

Aus der Klinik für Allgemeine Pädiatrie und Neonatologie,

Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar

Direktor: Prof. Dr. med. Michael Zemlin

---

**Prospektive Analyse von simulationsbasiertem Ultraschalltraining  
in der fetalen Echokardiographie**

**Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin**

**der Medizinischen Fakultät**

der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

2024

vorgelegt von Paul Janzing

geboren am 2. Februar 1997 in Münster (Westfalen)

---

Tag der Promotion: 27. August 2024

Dekan: Prof. Dr. med. Michael D. Menger

Berichterstattende: Prof. Dr. med. Michael Zemlin

Prof. Dr. med. Johannes Jäger

Teilergebnisse dieser Arbeit wurden auf folgenden Kongressen vorgestellt:

- 31. ISUOG World Congress on Ultrasound in Obstetrics and Gynecology, online, 15. – 17. Oktober 2021  
**P. Janzing**, N. Nourkami-Tutdibi, E. Tutdibi, P. Freundt, M. Zemlin, T. von Ostrowski, M. Langer, J. Steinhard  
*High-end ultrasound simulation training in fetal echocardiography FESIM II: A prospective six-week trial with a virtual, randomly moving fetus*  
<https://doi.org/10.1002/uog.24308>
  
- 64. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Gynäkologie und Geburtshilfe e.V., München, 12. – 15. Oktober 2022  
J. Steinhard, P. Freundt, **P. Janzing**, E. Tutdibi, N. Nourkami-Tutdibi  
*Effizientes Simulator-Training in der Pränatalmedizin – Erfahrungen aus den FESIM-Studien*  
<https://doi.org/10.1055/s-0042-1757063>
  
- 31. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Perinatale Medizin, Berlin, 30. November – 2. Dezember 2023  
J. Steinhard, **P. Janzing**, P. Freundt, E. Tutdibi, N. Nourkami-Tutdibi  
*High End Simulator-Training in der Pränatalen Medizin – eine Chance für eine standardisierte Ausbildung*  
<https://doi.org/10.1055/s-0043-1776500>

Teilergebnisse dieser Arbeit wurden in folgenden Fachzeitschriften zur Publikation angenommen:

- **P. Janzing**, N. Nourkami-Tutdibi, E. Tutdibi, P. Freundt, T. von Ostrowski, M. Langer, M. Zemlin, J. Steinhard  
*Controlled prospective study on ultrasound simulation training in fetal echocardiography: FESIM II*  
Arch Gynecol Obstet (2023), Springer, <https://doi.org/10.1007/s00404-023-07133-2>
  
- J. Steinhard, P. Freundt, **P. Janzing**, V. Popov, R. Menkhaus, L. Ross  
*Künstliche Intelligenz und Simulation in der Pränatalmedizin – was wir von Maschinen lernen können*  
Gynäkologie 55, 746–758 (2022), Springer, <https://doi.org/10.1007/s00129-022-04996-5>



# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Zusammenfassung .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Abstract .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>3</b> | <b>Einleitung.....</b>  | <b>4</b>  |
| 3.1      | Angeborene Herzfehler und ihre pränatale Detektion – der Status quo in Deutschland .....  | 4         |
| 3.1.1    | Die pränatale Detektionsrate angeborener Herzfehler in Deutschland .....  | 5         |
| 3.2      | Richtlinien für die ärztliche Betreuung von Schwangeren in Deutschland .....  | 7         |
| 3.2.1    | Ultraschalluntersuchung im zweiten Trimenon nach Mutterschafts-Richtlinie 2A .....  | 7         |
| 3.2.2    | Ultraschalluntersuchung im zweiten Trimenon nach Mutterschafts-Richtlinie 2B .....  | 8         |
| 3.2.3    | Kontrolle der fachlichen Eignung zur Ultraschalldiagnostik .....  | 8         |
| 3.3      | Die Mutterschafts-Richtlinien im Vergleich zu den Qualitätsanforderungen der Deutschen<br>Gesellschaft für Ultraschall in der Medizin ..... | 9         |
| 3.4      | Die fetale Echokardiographie: Untersuchungsprotokolle, Standardebenen und ihre Implementation im<br>U/S Mentor.....                         | 11        |
| 3.4.1    | Die Transversalebene .....  | 11        |
| 3.4.2    | Die Sagittalebene.....  | 15        |
| 3.4.3    | Die Kurzachsenschnitte .....  | 18        |
| 3.5      | Simulation in der Medizin .....   | 20        |
| 3.5.1    | Simulationsbasiertes Training im gynäkologisch-geburtshilflichen Ultraschall.....   | 21        |
| 3.5.2    | Ultraschallsimulation als Verfahren der Kompetenztestung .....  | 22        |
| <b>4</b> | <b>Fragestellung und Zielsetzung.....</b>   | <b>25</b> |
| <b>5</b> | <b>Materialien und Methoden .....</b>   | <b>26</b> |
| 5.1      | Der Symbionix U/S Mentor.....   | 26        |
| 5.1.1    | Der Aufbau des Simulators.....  | 26        |
| 5.1.2    | Die Funktionsweise und Eigenschaften des Simulators .....   | 28        |
| 5.1.3    | Die Lernplattform zur fetalen Echokardiographie am U/S Mentor.....  | 29        |
| 5.2      | Studiendesign.....  | 37        |
| 5.3      | Akquise der Proband:innen.....  | 38        |
| 5.4      | Inklusionskriterien .....   | 38        |
| 5.5      | Datenerhebung .....   | 39        |
| 5.6      | Nachbewertung der eingestellten Standardebenen .....  | 40        |
| 5.7      | Verarbeitung der Daten und statistische Analyse .....   | 41        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>6</b> | <b>Ergebnisse</b> .....   | <b>42</b> |
| 6.1      | Zusammensetzung der Referenzgruppen .....   | 42        |
| 6.1.1    | Gruppe der Ärztinnen und Ärzte .....  | 42        |
| 6.1.2    | Gruppe der Expertinnen und Experten .....   | 42        |
| 6.2      | Vorerfahrung der Referenzgruppen – Auswertung der Fragebögen.....   | 43        |
| 6.3      | Rücklaufquote und Vollständigkeit der Daten.....  | 43        |
| 6.4      | Nachbewertung der vom Simulator als falsch klassifizierten Standardebenen .....   | 44        |
| 6.5      | Vergleich der Gruppen hinsichtlich der Rate korrekt eingestellter Ebenen.....   | 44        |
| 6.6      | Vergleich der Gruppen hinsichtlich der Gesamtuntersuchungszeit (TTC).....   | 45        |
| 6.7      | Vergleich der Gruppen hinsichtlich der Untersuchungszeit von Einzelebenen.....  | 47        |
| 6.8      | Vergleich der Gruppen hinsichtlich der Schwierigkeitseinschätzung der Ebenen .....  | 48        |
| 6.9      | Vergleich der Standardebenen hinsichtlich der Schwierigkeitseinschätzung.....   | 49        |
| 6.10     | Vergleich der Standardebenen hinsichtlich ihrer korrekten Darstellung.....  | 49        |
| 6.11     | Vergleich der Standardebenen hinsichtlich ihrer Untersuchungszeit .....   | 50        |
| 6.12     | Korrelation von empfundener Schwierigkeit und Geschwindigkeit der Ebenendarstellung.....  | 52        |
| <b>7</b> | <b>Diskussion</b> .....   | <b>53</b> |
| 7.1      | Zentrale Resultate der Studie .....   | 53        |
| 7.2      | Gründe der niedrigen pränatalen Detektionsrate angeborener Herzfehler in Deutschland .....  | 54        |
| 7.2.1    | Kritische Reflexion der Mutterschaftsrichtlinien im Kontext der niedrigen pränatalen<br>Erkennungsrate angeborener Herzfehler .....                             | 56        |
| 7.3      | Möglichkeiten zur Verbesserung der pränatalen Detektionsrate angeborener Herzfehler .....   | 58        |
| 7.4      | Übertragbarkeit der Studiendaten aus der simulationsbasierten Testung in den realen Ultraschall.....  | 59        |
| 7.4.1    | Die Implementation von pathologischen Befunden in simulationsbasiertes Ultraschalltraining.....   | 61        |
| 7.5      | Das Messen der Untersuchungszeit – ein valider Parameter zur Quantifizierung von<br>Ultraschallkompetenz? .....   | 62        |
| 7.6      | Vorteile von simulationsbasiertem Ultraschalltraining und des während der Studie genutzten<br>Ultraschallsimulators.....  | 63        |
| 7.7      | Reproduzierbarkeit des Trainingsprogrammes und zukünftige Möglichkeiten für die<br>simulationsbasierte Ultraschallausbildung.....                               | 64        |
| 7.8      | Literaturüberblick - bisherige Evidenz für simulationsbasiertes Ultraschalltraining in der Gynäkologie<br>und Geburtshilfe.....                                 | 65        |
| 7.9      | Zukünftige Ausbildung in der fetalen Echokardiographie: Simulationsbasierte, Peer-Teaching-basierte<br>und konventionelle Trainingsverfahren im Vergleich ..... | 67        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 7.10      | Schwierigkeitslevel von Standardebenen .....                      | 68         |
| 7.11      | Schwächen und Limitationen des Ultraschallsimulators .....        | 70         |
| 7.11.1    | Bewertung der Standardebenen durch den Simulator .....            | 70         |
| 7.11.2    | Abweichungen der Simulationsumgebung von realem Ultraschall ..... | 71         |
| 7.12      | Limitationen der Studie.....                                      | 73         |
| 7.12.1    | Validität der simulationsbasierten Testung.....                   | 73         |
| 7.12.2    | Stichprobengröße .....  | 73         |
| 7.12.3    | Fetale Position.....  | 73         |
| 7.12.4    | „Glückstreffer“ bei den Prüfungen.....                            | 75         |
| 7.12.5    | Einfluss von Systole und Diastole beim Einfrieren des Bildes..... | 76         |
| 7.13      | Fazit und Ausblick .....  | 79         |
| <b>8</b>  | <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>                                | <b>80</b>  |
| <b>9</b>  | <b>Tabellenverzeichnis .....</b>                                  | <b>82</b>  |
| <b>10</b> | <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>                                | <b>83</b>  |
| <b>11</b> | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                                 | <b>85</b>  |
| <b>12</b> | <b>Anhänge .....</b>  | <b>99</b>  |
| <b>13</b> | <b>Publikationen .....</b>  | <b>101</b> |
| <b>14</b> | <b>Danksagung .....</b>   | <b>102</b> |
| <b>15</b> | <b>Lebenslauf .....</b>   | <b>103</b> |



# 1 Zusammenfassung

**Hintergrund und Fragestellung:** Weltweit werden ungefähr 1% aller Kinder mit einem angeborenen Herzfehler geboren. Die frühzeitige pränatale Erkennung dieser Defekte ist von entscheidender Bedeutung, um eine adäquate Behandlung zum Geburtszeitpunkt zu gewährleisten. In Deutschland wird trotz deutlich verbesserter technischer Möglichkeiten jedoch nur ein geringer Anteil (etwa 12% bis 33%) der angeborenen Herzfehler pränatal erkannt. Bis dato existiert keine standardisierte sonographische Ausbildung für Gynäkolog:innen in der Facharztweiterbildung. Dies resultiert in einem strukturellen Mangel an sonographischer Ausbildung. Simulationsbasiertes Ultraschalltraining bietet die Möglichkeit zu einer strukturierten, planbaren Ausbildung mit repetitiven Einheiten, da es patient:innenunabhängig durchführbar ist. Bis dato existieren keine Studien darüber, inwieweit sich die fetale Echokardiografie durch simulationsbasiertes Ultraschalltraining erlernen lässt. Ziel der Studie ist es, die Lernkurven von Ultraschall-Neulingen im Erlernen der fetalen Echokardiografie mittels eines strukturierten simulationsbasierten Ultraschalltrainings und einem sich zufällig bewegenden, virtuellen Fetus zu analysieren.

**Methodik:** Als Interventionsgruppe nahmen 11 Medizinstudierende mit minimaler (<10h) Vorerfahrung im gynäkologisch-geburtshilflichen Ultraschall an einem sechswöchigen Ultraschalltraining teil. Das Training bestand aus insgesamt 12 Stunden simulationsbasiertem, praktischen „hands-on“-Einzeltraining zur fetalen Echokardiographie. Der Lernfortschritt wurde anhand standardisierter Tests nach 2, 4 und 6 Wochen Trainingszeit untersucht. Die Teilnehmenden wurden dabei aufgefordert, die 11 Standardebenen der fetalen Echokardiographie (gemäß Leitlinien der American Heart Association sowie der International Society of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology) so schnell wie möglich korrekt einzustellen. Alle Tests wurden simulationsbasiert unter realistischen Untersuchungsbedingungen an einem gesunden, sich zufällig bewegenden virtuellen Fetus durchgeführt. Anschließend wurde die Rate der korrekt eingestellten Standardebenen sowie die zum Einstellen der Standardebenen benötigte Zeit erhoben und ausgewertet. Zwei Gruppen dienten als Referenzgruppen zur Interventionsgruppe und wurden mit denselben standardisierten Tests untersucht: (1) zehn Gynäkolog:innen mit im Median 750 zuvor durchgeführten gynäkologisch-geburtshilflichen Ultraschalluntersuchungen und (2) zehn Expert:innen für Pränataldiagnostik mit im Median 15.000 zuvor durchgeführten gynäkologisch-geburtshilflichen Ultraschalluntersuchungen sowie DEGUM-Zertifizierung mindestens auf Stufe II.

**Ergebnisse:** Die Interventionsgruppe zeigte eine stetige Verbesserung ihrer Ultraschall-Fertigkeiten in der fetalen Echokardiografie während des Trainingszeitraumes. Nach zwei Wochen war die Interventionsgruppe in der Lage, mehr als 95% der Standardebenen der fetalen Echokardiographie korrekt einzustellen. Nach sechs Wochen Training war die Interventionsgruppe signifikant schneller als

Referenzgruppe (1), die Ärzt:innengruppe ( $p < 0,001$ ), und zeigte keinen signifikanten Unterschied zur Referenzgruppe (2), der Expert:innengruppe ( $p = 0,944$ ).

**Schlussfolgerungen:** Simulationsbasiertes Ultraschalltraining ist eine effektive Methode zum Erlernen fortgeschrittener sonographischer Fertigkeiten wie der fetalen Echokardiographie. Hinsichtlich des Erlernens der AHA-/ISUOG-Standardebenen der fetalen Echokardiographie (ohne klinische Bewertung) waren die Studierenden am Simulator dazu in der Lage, sich innerhalb von sechs Wochen dem Kompetenzniveau der Expert:innengruppe anzunähern.

## 2 Abstract

**Background:** Approximately 1% of all children are born with a congenital heart defect (CHD). Early detection of heart defects is crucial to ensure adequate postnatal treatment. In Germany, only a minority of CHD are detected prenatally despite improved technical possibilities. Simulation-based ultrasound training (SIM-UT) is a promising option to train the sonographic skills of healthcare providers. To date, it has not been analyzed to which extent fetal echocardiography, as an advanced ultrasound skill, can be learned through simulation-based training approaches. We analyzed the learning curves of ultrasound novices in fetal echocardiography during structured simulation-based ultrasound training with a virtual, randomly moving fetus.

**Methods:** 11 medical students with minimal (<10 h) prior experience in gynecologic-obstetric ultrasound participated in a six-week training program consisting of a total of 12 hours of simulation-based individual hands-on training in fetal echocardiography. Their learning progress was assessed using standardized tests after 2, 4, and 6 weeks of training. The participants were asked to obtain all 11 standard planes of fetal echocardiography (according to the guidelines of the American Heart Association and the International Society of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology) as quickly as possible. All tests were simulation-based and performed under realistic examination conditions on a healthy, randomly moving virtual fetus. Subsequently, we analyzed the rate of correctly obtained standard planes and the timespan needed to obtain the standard planes. Two reference groups were selected and performed the same standardized tests: (1) ten gynecologists/obstetricians with a median of 750 previously performed gynecologic-obstetric ultrasound scans and (2) ten experts in prenatal diagnostics with a median of 15,000 previously performed gynecologic-obstetric ultrasound scans.

**Results:** The students showed steady stepwise improvement in their ultrasound performance during the training program. After 2 weeks, they were able to obtain more than 95% of the standard planes correctly. After 6 weeks, they were significantly faster at this than reference group (1), the physician group ( $p < 0.001$ ), and were no longer significantly slower than reference group (2), the expert group ( $p = 0.944$ ).

**Conclusions:** Simulation-based ultrasound training is effective for learning fetal echocardiography. Regarding the acquisition of the AHA/ISUOG standard planes of fetal echocardiography on an ultrasound simulator (without clinical assessment), the students were able to approach the competence level of experienced experts in prenatal diagnostics within six weeks.

## **3 Einleitung**

### **3.1 Angeborene Herzfehler und ihre pränatale Detektion – der Status quo in Deutschland**

Angeborene Herzfehler sind die häufigste angeborene Fehlbildung und treten mit einer Prävalenz von ungefähr 0,8% bis 1% aller lebendgeborenen Kinder auf [81]. Eine pränatale Erkennung von Herzfehlern ist in Abhängigkeit des Herzfehlers wichtig für die peri- und insbesondere postnatale Versorgung des Kindes, sie kann postnatal lebensrettend sein. [42]. Für eine Reihe komplexer bzw. kritischer Herzfehler wie zum Beispiel das hypoplastische Linksherzsyndrom (HLHS), die Transposition der großen Arterien und die Aortenisthmusstenose wurde eine Reduktion der kindlichen Mortalität und Morbidität durch pränatale Diagnosestellung nachgewiesen [20,53,56,83,88]. Insbesondere die Häufigkeit von metabolischer Azidose, Beatmungspflichtigkeit, renaler Dysfunktion oder präoperativer Herzinsuffizienz kann durch eine pränatale Diagnosestellung deutlich gesenkt werden [28,56,121,135]. Für die Transposition der großen Arterien und das hypoplastische Linksherzsyndrom wurde darüber hinaus auch eine Verbesserung der neurokognitiven Entwicklung gezeigt [24,83].

Für eine Reduktion der kindlichen Morbidität oder Mortalität durch die pränatale Detektion anderer Herzfehlbildungen, wie zum Beispiel eines atrioventrikulären Septumdefektes, gibt es derzeit keine Evidenz. Einige der vorliegenden Studien unterliegen allerdings einem Selektionsbias: Morbidität und Mortalität von pränatal und postnatal diagnostizierten Kindern mit angeborenen Herzfehlern wird in vielen Studien direkt miteinander verglichen. Prä- und postnatal diagnostizierte Herzfehler unterscheiden sich allerdings insofern, als dass pränatal diagnostizierte Herzfehler im Durchschnitt einen höheren Schweregrad haben als erst postnatal erkannte [64]. Dies liegt darin begründet, dass mit höherem Komplexitätsgrad der Fehlbildungen in der Regel auch eine höhere pränatale Detektionsrate einhergeht. Prinzipiell erscheint es sinnvoll, dass auch nicht-kritische angeborene Herzfehler möglichst frühzeitig erkannt werden, um eine frühzeitige kinderherzchirurgische Überwachung zu ermöglichen.

Die pränatale Diagnosestellung eines angeborenen Herzfehlers ermöglicht den Schwangeren die geplante Entbindung des Kindes in einem spezialisierten Level-1-Perinatalzentrum mit direkter Anbindung an eine neonatologische Intensivstation mit kinderherzchirurgischer und kinderherzchirurgischer Versorgung. Dadurch sind alle notwendigen Interventions- und Therapieoptionen postnatal verfügbar, eine lückenlose und adäquate Erstversorgung der Kinder ist gewährleistet [50,104]. Morris et al. untersuchten in einer großen populationsbasierten Studie die Mortalität von Kindern mit HLHS je nach Fahrtzeit zwischen Geburtsort und der nächsten kinderherzchirurgischen Interventionsmöglichkeit [88]. Hier zeigte sich, dass bei einer Fahrtzeit von unter 10 Minuten die neonatale Gesamtmortalität nur halb so hoch war wie bei einer Fahrtzeit von über 90 Minuten. Letzteres zeigt die Wichtigkeit einer pränatalen Diagnose und somit die Planung der Geburt in einem Krankenhaus der höchsten Versorgungsstufe. Viele Studien, in denen kein Vorteil durch eine pränatale

Diagnosestellung gezeigt werden konnte, unterliegen am ehesten einem Survivorship Bias, d.h. die kränksten Kinder versterben bereits vor dem Erreichen des nächsten Zentrums, und tauchen demnach als Verstorbene in der Analyse der Studien nicht auf [64]. Die Auswahl des kinderherzchirurgischen Zentrums hat ebenfalls Auswirkungen auf die Mortalität, denn die Fallzahl von Zentren korreliert invers mit der Mortalität [31,118]. So lag die 28-Tage-Mortalität von pränatal diagnostizierten Kindern mit HLHS, welche in Folge der pränatalen Diagnosestellung weniger als zehn Minuten entfernt von einem kinderherzchirurgischen Zentrum mit hoher Fallzahl geboren und behandelt wurden, in der Studie von Morris et al. bei nur 6,3% [88]. Im Falle einer postnatalen Diagnose mit Geburt mehr als zehn Minuten entfernt von einem chirurgischen Zentrum, das eine niedrige HLHS-Fallzahl hatte, lag die Mortalität bei 28,9%. Die Ergebnisse von Morris et al. sind kongruent mit der Meta-Analyse von Holland et al., welche eine knapp 4-fache Mortalitätsreduktion für Kinder mit kritischen angeborenen Herzfehlern durch die pränatale Diagnosestellung errechnete [64].

Bei einer pränatalen Diagnosestellung von angeborenen Herzfehlern wird den Eltern schon in der Schwangerschaft ermöglicht, sich mit dem Bestehen eines Herzfehlers bei ihrem Kind inklusive der jeweiligen therapeutischen Möglichkeiten und der Prognose auseinanderzusetzen. Für die werdenden Eltern ist dies eine sehr belastende Situation, die sich allerdings auch positiv auf ihre psychologische Situation auswirken und langfristig eine engere Eltern-Kind-Beziehung fördern kann [51,101]. Außerdem kann durch die pränatale Diagnosestellung bei infauster Prognose des Fetus den werdenden Eltern die Entscheidung zu einem Schwangerschaftsabbruch ermöglicht werden. Mit der Schwere des Herzfehlers sowie mit dem Vorhandensein weiterer assoziierter Fehlbildungen oder genetischen Anomalien nimmt die Rate der Schwangerschaftsabbrüche zu. Nicht zuletzt auch in Abhängigkeit der rechtlichen Rahmenbedingungen sind die Abbruchraten international verschieden. In einigen Ländern entscheidet sich der überwiegende Teil der Schwangeren auch bei komplexen Herzfehlern für eine Fortführung der Schwangerschaft [49,74,87,129].

Gelegentlich ermöglicht die pränatale Diagnose bereits intrauterin die Initiation einer Therapie: Sowohl kritische Aortenklappenstenosen als auch Pulmonalklappenstenosen oder -atresien können prinzipiell intrauterin fetalchirurgischen Therapiemöglichkeiten wie zum Beispiel einer Ballondilatation zugeführt werden. Der erste erfolgreiche Eingriff dieser Art wurde im Jahr 2000 am Kinderherzzentrum in Linz durchgeführt [9,130,131]. Hierdurch kann die Entwicklung der Erkrankung beeinflusst und ein potenzieller Progress der Erkrankung in einen univentrikulären Verlauf verhindert werden. In zwei Dritteln der erfolgreichen Interventionen wird auf diesem Wege eine biventrikuläre Zirkulation ermöglicht [10,132].

### **3.1.1 Die pränatale Detektionsrate angeborener Herzfehler in Deutschland**

Obwohl sich die technischen Möglichkeiten der sonographischen Pränataldiagnostik in den vergangenen Jahrzehnten besonders in Hinblick auf die Bildqualität deutlich verbessert haben, ist die pränatale Detektionsrate angeborener Herzfehler in Deutschland noch immer niedrig: Nur 12% aller

Herzfehler werden hierzulande pränatal erkannt [81,110]. Dies war das Ergebnis der ersten und einzigen landesweiten Registerstudie zur Prävalenz angeborener Herzfehler in Deutschland, der PAN-Studie, die 2010 veröffentlicht wurde [81]. Auch bei den komplexen Herzfehlern, welche am meisten von einer pränatalen Diagnosestellung profitieren, war die Detektionsrate mit 41% unzufriedenstellend niedrig. In der zeitlichen Entwicklung der Detektionsrate scheint es dabei keinen positiven Trend zu geben: Das Institut für Qualität und Wirtschaftlichkeit im Gesundheitswesen (IQWiG) resümierte in einem Bericht zur Testgüte des Ultraschallscreenings in der Schwangerschaft im Jahre 2008: „Die Teilnehmer der Erörterung waren einig darüber, dass sich die Detektionsraten des deutschen Screeningprogramms in den vergangenen 10 Jahren nur unwesentlich verbessert haben“ [68]. Bekräftigt wird diese Einschätzung durch Daten des International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research (ICBDSR), diesen zu Folge blieb die pränatale Detektionsrate von kritischen kardialen Fehlbildungen (critical congenital heart disease, CCHD) in Sachsen-Anhalt zwischen 2001 und 2012 konstant bei etwa 40%, kongruent mit den Zahlen der PAN-Studie [14]. Auch Schmand et al. (2022) zeigten in einer retrospektiven Analyse von Daten der Geschäftsstelle für Qualitätssicherung in Hessen, dass die Einführung des erweiterten Basisultraschalls (Mutterschaftsrichtlinien IIB) im Jahr 2013 keine Verbesserung der pränatalen Detektionsrate bewirkt hat. So wurden in Hessen im Zeitraum zwischen 2013 und 2016 weiterhin nur knapp 33% aller angeborenen Herzfehler pränatal diagnostiziert [107].

Simulationsbasiertes Ultraschalltraining stellt eine neue und vielversprechende Möglichkeit dar, sonographische Fähigkeiten zu trainieren und verbessern [89]. Für viele Anwendungsbereiche, unter anderem für die transthorakale und transösophageale Echokardiographie sowie für den gynäkologischen Ultraschall, wurde bereits nachgewiesen, dass simulationsbasiertes Training die klinische Performance, Schnelligkeit und diagnostische Genauigkeit der Lernenden verbessern kann [18,54,89,100,119,136]. Für die fetale Echokardiographie liegen noch keine Daten vor, die ihre Erlernbarkeit mittels simulationsbasiertem Training untersuchen. In unserer Studie wollen wir daher erste Anhaltspunkte sammeln, inwiefern sich systematisiertes, simulationsbasiertes Ultraschalltraining zum Erlernen der fetalen Echokardiographie eignen könnte. Wir analysierten die Lernkurven von 11 Medizinstudierenden während eines sechswöchigen Trainingszeitraumes an einem Ultraschallsimulator. Als Referenzgruppe analysierten wir die sonographischen Fertigkeiten von 10 erfahrenen Pränataldiagnostiker:innen (alle mindestens zertifiziert nach DEGUM-Stufe II) sowie 10 Ärzt:innen aus der Abteilung der Gynäkologie und Geburtshilfe eines Level-1-Perinatalzentrums.

### **3.2 Richtlinien für die ärztliche Betreuung von Schwangeren in Deutschland**

Die Richtlinien für die ärztliche Betreuung von Frauen während der Schwangerschaft und nach der Entbindung werden durch die Mutterschafts-Richtlinien (MuRL) des Gemeinsamen Bundesausschusses festgelegt [57]. Grundsätzlich sollen dabei „mögliche Gefahren für Leben und Gesundheit von Mutter oder Kind abgewendet sowie Gesundheitsstörungen rechtzeitig erkannt und der Behandlung zugeführt werden“ [57]. Auch der Umfang und Zeitpunkt der angebotenen Leistungen, insbesondere auch von Ultraschalluntersuchungen, wird hier geregelt.

Allgemein wird allen Schwangeren ein Ultraschall-Basisscreening zu drei Zeitpunkten in der Schwangerschaft (8+0 bis 11+6 SSW, 18+0 bis 21+6 SSW sowie 28+0 bis 31+6 SSW) angeboten. Vor Durchführung der ersten Untersuchung soll dabei über „Ziele, Inhalte und Grenzen sowie mögliche Folgen der Untersuchung“ aufgeklärt werden. Im Anschluss daran können Schwangere für das Ultraschallscreening im zweiten Trimenon zwischen zwei verschiedenen Versorgungsstufen wählen:

- a) einer ausschließlich biometrischen Untersuchung des Fetus ohne systematische Untersuchung (MuRL 2A)
- b) einer biometrischen Untersuchung mit zusätzlicher „systematischer Untersuchung der fetalen Morphologie durch einen besonders qualifizierten Untersucher“ (MuRL 2B).

Auch die nähere Spezifikation dieser Untersuchungen ist in den Mutterschafts-Richtlinien geregelt. Diese wird im Folgenden näher erläutert.

#### **3.2.1 Ultraschalluntersuchung im zweiten Trimenon nach Mutterschafts-Richtlinie 2A**

Bei einem Zweittrimesterschall nach Mutterschafts-Richtlinie 2A soll der Untersuchende beurteilen

- ob eine Einlingsschwangerschaft vorliegt oder nicht,
- ob eine Herzaktion nachweisbar ist,
- ob es Hinweiszeichen für Entwicklungsstörungen hinsichtlich der Fruchtwassermenge, körperlichen Entwicklung oder Plazentalokalisation und -struktur gibt sowie
- ob die biometrische Entwicklung des Fetus zeitgerecht ist oder nicht.

Die biometrische Entwicklung des Fetus soll dabei durch Messung des biparietalen Durchmessers, des fronto-okzipitalen Durchmessers oder Kopfumfangs, der Femurlänge und des Abdomen-/Thorax-Umfangs beurteilt werden. Vier dieser Messparameter sowie „kontrollbedürftige Befunde“ müssen dokumentiert werden. Nach fetalen Fehlbildungen muss bei der Untersuchung nicht gesucht werden. Dies entspricht dem Recht auf Nichtwissen. Über mögliche Folgen einer Nicht-Erkennung, beispielsweise bei nicht erkannten Herzfehlern (z.B. TGA), muss nicht expliziert aufgeklärt werden.

### **3.2.2 Ultraschalluntersuchung im zweiten Trimenon nach Mutterschafts-Richtlinie 2B**

Zusätzlich zu den in der Mutterschafts-Richtlinie 2A vorgegebenen Untersuchungsinhalten sollen hier einige fetale Strukturen systematisch morphologisch beurteilt werden:

- Kopf: Gibt es Auffälligkeiten der Kopfform oder der Hirnventrikel, ist das Kleinhirn darstellbar?
- Hals und Rücken: Gibt es „Unregelmäßigkeiten der dorsalen Hautkontur“?
- Thorax: Gibt es - rein blickdiagnostisch - eine auffällige Herz/Thorax-Relation? Ist die Herzposition linksseitig? Liegt eine persistierende Arrhythmie während des Untersuchungszeitraumes vor? Ist der Vier-Kammer-Blick darstellbar?
- Rumpf: Gibt es Konturunterbrechungen der vorderen Bauchwand? Ist der Magen im linken Oberbauch darstellbar? Ist eine Harnblase darstellbar? [57]

Auffälligkeiten in der Untersuchung müssen medikolegal mit Bild dokumentiert werden. Allerdings beinhalten die Mutterschaftsrichtlinien nicht, dass der Vierkammerblick von den Untersuchenden als normal oder auffällig beurteilt werden muss. Es muss explizit lediglich die Darstellbarkeit des Vierkammerblickes beurteilt werden. Eine Beurteilung der Ausflusstrakte (rechter und/oder linksventrikulärer Ausflusstrakt) ist ebenfalls nicht gefordert. Eine Verpflichtung zur Dokumentation des Vierkammerblickes oder anderer kardialer Standardebenen besteht somit nicht.

### **3.2.3 Kontrolle der fachlichen Eignung zur Ultraschalldiagnostik**

Bei einem Schwangerschaftsscreening gemäß der Mutterschaftsrichtlinien ist die Kontrolle der fachlichen Eignung der Untersuchenden in der Ultraschall-Vereinbarung der Kassenärztlichen Bundesvereinigung (KBV) geregelt [57,73].

Die Untersuchenden müssen gemäß Ultraschall-Vereinbarung mindestens „300 B-Modus-Sonographien der utero-plazento-fetalen Einheit“ unter Anleitung eines „in der Ultraschalldiagnostik qualifizierten Arztes“ durchgeführt haben sowie die Facharztprüfung bestanden haben. Anstelle der Facharztprüfung kann die Befähigung auch durch eine „ständige Tätigkeit“ oder über die erfolgreiche Teilnahme an Ultraschallkursen nachgewiesen werden.

Um eine Untersuchung nach MuRL 2B durchführen zu dürfen, muss zusätzlich ein „Befähigungsnachweis“ bei der kassenärztlichen Vereinigung in Form eines kurzen online-Tests erbracht werden [73]. Eine verpflichtende Basisausbildung, jährliche Mindestanzahl durchgeführter Untersuchungen oder regelmäßig stattfindende Kompetenzüberprüfungen sind bisher nicht vorgesehen. Es finden jedoch stichprobenartige Kontrollen statt, bei denen jährlich 6% aller Genehmigungsinhaber hinsichtlich der Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit der Dokumentation überprüft werden. Da bei Untersuchungen gemäß MuRL 2A und 2B aber lediglich die Biometrie verpflichtend dokumentiert werden muss, wird an dieser Stelle auch nur die Dokumentation der Biometrie überprüft.

### **3.3 Die Mutterschafts-Richtlinien im Vergleich zu den Qualitätsanforderungen der Deutschen Gesellschaft für Ultraschall in der Medizin**

Die Deutsche Gesellschaft für Ultraschall in der Medizin (DEGUM) forderte im Jahre 2016 in einer Pressemitteilung die Aufnahme der „Feindiagnostik“ in die Mutterschafts-Richtlinien, um auf diesem Wege die Qualität des Schwangerschaftsscreenings zu verbessern [39]. Eine sonographische Feindiagnostik wird von der DEGUM definiert als eine „weiterführende differenzierte Ultraschalluntersuchung in der pränatalen Diagnostik“, der Untersuchende sollte hierbei im DEGUM-Stufensystem mindestens nach Stufe II zertifiziert sein [85]. Aktuell wird eine solche Feindiagnostik laut Mutterschafts-Richtlinien lediglich bei spezifischen Risikokonstellationen in der Schwangerschaft als Kassenleistung übernommen, darunter u.a.

- „Rezidivierende oder persistierende uterine Blutung“,
- „Gestörte intrauterine Frühschwangerschaft“, „Frühschwangerschaft bei liegendem IUP“, „Uterus myomatosus“, „Adnextumor“ oder
- „vorzeitiger Blasensprung“, „vorzeitige Wehentätigkeit“ oder „Plazentalösung“ [57].

Außerdem besteht die Indikation zur gezielten Ausschlussdiagnostik bei einem erhöhten Risiko für Fehlbildungen oder Erkrankungen des Fetus aufgrund von konkreten sonographischen Hinweisen, laborchemischen Befunden, gehäuften genetischen Erkrankungen in der Familie oder Exposition zu teratogenen Noxen [57].

An die thorakale und kardiale sonographische Untersuchung des Fetus im Rahmen einer Feindiagnostik werden dabei folgende Mindestanforderungen von der DEGUM gestellt [85]:

- sonoanatomische Beurteilung der Lungenstruktur
- Überprüfung von Herzfrequenz und Herzrhythmus
- Qualitative Einschätzung von Größe, Form und Position des Herzens
- Beurteilung des Vierkammerblicks
- Beurteilung der links- und rechtsventrikulären Ausflusstrakte
- Beurteilung der Kuppelkontur der Zwerchfelle im Sagittalschnitt.

Der Vierkammerblick, die links- und rechtsventrikulären Ausflusstrakte sowie das Zwerchfell im Sagittal- oder Frontalschnitt müssen dabei medikolegal mit Bildnachweis dokumentiert werden. Die erreichbare Detektionsrate fetaler Herzfehlbildungen ist in diesem Untersuchungsprotokoll höher als bei einer Untersuchung gemäß Mutterschaftsrichtlinie 2B, vor allem da auf dieser diagnostischen Stufe sowohl der Vierkammerblick als auch die Ausflusstrakte verpflichtend beurteilt und dokumentiert werden müssen.

Noch striktere Qualitätsanforderungen der thorakalen und kardialen Untersuchung eines Fetus werden von der DEGUM im Rahmen einer fetalen Echokardiographie gestellt. Systematisch sollen hier [30]:

- der Situs solitus durch Darstellung und Untersuchung der abdominalen Organe sowie der großen Gefäße (abdominale Aorta, Vena cava inferior, Ductus venosus) bestätigt werden,
- die intra- sowie extrakardialen Blutflüsse dopplersonographisch dargestellt und in Hinblick z.B. auf Klappendefekte, -stenosierungen und adäquate kraniale Perfusion untersucht werden,
- die Position, Achse und Größe des Herzens sowie die Morphologie der Herzhöhlen, der Klappen, des Herzkreuzes und des Ventrikelseptums überprüft werden,
- die veno-atrialen, atrio-ventrikulären sowie ventrikulo-arteriellen Konnektionen sowohl im B-Bild als auch im Farbdoppler - bei auffälligen Blutflussmustern auch im Spektraldoppler - überprüft werden,
- die Abgänge der großen Arterien, der aortale und duktales Bogen sowie der Truncus pulmonalis inklusive seiner Verzweigung als Ganzes dargestellt werden,
- ggf. mit Hilfe der M-Mode-Sonographie nach Rhythmusstörungen gesucht, die Herzfrequenz determiniert und die Ventrikelfunktion überprüft werden [30].

