

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

Abstract

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

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

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

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

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

Barbara S. Brunner¹

Alisa Thierij¹

Andre Jakob¹

Anja Tengler¹

Maximilian Grab²

Nikolaus Thierfelder²

Christian J. Leuner³

Nikolaus A. Haas¹

Carina Hopfner¹

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

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

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

1. Introduction

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

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

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

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

2. Project description

2.1. Model development

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

2.2. Setup of the training environment

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

2.3. Structure of the CC training modules

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

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

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

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

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

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

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

2.4. Evaluation

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

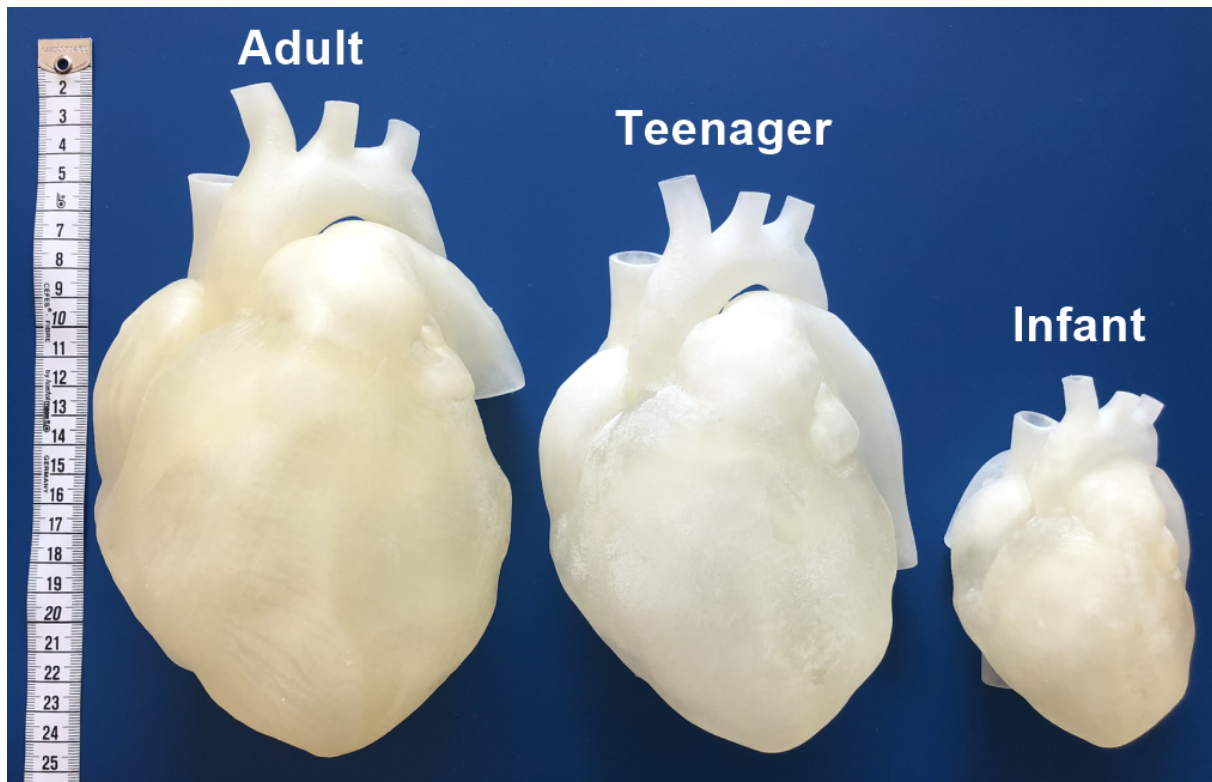


Figure 1: 3D-printed heart models in different sizes

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

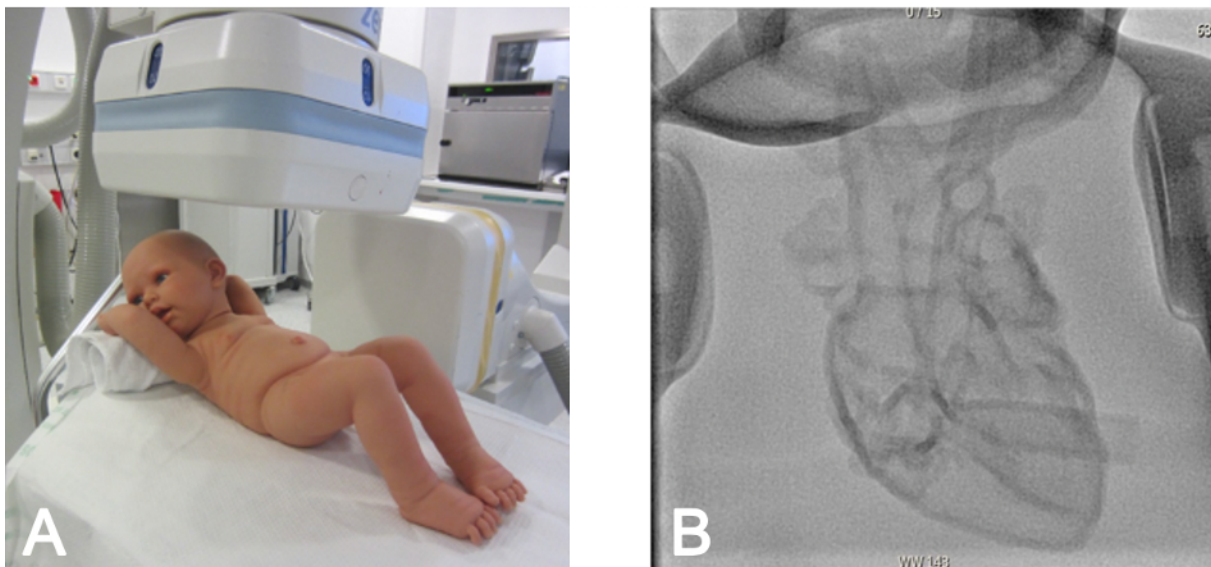


Figure 2: Baby doll with 3D-printed heart model inside the chest

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

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

The entire statistical analysis was done using Microsoft Excel.

