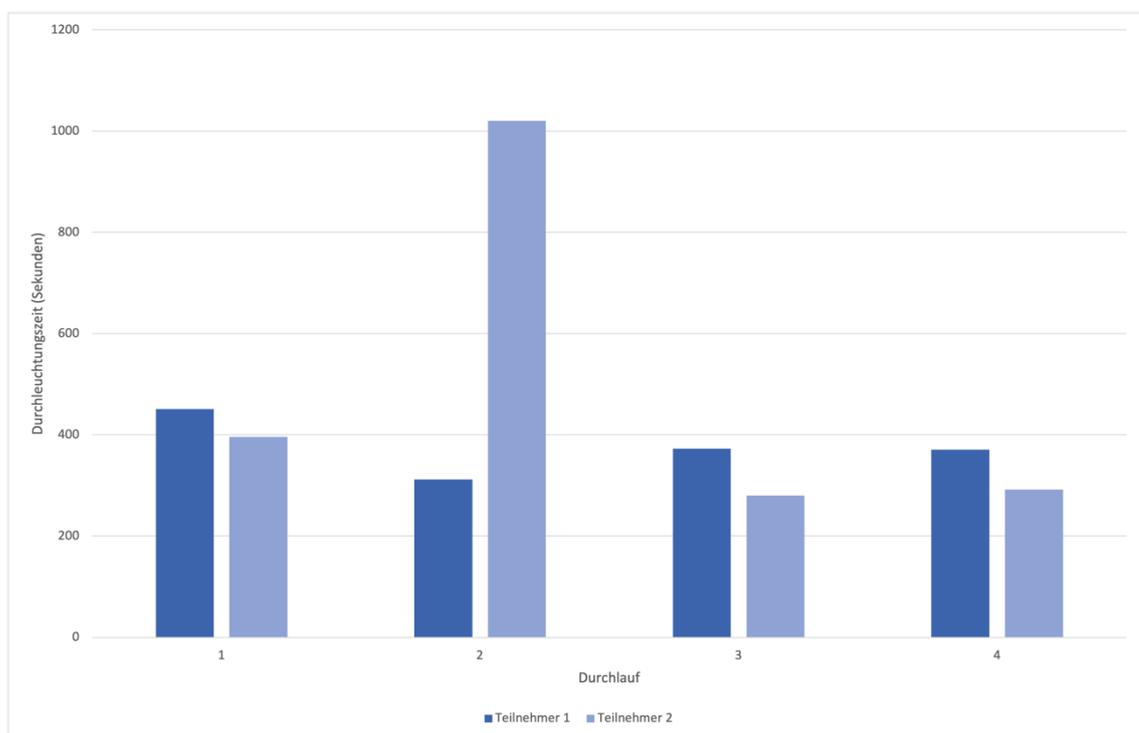


Abbildung 61: Modelltestung im Rahmen eines Kurses für Ärzte im HK-Labor, Ayder Referral Hospital, Mekelle: Ergebnisse und Vergleich der DL-Zeiten der vier Übungsrunden am Modell der Pulmonalklappenstenose eines „Small Hearts“.

### 3.4.4 Kursübergreifender Vergleich der prozentualen Veränderung pro Teilnehmer mit mehreren Durchläufen

Um kursübergreifende Veränderungen in der DL-Zeit messen zu können, wurden der erste und zweite Durchgang von jedem Teilnehmenden mit mehreren Durchgängen pro Kurs verwendet. Die Differenz zwischen der DL-Zeit aus Durchgang 1 und Durchgang 2 wurde in die prozentuale Veränderung umgerechnet. Vergleicht man mittels Ein-Stichproben-t-Test nun diese prozentuale Veränderung pro Teilnehmer mit einer prozentualen Veränderung von 0, der Baseline entsprechend, zeigt sich eine signifikante Verbesserung im Sinne einer Reduktion der benötigten DL-Zeit ( $t = -2,57$ ,  $p = 0,02$ ; siehe Abb.61).

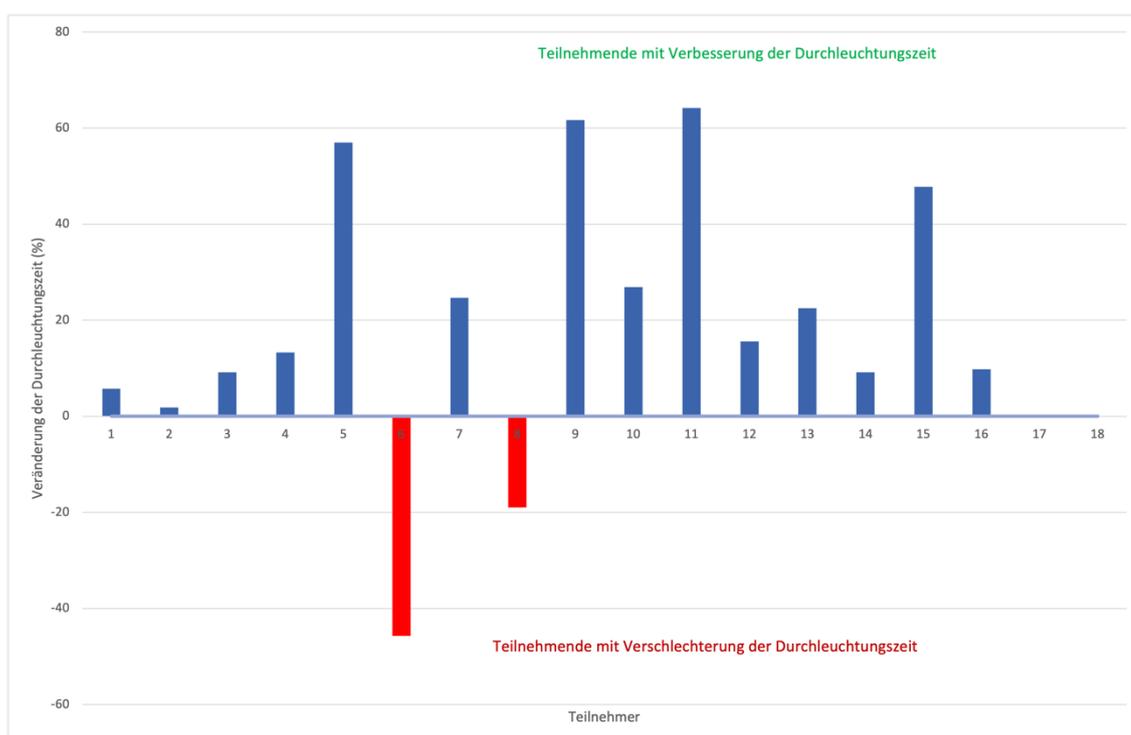


Abbildung 62: Kursübergreifender Vergleich der prozentualen Veränderung pro Teilnehmer mit mehreren Durchläufen verglichen mit einer prozentualen Veränderung von 0, der Baseline entsprechend.

