

# **Postoperative Ergebnisse kombinierter Trikuspidalklappenoperation über Sternotomie im Vergleich zu minimalinvasiver Chirurgie**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. med.)

der Medizinischen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

Bonn

**Clara Meret Klocksin**

aus Bonn

2026

Angefertigt mit der Genehmigung  
der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Prof. Dr. Farhad Bakhtiary
2. Gutachter: PD Dr. Florian Piekarski

Tag der mündlichen Prüfung: 01.06.2026

Aus der Klinik und Poliklinik für Herzchirurgie

## Inhaltsverzeichnis

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
|           | <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>                                | <b>5</b>  |
| <b>1.</b> | <b>Einleitung .....</b>   | <b>7</b>  |
| 1.1       | Die Herzklappen .....   | 7         |
| 1.2       | Die Trikuspidalklappe .....                                       | 10        |
| 1.3       | Die Trikuspidalklappeninsuffizienz.....                           | 13        |
| 1.4       | Chirurgische und interventionelle Techniken .....                 | 18        |
| 1.5       | Stand der Wissenschaft .....                                      | 24        |
| <b>2.</b> | <b>Material und Methoden.....</b>                                 | <b>27</b> |
| 2.1       | Studiendesign.....  | 27        |
| 2.2       | Echokardiographie .....   | 30        |
| 2.3       | Sternotomie .....   | 34        |
| 2.4       | Minimalinvasive Chirurgie.....                                    | 35        |
| 2.5       | Statistik.....  | 37        |
| <b>3.</b> | <b>Ergebnisse .....</b>   | <b>39</b> |
| 3.1       | Präoperative Charakteristika der Gesamtpopulation .....           | 39        |
| 3.2       | Operative und postoperative Ergebnisse der Gesamtpopulation ..... | 43        |
| 3.3       | Präoperative Charakteristika der Matching-Analyse.....            | 47        |
| 3.4       | Operative und postoperative Ergebnisse der Matching-Analyse ..... | 51        |
| <b>4.</b> | <b>Diskussion .....</b>   | <b>56</b> |
| 4.1       | Behandlung der Trikuspidalklappeninsuffizienz.....                | 56        |
| 4.2       | Operative Zeiten .....  | 61        |
| 4.3       | Bluttransfusion und postoperative Versorgung .....                | 63        |

|            |                                       |           |
|------------|---------------------------------------|-----------|
| 4.4        | Mortalitätsraten.....                 | 65        |
| 4.5        | Echokardiographische Ergebnisse ..... | 68        |
| <b>5.</b>  | <b>Zusammenfassung .....</b>          | <b>74</b> |
| <b>6.</b>  | <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>    | <b>76</b> |
| <b>7.</b>  | <b>Tabellenverzeichnis.....</b>       | <b>77</b> |
| <b>8.</b>  | <b>Literaturverzeichnis.....</b>      | <b>78</b> |
| <b>9.</b>  | <b>Erklärung zum Eigenanteil.....</b> | <b>85</b> |
| <b>10.</b> | <b>Veröffentlichung .....</b>         | <b>86</b> |
| <b>11.</b> | <b>Danksagung .....</b>               | <b>87</b> |

## Abkürzungsverzeichnis

|        |   |
|--------|---|
| A./Aa. | Arteria/Arteriae  |
| ACC    | American College of Cardiology                              |
| ACI    | Arteria carotis interna                                     |
| AHA    | American Heart Association                                  |
| BMI    | Body-Mass-Index   |
| CAVI   | caval valve implantation                                    |
| COPD   | chronisch obstruktive Lungenerkrankung                      |
| DCM    | dilatative Kardiomyopathie                                  |
| DGTHG  | Deutsche Gesellschaft für Thorax-, Herz- und Gefäßchirurgie |
| EACTS  | European Association for Cardio-Thoracic Surgery            |
| ECMO   | extrakorporale Membranoxygenation                           |
| EK     | Erythrozytenkonzentrat                                      |
| EROA   | effective regurgitant orifice area                          |
| ESC    | European Society of Cardiology                              |
| HLM    | Herz-Lungen-Maschine  |
| ICD    | implantierbarer Kardioverter-Defibrillator                  |
| ICM    | ischämische Kardiomyopathie                                 |
| KHK    | koronare Herzkrankheit                                      |
| LV     | linker Ventrikel/linksventrikulär                           |
| LVEF   | linksventrikuläre Ejektionsfraktion                         |
| M      | Mittelwert  |
| M./Mm. | Musculus/Musculi  |
| MHz    | Megahertz   |

|        |  |
|--------|--|
| MIC    | minimalinvasive Chirurgie                    |
| MKC    | Mitralklappenchirurgie                       |
| NYHA   | New York Heart Association                   |
| OR     | Odds Ratio                                   |
| pAVK   | periphere arterielle Verschlusskrankheit     |
| PCI    | perkutane koronare Intervention              |
| PISA   | proximal isovelocity surface area            |
| RCT    | randomisierte kontrollierte Studie           |
| RV     | rechter Ventrikel/rechtsventrikulär          |
| SD     | Standardabweichung                           |
| TAPSE  | tricuspid annular plane systolic excursion   |
| TEE    | transösophageale Echokardiographie           |
| TI     | Trikuspidalklappeninsuffizienz               |
| TKC    | Trikuspidalklappenchirurgie                  |
| TTE    | transthorakale Echokardiographie             |
| TVARC  | Tricuspid Valve Academic Research Consortium |
| V./Vv. | Vena/Venae                                   |
| VCW    | Vena contracta width                         |
| VHF    | Vorhofflimmern                               |
| WHS    | Wundheilungsstörung                          |