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

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

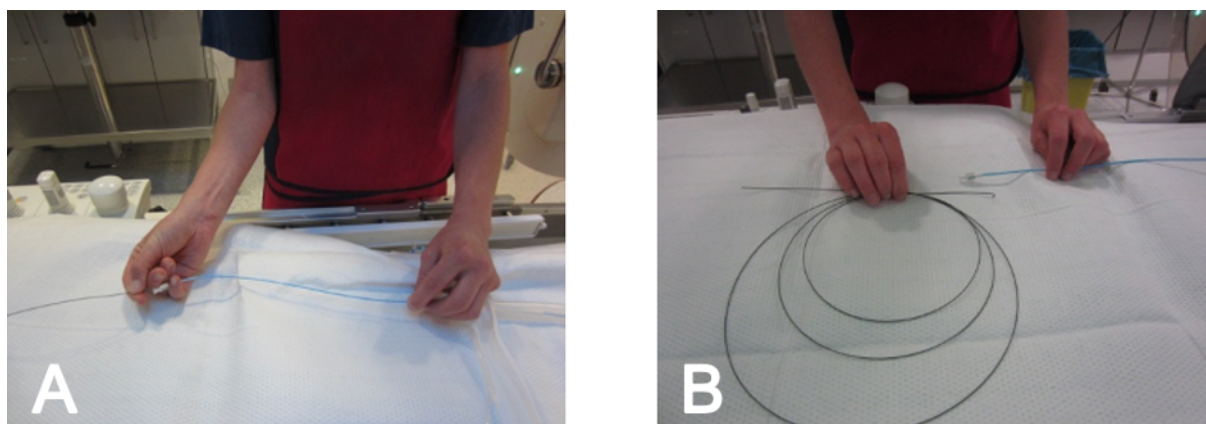


Figure 3: Demonstration of the correct handling of the guide wire

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

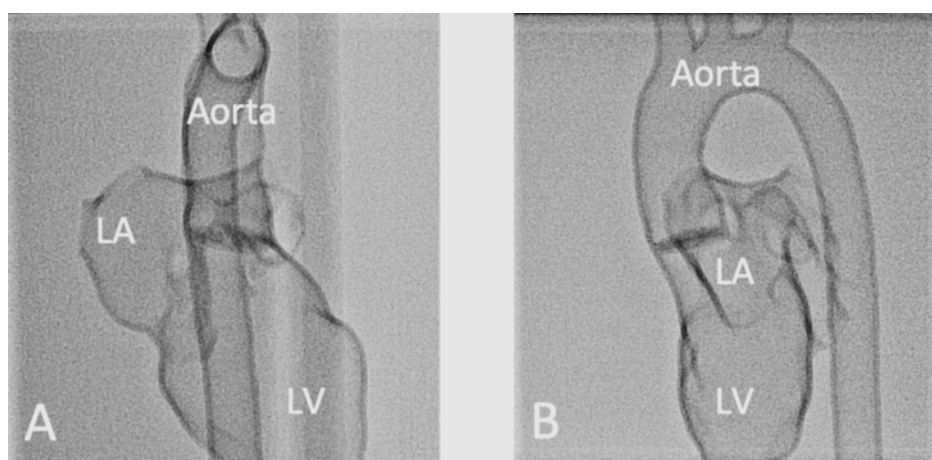


Figure 4: Influence of the projection levels on the anatomic representation during fluoroscopy of a 3D-printed left heart with physiological anatomy in two planes (Aorta = aortic arch, LV = left ventricle, LA = left atrium)

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

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

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

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

3. Results

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

3.1. Fluoroscopy time

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

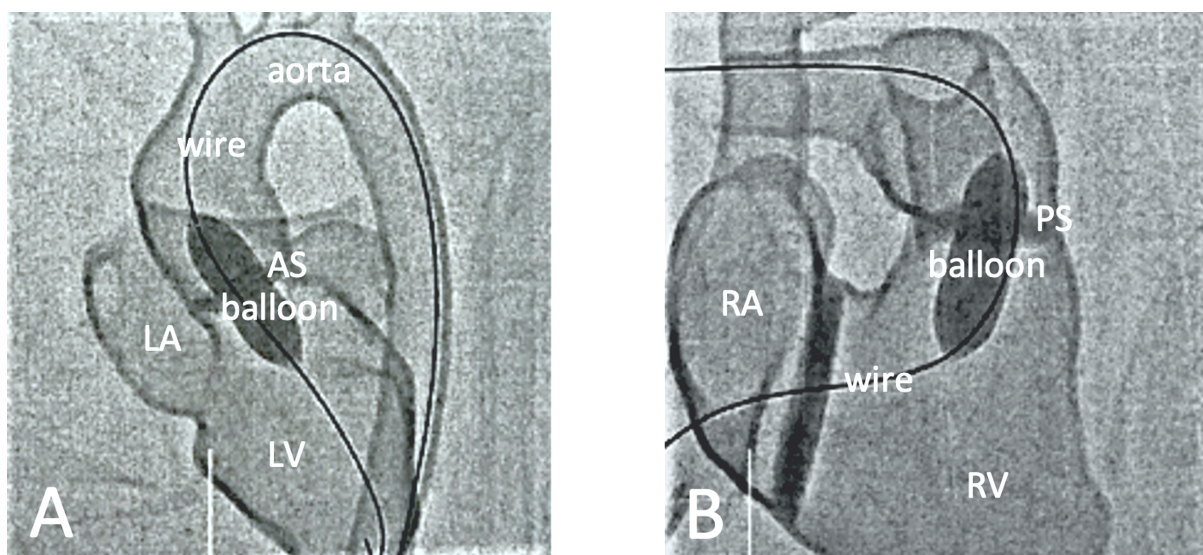


Figure 5: Fluoroscopic documentation of a balloon dilatation of a valvular stenosis within the 3D-printed heart model

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

group provides the best representation of the training effect.

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

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

3.2. Questionnaires

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

3.2.1. Assessment issues

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

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

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

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

3.2.2. Free text comments

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

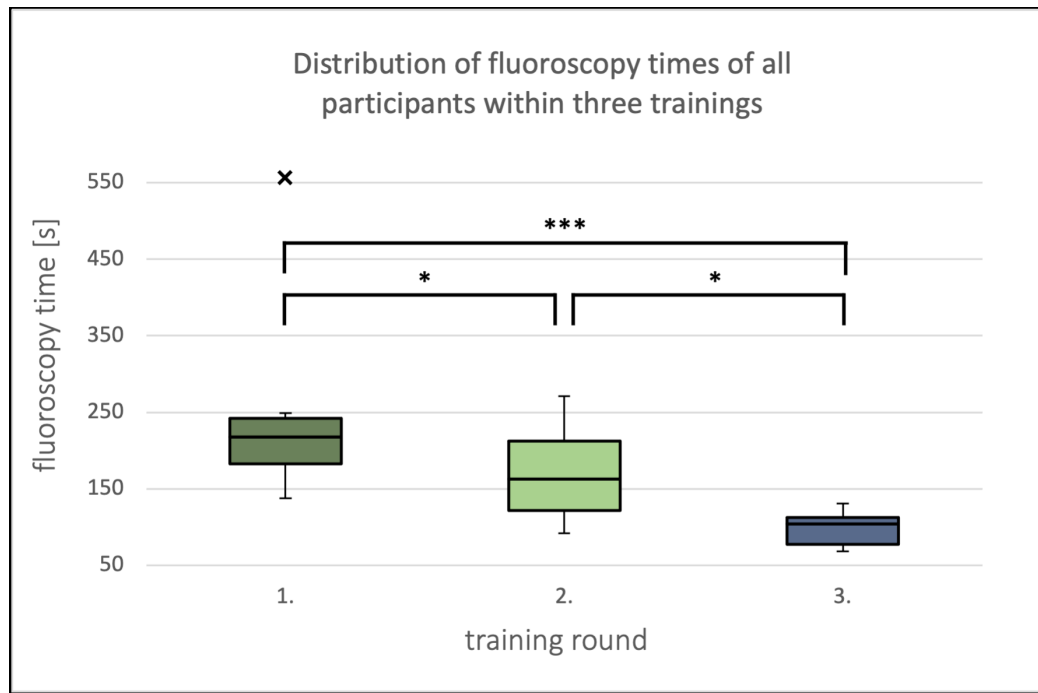


Figure 6: Development of the median distribution of fluoroscopy times of all participants (n=11) in three training rounds. The median fluoroscopy time could be reduced from 218 seconds in the beginning to 104 seconds at the end of the third training round. Attention needs to be paid to the fact that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