## 4. Diskussion

Ein flächendeckendes Simulationstraining ist in vielen Bereichen, die offensichtlich mit der Verantwortung und Gefährdung des menschlichen Lebens in Zusammenhang stehen, mittlerweile ein unverzichtbarer Bestandteil der Aus- und Weiterbildung geworden. Führendes Beispiel hierfür ist die Luft- und Raumfahrt, in der durch den Einsatz von Flugsimulatoren eine standardisierte Lernumgebung für hocheffektives Training geschaffen werden kann. Die Piloten in Ausbildung werden durch regelmäßiges Training bestmöglich auf ihr späteres Berufsleben vorbereitet, Standardsituationen sowie kritische Ereignisse können beliebig oft wiederholt werden. (3, 100, 101)

Ähnliche Simulationstrainings gibt es auch in der Seefahrt. Allen voran ist eine der drei weltweit ältesten Kapitänsschulen namens Port Revel in den französischen Voralpen. Eine Besonderheit von Port Revel stellt ein Wasserstraßenmodell dar, welches einer Miniaturausgabe des Suezkanals mit einem Maßstab von 1:25 entspricht. Im Zuge von Simulationstrainings werden hier somit die schwierigsten Manöver der globalen Seefahrt unter äußerst realistischen Bedingungen erlernt und gefestigt. Die Navigation durch dieses berühmte Wasserstraßenmodell erfolgt unter Anleitung erfahrener Kapitäne. (102-104)

Das Marine Training Center in Hamburg bietet ebenso einen der weltweit modernsten Simulatoren für die Schifffahrt an. Insgesamt bildet dieser Simulator neun Seegebiete und sechzig Schiffe ab, sodass im Zuge von Workshops verschiedenste Szenarien nachgestellt und unter anderem Stress-Situationen trainiert werden können. (105)

Ebenso hat sich das Simulationstraining in der militärischen Ausbildung etabliert, indem es dazu dient, die Fertigkeiten und Fähigkeiten der Einsatzkräfte zu erweitern, um ihnen somit eine Überlegenheit im Kampfeinsatz zu verschaffen. (106)

Der zunehmenden Komplexität in der Medizin, dem wachsenden Bewusstsein für das Thema Patientensicherheit sowie dem enormen technischen Fortschritt ist es zuzuschreiben, dass Simulationstrainings auch in verschiedenen medizinischen Disziplinen immer mehr an Stellenwert gewinnen und sich das Einsatzspektrum in den letzten Jahren deutlich erweitert hat. (107) In einigen Bereichen der Medizin hat die Simulation bereits Einzug gefunden, vor allem in der Notfallmedizin. Sei es beim Immediate Life Support (ILS), Advanced Life Support (ALS), Neonatal Life Support (NLS), European Pediatric Immediate Life Support (EPILS) oder beim European Pediatric Advanced Life Support (EPALS), Reanimationstrainings einschließlich Dummy-Brustkompressionen und das Üben möglichst effizienter Beatmung und richtiger Intubation sind im Rahmen der Simulationskurse unerlässlich. (108)

Weiters haben 3D-gedruckte Modelle auch in Bereichen wie der Kinderherzchirurgie (109), Neuro- (110), HNO- (111) und kolorektalen Chirurgie (112) Einzug gefunden und gelten hier ebenso als wertvolles Planungs- und Simulationshilfsmittel. Sie dienen einerseits der Veranschaulichung anatomischer Besonderheiten sowie kardialer Anomalien und tragen somit wesentlich zum grundlegenden Verständnis bei (87), wohingegen sie andererseits vor allem im präoperativen Setting und im Rahmen der individuellen OP-Planung bei AHF die durch die greifbare Veranschaulichung die Arzt-Patienten-Kommunikation fördern. (113-117) Derartige Modelle bieten eine kostengünstigere Alternative zu anderen klinischen Simulationsverfahren dar und können problemlos in unterschiedlicher Skalierung und Varianz beliebig oft angefertigt werden. (118)

In der Viszeralchirurgie werden mittlerweile ebenso Simulationen genutzt, um einfache Übungen bis hin zu komplexen OPs nachzustellen. (119) Für die Etablierung und den nachhaltigen Effekt von Simulationstrainings sind klar definierte Lernziele, die ständige Wiederholung sowie die Schaffung möglichst realitätsgetreuer Rahmenbedingungen wichtig. (107) In Bezug auf die Patientensicherheit spielt die eigene Sicherheit bei der Ausführung einzelner Interventionsschritte eine bedeutende Rolle.

In einer im Jahr 2002 veröffentlichten Studie konnte gezeigt werden, dass virtuelles Simulationstraining laparoskopischer Eingriffe zu einer verkürzten OP-Dauer und zu signifikant besseren Leistungen der Operateure führt. (120) Gleiches soll auch durch Training mittels 3D-gedruckten Herzmodellen im HK-Labor erzielt werden.

## 4.1 Lehre

Der Einsatz von Modellen dient nicht nur dem praktischen Training, sondern ist heute auch wesentlicher Bestandteil in Lehre und Forschung. Im Medizinstudium werden während der gesamten Ausbildungszeit Modelle und Simulationseinheiten genutzt, um den Studierenden einerseits die Grundlagen der Anatomie zu vermitteln und andererseits das physiologische Verständnis anhand der Visualisierung von Prozessen und Zusammenhängen zu maximieren. (121) Seit der Novellierung der ärztlichen Approbationsordnung von 2002 nimmt das Erlernen praktischer Fertigkeiten im Rahmen des Medizinstudiums einen immer höheren Stellenwert ein. (122, 123)

Im Zuge dessen wurden Trainingseinrichtungen, sogenannte "Skills labs", etabliert, die dazu dienen, den Medizinstudenten in Kleingruppen und unter standardisierten Bedingungen praktische Basisfertigkeiten für spätere ärztliche Tätigkeiten näherzubringen. (124) Als Beispiel sei hier das "Zentrum für Studium und Unterricht (ZeUS)" der LMU München angeführt, in welchem praktische Eingriffe wie das Legen einer Magensonde, die Arterienpunktion, Katheterisierung, die digitale rektale Untersuchung oder die Lumbalpunktion geübt werden können. (125) Derartige Übungsmöglichkeiten für Studierende sind mittlerweile in fast allen medizinischen Fakultäten Deutschlands vorhanden. (124) Dadurch wird Raum geschaffen, in dem Fehler gemacht und die Reaktionen auf mögliche Konsequenzen trainiert werden können, ohne dass Patienten unmittelbar zu Schaden kommen. (101)

## 4.2 Herzkatheteruntersuchung und angeborene Herzfehler

Den Daten des Deutschen Herzberichts 2020 zufolge, welche im Juni 2021 in Frankfurt vorgestellt wurden, lag die Zahl der durchgeführten HK-Untersuchungen, die in Deutschland bundesweit in insgesamt 20 kinder-kardiologischen Kliniken durchgeführt wurden, zuletzt bei 8 064. Dabei hat es sich wiederum in 70 % der Fälle um interventionelle Eingriffe gehandelt. Die sogenannte In-Hospital-Letalität belief sich dabei auf 0,5 %. Es steht außer Frage, dass es seit den 1950er Jahren zu einem enormen Fortschritt in Bezug auf die Therapieoptionen von AHF gekommen ist. Während die Lebenserwartung von Kindern mit AHF vor etwa 80 Jahren sehr gering war und nur etwa 20 % der Betroffenen die ersten Lebensjahre überstanden haben, wird heutzutage das Erwachsenenalter in über 95 % der Fälle erreicht. Die Behandlungsergebnisse fußen seit Jahren auf hohem Niveau. (126)