Standardmäßig dokumentiert werden sollen dabei der Querschnitt des oberen Abdomens im B-Bild sowie der Vierkammerblick, die links- und rechtsventrikulären Ausflusstrakte, Ductus arteriosus und Aortenbogen - alle jeweils sowohl als B-Bild, als auch mit Farbdoppler. Nach Möglichkeit soll zusätzlich die Einmündung mindestens einer Pulmonalvene in den linken Vorhof mittels Farbdoppler dokumentiert werden.

Bei strikter Einhaltung dieses Untersuchungsprotokolls können über 90% aller angeborenen Herzfehler pränatal korrekt diagnostiziert werden [109]. Schwachstellen sind dabei beispielsweise kleinere Ventrikelseptumdefekte oder kleine atriale Septumdefekte vom Secundum-Typ, welche vom physiologischen Foramen ovale nur schwierig abgrenzbar sein können.

Die Indikationen zur Durchführung einer fetalen Echokardiographie laut DEGUM-Empfehlungen [30] gliedern sich hierbei in vier Hauptgruppen:

- Anamnestische Indikationen (u.a. mütterlicher, väterlicher oder geschwisterlicher angeborener Herzfehler oder maternale prädisponierende Erkrankungen wie z.B. ein systemischer Lupus erythematoses)
- Nachgewiesene Auffälligkeiten beim Fetus (u.a. suspekter Vierkammerblick, Arrhythmien)
- Risikokonstellation z.B. bei auffälligen Befunden im ersten Trimester, verdickter Nackentransparenz oder fortgeschrittenem maternalen Alter mit Verzicht auf invasive Diagnostik zur Karyotypisierung wegen eines erhöhten Eingriffsrisikos
- Funktionelle Untersuchung bei Vorliegen oder Verdacht auf fetale Erkrankungen (u.a. Arrhythmien, Volumenbelastung bei Anämie, arterio-venöse Fisteln oder feto-fetales Transfusionssyndrom)

### **3.4 Die fetale Echokardiographie: Untersuchungsprotokolle, Standardebenen und ihre Implementation im U/S Mentor**

Für die fetale Echokardiographie wurden von verschiedenen nationalen und internationalen Fachgesellschaften mehrere Untersuchungsprotokolle definiert. Unter anderem existieren Protokolle der American Heart Association [41], des American Institute for Ultrasound in Medicine [5], der American Society of Echocardiography [103] oder der Deutschen Gesellschaft für Ultraschall in der Medizin [30]. Der Symbionix U/S Mentor arbeitet mit den Standardebenen nach Definition der International Society for Ultrasound in Obstetrics and Gynecology (ISUOG), der American Heart Association (AHA) und der Fetal Echo Task Force (siehe Abschnitt 5.1.3). Zusätzlich wurde dem Protokoll des fetalen Echo-Trainingsprogramms noch die Standardebene eines hohen abdominellen Transversalschnittes und einer alternativen Variante des Dreigeäßblickes hinzugefügt.

#### **3.4.1 Die Transversalebene**

Bevor die systematische Untersuchung des fetalen Herzens begonnen wird, sollte mit einem hohen Abdomen-Transversalschnitt die regelrechte Lage der Organe im Sinne eines Situs solitus überprüft werden. Die links gelegene Magenblase, links prävertebral gelegene Aorta descendens und rechts ventral der Aorta gelegene Vena cava inferior werden dokumentiert. Durch einen leichten Schwenk oder eine Parallelverschiebung des Schallkopfes nach kranial lässt sich anschließend der Vierkammerblick darstellen. Eine schematische Darstellung der transversalen Standardebenen findet sich in Abbildung 1 [7].

Im Vierkammerblick (4CV) lässt sich die Größe und Position des Herzens sowie die Relation der vier Herzhöhlen zueinander gut beurteilen. Bei einem Normalbefund kann mithilfe der farbkodierten Duplexsonographie eine laminare, nicht turbulente und seitengleiche ventrikuläre Füllung sowie die regelgerechte Mündung der Lungenvenen in das linke Atrium nachgewiesen werden. Auch der physiologische Rechts-Links-Shunt im Foramen ovale ist hier darstellbar. Darüber hinaus kann die atrioventrikuläre Konnektion sowie die regelrechte Morphologie des Herzkreuzes (Trikuspidalklappenansatz etwas weiter apikal als Mitralklappenansatz gelegen) und des Ventrikelseptums verifiziert werden.

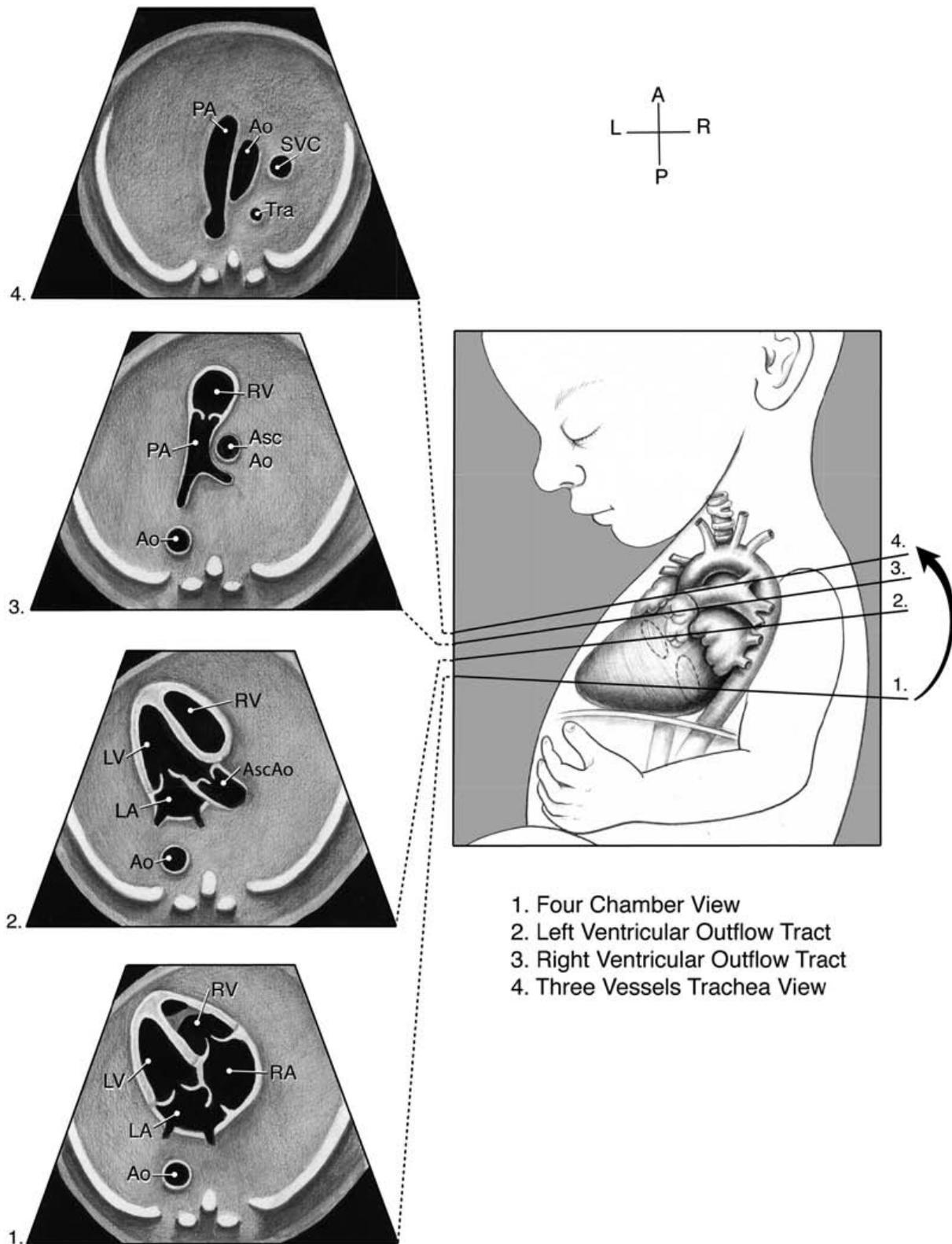


Abbildung 1: Die Transversalen Standardebenen der fetalen Echokardiographie.

PA: Pulmonalarterie, Ao: Aorta, SVC: Vena cava superior, Tra: Trachea, RV: Rechter Ventrikel, Asc Ao: Aorta ascendens, LV: Linker Ventrikel, LA: Linkes Atrium, RA: Rechtes Atrium.

Quelle: American Institute of Ultrasound in Medicine Clinical Standards Committee (2013) AIUM Practice Guideline for the Performance of Fetal Echocardiography. J Ultrasound Med 32:1067–1082

Durch eine leichte Kippung nach kranial kann der linksventrikuläre Ausflusstrakt (LVOT) dargestellt werden. Die Lumenweite der Aortenklappe oder des Ausflusstraktes sollte für einen Seitenvergleich mit der Pulmonalklappe gemessen und gespeichert werden. Der rechtsventrikuläre Ausflusstrakt ist physiologisch geringfügig prominenter als der linksventrikuläre Ausflusstrakt. Zum Erkennen einer Imbalance der Ausflusstrakte (die z.B. auf eine konotrunkale Pathologie hinweist) kann der Quotient der Lumenweiten von links- und rechtsventrikulärem Ausflusstrakt berechnet werden. Liegt dieser Quotient  $< 0,75$  oder  $> 0,75$ , so sollte der Verdacht einer konotrunkalen Pathologie abgeklärt werden. In dieser Standardebene sollte auch die ventrikuloarterielle Konnektion überprüft sowie der transvalvuläre Blutfluss durch die farbkodierte Duplexsonographie dargestellt werden. Dabei können Turbulenzen oder Flussbeschleunigungen z.B. im Sinne einer Stenosierung detektiert werden.

Durch eine weitere Kippung aus dieser Ebene nach kranial lässt sich der rechtsventrikuläre Ausflusstrakt (RVOT) darstellen. Die Lumenweite des rechtsventrikulären Ausflusstraktes sollte für den Seitenvergleich gemessen und dokumentiert werden. Auch hier muss die ventrikuloarterielle Konkordanz bestätigt werden.

Eine erneute Kippung der Ebene nach kranial überführt diesen Blick in den Dreigeäßblick. Die drei Hauptstrukturen in dieser Ebene bilden der Pulmonalis-Hauptstamm mit Ductus arteriosus, der Aortenbogen sowie die Vena cava superior. Dorsal ist oft die Trachea sichtbar. In dieser Ebene ist insbesondere die Beurteilung des Aortenbogens wichtig. Ein rechts gelegener, ein unterbrochener oder ein doppelter Aortenbogen sowie eine Aortenisthmusstenose sollten im B-Bild und farbduplexsonographisch ausgeschlossen oder dokumentiert werden. Auch die Offenheit und regelgerechte Perfusion des Ductus arteriosus ist bei einem Normalbefund nachweisbar. Weiterhin kann eine linkspersistierende obere Hohlvene (LSVC) ausgeschlossen werden: Diese kommt als Normvariante bei ungefähr 0,5% der Bevölkerung vor, hat allerdings eine erhöhte Prävalenz von ca. 10% in der Population der Menschen mit angeborenen Herzfehlern. Die Detektion einer LSVC sollte deshalb Anlass zum gründlichen und systematischen Ausschluss anderer Herzfehler geben [69]. Ferner ist das Vorhandensein einer LSVC für eine postnatale herzchirurgische Versorgung von großer Relevanz, da sie beim Anschluss an die Herz-Lungen-Maschine geklemmt und kanüliert werden muss.

In der Literatur existieren dabei zwei verschiedene Definitionen des Dreigeäßblickes [32,140]. Im klinischen Alltag am weitesten verbreitet ist die Variante des „Three Vessels-Trachea View“ (3VT), bei dem die Schnittebene transversal auf Höhe des Aortenbogens liegt. Bei dieser Variante des Dreigeäßblickes werden sowohl der Aortenbogen als auch der Ductus arteriosus durchgängig dargestellt, zusammen bilden sie ein V-förmiges Konfluens. Als Alternative dazu existiert auch die Definition des „Three Vessels View“ (3V), dessen Schnittebene etwas kaudal des Aortenbogens liegt. Bei dieser Variante werden (von rechts nach links) ventral im Bild Pulmonalishauptstamm, Aorta ascendens und Vena cava superior als drei große Gefäßanschnitte dargestellt. Dorsal dahinter liegt ein

Anschnitt der Aorta descendens. Beide Varianten des Dreigeäßbliches sind als separate Standardebenen im U/S Mentor implementiert worden.

### 3.4.2 Die Sagittalebene

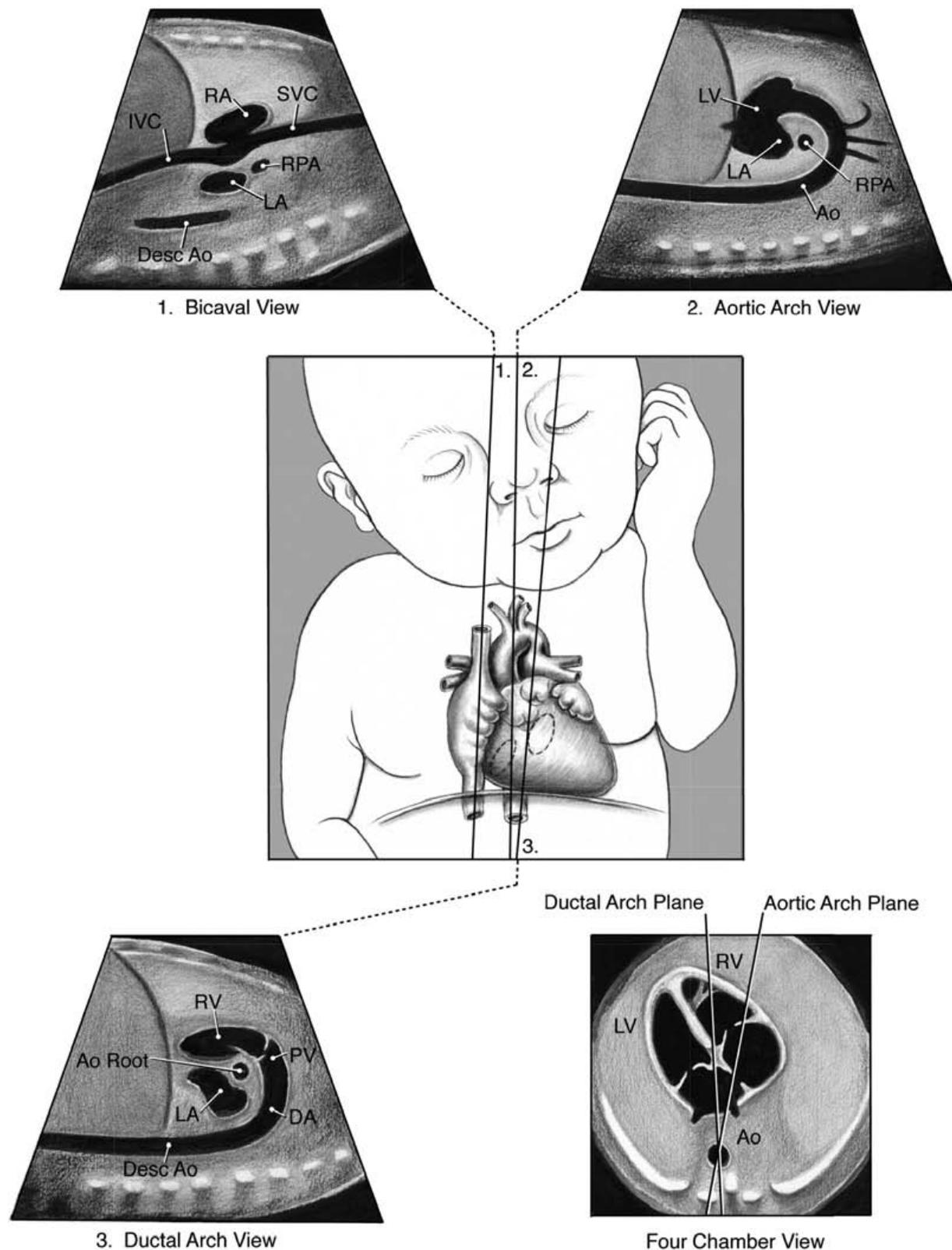


Abbildung 2: Die sagittalen Standardebenen der fetalen Echokardiographie.

IVC: Vena cava inferior, RA: Rechtes Atrium, SVC: Vena cava superior, RPA: Rechte Pulmonalarterie, LA: Linkes Atrium, Desc Ao: Aorta descendens, LV: Linker Ventrikel, Ao: Aorta, RV: Rechter Ventrikel, PV: Pulmonalklappe, Ao Root: Aortenwurzel, DA: Ductus arteriosus.

Quelle: American Institute of Ultrasound in Medicine Clinical Standards Committee (2013) AIUM Practice Guideline for the Performance of Fetal Echocardiography. J Ultrasound Med 32:1067–1082

In den sagittalen Schnittebenen werden die großen Gefäße des Fetus längs dargestellt. Hier lassen sich Stenosen und/oder Fehlanlagen zum Beispiel im Sinne von Fehlkonnektionen gut erkennen. In Abbildung 2 findet sich eine Darstellung dieser sagittalen Standardebenen [7].

Durch eine auf den Fetus bezogen in etwa mediansagittale Schallkopfführung lässt sich die Standardebene des bicavalen Blickes (Bic) einstellen. Hier kann die regelgerechte Einmündung der beiden Vv. cavae in das rechte Atrium überprüft werden. Relevante Fehleinmündungen des Hohlvenensystems sind allerdings sehr selten [12,34,95]. Mit einem leicht verkippten bicavalen Blick ist in der Regel der Blutfluss durch das Foramen ovale sehr gut darstellbar, da der Andopplungswinkel dafür in dieser Standardebene ideal ist. Ein pathologischer Links-Rechts-Shunt statt des physiologischen Rechts-Links-Shunts könnte an dieser Stelle Hinweis z.B. auf eine linksventrikuläre Obstruktion geben. In der Literatur gibt es nach meiner Kenntnis keine Beschreibungen, die dafür Anhalt geben, dass beim bicavalen Blick eine zeitgleiche Darstellung der Aorta descendens sinnvoll oder geboten ist [32,79,99]. Dennoch wurde die Darstellung eines Teils der Aorta descendens im bicavalen Blick im Modul der fetalen Echokardiographie des U/S Mentor implementiert. Nur mit gleichzeitiger Darstellung der Aorta stuft der Simulator bicavale Standardebenen als korrekt ein. Dieser Umstand wird in Abschnitt 7.11.1 diskutiert.

Durch eine leichte Verschiebung der Schnittebene aus dem bicavalen Blick hin zur linkslateralen Seite des Fetus lässt sich der aortale Bogen (Ao) darstellen. In dieser Standardebene stehen die physiologisch gleichmäßige und ununterbrochene Kontur des Aortenbogens mit adäquater Lumenweite im Zentrum der Untersuchung. Dabei sollte auch z.B. auf das Vorliegen eines „contraductal shelf“, einer dorsalen Einwärtsfältelung der Aorta auf Höhe der Ductuseinmündung, geachtet werden. Ein solcher contraductal shelf wäre stark hinweisgebend für eine Aortenisthmusstenose, vermutlich stellt er versprengtes residuales fibröses Gewebe des Ductus arteriosus dar [44,47,63]. In Abbildung 3 findet sich eine Darstellung eines solchen contraductal shelf [44]. Werden eine physiologische Kontur und Lumenweite lückenlos dargestellt, so ist eine Aortenisthmusstenose zum gegebenen Zeitpunkt unwahrscheinlich. Insgesamt ist die pränatale Diagnosestellung einer Aortenisthmusstenose allerdings selbst bei erfahrenen Untersucher:innen nach wie vor schwierig. (Verdachts-)Diagnosen sollten sich immer auf eine sorgfältige Analyse mehrerer Parameter stützen, insbesondere Z-Scores vom linken Einfluss- und Ausflusstrakt sowie des Aortenisthmus und Ductus arteriosus sind wichtig für die Risikostratifizierung [47].

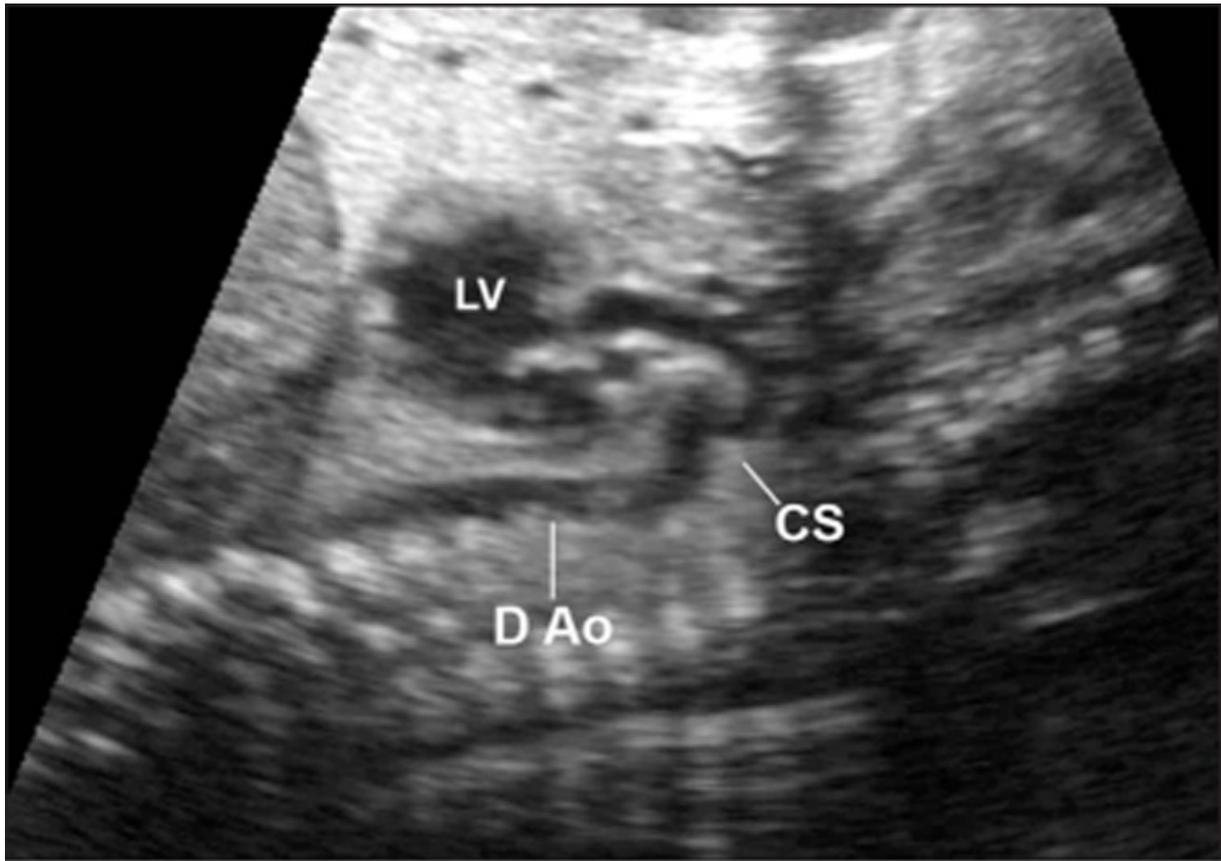


Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung eines „contraductal shelf“.

„Contraductal shelf“ in der sagittalen Standardebene des aortalen Bogens bei einem Fetus der 29. SSW mit Aortenisthmusstenose und hypoplastischem Aortenbogen als Teil eines hypoplastischen Linksherzsyndroms.

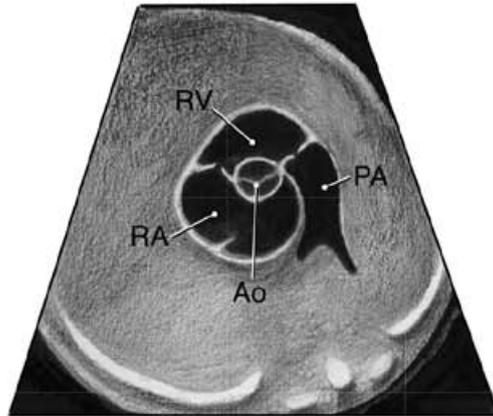
LV: Linker Ventrikel, CS: contraductal shelf, D Ao: Aorta descendens.

Quelle: Espinoza J, Romero R, Kusanovic JP, Gotsch F, Erez O, Hassan S, Yeo L (2009) Prenatal Diagnosis of Coarctation of Aorta with the Multiplanar Display and B-flow Imaging Using 4-Dimensional Ultrasonography. J Ultrasound Med 28:1375

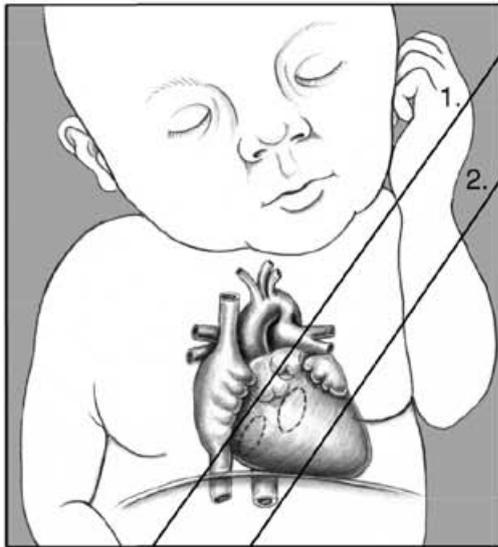
Durch Rotation des Schallkopfes um 90° um die Kabelachse aus dem apikalen Vierkammerblick bei medialem, streng ventrodorsalem Lauf der Schallwellen lässt sich die Standardebene des duktaalen Bogens (Duc) einstellen. Die Offenheit und regelgerechte Perfusion des Ductus lassen sich hier überprüfen.

### **3.4.3 Die Kurzachsenschnitte**

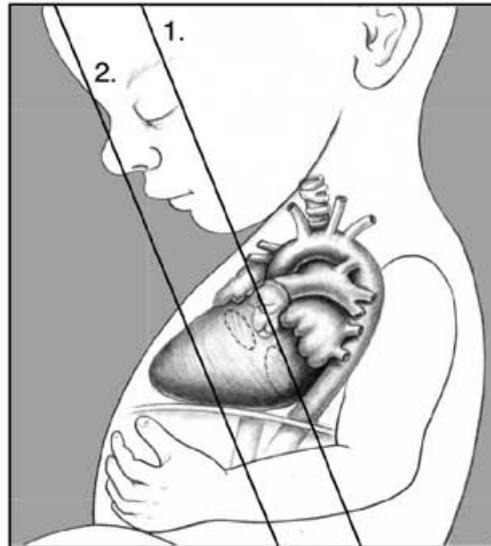
In Analogie zur Echokardiographie bei Erwachsenen werden auch in der fetalen Echokardiographie kurze Achsen eingestellt. Apikale tiefe biventrikuläre Kurzachsenschnitte (LSX) eignen sich besonders gut für die farbduplexsonographische Detektion von Ventrikelseptumdefekten, da ein VSD-Jet hier nahezu senkrecht im Bild - auf den Schallkopf bezogen also in axialer Ebene - verlaufen würde, wodurch eine maximal große Frequenzverschiebung verursacht wird. Der basale bzw. hohe Kurzachsenschnitt auf Höhe der Aortenklappe (HSX) eignet sich gut, um die Diameter der rechts- und linksventrikulären Ausflusstrakte miteinander zu vergleichen, da hier gleichzeitig beide Ausflusstrakte in einer Standardebene dargestellt werden können. Darüber hinaus kann hier die Morphologie der Aortenklappe beurteilt werden, bei guten Schallbedingungen und trikuspid angelegter Klappe gelingt die Darstellung aller drei Segeltaschen als „Mercedes-Stern“. Eine Darstellung der Kurzachsenschnitte findet sich in Abbildung 4 [7].



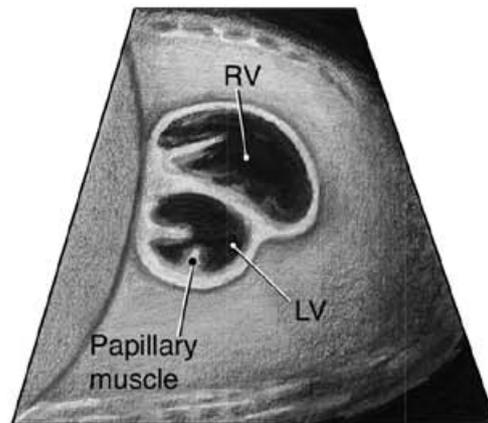
1. High Short Axis View - Great Arteries



Fetal Heart - Coronal View



Fetal Heart - Sagittal View



2. Low Short Axis View - Ventricles

Abbildung 4: Die Kurzachsenschnitte in der fetalen Echokardiographie.  
 RA: Rechtes Atrium, RV: Rechter Ventrikel, PA: Pulmonalarterie, Ao: Aortenklappe, LV: Linker Ventrikel.  
 Quelle: American Institute of Ultrasound in Medicine Clinical Standards Committee (2013) AIUM Practice Guideline for the Performance of Fetal Echocardiography. J Ultrasound Med 32:1067–1082

### 3.5 Simulation in der Medizin

In der medizinischen Ausbildung werden schon seit langer Zeit erfolgreich Simulatoren eingesetzt [3,98]. Die ersten Simulatoren entwickelten sich aus simplen anatomischen Modellen [84]. Einer der ersten bekannten interaktiven medizinischen Simulatoren zum Trainieren therapeutischer Eingriffe soll während der chinesischen Song-Dynastie im Jahre 1027 durch Wang Weiyi entwickelt worden sein: Er konstruierte zwei lebensgroße Bronzestatuen, um Oberflächenanatomie und die Lokalisation von Akupunkturpunkten zu veranschaulichen. Die Bronzestatuen hatten über 300 kleine Öffnungen, in welche die Akupunkturnadeln eingeführt werden sollten. Man vermutet, dass die Modelle innen flüssigkeitsgefüllt und außen mit Wachs beschichtet waren, sodass bei korrekter Platzierung der Nadeln als Feedback Flüssigkeit aus dem Modell heraustropfte [98,108].

Auch in der Geburtshilfe wurden schon früh simulationsbasierte Methoden zu Lehrzwecken eingesetzt. Das erste nachgewiesene Simulationstraining wurde Anfang des 18. Jahrhunderts durchgeführt: Gregoire der Jüngere begann in Paris damit, aus menschlichen Becken und verstorbenen, zum Teil bereits verwesten Feten geburtshilfliche Simulatoren zu bauen. An diesen „Modellen“ demonstrierte er die damals revolutionäre Forceps-Technik, einer Geburt mittels Zangenextraktion. Geburtshelfer aus ganz Europa reisten zu ihm und seinem Vater nach Paris, um von ihnen zu lernen [96,98].

Das moderne medizinische Simulationstraining wurde in der jüngeren Vergangenheit oft durch Pionierarbeit aus der Luftfahrtindustrie inspiriert. Dort werden simulationsbasierte Trainings bereits seit den 1930er Jahren systematisch zur Steigerung der Sicherheit eingesetzt [3]. In den 1960er Jahren wurden die ersten moderneren medizinischen Simulatoren entwickelt, zunächst vor allem zum Trainieren von Reanimation, Anästhesie und kardiopulmonaler Auskultation [36].

Simulationsbasierte Trainingsmethoden in der Medizin bieten den Trainierenden generell die Möglichkeit, sich ohne das Risiko von Patient:innenschädigung in verschiedenen klinischen Szenarien auszuprobieren und Lösungsmöglichkeiten zu entwickeln. Insbesondere selten vorkommende, aber akut bedrohliche Situationen wie zum Beispiel Reanimationen können über alle Altersklassen hinweg an lebens echten Simulatoren trainiert werden. In verschiedenen Szenarien kann hierbei durch repetitives Training auf verschiedenen Kompetenz- und Schwierigkeitsniveaus geübt werden [35,58,141]. Dadurch können Notfallsituationen in einem geschützten Setting trainiert werden, bevor man im klinischen Alltag mit diesen Situationen konfrontiert wird. Vermehrt werden in den letzten Jahren nicht nur einzelne Personen, sondern ganze Teams interdisziplinär und mit wechselnden Teilnehmern trainiert. Dabei werden oft die Prinzipien des Crew Resource Managements (CRM) angewandt: Es wird ein besonderer Fokus auf gute Kommunikation, Zusammenarbeit im Team und andere häufige Fehlerquellen aus dem Bereich der „human factors“ gelegt [117].

Qualitätskriterien für ein effektives Simulationstraining sind unter anderem das Vorhandensein von Feedback-gesteuertem und repetitivem Training verschiedener klinischer Szenarien unterschiedlicher

Komplexitätsgrade in einer kontrollierten Umgebung [70]. Viele Studien konnten den positiven Effekt von Simulationstrainings auf den Kompetenzerwerb und die damit verbunden verbesserte Versorgung von Patient:innen nachweisen. [35]. Der nachgewiesene Nutzen und die Vorteile simulationsbasierter Trainingsmethoden sind so signifikant, dass viele Empfehlungen dahingehen, Simulationstraining fest und obligat in die Curricula der medizinischen Aus- und Weiterbildung zu implementieren [141]. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat in ihren Leitlinien zur Transformation und Verbesserung der medizinischen Lehre dringend empfohlen, dass simulationsbasierte Trainingsmethoden in der medizinischen Ausbildung regelmäßige Anwendung finden sollte [139].

### **3.5.1 Simulationsbasiertes Training im gynäkologisch-geburtshilflichen Ultraschall**

Ultraschall gehört zu den am häufigsten angewandten gynäkologischen Diagnostikverfahren. Noch deutlicher als andere Diagnostikverfahren zeigt die Anwendung der Sonographie allerdings eine sehr hohe Anwender:innenabhängigkeit [105]. Der Kompetenzerwerb in der Anwendung der Ultraschalldiagnostik ist daher elementarer Bestandteil der Weiterbildung für Weiterbildungsassistent:innen in der Gynäkologie und Geburtshilfe. Nichtsdestotrotz fehlen bisher in die Weiterbildungsordnung verankerte, landesweit einheitliche Curricula oder standardisierte Fortbildungsprogramme zur Ausbildung in der Sonographie. Viele Assistenzärzt:innen fühlen sich unsicher oder unzureichend vorbereitet für die ihnen anvertrauten Ultraschalluntersuchungen, die sie im klinischen Alltag bereits früh selbstständig durchführen sollen und müssen [106,122]. Ein didaktisch hochwertiges Training in der Sonographie ist daher dringend notwendig und von großer Bedeutung für die Aus- und Weiterbildung.

Die Ultraschallsimulation ist eine der neueren Entwicklungen im medizinischen Simulationstraining. Durch stetige technische Weiterentwicklung gibt es mittlerweile eine Vielzahl verschiedener Trainingssysteme unterschiedlicher Qualität, mit denen diagnostischer Ultraschall oder sogar interventionelle Ultraschall-basierte Eingriffe trainiert werden können [80]. Die Trainierenden profitieren dabei von einer ruhigen Trainingsatmosphäre, die ein konzentriertes Training ermöglicht. Ihnen wird eine sichere Umgebung („safe space“) zum Trainieren grundlegender sonographischer Fertigkeiten wie zum Beispiel der Auge-Hand-Koordination, dem Erkennen anatomischer Strukturen oder dem Einstellen von Standardebenen geboten, ohne dass sie sich zugleich im unmittelbaren Patient:innenkontakt befinden [92,113,137]. In der Geburtshilfe bilden die Schallmodell-unabhängige Verfügbarkeit des Simulators und kontrollierbare Kindsbewegungen ideale Grundvoraussetzungen für ein strukturiertes und didaktisch hochwertiges Training [126]. Auch kann das Erkennen von seltenen, aber schwerwiegenden Fehlbildungen simulationsbasiert trainiert werden. Besonders die zufällige Kindslage und die nicht steuerbaren Bewegungen echter Feten erschweren das konventionelle „hands-on“ Ultraschalltraining an realen Patient:innen.