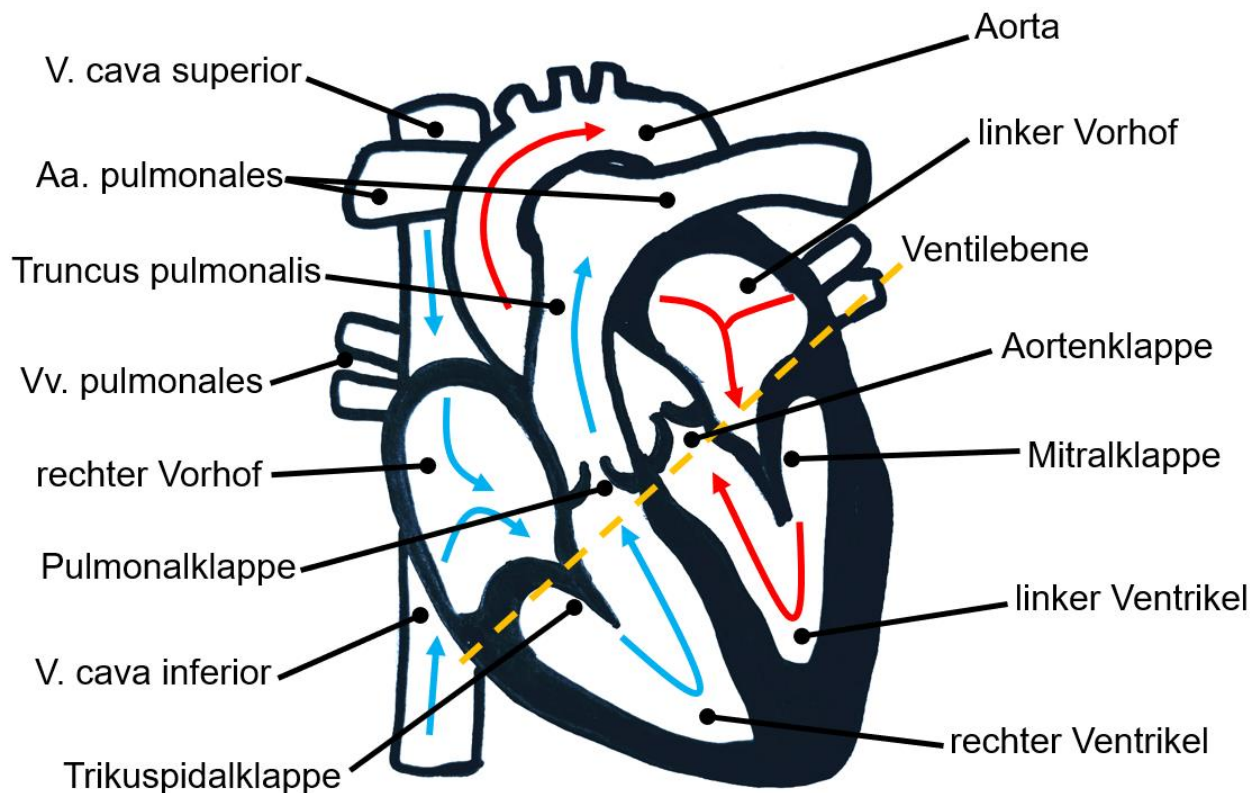
## 1. Einleitung

Die konventionelle chirurgische Behandlung der Trikuspidalklappe über eine komplette Sternotomie ist verbunden mit erhöhter Morbidität und Mortalität (Abdelbar et al., 2021). Um die Invasivität und das damit verbundene operative Risiko zu senken wurde in den letzten beiden Jahrzehnten die minimalinvasive Trikuspidalklappenchirurgie (TKC) in den Fokus gerückt. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf multimorbide Hochrisikopatientinnen und -patienten (Abdelbar et al., 2021).

### 1.1 Die Herzklappen

Das Herz differenziert sich in ein linkes und ein rechtes Herz (im Folgenden werden Inhalte zusammengefasst, die sich auf Gödecke et al., 2023; Schmitz, 2020; Schünke et al., 2022 stützen). Rechter Vorhof und rechte Kammer sind durch das interatriale sowie das interventrikuläre Septum vom linken Vorhof und der linken Kammer getrennt. Das Blut fließt während der mechanischen Herzaktion erst durch die rechte und anschließend durch die linke Herzhälfte. Die beiden Herzhälften stellen zwei Pumpsysteme dar (Abb. 1).

Das venöse Blut des Körperkreislaufs gelangt aus der Vena (V.) cava superior und V. cava inferior in den rechten Vorhof. Nach Öffnung der Trikuspidalklappe fließt es weiter in den rechten Ventrikel. In der Austreibungsphase wird das Blut durch die Pulmonalklappe in den Truncus pulmonalis und über die Arteriae pulmonales (Aa. pulmonales) in die Lungen gepumpt. Im Lungenkreislauf wird das sauerstoffarme Blut arterialisiert und strömt über die Venae (Vv.) pulmonales in den linken Vorhof. Das mit Sauerstoff angereicherte Blut gelangt durch die Mitralklappe in den linken Ventrikel. In der Systole öffnet sich die Aortenklappe, sodass das Blut über die Aorta in den großen Körperkreislauf gepumpt wird. Das Herzzeitvolumen beschreibt das ausgeworfene Blutvolumen in Litern pro Minute und beträgt in Ruhe durchschnittlich 4,5–6 L/min.



**Abb. 1:** Blutkreislauf im Herzen: V. cava superior und V. cava inferior → rechter Vorhof → Trikuspidalklappe → rechter Ventrikel → Pulmonalklappe → Truncus pulmonalis → Aa. pulmonales → Lungen → Vv. pulmonales → linker Vorhof → Mitralklappe → linker Ventrikel → Aortenklappe → Aorta. Eigene Darstellung nach Gödecke et al., 2023

Die vier Herzklappen, auch als Valvae cordis bezeichnet, befinden sich auf der sogenannten Klappen- oder Ventilebene. Diese Ebene wird durch das Herzskelett gebildet, das die Klappen umgibt. Das Herzskelett besteht aus einer Schicht aus Bindegewebe und Fettgewebe. Es trennt die Vorhöfe von den Kammern und somit auch deren erregbare Herzmuskulatur.

Zwischen den beiden Atrioventrikularklappen (Trikuspidal- und Mitralklappe) und den beiden Taschenklappen (Aorten- und Pulmonalklappe) wird unterschieden. Die Atrioventrikularklappen regulieren den Blutfluss zwischen den Vorhöfen und den Ventrikeln, während die Taschenklappen den Blutfluss aus dem Ventrikel in den großen Körperkreislauf bzw. den kleinen Lungenkreislauf steuern. Ihre Funktionsweise basiert auf

dem Prinzip eines Rückschlagventils: Der Blutfluss erfolgt ausschließlich in die vorgegebene Richtung, wobei ein Rückstrom zuverlässig verhindert wird.

Die Atrioventrikularklappen, auch als Segelklappen bezeichnet, bestehen aus bindegewebigen Segelblättern, die über Sehnenfäden (*Chordae tendineae*) mit den Papillarmuskeln (*Mm. papillares*) in den Ventrikeln verbunden sind. Die linke Atrioventrikularklappe (*Valva atrioventricularis sinistra*, Mitralklappe) setzt sich aus zwei Segeln, dem *Cuspis anterior* und dem *Cuspis posterior*, zusammen.

Im Gegensatz dazu besteht die rechte Atrioventrikularklappe (*Valva atrioventricularis dextra*, Trikuspidalklappe) aus drei Segeln: *Cuspis anterior*, *Cuspis posterior* und *Cuspis septalis*. Während der Diastole strömt das Blut aus den Vorhöfen in die Kammern, wobei die Atrioventrikularklappen durch den Blutdruck geöffnet werden. In der Systole entsteht in den Ventrikeln ein hoher Druck. Damit das Blut nicht zurück in die Vorhöfe fließt, kommt der Mechanismus des Rückschlagventils zum Einsatz: Die Segel wölben sich in Richtung der Vorhöfe, wobei die *Chordae tendineae*, die an den Papillarmuskeln befestigt sind, gespannt werden. Dadurch wird ein Rückschlag der Segel in die Vorhöfe unterbunden. Die Mitralklappe ist über ihre zwei Segel mit zwei Papillarmuskeln (*M. papillaris anterior* und *posterior*) verbunden, während die Trikuspidalklappe mit ihren drei Segeln an drei Papillarmuskeln (*M. papillaris anterior*, *posterior* und *septalis*) befestigt ist.

Die Aorten- und Pulmonalklappe werden auch als Taschenklappen bezeichnet, weil sie jeweils drei halbmondförmige, taschenartige Blätter (*Valvulae semilunares*) besitzen. Sie bestehen aus Bindegewebe und einem Endokardüberzug. Anders als die Segelklappen sind sie nicht mit Sehnenfäden fixiert. Die Aortenklappe (*Valva aortae*) liegt zwischen dem linken Ventrikel und der Aorta. Die Pulmonalklappe (*Valva trunci pulmonalis*) liegt zwischen dem rechten Ventrikel und dem *Truncus pulmonalis*. In der Systole öffnen sich die Taschenklappen in Folge des sich aufbauenden Druckgradienten. Das Blut fließt aus den Ventrikeln in den Körper- bzw. Lungenkreislauf. Mit der Diastole fällt der Druck im Ventrikel ab und die Klappen verschließen dicht. Sie verhindern, dass das Blut aus der