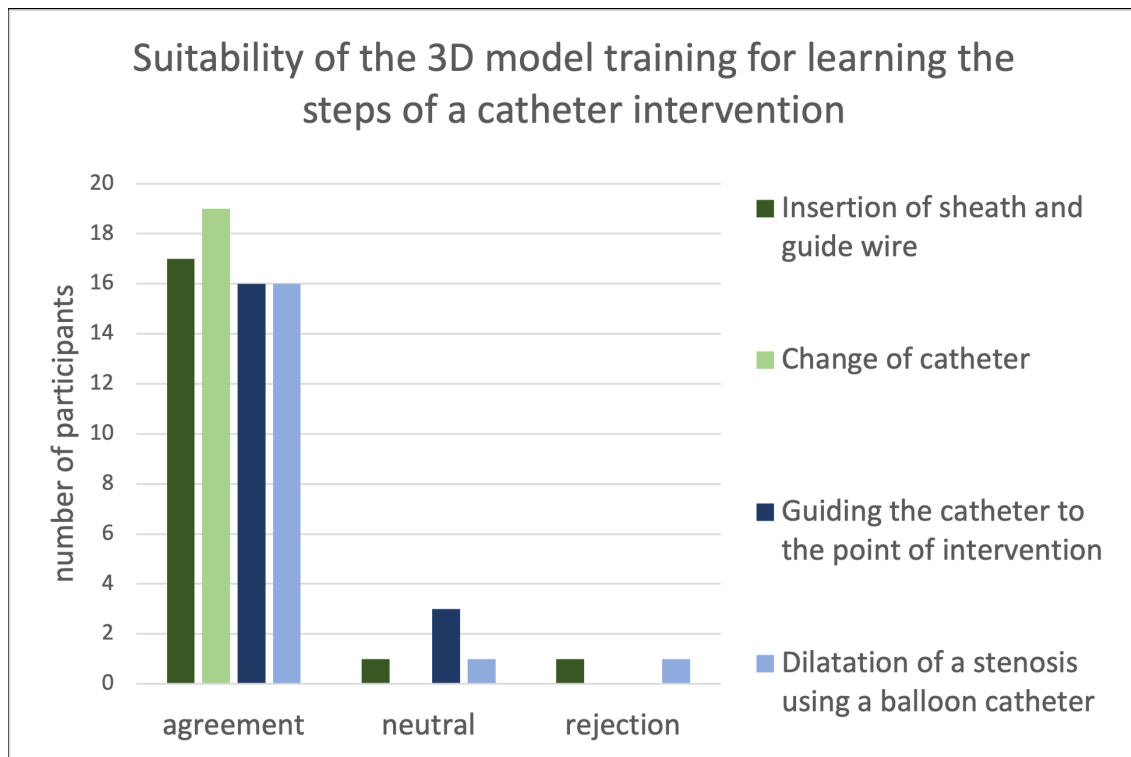


Figure 7: Responses of all participants (n=19) divided into approval and rejection regarding the suitability of 3D-printed heart models to learn the steps of a catheter intervention

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

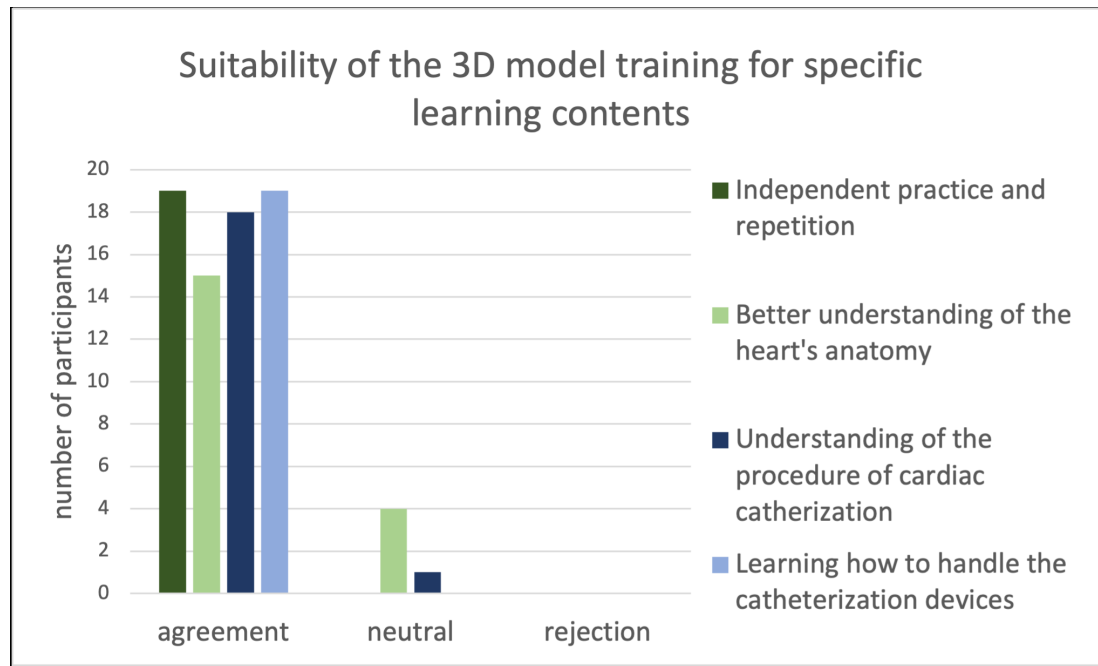


Figure 8: Responses of all participants (n=19) divided into approval and rejection regarding the suitability for certain learning contents