Die Schallmodell-unabhängige Durchführbarkeit von simulationsbasiertem Training ist in der Gynäkologie und Geburtshilfe von besonders großer Bedeutung. Transvaginales Ultraschalltraining mit

direktem Patient:innenkontakt ist angesichts des intimen Charakters der Untersuchung aus hygienischen und ethischen Gründen zu hinterfragen, wenn die grundlegenden Kenntnisse und Kompetenzen in ruhiger Atmosphäre simulationsbasiert ebenso effektiv erworben werden können [77]. Im geburtshilflichen Ultraschalltraining stellt der sichere Ausschluss potenzieller Auswirkungen auf einen realen Fetus einen weiteren Vorteil von simulationsbasierten Methoden dar. Wenngleich es an Nachweisen für fetale Schädigungen durch pränatalen Ultraschall fehlt, so können zumindest theoretisch thermische Auswirkungen auf den Fetus, insbesondere in der Frühschwangerschaft, nicht vollständig ausgeschlossen werden [59,60]. Diese thermischen Auswirkungen können durch den Thermischen Index (TI) quantifiziert und durch Geräteeinstellungen wie zum Beispiel den „Acoustic Output“ beeinflusst werden. Bei einem Thermischen Index von  $< 0.7$  ist dabei theoretisch eine unbegrenzte Schallzeit ohne thermische Beeinflussung des Fetus möglich [6]. Nichtsdestotrotz betonen internationale Positionspapiere und Leitlinien, dass gemäß dem ALARA-Prinzip („As Low As Reasonably Achievable“) die Schallzeit und insbesondere der Einsatz von gepulstem Doppler in der Schwangerschaft so gering wie möglich gehalten werden sollte [6,75,138]. Die im Jahr 2021 in Kraft getretene Neuerung der Strahlenschutzverordnung spiegelt dieses Prinzip wider. Ultraschalluntersuchungen ohne medizinische Indikation („Baby-Fernsehen“) während der Schwangerschaft sind seither verboten [40].

Eine Limitation für den breiten Einsatz simulationsbasierter Ultraschalltrainings stellen die hohen Kosten der Simulatoren dar. Jedoch ist auch die konventionelle, nicht-simulationsbasierte Ausbildung im gynäkologischen Ultraschall sehr kostspielig. Besonders in der fetalen Echokardiographie ist eine langjährige und intensive Ausbildung erforderlich, bis die Untersuchung selbstständig durchgeführt werden kann. Während der gesamten Ausbildungsdauer muss eine Supervision durch erfahrene Untersucher:innen sichergestellt sein. Eine Ausbildung zur fetalen Echokardiographie in einem Pränatalzentrum ist daher zwangsläufig mit sehr hohen Personalkosten verbunden. Carolan-Rees und Ray (2015) führten eine Kosteneffektivitätsstudie zum Einsatz des Medaphor ScanTrainers, einem Virtual Reality-basiertem Ultraschallsimulator für die gynäkologisch-sonographische Ausbildung durch. In der Berechnung ergab sich eine durchschnittliche jährliche Einsparung von 7.114 Britischen Pfund (entsprechend ca. 8.200 Euro) durch den Einsatz des Simulators. Kritisch anzumerken ist, dass diese Studie durch die Herstellerfirma des Simulators gesponsert wurde [25]. Ein Literaturüberblick zur bisherigen Evidenz für simulationsbasiertes Ultraschalltraining zeigt jedoch auch unabhängig davon die großen Vorteile einer solchen Ausbildung.

### **3.5.2 Ultraschallsimulation als Verfahren der Kompetenztestung**

Aufgrund der breiten Anwendung und gleichzeitig sehr hohen Anwenderabhängigkeit der Sonographie als diagnostischer Methode sind Überprüfungen der Untersucherkompetenz als Maßnahme der Qualitätssicherung unerlässlich. Die International Society for Ultrasound in Obstetrics and Gynecology (ISUOG) empfiehlt als grundlegende Maßnahme der Kompetenzsicherung für den gynäkologischen

Ultraschall, dass Anwender mindestens 100 supervidierte Untersuchungen durchgeführt haben sollten, bevor sie eigenständig schallen [67]. Die European Federation of Societies for Ultrasound in Medicine and Biology (EFSUMB) empfiehlt sogar 300 supervidierte Untersuchungen vor der eigenständigen Anwendung [45]. Die fetale Echokardiographie ist eine sehr komplexe Untersuchungsmethode, daher ist die Abhängigkeit von der Expertise des Untersuchers besonders groß: Tegnander et al. (2006) untersuchten anwenderabhängig die pränatale Erkennungsrate angeborener Herzfehler. Untersucher mit mehr als 2000 durchgeführten Untersuchungen hatten eine signifikant höhere Detektionsrate als Untersucher mit weniger als 2000 durchgeführten Untersuchungen [120]. Auch bei höheren Erfahrungs- bzw. Kompetenzniveaus gibt es demnach noch deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen Untersuchern. Im Gegensatz dazu sind andere ultraschallbasierte gynäkologische Untersuchungen deutlich leichter erlernbar: Das bloße Erkennen einer intrauterinen Schwangerschaft durch notfallmäßige, bettseitige Sonographie konnte in einer Studie von Jang et al. (2010) schon nach 10 Untersuchungen mit einer Sensitivität und Spezifität von 80% bzw. 86%, nach 40 Untersuchungen mit einer Sensitivität und Spezifität von je 100% von 25 Weiterbildungsassistent:innen der Notfall- und Inneren Medizin - also fachfremden Ärzten - erfolgreich durchgeführt werden [71]. Wegen der unterschiedlichen Anforderungsniveaus und der unterschiedlichen Komplexität verschiedener sonographischer Untersuchungen ist also die reine Anzahl der insgesamt durchgeführten sonographischen Untersuchungen kein ausreichender Prädiktor für die Ultraschallkompetenz eines Anwenders [61,128]. Selbst wenn einzelne Untersuchungsgänge (zum Beispiel eine transvaginale Sonographie) separat betrachtet werden, so korreliert die Zahl der durchgeführten Untersuchungen zwar mit der diagnostischen Genauigkeit, ist aber kein ausreichend guter Prädiktor für diese [128]. Im diagnostischen Ultraschall müssen zur Qualitätssicherung folglich andere Parameter als die bloße Anzahl der durchgeführten Untersuchungen in Betracht gezogen werden. Nichtsdestotrotz gibt es bisher keinen internationalen Konsens darüber, auf welchem anderen Weg man Ultraschallfertigkeiten oder Kompetenzniveaus prüfen sollte [127].

An genau diesem Punkt könnte der Einsatz von Ultraschallsimulation zukünftig ansetzen: Standardisierte Untersuchungsbedingungen, eine objektive und quantitative Bewertung der Schallperformance durch den Simulator, patient:innenunabhängige Verfügbarkeit, eine große Reihe verschiedener implementierter Pathologien und automatisiertes Feedback für den Prüfling bieten ideale Prüfungsbedingungen [112].

Erste Studien zur Überprüfung der Validität von simulationsbasierten Ultraschallkompetenzprüfungen wurden schon durchgeführt: Chalouhi et al. (2016) prüften im Rahmen der jährlichen nationalen Ultraschallkompetenzüberprüfung („national examination for the practice of obstetrical ultrasound“) in Paris 146 Trainierende, von denen 29 zusätzlich an einem Ultraschallsimulator geprüft wurden [29]. Die Prüfungsergebnisse der konventionellen Prüfungen wurden mit den simulationsbasierten Prüfungen verglichen und zeigten dabei eine gute Korrelation. Die Prüfungsergebnisse bei der simulationsbasierten

Prüfung waren etwas besser als in konventionellen Prüfungen, sodass die Autoren eine Anpassung der Bestehensgrenze empfehlen. Auch Madsen et al. (2014) untersuchten die Validität und Reliabilität simulationsbasierter Prüfungsverfahren und befanden diese für gut [82]. Simulationsbasierte Prüfungsverfahren sind also eine vielversprechende und ressourcenschonende Möglichkeit des Prüfens von sonographischen Fähigkeiten und können dabei genauso effektiv wie eine konventionelle Prüfung mittels realen Schwangeren sein [1,22,29,82].

## 4 Fragestellung und Zielsetzung

Im Rahmen dieser Dissertation wurde untersucht, ob die fetale Echokardiographie mittels simulationsbasiertem Ultraschalltraining erlernt werden kann. Dazu wurde die prospektive, experimentell-didaktische Studie FESIM II („Fetal Simulation Study II“) durchgeführt. Der Symbionix U/S Mentor wurde als Ultraschallsimulator der neuesten Generation verwendet, er beinhaltet ein Lernmodul zur fetalen Echokardiographie inklusive eines sich zufällig bewegenden Fetus. Die Lernkurven von elf Medizinstudierenden (Interventionsgruppe) ohne relevante Vorkenntnisse im gynäkologisch-geburtshilflichem Ultraschall wurden über einen Trainingszeitraum von sechs Wochen analysiert. Die Studierenden unterzogen sich dabei alle zwei Wochen einer standardisierten Lernfortschrittsanalyse. Der Lernfortschritt der Interventionsgruppe wurde mit zwei Referenzgruppen unterschiedlichen Kompetenz- und Erfahrungsniveaus verglichen: Referenzgruppe (1) bestand aus zehn Gynäkolog:innen, Referenzgruppe (2) aus zehn mindestens DEGUM-II-zertifizierte Expert:innen für Pränataldiagnostik. Beide Referenzgruppen wurden denselben standardisierten Tests wie die Interventionsgruppe unterzogen.

Ein weiterer Zweck der Studie war das Erfassen der Schwierigkeitsniveaus verschiedener sonographischer Standardebenen in der fetalen Echokardiographie. Auf den ersten Blick erscheint logisch, dass das Einstellen unterschiedlicher Standardebenen unterschiedlich schwierig ist. In der Literatur existieren dazu bisher allerdings noch keine Daten. Die Daten der vorliegenden Untersuchung könnten in Zukunft zu didaktischen Zwecken, beispielsweise bei der Planung von Kurscurricula, nützlich sein.

## **5 Materialien und Methoden**

### **5.1 Der Symbionix U/S Mentor**

Der Symbionix U/S Mentor ist ein High-End Simulator zum Trainieren von ultraschallbasierten Untersuchungsmethoden und interventioneller Verfahren. Er ermöglicht ein multidisziplinäres, realistisches hands-on Training für Ultraschall im point-of-care-Setting. Implementiert sind Trainingsmodule zu grundlegenden sonographischen Fertigkeiten der Auge-Hand-Koordination sowie zur Abdomensonographie, transthorakalen und transösophagealen Echokardiographie, Notfallsonographie (eFAST / RUSH), Thoraxsonographie (inkl. COVID 19-Modul), Halssonographie (Schilddrüse und Karotiden), gynäkologischen Sonographie (transabdominell und transvaginal), zum Ersttrimester- und Zweittrimesterschall, zur fetalen Neurosonographie und zur fetalen Echokardiographie. Darüber hinaus gibt es Virtual Reality-Module für Gynäkologie und Notfallsonographie, auch invasive Verfahren wie z.B. eine Thorakozentese können trainiert werden.

#### **5.1.1 Der Aufbau des Simulators**

Der Simulator besteht aus einem Torso (Mannequin), je nach Untersuchungsmodul in weiblicher oder männlicher Ausführung, einem Touchscreen mit integriertem PC, der „electronic box“ als zentralem Steuerungsgerät, dem Transmitter, einem Pedal, verschiedenen Schallköpfen sowie einer kabellosen Maus und Tastatur. Der Touchscreen fungiert zugleich als Bildschirm für das System. Mit dem Pedal lassen sich die dargestellten Ultraschallbilder einfrieren und/oder speichern. Vier verschiedene Schallköpfe gehören standardmäßig zum Simulator: Eine Konvexsonde (Abdomenschallkopf), eine Sektorsonde, eine transösophageale und eine transvaginale Sonde.

Für die simulationsbasierte fetale Echokardiographie wird genau wie unter realen Bedingungen die Konvexsonde genutzt. Der weibliche Torso hat einen auf- und abschaltbaren Bauch für die Zweittrimesterschall-, fetale Neurosonographie- und fetale Echokardiographie-Module.



Abbildung 5: Der Aufbau des U/S Mentor  
Quelle: Eigene Aufnahme

Im Rücken des Torsos befindet sich eine kleine Aussparung, in welcher der Transmitter positioniert ist. Über ein Kabel ist der Transmitter mit der electronic box verbunden.



Abbildung 6: Der Transmitter  
Durch das vom Transmitter ausgesendete Magnetfeld wird die ständige Ortung des Simulator-Schallkopfes ermöglicht.  
Quelle: Handbuch des Simulators mit Genehmigung von © Surgical Sciences Sweden AB

### 5.1.2 Die Funktionsweise und Eigenschaften des Simulators

Der Transmitter emittiert ein Magnetfeld, das in seiner dreidimensionalen Ausrichtung von Sensoren in den Schallkopfsonden wahrgenommen wird. Durch dieses Prinzip berechnet der Simulator die genaue Position der Schallköpfe im Raum. Durch den fest am Torso fixierten Transmitter wird diese Berechnung auch in Bezug auf den Mannequin ermöglicht. Der Simulator kennt also permanent die Ausrichtung der Schallköpfe bezogen auf den Torso, und berechnet auf dieser Basis das entstehende Ultraschallbild.

Eine Besonderheit des U/S Mentor ist der virtuelle Fetus: Die meisten bisherigen Ultraschallsimulatoren funktionieren auf der Basis realer Ultraschallbilder. Dabei werden zuvor in der Praxis aufgenommene Ultraschallbilder oder Loops vom Simulator wiedergegeben, sobald man den Simulatorschallkopf in einer programmierten Position an den Torso hält. Die Bilder solcher Simulatoren sind in der Regel anatomisch-regional limitiert. Das bedeutet, dass nicht der gesamte Fetus abgebildet ist. Daher kann nicht bei allen Schallkopfpositionen ein Ultraschallbild ausgegeben werden, sondern nur bei genau denjenigen Schallkopfpositionen, in denen die Bilder ursprünglich aufgenommen wurden. Deswegen können die Befunde auch nicht aus beliebig verschiedenen Winkeln aufgesucht oder beurteilt werden.

Der von uns verwendete Simulator stellt an dieser Stelle eine neue Generation von Ultraschallsimulatoren dar: Es werden nicht mehr vorher aufgenommenen Bilder wiedergegeben, sondern die vom Simulator ausgegebenen Bilder werden live generiert. Dieses Rendering geschieht auf Basis eines virtuellen Fetus. Diese dreidimensionalen virtuelle Feten wurden vorab auf Basis von MRT-Volumendaten für die geburtshilflichen Module erstellt. Der Simulator kann nun mit Hilfe des virtuellen Fetus und in Kenntnis der Schallkopfposition in Relation zum Torso das entsprechende Ultraschallbild rendern und auf dem Bildschirm ausgeben. Durch diese Funktionsweise sind die entstehenden Bilder nicht mehr anatomisch-regional limitiert. Außerdem ergeben sich weitere neue Möglichkeiten: Das Kind bewegt sich während der Untersuchung im Bauch der Mutter und simuliert so Kindsbewegungen, die auch in der Realität während der Untersuchung auftreten würden. Dies stellt ein Alleinstellungsmerkmal dar, denn der vorliegende Simulator war nach unserer Kenntnis zum Zeitpunkt der Studie im Herbst 2020 der einzige Ultraschallsimulator, der ein sich im Bauch der Mutter zufällig bewegendes Kind simulieren kann. Sowohl Schädel- als auch Beckenendlagen des Kindes sind implementiert, Stellung und Haltung des Kindes sind ebenfalls variabel und werden vom Simulator gesteuert. Weiterhin werden viele Artefakte simuliert, darunter zum Beispiel Schallschattenartefakte, dorsale Schallverstärkungen oder Randschattenphänomene. Auf diesem Weg werden noch realistischere Untersuchungsbedingungen geschaffen. Ebenfalls ergeben sich durch den virtuellen Fetus Möglichkeiten, pathologische Befunde zu implementieren. Im Modul zur fetalen Echokardiographie

sind Feten mit einer Transposition der großen Arterien, einer Fallot'schen Tetralogie und einem hypoplastischen Linksherzsyndrom in jeweils verschiedenen Schweregraden eingeschlossen.

Zusätzlich besteht auch beim vorliegenden Simulator grundsätzlich die Möglichkeit, nach dem Prinzip konventioneller Ultraschallsimulatoren zuvor mit einem realen Ultraschallgerät aufgenommene Bilder in die Simulation zu integrieren. Ab Werk sind solche Bilder von drei gesunden Feten sowie einem Fetus mit einer linkspersistierenden oberen Hohlvene und einem Fetus mit einer Pulmonalklappenstenose eingeschlossen.

### 5.1.3 Die Lernplattform zur fetalen Echokardiographie am U/S Mentor

Das Lernmodul der fetalen Echokardiographie ist konzipiert zum Erlernen einer kompletten kardialen Untersuchung eines Fetus der 20. Schwangerschaftswoche. Es ist integriert in die Plattform „MentorLearn“, welche die Benutzeroberfläche des Simulators darstellt. Innerhalb der Lernplattform gibt es dabei zwei verschiedene Modi. Einerseits gibt es „Tasks“, welche zum anfänglichen Kennenlernen und Trainieren der Standardebenen und fetalen Sonoanatomie entwickelt wurden. Andererseits sind „Cases“, also klinische Fälle angelegt, in denen nach einer Patientenvorstellung mit Anamnese und klinischen Daten in Textform die Untersuchung durchgeführt werden kann. Diese beiden Modi werden in den Abschnitten 5.1.3.1 und 5.1.3.2 näher beschrieben.

Implementiert in das Modul der fetalen Echokardiographie sind die elf in Abschnitt 3.4 vorgestellten Standardebenen:

Tabelle 1: Die Standardebenen im Modul der fetalen Echokardiographie des U/S Mentor

Quelle: Übersetzt nach Janzing P, Nourkami-Tutdibi N, Tutdibi E, Freundt P, von Ostrowski T, Langer M, Zemlin M, Steinhard J (2023) Controlled prospective study on ultrasound simulation training in fetal echocardiography: FESIM II. Arch Gynecol Obstet

| <b>Transversale Standardebenen</b>       | <b>Sagittale Standardebenen</b> | <b>Kurzachsenschnitte</b>                                 |
|--|---------------------------------|---|
| Abdomen-Transversalschnitt (Abd)         | Aortaler Bogen (Ao)             | Hoher Kurzachsenschnitt (HSX, „circle and sausage“-Blick) |
| Vierkammerblick (4CV)                    | Duktaler Bogen (Duc)            | Tiefer Kurzachsenschnitt (LSX, biventrikulärer Blick)     |
| Linksventrikulärer Ausflusstrakt (LVOT)  | Bicavale Ebene (Bic)            |   |
| Rechtsventrikulärer Ausflusstrakt (RVOT) |                                 |   |
| Dreigefäßblick (3V)                      |                                 |   |
| Dreigefäß-Trachea-Blick (3V-T)           |                                 |   |

Die Auswahl dieser Standardebenen entspricht weit verbreiteten klinischen Standards. Das Untersuchungsprotokoll wurde auf Basis der im Jahr 2013 von der Fetal Echo Task Force herausgegebenen Leitlinie implementiert, welche unter der Schirmherrschaft des American Institute for Ultrasound in Medicine (AIUM) Clinical Standards Committee in Kooperation mit dem American

College of Obstetricians and Gynecologists (ACOG), der Society for Maternal Fetal Medicine (SMFM) und der American Society of Echocardiography (ASE) [7] entstand. Diese Leitlinie wird außerdem vom American College of Radiology (ACR) unterstützt und befindet sich in Einklang mit den Leitlinien des Jahres 2013 der International Society of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology (ISUOG) und der American Heart Association (AHA) [26].

In der MentorLearn-Oberfläche besteht die Möglichkeit, verschiedene Benutzerkonten zu erstellen. Diese können auch in Gruppen (z.B. eine Gruppe für Studierende, eine für Weiterbildungsassistent:innen) angelegt werden. Der Administrator kann einzelnen Accounts oder ganzen Gruppen Aufgaben zuteilen, benutzerdefinierte Kurse erstellen und den Lernerfolg supervidieren. Den Benutzenden können auf diese Weise individuell abgestimmte Curricula zugewiesen werden. Für jeden durchgeführten „Task“ oder „Case“ wird ein Report erstellt, den sowohl der Benutzende selbst als auch sein Administrator einsehen kann. Im Report werden verschiedene Statistiken zur Performance des Benutzers präsentiert und dargelegt, ob die Standardebenen korrekt eingestellt wurden.

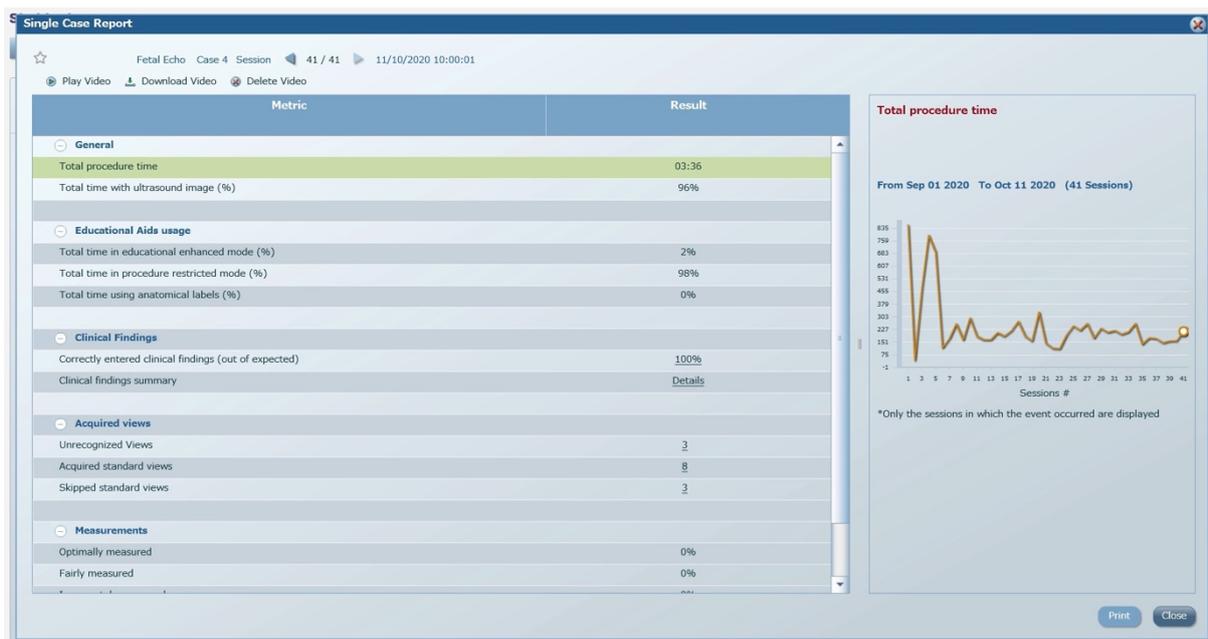


Abbildung 7: Simulator-Feedback in Form eines Statistik-Reports

Ein Report mit Statistiken zur Performance des Benutzers. Ein solches automatisiertes Feedback durch den Simulator wird nach jeder Benutzung ausgegeben. Unter anderem die benötigte Zeit, die Anzahl der korrekt eingestellten Standardebenen oder die Benutzung von Hilfestellungen analysiert

Quelle: Eigene Aufnahme

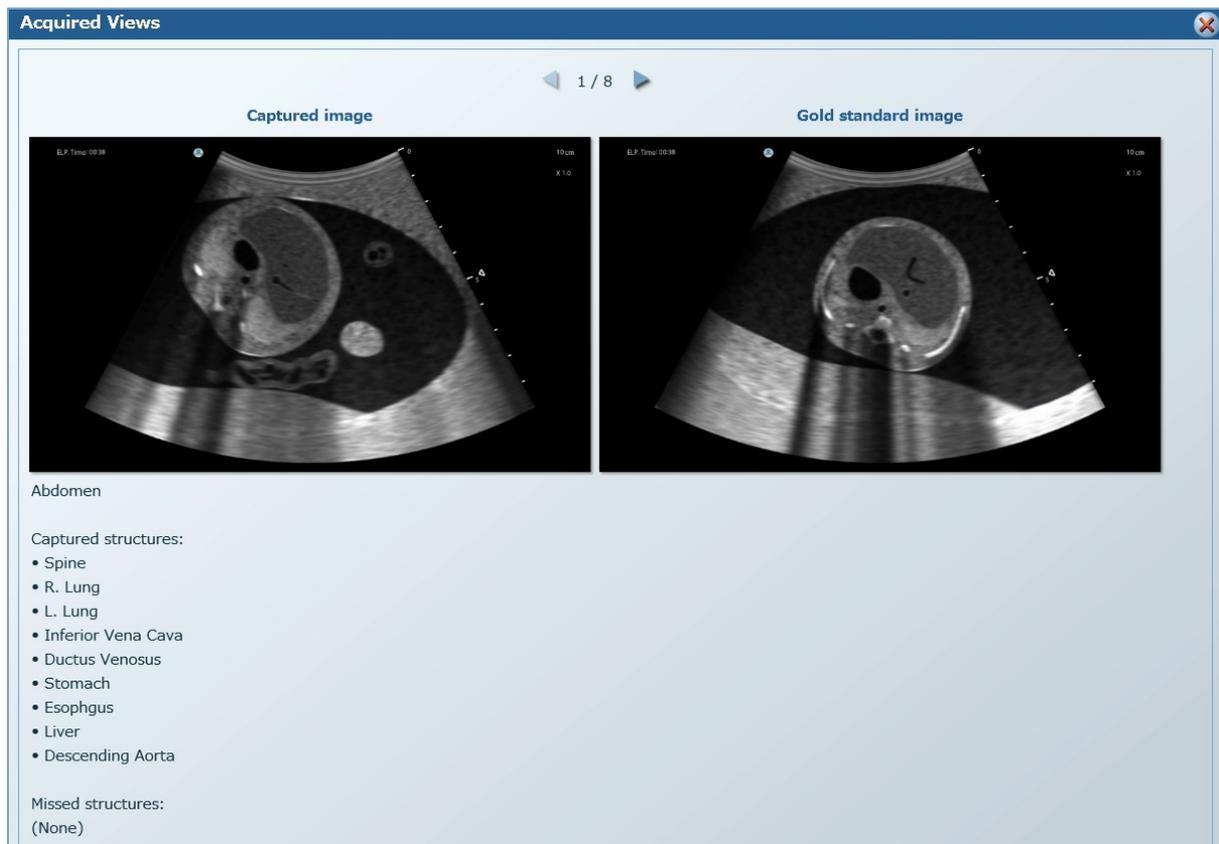


Abbildung 8: Simulator-Feedback durch Vergleich von Standardebenen  
 Alle vom Benutzer eingestellten Ebenen (links) werden nach Ende der Simulation mit der jeweiligen "Goldstandard"-Standardebene (rechts) verglichen. Auf diesem Wege können die Benutzenden ihre während der Simulation eingestellten Standardebenen nochmals selbstkritisch überprüfen. Eine Liste der darzustellenden und der dargestellten anatomischen Strukturen wird ebenfalls ausgegeben  
 Quelle: Eigene Aufnahme

Beim Feedback zur Einstellung der Standardebenen werden die vom Untersucher gespeicherten Bilder jeweils mit den „Goldstandard“-Bildern der Standardebenen verglichen. Der Simulator vergleicht ebenfalls die vom Benutzer im Bild dargestellten anatomischen Strukturen mit den geforderten Strukturen und ordnet die Darstellung der Standardebene entweder als ausreichend gut oder inkorrekt („missed“) ein. Wenn der Simulator ein gespeichertes Bild keiner der Standardebenen zuordnen kann, so wird das Bild als „unrecognized“ eingeordnet, der Vergleich mit dem Goldstandard bleibt in diesem Falle aus.

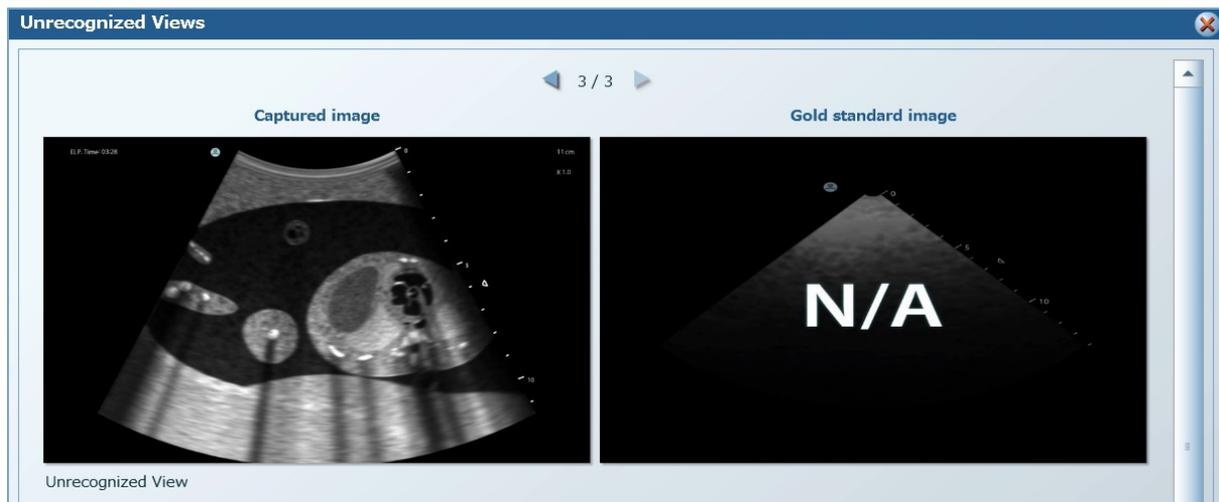


Abbildung 9: Simulator-Feedback bei nicht zugeordneten Standardebenen  
 Der links dargestellte hohe Kurzschnitt wurde vom Simulator nicht als solcher erkannt und konnte daher nicht zugeordnet werden  
 Quelle: Eigene Aufnahme

### 5.1.3.1 „Tasks“ – Der Modus zum anfänglichen Kennenlernen und Trainieren der Standardebenen

Im Modul „Fetal Echo“ als Teil der Lernplattform „MentorLearn“ gibt es verschiedene Tasks. Sie dienen als Basis für das Erlernen der fetalen Echokardiographie: Die verschiedenen Standardebenen werden vorgestellt und deren Einstellung kann geübt werden. Im Unterschied zu den Cases bewegt sich der virtuelle Fetus hierbei nicht, um den Trainierenden zum Einstieg vereinfachte Trainingsbedingungen zu ermöglichen.

Die ersten beiden Tasks dienen der Einführung in die fetale Echokardiographie. Den Anwender:innen wird hier die Einstellung der verschiedenen Standardebenen unter Benutzung diverser Hilfestellungen ermöglicht. Im ersten Task befindet sich der Fetus dabei in dorso-posteriorer Schädellage, im zweiten Task in einer Beckenendlage zwischen dorso-posteriorer und I. Stellung. Der dritte Task ist der sogenannte „Anatomy Recognition“-Modus: Hier sind die anatomischen Beschriftungen im B-Bild ausgeschaltet. Nach jedem „Einfrieren“ einer Standardebene muss der Trainierende anschließend die abgebildeten Strukturen zuordnen und aus einer Liste auswählen. Auf diesem Weg werden die fetale Sonoanatomie und die räumlich-anatomische Orientierung beim Schallen trainiert.

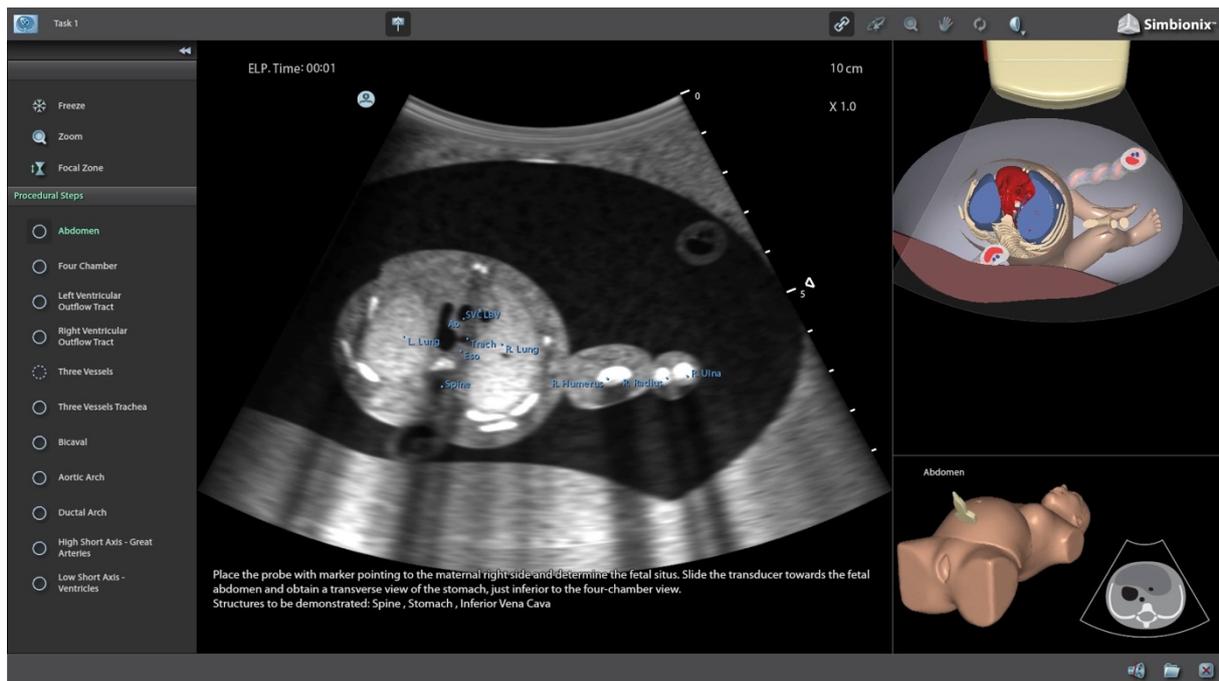


Abbildung 10: Ein Dreigeißblick im Task-Modus mit eingeschalteten Hilfestellungen

*Links:* Liste der anwählbaren Standardebenen. *Mittig:* Das B-Bild mit Beschriftung der anatomischen Strukturen. *Unten mittig:* Anleitung des Simulators zum Auffinden der Ebene. *Rechts oben:* Die 3D-Map mit der aktuellen Schnittebene. *Rechts unten:* Der „blue probe indicator“ zur Darstellung der Schallkopfposition sowie eine schematische Skizze der links ausgewählten Standardebene.

Quelle: Eigene Aufnahme

Bei allen Tasks befindet sich dabei zentral auf dem Bildschirm das B-Bild. Am linken Bildschirmrand befindet sich eine Liste der darzustellenden Standardebenen, die in beliebiger Reihenfolge ausgewählt werden können. Am unteren Bildschirmrand befindet sich jeweils eine kurze Anleitung, wie man den Schallkopf positionieren muss, um die gewählte Standardebene darzustellen. In den ersten beiden Tasks können optional alle relevanten anatomischen Strukturen des Fetus im B-Bild mit blauen Labels beschriftet werden, um den Benutzern anfänglich eine bessere Orientierung zu ermöglichen („anatomic labelling“). Diese können auf Wunsch jederzeit ein- und ausgeschaltet werden. Zusätzlich wird oben rechts im Bild ein dreidimensionales Modell (3D-Map) des Fetus eingeblendet. Die 3D-Map kann entweder so eingestellt werden, dass - wie in Abbildung 10 - ein Querschnittsbild des Fetus gezeigt wird, oder so, dass das gesamte von extern betrachtete Kind mit Andeutung des Strahlengangs der simulierten ausgesendeten Ultraschallwellen gezeigt wird. Zusätzlich kann der Blickwinkel auf das Modell entweder fixiert werden, oder dynamisch vom Simulator während des Schallens angepasst werden.

Unten rechts im Bild ist zusätzlich ein Schema des Torsos eingeblendet, die aktuelle Position des Schallkopfes wird dort live angezeigt. Wenn sich die vom Benutzer eingestellte Bildebene (der jeweils links im Bild ausgewählten) idealen Standardebene annähert, so verfärbt sich der Schallkopf und wird zunehmend blauer, um ein Feedback zur korrekten Positionierung zu geben („blue probe indicator“). Neben dieser Darstellung des Torsos findet sich in der unteren rechten Bildschirmecke außerdem noch eine schematische Skizze der jeweils ausgewählten Standardebene.

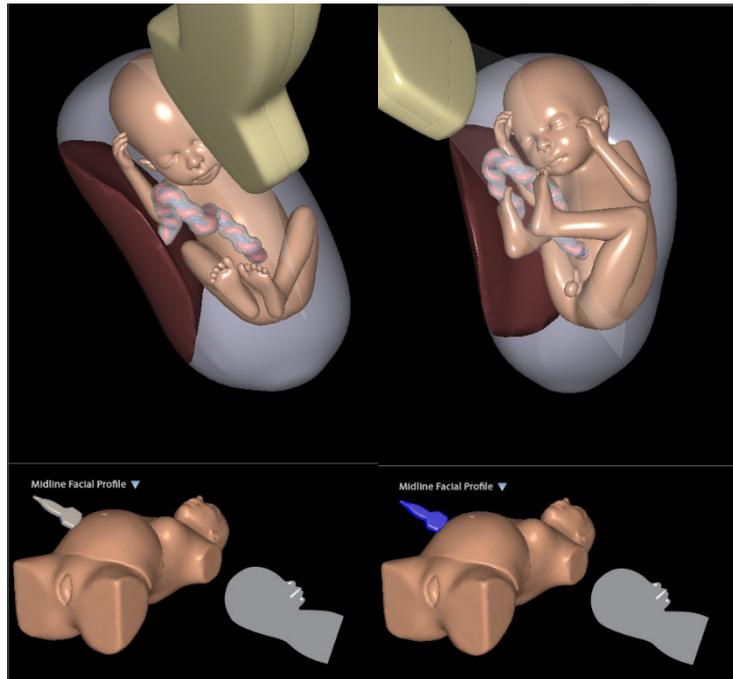


Abbildung 11: 3D-Map (oben) und „blue probe indicator“ (unten) als Hilfsmittel am Simulator  
Quelle: Handbuch des Simulators mit Genehmigung von © Surgical Sciences Sweden AB

### 5.1.3.2 „Cases“ – Die klinischen Fälle des Simulators

In den „Cases“ wird den Benutzenden jeweils zunächst in Textform eine Anamnese zum jeweiligen klinischen Fall präsentiert. Es stehen dabei vier verschiedene „Cases“ mit virtuellen Feten zur Verfügung. Im ersten Case trifft der Benutzer auf einen gesunden Fetus, im nachfolgenden Case auf einen Fetus mit hypoplastischem Linksherzsyndrom. Der dritte und vierte Case bieten einen Fetus mit Fallot'scher Tetralogie und einer dextro-Transposition der großen Gefäße. Darüber hinaus sind noch fünf Cases mit implementierten realen Ultraschallbildern nach konventionellem Prinzip verfügbar, hierunter drei Kinder mit Normalbefunden, ein Kind mit linkspersistierender oberer Hohlvene und ein Kind mit Pulmonalklappenstenose.