### 4.3 Simulationstraining in der Pädiatrie

Die Etablierung von Simulationstrainings hat in den letzten zwei Jahrzehnten auch in der Pädiatrie teilweise an Bedeutung gewonnen. (127) Die simulationsbasierte Ausbildung ist mittlerweile Bestandteil einiger pädiatrischer Facharztprogramme, allen voraus wiederum im Bereich des Reanimations- und Traumamanagements. Simulationstrainings haben sich auch hier als besonders sinnvoll erwiesen, um prozedurale Fertigkeiten zu festigen. (128) Standardmethodik in der Pädiatrie ist allerdings nach wie vor das „Lernen durch Beobachten“ nach dem „Learning-by-doing-Konzept“. (129) Modelle werden zur praktischen Ausbildung von Kinderkardiologen bisher kaum verwendet. Anhand der im Rahmen der Studie erhobenen Ergebnisse zeigt sich, dass die Entwicklung und Bereitstellung von 3D-Modellen auch in der Pädiatrischen Kardiologie zahlreiche Vorteile gegenüber dem herkömmlichen, oben angeführten, Ausbildungssystem mit sich bringt. Ein primäres Ziel ist eine Verkürzung der DL-Zeiten, da vor allem bei pädiatrischen Patienten die im Zuge einer HK-Untersuchung nicht vermeidbare Strahlendosis bestmöglich reduziert werden soll. Die Auswertungen der TK belegen eindeutig, dass durch wiederholtes Training tatsächlich eine beachtliche und zufriedenstellende Verkürzung der DL-Zeiten erzielt werden kann. Die Tatsache, dass eine Reduzierung der DL-Zeiten im Rahmen mehrerer Trainingseinheiten nicht nur, wie ohnehin angenommen, bei unerfahrenen Kollegen möglich war, sondern auch erfahrene Ärzte eine Verbesserung erzielten, bestätigt die Realitätsgetreue der Modelle.

Es zeigt sich demnach, dass die entwickelten Modelle alle Anforderungen erfüllen, um künftig einen festen Platz in der Aus- und Weiterbildung von interventionell tätigen Kinderkardiologen einzunehmen. In der Schlussfolgerung der TN zeigt sich, dass es in der Tat höchste Zeit ist, derartige Modelle in der praktischen Weiterbildung zum Kinderkardiologen standardmäßig zu etablieren, da ein derartiges Ausbildungsmodell die notwendige praktische Erfahrung und Routine vor der Behandlung von Patienten gewährleistet.

#### 4.3.1 Vorteile von derartigen Simulationstrainings im Herzkatheterlabor

HK-Untersuchungen können an den Modellen beliebig oft wiederholt werden, was zu erhöhter Sicherheit und Routine führt. Da die Trainingseinheiten direkt in einem HK-Labor stattfinden, kann eine realitätsnahe Arbeitsumgebung geschaffen werden, die Verwendung von originalen Drähten und Kathetern ermöglicht eine realistische Haptik bei der Bedienung der Instrumente. Das häufige Wiederholen der einzelnen Schritte steigert zudem die Sicherheit bei der Handhabung des Röntgengeräts und verbessert somit auch die Orientierung am Bildschirm. Bei dieser Ausbildungsmethode handelt es sich um ein einfach erweiterbares System, in dem die Modelle entsprechend modifiziert werden. Durch die Entwicklung von komplexen Modellen unterschiedlicher Schweregrade und Größen können neben Routineeingriffen auch komplizierte Fälle und Notfallsituationen simuliert werden, wodurch einerseits das richtige Agieren in Ausnahmesituationen verinnerlicht werden kann und andererseits auch erfahrene Ärzte von den Kursen profitieren. (3, 4)

Der hohe Stellenwert der ständigen Wiederholung wird vor allem auch in der Notfallmedizin, besonders beim Reanimationstraining, ersichtlich. (108) Nicht nur Anfänger, sondern auch erfahrene Ärzte festigen durch regelmäßige Auffrischkurse ihr Wissen und ihre praktischen Fertigkeiten; daher wird eine regelmäßige standardisierte Wiederholung dieser Trainingseinheiten auch für erfahrene Ärzte und professionelle Helfer der verschiedenen Bereiche der Gesundheitsversorgung, wie beispielsweise der Ambulanz- und

Rettungsorganisation, der Krankenhaus-Stationen und der Notfall- und Intensivmedizin empfohlen. (108)

### 4.3.2 Durchleuchtungszeiten

In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass eine Reduktion der DL-Zeiten durch mehrmaliges Wiederholen einer gleichbleibenden Übungssequenz erzielt werden kann (siehe Abb. 53-62). Zur Einschätzung und Bewertung der Nachhaltigkeit des Lerneffekts sind weitere TK mit den Modellen sowie eine longitudinale Datenerhebung unerlässlich. Die Tatsache, dass eine Reduktion der Strahlenbelastung durch gezieltes Training und entsprechende Unterrichtseinheiten erzielt werden kann, konnte in vorangegangenen Studien bereits belegen. (95-97)

Bislang ist noch unklar, in welchem zeitlichen Intervall die Trainingseinheiten stattfinden müssen, um einen nachhaltigen Effekt zu erzielen. Weininger et al. zeigt auf, dass vor allem anfangs ein intensiveres Training notwendig sei und im Verlauf weiterhin regelmäßige Wiederholungseinheiten stattfinden sollten. Zudem wäre es möglich, dass sich Simulationstraining und klinische Arbeit an Patienten synergistisch ergänzen. (130)

## 4.4 Äthiopien

Je nach Verfügbarkeit von klinikinternen HK-Laboren können derartige TK mit 3D gedruckten Modellen problemlos weltweit stattfinden. Das Paradebeispiel hierfür stellt ein durch die Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) gefördertes Klinikpartnerschaftsprojekt zwischen der Abteilung für Kinderkardiologie und Pädiatrische Intensivmedizin der Ludwig-Maximilians-Universität München, Campus Großhadern, und dem Ayder Referral Hospital der Stadt Mekelle in Äthiopien dar. Im Fokus dieser Kooperation steht die Ausbildung von äthiopischen Ärzten ohne jegliche Erfahrungswerte im HK-Labor anhand der entwickelten 3D-gedruckten Herzmodelle. Der Fortschritt der äthiopischen Ärzte in Bezug auf die praktischen Fertigkeiten wird anhand der DL-Zeiten im Verlauf jeweils dokumentiert, wobei auch hier ein nachhaltiger Effekt gezeigt werden konnte.

Eines der größten Probleme Äthiopiens stellt der Ärztemangel dar, insbesondere fehlen Mediziner mit Fachausbildung. Aus diesem Grund ist das Land auf Hilfe aus dem Ausland angewiesen. Es gibt zahlreiche Initiativen und Projekte freiwilliger Hilfsorganisationen, sogenannte Non Governmental Organisations, kurz NGOs, aus dem Ausland, die Äthiopien unterstützen. Eine dieser Hilfsorganisationen ist „Etiopia-Witten“, ein vor zehn Jahren in der Universitätsstadt Witten gegründeter gemeinnütziger Verein, der immer wieder Ärzte nach Äthiopien entsendet. In diesem Zusammenhang ist vor allem Dr. Christian Leuner, ehemaliger leitender Oberarzt im Klinikum Bielefeld und erster Vorsitzender des Vereins Etiopia-Witten, hervorzuheben, der sich seit dem Jahr 2013 für den Aufbau des ersten modernen Katheterisierungslabors am Ayder Referral der Universität Mekelle in Äthiopien einsetzt.