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

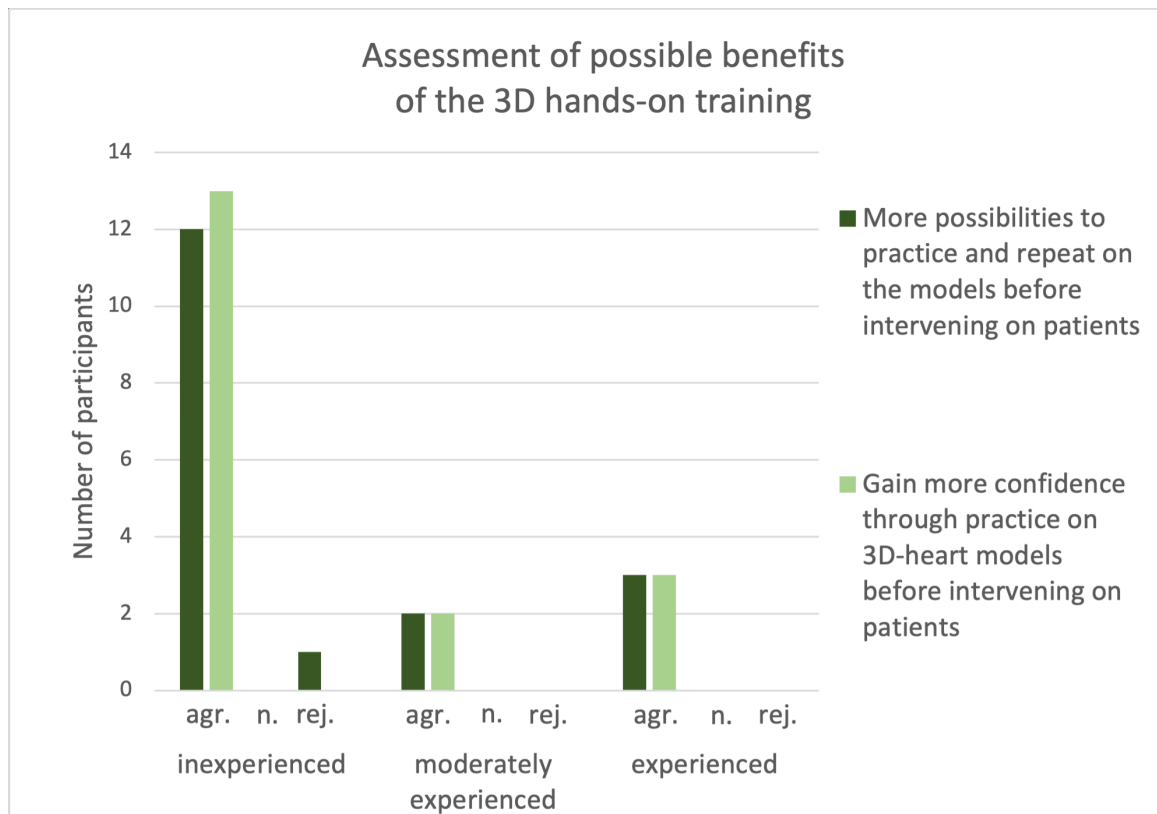


Figure 9: Assessment of possible benefits of the 3D hands-on training

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

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

4. Discussion

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5. Conclusion

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

Notes

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

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

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

References

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

23. Batteux C, Haidar MA, Bonnet D. 3D-printed models for surgical planning in complex congenital heart diseases: a systematic review. *Front Pediatr*. 2019;7:23. DOI: 10.3389/fped.2019.00023
24. Hussein N, Honjo O, Barron DJ, Haller C, Coles JG, Yoo SJ. The incorporation of hands-on surgical training in a congenital heart surgery training curriculum. *Ann Thorac Surg*. 2020;S-0003-4975(20)32088-9.
25. Yoo SJ, Spray T, Austin III EH, Yun TJ, van Arsdell GS. Hands-on surgical training of congenital heart surgery using 3-dimensional print models. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2017;153(6):1530-1540. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2016.12.054
26. Nguyen D, Appelbaum J, Ali F, Shorofsky S, Dickfeld T, See V, Restrepo AJ. Three-Dimensional Printing in Cardiac Electrophysiology: Current Applications and Future Directions. *EPLabDigest*. 2021;21(5). Zugänglich unter/available from: <https://www.eplabdigest.com/three-dimensional-printing-cardiac-electrophysiology-current-applications-and-future-directions>
27. Heidebuchel H, Wittkamp FH, Vano E, Ernst S, Schilling R, Picano E, Mont L, Jais P, de Bono J, Pieorkowski C, Saad E, Femenia F. Practical ways to reduce radiation dose for patients and staff during device implantations and electrophysiological procedures. *Europace*. 2014;16(7):946-964. DOI: 10.1093/europace/eut409
28. Chambers CE, Awuor S. Reducing radiation dose: Equipment, procedure, and operator Perfecting the Trifecta. *Catheter Cardiovasc Interv*. 2018;92(7):1237-1238. DOI: 10.1002/ccd.28001
29. Katz A, Shtub A, Solomonica A, Poliakov A, Roguin A. Simulator training to minimize ionizing radiation exposure in the catheterization laboratory. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2017;33(3):303-310. DOI: 10.1007/s10554-016-1009-7
30. Ziv A, Wolpe PR, Small SD, Glick S. Simulation-Based Medical Education: An Ethical Imperative. *Acad Med*. 2003;78(8):783-788. DOI: 10.1097/00001888-200308000-00006
31. Burkhart HM. Simulation in congenital cardiac surgical education: We have arrived. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2017;153(6):1528-1529. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2017.03.012
32. Seymour NE, Gallagher AG, Roman SA, O'Brien MK, Bansal VK, Andersen DK, Satava RM. Virtual reality training improves operating room performance: results of a randomized, double-blinded study. *Ann Surg*. 2002;236(4):458. DOI: 10.1097/00000658-200210000-00008
33. Weinger MB. The pharmacology of simulation: a conceptual framework to inform progress in simulation research. *Simul Healthc*. 2010;5(1):8-15. DOI: 10.1097/SIH.0b013e3181c91d4a

Corresponding author:

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

Please cite as

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

This article is freely available from

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

Received: 2021-05-02

Revised: 2021-10-05

Accepted: 2022-01-24

Published: 2022-04-14

Copyright

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

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

Zusammenfassung

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

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

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

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

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

Barbara S. Brunner¹

Alisa Thierij¹

Andre Jakob¹

Anja Tengler¹

Maximilian Grab²

Nikolaus Thierfelder²

Christian J. Leuner³

Nikolaus A. Haas¹

Carina Hopfner¹

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

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

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

1. Einleitung

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

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

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

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

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

2. Projektbeschreibung

2.1. Modellentwicklung

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

2.2. Aufbau der Trainingsumgebung

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

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

2.3. Ablauf HK-Trainingsmodule

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

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

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

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

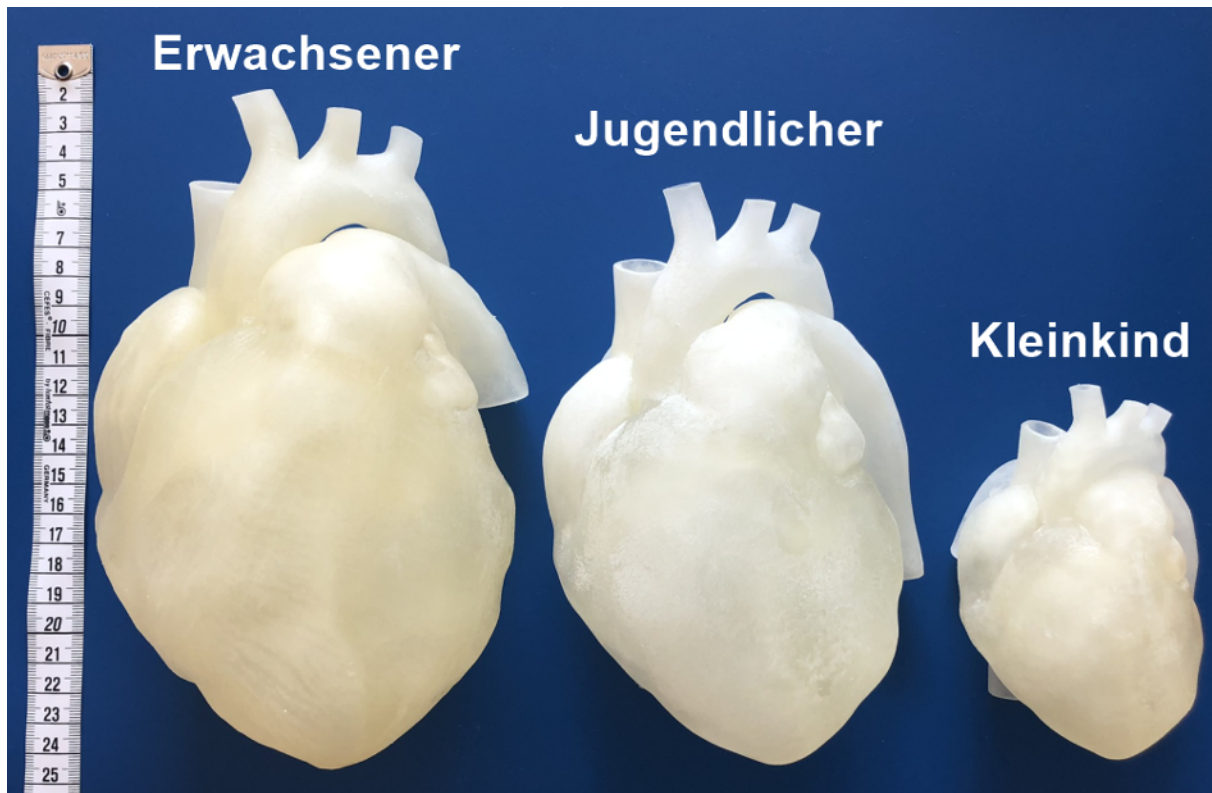


Abbildung 1: Größenvergleich der 3D-gedruckten Herzmodelle. Abgebildet sind Modelle in der Größe des Herzen eines Erwachsenen, eines Jugendlichen und eines Kleinkindes im Vergleich. Die Herzmodelle für das Hands-on-Training wurden mit einem 3D-Drucker (Agilista 3200W, Keyence Corp.) im Additiven Fertigungsverfahren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