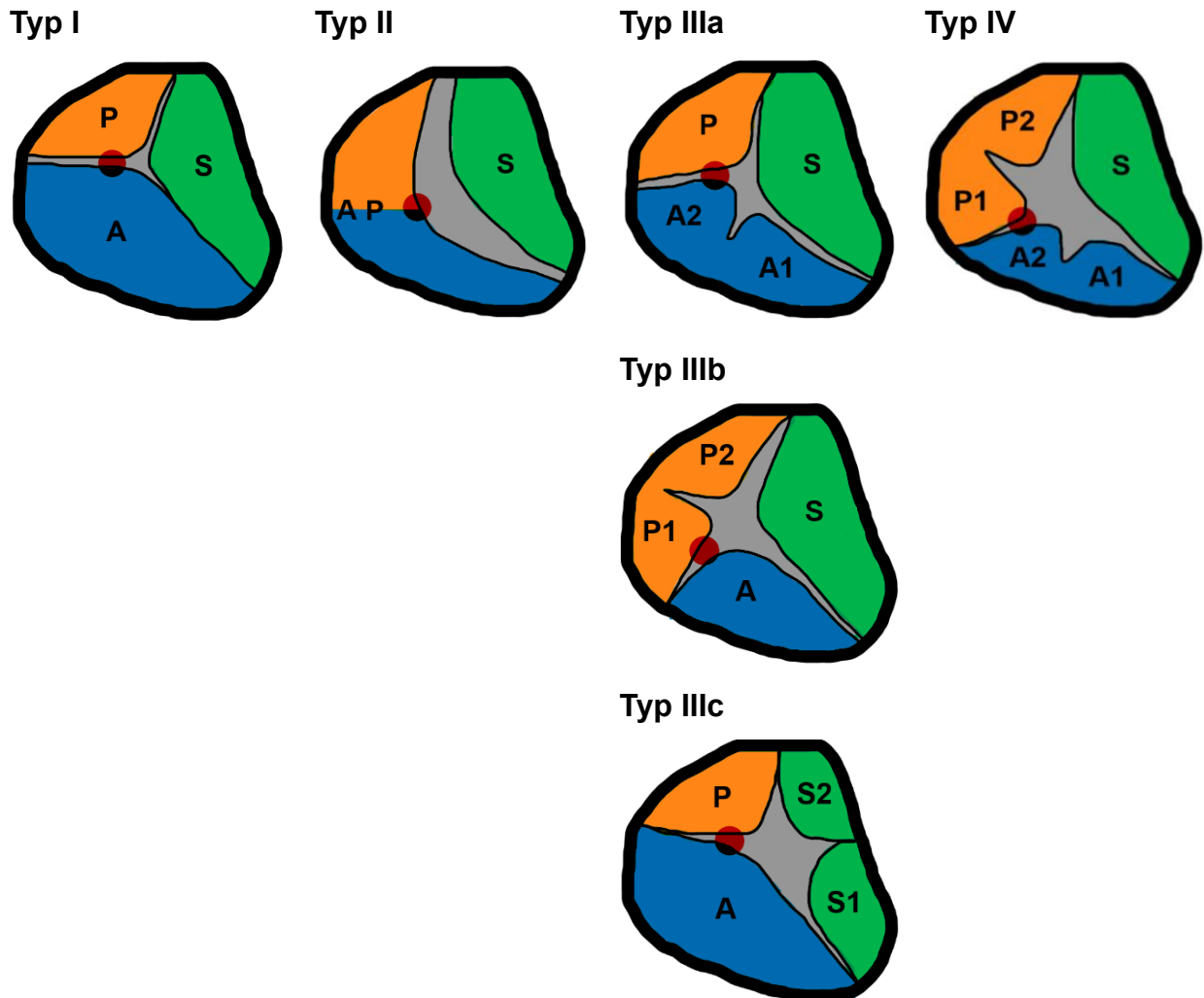
Aorta und dem Truncus pulmonalis zurück in die Kammern strömt. Die drei Taschen wölben sich dabei sackartig in die Ventrikel vor.

Alle vier Herzklappen können in ihrem funktionellen Mechanismus durch pathologische Veränderungen beeinträchtigt werden. Es wird die Klappenstenose von der Klappeninsuffizienz unterschieden. Liegt eine Stenose vor, ist die Klappenöffnung erschwert. Der Blutfluss ist reduziert, und vor der Klappe kommt es zur Druckerhöhung. Im Falle der Insuffizienz findet ein unvollständiger Verschluss der Klappensegel statt. Dies führt zu einem Rückstrom des Blutes. Eine Insuffizienz der Atrioventrikularklappen kann beispielsweise durch den Abriss der Papillarmuskeln bzw. der Sehnenfäden, oder sekundär durch Erweiterung des Klappenanulus bedingt sein. Insuffizienz und Stenose können auch in Kombination vorliegen.

Bei einer höhergradigen Insuffizienz und/oder Stenose kann eine operative Klappenrekonstruktion oder ein Klappenersatz notwendig werden. Da Erkrankungen der Herzklappen Teil der Herz-Kreislauf-Erkrankungen sind, tragen sie zu einer bedeutenden globalen Krankheitslast bei: Herz-Kreislauf-Erkrankungen sind weltweit die häufigste Todesursache unter den nichtübertragbaren Krankheiten, und waren im Jahr 2021 für mehr als 19 Millionen Todesfälle verantwortlich (World Health Organization, 2024).

## 1.2 Die Trikuspidalklappe

Der Trikuspidalklappenkomplex umfasst die drei Klappensegel, den Klappenanulus, die Chordae tendineae, die Papillarmuskeln sowie die Herzmuskulatur des rechten Vorhofs und des rechten Ventrikels (im Folgenden werden Inhalte zusammengefasst, die sich auf Condello et al., 2021; Hahn et al., 2021 stützen). Die drei Klappensegel, Cuspides anterior, posterior und septalis bestehen aus einer dünnen Bindegewebsschicht, die von Endokard überzogen ist. Das anteriore Blatt hat die größte und das septale Blatt die kleinste Oberfläche.



**Abb. 2:** Ausprägungsformen der Trikuspidalklappe. **P:** posteriores Segel; **A:** anteriores Segel; **S:** septales Segel; **●:** anteriorer Papillarmuskel. Eigene Darstellung nach Hahn et al., 2021

Die Morphologie der Trikuspidalklappe zeigt eine hohe Variabilität. Mithilfe der transösophagealen Echokardiographie (TEE) lassen sich vier Ausprägungsformen der Trikuspidalklappe differenzieren (Abb. 2). Typ I repräsentiert die klassische Form mit drei Segeln. Bei Typ II liegt eine zweiblättrige Morphologie vor, bei der das anteriore und das posteriore Segel zu einem großen Blatt verschmolzen sind. Typ III ist durch vier Klappensegel gekennzeichnet, wobei ein zusätzliches Segel aus einem der drei klassischen Segel entsteht. Abhängig von der Lokalisation des zusätzlichen Blattes wird zwischen Typ IIIa (Zusatzblatt am anterioren Segel), Typ IIIb (Zusatzblatt am posterioren

Segel) und Typ IIIc (Zusatzblatt am septalen Segel) unterschieden. Typ IV umfasst Klappen mit mehr als vier Segeln. Die Morphologien Typ I und Typ IIIb treten am häufigsten auf.

Die Trikuspidalklappe liegt auf der Höhe der Ventilebene und wird von dem Herzskelett umgeben. Der bindegewebige, elliptisch geformte Faserring der Klappe, der sogenannte Anulus, besitzt eine dynamische Struktur. Diese Dynamik wird durch die Herzaktion und die damit einhergehenden Veränderungen des rechten Ventrikels beeinflusst. Der Anulus ist fest mit dem Herzskelett verbunden, wobei die Cuspis septalis in der Nähe des Trigonum fibrosum, einem Anteil des Herzskeletts, fest verankert ist. Die Cuspis posterior hingegen ist direkt mit der Wand des rechten Ventrikels verbunden. Aufgrund dieser anatomischen Fixierung ist die Bewegungsfreiheit des Klappenanulus in medialer und posterior-inferiorer Richtung stark eingeschränkt. Pathologisch zeigt sich daher bei einer Trikuspidalklappeninsuffizienz häufig eine Erweiterung des Anulus in anterolaterale Richtung. Die Papillarmuskeln des rechten Ventrikels sind kleiner und jeweils nur mit einem Klappensegel verbunden, im Gegensatz zum linken Ventrikel. Dadurch kann eine Dilatation des rechten Ventrikels den Anulus der Trikuspidalklappe erweitern und eine Insuffizienz fördern.