Die Abteilung für Kinderkardiologie und Pädiatrische Intensivmedizin der Ludwig-Maximilians-Universität München ist seit dem Jahr 2017 ebenso wesentlich an der Weiterentwicklung des HK-Labors beteiligt. Das langfristige Ziel war von Anfang an die Entwicklung eines relativ kostengünstigen Ausbildungssystems für äthiopische Kollegen, sodass sich diese durch kontinuierliches Training die notwendigen Fertigkeiten aneignen und in weiterer Folge dazu in der Lage sind, pädiatrische Patienten mit AHF eigenständig zu behandeln. Es gibt zahlreiche andere

---

Hilfsorganisationen, die den Entwicklungsländern kurzfristig Dienste anbieten, indem sie Ärzte für OPs oder Interventionen entsenden. Dies widerspricht allerdings der Philosophie des Vereins Etiopia-Witten, da nur durch ein Ausbildungssystem mit kontinuierlicher Trainingsmöglichkeit Nachhaltigkeit erreicht werden kann. (131) Dafür bieten sich 3D-gedruckten Modelle an, da die TK auch hier im klinikinternen HK-Labor stattfinden können.

## 5. Schlussfolgerung

Ziel der Arbeit war es, realitätsnahe 3D-Modelle der häufigsten AHF zu entwickeln, um das Aus- und Weiterbildungsmodell von interventionell tätigen Ärzten in der Pädiatrischen Kardiologie zu revolutionieren, weg vom bisher etablierten „Learning-by-doing“-Konzept hin zu einer neuen Ausbildungsform anhand von Simulationstrainings mittels 3D-gedruckten Herzmodellen.

Es sollte herausgefunden werden, ob es möglich ist, sich durch kontinuierliches Training an diesen Modellen die nötigen prozeduralen Fertigkeiten anzueignen, um eine HK-Untersuchung in weiterer Folge problemlos und mit Verkürzung der DL-Zeiten an Patienten durchzuführen.

Die im Rahmen der Studie konzipierten Herzmodelle wurden im HK-Labor stetig evaluiert und weiterentwickelt, bis letztlich Modelle der dritten Generation aus silikonähnlichem Material entstanden sind. Diese Modelle entsprechen weitgehend der Anatomie des Menschen und eignen sich besonders gut, um die einzelnen Schritte einer HK-Untersuchung zu erlernen und zu festigen, was in der beachtlichen Verkürzung der DL-Zeiten im Rahmen der TK widerspiegelt wird.

Es konnte gezeigt werden, dass eine Reduzierung der DL-Zeiten nicht nur bei unerfahrenen Kollegen erreicht werden konnte, sondern auch erfahrene Ärzte eine Verbesserung erzielten.

Insgesamt zeigte sich unter allen TN der verschiedenen TK eine hohe Akzeptanz bezüglich einer derartigen Weiterbildungsform. Durch die Etablierung von Simulationstrainings wird Raum geschaffen, in dem die einzelnen Schritte einer HK-Untersuchung beliebig oft wiederholt und die notwendigen praktischen Erfahrungswerte gesammelt werden können, um in weiterer Folge für die Behandlung an Patienten bestmöglich vorbereitet zu sein. Durch die Entwicklung komplexer Modelle sind dem Ausbildungspotential nach oben hin keine Grenzen gesetzt. Langfristiges Ziel ist die Entwicklung eines flüssigkeitsgefüllten, pulsatilen 3D-gedruckten Herzmodells, anhand dessen weitere Herzkatheter-Techniken wie beispielsweise die Durchführung intrakardialer Druckmessungen und Angiographien erlernt werden können. Durch ein derartiges Modell wird zudem sowohl das visuelle als auch das haptische Feedback weiter verbessert.

Insgesamt ist die simulationsbasierte Ausbildung mittlerweile fester Bestandteil einiger pädiatrischer Facharztprogramme. Anhand der neu entwickelten 3D-gedruckten Modelle werden nun auch in der Pädiatrischen Kardiologie alle Anforderungen erfüllt, um derartige Simulationstrainings in der Aus- und Weiterbildung von interventionell tätigen Kinderkardiologen zu etablieren.

## Publikationsliste

- 1) **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.
- 2) Hopfner C, Jakob A, Tengler A, Grab M, Thierfelder N, **Brunner B**, Thierij A, Haas NA. Design and 3D printing of variant pediatric heart models for training based on a single patient scan. *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.
- 3) Hopfner C, Jakob A, Tengler A, Grab M, Thierfelder N, **Brunner B**, et al. Engineering on Anatomy to Avoid the Necessity of Invasive Imaging in Medical 3D Printing: Examples from Pediatric Cardiology 2020.
- 4) **Brunner B.S.**, Thierij A., Lehner A., Fernandez S., Jakob A., Leuner C., Tsega T., Lieul A., Weldegerima A., Haas N.A. Clinical implementation of a model-based training course to reduce the learning curve in interventional therapy of congenital heart defects. 53th Annual Meeting of the Association for European Paediatric and Congenital Cardiology. Poster participation. Sevilla, 2019.
- 5) Thierij A., **Brunner B.**, Lehner A., Grab M., Thierfelder N., Fernandez S., Andre J., Haas N.A. Establishment of a 3-D silicone model to facilitate realistic hands-on training for diagnostic and interventional pediatric cardiac catheterization. 53th Annual Meeting of the Association for European Paediatric and Congenital Cardiology. Poster participation. Sevilla, 2019.
- 6) **Brunner B.S.**, Thierij A., Haas N.A. Pädiatrie in Entwicklungsländern: Zwei Welten – Eine Medizin. *BVKJ.* Nr. 3905. 2019.
- 7) **Brunner B.S.** Zwei Welten, eine Medizin 2019 [Available from: [https://etiopiawitten.de/files/Aktuelles/Aktuelles%202018/Workshop%20October%202018%20and%20more/Bericht%20Ayder%20Hospital%2010\\_2018%20Autor%20Barbara%20Brunner.pdf](https://etiopiawitten.de/files/Aktuelles/Aktuelles%202018/Workshop%20October%202018%20and%20more/Bericht%20Ayder%20Hospital%2010_2018%20Autor%20Barbara%20Brunner.pdf). (Internetbeitrag auf der Homepage von Ethiopia Witten)

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen meinen größten Dank aussprechen, die mir bei der Anfertigung meiner Doktorarbeit zur Seite gestanden sind.

Mein besonderer Dank gilt hierbei an erster Stelle meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Nikolaus Haas, für die großartige Unterstützung und die produktive Zusammenarbeit während der letzten Jahre. Ich möchte mich für das mir entgegengebrachte Vertrauen bedanken sowie für die vielen Eindrücke, Erlebnisse und Erfahrungen, die mir im Zuge der Doktorarbeit ermöglicht wurden. Es war für mich eine sehr interessante und lehrreiche Zeit, von der ich sowohl privat als auch auf meinem beruflichen Werdegang nur profitieren kann.

Gebührender Dank gilt zudem auch Frau M.Sc. Leonie Arnold, die mich wesentlich bei der statistischen Auswertung unterstützt hat.

Zudem möchte ich mich von ganzem Herzen bei Frau M.Sc. Carina Hopfner für ihre hilfsbereite und zuverlässige Art, die unermüdliche Unterstützung bei der Fertigstellung der 3D-gedruckten Modelle und die vielen Anregungen bei der Umsetzung meiner Ideen bedanken.

Ich möchte außerdem noch meiner Mit-Doktorandin, Alisa Thierij, für die gute Zusammenarbeit und die vielen unterhaltsamen Stunden, die wir miteinander verbracht haben, danken. Danke für die gute Umsetzung unserer gemeinsamen Arbeit.

Gebührender Dank gilt ebenso Herrn Dr. Christian Leuner, der unseren Aufenthalt im Ayder Referral Hospital in Mekelle, Äthiopien, durch seine umsichtige Art so angenehm wie möglich gestaltet und uns einen Einblick in eine komplett andere Welt gewährleistet hat. Die Zeit in Äthiopien werde ich bestimmt nie vergessen.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Familie und all meinen engen Bezugspersonen danken, die mich während der Entstehung meiner Doktorarbeit begleitet haben. Ich danke euch für das bedingungslose Verständnis, den Rückhalt, die Geduld und die großartige Unterstützung in den letzten Jahren. Ohne euch wäre all das nicht möglich gewesen.