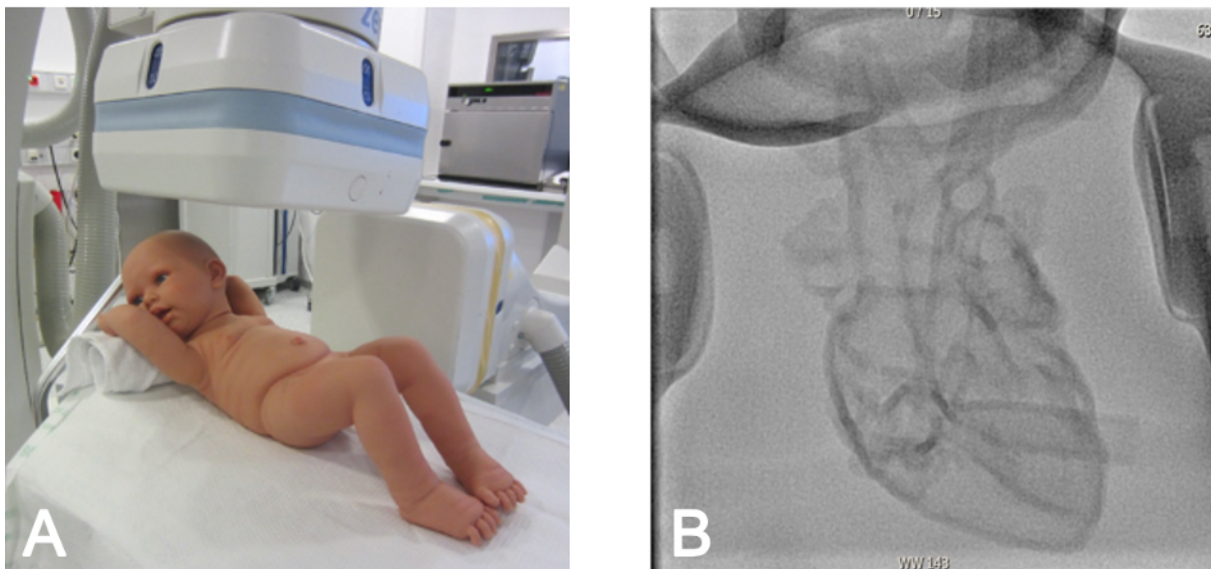


Abbildung 2: Kunststoff-Babypuppe mit innen liegendem 3D-gedrucktem Herzmodell.

A) Die Modellpuppe auf dem Herzkatheter-Tisch positioniert wie ein realer Patient.

B) unter anterior-posteriorer Durchleuchtung ist das 3-D gedruckte Herzmodell des gesunden Herzens in der Kunststoff-Babypuppe erkennbar.

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

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

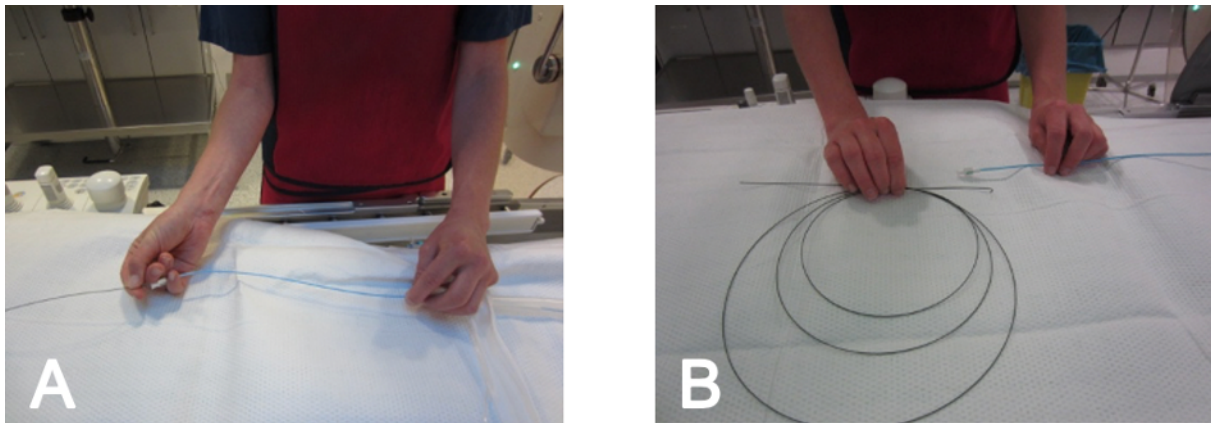


Abbildung 3: Demonstration der korrekten Handhabung des Führungsdrahtes.

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

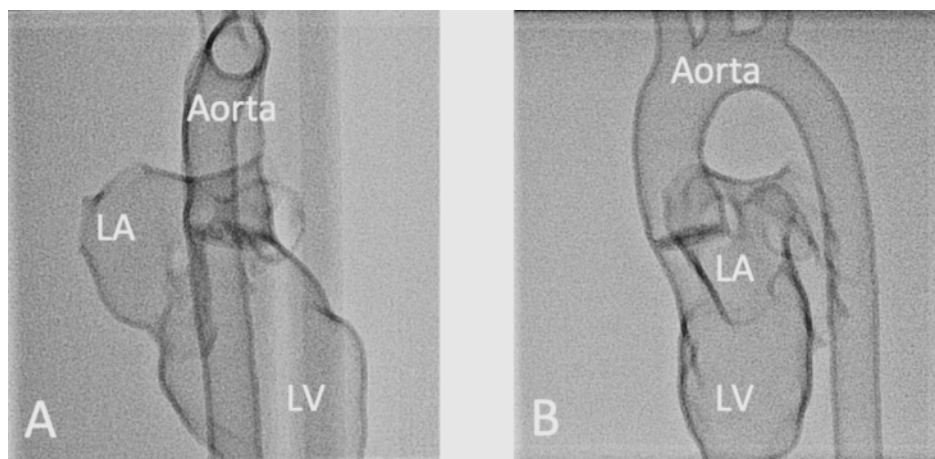


Abbildung 4: Einfluss der Projektionsebenen auf die anatomische Darstellung während der Durchleuchtung eines 3D-gedruckten Herzmodells mit physiologischer Herzanatomie des linken Herzens in zwei Ebenen. (Aorta = Aortenbogen, LV= linker Ventrikel, LA= linker Vorhof)

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

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

2.4. Evaluation

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

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

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

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

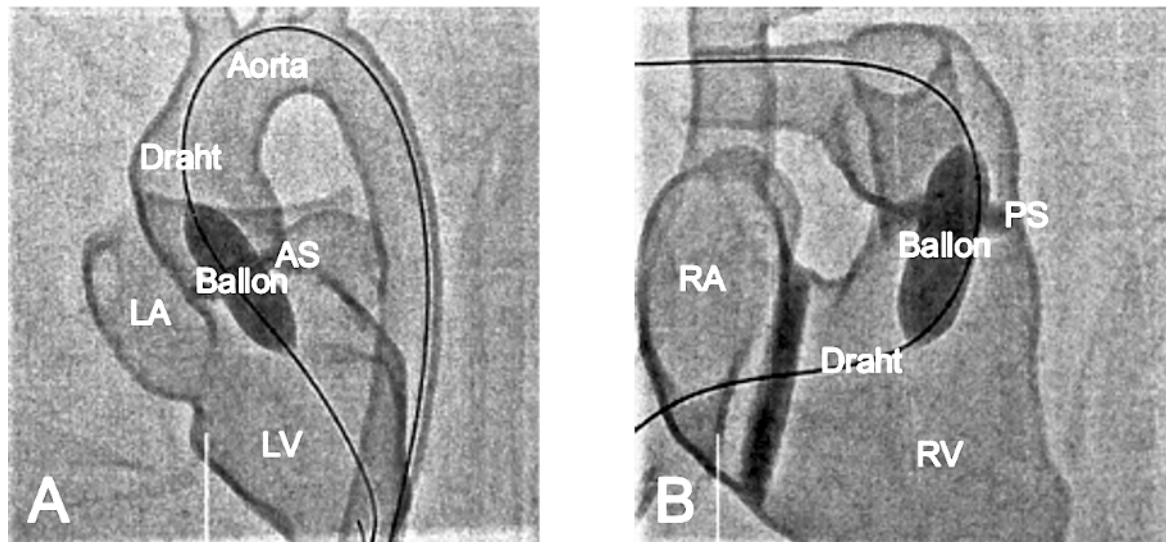


Abbildung 5: Fluoroskopische Dokumentation der Ballondilatation von Stenosen im 3D-gedruckten Herzmodell