Neben der Klappeninsuffizienz stellt die Klappenstenose eine weitere wichtige Pathologie der Trikuspidalklappe dar, die häufig mit einer Insuffizienz kombiniert auftritt (Vahanian et al., 2022). Rheumatische Erkrankungen sind hierbei die häufigste Ursache (Vahanian et al., 2022): Bis zu 90 % der Trikuspidalklappenstenosen gründen auf rheumatischen Herzerkrankungen (Stähli und Lauten, 2019). Zur Ätiologie der Stenose können auch kongenitale Erkrankungen, Drogenabusus, infektiöse Endokarditis oder rechtsventrikuläres Tumorleiden zählen (Vahanian et al., 2022). In der Echokardiographie wird ein transvalvulärer Gradient von  $\geq 5$  mmHg als Hinweis auf eine manifeste Stenose angesehen (Baumgartner et al., 2009).

### 1.3 Die Trikuspidalklappeninsuffizienz

Die Leitlinien der Europäischen Gesellschaft für Kardiologie (ESC) und der Europäischen Gesellschaft für Herz-Thorax-Chirurgie (EACTS) zur Diagnose und Therapie von Herzklappenerkrankungen, veröffentlicht im Jahr 2021, geben an, dass bei etwa 0,55 % der Bevölkerung eine mindestens moderate Trikuspidalklappeninsuffizienz (TI) beobachtet wird (Vahanian et al., 2022). Diese Angabe basiert auf der US-amerikanischen Bevölkerungsstudie von Topilsky et al. (2019), in der für  $\geq$  moderate TI eine alters- und geschlechtsadjustierte Prävalenz von 0,55 % (95 %-KI: 0,50; 0,60) berichtet wurde. Bei Personen im Alter von 75 Jahren oder älter lag die Prävalenz bei etwa 4 % (Topilsky et al., 2019).

Ein Viertel der Personen mit Aortenklappenstenose und bis zu 50 % der Personen mit Mitralklappenstenose weisen eine mindestens moderate TI auf (Condello et al., 2021). Die Form der sekundären TI macht mit über 90 % den Hauptanteil aus (Möllmann et al., 2022; Vahanian et al., 2022). Eine höhergradige TI kann mit einer ungünstigen Prognose einhergehen und führt zu einer ansteigenden Mortalität auf über 30 % pro Jahr (Möllmann et al., 2022). Verantwortlich sind dafür unter anderem Begleiterkrankungen wie Herzinsuffizienz sowie Endorganschäden, darunter Nieren- und Leberversagen (Möllmann et al., 2022). Im Verlauf einer höhergradigen TI verschlechtert sich der Zusammenschluss (Koaptation) der Klappensegel zunehmend, was die rechtsventrikuläre Volumenbelastung und eine Erweiterung des Trikuspidalklappenannulus weiter verstärkt (Möllmann et al., 2022; Neuhold et al., 2013). Dieser Prozess führt zu einem sich selbst verstärkenden Teufelskreis, einem Circulus vitiosus (Möllmann et al., 2022; Neuhold et al., 2013).

Die TI wird in primäre (organische) und sekundäre (funktionelle) Formen unterteilt (Tab. 1). Die primäre TI tritt in weniger als 10 % der Fälle auf (Möllmann et al., 2022). Charakteristisch sind funktionelle Einschränkungen oder Perforationen der Klappensegel, ein verstärkter Zug oder eine Ruptur der Sehnenfäden sowie eine Dilatation des

Klappenannulus infolge einer Volumenüberlastung des rechten Herzens (Condello et al., 2021). Ätiologische Hintergründe können beispielsweise rheumatische Erkrankungen, Systemerkrankungen wie das Karzinoidsyndrom oder der Lupus erythematodes, infektiöse Endokarditis und kongenitale Pathologien, wie die Ebstein-Anomalie, sein (Möllmann et al., 2022). Darüber hinaus können iatrogene Verletzungen oder Schäden durch Traumata, Endomyokardbiopsien, Schrittmacher- und ICD-Sonden, Medikamente, Strahlentherapie oder Drogenabusus zu einer primären TI führen (Möllmann et al., 2022; Vahanian et al., 2022). Besondere Relevanz haben implantierte elektronische Herzschrittmacher- oder Defibrillatorsonden, die bei 20–30 % der Patientinnen und Patienten eine fortschreitende TI bedingen können (Vahanian et al., 2022).

**Tab. 1:** Ätiologie der Trikuspidalklappeninsuffizienz. Modifiziert nach Condello et al., 2021; Möllmann et al., 2022; Otto et al., 2021

| <b>Primäre TI</b>   | <b>Sekundäre (funktionelle) TI</b>  |
|---|---|
| Iatrogene Verletzungen <ul style="list-style-type: none"> <li>• Endomyokardbiopsien</li> <li>• Schrittmacher- und ICD-Geräte</li> <li>• Medikamente, Noxen</li> <li>• Strahlung</li> </ul>  | Pulmonale Hypertonie mit ggf. RV-Dysfunktion <ul style="list-style-type: none"> <li>• primär oder sekundär bei Linksherzerkrankungen</li> <li>• bei Lungenerkrankungen</li> <li>• idiopathisch</li> </ul> |
| Rheumatische Erkrankungen   | LV-Dysfunktion (DCM, ICM)   |
| Karzinoidsyndrom  | Aorten-/Pulmonal-/Mitralklappenvitien   |
| Trikuspidaler Prolaps   | Pericarditis constrictiva   |
| Infektiöse Endokarditis   | Kardiale Tumore   |
| Trauma  | Vorhofflimmern/Anulusdilatation   |
| Drogenabusus  | Shuntvitien   |
| Kongenitale Pathologien <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ebstein Anomalie</li> <li>• Atresie/Dysplasie</li> <li>• Bindegewebs-Syndrome</li> </ul>   | Hyperthyreose   |
| TI: Trikuspidalklappeninsuffizienz; ICD: implantierbarer Kardioverter-Defibrillator; RV: rechter Ventrikel/Rechtsventrikulär; LV: linker Ventrikel/Linksventrikulär; DCM: dilatative Kardiomyopathie; ICM: ischämische Kardiomyopathie. |   |

Die sekundäre TI kann durch eine fehlerhafte Koaptation der Klappensegel und eine Erweiterung des Klappenrings hervorgerufen werden. Der Grund hierfür sind pathologische Veränderungen im rechten Vorhof und/oder rechten Ventrikel (Hahn et al., 2023). Während der Systole ist die Trikuspidalklappe durch die physiologische Koaptation

der Klappensegel vollständig geschlossen, wobei etwa 5–10 mm der Segelflächen miteinander in Kontakt stehen. Im Zuge des Krankheitsprozesses verringert sich jedoch die Kontaktfläche zwischen den Segeln, ohne dass diese strukturell geschädigt sind. Die krankheitsbedingten Veränderungen im rechten Ventrikel führen zu einer kaudalen Verlagerung der Papillarmuskeln, was eine verstärkte Zugkraft der Sehnenfäden auf die Klappensegel (leaflet tethering) zur Folge hat. In Kombination mit einer fortschreitenden Anulusdilatation bleibt die Koaptation der Klappensegel unvollständig. Dies resultiert in einer funktionellen Insuffizienz, bei der der rechte Vorhof und der rechte Ventrikel zu einem zusammenhängenden Raum verschmelzen (Condello et al., 2021).