## Affidavit



### Eidesstattliche Versicherung

Brunner, Barbara Sophie

Name, Vorname

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

### **Entwicklung eines 3D-Modells zum Training von Herzkatheteruntersuchungen bei angeborenen Herzfehlern**

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, 28.02.2024

Barbara Sophie Brunner

Ort, Datum

Unterschrift

## Literaturverzeichnis

1. Kim S-H. Recent advances in pediatric interventional cardiology. *Korean J Pediatr.* 2017;60(8):237-44.
2. Van Aerschot IB, Y. Cathétérisme interventionnel et chirurgie cardiaque [Interventional cardiac catheterization in children]. *Archives de Pédiatrie.* 2012;19(1):96-102.
3. Voelker W, Gauper FP. Simulationstraining in der inneren Medizin. In: St.Pierre M, Breuer G, editors. *Simulation in der Medizin: Grundlegende Konzepte – Klinische Anwendung.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2013. p. 249-61.
4. Kornmesser U. Catheter Instruction System: Ein virtuelles Ausbildungs- und Trainingssystem für Kardiologen [Inauguraldissertation zur Erlangung des akademische Grades eines Doktors in Naturwissenschaften]. Mannheim: Mannheim; 2003.
5. Beschluss des 111. Deutschen Ärztetages. Gesundheitspolitische Leitsätze der Ärzteschaft: Ulmer Papier; 2008 [Available from: <https://www.bundesaerztekammer.de/aerztetag/aerztetage-der-vorjahre/111-daet-2008-in-ulm/ulmer-papier/>, 06.06.2022].
6. Bonzel T, Hamm C. Leitfaden Herzkatheter. Heidelberg: Steinkopff-Verlag; 2009.
7. Mathey D, Schofer J. Invasive Kardiologie: Grundlagen der Herzkatheteruntersuchung und Angiographie. Berlin: Springer-Verlag; 1991.
8. Borth-Bruhns T, Eichler A. Pädiatrische Kardiologie: Herzkatheteruntersuchung. Berlin: Springer-Verlag; 2004.
9. Beers MH. MSD-Manual Handbuch Gesundheit: Medizinisches Wissen und ärztlicher Rat für die ganze Familie; (Ärztewissen für Patienten). München: ADAC-Verlag; 2007.
10. Braun W. Laborwerte im Klartext: Untersuchungsmethoden und Befund verständlich gemacht. Was sind Normalwerte? Messgeräte für den Hausgebrauch u.v.m. Baden-Baden: Humboldt-Verlag; 2005.
11. Dierkes S. Der Gesundheits Brockhaus: Kursbuch Mensch: Aufbau, Funktion, Entwicklung, Krankheit und Heilung. Mannheim: F.A. Brockhaus Verlag; 2001.
12. Roskamm H, Neumann F-J, Kalusche D, Besthorn H-P. Koronarangiographie, Herzkatheterisierung und Angiokardiographie. *Herzkrankheiten: Pathophysiologie Diagnostik Therapie.* 5 ed. Berlin: Springer-Verlag; 2004. p. 281-317.
13. Davidson C, Bonow R. Cardiac catheterization. In: Bonow R, Mann D, Zipes D, Libby P, editors. *Braunwald's Heart Disease: A Textbook of Cardiovascular Medicine.* 8 ed. Philadelphia: Elsevier Science Verlag; 2007. p. 439-63.
14. Weiner R, Md VM. Development and application of transseptal left heart catheterization. *Catheterization and Cardiovascular Diagnosis.* 1988;15(2):112-20.
15. Guyatt G. A randomized control trial of right-heart catheterization in critically ill patients. Ontario Intensive Care Study Group. *Journal of Intensive Care Medicine.* 1991;6(2):91-5.
16. Roelke M, Smith A, Palacios I. The technique and safety of transseptal left heart catheterization: The Massachusetts General Hospital experience with 1,279 procedures. *Catheterization and Cardiovascular Diagnosis.* 1994;32(4):332-9.
17. Moustafa GK, A; Charitakis, K; Avgerinos, DV;. Diagnostic Cardiac Catheterization in the Pediatric Population. *Current Cardiology Reviews.* 2016 12(2):155-62.
18. Klinik für angeborene Herzfehler Bochum. Herzkatheter-Untersuchungen: Informationen für Patienten, Eltern und Angehörige 2008 [Available from: [https://www.hdz-nrw.de/fileadmin/downloads/kliniken/HDZ\\_KK\\_Herzkatheter\\_web.pdf](https://www.hdz-nrw.de/fileadmin/downloads/kliniken/HDZ_KK_Herzkatheter_web.pdf), 06.06.2022].
19. Kang S-L, Benson L. Recent advances in cardiac catheterization for congenital heart disease. 2018;7(370).
20. Bundesverband für Herzranke Kinder e.V. Leitfaden: Herzkatheter bei Kindern zur Diagnostik und Therapie 2015 [Available from: [https://bvhk.de/wp-content/uploads/2017/06/Broschuere-Herzkatheter\\_2015-Web.pdf](https://bvhk.de/wp-content/uploads/2017/06/Broschuere-Herzkatheter_2015-Web.pdf), 06.06.2022].