#### Medical history and complaints:

A 24-year old female G2P1, currently at 20+3 weeks of gestation, was referred for fetal echocardiography due to a previous child diagnosed with AVSD. No additional family history of congenital heart defects is known.

Abbildung 12: Fallvorstellung einer Schwangeren  
Vor Beginn jeder Simulation im Case-Modus zeigt der Simulator eine kurze Anamnese an, um die Simulation in ein klinisches Setting einzubetten  
Quelle: Eigene Aufnahme

Nach dem Lesen der Anamnese kann der Fetus sonographisch untersucht werden. Es stehen dabei sowohl die B-Bild- und M-Mode-Sonographie als auch die farbkodierte Duplexsonographie (inklusive Einstellung der Pulsrepetitionfrequenz), der PW-Doppler und Messungen der kardialen Biometrie zur Verfügung. Dadurch wird eine vollständige Untersuchung der fetalen Anatomie und Hämodynamik sowie des fetalen Herzrhythmus gemäß Leitlinien zur fetalen Echokardiographie der DEGUM (siehe Abschnitt 3.3) oder der AHA ermöglicht. Alle Hilfsmittel, die dem Benutzer im Task geboten werden, können in den Cases deaktiviert werden, um eine Untersuchung unter möglichst realitätsnahen Bedingungen zu ermöglichen.

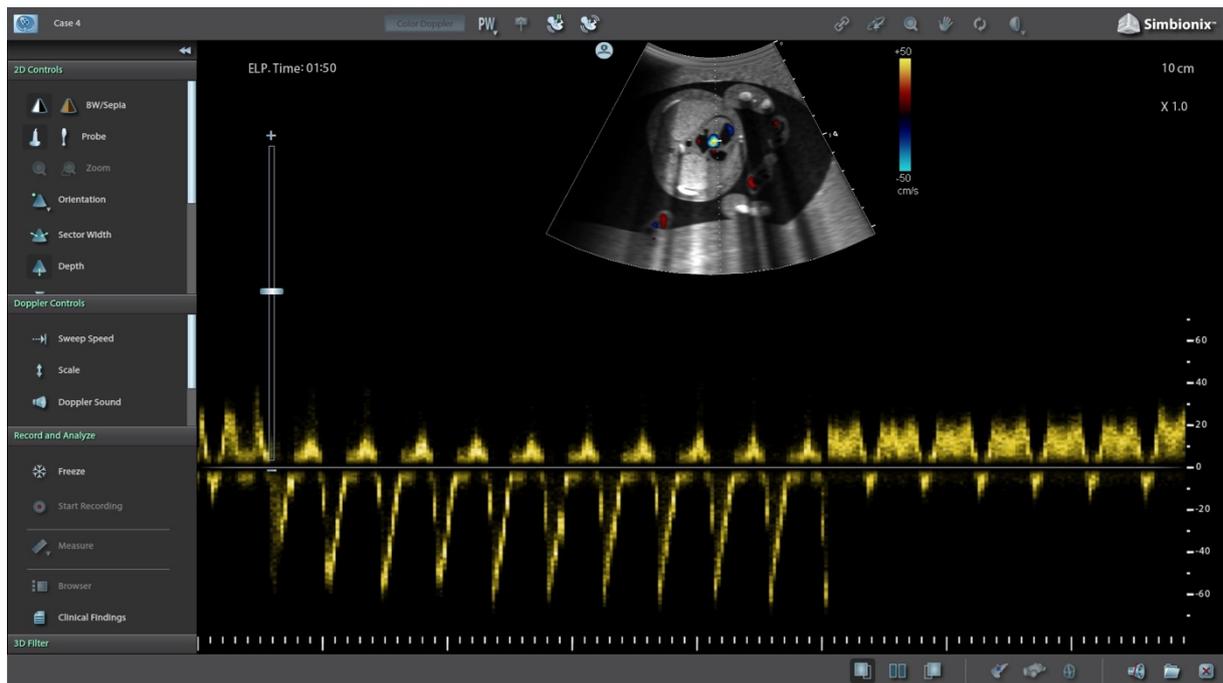


Abbildung 13: Bildschirm des U/S Mentor während einer Simulation im Case-Modus

*Links:* Leiste zur Bedienung der simulierten Geräteeinstellungen wie z.B. Tiefe, Sektorbreite, Bildorientierung oder Pulsrepetitionfrequenz. *Mitte oben:* kleines B-Bild, PW-Doppler-Modus. *Mitte unten:* die aufgezeichnete simulierte Dopplerkurve.

Quelle: Eigene Aufnahme

Im Anschluss kann der Benutzer einen klinischen Befund erstellen, welcher nach Beendigung der Untersuchung mit dem reellen Befund als Teil des Reports korreliert wird:

| Clinical Findings Summary                                      |   |   |
|--|---|---|
| Entered Clinical Findings                                      | Expected Clinical Findings                                      |   |
| Aorta structure: Transposition                                 | Aorta structure: Transposition                                  | ✓ |
| Aorta branching: Normal  | Aorta branching: Normal   | ✓ |
| Aorta size: Normal   | Aorta size: Normal  | ✓ |
| Aorta aortic flow: Antegrade                                   | Aorta aortic flow: Antegrade                                    | ✓ |
| Pulmonary valve stenosis: Absent                               | Pulmonary valve stenosis: Absent                                | ✓ |
| Pulmonary valve atresia: Absent                                | Pulmonary valve atresia: Absent                                 | ✓ |
| Pulmonary artery structure: Transposition                      | Pulmonary artery structure: Transposition                       | ✓ |
| Pulmonary artery size: Normal                                  | Pulmonary artery size: Normal                                   | ✓ |
| Pulmonary artery pulmonic flow: Antegrade                      | Pulmonary artery pulmonic flow: Antegrade                       | ✓ |
| Ductus arteriosus: Abnormal                                    | Ductus arteriosus: Normal                                       | ✗ |
| Heart rhythm: Normal   | Heart rhythm: Normal  | ✓ |
| Diagnosis: Complete transposition of the great arteries (d-... | Diagnosis: Complete transposition of the great arteries (d-tga) | ✓ |

Close

Abbildung 14: Feedback des Simulators zu klinischen Befunden

Die vom Benutzer eingegebenen klinischen Befunde (links) werden stets vom Simulator mit den tatsächlich vorliegenden klinischen Befunden (rechts) korreliert. Nach jeder Simulation kann die Übereinstimmung überprüft werden

Quelle: Eigene Aufnahme

## 5.2 Studiendesign

Dies ist eine prospektive, experimentelle didaktische Studie. Wir analysierten den Lernfortschritt von elf Medizinstudierenden über einen Trainingszeitraum von sechs Wochen individuellen Trainings am Symbionix U/S Mentor Ultraschallsimulator. Als Referenzgruppen testeten wir zehn Expert:innen für fetale Echokardiographie (mindestens DEGUM-Stufe II und > 1000 durchgeführte fetale Echokardiogramme) sowie zehn Ärzt:innen der Gynäkologie und Geburtshilfe.

Die Gruppe der Medizinstudierenden besuchte vor Beginn des Trainingszeitraumes eine 1,5-stündige Einführungsveranstaltung, in welcher die Studie vorgestellt und eine Übersicht über die Grundlagen der Pränataldiagnostik sowie der fetalen Echokardiographie gegeben wurde. Ab dem darauffolgenden Tag konnten die Studierenden sich selbstständig online über eine Doodle-Liste für individuelle Trainingstermine eintragen. Die ersten zwei Trainingseinheiten wurden von Tutor:innen begleitet, um die Teilnehmenden am Simulator anzuleiten. In den darauffolgenden fünf Wochen trainierten die Probanden zwei Mal pro Woche alleine am Simulator. Die erste Trainingseinheit war auf eine Dauer von 1,5 Stunden, inklusive halbstündiger Einführung am Simulator, angesetzt. Die nachfolgenden Trainingseinheiten dauerten jeweils eine Stunde. Insgesamt sammelten die Studierenden somit jeweils 12 Stunden individuelle hands-on-Trainingszeit am Simulator. Alle Studierenden bekamen einen eigenen Account in der MentorLearn-Lernplattform des Simulators. Über die Log-in-Zeiten der Accounts sowie zusätzlich eine händische Unterschriftenliste am Simulator wurde kontrolliert, ob die Studierenden ihre Trainingseinheiten wie abgesprochen absolvierten.

Der Simulator stand in den Räumlichkeiten des Simulationszentrums „FranziskusSIM“ des St. Franziskus-Hospitals Münster. Dieser Raum war über den gesamten Studienzeitraum allein für die Studie reserviert, sodass die Studierenden durchgängig eine ruhige Lern- und Trainingsatmosphäre vorfanden. Um eine maximale zeitliche Flexibilität zu ermöglichen, wurde der Zugang zum Raum über einen an der Krankenhausporte hinterlegten Schlüssel geregelt, wodurch die Studierenden täglich nach Wunsch zwischen 8 und 23 Uhr trainieren konnten.

Alle zwei Wochen, insgesamt also drei Mal während des Studienzeitraumes von sechs Wochen, wurde der Lernfortschritt der Studierenden analysiert. Anfängliche Überlegungen, die Studierenden zusätzlich vor Beginn der Studie im Sinne eines Prä-Testes zu testen, um Ausgangsdaten zum Vergleich zu haben, wurden angesichts der Inklusionskriterien (weniger als 10 Stunden Erfahrung in gynäkologischem oder geburtshilflichem Ultraschall) verworfen, da praktisch keinerlei Vorkenntnisse vorhanden waren.

Alle Studienteilnehmer gaben eine Einverständniserklärung zur Teilnahme an der Studie sowie eine Einwilligung zur Verarbeitung ihrer personenbezogenen Daten ab. Zusätzlich wurden alle Teilnehmenden am Ende der Studie mittels eines standardisierten Fragebogens befragt, wie schwierig sie die Einstellung der einzelnen Standardebenen am Simulator fanden. Allen ärztlichen Teilnehmenden der Studie wurde ein standardisierter Fragebogen zu den Vorerfahrungen ausgehändigt. Dabei wurden

speziell Vorerfahrungen im gynäkologischen Ultraschall erfragt. Der in der Studie verwendete Fragebogen befindet sich im Anhang (Abschnitt 12).

### **5.3 Akquise der Proband:innen**

Die Akquise der Studierenden erfolgte hauptsächlich über die Allgemeine Mailingliste der Fachschaft Medizin an der Universität Münster. Zusätzlich wurde auf Facebook in den Facebook-Gruppen der Semesterkohorten an der Universität Münster für eine Teilnahme an der Studie geworben. Die Teilnehmenden erhielten keine Aufwandsentschädigung. Geworben wurde mit dem direkt resultierenden Lernerfolg, zudem bekamen die Probanden in Aussicht gestellt, nach Abschluss der Studie ein Zertifikat über die Studienteilnahme und über ihren Lernerfolg zu bekommen.

Die Akquise der Ärztinnen und Ärzte erfolgte in Kooperation mit dem St. Franziskus-Hospital Münster (Level 1-Perinatalzentrum) durch direkte Einladung.

Die Akquise der DEGUM-Profis erfolgte durch direkte Ansprache des Studienleiters. Auch die Probanden aus den Gruppen der Ärzt:innen und DEGUM-Profis erhielten keine Aufwandsentschädigung.

### **5.4 Inklusionskriterien**

Elf Medizinstudierende zwischen dem dritten und sechsten Jahr wurden in die Studie eingeschlossen. Die Inklusionskriterien für die Gruppe der Studierenden waren:

- Immatrikulation an einer medizinischen Fakultät in Deutschland
- Vollendung des Faches Anatomie
- < 10 Stunden Erfahrung im gynäkologischen oder geburtshilflichen Ultraschall.

Einschlusskriterien für Probanden aus der Gruppe der DEGUM-Profis waren:

- mindestens zertifiziert nach DEGUM-Stufe II im gynäkologisch/geburtshilflichem Ultraschall
- mindestens 1000 durchgeführte fetale Echokardiogramme

Inklusionskriterien für die Gruppe der Ärzt:innen waren:

- Arbeit als Arzt / Ärztin in einer Klinik für Gynäkologie und Geburtshilfe

Bei der Auswahl der Teilnehmenden der Ärzt:innengruppe haben wir darauf geachtet, eine möglichst heterogene Gruppe zusammenzustellen, um so bei der Untersuchung ein möglichst breit gefächertes und aussagekräftiges Bild von den durchschnittlichen sonographischen Fertigkeiten zu bekommen. Es war uns wichtig, dass nicht ausschließlich Weiterbildungsassistent:innen aus den ersten Jahren die Gruppe bilden, sondern dass sich auch erfahrenere Ärzt:innen und Fachärzt:innen unter den Teilnehmenden dieser Gruppe befinden.

## 5.5 Datenerhebung

Die Untersuchungen des Lernfortschrittes der Studierenden erfolgte durch einen standardisierten Test: Die Probanden sollten innerhalb einer maximalen Zeitspanne von 30 Minuten alle Standardebenen in selbst gewählter Reihenfolge so schnell wie möglich aufsuchen und dokumentieren. Alle Hilfestellungen und Feedback-Mechanismen des Simulators waren dabei deaktiviert, um eine Testung unter möglichst realitätsnahen Bedingungen zu ermöglichen. Die Untersuchungen fanden folglich im Case-Modus des Simulators an einem gesunden, sich randomisiert bewegenden Fetus statt.

Bei den Lernfortschrittsanalysen wurden dabei jeweils alle elf Standardebenen der fetalen Echokardiographie, die im U/S Mentor implementiert sind (siehe Abschnitt 5.1.3) überprüft. Diese befinden sich in Einklang mit internationalen Leitlinien zur fetalen Echokardiographie u.a. der International Society for Ultrasound in Obstetrics and Gynecology (ISUOG), der American Heart Association (AHA) oder des American Institute for Ultrasound in Medicine (AIUM) [7,26].

Alle Lernfortschrittsüberprüfungen der Studierenden und alle Prüfungen der Referenzgruppen wurden mit einem Elgato Game Capture HD60 S+ Screenrecorder aufgenommen. Weiterhin verfügt der Simulator über ein integriertes Bildschirmrecording. Als Backup wurden zusätzlich auch diese Aufnahmen aller Prüfungen von der Festplatte des Simulators exportiert und extern gesichert. Darüber hinaus wurden während der Prüfungen alle Zeitpunkte, zu denen die Probanden das Ultraschallbild entweder „einfroren“, das Bild wieder „entfroren“ oder ohne „Einfrieren“ des Bildes das Suchen einer anderen Ebene starteten, handschriftlich festgehalten. Auf diesem Wege wurde lückenlos protokolliert, wie viel Zeit die Probanden jeweils zum Suchen der einzelnen Standardebenen benötigten.

Alle Teilnehmenden wurden nach der letzten Prüfung gebeten, einen standardisierten Fragebogen zur subjektiv empfundenen Schwierigkeit der Standardebenen auszufüllen. Auf einer stufenlosen Achse zwischen zwei Extremen („sehr leicht“ bis „sehr schwierig“) sollte dabei für jede Standardebene einzeln mit einem Kreuz die eigene subjektive Einschätzung markiert werden. Teilnehmende aus der Ärzt:innen- und Expert:innengruppe wurden darauf hingewiesen, dass falls eine Differenz zwischen der empfundenen Schwierigkeit am Simulator und der empfundenen Schwierigkeit in der klinischen Praxis bestehen sollte, sie diejenige empfundene Schwierigkeit angeben sollen, die sie in der klinischen Praxis empfinden. Außerdem wurden sie angewiesen, dass falls sie eine Standardebene nicht kennen, sie die entsprechende Standardebene durchstreichen sollten. Nachträglich wurden die Achsen mit Zahlenwerten von 0 bis 10 skaliert und die markierten Zahlenwerte abgelesen und ausgewertet. Ein Muster dieses Fragebogens befindet sich im Anhang (Abschnitt 12).

## 5.6 Nachbewertung der eingestellten Standardebenen

Im Laufe der Studie fiel wiederholt auf, dass während der Tests eingestellte Standardebenen, welche nach unserem Empfinden korrekt eingestellt waren, vom Simulator als fehlerhaft bewertet wurden. Aus diesem Grund haben wir uns dazu entschlossen, alle vom Simulator als falsch eingestuften Bilder von einem unabhängigen Expertengremium verblindet bewerten zu lassen. Das Expertengremium bestand aus drei erfahrenen Pränataldiagnostikern mit DEGUM-Zertifizierung mindestens auf Stufe II. Alle Mitglieder des Expertengremiums waren zudem Mitglieder der Qualitätssicherungskommission gynäkologischer Ultraschall der Kassenärztlichen Vereinigung Westfalen-Lippe.

Die Nachbewertung der Bilder erfolgte analog zum deutschen Schulnotensystem anhand der folgenden Kriterien:

Tabelle 2: Kriterien der Notenvergabe  
Erläuterung der Kriterien, die bei der Nachbewertung aller vom Simulator als falsch klassifizierten Standardebenen durch das Expertengremium angewandt wurden

| Noten                                    | Vergabekriterien der Noten  |
|--|---|
| „sehr gut“ (1) und „gut“ (2)             | Bilder, die sowohl die klinischen Anforderungen für Korrektheit der jeweiligen Standardebene als auch die Anforderungen des Simulators komplett erfüllten<br><i>Beispiel:</i> Darstellung sowohl der Einmündungen der oberen und unteren Hohlvene in das rechte Atrium als auch parallel eines Teiles der Aorta descendens in der Standardebene „Bicaval“ |
| „befriedigend“ (3) und „ausreichend“ (4) | Bilder, die die klinischen Anforderungen für Korrektheit der jeweiligen Standardebene erfüllten<br><i>Beispiel:</i> Darstellung nur der Einmündungen der oberen und unteren Hohlvene in das rechte Atrium ohne gleichzeitige Darstellung der Aorta descendens in der Standardebene „Bicaval“  |
| „mangelhaft“ (5) und „ungenügend“ (6)    | Bilder, die die klinischen Anforderungen für Korrektheit der jeweiligen Standardebene nicht erfüllten<br><i>Beispiel:</i> Darstellung nur einer der beiden Einmündungen der Hohlvenen in das rechte Atrium in der Standardebene „Bicaval“   |

Jedes Mitglied der Nachbewertungskommission bewertete die vom Simulator abgelehnten Bilder verblindet jeweils einzeln mit einer Note. Nachfolgend wurde als Durchschnitt aus den drei Einzelnoten eine Gesamtnote für jedes Bild berechnet. Alle Bilder, dessen Gesamtnote noch „ausreichend“ ergab, wurden von uns als korrekt eingestuft. Alle Bilder, dessen Durchschnittsnote „mangelhaft“ oder „ungenügend“ ergab, die also die klinischen Anforderungen an eine korrekte Standardebene nicht erfüllten, wurden von uns als falsch eingestuft.

## 5.7 Verarbeitung der Daten und statistische Analyse

Nach Abschluss der Datensammlung wurden die von den Proband:innen benötigten Zeitintervalle zum Aufsuchen der einzelnen Standardebenen mit Microsoft Excel kalkuliert. Vom Simulator als korrekt bewertete Ebenen wurden von uns ebenfalls als korrekt akzeptiert.

Die statistische Analyse wurde mit Hilfe von IBM SPSS Statistics 27 durchgeführt. Für jede Prüfung wurde eine Gesamtuntersuchungszeit („total time to completion“, TTC) des jeweiligen Probanden als Summe der Zeitwerte aller Einzelebenen der Testung im Case-Modus berechnet. Die Gesamtuntersuchungszeiten der Studierenden zu den drei verschiedenen Testzeitpunkten wurden mittels gepaarten nicht-parametrischen Tests (Friedmann und Wilcoxon) als abhängige Stichproben miteinander verglichen. Ungepaarte nicht-parametrische Tests (Kruskal-Wallis- und Mann-Whitney-U) wurden angewandt, um die Gesamtprüfungszeiten der Studierenden mit denen der Ärzt:innen- und Expert:innengruppe als unabhängige Stichproben zu vergleichen. Ein  $p < 0,05$  wurde als signifikant gewertet. Zusätzlich wurden die zum Aufsuchen der jeweiligen Einzelebenen benötigten Zeitintervalle („time to completion“) mittels Mann-Whitney-U- und Wilcoxon-Tests verglichen.

Weiterhin wurde für jeden Testzeitpunkt der Studierenden sowie für beide Referenzgruppen die Rate der korrekt eingestellten Standardebenen („rate of appropriate images“, RAI) berechnet. Mittels Friedmann-Test als gepaartem nicht-parametrischen Test verglichen wir die Ergebnisse der Studierenden als abhängige Stichproben. Der Kruskal-Wallis-Test als ungepaarter nicht-parametrischer Tests wurde angewandt, um die Ergebnisse der Studierenden mit denen der Ärzt:innen- und Expert:innengruppe als unabhängige Stichproben zu vergleichen.

Als Korrelat der Schwierigkeit einer Standardebene analysierten wir die folgenden drei Parameter:

- die Rate an korrekt bzw. falsch eingestellten Standardebenen je nach Standardebene
- die durchschnittliche Zeit, die zum Einstellen der Standardebene benötigt wurde
- die von den Proband:innen subjektiv empfundene Schwierigkeit der Standardebene.

Die beiden ersten Parameter wurden durch die Lernfortschrittsanalysen erhoben. Die von den Proband:innen empfundene Schwierigkeit wurde mittels eines Fragebogens nach Abschluss der Studie erhoben.

Da die Streubreite insbesondere der im Rahmen der Lernfortschrittsanalysen erhobenen Daten zur Schwierigkeit der Ebenen hoch war, haben wir bei der Analyse dieser Daten auf eine vergleichende Statistik und Signifikanztests bewusst verzichtet. Stattdessen wurde hier eine rein deskriptive Analyse durchgeführt.

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Zusammensetzung der Referenzgruppen

#### 6.1.1 Gruppe der Ärztinnen und Ärzte

In die Referenzgruppe der Ärztinnen und Ärzte wurden zehn Gynäkolog:innen eingeschlossen. Neun der zehn Teilnehmenden waren zum Zeitpunkt der Studie an einem Level-1-Perinatalzentrum mit über 2.500 jährlichen Geburten, eine Teilnehmerin war an einer perinatalen Schwerpunktlinik mit 700 jährlichen Geburten angestellt. Der Ausbildungsstand in der Gruppe war heterogen:

Tabelle 3: Zusammensetzung der Ärzt:innengruppe in Bezug auf den Ausbildungsstand

|   |   |
|---|---|
| Assistenzärzt:innen im 1. Jahr der Facharztausbildung | 1 |
| Assistenzärzt:innen im 2. Jahr der Facharztausbildung | 3 |
| Assistenzärzt:innen im 3. Jahr der Facharztausbildung | - |
| Assistenzärzt:innen im 4. Jahr der Facharztausbildung | 2 |
| Assistenzärzt:innen im 5. Jahr der Facharztausbildung | 2 |
| Fachärzt:innen  | 1 |
| Oberärzt:innen  | 1 |

Ein Teilnehmer war im gynäkologisch-geburtshilflichen Ultraschall nach DEGUM I zertifiziert, die anderen Teilnehmenden hatten keine DEGUM-Zertifizierung.

#### 6.1.2 Gruppe der Expertinnen und Experten

Alle Teilnehmenden der Expert:innengruppe hatten gemäß der Einschlusskriterien über 1.000 fetale Echokardiographien selbst durchgeführt. Zudem waren alle Teilnehmenden nach den Richtlinien der gynäkologischen Sektion der DEGUM auf Stufe II zertifiziert. Zwei Teilnehmende aus der Expert:innengruppe waren zusätzlich als DEGUM-Kursleiter zertifiziert und vier Teilnehmende als Ultraschallausbilder der Kassenärztlichen Vereinigung Westfalen-Lippe aktiv.

## 6.2 Vorerfahrung der Referenzgruppen – Auswertung der Fragebögen

Zwei der zehn Ärzt:innen hatten jemals zuvor eine komplette fetale Echokardiographie durchgeführt, acht nie. Die Auswertung der Fragebögen zu den bereits durchgeführten Ultraschalluntersuchungen der Referenzgruppen brachte die folgenden Resultate:

Tabelle 4: Ergebnisse der Befragung zu den Vorerfahrungen der Ärzt:innen- und Expert:innengruppe

|   | <b>Gruppe der<br/>Ärzt:innen</b> | <b>Gruppe der<br/>DEGUM-Profis</b> |
|---|----------------------------------|------------------------------------|
| <b>Median der durchgeführten gynäkologisch-<br/>geburtshilflichen Ultraschalluntersuchungen</b> | 750                              | 15.000                             |
| <b>Median der durchgeführten fetalen Biometrien nach<br/>Mutterschaftsrichtlinien</b>           | 750                              | 8.000                              |
| <b>Median der durchgeführten feindiagnostischen<br/>Ultraschalluntersuchungen nach DEGUM II</b> | 0                                | 6.000                              |
| <b>Median der durchgeführten kompletten fetalen<br/>Echokardiogramme</b>                        | 0                                | 2.500                              |
| <b>Median der selbst gesehenen Herzfehler</b>   | 0                                | 150                                |
| <b>Median der eigenständig diagnostizierten Herzfehler</b>                                      | 0                                | 80                                 |

## 6.3 Rücklaufquote und Vollständigkeit der Daten

Alle Studierenden haben das sechswöchige Training inklusive der Lernfortschrittsanalysen komplett absolviert, es gab keine Drop-outs. Die Daten zur Korrektheit der Standardebenen sowie der zum Einstellen der Ebenen benötigten Zeitintervalle liegen ebenfalls vollständig vor.

Von den 20 Teilnehmenden aus beiden Referenzgruppen gaben 19 den Fragebogen zur Schwierigkeitseinschätzung ab. Eine Person aus der Ärzt:innengruppe gab keinen Bogen ab. Alle elf Studierenden gaben vollständige Schwierigkeitseinschätzungsbögen ab.

## 6.4 Nachbewertung der vom Simulator als falsch klassifizierten Standardebenen

Im Rahmen der Prüfungen wurden insgesamt 189 eingestellte Standardebenen vom Simulator als falsch eingestuft. In der Nachbewertung durch das Expertengremium wurden lediglich knapp 12% (22 von 189) dieser vom Simulator abgelehnten Ebenen als tatsächlich klinisch ungenügend klassifiziert. Indessen wurden 37% (70 von 189) der untersuchten Ebenen mit der Schulnote „sehr gut“ oder „gut“ bewertet – waren aus Sicht des Expertengremiums also sowohl nach klinischen Kriterien als auch nach den strengen Kriterien des Simulators fehlerfrei eingestellt worden.

Tabelle 5: Notenverteilung der Gesamtnoten des Expertengremiums

| Gesamtnote         | Anzahl |
|--------------------|--------|
| „sehr gut“ (1)     | 10     |
| „gut“ (2)          | 60     |
| „befriedigend“ (3) | 55     |
| „ausreichend“ (4)  | 42     |
| „mangelhaft“ (5)   | 19     |
| „ungenügend“ (6)   | 3      |

## 6.5 Vergleich der Gruppen hinsichtlich der Rate korrekt eingestellter Ebenen

Bei der ersten Lernfortschrittsüberprüfung nach einem Trainingszeitraum von zwei Wochen stellten die Studierenden bei der Testung im Case-Modus über 95% der Standardebenen korrekt ein. Diese Rate blieb bei den Überprüfungen nach vier und sechs Wochen konstant. Auch die Expertengruppe stellte über 95% der Standardebenen korrekt ein. In der Ärzt:innengruppe blieb der Anteil der korrekt eingestellten Standardebenen mit 92% etwas geringer, wenn auch nicht statistisch signifikant ( $p < 0,576$ ). Alle anderen statistischen Tests waren ebenfalls nicht signifikant, sodass geschlossen werden kann, dass die Rate der korrekt eingestellten Ebenen in allen Gruppen annäherungsweise gleich war.

Tabelle 6: Rate korrekt eingestellter Standardebenen

Die Rate korrekt eingestellter Standardebenen der Studierenden im Test nach zwei, vier und sechs Wochen Trainingszeit sowie der Ärzt:innen- und Expert:innengruppe.

Quelle: Übersetzt nach Janzing P, Nourkami-Tutdibi N, Tutdibi E, Freundt P, von Ostrowski T, Langer M, Zemlin M, Steinhard J (2023) Controlled prospective study on ultrasound simulation training in fetal echocardiography: FESIM II. Arch Gynecol Obstet

| Gruppe                        | Rate der korrekt eingestellten Standardebenen (%) |
|-------------------------------|---|
| Studierende nach zwei Wochen  | 96,7 ±7.4   |
| Studierende nach vier Wochen  | 96,7 ±4.6   |
| Studierende nach sechs Wochen | 95,9 ±1.1   |
| Ärzt:innengruppe              | 91,8 ±13.2  |
| Expert:innengruppe            | 95,5 ±7.7   |

## 6.6 Vergleich der Gruppen hinsichtlich der Gesamtuntersuchungszeit (TTC)

Die Studierenden zeigten über den sechswöchigen Trainingszeitraum eine Verkürzung sowohl der Gesamtuntersuchungszeit (total time to completion, TTC) als auch der zum Einstellen der Einzelebenen benötigten Zeit. Friedman- und Wilcoxon-Tests zeigen eine signifikante ( $p < 0,05$ ) schrittweise Verkürzung der TTC zwischen dem ersten und zweiten sowie dem zweiten und dritten Testzeitpunkt.

Der Mann-Whitney-U-Test zeigt, dass die Studierenden nach sechs Wochen beim Einstellen der Standardebenen signifikant schneller als die Ärzt:innengruppe ( $p < 0,001$ ) und nicht mehr signifikant langsamer als die Expert:innengruppe ( $p = 0,944$ ) war. Die Ärzt:innengruppe war signifikant langsamer als die Expert:innengruppe ( $p < 0,001$ ).

Tabelle 7: Gesamtuntersuchungszeiten

Die Gesamtuntersuchungszeiten der Studierenden nach 2, 4 und 6 Wochen Trainingszeit sowie der Ärzt:innen- und Expert:innengruppe im Vergleich.

Quelle: übersetzt nach Janzing P, Nourkami-Tutdibi N, Tutdibi E, Freundt P, von Ostrowski T, Langer M, Zemlin M, Steinhard J (2023) Controlled prospective study on ultrasound simulation training in fetal echocardiography: FESIM II. Arch Gynecol Obstet

|                           | n  | Mittelwert | Standardabweichung | Standardfehler | 95%-Konfidenzintervall |            | Minimum | Maximum |
|---------------------------|----|------------|--------------------|----------------|------------------------|------------|---------|---------|
|                           |    |            |                    |                | Untergrenze            | Obergrenze |         |         |
| Studierende nach 2 Wochen | 11 | 847,09     | 352,605            | 106,314        | 610,21                 | 1083,97    | 383     | 1609    |
| Studierende nach 4 Wochen | 11 | 565,91     | 442,379            | 133,382        | 268,71                 | 863,1      | 128     | 1800    |
| Studierende nach 6 Wochen | 11 | 289,27     | 221,511            | 66,788         | 140,46                 | 438,09     | 57      | 825     |
| Ärzt:innen                | 10 | 951,3      | 438,826            | 138,769        | 637,38                 | 1265,22    | 454     | 1800    |
| Expert:innen              | 10 | 269,2      | 128,44             | 40,616         | 177,32                 | 361,08     | 104     | 543     |

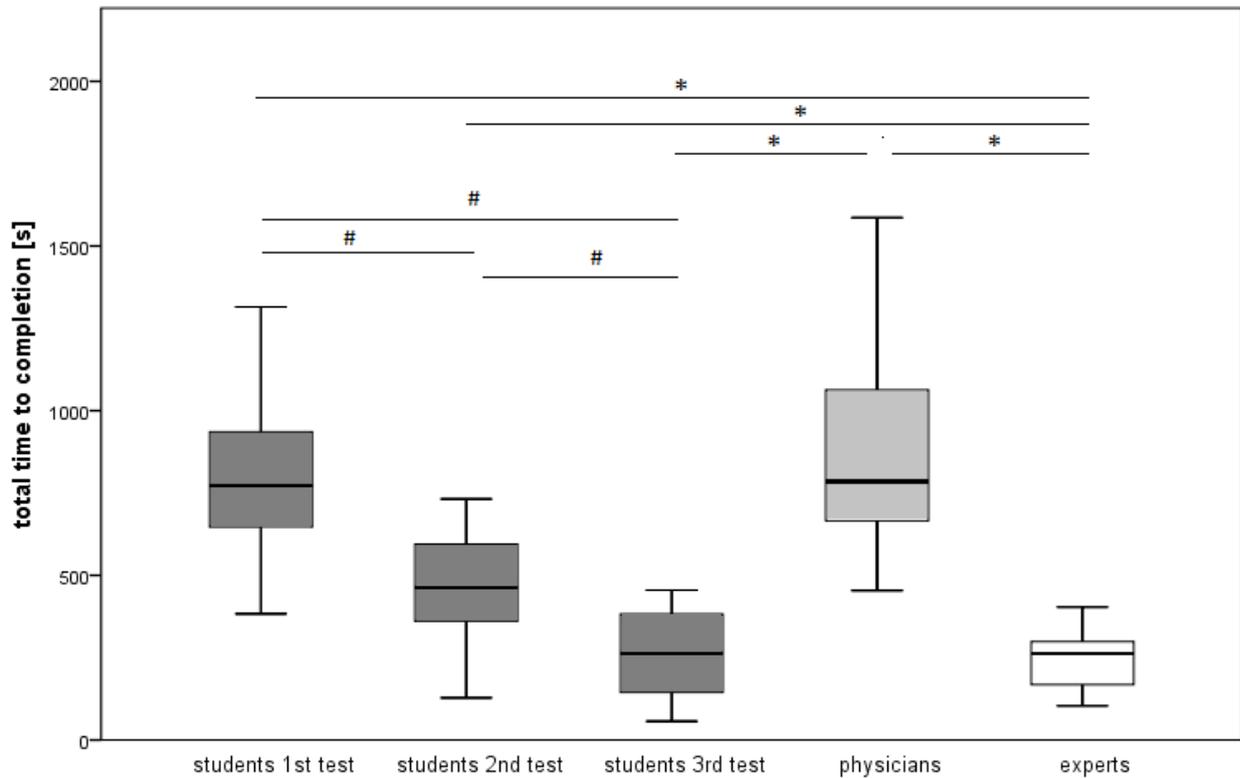


Abbildung 15: Gesamtuntersuchungszeit ("total time to completion", TTC) in Sekunden von Studierenden nach 2, 4 und 6 Wochen Trainingszeit sowie der Ärzt:innen- und Expert:innengruppe im Vergleich.

#: signifikanter Unterschied innerhalb der Studierendengruppe mit Wilcoxon-Test ( $p < 0,05$ ),

\*: signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen mit Mann-Whitney-U-Test ( $p < 0,05$ ).

Quelle: Janzing P, Nourkami-Tutdibi N, Tutdibi E, Freundt P, von Ostrowski T, Langer M, Zemlin M, Steinhard J (2023) Controlled prospective study on ultrasound simulation training in fetal echocardiography: FESIM II. Arch Gynecol Obstet

## 6.7 Vergleich der Gruppen hinsichtlich der Untersuchungszeit von Einzelebenen

Signifikante ( $p < 0,05$ ) Unterschiede der zum Einstellen von einzelnen Standardebenen benötigten Zeit wurden bei 6 der 11 Standardebenen gefunden. Eine zusammenfassende Darstellung findet sich in Abbildung 16 [72].

Die Standardebenen linksventrikulärer Ausflusstrakt, bicaval, duktaler Bogen und die hohe kurze Achse wurden von den Studierenden (während der letzten Testung nach Abschluss des sechswöchigen Trainings) signifikant schneller eingestellt als von der Ärzt:innengruppe. Die Expert:innengruppe stellte den duktaalen Bogen signifikant schneller ein als die Studierenden. Der Abdomenquerschnitt, Vierkammerblick, linksventrikuläre Ausflusstrakt, bicavale Blick und den duktaale Bogen wurden von den Expert:innen signifikant schneller eingestellt als von der Ärzt:innengruppe.