Eine durch pulmonale Hypertonie bedingte TI stellt die häufigste Form der funktionellen TI dar (Condello et al., 2021). Pulmonale Hypertonie kann als Folge verschiedener Grunderkrankungen auftreten, darunter Linksherzerkrankungen, Lungenerkrankungen, chronisch thromboembolische Erkrankungen sowie multifaktorielle Ursachen (Möllmann et al., 2022). Im Verlauf der pulmonalen Hypertonie kommt es zu einem strukturellen Umbau (Remodeling) des rechten Ventrikels (RV), des rechten Vorhofs und des Trikuspidalklappenannulus (Topilsky et al., 2012). Das longitudinale Remodeling des rechten Ventrikels führt zu einem verstärkten Tethering, das durch die kaudale Verlagerung der Papillarmuskeln und die damit verbundene erhöhte Zugkraft der Sehnenfäden auf die Klappensegel bedingt ist (Condello et al., 2021; Topilsky et al., 2012). Die beschriebenen strukturellen Umbauprozesse, Remodeling des rechten Vorhofes und/oder Ventrikels sowie eine Anulusdilatation, können bei einer Reihe weiterer Erkrankungen auftreten. Beispiele sind Kardiomyopathien, Linksherzinsuffizienz mit/ohne erhaltener Ejektionsfraktion, Aorten-, Pulmonal- und Mitralklappenitien, Pericarditis constrictiva, kardiale Tumore, Shuntvitien und Hyperthyreose (Möllmann et al., 2022).

In 8,1 % der Fälle tritt eine isolierte sekundäre TI ohne das Vorliegen einer Linksherzerkrankung auf (Topilsky et al., 2019). Diese isolierte Form der TI ist charakterisiert durch eine normale linksventrikuläre Ejektionsfraktion (LVEF) von über 60 % und einen pulmonalarteriellen systolischen Druck unter 50 mmHg (Otto et al., 2021). Häufig ist sie mit Vorhofflimmern (VHF) und/oder einem rechtsatrialen Remodeling

assoziiert (Möllmann et al., 2022). Die idiopathische funktionelle TI weist eine höhere Prävalenz von VHF auf (51 %), als eine TI in Zusammenhang mit pulmonaler Hypertonie (39 %) (Topilsky et al., 2012). Pathophysiologisch führt VHF zu einer Erweiterung des Trikuspidalklappenanulus, des rechten Vorhofs und des basalen Anteils des rechten Ventrikels. Mit fortschreitender Anulusdilatation bleibt die Klappe schließlich dauerhaft geöffnet (Condello et al., 2021).

Klinisch äußert sich die TI durch Symptome einer Rechtsherzinsuffizienz (Hahn et al., 2023). Diese können durch eine begleitende pulmonale Hypertonie und/oder Linksherzerkrankung verstärkt oder überlagert werden (Möllmann et al., 2022). Zu den typischen Zeichen einer systemischen Flüssigkeitsretention gehören periphere Ödeme, Anasarka, Aszites, eine Erweiterung der Vv. jugulares, verminderte Darmresorption, Splenomegalie und eine Leberfunktionsstörung, die sich als Cirrhose cardiaque manifestieren kann (Haddad et al., 2008; Hahn et al., 2023). Darüber hinaus können atriale und ventrikuläre Herzrhythmusstörungen auftreten. Eine Abnahme des Herzzeitvolumens führt zu Symptomen wie Leistungsminderung und Abgeschlagenheit, insbesondere bei einer chronischen TI (Haddad et al., 2008). Im weiteren Verlauf können Unterernährung, Anämie und eingeschränkte kognitive Funktionen hinzukommen (Haddad et al., 2008; Hahn et al., 2023). Ein hoher Schweregrad der chronischen TI, begleitet von einer Rechtsherzinsuffizienz, führt häufig zu Endorganschäden wie Niereninsuffizienz und Leberversagen (Hahn et al., 2023). Unbehandelt hat die TI, unabhängig von ihrer Ursache, eine schlechte Prognose. Selbst bei einem milden Schweregrad kann die Erkrankung eine schwerwiegende klinische Symptomatik nach sich ziehen (Hahn et al., 2023; Möllmann et al., 2022).

Die Leitlinien des American College of Cardiology (ACC) und der American Heart Association (AHA) von 2020 empfehlen bei einer fortgeschrittenen TI mit Symptomen der Rechtsherzinsuffizienz die medikamentöse Therapie mit Diuretika (Otto et al., 2021). Bei begleitender Leberstauung und Aktivierung des Renin-Angiotensin-Aldosteron-Systems kann zusätzlich die Verabreichung eines Aldosteron-Antagonisten erwogen werden (Otto et al., 2021). Die Behandlung der zugrunde liegenden Ursache der Herzinsuffizienz spielt

eine wichtige Rolle, um den Schweregrad der TI sowie die Volumenbelastung des rechten Ventrikels zu reduzieren (Otto et al., 2021). Hierbei stehen die Rhythmuskontrolle bei chronischem Vorhofflimmern sowie die Senkung des pulmonalarteriellen Drucks und des pulmonalvaskulären Widerstands im Fokus (Otto et al., 2021). Die ESC/EACTS-Leitlinien betonen jedoch, dass eine medikamentöse Therapie nicht die Indikation für eine chirurgische Intervention oder Transkathetertherapie verzögern sollte (Vahanian et al., 2022). Voraussetzung hierfür ist das Fehlen einer fortgeschrittenen rechtsventrikulären (RV-) Dysfunktion oder schweren pulmonalen Hypertonie (Vahanian et al., 2022).

Die ACC/AHA-Leitlinien von 2020 (Otto et al., 2021) und die ESC/EACTS-Leitlinien von 2021 (Vahanian et al., 2022) geben spezifische Empfehlungen für operative Interventionen bei Trikuspidalklappenerkrankungen. Eine Übersicht der Empfehlungen gemäß ESC/EACTS-Leitlinien zur Behandlung der Trikuspidalklappeninsuffizienz ist in Tabelle 2 dargestellt.

**Tab. 2:** Empfehlungen zur Trikuspidalklappenerkrankung nach den ESC/EACTS-Leitlinien 2021. Modifiziert nach Vahanian et al., 2022

| Klinische Situation  | Empfehlung                                   | Klasse/<br>Evidenz |
|--|--|--------------------|
| Schwere primäre Trikuspidalinsuffizienz bei gleichzeitiger Operation an einer linken Herzklappe.   | Operation empfohlen.                         | I/C                |
| Isolierte, symptomatische schwere primäre Trikuspidalinsuffizienz ohne relevante RV-Dysfunktion.   | Operation empfohlen.                         | I/C                |
| Asymptomatische oder leicht symptomatische Patientinnen und Patienten mit isolierter schwerer primärer Trikuspidalinsuffizienz und RV-Dilatation.  | Operation kann erwogen werden.               | IIa/C              |
| Schwere sekundäre Trikuspidalinsuffizienz bei Operation an einer linken Herzklappe.  | Operation empfohlen.                         | I/B                |
| Leichte bis mittelschwere sekundäre Trikuspidalinsuffizienz mit Anulusdilatation bei Operation an einer linken Herzklappe.   | Operation kann erwogen werden.               | IIa/B              |
| Schwere symptomatische sekundäre Trikuspidalinsuffizienz mit ggf. RV-Erweiterung, jedoch Fehlen von schwerer RV-/LV-Dysfunktion bzw. pulmonaler Hypertonie.  | Operation kann erwogen werden.               | IIa/B              |
| Inoperable Patientinnen und Patienten mit schwerer symptomatischer sekundärer Trikuspidalinsuffizienz.   | Transkatheterbehandlung kann erwogen werden. | IIb/C              |
| RV: rechter Ventrikel/rechtsventrikulär; LV: linker Ventrikel/linksventrikulär.<br>Klassen der Empfehlung: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Klasse I: Es besteht Evidenz, dass eine Maßnahme nützlich, wirksam und sinnvoll ist.</li> <li>• Klasse II: Umstrittene Evidenz über den Nutzen der Maßnahme.</li> <li>• Klasse III: Es besteht Evidenz, dass die Maßnahme nicht wirksam oder potenziell schädlich ist.</li> </ul> Evidenzgrade: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Level A: Daten aus randomisierten kontrollierten Studien (RCTs) oder Metaanalysen.</li> <li>• Level B: Daten aus einer einzelnen RCT oder großen nicht-randomisierten Studien.</li> <li>• Level C: Expertenmeinung, kleine Studien, retrospektive Studien.</li> </ul> |  |                    |