21. Navarini S, Knirsch W, Kretschmar O. Herzkatheterinterventionen bei angeborenen Herzfehlern. *Pädiatrie*. 2011;3(30-34).
22. Kim S-h. Recent advances in pediatric interventional cardiology. *Korean Journal of Pediatrics*. 2017;60(8):237-44.
23. Feltes TF, Bacha E, Beekman 3rd RH, Cheatham JP, Feinstein JA, Gomes AS, et al. Indications for cardiac catheterization and intervention in pediatric cardiac disease: A scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*. 2011;123(22):2607-52.
24. Callan P, Clark AL. Right heart catheterisation indications and interpretation. *Heart*. 2016;102(2):147-57.
25. Kosova E, Ricciardi M. Cardiac Catheterization. *Journal of the American Medical Association*. 2017;317(22).
26. Duignan S, Walsh KP, McMahon CJ. Decision-Making in the Catheter Laboratory: The Most Important Variable in Successful Outcomes. *Pediatric Cardiology*. 2020;41(3):459-68.
27. D'Alto M, Dimopoulos K, Coghlan JG, Kovacs G, Rosenkranz S, Naeije R. Right Heart Catheterization for the Diagnosis of Pulmonary Hypertension: Controversies and Practical Issues. *Heart failure clinics*. 2018;14(3):467-77.
28. Mandra Y, Baradhi K. Cardiac Catheterization Risks and Complications 2021 [Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30285356/>, 06.06.2022].
29. Haas N, Kleideiter U. Herzkatheteruntersuchung. *Kinderkardiologie: Klinik und Praxis der Herzerkrankungen bei Kindern, Jugendlichen und jungen Erwachsenen*. Stuttgart: Thieme-Verlag; 2018.
30. Moustafa GK, A; Charitakis, K,; Avgerinos, DV,; Diagnostic Cardiac Catheterization in the Pediatric Population. *Current Cardiology Reviews*. 2016;12(2).
31. Hamm C, Albrecht A, Bonzel T, Kelm M, Lange H, Schächinger V, et al. Diagnostische Herzkatheteruntersuchung. *Clinical Research in Cardiology*. 2008;97:475-521.
32. Knuuti J, Wijns W, Saraste A, Capodanno D, Barbato E, Funck-Brentano C, et al. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes. *European Heart Journal*. 2020;43(3):407-77.
33. Deutsche Gesellschaft für Angiologie - Gesellschaft für Gefäßmedizin e.V. Aktionstag Gefäßgesundheit - Risiko Thrombose am 20. Juni 2015 Konzept: Die Kampagne „Risiko Thrombose“ 2015 [Available from: [https://www.dga-gefaessmedizin.de/fileadmin/content/PDFs/Aktionstag\\_Gefaessgesundheit/2015\\_Aktionstag\\_Gefaessgesundheit\\_Konzept.pdf](https://www.dga-gefaessmedizin.de/fileadmin/content/PDFs/Aktionstag_Gefaessgesundheit/2015_Aktionstag_Gefaessgesundheit_Konzept.pdf), 06.06.2022].
34. Schunkert H, Kromer E. Rationale Diagnostik und Therapie bei koronarer Herzerkrankung: Herzkatheteruntersuchung. Berlin: Springer; 1999.
35. Lock JE, Keane JF, Perry SB. Diagnostic and Interventional Catheterization in Congenital Heart Disease. Boston: Kluwer Academic Publishers; 2000.
36. Möckel M, Searle J, Jeschke E. Indikation, Prognose und regionale Unterschiede der Herzkatheteruntersuchung in Deutschland 2014 [Available from: [https://www.qualitaetssicherung-mit-routinedaten.de/imperia/md/qsr/publikationen/wido\\_qsr\\_region\\_untersch\\_herzkatheter\\_2\\_014.pdf](https://www.qualitaetssicherung-mit-routinedaten.de/imperia/md/qsr/publikationen/wido_qsr_region_untersch_herzkatheter_2_014.pdf), 06.06.2022].
37. Wiemer M, Schäufele T, Schmitz T, Hoffmann S, Comberg T, Eggebrecht H, et al. Herzkatheter: Diagnostik und Intervention über die Arteria radialis. *Kardiologe*. 2018;12:268-76.
38. Mewis C. Erworbene Klappenfehler: Pulmonalklappenfehler. *Kardiologie compact*. 2 ed. Stuttgart: Thieme-Verlag; 2006. p. 347-9.
39. Pfammatter J. Interventionelle Kardiologie in der Pädiatrie [Interventional cardiology in pediatrics]. *Praxis (Bern 1994)*. 1997;86(17):696-9.

40. Godart F. Approches percutanées des cardiopathies congénitales [Transcatheter treatment of congenital heart disease]. *Revue du Praticien*. 2006;56(6):631-5.
41. Warmerdam E, Krings G, Leiner T, Grotenhuis H. Three-dimensional and four-dimensional flow assessment in congenital heart disease. *Heart*. 2020;106(6):421-6.
42. Reller M, MJ S, Riehle-Colarusso T, Mahle W, Correa A. Prevalence of congenital heart defects in metropolitan Atlanta, 1998-2005. *The Journal of Pediatrics* 2008;153(6):807-13.
43. Abdul-Khaliq H, Berger F. Angeborene Herzfehler: Die Diagnose wird häufig zu spät gestellt. *Deutsches Ärzteblatt*. 2011;108(31-32).
44. Lindinger A, Schwedler G, Hense H. 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;222:321-6.
45. Bibi S, Hussain Gilani S, Bibi S. Spectrum Of Congenital Heart Disease In Full Term Neonates. *Journal of Ayub Medical College Abbottabad*. 2018;30(1):67-70.
46. Siegmund-Schultze N. Angeborene Herzfehler und Malignomrisiko: Patienten mit kongenitalen Herzfehlern haben als junge Erwachsene erhöhtes Risiko. *Deutsches Ärzteblatt*. 2019;116(33-34).
47. Hussain S, Asghar I, Sabir M, Chattha M, Tarar S, Mushtaq R. Prevalence and pattern of congenital malformations among neonates in the neonatal unit of a teaching hospital. *Journal of Pakistan Medical Association*. 2014;64(6):629-34.
48. Muntau A, Driemeyer J. *Pädiatrie hoch 2: Kardiologie: Angeborene Herzfehler*. München: Elsevier; 2018.
49. Majunke N, Erbs S. Persistierendes Foramen ovale und Vorhofseptumdefekt. *Aktuelle Kardiologie*. 2015;4(1):37-41.
50. Blum U, Meyer H, Beerbaum P, Peuster, M. *Kompendium angeborene Herzfehler bei Kindern: Diagnose und Behandlung. Vorhofseptumdefekt*. Berlin: Springer-Verlag; 2021: 59-65.
51. Haas N, Kececioğlu D. *Aktuelle Kardiologie: Angeborene Shuntvitien*. Stuttgart: Thieme-Verlag; 2015.
52. Plana M, Zamora J, Suresh G, Fernandez-Pineda L, Thangaratinam S, Ewer A. Pulse oximetry screening for critical congenital heart defects. *Cochrane database of systematic reviews*. 2018;3(3).
53. Haas N, Kleideiter U. *Kinderkardiologie: Angeborene Herzfehler: Vorhofseptumdefekt*. 2 ed. Stuttgart: Thieme-Verlag; 2018.
54. Kretschmer C. Gelbe Liste: Vorhofseptumdefekt 2019 [Available from: <https://www.gelbe-liste.de/krankheiten/vorhofseptumdefekt>, 06.06.2022]
55. Schön S, Speiser U, Sievers B, Strasser R. Integrative Bildgebung zur Therapieplanung bei Shuntvitien im Erwachsenenalter. *Kardiologie up2date*. 2010;6(3):215-27.
56. Deutsche Gesellschaft für Pädiatrische Kardiologie und angeborene Herzfehler e.V. S2k Leitlinie: Vorhofseptumdefekt 2019 [Available from: [https://www.dgpk.org/fileadmin/user\\_upload/Leitlinien/2019\\_11\\_27\\_LL\\_ASD.total.final.27.10.2019.li.pdf](https://www.dgpk.org/fileadmin/user_upload/Leitlinien/2019_11_27_LL_ASD.total.final.27.10.2019.li.pdf).
57. Flachskampf F, Angermann C, Baumgartner H, H B, Bocksch W, Buck T, et al. *Praxis der Echokardiographie: Echokardiographie von angeborenen Herzfehlern im Erwachsenenalter: Angeborene Shuntvitien*. 2 ed. Stuttgart: Thieme Verlag; 2007: 573-575.
58. Becherer N. *Simulation von Herzkatheterinterventionen bei Kleinkindern*. Mannheim: Universität Mannheim; 2008.
59. Eisoldt S. *Fallbuch Chirurgie*. 6 ed. Stuttgart: Thieme-Verlag; 2020.
60. Haas N, Kleideiter U. *Kinderkardiologie: Angeborene Herzfehler: Ventrikelseptumdefekte*. 2 ed. Stuttgart: Thieme-Verlag; 2011.