A) Ballondilatation einer valvulären Aortenstenose. Der inflatierte Dilatationsballon ist im Bereich der Aortenklappe positioniert, der lange Führungsdraht kommt aus der descendierenden Aorta und liegt mit der Spitze im linken Ventrikel.

B) Ballondilatation einer valvulären Pulmonalstenose. Der inflatierte Dilatationsballon ist im Bereich der Pulmonalklappe positioniert, der lange Führungsdraht kommt aus der Vena cava inferior über den rechten Vorhof in den rechten Ventrikel und liegt mit seinem Ende in der rechten Pulmonalarterie

(Aorta = Aortenbogen, AS= Aortenstenose, PS= Pulmonalstenose, LV= linker Ventrikel, LA= linker Vorhof, RV= rechter Ventrikel, RA= rechter Vorhof)

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

3. Ergebnisse

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

3.1. Durchleuchtungszeit

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

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

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

3.2. Fragebögen

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

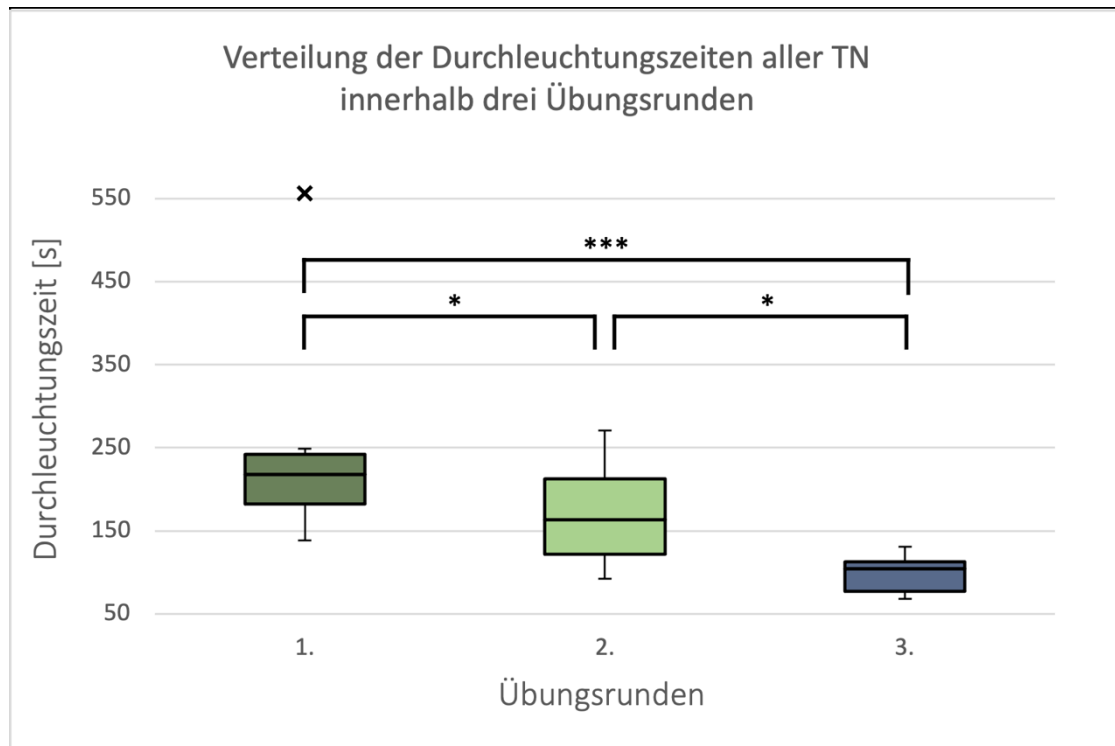


Abbildung 6: Entwicklung der medianen Verteilung der Durchleuchtungszeiten aller Teilnehmenden (n=11) im Verlauf von drei Übungsdurchgängen.

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

3.2.1. Bewertungsfragen

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

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

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

3.2.2. Freitextkommentare

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

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

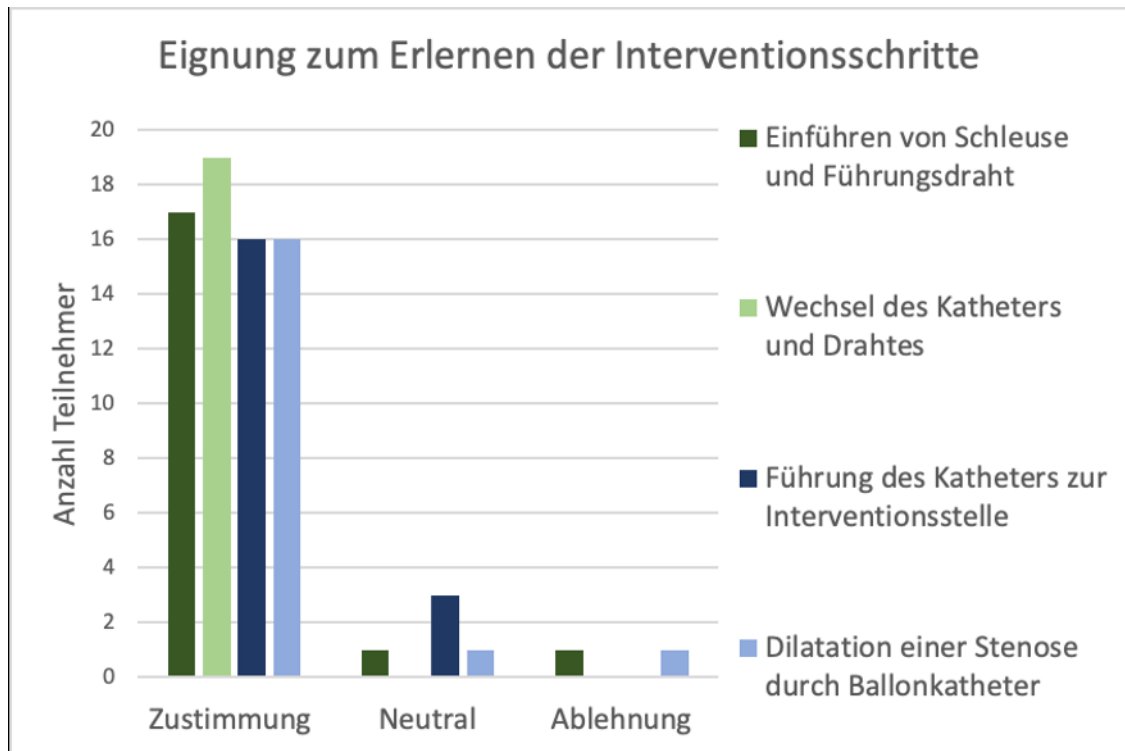


Abbildung 7: Antworten aller Teilnehmenden (n=19) unterteilt in Zustimmung und Ablehnung bezüglich der Eignung 3D-gedruckter Herzmodelle zum Erlernen von Interventionsschritten.