#### 1.4 Chirurgische und interventionelle Techniken

Operative Behandlungsoptionen für die Trikuspidalklappeninsuffizienz umfassen die Klappenrekonstruktion und den Klappenersatz (Tab. 3). Im Sinne einer möglichst minimalinvasiven Therapie wird die Klappenrekonstruktion mithilfe eines Anuloplastierings dem vollständigen Klappenersatz vorgezogen (Silaschi und Treede, 2020). Chirurgische Eingriffe können an drei zentralen Komponenten des Klappenapparates vorgenommen werden: dem Klappenanulus, den Klappensegeln und dem subvalvulären Apparat, einschließlich der Sehnenfäden und Papillarmuskeln (Lange

et al., 2017). Zu den etablierten Verfahren zählen die Naht-Anuloplastie nach De Vega und die Ring-Anuloplastie. Weitere chirurgische Therapieverfahren umfassen die Bikuspidalisierung nach Kay, edge-to-edge-Rekonstruktionen der Klappensegel oder den vollständigen Klappenersatz (Silaschi und Treede, 2020). Der operative Zugang erfolgt über eine komplette oder partielle Sternotomie, kann jedoch auch über einen minimalinvasiven, rechts-lateralen Zugang durchgeführt werden (Lange et al., 2017). Für den kardiopulmonalen Bypass werden die obere und untere Hohlvene kanüliert. Die TKC ist zudem am schlagenden Herzen möglich (Starck et al., 2015). Katheterbasierte, interventionelle Verfahren gewinnen zunehmend an Bedeutung, insbesondere für multimorbide Hochrisiko-patientinnen und -patienten. Sowohl Anuloplastie- und Segelrekonstruktionsverfahren als auch der Klappenersatz können kathetergestützt durchgeführt werden (Weber et al., 2020).

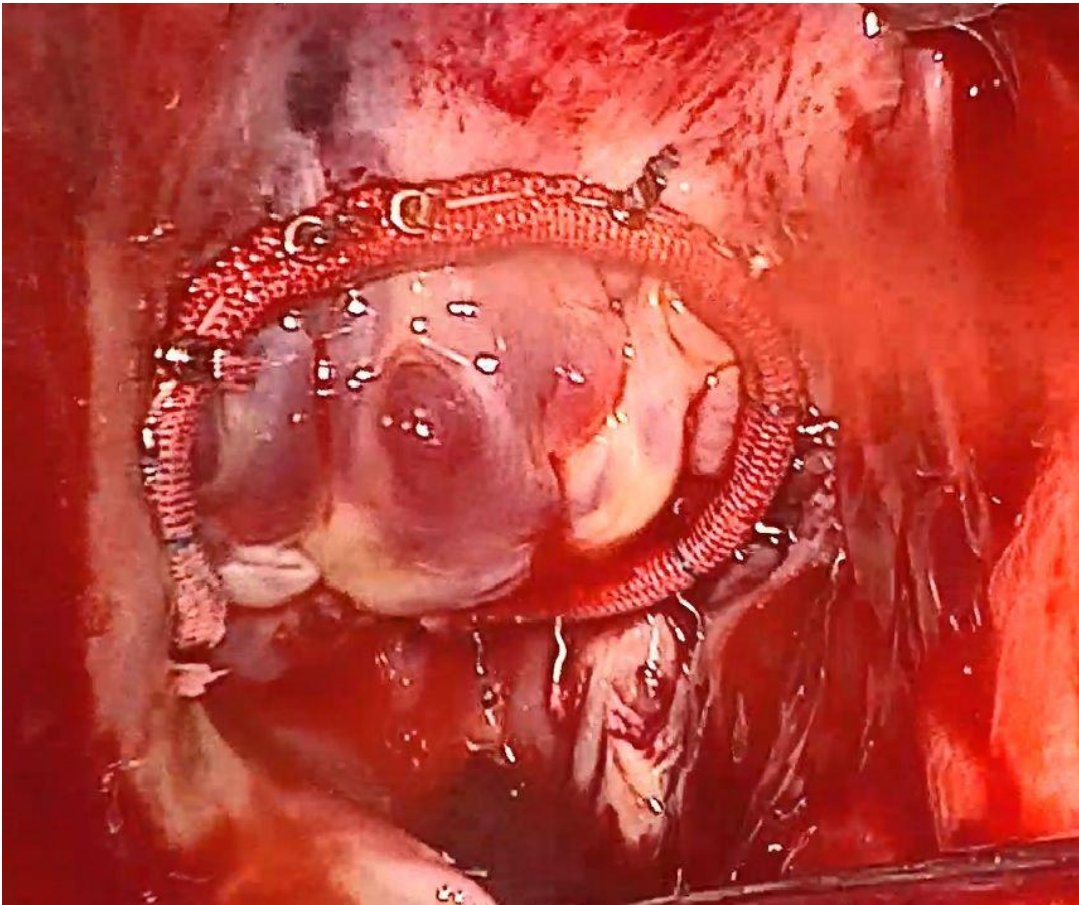
**Tab. 3:** Übersicht der chirurgischen und interventionellen Techniken bei Trikuspidalklappeninterventionen. Eigene Darstellung nach Condello et al., 2021; Lange et al., 2017; Weber et al., 2020

| Technik                               | Beispiele  |
|---------------------------------------|--|
| Anuloplastiesysteme, chirurgisch      | <p>Naht-Anuloplastie nach De Vega</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cardioband (Edwards Lifesciences, Irvine, CA, USA)</li> </ul> <p>Ring-Anuloplastie</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Medtronic Contour 3D Tricuspid (Medtronic, Minneapolis, MN, USA)</li> <li>• Carpentier-Edwards Physio II Tricuspid (Edwards Lifesciences, Irvine, CA, USA)</li> <li>• LivaNova Memo 3D Tricuspid (LivaNova, London, UK)</li> </ul>  |
| edge-to-edge-Technik, interventionell | <ul style="list-style-type: none"> <li>• TriClip (Abbott Vascular, Santa Clara, CA, USA)</li> <li>• PASCAL (Edwards Lifesciences, Irvine, CA, USA)</li> <li>• Mistral (Mitralix Ltd, Yokneam, Israel)</li> </ul>   |
| Chirurgischer Klappenersatz           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Medtronic Hancock II Tricuspid Bioprosthesis (Medtronic, Minneapolis, MN, USA)</li> <li>• Edwards Tricuspid Pericardial Bioprosthesis (Edwards Lifesciences, Irvine, CA, USA)</li> </ul>  |
| Transkatheterbasierter Klappenersatz  | <p>Cavale Klappenimplantation (CAVI)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Caval Sapien Valve (Edwards Lifesciences, Irvine, CA, USA)</li> <li>• TricValve (P&amp;F Products Features Vertriebs GmbH, Wien, Österreich)</li> <li>• Tricento (New Valve Technology, Hechingen, Deutschland)</li> </ul> <p>Orthotoper Klappenersatz</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Navigate Bioprosthesis (NaviGate Cardiac Structures Inc. Lake Forest, CA, USA)</li> <li>• LUX-Valve (Ningbo Jenscare Biotechnology Co., Ningbo, China)</li> <li>• EVO-QUE (Edwards Lifesciences, Irvine, CA, USA)</li> </ul> |

Die Anulorhaphie nach De Vega setzt am anterioren und posterioren Klappensegel an. Mittels Polypropylenfäden wird eine doppelte Naht entlang des Klappenannulus geführt. Zur Stabilisierung werden die Anfangs-, End- und Umschlagpunkte der Naht mit Teflonplättchen unterlegt. Die Fixierung der Nahtenden findet auf Höhe des posterioren und septalen Segelübergangs an der Außenwand des rechten Vorhofs statt. Durch das Zusammenziehen der Naht wird die Öffnungsfläche des Klappenannulus auf etwa 3–4 cm<sup>2</sup> reduziert, wodurch die Insuffizienz behoben wird (Wahlers und Strauch, 2010).