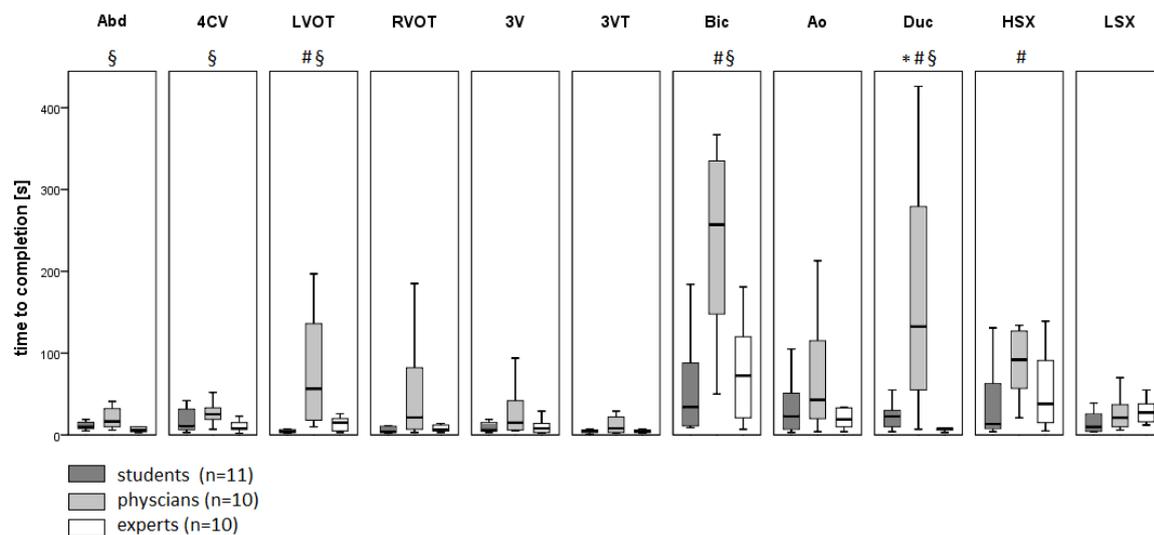


Abbildung 16: Benötigte Zeit zum Einstellen der einzelnen Standardebenen ("time to completion") in Sekunden von Studierenden (nach 6 Wochen Training), Ärzt:innen- und Expert:innengruppe.

Die Gruppen wurden mittels Mann-Whitney-U-Test verglichen, ein  $p < 0,05$  dabei als signifikant gewertet.

#: signifikanter Unterschied zwischen Studierenden und Ärzt:innen, \*: signifikanter Unterschied zwischen Studierenden und Expert:innen, §: signifikanter Unterschied zwischen Ärzt:innen und Expert:innen.

Standardebenen: Abd: Abdomenquerschnitt, 4CV: Vierkammerblick, LVOT: linksventrikulärer Ausflusstrakt, RVOT: rechtsventrikulärer Ausflusstrakt, 3V: Dreigeäßblick, 3VT: Dreigeäß-Trachea-Blick, Bic: bicavaler Blick, Ao: Aortenbogen, Duc: duktaaler Bogen, HSX: hoher Kurzachsenschnitt, LSX: tiefer biventrikulärer Kurzachsenschnitt.

Quelle: Janzing P, Nourkami-Tutdibi N, Tutdibi E, Freundt P, von Ostrowski T, Langer M, Zemlin M, Steinhard J (2023) Controlled prospective study on ultrasound simulation training in fetal echocardiography: FESIM II. Arch Gynecol Obstet

## 6.8 Vergleich der Gruppen hinsichtlich der Schwierigkeitseinschätzung der Ebenen

Insgesamt gab es sowohl zwischen den Gruppen als auch zwischen den Einzelebenen innerhalb der Gruppen signifikante ( $p < 0,05$ ) Unterschiede bei der Einschätzung des Schwierigkeitsniveaus. Eine zusammenfassende Darstellung findet sich in Abbildung 17. Im Gruppenvergleich bewertete die Expert:innengruppe die Schwierigkeitsniveaus der Standardebenen am niedrigsten. Die Ärzt:innengruppe gab die höchsten empfundenen Schwierigkeitsniveaus an, die Studierenden befanden sich zwischen Ärzt:innen- und Expert:innengruppe.

Signifikante Unterschiede zwischen den subjektiv empfundenen Schwierigkeitsniveaus der Einzelebenen fanden sich bei 9 von 11 Standardebenen: Wie in Abbildung 17 dargelegt, wurde das Einstellen der Standardebenen 4CV, LVOT, RVOT, 3V, 3VT, Bic, Ao und Duc von der Ärzt:innengruppe als signifikant schwerer empfunden als von der Expert:innengruppe. Die Ärzt:innengruppe empfand die Ebenen LVOT, RVOT, 3V, 3VT, Bic und LSX signifikant schwerer als die Studierenden. Der Vierkammerblick, der Drei-Gefäß-Blick (3V) sowie der aortale und duktale Bogen wurde von den Studierenden signifikant schwerer empfunden als von den Expert:innen.

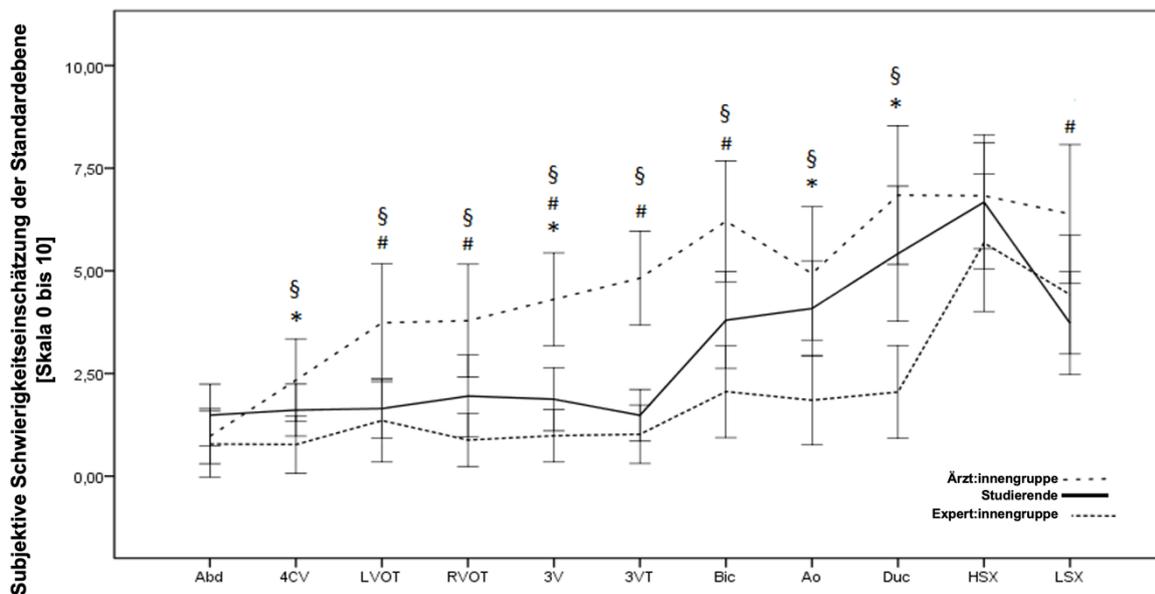


Abbildung 17: Die von den Gruppen subjektiv empfundene Schwierigkeit der Standardebenen

Standardebenen: Abd: Abdomenquerschnitt, 4CV: Vierkammerblick, LVOT: linksventrikulärer Ausflusstrakt, RVOT: rechtsventrikulärer Ausflusstrakt, 3V: Dreigefäßblick, 3VT: Dreigefäß-Trachea-Blick, Bic: bicavaler Blick, Ao: Aortenbogen, Duc: duktaler Bogen, HSX: hoher Kurzachsenschnitt, LSX: tiefer biventrikulärer Kurzachsenschnitt.

\*: signifikanter Unterschied zwischen Studierenden und Expert:innen ( $p < 0,05$  im Mann-Whitney U-Test),

#: signifikanter Unterschied zwischen Studierenden und Ärzt:innen ( $p < 0,05$  im Mann-Whitney U-Test),

§: signifikanter Unterschied zwischen Ärzt:innen und Expert:innen ( $p < 0,05$  im Mann-Whitney U-Test)

Quelle: Eigene Darstellung

## 6.9 Vergleich der Standardebenen hinsichtlich der Schwierigkeitseinschätzung

In Tabelle 8 sind die Mittelwerte der empfundenen Schwierigkeit der Standardebenen je nach Gruppe aufgelistet. Die Einstellung der transversalen Standardebenen wurde dabei durchschnittlich tendenziell als einfacher empfunden als die Einstellung der sagittalen und schrägen Standardebenen. Zwei Teilnehmende aus der Ärzt:innengruppe strichen zehn der elf Standardebenen (jeweils alle Ebenen außer der Abdomen-Ebene) durch, gaben damit also an, diese Standardebenen nie zuvor angewendet zu haben.

Tabelle 8: Subjektiv empfundene Schwierigkeit

Mittelwerte der empfundenen Schwierigkeit aus der Befragung zur empfundenen Schwierigkeit der Standardebenen je nach Gruppe (Stufenlose Skala, Wiedergabe hier mit Zahlenwerten 1 – 10)

| Standardebene | Studierende | Ärzt:innen | Expert:innen |
|---------------|-------------|------------|--------------|
| Abd           | 1,4864      | 0,85       | 0,781        |
| 4CV           | 1,6091      | 2,1286     | 0,77         |
| LVOT          | 1,6455      | 3,7357     | 1,355        |
| RVOT          | 1,95        | 3,7857     | 0,88         |
| 3V            | 1,8727      | 4,3071     | 0,985        |
| 3VT           | 1,4818      | 4,8214     | 1,02         |
| Bic           | 3,8         | 6,2071     | 2,06         |
| Ao            | 4,0818      | 4,9357     | 1,85         |
| Duc           | 5,4182      | 6,8429     | 2,05         |
| HSX           | 6,6727      | 6,8286     | 5,6813       |
| LSX           | 3,7273      | 6,3857     | 4,4222       |

## 6.10 Vergleich der Standardebenen hinsichtlich ihrer korrekten Darstellung

Im Rahmen der Tests sind insgesamt 27 Mal Standardebenen nicht korrekt eingestellt worden. In 5 dieser 27 Ebenen hatten die Teilnehmenden es nicht geschafft, eine Standardebene einzufrieren. Bei 22 der insgesamt 27 nicht-korrekten Ebenen war die von den Teilnehmenden abgespeicherte Ebene nach Ansicht des Expertengremiums falsch. Jede Standardebene sollte im Rahmen der Tests insgesamt 53 Mal eingestellt werden (drei Mal von jeweils elf Studierenden, zwei Mal von jeweils zehn Ärzt:innen / Expert:innen).

Tabelle 9: Ebenenvergleich von absoluter Anzahl und relativem Anteil der nicht korrekt eingestellten Standardebene

| <b>Standardebene</b>                     | <b>Absolute Anzahl der nicht-korrekten Einstellungen</b> | <b>Relativer Anteil der nicht-korrekten Einstellungen an allen Einstellungen</b> |
|--|--|--|
| Abdomenquerschnitt (Abd)                 | 0  | 0,00%  |
| Vierkammerblick (4CV)                    | 1  | 1,89%  |
| Linksventrikulärer Ausflusstrakt (LVOT)  | 2  | 3,77%  |
| Rechtsventrikulärer Ausflusstrakt (RVOT) | 1  | 1,89%  |
| Dreigefäßblick (3V)                      | 1  | 1,89%  |
| Dreigefäß-Trachea-Blick (3V-T)           | 1  | 1,89%  |
| Bicaval (Bic)                            | 3  | 5,66%  |
| Aortenbogen (Ao)                         | 4  | 7,55%  |
| Duktaler Bogen (Duc)                     | 6  | 11,32%   |
| Hoher Kurzschnitt (HSX)                  | 6  | 11,32%   |
| Tiefer Kurzschnitt (LSX)                 | 2  | 3,77%  |

### 6.11 Vergleich der Standardebene hinsichtlich ihrer Untersuchungszeit

Für die Einstellung der einzelnen Standardebene benötigten die Teilnehmenden unterschiedlich lange. Eine zusammenfassende Darstellung dieser „time to completion“ je nach Standardebene findet sich in Abbildung 16. Die zu Grunde liegenden Daten sind in Tabelle 10 für die Studierenden, in Tabelle 11 für die Ärzt:innengruppe sowie in Tabelle 12 für die Expert:innengruppe zu finden.

Die Streubreite dieser Daten ist sehr hoch. Exemplarisch benötigten die Studierenden für die Einstellung der Standardebene des duktales Bogens (Duc) im arithmetischen Mittel ca. 45 Sekunden - bei einer Standardabweichung von 82 Sekunden. Aus diesem Grund wurde an dieser Stelle auf eine Signifikanztestung und vergleichende Statistik verzichtet.

Für die Einstellung der transversalen Ebenen des Abdomen-Transversalschnitts, des Vierkammerblicks, der beiden Dreikammerblicke sowie die Ebene des tiefen Kurzschnitts benötigten alle drei Gruppen wenig Zeit. Die Ausflusstrakt-Ebenen wurden von Studierenden und Expert:innen ebenfalls sehr schnell eingestellt, während die Assistenzärzt:innen etwas mehr Zeit benötigten. Für die Einstellung der sagittalen Standardebene (bicaval, Aortenbogen, duktales Bogen) und des hohen Kurzschnitts benötigten alle drei Gruppen mehr Zeit, außerdem zeigten sich hier zwischen den Gruppen deutlich größere Unterschiede in Bezug auf die benötigte Untersuchungszeit.

Tabelle 10: Untersuchungszeit der einzelnen Standardebene(n) der Studierenden  
 Die Untersuchungszeit der einzelnen Standardebene(n) (in Sekunden) bei der dritten Lernfortschrittsanalyse nach Abschluss des Trainings

| <b>Studierende – Untersuchungszeit von Einzelebenen</b> |                |                     |            |             |             |
|---|----------------|---------------------|------------|-------------|-------------|
| <b>Standardebene</b>                                    | Mittelwert [s] | Std.-Abweichung [s] | Median [s] | Minimum [s] | Maximum [s] |
| <b>Abd</b>  | 13,36          | 9,862               | 10         | 5           | 40          |
| <b>4CV</b>  | 22,36          | 26,024              | 11         | 3           | 90          |
| <b>LVOT</b>   | 8,18           | 11,973              | 4          | 2           | 43          |
| <b>RVOT</b>   | 19             | 32,542              | 4          | 2           | 102         |
| <b>3V</b>   | 9,09           | 6,348               | 6          | 3           | 19          |
| <b>3VT</b>  | 11,64          | 21,579              | 5          | 1           | 75          |
| <b>Bic</b>  | 58,64          | 66,474              | 34         | 9           | 184         |
| <b>Ao</b>   | 33,27          | 33,061              | 23         | 3           | 105         |
| <b>Duc</b>  | 45,27          | 82,462              | 23         | 4           | 290         |
| <b>HSX</b>  | 51             | 75,001              | 13         | 4           | 242         |
| <b>LSX</b>  | 17,45          | 18,398              | 10         | 4           | 58          |

Tabelle 11: Untersuchungszeit der einzelnen Standardebene(n) (in Sekunden) der Ärzt:innengruppe

| <b>Ärzt:innengruppe – Untersuchungszeit von Einzelebenen</b> |                |                     |            |             |             |
|--|----------------|---------------------|------------|-------------|-------------|
| <b>Standardebene</b>   | Mittelwert [s] | Std.-Abweichung [s] | Median [s] | Minimum [s] | Maximum [s] |
| <b>Abd</b>   | 25,4           | 25,132              | 16,5       | 6           | 90          |
| <b>4CV</b>   | 27,1           | 14,51               | 25,5       | 7           | 52          |
| <b>LVOT</b>  | 80,2           | 68,812              | 56,5       | 10          | 197         |
| <b>RVOT</b>  | 75,7           | 122,316             | 21,5       | 3           | 385         |
| <b>3V</b>  | 31,7           | 36,579              | 15         | 5           | 101         |
| <b>3VT</b>   | 20,8           | 35,348              | 8          | 2           | 118         |
| <b>Bic</b>   | 241,2          | 112,252             | 257        | 50          | 367         |
| <b>Ao</b>  | 78,67          | 77,706              | 43         | 4           | 213         |
| <b>Duc</b>   | 174,3          | 156,709             | 132,5      | 7           | 426         |
| <b>HSX</b>   | 99,78          | 64,087              | 92         | 21          | 233         |
| <b>LSX</b>   | 26,2           | 20,28               | 21         | 6           | 70          |

Tabelle 12: Untersuchungszeit der einzelnen Standardebenen (in Sekunden) der Expert:innengruppe

| <b>Expert:innengruppe – Untersuchungszeit von Einzelebenen</b> |                |                     |            |             |             |
|--|----------------|---------------------|------------|-------------|-------------|
| <b>Standardebene</b>   | Mittelwert [s] | Std.-Abweichung [s] | Median [s] | Minimum [s] | Maximum [s] |
| <b>Abd</b>   | 10,1           | 10,713              | 6          | 3           | 36          |
| <b>4CV</b>   | 12,7           | 10,594              | 8          | 2           | 38          |
| <b>LVOT</b>  | 13,7           | 8,341               | 15         | 3           | 26          |
| <b>RVOT</b>  | 10,7           | 11,87               | 6,5        | 3           | 43          |
| <b>3V</b>  | 11,1           | 9,837               | 8          | 2           | 29          |
| <b>3VT</b>   | 8,7            | 14,606              | 4,5        | 2           | 50          |
| <b>Bic</b>   | 78,7           | 62,315              | 72,5       | 7           | 181         |
| <b>Ao</b>  | 25,7           | 23,467              | 19         | 4           | 86          |
| <b>Duc</b>   | 15,8           | 22,054              | 8          | 3           | 74          |
| <b>HSX</b>   | 52,5           | 45,16               | 38         | 5           | 139         |
| <b>LSX</b>   | 29,5           | 14,254              | 27,5       | 12          | 55          |

## **6.12 Korrelation von empfundener Schwierigkeit und Geschwindigkeit der Ebenendarstellung**

Die subjektive Schwierigkeitsbewertung und die zum Aufsuchen der Standardebenen benötigte Zeit korrelierten hochsignifikant (Pearson-Korrelationskoeffizient 0,388;  $p < 0.001$ ).

## 7 Diskussion

### 7.1 Zentrale Resultate der Studie

In der Studie konnten wir Belege dafür sammeln, dass simulationsbasiertes Ultraschalltraining zum Erlernen der fetalen Echokardiographie eine effektive und erfolgreiche Methode ist. Die Studierenden schafften es schon nach vier Stunden Trainingszeit, ca. 95% der Standardebenen am bewegten Kind ohne Hilfsmittel korrekt einzustellen. Nach nur zwölf Stunden strukturierten Simulationstrainings waren die Studierenden dazu in der Lage, die Standardebenen am Simulator ähnlich schnell und mit gleicher Rate korrekt eingestellter Ebenen einzustellen wie die Gruppe der erfahrenen Pränataldiagnostiker:innen.

Das Kompetenzniveau der Ärzt:innengruppe im Einstellen der Standardebenen der fetalen Echokardiographie am Simulator war ungefähr vergleichbar mit der Studierendengruppe nach zwei Wochen Simulatortraining. Beachtenswert ist dabei, dass die Ärzt:innengruppe in puncto Sonographie-Vorerfahrung im Durchschnitt den deutschen Facharztstandard erfüllt: Sie hatte vor Beginn der Studie im Median 750 gynäkologisch-geburtshilfliche Ultraschalluntersuchungen durchgeführt. Laut Weiterbildungsordnung sind derzeit nur 300 Ultraschalluntersuchungen der utero-plazento-fetalen Einheit für die Facharztprüfung und damit als Zugang zur Teilnahme am Screening gefordert [11]. Die Daten der vorliegenden Studie zeigen, dass nicht nur Neulinge im pränatalen Ultraschall, sondern auch bereits praktizierende Ärzt:innen bzw. Gynäkolog:innen von einem Training am Ultraschallsimulator signifikant profitieren können.

Simulationsbasiertes Ultraschalltraining als Ergänzung zu konventionellem gynäkologischen Ultraschalltraining ist nachgewiesen effektiv [8,119,124,125]. Die idealen Lernbedingungen am Simulator und die sehr schnelle Lernkurve der Studierenden in dieser Studie lassen die Annahme zu, dass ein strukturiertes Simulationstraining für Neulinge in der Phase zu Beginn des Ultraschalltrainings sogar effektiver sein könnte als das konventionelle Schallmodell-basierte Training. Besonders die schwangerenunabhängige rund-um-die-Uhr-Verfügbarkeit ist ein sehr großer Vorteil von simulationsbasierten Trainingsmethoden. Auf diesem Weg ermöglicht der Simulator konzentriertes, gezieltes und strukturiertes Ultraschalltraining in einem geschützten Setting, das in dieser Form im Klinikalltag nicht möglich ist [115].

## 7.2 Gründe der niedrigen pränatalen Detektionsrate angeborener Herzfehler in Deutschland

Die Qualität der Ultraschalldiagnostik ist noch mehr als bei anderen bildgebenden Modalitäten vom Qualifikationsniveau der Untersuchenden abhängig [15,105]. Folgerichtig zeigt auch die pränatale Erkennungsrate von Herzfehlern eine starke Abhängigkeit von der Qualifikation der Untersuchenden. Mehrere Studien haben nachgewiesen, dass die pränatalen Detektionsraten in Zentren höherer Versorgungsstufe und Spezialisierung besser sind als in nicht-spezialisierten Praxen. Spezialisierte Untersucher erreichen auch in maternalen Niedrigrisikopopulationen pränatale Detektionsraten von bis zu fast 90% [38,107,116,120]. Zum Teil kann diese sehr große Differenz der Detektionsraten darauf zurückgeführt werden, dass unerfahrenere Untersucher:innen bei der Untersuchung des Herzens oft lediglich die Standardebene des Vierkammerblickes einstellen [120]. Eine Vielzahl der kindlichen Herzfehler, darunter viele ductusabhängige Defekte, gehen allerdings insbesondere mit Veränderungen im Bereich der Ausflusstrakte einher, welche bei einer ausschließlichen Untersuchung des Vierkammerblickes vom Untersucher nicht erkannt werden können. Die pränatal am häufigsten erkannten Fehlbildungen sind daher diejenigen, die mit einem deutlich abnormalen Vierkammerblick einhergehen, wie zum Beispiel ein hypoplastisches Links- oder Rechtsherzsyndrom, ein atrioventrikulärer Septumdefekt oder eine Ebstein-Anomalie [33]. Im Gegenzug dazu weisen Fehlbildungen wie der Truncus arteriosus communis, der unterbrochene Aortenbogen oder eine Transposition der großen Arterien sehr schlechte pränatale Detektionsraten auf, da sich der Vierkammerblick hier häufig normal darstellen lässt bzw. scheinbar normal „imponiert“ [33,55]. Doch auch die Erkennungsrate von Herzfehlern durch den Vierkammerblick scheint in Deutschland schlecht zu sein: In einer Analyse von Schmand et al. wurden in Hessen zwischen 2013 und 2016 nur 16,7% aller im Vierkammerblick erkennbaren Herzfehler pränatal diagnostiziert [107]. Die zur Sensitivität des Vierkammerblickes im Screening publizierten Daten sind sehr heterogen: In einer niederländischen prospektiven follow-up Studie von Buskens et al. aus dem Jahre 1996 mit über 6.900 pränatal und postnatal untersuchten Feten hatte der Vierkammerblick im Basisscreening eine Sensitivität von lediglich 4,5% (95%-Konfidenzintervall 0,6% bis 15%) [23]. L. D. Allan hingegen resümierte im Jahr 2000, dass knapp 60% aller angeborener Herzfehler im Vierkammerblick erkennbar seien, viele davon allerdings übersehen würden [4]. Die meisten Studien, die zur Sensitivität des Vierkammerblickes vorliegenden, geben eine Sensitivität in Bezug auf die Erkennung angeborener Herzfehler im Bereich zwischen 30% und 50% an [33]. Diese große Differenz zwischen grundsätzlich erkennbaren Defekten und tatsächlich erkannten Defekten spiegelt ebenfalls die Untersucherabhängigkeit der Sonographie wider.

Die meisten kindlichen Herzfehler entstehen in Niedrigrisikoschwangerschaften. Solche Graviditäten werden jedoch nur zu einem geringen Teil einer differenzierten fetalen Echokardiographie in einem spezialisierten Zentrum zugeführt. So ging aus der PAN-Studie hervor, dass nur bei rund 30% aller Kinder mit angeborenen Herzfehlern im Laufe der Schwangerschaft eine fetale Echokardiographie

durchgeführt wurde [21,81,110,111]. Die meisten Herzfehler in Niedrigrisikoschwangerschaften bleiben daher vorgeburtlich unerkannt. Wie auch im Gutachten des IQWiG betont wird, hängt folglich in einem mehrstufigen Screeningsystem wie in Deutschland die Sensitivität des gesamten Screeningprogramms maßgeblich von der Güte des Eingangsscreenings ab [68]. Der effizienteste Weg zur Steigerung der pränatalen Detektionsrate von kardialen Fehlbildungen im bestehenden Screeningsystem ist daher die Aus- und Weiterbildung von niedergelassenen nicht-spezialisierten Gynäkolog:innen, denn diese bilden das Fundament des Screenings. Besonders die zusätzliche Darstellung der Ausflusstraktebenen hat großes Potential, die Qualität des Screenings zu verbessern [2,27,94].

An dieser Stelle zeigt sich eine Ursache der niedrigen pränatalen Detektionsrate angeborener Herzfehler: Es liegt ein strukturell verankertes Defizit in der Ausbildung von Gynäkolog:innen vor. Im Rahmen ihrer Facharztweiterbildung haben diese in der Regel keinen Zugang zu einem systematischen und strukturierten Ausbildungsprogramm in der pränatalen Sonographie bzw. in der Erkennung angeborener Malformationen [105]. Einheitliche und standardisierte bzw. im Curriculum verankerte Fortbildungen auf nationaler Ebene fehlen. Die sonographische Ausbildung findet daher größtenteils in kostenpflichtigen externen Fortbildungen während der Weiterbildungszeit oder in freiwilligen Wahlfächern noch während des Medizinstudiums statt. Nach Abschluss ihrer Facharztweiterbildung werden die Gynäkolog:innen in der Regel ohne weitere Kompetenzprüfung oder Zulassung in das Screeningnetz eingebunden.

Schlapp et al. untersuchten in einer deutschlandweiten Befragung von Assistenzärzt:innen der Gynäkologie und Geburtshilfe die Zufriedenheit mit der sonographischen Ausbildung. Im Dezember 2023 präsentierten sie die Ergebnisse einer ersten Interimsanalyse [106]. Es zeigten sich große Unzufriedenheiten mit der Ausbildung im Ultraschall. Fast 90% der befragten Assistenzärzt:innen gaben an, dass in ihrer Abteilung diesbezüglich kein strukturiertes Ausbildungsprogramm existiert. Knapp 80% gaben an, dass ihre Qualifikationen für den eigenständigen Einsatz von Ultraschallgeräten in einer möglichen späteren Niederlassung nicht ausreichend sind. Dieser Mangel an systematischer, strukturierter Ausbildung führt zu einer unzureichenden Detektion von Fehlbildungen, gerade weil die Inzidenz schwerwiegender Herzfehler in nicht-vorselektionierten Patientenpopulationen niedrig ist.

Das Fehlen von strukturierter Ausbildung in der fetalen Echokardiographie spiegelt sich auch in den von uns erhobenen Daten wider: Das Kompetenzlevel der Ärzt:innengruppe in der Einstellung der kardialen Standardebenen entsprach in etwa dem Kompetenzlevel der Studierenden nach vier Stunden Simulationstraining.

### **7.2.1 Kritische Reflexion der Mutterschaftsrichtlinien im Kontext der niedrigen pränatalen Erkennungsrate angeborener Herzfehler**

Die Untersuchung nach Mutterschafts-Richtlinie 2A umfasst lediglich eine rein biometrische Untersuchung ohne Darstellung einzelner Organe – somit ist die Entdeckung kardialer Fehlbildung nicht Ziel der Untersuchung. Dies spiegelt das „Recht auf Nichtwissen“ wider. In Deutschland entscheiden sich allerdings „annähernd 100%“ der gesetzlich versicherten Schwangeren für den anderen Untersuchungsmodus, einer erweiterten Untersuchung nach Mutterschafts-Richtlinie 2B [17]. Bei diesem erweiterten Basis-Ultraschall muss den Vorgaben entsprechend lediglich blickdiagnostisch die Größe und Lage des Herzens beurteilt werden, der Vierkammerblick auf seine Darstellbarkeit hin überprüft und eine persistierende Arrhythmie bejaht oder verneint werden. Der Vierkammerblick muss gemäß Mutterschaftsrichtlinien nicht als physiologisch oder pathologisch beurteilt werden, es muss lediglich seine Darstellbarkeit überprüft werden. Die Ausflusstraktebenen und andere kardiale Standardebenen müssen ebenfalls nicht verpflichtend beurteilt werden. Eine Aufklärung der Schwangeren über die Einschränkungen dieser Untersuchung in der Detektion von Herzfehlern und der Bedeutung eines „nicht-Erkennens“ wird nicht verlangt.

Die meisten kardialen Fehlbildungen würden sich bei einer solchen Untersuchung der Detektion entziehen. Beispielhaft sind bei einer Transposition der großen Arterien regelhaft weder Herz-Thorax-Relation oder Vierkammerblick auffällig, noch treten zwangsläufig persistierende Arrhythmien auf – jedoch ist das Kind postnatal mit Schluss des Ductus arteriosus beim Fehlen einer anderen Shuntverbindung lebensbedrohlich gefährdet. Ein effektives Screening auf Herzfehler mit ausschließlicher Untersuchung des Vierkammerblickes erscheint daher aktuellen evidenzbasierten Ansprüchen nicht mehr gerecht zu werden [107]. Hinzu kommt, dass die Einstellung des Vierkammerblickes nicht verpflichtend beurteilt werden muss. Achiron et al. (1992) schlugen bereits im Jahr 1992 eine Aufnahme der Ausflusstraktebenen in das Herzfehler-Screening vor [2].

An dieser Stelle zeigt sich ein weiterer Grund für die niedrige pränatale Erkennungsrate von Herzfehlern in Deutschland: Der gesetzliche Rahmen für ein Screening des Herzens scheint unzureichend. Um ein effektives Screening für die pränatale Erkennung von Herzfehlern zu gewährleisten, sind die Mutterschafts-Richtlinien in ihrer derzeitigen Fassung als alleinige Grundlage nicht ausreichend [107].

Eine Reihe anderer europäischer und außereuropäischer Länder haben bereits die verpflichtende Untersuchung der Ausflusstraktebenen in die jeweiligen nationalen Screeningprogramme implementiert. In den Niederlanden wurde darüber hinaus die verpflichtende Untersuchung des Dreigefäßblicks im Jahre 2012 in das nationale Screeningprotokoll aufgenommen. Everwijn et al. analysierten die Auswirkungen dieser Änderung und stellten unter anderem fest, dass sich die Detektionsrate für die Transposition der großen Arterien nahezu verdoppelte (44,2% vs. 82,4%). Auch die Detektionsrate für die Fallotsche Tetralogie stieg signifikant von 43,8% auf 67,7% [46].

In seinem Bericht zur Testgüte des Ultraschallscreenings in der Schwangerschaft hinsichtlich der Entdeckung fetaler Anomalien aus dem Jahre 2008 empfahl das IQWiG, das bestehende Screeningsystem vollständig umzustrukturieren, weil „ein Screening auf fetale Anomalien auf Stufe I nicht sinnvoll ist“, da die Qualität des Eingangsscreenings „trotz jahrelanger Bemühungen der Fachgesellschaften um die Fortbildung der niedergelassenen Ärzte nicht nachhaltig zu verbessern“ sei [68]. Stattdessen wurde als Alternative zum bestehenden Screeningsystem vorgeschlagen, dass „die niedergelassenen Gynäkologen nur die Basissonografie durchführen“ und „auf expliziten Wunsch [...] zu einem Stufe-II-Diagnostiker überweisen“ sollen [68]. Diesen Forderungen des IQWiG-Gutachtens wurde allerdings nicht entsprochen. Stattdessen wurde im Jahr 2013 der in Abschnitt 3.2.2 vorgestellte „erweiterte Basis-Ultraschall“ mit einer Untersuchung nach Mutterschaftsrichtlinie 2B eingeführt. Schmand et al. zeigten kürzlich, dass diese Änderung keinen positiven Effekt auf die pränatalen Detektionsraten hatte [107]. Im Folgenden möchte ich erörtern, auf welchem Wege sich die pränatale Detektionsrate verbessern ließe.

### **7.3 Möglichkeiten zur Verbesserung der pränatalen Detektionsrate angeborener Herzfehler**

Die sonographische Aus- und Weiterbildung von Anwender:innen des Basisscreenings durch strukturierte Trainingsprogramme erwies sich in der Vergangenheit als effizient für die Steigerung der pränatalen Detektionsrate und erzielte dabei teils beeindruckende Resultate: Uzun et al. (2018) schufen über Trainingsnetzwerke als Teil des walisischen National Health Service ein „skills development programme“ an 13 beteiligten Kliniken in Wales [133]. Dadurch konnte die landesweite Detektionsrate angeborener Herzfehler in Wales ausgehend von 11% im Jahre 2001 auf bis zu 74% im Jahr 2011 angehoben werden. Die perinatale Mortalität aller Kinder mit angeborenen Herzfehlern (in nicht-chromosomalem Kontext) wurde im laufenden Dreijahresschnitt von 2001 bis 2012 mehr als halbiert. Die präoperative Mortalität von Kindern mit einer Transposition der großen Arterien wurde von 10% auf 0%, die perioperative Mortalität von Kindern mit einem hypoplastischen Linksherzsyndrom wurde von 75% auf 30% gesenkt. Darüber hinaus verbesserte sich sowohl die Zufriedenheit der Patientinnen als auch der Untersuchenden. Die Autoren führten für die vorgenommene Intervention eine Kosteneffektivitätsrechnung durch: Dem NHS sind durch das Trainingsprogramm pro Jahr im Schnitt über 220.000 Britische Pfund (ca. 255.000 Euro) an Kosten erspart worden [133]. Auch Hunter et al. konnten die pränatale Detektionsrate in Nordengland durch ein Trainingsprogramm von 17% im Jahr 1994 auf 36% im Jahr 1996 verdoppeln [66]. Trainingsprogramme bieten also eine sehr gute Möglichkeit, die pränatale Erkennungsrate angeborener Herzfehler zu steigern und auf diesem Weg konsekutiv die Mortalität von Kindern mit angeborenen Herzfehlern zu senken.

Prinzipiell wäre der Einsatz von simulationsbasiertem Ultraschalltraining denkbar, um eine Steigerung der pränatalen Detektionsrate zu erreichen. Für die transthorakale [18,37,90,136] und transösophageale [18,48,65,100] Echokardiographie sowie für viele gynäkologisch-geburtshilfliche Ultraschalluntersuchungen [119] gibt es bereits den Konsens, dass simulationsbasierte Trainingsprogramme effektiv sind. Für die fetale Echokardiographie fehlen bislang Daten, die den sinnvollen Einsatz belegen. Im Fokus des folgenden Abschnittes steht daher die Frage, inwiefern aus den Daten der vorliegenden Studie auf eine Effektivität von simulationsbasiertem Ultraschalltraining in der fetalen Echokardiographie geschlossen werden kann.

## 7.4 Übertragbarkeit der Studiendaten aus der simulationsbasierten Testung in den realen Ultraschall

Alle Daten dieser Arbeit wurden am Ultraschallsimulator im Rahmen des Trainings erhoben. Aufgrund der COVID-19 Pandemie und den daraus resultierten Restriktionen konnte das Training nicht im nächsten Schritt, wie ursprünglich vorgesehen, auf reale schwangere Probandinnen ausgeweitet werden. Es bleibt daher bis dato die Frage unbeantwortet, ob die Studierenden, nach entsprechendem Training und Kompetenzerwerb am Simulator, die Standardebenen der fetalen Echokardiographie an realen Schwangeren erfolgreich einstellen und beurteilen hätten können. Eine für die Interpretation der Studienergebnisse zentrale Frage ist daher, ob eine Übertragbarkeit des simulationsbasierten Kompetenzgewinnes in den realen Ultraschall angenommen werden kann.

Nach sechs Wochen Training zeigte die Interventionsgruppe in den von uns analysierten statistischen Parametern keinen signifikanten Unterschied mehr zur Expert:innengruppe. Selbstverständlich ist es jedoch nicht möglich, dass Studierende ohne relevante Vorkenntnisse allein durch sechs Wochen Simulationstraining die Ultraschallfertigkeiten von erfahrenen Pränataldiagnostiker:innen mit DEGUM II-Zertifizierung erreichen.