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

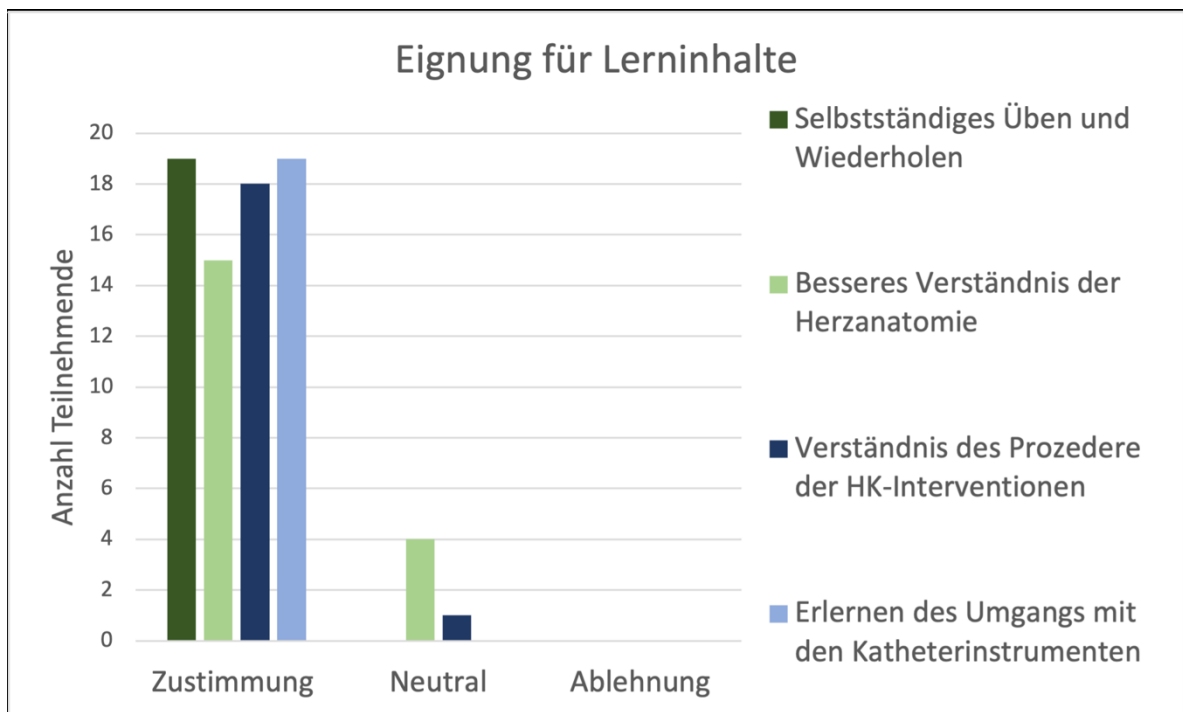


Abbildung 8: Antworten aller Teilnehmenden (n= 19) unterteilt in Zustimmung und Ablehnung bezüglich der Eignung für bestimmte Lerninhalte.

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

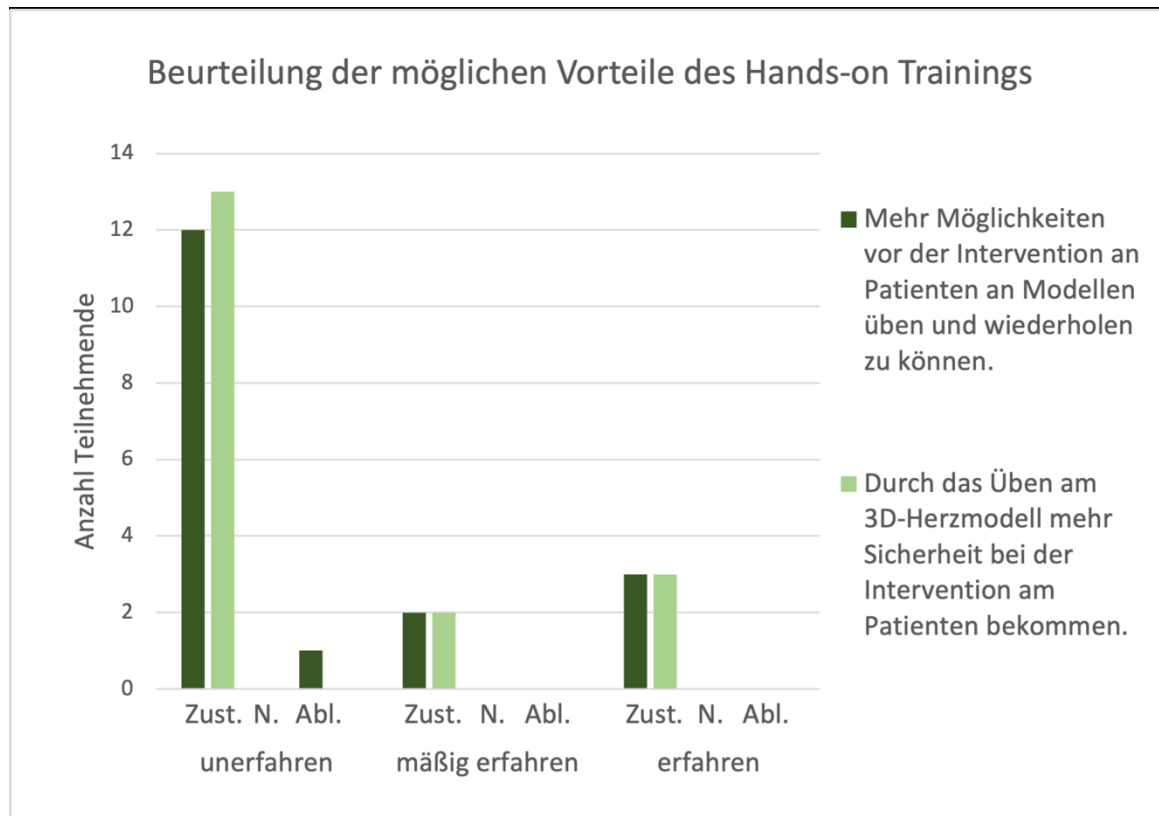


Abbildung 9: Beurteilung der möglichen Vorteile des Hands-on Trainings.