Die Ring-Anuloplastie (Abb. 3) verfolgt wie die Anulorhaphie nach De Vega das Ziel, einer Annulusdilatation entgegenzuwirken. Im Hinblick auf die langfristige Haltbarkeit ist jedoch

der Einsatz eines Rings der Naht überlegen (Condello et al., 2021). Es stehen unterschiedliche Anuloplastieringe und -bänder zur Verfügung, die sich in Form und Beweglichkeit unterscheiden (Wahlers und Strauch, 2010). Modelle mit 3D-, sattel- und wellenartigen Formen orientieren sich an der ursprünglichen Ausprägung des Klappenannulus (Lange et al., 2017). Die Beschaffenheit der Ringe kann in drei Varianten unterteilt werden: flexibel, halbrigide und rigide. Halbrigide und rigide Ringe rekonstruieren die physiologische D-Form des Anulus, während flexible Ringe lediglich eine Raffung des Anulus bewirken (Condello et al., 2021). Die Methode der Ring-Anuloplastie für die Trikuspidalklappe geht auf das Konzept von Alain Carpentier zurück, der dieses Verfahren 1969 zunächst für die Mitralklappe entwickelte (Lange et al., 2017). Der Carpentier-Ring wird auf den Anulus aufgelegt und im Bereich des anterioren und posterioren Segels vernäht. Auf Höhe des septalen Segels bleibt der Ring zum Teil offen, um eine Verletzungsgefahr des Atrioventrikularknotens im Koch'schen Dreieck zu vermeiden. Alternativ erfolgt die Fixierung in den Segeln selbst. Die Größe des Ringes wird mithilfe von Klappenmessgeräten präzise ermittelt (Wahlers und Strauch, 2010). Bei einer starken Erweiterung des Klappenannulus kann zusätzlich zur Ring-Anuloplastie ein Perikardpatch notwendig sein, um eine ausreichende Schließung der Klappenöffnung sicherzustellen. Dieser Patch wird am anterioren Segel angebracht (Condello et al., 2021).



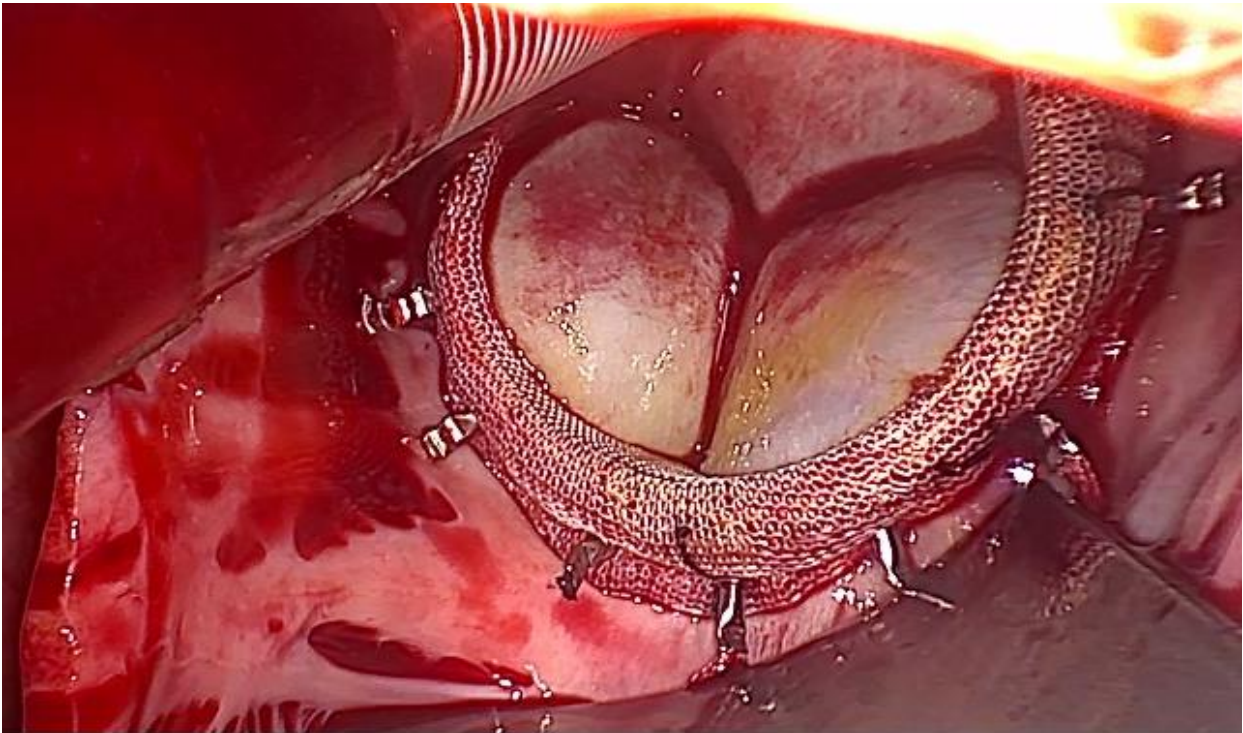
**Abb. 3:** Intraoperative Aufnahme von einer MIC-TKR mit Ring-Anuloplastie. Universitätsklinikum Bonn, Klinik für Herzchirurgie

Das Edwards-Cardioband (Edwards Lifesciences, Irvine, CA, USA) stellt eine interventionelle Therapiemöglichkeit zur Behandlung der TI dar. Mithilfe von Ultraschallkontrolle wird das Band schrittweise gerafft, wodurch der Klappenannulus verkleinert und die pathologisch vergrößerte Klappenöffnungsfläche reduziert wird (Weber et al., 2020).

Die Anuloplastie nach Kay zielt auf eine Bikuspidalisierung der Trikuspidalklappe ab. Dabei wird eine Klappensegelkomponente funktionell ausgeschaltet, indem der Anulus in diesem Bereich gerafft wird, sodass nur noch zwei Segel an der Klappenfunktion beteiligt sind (Wahlers und Strauch, 2010).

Zu den interventionellen edge-to-edge-Therapien zählen unter anderem das TriClip-System (Abbott Vascular, Santa Clara, CA, USA) und das PASCAL-System (Edwards Lifesciences, Irvine, CA, USA). Beide Systeme basieren auf einem ähnlichen Prinzip: Mithilfe interventionell eingeführter Klammern werden die Ränder der Klappensegel zusammengeführt, um die Koaptation der Klappe zu optimieren (Weber et al., 2020). Das TriClip-System und das PASCAL-System sind eine Weiterentwicklung des MitraClip-Systems, das ursprünglich zur Rekonstruktion der Mitralklappe entwickelt wurde (Weber et al., 2020).

Bei beschädigten Klappensegeln und erhöhtem Tethering kann ein Klappenersatz erfolgsversprechender sein. Dies ist beispielsweise in Folge einer infektiösen Endokarditis der Fall (Silaschi und Treede, 2020). Wenn ein Ersatz notwendig wird, liegt häufig ein bereits fortgeschrittenes Krankheitsstadium mit Endorganschäden vor. Aus diesem Grund ist die operative Mortalität erhöht (Condello et al., 2021). Die Verwendung einer biologischen oder mechanischen Prothese ist möglich (Möllmann et al., 2022). Allerdings werden biologische Prothesen (Abb. 4) bevorzugt, da sie eine geringere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten thromboembolischer Ereignisse aufweisen (Condello et al., 2021).



**Abb. 4:** Intraoperative Aufnahme von einer MIC-TKE mit biologischer Prothese. Universitätsklinikum Bonn, Klinik für Herzchirurgie

### 1.5 Stand der Wissenschaft

Die Heart Valve Collaboratory, ein multidisziplinäres Expertenteam, hob im ersten Tricuspid Valve Academic Research Consortium (TVARC) von 2023 die zunehmende wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der TI im letzten Jahrzehnt hervor (Hahn et al., 2023). Diskussionsschwerpunkte umfassen die Pathophysiologie, die Frage nach effektiven Behandlungsstrategien sowie die Langzeitfolgen operativer Eingriffe (Hahn et al., 2023). Übereinstimmung besteht darüber, dass eine unbehandelte TI mit einer schlechten Prognose einhergeht (Abdelbar et al., 2021).