Die Schallbedingungen am Simulator sind stets sehr gut, es gab keine Einschränkungen beispielsweise durch maternale Adipositas, Plazentaverkalkungen oder weitere Merkmale, welche die Untersuchungsbedingungen verschlechtern könnten. Außerdem konnte sich die Interventionsgruppe während des Trainings und der Testungen gänzlich auf die Einstellung der Standardebenen konzentrieren, denn es war nicht nötig, wachsam auf mögliche Pathologien zu achten und gleichzeitig ein Gespräch mit der Patientin zu führen. Auch die sonographische Bildoptimierung, beispielsweise durch Auswahl einer angepassten Bildtiefe, Applikation von Zoom auf das Herz sowie Wahl der korrekten Fokuszone und Bildverstärkung war nicht Teil der Kompetenzprüfung.

Dies bedingt, dass nicht eine fetale Echokardiographie als komplette Untersuchungsmethode in den Tests abgebildet wurde. Zu einer kompletten fetalen Echokardiographie gehört mehr als die Einstellung der Standardebenen. Teil der Durchführung einer kompletten Untersuchung wäre auch die Kommunikation mit der Schwangeren, die fachliche Beurteilung der eingestellten Standardebenen (Pathologieerkennung) und die Bildoptimierung.

Die Tatsache, dass die von uns erhobenen statistischen Parameter am Ende des Studienzeitraumes nicht mehr zwischen der Interventions- und der Expert:innengruppe diskriminieren konnten, erklärt sich folglich daraus, dass bei der verwendeten Testung nur ein Teilaspekt der fetalen Echokardiographie – das Einstellen der Standardebenen – abgebildet wurde. Die Schwierigkeit dieses simulationsbasierten Teilaspektes war insgesamt niedriger als die Schwierigkeit einer realen Untersuchung. Durch diese Umstände wurde das deutliche Aufholen der Studierenden auf die Expert:innengruppe in Bezug auf die Gesamtuntersuchungszeit begünstigt.

Chalouhi et al. (2016) untersuchten die Korrelation von Prüfungsergebnissen bei simulationsbasierter Prüfung im Vergleich zu konventioneller Prüfung an echten Schwangeren im Zweittrimesterschall [29] und fanden dabei eine sehr gute Korrelation. Auch Madsen et. al. (2014) und Burden et al. (2012) untersuchten die Reliabilität und Validität von simulationsbasierten Kompetenztestungen und schlussfolgerten, dass sich Kompetenzniveaus im gynäkologisch-geburtshilflichen Ultraschall durch simulationsbasierte Prüfungen valide abbilden lassen [22,82]. Simulationsbasierte Testungen zur Untersuchung von Ultraschallkompetenz können also genau so effektiv sein wie konventionelle Live-Modell-basierte Testmethoden. Diese Ergebnisse unterstützen die Validität unserer am Simulator erhobenen Daten und bekräftigen uns in der Annahme, dass die vorliegenden Prüfungsergebnisse grundsätzlich auch in den realen Ultraschall übertragbar sind. Nichtsdestotrotz sind weitere Studien nötig, um die Übertragbarkeit dieses Trainingsprogramms in den realen Ultraschall nachzuweisen.

Die Erkennung von Pathologien wurde in unserer Studie nicht trainiert oder untersucht. Folglich haben wir keine Daten gesammelt, welche einen Einfluss von Simulationstraining auf die Erkennungsrate von Pathologien zeigen. In dieser Hinsicht können keine direkten Schlussfolgerungen gezogen werden. Die korrekte Einstellung von Standardebenen, welche im Trainingsprogramm unserer Studie zentral in den Fokus gerückt wurde, hat jedoch nachgewiesenermaßen einen großen Effekt auf die Detektionsrate von angeborenen Herzfehlern. Van Nisselrooij et al. (2019) veröffentlichten eine Fall-Kontroll-Studie, in der sie die Ursachen für das Verfehlen der pränatalen Diagnose angeborener Herzfehler in den Niederlanden untersuchten [134]. In ungefähr der Hälfte (48,9%) der pränatal übersehenen Herzfehler war eine inkorrekte Darstellung der Standardebenen die Ursache der verfehlten Diagnose. In 20% der Fälle war der Herzfehler trotz ausreichender Qualität der Standardebenen nicht zu erkennen, die Nicht-Erkennung des Herzfehlers war hier also unabwendbar. In den verbleibenden 31,1% der Fälle war der Herzfehler auf den eingestellten Standardebenen zu erkennen, und das Verpassen der pränatalen Diagnose war folglich durch die fehlende Erkennung der im Bild erkennbaren Pathologie bedingt [134].

Um diese Studiendaten von Van Nisselrooij et al. zu kontextualisieren, ist ein Blick auf das niederländische Screeningsystem nützlich: Die Richtlinien zur Durchführung des Screenings gehen in den Niederlanden inhaltlich deutlich über die deutschen Mutterschaftsrichtlinien hinaus. Unter anderem müssen neben dem Vierkammerblick verpflichtend auch der Dreigefäßblick sowie die links- und rechtsventrikulären Ausflusstrakte untersucht werden [13,91]. Außerdem finden regelmäßige Kompetenzüberprüfungen der Untersuchenden statt und es gibt eine jährliche Mindestanzahl von 150 durchgeführten Zweittrimester-Untersuchungen (250 bei unerfahrenen Untersuchenden). Gemessen an diesen Standards ist das niederländische Basisscreening in Bezug auf den Level of Care eher mit einer DEGUM-Feindiagnostik vergleichbar [85]. Trotz dieses im Vergleich zu Deutschland umfangreicheren Screeningprogramms und der strengeren Ausbildungs- und Qualitätssicherungsrichtlinien scheitert die Erkennung von angeborenen Herzfehlern in den Niederlanden in der Hälfte der Fälle an unzureichend gut dargestellten Standardebenen. Im deutlich weniger kontrollierten deutschen Screeningsystem könnte

der Anteil unzureichend eingestellter Standardebenen folglich sogar noch höher liegen. Das Trainieren des korrekten Einstellens der Standardebenen ist demnach absolut elementar, um die pränatale Detektionsrate angeborener Herzfehler zu verbessern. Genau dieses korrekte Einstellen von Standardebenen ist zentraler Bestandteil des Trainings der fetalen Echokardiographie am Simulator. In den vorliegenden Daten zeigte sich diesbezüglich ein deutlicher Lernerfolg. Daher hat das simulationsbasierte Training aus meiner Sicht grundsätzlich das Potential, die pränatale Erkennungsrate angeborener Herzfehler zu verbessern.

#### **7.4.1 Die Implementation von pathologischen Befunden in simulationsbasiertes Ultraschalltraining**

Ungeachtet dessen gehört zu einer umfassenden Ultrascchallausbildung auch die Vermittlung der Kenntnis pathologischer Befunde. Die Implementation von pathologischen Befunden in simulationsbasiertes Ultraschalltraining kann dabei unterstützen. Staboulidou et al. führten bereits zwischen 2004 und 2006 simulationsbasiertes Ultraschalltraining mit simulierten fetalen Malformationen durch [114]. Nach Analyse anhand von Multiple-Choice-Fragen vor und nach dem Training befanden sie, dass sich die Pathologie-Kenntnisse der Teilnehmenden signifikant verbesserten.

Im Modul zur fetalen Echokardiographie des vorliegenden Ultrascchallsimulators sind drei pathologische Fallbeispiele (ein Fetus mit hypoplastischem Linksherzsyndrom, ein Fetus mit dextro-Transposition der großen Arterien, ein Fetus mit Fallot-Tetralogie) vorhanden. Durch die Lernplattform und den virtuellen Fetus ist die technologische Basis gelegt, noch mehr pathologische Fallbeispiele einzubauen. Dies würde ermöglichen, die Erkennung von Pathologien gezielt zu trainieren. Existiert ein ausreichend großer Pool an Fallbeispielen, so wäre außerdem denkbar, Prüflingen zufällig Fallbeispiele von Feten mit und ohne Herzfehler zuzuweisen und auf diesem Weg zu überprüfen, ob Prüflinge die Herzfehler erkennen können. Auf diesem Weg kann ein Ultrascchallsimulator auch als direktes Testverfahren zur Pathologieerkennung im Ultrascchall eingesetzt werden.

## **7.5 Das Messen der Untersuchungszeit – ein valider Parameter zur Quantifizierung von Ultraschallkompetenz?**

Bisher gibt es keinen einheitlichen Konsens über die Messung und Quantifizierung von Ultraschallfertigkeiten in der fetalen Echokardiographie. Für den gynäkologisch-geburtshilflichen Ultraschall wurde der OSAUS-Score (Objective Structured Assessment of Ultrasound Skills) von Tolsgaard et al. publiziert [123] und in einer Reihe von Publikationen verwendet. Eine Anwendung des OSAUS-Scores bei unserer Datenerhebung wäre allerdings nicht sinnvoll gewesen, da der OSAUS-Score eine Reihe weiterer Parameter wie beispielsweise eine fachgerechte Indikationsstellung, Bildoptimierung und Bildinterpretation miteinbezieht, die wir mit Hilfe unseres Studiendesigns nicht sammeln konnten. Aus diesem Grund haben wir uns dazu entschieden, die Rate der korrekt eingestellten Standardebenen sowie die dafür benötigte Zeit zum Leistungsvergleich der Teilnehmenden zu erheben.

Hätte ein Untersuchender unendlich viel Zeit zum Einstellen einer Standardebene, so würde ihm das Aufsuchen nach einer gewissen Zeit gelingen. Zufällig bzw. planlos durchgeführte Schallkopfbewegungen und zufällige fetale Bewegungen führen zwangsläufig dazu, dass irgendwann – wenn auch nach einer längeren Zeit – bei perfekten Schallbedingungen prinzipiell jede Standardebene dargestellt werden kann. Der bloße Erfolg beim Einstellen einer Standardebene ist daher für sich allein genommen kein hinreichender Beleg für Ultraschallkompetenz. Vielmehr ist entscheidend, dass Untersuchende dazu in der Lage sind, eine Standardebene gezielt und präzise einstellen zu können. Erforderlich dazu sind unter anderem räumliches Vorstellungsvermögen, Auge-Hand-Koordination, anatomische Kenntnisse inklusive der genauen Kenntnis der Standardebenen und Mustererkennung. Diese Fähigkeiten werden durch die zum Einstellen der Standardebenen benötigte Zeit quantitativ widerspiegelt: Haben Teilnehmende ein hohes Level an Ultraschallkompetenz, so sind sie dazu in der Lage, die Standardebenen gezielt und schnell aufzusuchen und werden dabei weniger Zeit benötigen als Untrainierte. Andere Untersuchungen zur Effektivität von simulationsbasiertem Ultraschalltraining verwendeten die benötigte Zeit ebenfalls als einen Surrogatparameter für Ultraschallkompetenz [22,82,100].

Angesichts der standardisierten Untersuchungsbedingungen können mit Hilfe von Parametern wie der benötigten Untersuchungszeit Kompetenzlevel definiert werden. Zukünftig kann auf diesem Wege ein Benchmarking von Ultraschallfertigkeiten ermöglicht werden und bei praktischen Prüfungen im Rahmen der Weiterbildung eingesetzt werden [115].

## **7.6 Vorteile von simulationsbasiertem Ultraschalltraining und des während der Studie genutzten Ultraschallsimulators**

Räumliches Vorstellungsvermögen, Auge-Hand-Koordination und Mustererkennung sind die wichtigsten Grundfertigkeiten beim Erlernen von Ultraschall. Neulinge haben oft Schwierigkeiten mit dem „mental mapping“ zwischen den dreidimensionalen anatomischen Strukturen und dem zweidimensionalen Ultraschallbild [19]. Fetale Bewegungen sowie das Fehlen von anatomischen Landmarken machen die fetale Echokardiographie anfangs besonders schwer erlernbar. Aus diesem Grund kommt in der fetalen Echokardiographie dem räumlichen Vorstellungsvermögen eine besonders hohe Bedeutung zu. Computerbasierte Ultraschallsimulatoren stellen eine vielversprechende neue Möglichkeit dar, diese Fertigkeiten zu trainieren. So könnte zum Beispiel die während dem Training im Task-Mode verfügbare 3D-Map eine sehr nützliche Hilfe beim Erlernen des „mental mappings“ und Training des räumlichen Vorstellungsvermögens sein. Der in der vorliegenden Arbeit verwendete Ultraschallsimulator war zum Zeitpunkt der Studie im Herbst 2020 der erste und einzige Ultraschallsimulator, der zufällige fetale Bewegungen implementiert hatte, sodass auch diese spezielle Herausforderung des pränatalen Ultraschalls trainiert werden konnte.

Mit Hilfe des Simulators kann auf verschiedenen Schwierigkeitsniveaus trainiert werden: Es sind verschiedene Simulationsmodi („Task“- und „Case“-Modus) vorhanden und die Trainierenden können diverse Hilfestellungen entsprechend ihren individuellen Bedürfnissen hinzu- oder abschalten. Dadurch wird sichergestellt, dass Trainierende verschiedener Ausgangskompetenzlevel vom Training profitieren. Außerdem ermöglicht dies eine stufenlose Steigerung des Schwierigkeitsniveaus im Laufe des Trainings: Die Trainierenden können die Hilfestellungen selbstständig ausschalten, sobald sie sich dazu in der Lage fühlen. Viele der von Issenberg et al. im Rahmen einer Meta-Analyse genannten Qualitätskriterien für gutes simulationsbasiertes Training werden somit durch den vorliegenden Simulator erfüllt [70].

Zum anfänglichen Kennenlernen der Standardebenen und Trainieren der fetalen Sonoanatomie bieten die Task-Modi ideale Bedingungen: Ein sich nicht bewegendes Kind in Schädellage sowie eine (optionale) Markierung der anatomischen Strukturen. Die Anatomie des Fetus kann auch in interaktiven Quizen nach Einstellung der jeweiligen Standardebenen abgefragt werden. Auf diesem Weg kann auf „spielerische“ Weise ein Kompetenzerwerb im Ultraschall stattfinden, noch bevor die Lernenden diese Kompetenzen im klinischen Alltag anwenden müssen [115]. Erstmals ermöglicht der virtuelle Fetus nun auch das Training an einem sich bewegendem Fetus, gleichermaßen werden auch Artefakte wie Randschattenphänomene oder Schallschatten simuliert. Bisher stellte dies eine Limitation in der Ultraschallsimulation dar und wurde als solches auch in vorherigen Studien kritisiert [78]. Insbesondere das Training am sich bewegendem Kind ist ein großer Schritt in puncto Realitätsnähe in der Simulation der fetalen Echokardiographie.

## **7.7 Reproduzierbarkeit des Trainingsprogrammes und zukünftige Möglichkeiten für die simulationsbasierte Ultraschallausbildung**

Die Studierenden trainierten individuell und allein am Simulator. Nach der anfänglichen Einführung während der ersten Trainingswoche war keine Supervision des Ultraschalltrainings mehr erforderlich. Die Studierenden teilten sich die Zeitslots selbstständig über einen online-Terminplaner zu. Selbst während der Corona-Pandemie, mit eingeschränktem Zugang zu Krankenhäusern und Patientenbereichen für Medizinstudierende, war so das simulationsbasierte Training möglich. Der Aufwand zur Organisation und Durchführung des Trainings war dadurch insgesamt gering und der Kompetenzzuwachs gemessen am geringen Aufwand erheblich. Für die Ultraschallausbildung ergibt sich daraus die Möglichkeit, mit ressourcensparenden Mitteln einen sehr hohen Kompetenzzuwachs erreichen zu können.

Ultraschallsimulatoren bieten außerdem die Möglichkeit, Lehrvideos und weiteres additives didaktisches Material in selbst erstellbare Trainingscurricula zu integrieren. Durch die Integration von begleitenden Kurskompendien zum Beispiel mit Teaching-Videos zur Schallkopfführung oder zu technischen Hintergründen, Pathologie-Quizen oder weiteren vertiefenden Inhalten können simulationsbasierte Trainingsprogramme weiter optimiert werden und ermöglichen flexibles und reproduzierbares Training. Auf diesem Weg ist autonomes Lernen auch für sehr schwierige und spezielle Untersuchungen wie die fetale Echokardiographie möglich. Ferner ist eine Dezentralisierung der Lehre möglich: So könnten beispielsweise einzelne Institutionen ein umfassendes Curriculum für die Lehrplattform zur Verfügung stellen, auf das ortsunabhängig sowie unabhängig von Präsenzkursen dezentral zugegriffen werden kann [115]. Dies ist ein vielversprechender Ausblick auf Möglichkeiten für die zukünftige Entwicklung der Ultraschallausbildung.

Ein Hindernis bei der systematischen Implementierung simulationsbasierter Trainingsprogramme in Standard-Curricula sind die hohen Anschaffungskosten des Simulators. Berücksichtigt man jedoch, dass die konventionelle Ausbildung im klinischen Alltag durch kontinuierliche Supervision, vermeidbare Wiederholungsuntersuchungen und längere Untersuchungszeiten mit sehr hohen Personalkosten verbunden ist, so relativieren sich die Kosten des Ultraschallsimulators [115]. Erste positive Kosteneffektivitätsstudien zu simulationsbasierten Trainingscurricula in der Gynäkologie und Geburtshilfe liegen bereits vor [25].

## **7.8 Literaturüberblick - bisherige Evidenz für simulationsbasiertes Ultraschalltraining in der Gynäkologie und Geburtshilfe**

Einige Forschungsgruppen untersuchten bereits die Effektivität von simulationsbasiertem Training in der Sonographie. Taksøe-Vester et al. veröffentlichten im Jahr 2020 ein systematisches Review mit Meta-Analyse zu simulationsbasiertem Ultraschalltraining in der Gynäkologie und Geburtshilfe [119]. In diesem Review wurden alle bis dato publizierten prospektiven Studien eingeschlossen, die simulationsbasiertes Ultraschalltraining in der Gynäkologie und Geburtshilfe mit nicht-simulationsbasierten Trainingsprogrammen direkt verglichen. Proband:innen waren Assistenzärzt:innen (n = 437 / 69,7% der Gesamtteilnehmerzahl), Medizinstudierende (n = 154 / 24,6%) und Hebammen (n = 36 / 5,7%). Die Mehrheit der eingeschlossenen Studien beschrieben dabei positive Effekte des Simulationstrainings auf die Performance der Proband:innen sowohl bei Tests in simulierter Umgebung als auch im klinischem Setting. Simulationsbasiertes Ultraschalltraining zeigte sich insgesamt signifikant überlegen gegenüber alleinigem klinischem Training und theoretischem Teaching. Eine Über- oder Unterlegenheit gegenüber live-Modell-basiertem Training bestand nicht. In einer Studie zu transvaginaler Sonographie war das live-Modell-basierte Training überlegen gegenüber simulationsbasiertem Training, allerdings wurden die Proband:innen im Arm der live-Modell-Gruppe an der gleichen Patientin geprüft, die sie zuvor im Training untersucht hatten, sodass von einem systematischen Bias ausgegangen werden kann [86,119]. Auf einige der in die Meta-Analyse eingeschlossenen Studien möchte ich im Folgenden detaillierter eingehen:

Tolsgaard et al. (2015) führten eine randomisierte Studie zur transvaginalen Sonographie mit Ärzt:innen im ersten Jahr der Weiterbildung ohne Ultraschallvorerfahrungen durch [124]. Teilnehmende in der Interventionsgruppe bekamen Simulationstraining mit anschließendem klinischen Training, Teilnehmende der Kontrollgruppe lediglich das konventionelle klinische Training. Das Simulationstraining wurde zunächst an einem Virtual Reality-basierten und anschließend an einem Mannequin-basiertem transvaginalen Sonographiesimulator jeweils so lange durchgeführt, bis „expert level of performance“ bzw. „proficiency“ im Training erreicht wurde. Zwei Monate nach Berufsbeginn wurden die Probanden unabhängig voneinander bei einer transvaginalen Untersuchung gefilmt und mit Hilfe eines standardisierten Prüfungsprotokolls durch zwei verblindete Experten geprüft. In der Interventionsgruppe erreichten 86% der Proband:innen die Testanforderungen für zertifizierte Fachärzt:innen für Gynäkologie, in der Kontrollgruppe lediglich 8% [124].

In einer anderen randomisierten Studie verglichen Tolsgaard et al. (2017) das Unwohlsein und Sicherheitsgefühl von Patient:innen (n = 1150) während gynäkologischer Ultraschalluntersuchungen. In der Interventionsgruppe der Untersuchenden, die vorher ein simulationsbasiertes und klinisches Training absolviert hatte, war das Unwohlsein der Patient:innen um 18,5% geringer als bei Untersuchenden der Kontrollgruppe, die nur klinisches Training absolviert hatte. Demgegenüber war das Sicherheitsgefühl der Patient:innen bei Untersuchungen durch Ärzt:innen aus der

Interventionsgruppe war mit 7,9% signifikant größer als bei Untersuchenden der Kontrollgruppe. Simulationstraining wirkt sich demnach positiv auf das Sicherheitsgefühl und Wohlbefinden der Patientinnen aus und könnte auf diesem Weg auch die Arzt-Patient:innen-Beziehung verbessern [125].

Andreasen et al. (2020) verglichen in einer multizentrischen randomisierten Studie die diagnostische Genauigkeit von Geburtsgewichtsschätzungen von Gynäkolog:innen unterschiedlicher Erfahrungsstufen. Die Teilnehmenden wurden randomisiert in die Interventionsgruppe, welche simulationsbasiertes Ultraschalltraining zu Geburtsgewichtsschätzungen bekam, und die Kontrollgruppe ohne simulationsbasiertes Training. Vor und nach dem Training wurden jeweils zwei Geburtsgewichtsschätzungen durchgeführt und die Schätzungen jeweils mit dem realen postpartalen Geburtsgewicht des Fetus korreliert. Bei der postinterventionellen Datenerhebung hatte sich die diagnostische Genauigkeit der Interventionsgruppe um 31,9% verbessert, während die diagnostische Genauigkeit der Kontrollgruppe gleich blieb [8].

Zusammenfassend gibt es bereits Evidenz dafür, dass simulationsbasierte Trainingsprogramme in der gynäkologischen bzw. geburtshilflichen Ultraschalldiagnostik eine sehr vielversprechende Möglichkeit für effektives und didaktisch hochwertiges Ultraschalltraining darstellen. Die im Rahmen dieser Dissertation erhobenen Daten bekräftigen diese Schlussfolgerung weiterhin. Zudem konnten erstmals Hinweise dafür gewonnen werden, dass simulationsbasiertes Ultraschalltraining auch zum Erlernen der fetalen Echokardiographie als einer besonders komplexen Untersuchungsmethode geeignet ist.

## **7.9 Zukünftige Ausbildung in der fetalen Echokardiographie: Simulationsbasierte, Peer-Teaching-basierte und konventionelle Trainingsverfahren im Vergleich**

Neben simulationsbasiertem Ultraschalltraining stellen auch konventionelle Ultraschallkurse oder Peer-Teaching-basierte Konzepte eine Möglichkeit für strukturierte und effektive sonographische Ausbildung dar [16,93]. Kürzlich entwickelten Recker et al. (2022) an der Universitätsklinik Bonn ein strukturiertes, Peer-Teaching-basiertes Weiterbildungsprogramm für gynäkologisch-geburtshilflichen Ultraschall [102]. Jede Ausbildungsmodalität hat Vor- und Nachteile. Nach wie vor ist eine konventionelle Ausbildung an realen Schwangeren unverzichtbarer Teil der Ausbildung. Durch die ständige schwangerenunabhängige Verfügbarkeit, ruhige Lernatmosphäre und standardisierte, kontrollierbare Untersuchungsbedingungen mit optionalen Hilfestellungen des Simulators werden beim simulationsbasierten Ultraschalltraining ideale Voraussetzungen für ein systematisches und strukturiertes Grundlagentraining geschaffen. Außerdem sind simulationsbasierte Trainingsprogramme in Bezug auf den personellen und zeitlichen Aufwand der Lehre deutlich ressourcensparender als konventionelle oder Peer-Teaching-basierte Ausbildungsverfahren. Die ausgezeichneten Trainingsbedingungen spiegeln sich in der sehr steilen Lernkurve wider, die bei den Studierenden während des sechswöchigen Trainings beobachtet werden konnte. Zu Beginn der Ultraschallausbildung, wenn die Lernenden grundlegende Fertigkeiten wie z.B. die Auge-Hand-Koordination erlernen müssen und sich zunächst mit der Einstellung der Standardebenen vertraut machen, könnte simulationsbasiertes Ultraschalltraining in der fetalen Echokardiographie daher konventionellen oder Peer-Teaching-basierten Trainingskonzepten überlegen sein. Die anfängliche Durchführung von Simulationstraining vor dem Einstieg in das klinische Training zeigte sich auch in einer Meta-Analyse zu simulationsbasiertem Ultraschalltraining in der Gynäkologie und Geburtshilfe von Taksøe-Vester et al. gegenüber dem konventionellen klinischen Training als überlegen [119]. Eine solche Kombination von simulationsbasierter und konventioneller Ausbildung könnte zukünftig den Goldstandard für strukturiertes Training im Ultraschall darstellen.

## 7.10 Schwierigkeitslevel von Standardebenen

In einer landesweiten Befragung aller niederländischen Gesundheitsfachkräfte, die am Zweittrimester-Screening beteiligt sind, wurde das Herz als das am schwierigsten zu schallende Organsystem bewertet. Auch bei der Frage, bei welchem Organsystem sie sich am unsichersten fühlen, wählten 80% das Herz aus. Die Mehrheit (59%) hatte das Bedürfnis nach mehr Training [97]. Unsere Studienergebnisse legen nahe, dass eine differenzierte Untersuchung des fetalen Herzens in ihrer Schwierigkeit durchaus heterogen ist: Unterschiedliche Standardebenen haben unterschiedliche Schwierigkeitsniveaus. Bisher gibt es – unseres Wissens nach - keine Publikationen oder quantifizierbare Daten zu diesen Schwierigkeitsniveaus in der fetalen Echokardiographie. Wir konnten erstmals solche quantitativen Daten sammeln.

Für die Einstellung der transversalen Ebenen benötigten die Proband:innen im Mittel tendenziell weniger Zeit als zum Einstellen der sagittalen Ebenen und dem hohen Kurzsachsenschnitt. Die Fehlerverteilung der Teilnehmenden war nicht symmetrisch über alle Ebenen verteilt, sondern zeigte einen Trend: In den sagittalen Ebenen und dem hohen Kurzsachsenschnitt wurden mehr Ebenen falsch eingestellt als in den übrigen Ebenen. Auch die subjektive Schwierigkeitseinschätzung der Teilnehmenden spiegelt dieses Ergebnis wider. Wie in Abbildung 17 ersichtlich ist, gaben die Befragten für die transversalen Ebenen tendenziell einen niedrigeren subjektiv empfundenen Schwierigkeitsgrad an.

Aus den Ergebnissen geht also hervor, dass transversale Standardebenen einfacher einzustellen sind als sagittale Ebenen. Ein Grund dafür könnte sein, dass das Lernen von anatomischen Strukturen schon im vorklinischen Studienabschnitt deutlich häufiger in transversalen Schnitten erfolgt als in sagittalen. Auch im klinischen Studienabschnitt und in der klinischen Praxis treffen Studierende und Ärzt:innen häufiger auf transversale als auf sagittale Schnittbilder: CT- und MRT-Bilder werden beispielsweise am häufigsten in transversaler Schnittführung betrachtet. Dies könnte dazu führen, dass den meisten Untersuchenden die räumlich-anatomische Orientierung in Transversalschnitten leichter fällt als in sagittalen Schnitten. Ein weiterer Grund könnte sein, dass das auf dem Bildschirm abgebildete Schnittbild des Fetus bei einem transversalen Schnitt deutlich kleiner ist als bei einem sagittalen Schnitt. Die Wiedererkennung von anatomischen Strukturen in dieser kleineren Schnittebene könnte einfacher sein als in einer größeren Schnittfläche.

Der vermutlich wichtigste Grund für den Schwierigkeitsunterschied zwischen transversalen und sagittalen Achsen ist allerdings der Vierkammerblick als „Ankerpunkt“. Ausgehend vom Vierkammerblick lassen sich alle anderen transversalen Standardebenen durch einen leichten Schwenk in Richtung Kopf bzw. Fuß des Kindes einstellen. Der Vierkammerblick fungiert hier also als „Ankerpunkt“ für die Untersuchung und kann aufgrund seines großen Wiedererkennungswertes leicht gefunden werden. Bei den sagittalen und schrägen Ebenen fehlt ein solcher Orientierungspunkt. Lediglich der duktale Bogen lässt sich aus einem Vierkammerblick heraus darstellen, in dem eine 90°-

Drehung des Schallkopfs ausgeführt wird. Dies ist allerdings nur bei einem apikalen Vierkammerblick in streng dorsoposteriorer Lage des Kindes möglich.

## **7.11 Schwächen und Limitationen des Ultraschallsimulators**

### **7.11.1 Bewertung der Standardebenen durch den Simulator**

Eine Limitation des Simulators stellt das teils noch unausgereifte Bewertungssystem der vom Benutzer eingestellten Ebenen dar. Die Kriterien, nach denen der Simulator die eingestellten Standardebenen als korrekt oder falsch einstuft, blieben bis zum Abschluss der Studie teilweise nicht nachvollziehbar. Viele klinisch korrekte Standardebenen wurden vom Simulator als falsch abgelehnt. In der Nachbewertung des Expertengremiums wurden rund 37% (70 von 189) der vom Simulator als falsch kategorisierten Ebenen mit der Schulnote „sehr gut“ oder „gut“ bewertet, nur knapp 12% der abgelehnten Ebenen waren auch aus Sicht des Expertengremiums klinisch falsch.

Eine sehr strenge Bewertung der jeweilig eingestellten Ebene durch den Simulator schafft für Lernende den Anreiz, die Ebenen möglichst präzise entsprechend den Qualitätsanforderungen an korrekte Standardebenen abzubilden. Allerdings kann durch eine übermäßig strenge Bewertung schnell Frustration hervorgerufen werden, wenn korrekte Ebenen nicht als korrekt anerkannt werden. Die Notenverteilung des Expertengremiums zeigt, dass der Simulator die Standardebenen insgesamt zu streng bewertet.

In diesem Kontext möchte ich auch die vom Simulator angewandte Ebenendefinition des bicavalen Blickes diskutieren. Der Simulator akzeptierte bicavale Ebenen nur dann, wenn parallel zu den beiden Einmündungen der Hohlvenen in das rechte Atrium gleichzeitig auch ein Teil der Aorta descendens dargestellt wurde. Dies erscheint fragwürdig – in der Literatur wird in der Beschreibung der bicavalen Ebene in der fetalen Echokardiographie zwar darauf eingegangen, dass eine gleichzeitige Darstellung der Aorta descendens möglich ist, diese gleichzeitige Darstellung wird allerdings nicht als zwingend oder notwendig beschrieben [32,79,99]. Ein diagnostischer Zweck einer zusätzlichen Darstellung der deszendierenden Aorta in der bicavalen Ebene wird in der Literatur nicht beschrieben. Es gibt zwar Fallberichte von kardialen Fehlbildungen mit Kommunikation zwischen Aorta und rechtem Atrium, allerdings sind diese fast immer bedingt durch eine Fistelung zwischen rechtem Atrium und der ascendierenden Aorta [52,76]. Bisher gibt es weltweit nur zwei Fallbeschreibungen von Fistelungen zwischen rechtem Atrium und Aorta descendens [43,62]. Auch aus klinischen Überlegungen heraus scheint eine zwangsweise Darstellung der Aorta im bicavalen Blick daher nicht unbedingt notwendig und macht die Darstellung der Standardebene nur unnötig kompliziert. Diese zusätzliche Schwierigkeit zeigt sich auch in unseren Daten: Im Vergleich aller Standardebenen benötigte die Expert:innengruppe für die Einstellung des bicavalen Blickes durchschnittlich am längsten.

### 7.11.2 Abweichungen der Simulationsumgebung von realem Ultraschall

Das Ultraschallbild des von uns verwendeten Simulators wird mit Hilfe eines virtuellen Fetus auf Basis von MRT-Volumendaten erzeugt. Ein Nachteil dieser Methode ist die gegenüber realen Ultraschallbildern etwas verschiedene Bildausgabe. Tendenziell ist die Bilddarstellung im verwendeten Simulator schärfer, kontrastreicher und etwas schematischer als in der Realität.



Abbildung 18: Ein transversaler Vierkammerblick in der echten fetalen Echokardiographie (links) im Vergleich mit einem simulierten apikalen Vierkammerblick am U/S Mentor (rechts).

Quelle: Eigene Aufnahme

Ein weiterer Nachteil des Simulators ist die mangelnde Variationsmöglichkeit der Schallbedingungen. Beim Training treffen die Lernenden zu jeder Zeit auf sehr gute Schallbedingungen. Für das anfängliche Üben ist dies sehr vorteilhaft, allerdings kann auf diesem Weg nicht das Schallen bei schlechten Schallbedingungen trainiert werden, welches besonders für fortgeschrittene Benutzer des Simulators interessant wäre. Es wäre wünschenswert, dass auf Wunsch auch schlechte Schallbedingungen simuliert werden können. Andere Ultraschallsimulatoren wie beispielsweise der CAE Vimedix haben eine solche Möglichkeit bereits implementiert.

Das Gefühl und die Haptik des Schallens am Ultraschallsimulator ist naturgemäß nicht komplett identisch mit dem Schallgefühl an einer echten Patientin. So bemängelten beispielsweise einige Teilnehmende aus der Expert:innengruppe, dass der Schallkopf auf dem Torso nicht gleitet. Dies ist dadurch bedingt, dass bei der Benutzung des Simulators kein Schallgel benutzt wird, und der Puppenbauch aus gummiartigem Material besteht. Aus diesem Grund haben wir während der Studie für alle Teilnehmenden, die dies bevorzugten, Frischhaltefolie auf dem Bauch der Puppe des Simulators gespannt, wodurch der Schallkopf etwas reibungsloser glitt. Gemäß Herstellerangaben kann auch

Babypuder verwendet werden, um die Reibung zwischen Bauch und Schallkopf zu verringern. Prinzipiell wäre es wünschenswert, wenn der Schallkopf wasserdicht konstruiert werden könnte, sodass auch am Simulator Schallgel benutzt werden kann. Durch die Beschaffenheit des Simulators ist es nicht möglich, den Bauch der Puppe einzudrücken. In der Realität könnte durch ein Eindringen des Schallkopfes Bewegungen des Kindes stimuliert oder das Schallfenster optimiert werden.

## **7.12 Limitationen der Studie**

### **7.12.1 Validität der simulationsbasierten Testung**

Die wichtigste Limitation der vorliegenden Studie ist die fragliche Übertragbarkeit in die reale Ultraschalldiagnostik. Alle Testungen wurden simulationsbasiert erhoben. Die Validität dieser simulationsbasierten Testung im Sinne der Übertragbarkeit der Ergebnisse in den realen Ultraschall konnten wir daher mit diesem Studiendesign nicht nachweisen. Dieser Umstand wurde bereits ausführlich in Abschnitt 7.4 erörtert.

### **7.12.2 Stichprobengröße**

In die Interventionsgruppe der Studierenden wurden elf Studierende eingeschlossen, in den beiden Referenzgruppen wurden jeweils zehn Teilnehmende eingeschlossen. Es gab dabei keine Drop-outs. Eine größere Interventionsgruppe hätte zu repräsentativeren Ergebnissen mit geringerer Streubreite geführt. Die Anzahl der Teilnehmenden in der Studierendengruppe wurde durch die Verfügbarkeit des Ultraschallsimulators limitiert. Es stand ein Exemplar des Simulators während des Studienzeitraumes zur Verfügung. Das von den Studierenden durchgeführte Trainingsprogramm war zeitintensiv: Durch das pro Woche jeweils zweistündige Training der Studierendengruppe dieser Studie war der Simulator bereits 22 Stunden pro Woche belegt. Zeitgleich wurde am Simulator eine Parallelstudie zur Erlernbarkeit eines erweiterten Zweittrimesterschall-Screeningprotokolls (ohne Einstellung der Herzebenen) mit ähnlicher Methodik durchgeführt [54], sodass der Simulator allein 44 Stunden pro Woche durch Studierendentraining belegt war. Zugleich mussten die Teilnehmenden der jeweiligen Referenzgruppen beider Studien am Simulator geprüft werden, ferner fanden an drei Wochenenden die Lernfortschrittsanalysen der Studierendengruppe statt. Durch diese Begebenheiten war der Simulator zeitlich sehr stark ausgelastet, und der Einschluss von mehr Teilnehmenden nicht möglich.

### **7.12.3 Fetale Position**

Wie schwierig eine Standardebene einzustellen ist, ist auch von der fetalen Position abhängig. Generell ist eine dorsoposteriore Position (die Wirbelsäule des Kindes zeigt in Richtung Wirbelsäule der Mutter) dabei eher vorteilhaft, während eine dorsoanteriore Position (die Wirbelsäule des Kindes zeigt in Richtung Bauchnabel der Mutter) eher nachteilhaft ist. Dies hat mehrere Gründe:

- die Wirbelsäule des Kindes kann bei dorsoanteriorer Position durch Bildung eines Schallschattens das Herz und die übrigen Organe verdecken
- das Auffinden der Standardebenen bei dorsoposteriorer Position fällt vielen Schallenden auf Grund der „anatomisch normalen“ Position des Kindes einfacher als bei dorsoanteriorer Position
- das Herz des Kindes befindet sich bei dorsoposteriorer Position näher am Schallkopf, was die Wahl einer höheren Centerfrequenz mit höherer Bildauflösung ermöglicht.