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

4. Diskussion

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5. Schlussfolgerung

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

Anmerkungen

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

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

Interessenkonflikt

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

Literatur

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

2. Kang SL, Benson L. Recent advances in cardiac catheterization for congenital heart disease. *F1000Research*. 2018;7(F1000 Faculty Rev):370. DOI: 10.12688/f1000research.13021.1
3. Kim SH. Recent advances in pediatric interventional cardiology. *Korean J Pediatr*. 2017;60(8):237-244. DOI: 10.3345/kjp.2017.60.8.237
4. Voelker W, Gauper FP. Simulatortraining in der inneren Medizin. In: St. Pierre M, Breuer G, editors. *Simulation in der Medizin*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2018. p.337-355. DOI: 10.1007/978-3-662-54566-9_24
5. Greif R, Lockey AS, Conaghan P, Lippert A, De Vries W, Monsieurs KG. Ausbildung und Implementierung der Reanimation. *Notfall Rettungsmed*. 2015;18(8):1016-1034. DOI: 10.1007/s10049-015-0092-y
6. van der Linde D, Konings EE, Slager MA, Witsenburg M, Helbing WA, Takkenberg JJ, Roos-Hesselink JW. Birth prevalence of congenital heart disease worldwide: a systematic review and meta-analysis. *J Am Coll Cardiol*. 2011;58(21):2241-2247. DOI: 10.1016/j.jacc.2011.08.025
7. Grab M, Hopfner C, Gesenhues A, König F, Haas NA, Hagl C, Curta A, Thierfelder N. Development and Evaluation of 3D-Printed Cardiovascular Phantoms for Interventional Planning and Training. *J Vis Exp*. 2021;(167):e62063. DOI: 10.3791/62063
8. Lopreiato JO, Sawyer T. Simulation-based medical education in pediatrics. *Acad Pediatr*. 2015;15(2):134-142. DOI: 10.1016/j.acap.2014.10.010
9. Ojha R, Liu A, Rai D, Nanan R. Review of simulation in pediatrics: the evolution of a revolution. *Front Pediatr*. 2015;3:106. DOI: 10.3389/fped.2015.00106
10. Bintley HL, Bell A, Ashworth R. Remember to breathe: teaching respiratory physiology in a clinical context using simulation. *Adv Physiol Educ*. 2019;43(1):76-81. DOI: 10.1152/advan.00148.2018
11. Rüsseler M, Weber R, Braunbeck A, Flaig W, Marzi I, Walcher F. Training praktischer Fertigkeiten in der Chirurgie-Ein Ausbildungskonzept für Studierende. *Zentralbl Chir*. 2010;135(03):249-256. DOI: 10.1055/s-0030-1247355
12. Nikendei C, Schilling T, Nawroth P, Hensel M, Ho A, Schwenger V, Zeier M, Herzog W, Schellberg D, Katus HA, Dengler T, Stremmel W, Müller M, Jünger J. Integriertes Skills-Lab-Konzept für die studentische Ausbildung in der Inneren Medizin [Integrated skills laboratory concept for undergraduate training in internal medicine]. *Dtsch Med Wochenschr*. 2005;130(18):1133-1138. DOI: 10.1055/s-2005-866799
13. Fichtner A. Lernen für die Praxis: Das Skills-Lab. In: St. Pierre M, Breuer G, editors. *Simulation in der Medizin*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013. p.105-114. DOI: 10.1007/978-3-642-29436-5_10
14. Vukicevic M, Mosadegh B, Min JK, Little SH. Cardiac 3D printing and its future directions. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2017;10(2):171-184. DOI: 10.1016/j.jcmg.2016.12.001
15. Su W, Xiao Y, He S, Huang P, Deng X. Three-dimensional printing models in congenital heart disease education for medical students: a controlled comparative study. *BMC Med Educ*. 2018;18(1):178. DOI: 10.1186/s12909-018-1293-0
16. Anwar S, Singh GK, Miller J, Sharma M, Manning P, Billadello JJ, Eghtesady P, Woodard PK. 3D Printing is a Transformative Technology in Congenital Heart Disease. *JACC Basic Transl Sci*. 2018;3(2):294-312. DOI: 10.1016/j.jacbs.2017.10.003
17. Randazzo M, Pisapia JM, Singh N, Thawani JP. 3D printing in neurosurgery: a systematic review. *Surg Neurol Int*. 2016;7(Suppl 33):S801-S809. DOI: 10.4103/2152-7806.194059
18. VanKoeveering KK, Hollister SJ, Green GE. Advances in 3-dimensional printing in otolaryngology: a review. *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg*. 2017;143(2):178-183. DOI: 10.1001/jamaoto.2016.3002
19. Papazarkadas X, Spartalis E, Patsouras D, Ioannidis A, Schizas D, Georgiou K, Dimitroulis D, Nikiteas N. The role of 3D printing in colorectal surgery: Current evidence and future perspectives. *In Vivo*. 2019;33(2):297-302. DOI: 10.21873/invivo.11475
20. Loke YH, Harahsheh AS, Krieger A, Olivieri LJ. Usage of 3D models of tetralogy of Fallot for medical education: impact on learning congenital heart disease. *BMC Med Educ*. 2017;17(1):1-8. DOI: 10.1186/s12909-017-0889-0
21. Biglino G, Capelli C, Leaver LK, Schievano S, Taylor AM, Wray J. Involving patients, families and medical staff in the evaluation of 3D printing models of congenital heart disease. *Commun Med*. 2016;12(2-3):157-169. DOI: 10.1558/cam.28455
22. Kiraly L, Tofeig M, Jha NK, Talo H. Three-dimensional printed prototypes refine the anatomy of post-modified Norwood-1 complex aortic arch obstruction and allow presurgical simulation of the repair. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*. 2016;22(2):238-240. DOI: 10.1093/icvts/ivv320
23. Batteux C, Haidar MA, Bonnet D. 3D-printed models for surgical planning in complex congenital heart diseases: a systematic review. *Front Pediatr*. 2019;7:23. DOI: 10.3389/fped.2019.00023
24. Hussein N, Honjo O, Barron DJ, Haller C, Coles JG, Yoo SJ. The incorporation of hands-on surgical training in a congenital heart surgery training curriculum. *Ann Thorac Surg*. 2020;S-0003-4975(20)32088-9.
25. Yoo SJ, Spray T, Austin III EH, Yun TJ, van Arsdell GS. Hands-on surgical training of congenital heart surgery using 3-dimensional print models. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2017;153(6):1530-1540. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2016.12.054
26. Nguyen D, Appelbaum J, Ali F, Shorofsky S, Dickfeld T, See V, Restrepo AJ. Three-Dimensional Printing in Cardiac Electrophysiology: Current Applications and Future Directions. *EPLabDigest*. 2021;21(5). Zugänglich unter/available from: <https://www.eplabdigest.com/three-dimensional-printing-cardiac-electrophysiology-current-applications-and-future-directions>
27. Heidebuchel H, Wittkamp FH, Vano E, Ernst S, Schilling R, Picano E, Mont L, Jais P, de Bono J, Pieorkowski C, Saad E, Femenia F. Practical ways to reduce radiation dose for patients and staff during device implantations and electrophysiological procedures. *Europace*. 2014;16(7):946-964. DOI: 10.1093/europace/eut409
28. Chambers CE, Awuor S. Reducing radiation dose: Equipment, procedure, and operator Perfecting the Trifecta. *Catheter Cardiovasc Interv*. 2018;92(7):1237-1238. DOI: 10.1002/ccd.28001
29. Katz A, Shtub A, Solomonica A, Poliakov A, Roguin A. Simulator training to minimize ionizing radiation exposure in the catheterization laboratory. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2017;33(3):303-310. DOI: 10.1007/s10554-016-1009-7
30. Ziv A, Wolpe PR, Small SD, Glick S. Simulation-Based Medical Education: An Ethical Imperative. *Acad Med*. 2003;78(8):783-788. DOI: 10.1097/00001888-200308000-00006
31. Burkhart HM. Simulation in congenital cardiac surgical education: We have arrived. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2017;153(6):1528-1529. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2017.03.012
32. Seymour NE, Gallagher AG, Roman SA, O'brien MK, Bansal VK, Andersen DK, Satava RM. Virtual reality training improves operating room performance: results of a randomized, double-blinded study. *Ann Surg*. 2002;236(4):458. DOI: 10.1097/00000658-200210000-00008

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

Korrespondenzadresse:

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

Bitte zitieren als

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

Artikel online frei zugänglich unter

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

Eingereicht: 02.05.2021

Überarbeitet: 05.10.2021

Angenommen: 24.01.2022

Veröffentlicht: 14.04.2022

Copyright

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