61. Steffel J, Luescher T. Herz-Kreislauf: Module Innere Medizin. 2 ed. Heidelberg: Springer-Verlag; 2014.
62. Menche N. Biologie Anatomie Physiologie: Das Herz. 8 ed. Urban&Fischer Verlag/Elsevier GmbH; 2016: 225-233.
63. Schmidt B. Anatomie und Physiologie des Herzens und des Kreislaufsystems. Norderstedt GRIN-Verlag; 2020
64. Bergström S, Carr H, Petersson G, Stephansson O, Bonamy A, Dahlström A, et al. Trends in Congenital Heart Defects in Infants With Down Syndrome. *Pediatrics*. 2016;138(1).
65. Rumman R, Nickel C, Matsuda-Abadini M, Lorenzo A, Langlois V, Radhakrishnan S, et al. Disease Beyond the Arch: A Systematic Review of Middle Aortic Syndrome in Childhood. *American Journal of Hypertension*. 2015;28(7):833-46.
66. Wisotzkey B, Hornik C, Green A, Barker P. Comparison of invasive and non-invasive pressure gradients in aortic arch obstruction. *Cardiology in the young*. 2015;25(7):1348-57.
67. Haas N, Kleideiter U. Kinderkardiologie: Angeborene Herzfehler: Aortenisthmusstenose. 2 ed. Stuttgart: Thieme-Verlag; 2018.
68. Deutsche Gesellschaft für Pädiatrische Kardiologie. Leitlinie Pädiatrische Kardiologie: Aortenisthmusstenose 2018 [Available from: [https://www.awmf.org/uploads/tx\\_szleitlinien/023-010I\\_S2k\\_Aortenisthmusstenose\\_Kinder\\_Jugendliche\\_2018-07.docx.pdf](https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/023-010I_S2k_Aortenisthmusstenose_Kinder_Jugendliche_2018-07.docx.pdf), 06.06.2022].
69. Eicken A, Ewert P. Schwerpunkt: Aortenisthmusstenose: Invasive Diagnostik und Behandlung der Aortenisthmusstenose (CoA). *Journal für angeborene Herzfehler*. 2016;4:26-30.
70. Baumgartner H, Bonhoeffer P, De Groot N, De Haan F, Deanfield J, Galie N, et al. ESC Guidelines for the management of grown-up congenital heart disease (new version 2010). *European Heart Journal*. 2010;31(23):2915-57
71. Deutsche Gesellschaft für Pädiatrische Kardiologie. 9 Leitlinie Pädiatrische Kardiologie: Aortenisthmusstenose 2011 [Available from: [https://www.dgpk.org/fileadmin/user\\_upload/Leitlinien/08%20LL%20AortenisthmusstenoseAS.pdf](https://www.dgpk.org/fileadmin/user_upload/Leitlinien/08%20LL%20AortenisthmusstenoseAS.pdf), 06.06.2022].
72. Sos T, Sniderman K, Rettke-Sos B, Strupp A, Alonso D. Percutaneous transluminal dilatation of coarctation of thoracic aorta post mortem. *Lancet*. 1979;2(8149):970-1.
73. Cleuziou J, Kasnar-Samprec J, Hörer J, Eicken A, Lange R, Schreiber C. Recoarctation after the norwood I procedure for hypoplastic left heart syndrome: incidence, risk factors, and treatment options. *The Annals of Thoracic Surgery*. 2013;95(3):935-40.
74. Sündermann S, Falk V. Angeborene Herzfehler. Subvalvuläre und valvuläre Aortenstenose. In: Largiadèr F, Saeger H, Keel M, editors. *Checkliste Chirurgie*. Stuttgart: Thieme-Verlag; 2016.
75. Grosse-Brockhoff F, Loogen F. Angeborene Aortenstenose *Deutsche Medizinische Wochenschrift*. 1961;86(10):417-25.
76. Haas N, Kleideiter U. Kinderkardiologie: Angeborene Herzfehler: Aortenstenose. 2 ed. Stuttgart: Thieme-Verlag; 2018.
77. Deutsche Gesellschaft für Pädiatrische Kardiologie. 8a Leitlinie Pädiatrische Kardiologie: Aortenklappenstenose 2011 [Available from: [https://www.dgpk.org/fileadmin/user\\_upload/Leitlinien/05%20LL%20AortenklappenstenoseAS.pdf](https://www.dgpk.org/fileadmin/user_upload/Leitlinien/05%20LL%20AortenklappenstenoseAS.pdf), 06.06.2022].
78. Haas N, Kleideiter U. Kinderkardiologie: Angeborene Herzfehler: Pulmonalstenose. Stuttgart: Thieme-Verlag; 2018.
79. Deutsche Gesellschaft für Pädiatrische Kardiologie. Leitlinie Pädiatrische Kardiologie: Valvuläre Pulmonalstenose 2017 [Available from: [https://www.dgpk.org/fileadmin/user\\_upload/Leitlinien/LL\\_valvPstnachVSS.pdf](https://www.dgpk.org/fileadmin/user_upload/Leitlinien/LL_valvPstnachVSS.pdf), 06.06.2022].

80. Deutsche Gesellschaft für Pädiatrische Kardiologie. Leitlinie: Pädiatrische Kardiologie: Valvuläre Pulmonalstenose 2017 [Available from: [https://www.dgpk.org/fileadmin/user\\_upload/Leitlinien/LL\\_valvPstnachVSS.pdf](https://www.dgpk.org/fileadmin/user_upload/Leitlinien/LL_valvPstnachVSS.pdf), 06.06.2022]
81. Kerbl R, Kurz R, Roos R, Wessel L, Reiter K. Checkliste Pädiatrie: Herz-Kreislauf-Erkrankungen. 5 ed. Stuttgart: Thieme-Verlag; 2015.
82. Waight DH, ZM; . Pediatric interventional cardiology: the cardiologist's role and relationship with pediatric cardiothoracic surgery. *Advances in cardiac surgery*. 2001;13:143-67.
83. Di Bernardo SM, Y; Meijboom, EJ; Sekarski, N; . Traitement des cardiopathies congénitales par cathétérisme interventionnel [Treatment of congenital heart disease with interventional catheterization]. *Revue Médicale Suisse*. 2005;1(31):2049-50, 53-55.
84. Ejaz F, Ryan J, Hendriksen M, et al. Farbkodierte patientenspezifische physikalische Modelle angeborener Herzerkrankungen. *Rapid Prototyping Zeitschrift*. 2014;20(4):336-43.
85. Costello J, Olivieri L, Su L, et al. Einbindung des dreidimensionalen Druckens in ein simulationsbasiertes Trainingscurriculum für angeborene Herzerkrankungen und Intensivpflege für Assistenzärzte. *Angeborene Herzerkrankungen*. 2015;10(2):185-90.
86. Lau IWW, Liu D, Xu L, Fan Z, Sun Z. Clinical value of patient-specific three-dimensional printing of congenital heart disease: Quantitative and qualitative assessments. *PLoS One*. 2018;13(3):e0194333.
87. Loke Y-H, Harahsheh AS, Krieger A, Olivieri LJ. Usage of 3D models of tetralogy of Fallot for medical education: impact on learning congenital heart disease. *BMC medical education*. 2017;17(1):1-8.
88. Olivieri L, Su L, Hynes C, et al. „Just-In-Time“-Simulationstraining mit gedruckten 3-D-Herzmodellen nach kongenitaler Herzchirurgie. *World Journal of Pediatrics Heart Surgery*. 2016;7(2):164-8.
89. 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.
90. Wang Z, Liu Y, Luo H, et al. Is a Three-Dimensional Printing Model Better Than a Traditional Cardiac Model for Medical Education? A Pilot Randomized Controlled Study. *Acta Cardiologica Sinica*. 2017;33(6):664-9.
91. White S, Sedler J, Jones T, et al. Utility of three-dimensional models in resident education on simple and complex intracardiac congenital heart defects. *Congenital heart disease*. 2018;13(6):1045-9.
92. Hopfner C, Jakob A, Tengler A, Grab M, Thierfelder N, Brunner B, et al. Engineering on Anatomy to Avoid the Necessity of Invasive Imaging in Medical 3D Printing: Examples from Pediatric Cardiology 2020.
93. Keyence. Hochauflösender 3D Drucker: (o.J.) [Available from: [https://www.keyence.de/products/3d-printers/3d-printers/agilista-3100/models/agilista-3200w/?search\\_sl=1](https://www.keyence.de/products/3d-printers/3d-printers/agilista-3100/models/agilista-3200w/?search_sl=1), 06.06.2022].
94. Grab M, Hopfner C, Gesenhues A, König F, Haas N, Hagl C, et al. Development and Evaluation of 3D-Printed Cardiovascular Phantoms for Interventional Planning and Training. *Journal of Visualized Experiments*. 2021;167.
95. 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.
96. 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):303-10.