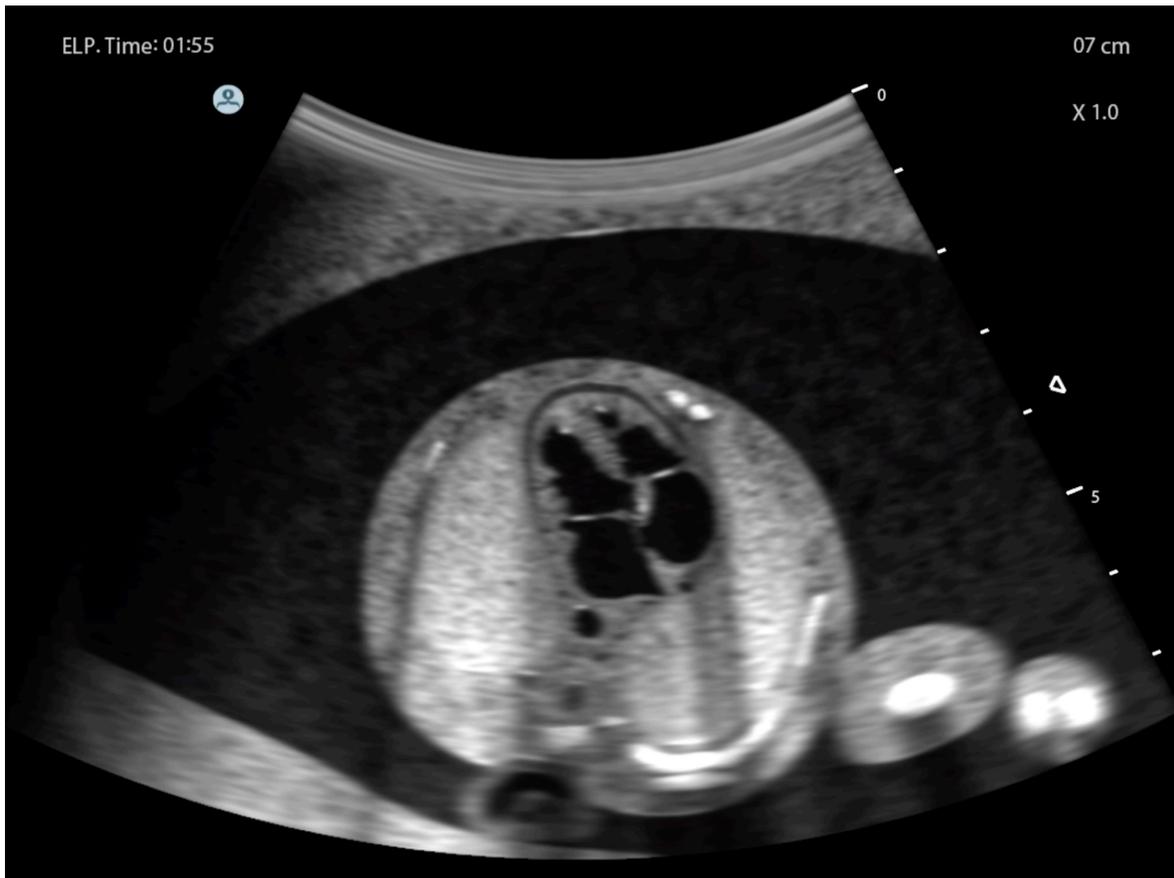


Abbildung 19: Einfluss der Fetalen Position auf die Schwierigkeit der Einstellung von Standardebenen: Dorsoposteriore Position  
Quelle: Eigene Aufnahme

Leider verfügt der verwendete Ultraschallsimulator über keine Möglichkeit, die fetale Position gezielt zu steuern. Entweder bleibt der virtuelle Fetus unbewegt (Task-Modus), oder die Bewegungen erfolgen zufällig (Case-Modus). Es gibt keine Möglichkeit, die fetale Position während der Benutzung des Simulators aufzuzeichnen. In der Planungsphase der Studie standen wir diesbezüglich in Kontakt mit der Herstellerfirma.

Eine Aufzeichnung der fetalen Positionen während der Lernfortschrittsanalysen wäre sehr vorteilhaft gewesen, da auf diesem Wege der Einfluss der Position auf die Schwierigkeit der Standardebene hätte quantifiziert werden können. So hätte die fetale Position auch als Parameter, der für eine Verzerrung der Daten sorgen kann, ausgeschlossen werden können. Da die fetalen Bewegungen während der Tests jedoch zufällig erfolgten, erscheint ein systematischer Bias ausgeschlossen. Vermutlich hat die fehlende Aufzeichnung der Position allerdings einen negativen Einfluss auf die statistische Power der Studie, da so die Streubreite der Zeiten vergrößert wurde.

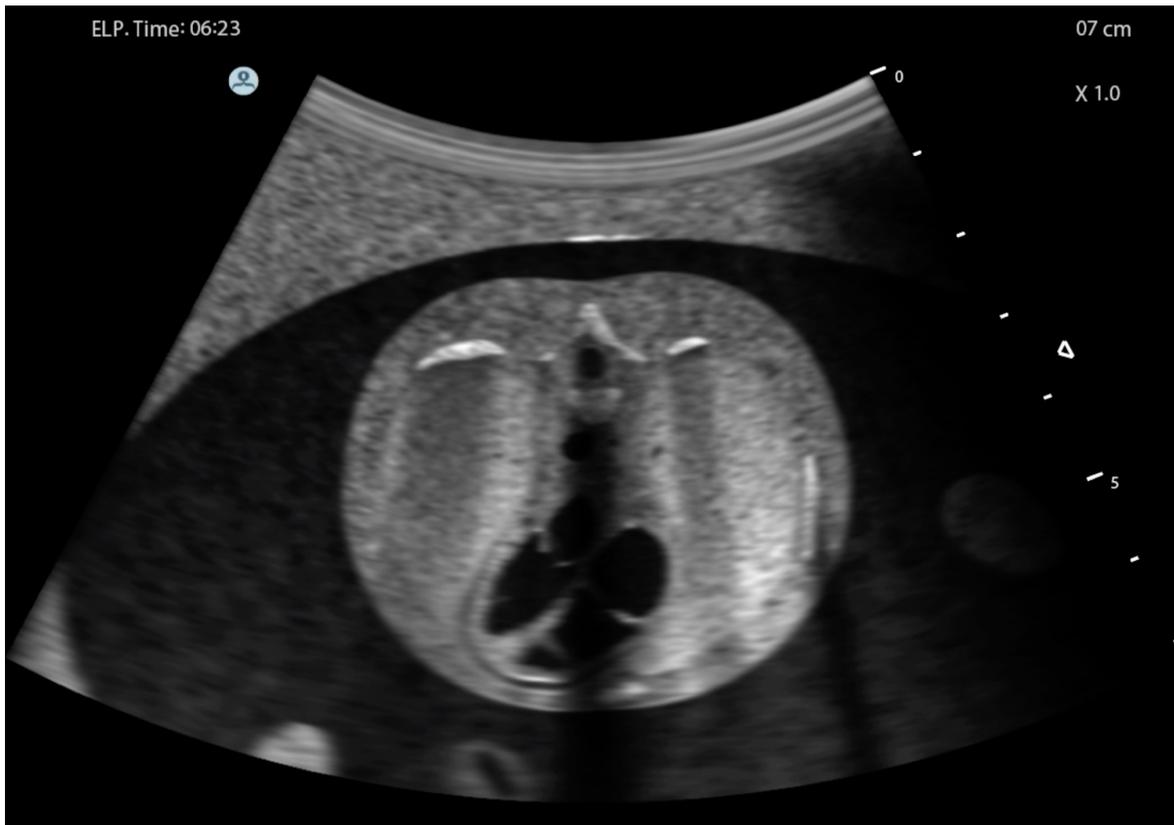


Abbildung 20: Einfluss der Fetalen Position auf die Schwierigkeit der Einstellung von Standardebenen: Dorsoanteriore Position  
 Die erhöhte Schwierigkeit durch die dorsoanteriore Position des Fetus wird hier deutlich. Die Wirbelsäule wirft einen Schallschatten auf das Herz  
 Quelle: Eigene Aufnahme

#### 7.12.4 „Glückstreffer“ bei den Prüfungen

Die Reihenfolge, in der die Teilnehmenden die Standardebenen bei den Prüfungen einstellten, war frei wählbar, um eine möglichst realitätsnahe Prüfungssituation zu schaffen. Diese Freiheit hatte allerdings manchmal zur Folge, dass auf Grund der zufälligen Bewegungen des Fetus Standardebenen zufällig ins Bild gedreht wurden und die Teilnehmenden dadurch „Zufallstreffer“ bzw. „Glückstreffer“ landen konnten. Diese „Glückstreffer“ könnten die durchschnittlichen Zeiten nach unten verzerren. Vor Beginn der Studie wurde dies bereits bedacht und dafür folgende Möglichkeit des Umgangs mit solchen „Glücktreffern“ in Betracht gezogen:

- Die „Glückstreffer“ aus der Wertung zu nehmen,
- Die „Glückstreffer“ zu akzeptieren - unter der Annahme, dass sie bei allen Teilnehmenden und Standardebenen statistisch ungefähr in gleicher Häufigkeit auftreten sollten und somit in Summe vernachlässigbar sind.

Wir entschieden uns dafür, die „Glückstreffer“ zu akzeptieren. Um sie gänzlich aus der Wertung zu nehmen, hätte ein von uns zuvor festgelegtes Definitionsschema angewandt werden müssen, die „Glückstreffer“ hätten also vorab genau definiert werden müssen. Dies wäre schwierig gewesen, da die

Grenzen fließend sind. Daher erachteten wir ein solches Definitionsschema als zu ungenau, sodass richtige Zufallstreffer mit in die Wertung einbezogen wurden. Außerdem überzeugte uns das Argument, dass die „Glückstreffer“ unter den Gruppen gleichmäßig verteilt sein sollten, sodass eine Verzerrung der Gruppenvergleiche unwahrscheinlich ist.

#### **7.12.5 Einfluss von Systole und Diastole beim Einfrieren des Bildes**

Die fetale Echokardiographie ist keine statische, sondern eine dynamische Untersuchungsmethode: Das Herz wird im bewegten Zustand untersucht. Wird ein statisches Bild vom bewegten Herzen gemacht, so hat der Herzzyklus einen Einfluss auf das resultierende Bild. Es ist möglich, dass eine Standardebene im bewegten Bild gut eingestellt wurde, auf dem eingefrorenen Bild allerdings nicht ausreichend dargestellt erscheint. Die systolische Verkürzung und Verdickung der Ventrikelwände mit Verkleinerung des Kavums, die Bewegung des Herzkreuzes und der Ventilebene nach apikal oder die Kaliberschwankungen der großen Gefäße können großen Einfluss auf das Bild als Momentaufnahme nehmen. Dieser Effekt war insbesondere am Simulator relevant, da oft eine kurze zeitliche Latenz zwischen dem Betätigen des Fußpedals zum Einfrieren des Bildes und dem darauffolgenden Einfrieren des B-Bildes auftrat. Dies kann potenziell auch Auswirkungen auf die im Rahmen der Prüfungen gespeicherten Standardebenen haben. In Abbildung 21 und Abbildung 22 ein exemplarisches Beispiel:

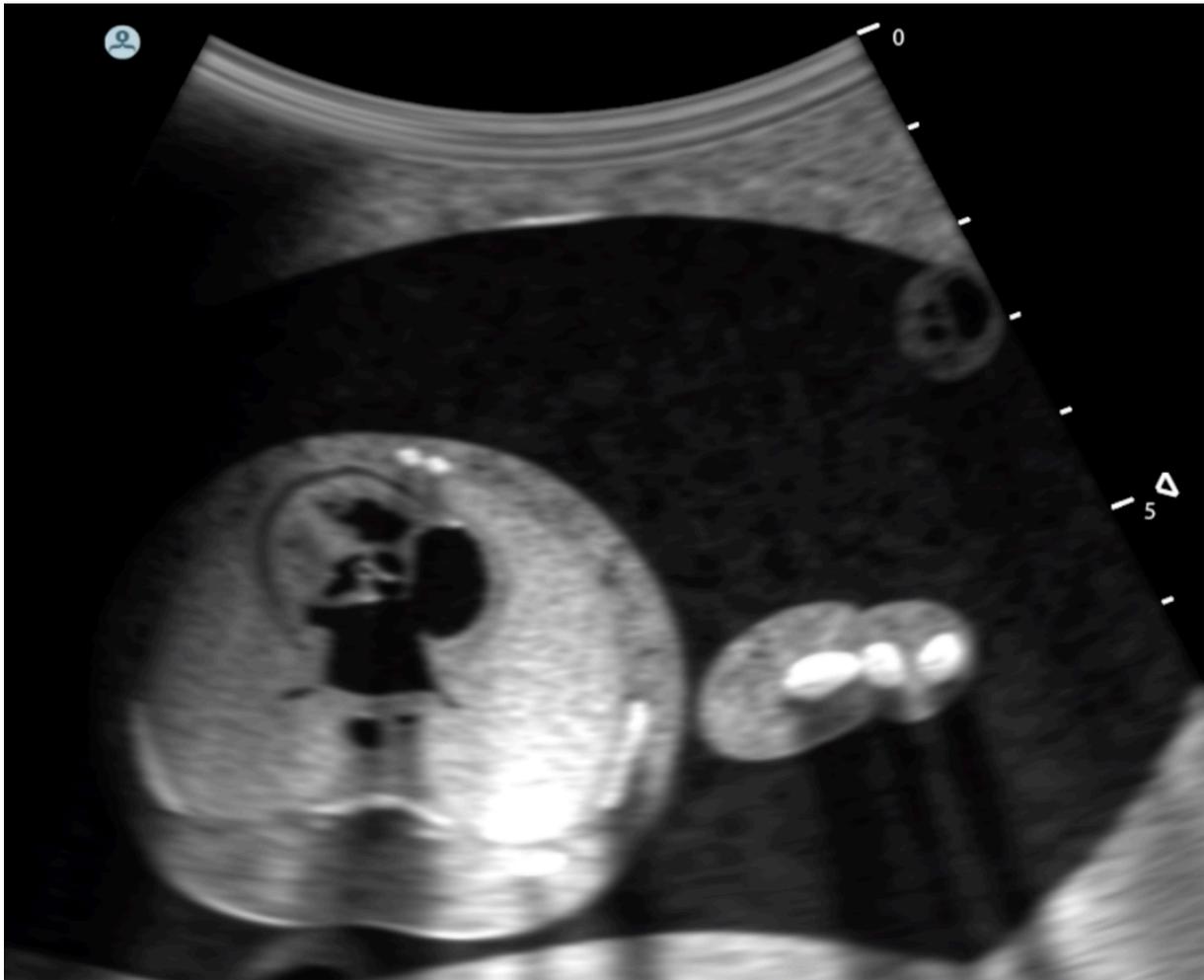


Abbildung 21: Die Abhängigkeit des gespeicherten Bildes vom Herzzyklus  
 Die Standardebene des linksventrikulären Ausflusstraktes erscheint hier unzureichend dargestellt: Das Kavum des linken Ventrikels ist nicht sichtbar.  
 Quelle: Eigene Aufnahme

In Abbildung 21 erscheint die Standardebene des linksventrikulären Ausflusstraktes unzureichend dargestellt. Das Kavum des linken Ventrikels ist gar nicht dargestellt, sodass auch der Ausflusstrakt nicht sichtbar ist. Darüber hinaus erscheint die Achse des Bildes zu weit kranial gewählt, sodass die Achse nicht durch den wahren Apex der Ventrikel verläuft und die Ventrikel infolgedessen verkürzt erscheinen („Foreshortening“). Dies wäre eine inkorrekt eingestellte Standardebene.

Der Simulator verfügt über die Möglichkeit, den Herzzyklus im gefreezten Bild nachträglich zu verändern. Wenn ein gefreeztes Bild durch eine herzzyklusbedingte Veränderung des Herzens also schlechter dargestellt erscheint, so können die Benutzenden den Herzzyklus im Postprocessing so verändern, dass das resultierende Bild wieder korrekt ist. Abbildung 22 demonstriert dies: Es ist das gleiche Bild wie Abbildung 21, allerdings wurde der Herzzyklus hier nun diastolisch statt systolisch eingestellt. Nun ist das Kavum des linken Ventrikels gut sichtbar und so auch der gesamte linksventrikuläre Ausflusstrakt gut dargestellt. Zudem erscheint das Ausmaß des Foreshortenings geringer. Dies wäre eine korrekt eingestellte Standardebene.

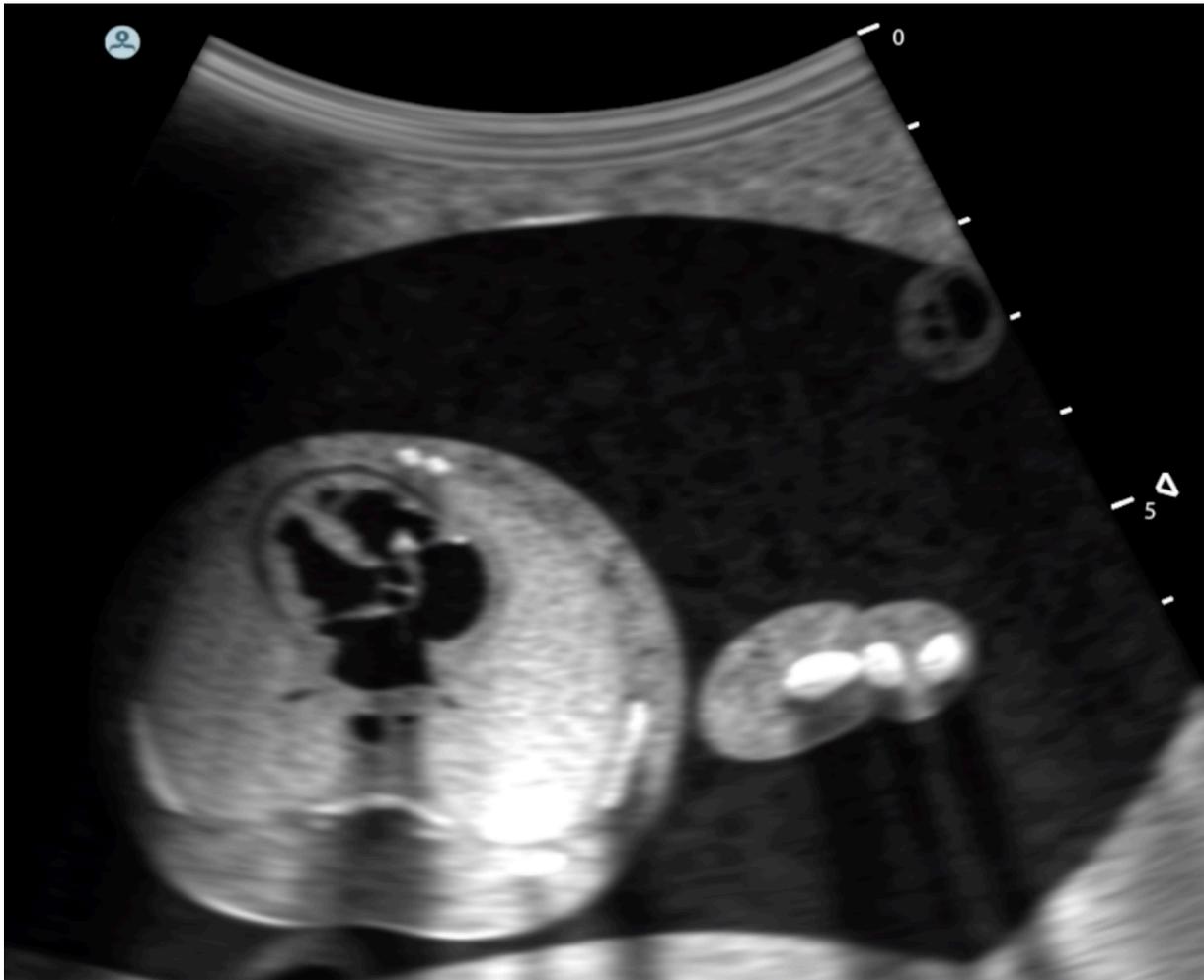


Abbildung 22: Systolisch-diastolische Adaption des gespeicherten Bildes  
 Nach Anwendung der systolisch-diastolischen Adaption des Bildes im Postprocessing zeigt sich die Standardebene ausreichend dargestellt. Die Ventrikel werden zwar etwas verkürzt („Foreshortening“), der linke Ausflusstrakt inklusive Aortenklappe allerdings vollständig dargestellt.  
 Quelle: Eigene Aufnahme

Wir haben alle Teilnehmenden auf diese Problematik aufmerksam gemacht und betont, dass nur das gespeicherte Bild allein maßgeblich ist. Der Simulator ist so konzipiert, dass ein durch Betätigung des Fußpedals eingefrorenes Bild erst dann gespeichert wird, wenn es durch nochmalige Betätigung des Fußpedals bestätigt wird. Die eigenständige und selbstkritische Beurteilung, ob eine eingefrorene Standardebene ausreichend gut eingestellt ist, gehörte explizit zur Prüfungsleistung. Es konnten auch mehrere Bilder von einer Standardebene eingespeichert werden. Ideal wäre an dieser Stelle die Möglichkeit des Speicherns von kurzen Loops, z.B. von der Dauer eines jeweiligen Herzzyklus.

### 7.13 Fazit und Ausblick

Für eine pränatale Erkennung und akkurate Diagnosestellung von angeborenen Herzfehlern ist die korrekte Einstellung von Standardebenen von zentraler Bedeutung. Wir konnten mit dieser Studie Belege dafür sammeln, dass simulationsbasiertes Ultraschalltraining für das Erlernen der Einstellung von Standardebenen der fetalen Echokardiographie sehr effektiv ist. In Bezug auf die Einstellung der Standardebenen - als Grundstein und zentralem Element der Untersuchung - konnten sich die Studierenden innerhalb von sechs Wochen dem Niveau der Expert:innengruppe annähern. Schon nach zwei Wochen simulationsbasiertem Training gelang es den Studierenden, über 95% der Standardebenen korrekt einzustellen. Nicht nur Ultraschall-Neulinge, sondern auch Gynäkolog:innen mit Vorerfahrung im Ultraschall können von strukturiertem simulationsbasiertem Training profitieren. Ihre Fähigkeiten in der Einstellung der fetalen Echokardiographie-Standardebenen waren vergleichbar mit den Fertigkeiten der Studierenden nach zwei Wochen Simulatortraining. Dies ist ein Spiegelbild des Mangels an strukturierter sonographischer Aus- und Weiterbildung.

Simulationsbasiertes Ultraschalltraining ist eine sehr praktikable und ressourcenschonende Trainingsmethode, die einfache Umsetzbarkeit des Trainings ist ein wichtiger Vorteil. Grundsätzlich hat simulationsbasiertes Training das Potenzial, die pränatale Detektionsrate von angeborenen Herzfehlern zu verbessern und so konsekutiv neonatale Outcomes zu verbessern. Auf der Grundlage unserer Ergebnisse empfehlen wir die Durchführung weiterer Studien, um die Translation von durch simulationsbasiertes Training gewonnener sonographischer Fertigkeiten in den klinischen Alltag zu untersuchen.

Es existieren verschiedene Schwierigkeitslevel von Standardebenen. Die Einstellung der transversalen Ebenen scheint insgesamt leichter zu sein als die Einstellung der sagittalen Standardebenen (bicavale Ebene, Aortenbogen, duktaler Bogen) und des hohen Kurzachsenschnitts. Diese Daten könnten zum Beispiel für die didaktische Konzeption zukünftiger (simulationsbasierter) Kurscurricula von Nutzen sein.

## 8 Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1: Die Transversalen Standardebenen der fetalen Echokardiographie.....  | 12 |
| Abbildung 2: Die sagittalen Standardebenen der fetalen Echokardiographie.....   | 15 |
| Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung eines „contraductal shelf“.....  | 17 |
| Abbildung 4: Die Kurzsachsenschnitte in der fetalen Echokardiographie. ....   | 19 |
| Abbildung 5: Der Aufbau des U/S Mentor.....   | 27 |
| Abbildung 6: Der Transmitter .....  | 27 |
| Abbildung 7: Simulator-Feedback in Form eines Statistik-Reports.....  | 30 |
| Abbildung 8: Simulator-Feedback durch Vergleich von Standardebenen .....  | 31 |
| Abbildung 9: Simulator-Feedback bei nicht zugeordneten Standardebenen.....  | 32 |
| Abbildung 10: Ein Dreigefäßblick im Task-Modus mit eingeschalteten Hilfestellungen .....  | 33 |
| Abbildung 11: 3D-Map (oben) und „blue probe indicator“ (unten) als Hilfsmittel am Simulator .....   | 34 |
| Abbildung 12: Fallvorstellung einer Schwangeren .....   | 34 |
| Abbildung 13: Bildschirm des U/S Mentor während einer Simulation im Case-Modus .....  | 35 |
| Abbildung 14: Feedback des Simulators zu klinischen Befunden .....  | 36 |
| Abbildung 15: Gesamtuntersuchungszeit ("total time to completion", TTC) in Sekunden von Studierenden nach 2, 4 und 6 Wochen Trainingszeit sowie der Ärzt:innen- und Expert:innengruppe im Vergleich. .... | 46 |
| Abbildung 16: Benötigte Zeit zum Einstellen der einzelnen Standardebenen ("time to completion") in Sekunden von Studierenden (nach 6 Wochen Training), Ärzt:innen- und Expert:innengruppe.....            | 47 |
| Abbildung 17: Die von den Gruppen subjektiv empfundene Schwierigkeit der Standardebenen .....   | 48 |
| Abbildung 18: Ein transversaler Vierkammerblick in der echten fetalen Echokardiographie (links) im Vergleich mit einem simulierten apikalen Vierkammerblick am U/S Mentor (rechts).....                   | 71 |
| Abbildung 19: Einfluss der Fetalen Position auf die Schwierigkeit der Einstellung von Standardebenen: Dorsoposteriore Position .....  | 74 |
| Abbildung 20: Einfluss der Fetalen Position auf die Schwierigkeit der Einstellung von Standardebenen: Dorsoanteriore Position .....   | 75 |
| Abbildung 21: Die Abhängigkeit des gespeicherten Bildes vom Herzzyklus.....   | 77 |

Abbildung 22: Systolisch-diastolische Adaption des gespeicherten Bildes ..... 78

## 9 Tabellenverzeichnis

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tabelle 1:  | Die Standardebenen im Modul der fetalen Echokardiographie des U/S Mentor .....                                    | 29 |
| Tabelle 2:  | Kriterien der Notenvergabe .....  | 40 |
| Tabelle 3:  | Zusammensetzung der Ärzt:innengruppe in Bezug auf den Ausbildungsstand.....                                       | 42 |
| Tabelle 4:  | Ergebnisse der Befragung zu den Vorerfahrungen der Ärzt:innen- und<br>Expert:innengruppe .....                    | 43 |
| Tabelle 5:  | Notenverteilung der Gesamtnoten des Expertengremiums .....  | 44 |
| Tabelle 6:  | Rate korrekt eingestellter Standardebenen .....   | 44 |
| Tabelle 7:  | Gesamtuntersuchungszeiten .....   | 45 |
| Tabelle 8:  | Subjektiv empfundene Schwierigkeit.....   | 49 |
| Tabelle 9:  | Ebenenvergleich von absoluter Anzahl und relativem Anteil der nicht korrekt<br>eingestellten Standardebenen ..... | 50 |
| Tabelle 10: | Untersuchungszeit der einzelnen Standardebenen der Studierenden .....   | 51 |
| Tabelle 11: | Untersuchungszeit der einzelnen Standardebenen (in Sekunden) der<br>Ärzt:innengruppe.....                         | 51 |
| Tabelle 12: | Untersuchungszeit der einzelnen Standardebenen (in Sekunden) der<br>Expert:innengruppe .....                      | 52 |

## 10 Abkürzungsverzeichnis

|        |  |
|--------|--|
| ACOG   | American College of Obstetricians and Gynecologists                        |
| ACR    | American College of Radiology  |
| AHA    | American Heart Association   |
| AIUM   | American Institute for Ultrasound in Medicine                              |
| ALARA  | As low as reasonably achievable  |
| ASD    | Atrialer Septumdefekt  |
| ASE    | American Society of Echocardiography                                       |
| CCHD   | Critical Congenital Heart Malformation (kritischer angeborener Herzfehler) |
| CHD    | Congenital Heart Disease (Angeborener Herzfehler)                          |
| CRM    | Crew Resource Management   |
| CT     | Computertomographie  |
| DEGUM  | Deutsche Gesellschaft für Ultraschall in der Medizin                       |
| eFAST  | Extended Focused Assessment with Sonography in Trauma                      |
| EFSUMB | European Federation of Societies for Ultrasound in Medicine and Biology    |
| HLHS   | Hypoplastisches Linksherzsyndrom   |
| ICBDSR | International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research    |
| IQWiG  | Institut für Qualität und Wirtschaftlichkeit im Gesundheitswesen           |
| ISUOG  | International Society of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology           |
| KBV    | Kassenärztliche Bundesvereinigung  |
| LSVC   | Linkspersistierende obere Hohlvene   |
| MRT    | Magnetresonanztomographie  |
| MuRL   | Mutterschaftsrichtlinien   |
| NHS    | National Health Service  |
| PFO    | Persistierendes Foramen Ovale  |

|      |  |
|------|--|
| RUSH | Rapid Ultrasound in Shock and Hypotension                            |
| SMFM | Society for Maternal Fetal Medicine                                  |
| SSW  | Schwangerschaftswoche  |
| TGA  | Transposition der großen Gefäße                                      |
| TI   | Thermischer Index  |
| TTC  | Total Time to Completion (Gesamtuntersuchungszeit der Teilnehmenden) |
| VSD  | Ventrikelseptumdefekt  |
| WHO  | Weltgesundheitsorganisation  |

#### Abkürzungen der in der Studie verwendeten Standardebenen der fetalen Echokardiographie

|      |   |
|------|---|
| Abd  | Abdomen-Transversalschnitt              |
| 4CV  | Vierkammerblick                         |
| LVOT | linksventrikulärer Ausflusstrakt-Blick  |
| RVOT | rechtsventrikulärer Ausflusstrakt-Blick |
| 3VT  | Dreigefäß-Trachea-Blick                 |
| 3V   | Dreigefäßblick                          |
| Bic  | bicavaler Blick                         |
| Duc  | duktaler Bogen-Blick                    |
| Ao   | Aortenbogenschnitt                      |
| HSX  | hoher Kurzachsenschnitt                 |
| LSX  | tiefer Kurzachsenschnitt                |

## 11 Literaturverzeichnis

1. Abuhamad A, Minton KK, Benson CB, Chudleigh T, Crites L, Doubilet PM, Driggers R, Lee W, Mann K V., Perez JJ, Rose NC, Simpson LL, Tabor A, Benacerraf BR (2018) Obstetric and Gynecologic Ultrasound Curriculum and Competency Assessment in Residency Training Programs: Consensus Report. *J Ultrasound Med* 37:19–50
2. Achiron R, Glaser J, Gelernter I, Hegesh J, Yagel S (1992) Extended fetal echocardiographic examination for detecting cardiac malformations in low risk pregnancies. *Br Med J* 304:671–674
3. Aebersold M (2016) The history of simulation and its impact on the future. *AACN Adv Crit Care* 27:56–61
4. Allan LD (2000) A practical approach to fetal heart scanning. *Semin Perinatol* 24:324–330
5. American Institute of Ultrasound in Medicine (2020) AIUM Practice Parameter for the Performance of Fetal Echocardiography. *J Ultrasound Med* 39:E5–E16
6. American Institute of Ultrasound in Medicine (2022) Recommended Maximum Scanning Times for Displayed Thermal Index (TI) Values. URL: [https://www.aium.org/resources/official-statements/view/recommended-maximum-scanning-times-for-displayed-thermal-index-\(ti\)-values](https://www.aium.org/resources/official-statements/view/recommended-maximum-scanning-times-for-displayed-thermal-index-(ti)-values)
7. American Institute of Ultrasound in Medicine Clinical Standards Committee (2013) AIUM Practice Guideline for the Performance of Fetal Echocardiography. *J Ultrasound Med* 32:1067–1082
8. Andreasen LA, Tabor A, Nørgaard LN, Ringsted C, Sandager P, Rosthøj S, Tolsgaard MG (2020) Multicenter randomized trial exploring effects of simulation-based ultrasound training on obstetricians' diagnostic accuracy: value for experienced operators. *Ultrasound Obstet Gynecol* 55:523–529
9. Arzt W, Tulzer G, Aigner M, Mair R, Hafner E (2003) Invasive intrauterine treatment of pulmonary atresia/intact ventricular septum with heart failure. *Ultrasound Obstet Gynecol* 21:186–188
10. Arzt W, Tulzer G (2011) Fetal surgery for cardiac lesions. *Prenat Diagn* 31:695–698
11. Ärztekammer Westfalen-Lippe (2023) Logbuch zur Dokumentation der Weiterbildung gem. Weiterbildungsordnung (WO) im Gebiet Frauenheilkunde und Geburtshilfe. Deutschland. URL: [https://www.aekwl.de/fileadmin/user\\_upload/aekwl/weiterbildung/logbuch/Frauenheilkunde\\_und\\_Geburtshilfe\\_01.07.2020.pdf](https://www.aekwl.de/fileadmin/user_upload/aekwl/weiterbildung/logbuch/Frauenheilkunde_und_Geburtshilfe_01.07.2020.pdf)

12. Atalay A, Ecevit AN (2022) The anomalous drainage of the inferior vena cava into the left atrium. *Turk J Pediatr* 64:932–934
13. Baardman ME, du Marchie Sarvaas J, de Walle HEK, Fleurke-Rozema H, Snijders R, Ebels T, Bergman JEH, Bilardo CM, Berger RMF, Bakker MK (2014) Impact of introduction of 20-week ultrasound scan on prevalence and fetal and neonatal outcomes in cases of selected severe congenital heart defects in The Netherlands. *Ultrasound Obstet Gynecol* 44:58–63
14. Bakker MK, Bergman JEH, Krikov S, Amar E, Cocchi G, Cragan J, De Walle HEK, Gatt M, Groisman B, Liu S, Nembhard WN, Pierini A, Rissmann A, Chidambarathanu S, Sipek A, Szabova E, Tagliabue G, Tucker D, Mastroiacovo P, Botto LD (2019) Prenatal diagnosis and prevalence of critical congenital heart defects: An international retrospective cohort study. *BMJ Open* 9:e028139
15. Benacerraf BR, Minton KK, Benson CB, Bromley BS, Coley BD, Doubilet PM, Lee W, Maslak SH, Pellerito JS, Perez JJ, Savitsky E, Scarborough NA, Wax J, Abuhamad AZ (2018) Proceedings: Beyond ultrasound first forum on improving the quality of ultrasound imaging in obstetrics and gynecology. *J Ultrasound Med* 37:7–18
16. Ben-Sasson A, Lior Y, Krispel J, Rucham M, Liel-Cohen N, Fuchs L, Kobal SL (2019) Peer-teaching cardiac ultrasound among medical students: A real option. *PLoS One* 14:e0212794
17. Berufsverband der Frauenärzte e.V. (BVF), Deutsche Gesellschaft für Gynäkologie und Geburtshilfe e.V. (DGGG), vereint im German Board and College of Obstetrics and Gynecology (GBCOG) (2019) Stellungnahme des German Board and College of Obstetrics and Gynecology (GBCOG) zu den tragenden Gründen und dem Beschlussentwurf des Gemeinsamen Bundesausschusses über eine Änderung der Mutterschafts-Richtlinien (MuRL): Nicht-invasive Pränataldiagnostik zur Bestimmung des Risikos autosomaler Trisomien 13, 18 und 21 mittels eines molekulargenetischen Tests (NIPT) für die Anwendung bei Risikoschwangerschaften. URL:  
[https://www.dggg.de/fileadmin/data/Stellungnahmen/GBCOG/2019/290419\\_4.\\_Stellungnahme\\_GBCOG\\_NIPT.pdf](https://www.dggg.de/fileadmin/data/Stellungnahmen/GBCOG/2019/290419_4._Stellungnahme_GBCOG_NIPT.pdf)
18. Biswas M, Patel R, German C, Kharod A, Mohamed A, Dod HS, Kapoor PM, Nanda NC (2016) Simulation-based training in echocardiography. *Echocardiography* 33:1581–1588
19. Blum T, Rieger A, Navab N, Friess H, Martignoni M (2013) A Review of Computer-Based Simulators for Ultrasound Training. *Simulation in Healthcare: The Journal of the Society for Simulation in Healthcare* 8:98–108

20. Bonnet D, Coltri A, Butera G, Fermont L, le Bidois J, Kachaner J, Sidi D (1999) Detection of transposition of the great arteries in fetuses reduces neonatal morbidity and mortality. *Circulation* 99:916–918
21. Bronshtein M, Zimmer EZ, Gerlis LM, Lorber A, Drugan A (1993) Early ultrasound diagnosis of fetal congenital heart defects in high-risk and low-risk pregnancies. *Obstetrics and Gynecology* 82:225–229
22. Burden C, Preshaw J, White P, Draycott TJ, Grant S, Fox R (2012) Validation of virtual reality simulation for obstetric ultrasonography: A prospective cross-sectional study. *Simulation in Healthcare* 7:269–273
23. Buskens E, Grobbee DE, Frohn-Mulder IME, Stewart PA, Juttman RE, Wladimiroff JW, Hess J (1996) Efficacy of Routine Fetal Ultrasound Screening for Congenital Heart Disease in Normal Pregnancy. *Circulation* 94:67–72
24. Calderon J, Angeard N, Moutier S, Plumet MH, Jambaqué I, Bonnet D (2012) Impact of prenatal diagnosis on neurocognitive outcomes in children with transposition of the great arteries. *Journal of Pediatrics* 161:94–98
25. Carolan-Rees G, Ray AF (2015) The ScanTrainer obstetrics and gynaecology ultrasound virtual reality training simulator: A cost model to determine the cost viability of replacing clinical training with simulation training. *Ultrasound* 23:110–5
26. Carvalho J, Allan L, Chaoui R, Copel J, DeVore G, Hecher K, Lee W, Munoz H, Paladini D, Tutschek B, Yagel S (2013) ISUOG Practice Guidelines (updated): sonographic screening examination of the fetal heart. *Ultrasound in Obstetrics & Gynecology* 41:348–359
27. Carvalho JS, Mavrides E, Shinebourne EA, Campbell S, Thilaganathan B (2002) Improving the effectiveness of routine prenatal screening for major congenital heart defects. *Heart* 88:387–391
28. Chakraborty A, Gorla S, Swaminathan S (2018) Impact of prenatal diagnosis of complex congenital heart disease on neonatal and infant morbidity and mortality. *Prenat Diagn* 38:958–963
29. Chalouhi GE, Bernardi V, Gueneuc A, Houssin I, Stirnemann JJ, Ville Y (2016) Evaluation of trainees' ability to perform obstetrical ultrasound using simulation: Challenges and opportunities. *Am J Obstet Gynecol* 214:525.e1-525.e8
30. Chaoui R, Heling K, Mielke G, Hofbeck M, Gembruch U (2008) Qualitätsanforderungen der DEGUM zur Durchführung der fetalen Echokardiografie. *Ultraschall Med* 29:197–200

31. Checchia PA, McCollegan J, Daher N, Kolovos N, Levy F, Markovitz B (2005) The effect of surgical case volume on outcome after the Norwood procedure. *J Thorac Cardiovasc Surg* 129:754–759
32. Chiappa E, Cook A, Botta G, Silverman N (2008) *Echocardiographic Anatomy in the Fetus*. 1. edition. Springer Milano, Milano
33. Clur SAB, Bilardo CM (2014) Second trimester cardiac diagnosis: Screening standards and outcomes. *Cardiol Young* 24:19–25
34. Colak MC, Rahman A, Kocaturk H, Bayram E, Kocakoc E (2009) Interrupted inferior vena cava and partial anomalous pulmonary venous return with atrial septal defect in a 38-year-old adult: a case report. *Cases J* 2:7346
35. Cook DA, Hatala R, Brydges R, Zendejas B, Szostek JH, Wang AT, Erwin PJ, Hamstra SJ (2011) Technology-enhanced simulation for health professions education: A systematic review and meta-analysis. *JAMA* 306:978–988
36. Cooper JB (2004) A brief history of the development of mannequin simulators for clinical education and training. *Qual Saf Health Care* 13:11–18
37. Dayton JD, Groves AM, Glickstein JS, Flynn PA (2018) Effectiveness of echocardiography simulation training for paediatric cardiology fellows in CHD. *Cardiol Young* 28:611–615
38. Del Bianco A, Russo S, Lacerenza N, Rinaldi M, Rinaldi G, Nappi L, Greco P (2006) Four chamber view plus three-vessel and trachea view for a complete evaluation of the fetal heart during the second trimester. *J Perinat Med* 34:309–312
39. Deutsche Gesellschaft für Ultraschall in der Medizin (2016) DEGUM fordert Aufnahme der „Feindiagnostik“ in die Mutterschaftsrichtlinien. URL: <https://www.degum.de/aktuelles/presse-medien/pressemitteilungen/im-detail/news/degum-fordert-aufnahme-der-feindiagnostik-in-die-mutterschaftsrichtlinien.html>
40. Deutsche Gesellschaft für Ultraschall in der Medizin (2021) Strahlenschutzverordnung und „Babykino“. URL: <https://www.degum.de/presse/pressemitteilungen/im-detail/news/strahlenschutzverordnung-und-babykino.html>
41. Donofrio MT, Moon-Grady AJ, Hornberger LK, Copel JA, Sklansky MS, Abuhamad A, Cuneo BF, Huhta JC, Jonas RA, Krishnan A, Lacey S, Lee W, Michelfelder EC, Rempel GR, Silverman NH, Spray TL, Strasburger JF, Tworetzky W, Rychik J (2014) Diagnosis and treatment of fetal cardiac disease: A scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* 129:2183–2242

42. Eckersley L, Sadler L, Parry E, Finucane K, Gentles TL (2016) Timing of diagnosis affects mortality in critical congenital heart disease. *Arch Dis Child* 101:516–520
43. Elwatidy AF, Galal AN, Rhydderch D, Ashmeg AK (2003) Aorto-right atrial fistula. *Ann Thorac Surg* 76:929–931
44. Espinoza J, Romero R, Kusanovic JP, Gotsch F, Erez O, Hassan S, Yeo L (2009) Prenatal Diagnosis of Coarctation of Aorta with the Multiplanar Display and B-flow Imaging Using 4-Dimensional Ultrasonography. *J Ultrasound Med* 28:1375
45. European Federation of Societies for Ultrasound in Medicine and Biology (2006) Building a European Ultrasound Community - Minimum Training Requirements for the Practice of Medical Ultrasound in Europe - Appendix 3: Gynaecological Ultrasound. URL: <https://efsumb.org/wp-content/uploads/2020/12/2009-04-14apx3.pdf>
46. Everwijn SMP, van Nisselrooij AEL, Rozendaal L, Clur SAB, Pajkrt E, Hruda J, Linskens IH, van Lith JM, Blom NA, Haak MC (2018) The effect of the introduction of the three-vessel view on the detection rate of transposition of the great arteries and tetralogy of Fallot. *Prenat Diagn* 38:951–957
47. Familiari A, Morlando M, Khalil A, Sonesson SE, Scala C, Rizzo G, Del Sordo G, Vassallo C, Elena Flacco M, Manzoli L, Lanzone A, Scambia G, Acharya G, D'Antonio F (2017) Risk Factors for Coarctation of the Aorta on Prenatal Ultrasound: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Circulation* 135:772–785
48. Ferrero NA, Bortsov AV, Arora H, Martinelli SM, Kolarczyk LM, Teeter EC, Zvara DA, Kumar PA (2014) Simulator Training Enhances Resident Performance in Transesophageal Echocardiography. *Anesthesiology* 120:149–159
49. Fesslova V, Nava S, Villa L (1999) Evolution and long term outcome in cases with fetal diagnosis of congenital heart disease: Italian multicentre study. *Heart* 82:594
50. Finkelstein DM, Houlihan TH, Montenegro LM, Nicolson SC, Moldenhauer JS, Gebb J, Khalek N, Szwast A, Smith E, Coulter E, Combs J, Rychik J (2021) OP05.06: Immediate postpartum access to cardiac therapy: outcomes of a coordinated strategy for managing the fetus with severe cardiovascular disease. *Ultrasound Obstet Gynecol* 58:74–74
51. Fonseca A, Nazaré B, Canavarro MC (2012) Parental psychological distress and quality of life after a prenatal or postnatal diagnosis of congenital anomaly: A controlled comparison study with parents of healthy infants. *Disabil Health J* 5:67–74

52. Fontes A, Dias-Ferreira N, Ladeiras-Lopes R, Oliveira M, Braga P (2019) Aorta-right atrium tunnel: an unexpected diagnosis. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 20:1352–1352
53. Franklin O, Burch M, Manning N, Sleeman K, Gould S, Archer N (2002) Prenatal diagnosis of coarctation of the aorta improves survival and reduces morbidity. *Heart* 87:67–69
54. Freundt P, Nourkami-Tutdibi N, Tutdibi E, Janzing P, von Ostrowski T, Langer M, Zemlin M, Steinhard J (2023) Controlled Prospective Study on the Use of Systematic Simulator-Based Training with a Virtual, Moving Fetus for Learning Second-Trimester Scan: FESIM III. *Ultraschall Med* 44:e199–e205
55. Friedberg MK, Silverman NH, Moon-Grady AJ, Tong E, Nourse J, Sorenson B, Lee J, Hornberger LK (2009) Prenatal Detection of Congenital Heart Disease. *J Pediatr* 155:26–31
56. Fuchs IB, Müller H, Abdul-Khaliq H, Harder T, Dudenhausen JW, Henrich W (2007) Immediate and long-term outcomes in children with prenatal diagnosis of selected isolated congenital heart defects. *Ultrasound Obstet Gynecol* 29:38–43
57. Gemeinsamer Bundesausschuss (2020) Richtlinien des Gemeinsamen Bundesausschusses über die ärztliche Betreuung während der Schwangerschaft und nach der Entbindung („Mutterschafts-Richtlinien“).
58. Harwayne-Gidansky I, Panesar R, Maa T (2020) Recent Advances in Simulation for Pediatric Critical Care Medicine. *Curr Pediatr Rep* 8:147
59. Heling KS, Kozlowski P (2020) Safety aspects of ultrasound in prenatal diagnosis. *Ultraschall Med* 41:116–119
60. Helmy S, Bader Y, Koch M, Tiringier D, Kollmann C (2015) Measurement of Thermal Effects of Doppler Ultrasound: An In Vitro Study. *PLoS One* 10:135717
61. Hertzberg BS, Kliwer MA, Bowie JD, Carroll BA, DeLong DH, Gray L, Nelson RC (2000) Physician training requirements in sonography: how many cases are needed for competence? *AJR Am J Roentgenol* 174:1221–1227
62. Ho AB, Magee AG, Hayes N (2017) Descending aorta to right atrial fistula. *Catheter Cardiovasc Interv* 90:1158–1160
63. Ho SY, Anderson RH (1979) Coarctation, tubular hypoplasia, and the ductus arteriosus. Histological study of 35 specimens. *Br Heart J* 41:268

64. Holland BJ, Myers JA, Woods CR (2015) Prenatal diagnosis of critical congenital heart disease reduces risk of death from cardiovascular compromise prior to planned neonatal cardiac surgery: a meta-analysis. *Ultrasound Obstet Gynecol* 45:631–638
65. Huang GS, Sheehan FH, Gill EA (2022) Transesophageal echocardiography simulation: A review of current technology. *Echocardiography* 39:89–100
66. Hunter S, Heads A, Wyllie J, Robson S (2000) Prenatal diagnosis of congenital heart disease in the northern region of England: Benefits of a training programme for obstetric ultrasonographers. *Heart* 84:294–298
67. International Society of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology (2014) ISUOG Education Committee recommendations for basic training in obstetric and gynecological ultrasound. *Ultrasound Obstet Gynecol* 43:113–116
68. IQWiG (Institut für Qualität und Wirtschaftlichkeit im Gesundheitswesen) (2008) Ultraschallscreening in der Schwangerschaft: Testgüte hinsichtlich der Entdeckungsrate fetaler Anomalien. URL: [https://www.iqwig.de/download/s05-03\\_abschlussbericht\\_ultraschallscreening\\_in\\_der\\_schwangerschaft.pdf](https://www.iqwig.de/download/s05-03_abschlussbericht_ultraschallscreening_in_der_schwangerschaft.pdf)
69. Irwin RB, Greaves M, Schmitt M (2012) Left superior vena cava: revisited. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 13:284–291
70. Issenberg SB, McGaghie WC, Petrusa ER, Gordon DL, Scalese RJ (2005) Features and uses of high-fidelity medical simulations that lead to effective learning: A BEME systematic review. *Med Teach* 27:10–28
71. Jang TB, Ruggeri W, Dyne P, Kaji AH (2010) Learning curve of emergency physicians using emergency bedside sonography for symptomatic first-trimester pregnancy. *J Ultrasound Med* 29:1423–1428
72. Janzing P, Nourkami-Tutdibi N, Tutdibi E, Freundt P, von Ostrowski T, Langer M, Zemlin M, Steinhard J (2023) Controlled prospective study on ultrasound simulation training in fetal echocardiography: FESIM II. *Arch Gynecol Obstet*
73. Kassenärztliche Bundesvereinigung (2021) Vereinbarung von Qualitätssicherungsmaßnahmen nach § 135 Abs. 2 SGB V zur Ultraschalldiagnostik (Ultraschall-Vereinbarung). <https://www.kbv.de/media/sp/Ultraschallvereinbarung.pdf>
74. Khoshnood B, De Vigan C, Vodovar V, Goujard J, Lhomme A, Bonnet D, Goffinet F (2005) Trends in prenatal diagnosis, pregnancy termination, and perinatal mortality of newborns with

- congenital heart disease in France, 1983-2000: a population-based evaluation. *Pediatrics* 115:95–101
75. Kollmann C, Jenderka K-V, Moran CM, Draghi F, Jimenez Diaz JF, Sande R (2020) EFSUMB Clinical Safety Statement for Diagnostic Ultrasound (2019 revision). *Ultraschall in Med* 41:387–389
  76. Krishna CS, Baruah DK, Reddy GV, Panigrahi NK, Suman K, Kumar PVN (2010) Aorta-Right Atrial Tunnel. *Tex Heart Inst J* 37:480
  77. Le Lous M, De Chanaud N, Bourret A, Senat M, Colmant C, Jaury P, Tesnière A, Tsatsaris V (2017) Improving the quality of transvaginal ultrasound scan by simulation training for general practice residents. *Adv Simul* 2:
  78. Le Lous M, Tsatsaris V, Tesnière A, Grangé G (2017) Improving students' ability to perform a standardized foetal biometry plane using ultrasound simulators. *J Gynecol Obstet Hum Reprod* 46:439–443
  79. Lee M-Y, Won H-S (2013) Technique of fetal echocardiography. *Obstet Gynecol Sci* 56:217
  80. Lewiss RE, Hoffmann B, Beaulieu Y, Phelan MB (2014) Point-of-Care Ultrasound Education. *J Ultrasound Med* 33:27–32
  81. Lindinger A, Schwedler G, Hense HW (2010) 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 Padiatr* 222:321–326
  82. Madsen M, Konge L, Nørgaard L, Tabor A, Ringsted C, Klemmensen Å, Ottesen B, Tolsgaard M (2014) Assessment of performance measures and learning curves for use of a virtual-reality ultrasound simulator in transvaginal ultrasound examination. *Ultrasound Obstet Gynecol* 44:693–699
  83. Mahle WT, Clancy RR, McGaurn SP, Goin JE, Clark BJ (2001) Impact of prenatal diagnosis on survival and early neurologic morbidity in neonates with the hypoplastic left heart syndrome. *Pediatrics* 107:1277–1282
  84. Meller G (1997) A typology of simulators for medical education. *J Digit Imaging* 10:194–196
  85. Merz E, Eichhorn KH, Von Kaisenberg C, Schramm T (2012) Aktualisierte Qualitätsanforderungen an die weiterführende differenzierte Ultraschalluntersuchung in der pränatalen Diagnostik (= DEGUM-Stufe II) im Zeitraum von 18+0 bis 21+6 Schwangerschaftswochen. *Ultraschall Med* 33:593–596

86. Moak JH, Larese SR, Riordan JP, Sudhir A, Yan G (2014) Training in transvaginal sonography using pelvic ultrasound simulators versus live models: A randomized controlled trial. *Academic Medicine* 89:1063–1068
87. Montaguti E, Balducci A, Perolo A, Livi A, Contro E, Casadio P, Donti A, Angeli E, Gargiulo G, Pilu G (2020) Prenatal diagnosis of congenital heart defects and voluntary termination of pregnancy. *Am J Obstet Gynecol MFM* 2:100207
88. Morris SA, Ethen MK, Penny DJ, Canfield MA, Minard CG, Fixler DE, Nembhard WN (2014) Prenatal Diagnosis, Birth Location, Surgical Center, and Neonatal Mortality in Infants With Hypoplastic Left Heart Syndrome. *Circulation* 129:285–292
89. Nayahangan LJ, Dietrich CF, Nielsen MB (2021) Simulation-based training in ultrasound - where are we now? *Ultraschall Med* 42:240–244
90. Nazarnia S, Subramaniam K (2017) Role of Simulation in Perioperative Echocardiography Training: Current Evidence and Future Directions. *Semin Cardiothorac Vasc Anesth* 21:81–94
91. Nederlandse Vereniging voor Obstetrie en Gynaecologie (NVOG) (2012) Structureel Echoscopisch Onderzoek (SEO) Versie 2.0. URL: <https://www.nvog.nl/wp-content/uploads/2017/12/Structureel-echoscopisch-onderzoek-SEO-20-07-03-2012.pdf>
92. Nicholls D, Sweet L, Hyett J (2014) Psychomotor Skills in Medical Ultrasound Imaging. *J Ultrasound Med* 33:1349–1352
93. Nourkami-Tutdibi N, Tutdibi E, Schmidt S, Zemlin M, Abdul-Khaliq H, Hofer M (2020) Long-Term Knowledge Retention after Peer-Assisted Abdominal Ultrasound Teaching: Is PAL a Successful Model for Achieving Knowledge Retention? *Ultraschall Med* 41:36–43
94. Oggè G, Gaglioti P, Maccanti S, Faggiano F, Todros T (2006) Prenatal screening for congenital heart disease with four-chamber and outflow-tract views: a multicenter study. *Ultrasound Obstet Gynecol* 28:779–784
95. Oliveira JD, Martins I (2019) Congenital systemic venous return anomalies to the right atrium review. *Insights Imaging* 10:
96. Onslow M (1821) Obstetrical Researches. *The London Medical Repository* 15:101f
97. Oosterhuis JJ, Gillissen A, Snijder CA, Stiggelbout A, Haak MC (2016) Decision-making in the referral process of sonographers in primary care screening centers. *Prenat Diagn* 36:555–560
98. Owen H (2012) Early use of simulation in medical education. *Simul Healthc* 7:102–116

99. Patel N, Narasimhan E, Kennedy A (2017) Fetal Cardiac US: Techniques and Normal Anatomy Correlated with Adult CT and MR Imaging. *Radiographics* 37:1290–1303
100. Pezel T, Dreyfus J, Mouhat B, Thébaut C, Audureau E, Bernard A, Badie YL, Bohbot Y, Fard D, Nguyen LS, Monteil C, Bière L, Le Ven F, Canu M, Ribeyrolles S, Mion B, Bazire B, Fauvel C, Cautela J, Cambet T, Le Tourneau T, Donal E, Lafitte S, Magne J, Mansencal N, Coisne A (2023) Effectiveness of Simulation-Based Training on Transesophageal Echocardiography Learning: The SIMULATOR Randomized Clinical Trial. *JAMA Cardiol* 8:248–256
101. Pinto NM, Weng C, Sheng X, Simon K, Byrne JB, Miller T, Puchalski MD (2016) Modifiers of stress related to timing of diagnosis in parents of children with complex congenital heart disease. *J Matern Fetal Neonatal Med* 29:3340–3346
102. Recker F, Dugar M, Böckenhoff P, Gembruch U, Geipel A (2022) Development and implementation of a comprehensive postgraduate ultrasound curriculum for residents in obstetrics and gynecology: a feasibility study. *Arch Gynecol Obstet* 306:1045
103. Rychik J, Ayres N, Cuneo B, Gotteiner N, Hornberger L, Spevak PJ, Van Der Veld M (2004) American society of echocardiography guidelines and standards for performance of the fetal echocardiogram. *J Am Soc Echocardiogr* 17:803–810
104. Rychik J, Montenegro L, Nicolson S, Rome J, Gaynor JW, Spray T, Donaghue D, Combs J, Miesnik S, Mann S, Bebbington M, Wilson RD, Johnson M (2008) 610: Immediate postpartum access to cardiac therapy: The impact procedure – a strategy for management of the fetus with severe cardiovascular disease. *Am J Obstet Gynecol* 199:S176
105. Salvesen KÅ, Lees C, Tutschek B (2010) Basic European ultrasound training in obstetrics and gynecology: where are we and where do we go from here? *Ultrasound Obstet Gynecol* 36:525–529
106. Schlapp MS, Riedel M, Cruz JJ, Berg C, Geipel A, Strizek B, Recker F (2023) Ultraschallausbildung in der Weiterbildung zum Facharzt der Gynäkologie und Geburtshilfe in Deutschland: aktueller Stand und Ausblick. *Z Geburtshilfe Neonatol* 227:P174
107. Schmand C, Misselwitz B, Hudel H, Bedei I, Wolter A, Schenk J, Keil C, Köhler S, Axt-Fliedner R (2022) Analysis of the Results of Sonographic Screening Examinations According to the Maternity Guidelines Before and After the Introduction of the Extended Basic Screening (IIb Screening) in Hesse. *Ultraschall Med* 44:e175–e183
108. Schnorrenberger C (2008) Anatomical Roots of Chinese Medicine and Acupuncture. *J Chin Med* 19:54–55

109. Schumacher G, Hess J, Bühlmeier K (2008) *Klinische Kinderkardiologie*. Springer, München
110. Schwedler G, Lindinger A, Lange PE, Sax U, Olchvary J, Peters B, Bauer U, Hense HW (2011) Frequency and spectrum of congenital heart defects among live births in Germany: A study of the competence network for congenital heart defects. *Clin Res Cardiol* 100:1111–1117
111. Sharland G (2012) Fetal cardiac screening and variation in prenatal detection rates of congenital heart disease: Why bother with screening at all? *Future Cardiol* 8:189–202
112. Sheehan FH, Zierler RE (2018) Simulation for competency assessment in vascular and cardiac ultrasound. *Vasc Med* 23:172–180
113. Smith HM, Kopp SL, Johnson RL, Long TR, Cerhan JH, Hebl JR (2012) Looking into learning: Visuospatial and psychomotor predictors of ultrasound-guided procedural performance. *Reg Anesth Pain Med* 37:441–447
114. Staboulidou I, Wüstemann M, Vaske B, Elsässer M, Hillemanns P, Scharf A (2010) Quality assured ultrasound simulator training for the detection of fetal malformations. *Acta Obstet Gynecol Scand* 89:350–354
115. Steinhard J, Freundt P, Janzing P, Popov V, Menkhaus R, Ross L (2022) Künstliche Intelligenz und Simulation in der Pränatalmedizin - was wir von Maschinen lernen können. *Die Gynäkologie* 55:746–758
116. Stümpflen I, Stümpflen A, Wimmer M, Bernaschek G (1996) Effect of detailed fetal echocardiography as part of routine prenatal ultrasonographic screening on detection of congenital heart disease. *Lancet* 348:854–857
117. Sundar E, Sundar S, Pawlowski J, Blum R, Feinstein D, Pratt S (2007) Crew Resource Management and Team Training. *Anesthesiol Clin* 25:283–300
118. Tabbutt S, Ghanayem N, Ravishankar C, Sleeper LA, Cooper DS, Frank DU, Lu M, Pizarro C, Frommelt P, Goldberg CS, Graham EM, Krawczeski CD, Lai WW, Lewis A, Kirsh JA, Mahony L, Ohye RG, Simsic J, Lodge AJ, Spurrier E, Stylianou M, Laussen P (2012) Risk factors for hospital morbidity and mortality after the Norwood procedure: A report from the Pediatric Heart Network Single Ventricle Reconstruction trial. *J Thorac Cardiovasc Surg* 144:882–895
119. Taksøe-Vester C, Dyre L, Schroll J, Tabor A, Tolsgaard M (2021) Simulation-Based Ultrasound Training in Obstetrics and Gynecology: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Ultraschall Med* 42:e42–e54

120. Tegnander E, Eik-Nes SH (2006) The examiner's ultrasound experience has a significant impact on the detection rate of congenital heart defects at the second-trimester fetal examination. *Ultrasound Obstet Gynecol* 28:8–14
121. Thakur V, Munk N, Mertens L, Nield LE (2016) Does prenatal diagnosis of hypoplastic left heart syndrome make a difference? – A systematic review. *Prenat Diagn* 36:854–863
122. Tolsgaard M, Rasmussen M, Tappert C, Sundler M, Sorensen J, Ottesen B, Ringsted C, Tabor A (2014) Which factors are associated with trainees' confidence in performing obstetric and gynecological ultrasound examinations? *Ultrasound Obstet Gynecol* 43:444–451
123. Tolsgaard M, Ringsted C, Dreisler E, Klemmensen A, Loft A, Sorensen J, Ottesen B, Tabor A (2014) Reliable and valid assessment of ultrasound operator competence in obstetrics and gynecology. *Ultrasound Obstet Gynecol* 43:437–443
124. Tolsgaard M, Ringsted C, Dreisler E, Nørgaard L, Petersen J, Madsen M, Freiesleben N, Sørensen J, Tabor A (2015) Sustained effect of simulation-based ultrasound training on clinical performance: A randomized trial. *Ultrasound Obstet Gynecol* 46:312–318
125. Tolsgaard M, Ringsted C, Rosthøj S, Nørgaard L, Møller L, La Cour Freiesleben N, Dyre L, Tabor A (2017) The effects of simulation-based transvaginal ultrasound training on quality and efficiency of care. *Ann Surg* 265:630–637
126. Tolsgaard M (2018) A multiple-perspective approach for the assessment and learning of ultrasound skills. *Perspect Med Educ* 7:211–213
127. Tolsgaard M (2018) Assessment and learning of ultrasound skills in obstetrics & gynecology. *Dan Med J* 65:
128. Tolsgaard M, Veluppillai C, Gueneuc A, Taksoe-Vester C, Hajal N, Levailant J, Ville Y, Tabor A, Chalouhi G (2019) When Are Trainees Ready to Perform Transvaginal Ultrasound? An Observational Study. *Ultraschall Med* 40:366–373
129. Tomek V, Marek J, Jičínská H, Škovránek J (2009) Fetal cardiology in the Czech Republic: current management of prenatally diagnosed congenital heart diseases and arrhythmias. *Physiol Res* 58 Suppl 2:S159–S166
130. Tulzer G, Arzt W, Franklin R, Loughna P, Mair R, Gardiner H (2002) Fetal pulmonary valvuloplasty for critical pulmonary stenosis or atresia with intact septum. *Lancet* 360:1567–1568

131. Tulzer G, Arzt W (2018) Fetale kardiale Interventionen – Methode, Risiko, Outcome. URL: <https://www.universimed.com/ch/article/gynaekologie-geburtshilfe/fetale-kardiale-interventionen-methode-risiko-outcome-2116035>
132. Tworetzky W, Wilkins-Haug L, Jennings RW, Van der Velde ME, Marshall AC, Marx GR, Colan SD, Benson CB, Lock JE, Perry SB (2004) Balloon dilation of severe aortic stenosis in the fetus: Potential for prevention of hypoplastic left heart syndrome. Candidate selection, technique, and results of successful intervention. *Circulation* 110:2125–2131
133. Uzun O, Kennedy J, Davies C, Goodwin A, Thomas N, Rich D, Thomas A, Tucker D, Beattie B, Lewis MJ (2018) Training: Improving antenatal detection and outcomes of congenital heart disease. *BMJ Open Qual* 7:e000276
134. van Nesselrooij AEL, Teunissen AKK, Clur SA, Rozendaal L, Pajkrt E, Linskens IH, Rammeloo L, van Lith JMM, Blom NA, Haak MC (2020) Why are congenital heart defects being missed? *Ultrasound Obstet Gynecol* 55:747–757
135. Verheijen PM, Lisowski LA, Stoutenbeek P, Hitchcock JF, Brenner JI, Copel JA, Kleinman CS, Meijboom EJ, Bennink GBWE (2001) Prenatal diagnosis of congenital heart disease affects preoperative acidosis in the newborn patient. *J Thorac Cardiovasc Surg* 121:798–803
136. Wagner R, Razek V, Gräfe F, Berlage T, Janoušek J, Daehnert I, Weidenbach M (2013) Effectiveness of Simulator-Based Echocardiography Training of Noncardiologists in Congenital Heart Diseases. *Echocardiography* 30:693–698
137. Walker MA, MacCormick MRA, Kilkenny JJ, Phillips J, Singh A, zur Linden A (2019) Visuospatial skills are better predictors than dexterity for basic ultrasonographic and fluoroscopic skills in veterinary students. *Vet Radiol Ultrasound* 60:81–92
138. World Federation for Ultrasound in Medicine and Biology, International Society of Ultrasound in Obstetrics & Gynecology (2013) WFUMB/ISUOG Statement on the Safe Use of Doppler Ultrasound During 11–14 Week Scans (or Earlier in Pregnancy). *Ultrasound Med Biol* 39:373
139. World Health Organization (2013) Transforming and scaling up health professionals' education and training. Genf. URL: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/93635/9789241506502\\_eng.pdf;jsessionid=2E99B74C2013C9C33A8C53638FFAEA4D?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/93635/9789241506502_eng.pdf;jsessionid=2E99B74C2013C9C33A8C53638FFAEA4D?sequence=1)
140. Yagel S, Arbel R, Anteby EY, Raveh D, Achiron R (2002) The three vessels and trachea view (3VT) in fetal cardiac scanning. *Ultrasound Obstet Gynecol* 20:340–345

141. Ziv A, Root Wolpe P, Small SD, Glick S (2003) Simulation-based medical education: An ethical imperative. *Academic Medicine* 78:783–788

# 12 Anhänge

## Subjektive Bewertung der Schwierigkeit der Standardebenen

Bitte auf der Achse ankreuzen: Die folgende Ebene einzustellen finde ich...

*sehr leicht*

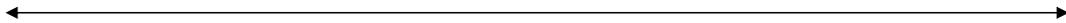
*sehr schwierig*

### Ebenen der fetalen Echokardiographie

Abdomen



Four chamber view



Left ventricular outflow tract (LVOT)



Right ventricular outflow tract (RVOT)



Three vessels view (als drei Gefäßanschnitte nebeneinander)



Three vessels view - Trachea (V-förmig)



Bicaval



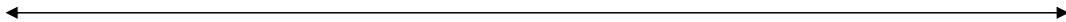
Aortic Arch



Ductal Arch



High Short Axis



Low Short Axis



# GynSonoSim-Studie: Fragebogen zur Selbsteinschätzung

NAME:

VORNAME:

GEBDAT:

1. Approbation seit: \_\_\_\_\_ (Monat) \_\_\_\_\_ (Jahr)
2. Facharzt Frauenheilkunde/Geburtshilfe seit: \_\_\_\_\_ //  kein Facharzt
3. Welche DEGUM-Qualifikation haben Sie:  
 Keine     DEGUM I     DEGUM II     DEGUM III
4. Ultraschallerfahrung
  - Wie viele US-Untersuchungen haben Sie insgesamt ca. durchgeführt? \_\_\_\_\_
  - Wie viele gynäkologische/geburtshilfliche US-Untersuchungen haben Sie insgesamt ca. durchgeführt? \_\_\_\_\_
  - Fetale Biometrien nach MuRL im 2. und 3. Trimenon? \_\_\_\_\_
  - Organultraschalls nach MuRL 2B / DEGUM I? \_\_\_\_\_
  - Fehlbildungultraschall / Feindiagnostik (Level DEGUM II) \_\_\_\_\_
  - Fetale Echokardiographien (mit Ausflusstraktbeurteilung) \_\_\_\_\_
5. Wie viele Herzfehler haben Sie im Ultraschall gesehen? \_\_\_\_\_
6. Wie viele Herzfehler haben Sie selbstständig erkannt? \_\_\_\_\_
7. Welche der folgenden Herzfehler haben Sie schon selbst diagnostiziert:  
 VSD  
 ASD  
 AVSD  
 TOF (Fallot)  
 HLHS  
 Aortenisthmusstenose  
 DORV  
 Pulmonalstenose  
 Aortenstenose  
 Partielle Lungenvenenfehleinnüpfung
8. Welche der folgenden Fehlbildungen haben Sie schon selbst diagnostiziert:  
 Pyelektasie  
 Omphalozele  
 Gastroschisis  
 Spina bifida  
 Skelettfehlbildungen  
 LKG  
 Duodenalatresie  
 Lungenfehlbildungen  
 Nierenagenesie (auch einseitig)

## 13 Publikationen

Teilergebnisse dieser Arbeit wurden auf folgenden Kongressen vorgestellt:

- 31. ISUOG World Congress on Ultrasound in Obstetrics and Gynecology, online, 15. – 17. Oktober 2021  
**P. Janzing**, N. Nourkami-Tutdibi, E. Tutdibi, P. Freundt, M. Zemlin, T. von Ostrowski, M. Langer, J. Steinhard  
*High-end ultrasound simulation training in fetal echocardiography FESIM II: A prospective six-week trial with a virtual, randomly moving fetus*  
<https://doi.org/10.1002/uog.24308>
  
- 64. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Gynäkologie und Geburtshilfe e.V., München, 12. – 15. Oktober 2022  
J. Steinhard, P. Freundt, **P. Janzing**, E. Tutdibi, N. Nourkami-Tutdibi  
*Effizientes Simulator-Training in der Pränatalmedizin – Erfahrungen aus den FESIM-Studien*  
<https://doi.org/10.1055/s-0042-1757063>
  
- 31. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Perinatale Medizin, Berlin, 30. November – 2. Dezember 2023  
J. Steinhard, **P. Janzing**, P. Freundt, E. Tutdibi, N. Nourkami-Tutdibi  
*High End Simulator-Training in der Pränatalen Medizin – eine Chance für eine standardisierte Ausbildung*  
<https://doi.org/10.1055/s-0043-1776500>

Teilergebnisse dieser Arbeit wurden in folgenden Fachzeitschriften zur Publikation angenommen:

- **P. Janzing**, N. Nourkami-Tutdibi, E. Tutdibi, P. Freundt, T. von Ostrowski, M. Langer, M. Zemlin, J. Steinhard  
*Controlled prospective study on ultrasound simulation training in fetal echocardiography: FESIM II*  
Arch Gynecol Obstet (2023), Springer, <https://doi.org/10.1007/s00404-023-07133-2>
  
- J. Steinhard, P. Freundt, **P. Janzing**, V. Popov, R. Menkhaus, L. Ross  
*Künstliche Intelligenz und Simulation in der Pränatalmedizin – was wir von Maschinen lernen können*  
Gynäkologie 55, 746–758 (2022), Springer, <https://doi.org/10.1007/s00129-022-04996-5>

## 14 Danksagung

Auf dem Weg zur Fertigstellung dieser Dissertation haben mich viele Menschen begleitet, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Zunächst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr. med. Michael Zemlin für die Möglichkeit der Promotion und die großzügige Ermöglichung der Open-Access-Publikation bedanken.

Ein besonderer Dank gilt Dr. med. Johannes Steinhard als Initiator, Ideengeber und Leiter dieser Studie. Vielen Dank für die stete Unterstützung, die Betreuung der Doktorarbeit und die zahlreichen fachlichen und wissenschaftlichen Anregungen. Durch ihn wurde mein Interesse an eigenständiger wissenschaftlicher Arbeit geweckt. Auch für die vielfältigen und spannenden Einblicke in die Pränataldiagnostik und die fetale Kardiologie, die ich bei ihm sammeln konnte, möchte ich mich bedanken.

Ein besonderer Dank gilt PD Dr. med. Nasenien Nourkami-Tutdibi für die stetige Unterstützung nicht nur durch die Betreuung meiner Doktorarbeit. Ihr offenes Ohr und ihre Anregungen haben mir sehr geholfen und mir viele Türen geöffnet. Ihr und PD Dr. med. Erol Tutdibis großes Engagement für das Wahlfach „sonoBYstudents“ haben meine Begeisterung für die Sonographie und die Ultraschalldidaktik geweckt. Ohne dieses Engagement und ohne sonoBYstudents wäre diese Dissertation nie entstanden!

Vielen Dank auch an PD Dr. med. Erol Tutdibi für die Unterstützung bei den statistischen Analysen und der Erstellung der Grafiken.

Ich danke den Studierenden, die trotz parallellaufender Famulaturen, Praktischem Jahr oder Examenslernplänen an der Studie teilgenommen haben. Auch danke ich allen teilnehmenden Ärzt:innen, die trotz der sehr zeitintensiven Arbeit in ihren Kliniken oder Praxen Zeit für die Studienteilnahme gefunden haben.

Vielen Dank an all meine Freund:innen, die mich während der letzten Jahre begleitet haben. Besonders möchte ich Joschi und Max für das stete gegenseitige offene Ohr, die aufbauenden Worte und das sorgfältige Korrekturlesen des Manuskriptes danken.

Besonders und in tiefer Verbundenheit möchte ich meiner Partnerin, Co-Doktorandin und besten Freundin Paula danken. Ich freue mich, dass wir diesen Weg gemeinsam gegangen sind.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern für die liebevolle Unterstützung nicht nur während dieser Doktorarbeit, sondern während meines gesamten Studiums. Vielen Dank an meine Mutter Burgis für die Durchsicht meines Manuskriptes!

## **15 Lebenslauf**

Aus datenschutzrechtlichen Gründen wird der Lebenslauf in der elektronischen Fassung der Dissertation nicht veröffentlicht.

Aus datenschutzrechtlichen Gründen wird der Lebenslauf in der elektronischen Fassung der Dissertation nicht veröffentlicht.