97. 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.
98. Institut für Qualität und Wirtschaftlichkeit im Gesundheitswesen (IQWiG). Was passiert bei einer Herzkatheter-Untersuchung? 2019 [Available from: <https://www.gesundheitsinformation.de/was-passiert-bei-einer-herzkatheter-untersuchung.html>, 06.06.2022].
99. Haas N, Kleidreiter U. *Kinderkardiologie: Herzkatheter: Unterschiedliche Katheter*. Stuttgart: Thieme-Verlag; 2011.
100. Schmitz D, Roth M, Götz S, Papkalla N, Koberne F, Müller M. Simulationstraining für das Team im Rettungsdienst: Beispielhaftes Konzept einer flächendeckenden Umsetzung. *Notfall + Rettungsmedizin* 2016;19(7):559-65.
101. Ziv A, Wolpe P, Small S, Glick S. Simulation-based medical education: an ethical imperative. *Academic Medicine*. 2003;78(8):783-8.
102. Rau S. Die Tanker-Fahrschule in den Alpen 2021 [Available from: <https://www.tagesschau.de/ausland/europa/tanker-fahrschule-alpen-101.html>, 06.06.2022].
103. Kasang M. Mini-Suezkanal: Wo Nachwuchskapitäne lernen, nicht zu havarieren 2021 [Available from: <https://www.spiegel.de/wirtschaft/wo-nachwuchskapitaene-lernen-nicht-zu-havarieren-a-f9656df2-b05d-44e3-8168-d73684a4c155>, 06.06.2022].
104. Kunkel RK, C;. Die Fahrschule der Kapitäne: In einem Alpenteich übt die Elite der Nautiker, wie ihre Riesenpötte in tückische Kanäle und enge Häfen passen. *mare: Die Zeitschrift der Meere*. 2000.
105. Behrend T. *Schifffahrt: Fahrschule für Kapitäne*. FOCUS Magazin. 2009.
106. Metz C. *Virtual und Augmented Reality in Industrie und Militär*. Munich: LMU; 2004.
107. Burghofer K, Lackner C. Simulationstraining zwischen „human factors“ und „technical skills“. *Notfall + Rettungsmedizin*. 2014;17:386-92.
108. Greif R, Lockey A, Conaghan P, Lippert A, De Vries W, Monsieurs K. ERC Leitlinien: Ausbildung und Implementierung der Reanimation: Kapitel 10 der Leitlinie zur Reanimation *Notfall + Rettungsmedizin*. 2015;18:1016-34.
109. 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.
110. Randazzo M, Pisapia JM, Singh N, Thawani JP. 3D printing in neurosurgery: a systematic review. *Surgical Neurology International*. 2016;7(Suppl 33): 801.
111. VanKoevering KK, Hollister SJ, Green GE. Advances in 3-dimensional printing in otolaryngology: a review. *JAMA Otolaryngology–Head & Neck Surgery*. 2017;143(2):178-83.
112. Papazarkadas X, Spartalis E, Patsouras D, Ioannidis A, Schizas D, Georgiou K, et al. The role of 3D printing in colorectal surgery: Current evidence and future perspectives. *in vivo*. 2019;33(2):297-302.
113. 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.
114. 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.
115. 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.

116. 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.
117. 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.
118. 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.
119. Maschuw K, Hassan I, Bartsch D. Chirurgisches Training am Simulator: „Virtual reality“. *Der Chirurg*. 2010(1).
120. Seymour NE, Gallagher AG, Roman SA, O'brien MK, Bansal VK, Andersen DK, et al. Virtual reality training improves operating room performance: results of a randomized, double-blinded study. *Annals of surgery*. 2002;236(4):458.
121. Bintley H, Bell A, Ashworth R. Remember to breathe: teaching respiratory physiology in a clinical context using simulation. *Advances in physiology education*. 2019;43(1):76-81.
122. Rüsseler M, Weber R, Barunbeck A, Flaig W, Lehrteam des Zentrum Chirurgie, Marzi I, et al. Training praktischer Fertigkeiten in der Chirurgie - Ein Ausbildungskonzept für Studierende. *Zentralblatt für Chirurgie*. 2010;135(3):249-56.
123. Nikendei C, Schilling T, Nawroth P, Henadsel M, Ho A, Schwenger V, et al. Integriertes Skills-Lab-Konzept für die studentische Ausbildung in der Inneren Medizin [Integrated skills laboratory concept for undergraduate training in internal medicine]. *Deutsche Medizinische Wochenschrift*. 2005;130(18):1133-8.
124. Fichtner A. Lernen für die Praxis: Das Skills-Lab. In: St. Pierre M, Breuer G, editors. *Simulation in der Medizin*. Berlin: Springer-Verlag; 2013. p. 105-14.
125. Medizinische Fakultät (Mecum) Zentrum für Unterricht und Studium (ZeUS). Phantome und Modelle (o.J.) [Available from: [https://www.zeus.med.uni-muenchen.de/grosshadern/ausstattung/phantome\\_modelle/index.html](https://www.zeus.med.uni-muenchen.de/grosshadern/ausstattung/phantome_modelle/index.html), 06.06.2022].
126. Lindinger A. DHS Deutscher Herzbericht 2020: Versorgung von herzkranken Kindern in Deutschland weiterhin exzellent 2021 [Available from: <https://nachrichten.idw-online.de/2021/06/23/dhs-deutscher-herzbericht-2020-versorgung-von-herzkranken-kindern-in-deutschland-weiterhin-exzellent/>, 06.06.2022].
127. Lopreiato J, Sawyer T. Simulation-based medical education in pediatrics. *Academic Pediatrics*. 2015;15(2):134-42.
128. Ojha R, Liu A, Rai D, Nanan R. Review of Simulation in Pediatrics: The Evolution of a Revolution. *Frontiers in Pediatrics*. 2015;3(106).
129. St. Pierre M, Breuer G. *Simulation in der Medizin: Grundlegende Konzepte - Klinische Anwendung*. 2 ed. Berlin: Springer-Verlag; 2018.
130. Weinger MB. The pharmacology of simulation: a conceptual framework to inform progress in simulation research. *Simulation in Healthcare*. 2010;5(1):8-15.
131. Brunner BS. Zwei Welten, eine Medizin 2019 [Available from: [https://etiopiawitten.de/files/Aktuelles/Aktuelles%202018/Workshop%20October%202018%20and%20more/Bericht%20Ayder%20Hospital%2010\\_2018%20Autor%20Barbara%20Brunner.pdf](https://etiopiawitten.de/files/Aktuelles/Aktuelles%202018/Workshop%20October%202018%20and%20more/Bericht%20Ayder%20Hospital%2010_2018%20Autor%20Barbara%20Brunner.pdf), 06.06.2022].