Bei schwerer symptomatischer primärer TI zeigt eine medikamentöse Therapie nur begrenzten Erfolg. Die ESC/EACTS-Leitlinien von 2021 empfehlen, die Indikation zur TKC frühzeitig zu stellen, um das Auftreten von Komplikationen wie RV-Dysfunktion sowie Leber- oder Niereninsuffizienz zu verhindern (Vahanian et al., 2022).

Auch bei asymptomatischen Patientinnen und Patienten mit bereits erweitertem rechtem Ventrikel sollte ein operativer Eingriff in Erwägung gezogen werden. Bei geplanter Mitralklappenoperation ist eine gleichzeitige Rekonstruktion der Trikuspidalklappe bei moderater TI indiziert (Vahanian et al., 2022). Die präzise Auswahl des Patientinnen- und Patientenkollektivs für einen operativen Eingriff ist dabei essenziell, um ein vielversprechendes Langzeitergebnis zu erzielen. Bei weit fortgeschrittener Insuffizienz ist das peri- oder postoperative Risiko für Mortalität und Morbidität deutlich erhöht. Daher sollte eine chirurgische Intervention idealerweise frühzeitig erfolgen (Vahanian et al., 2022).

Obwohl eine tricuspid annular plane systolic excursion (TAPSE)  $<17$  mm als prognostisch ungünstig gilt, fehlen derzeit eindeutige Kriterien, die den Zeitpunkt definieren, ab wann eine RV-Dysfunktion eine operative Therapie ausschließt (Vahanian et al., 2022). Eine Reoperation nach bereits erfolgter Mitralklappenoperation birgt ein hohes Risiko, daher sollte frühzeitig eine kombinierte Mitral- und Trikuspidalklappenchirurgie erwogen werden. Dies gilt beispielsweise für Patientinnen und Patienten mit einer asymptomatischen TI, die bereits Zeichen einer RV-Dysfunktion oder Dilatation aufweisen (Vahanian et al., 2022).

Der Schweregrad der TI korreliert mit einer erhöhten Mortalität, die bei schwerer TI über 30 % pro Jahr beträgt (Möllmann et al., 2022). Laut dem Herzchirurgiereport der Deutschen Gesellschaft für Thorax-, Herz- und Gefäßchirurgie (DGTHG) wurden im Jahr 2019 weniger als 3000 isolierte oder kombinierte Trikuspidalklappenprozeduren in Deutschland durchgeführt, 2023 stieg diese Zahl auf über 3500 an (Beckmann et al., 2020; Beckmann et al., 2024). Insbesondere transkatheterbasierte Verfahren verzeichneten einen erheblichen Anstieg: Die Anzahl der isolierten transkathetergestützten Trikuspidalklappeninterventionen stieg von 149 im Jahr 2019 auf 882 im Jahr 2023 (Beckmann et al., 2024).

Chirurgische Eingriffe erfolgen häufig erst im fortgeschrittenen Stadium der TI, wenn bereits rechtsventrikuläre Dysfunktion oder Endorganschäden vorliegen. Dies erhöht das operative Risiko und erklärt die teilweise hohe Mortalität isolierter TKC (Hahn et al., 2023; Vahanian et al., 2022). Personen mit moderater bis schwerer TI weisen ein 2,0- bis 3,2-

fach erhöhtes Mortalitätsrisiko im Vergleich zu Personen ohne TI auf (Offen et al., 2022). Die Studie von Wang et al. (2019) zeigte ein deutlich erhöhtes relatives Risiko für die Gesamtmortalität, das mit dem Schweregrad der TI zunimmt: 1,25 für milde, 1,61 für moderate und 3,44 für schwere TI ( $p < 0,001$ ). Selbst bei einer milden TI ist ein erhöhtes Risiko für die Mortalität zu beobachten: HR = 1,29 [95 %-KI: 1,27; 1,31] (Offen et al., 2022). Eine erhöhte Mortalität wird häufig mit dem offenen chirurgischen Verfahren über eine komplette Sternotomie in Verbindung gebracht (Abdelbar et al., 2021; Chen et al., 2020; Färber et al., 2018). Als vielversprechende Alternative gilt die minimalinvasive Chirurgie, die durch geringere Gewebsverletzungen und ein reduziertes Trauma weniger postoperative Komplikationen verursacht (Abdelbar et al., 2021). Mitte der 1990er Jahre begann die Einführung der minimalinvasiven TKC. In den letzten zwei Jahrzehnten ist eine kontinuierliche Zunahme in der Anwendung der minimalinvasiven Verfahren zu beobachten. Die Tendenz geht zu einer immer geringeren Invasivität, um die postoperative Mortalität zu senken und die Genesung der Patientinnen und Patienten zu beschleunigen (Tugtekin et al., 2023).

Das TVARC betont die Notwendigkeit einer verstärkten Auseinandersetzung mit der TI und deren Behandlung. Vergleichbare Studien mit klaren und standardisierten Zielgrößen werden benötigt (Hahn et al., 2023). Weitere Forschung ist erforderlich, um minimalinvasive Techniken in der TKC zu untersuchen. Dabei ist eine Gegenüberstellung der Ergebnisse minimalinvasiver Verfahren mit der konventionellen Sternotomie essenziell (Abdelbar et al., 2021). Derzeit ist die Datenbasis hinsichtlich ihrer Aktualität und Spezifität limitiert (Silaschi und Treede, 2020).

Ziel dieser Arbeit ist die retrospektive Analyse klinischer und echokardiographischer Ergebnisse isolierter und kombinierter TKC. Dazu soll ein Vergleich zwischen den beiden operativen Zugängen, komplette Sternotomie und minimalinvasive Chirurgie (MIC), hergestellt werden. Die gewonnenen Ergebnisse werden in den Kontext bestehender Literatur gesetzt und kritisch diskutiert.

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Studiendesign

Die vorliegende Dissertation umfasst eine explorative, retrospektive Datenanalyse klinischer und echokardiographischer Parameter im Rahmen der isolierten und kombinierten TKC. Dabei werden die minimalinvasive Chirurgie und das offene chirurgische Verfahren über eine komplette Sternotomie miteinander verglichen. Die Ergebnisse dieser Studie werden anschließend bestehenden Erkenntnissen aus der Fachliteratur gegenübergestellt und kritisch diskutiert.

Die Gesamtpopulation von insgesamt 180 Personen erhielt zwischen 2017 und 2021 in der Klinik und Poliklinik für Herzchirurgie am Universitätsklinikum Bonn entweder eine isolierte oder kombinierte (zusätzliche Prozeduren zu TKC) TKC. Das Patientinnen- und Patientenkollektiv wurde basierend auf dem chirurgischen Zugangsweg in zwei Vergleichsgruppen aufgeteilt: Die Sternotomie-Gruppe umfasst 152 Patientinnen und Patienten, deren Eingriffe offen chirurgisch über eine komplette Sternotomie durchgeführt wurden, während die MIC-Gruppe aus 28 Patientinnen und Patienten besteht, bei denen ein minimalinvasiver Zugang angewandt wurde.

Aufgrund der deutlichen Unterschiede in den Gruppengrößen wurde eine Propensity-Score-Matching (PSM)-Analyse durchgeführt, um Verzerrungen durch ungleiche Gruppencharakteristika zu minimieren. Dabei wurden für jede Person der einen Gruppe möglichst ähnliche Personen der anderen Gruppe identifiziert. Nach Berücksichtigung von Alter, Geschlecht, Body-Mass-Index (BMI) und EuroSCORE II als Matching-Variablen ergaben sich zwei vergleichbare Gruppen von jeweils 24 Patientinnen und Patienten.

Die Studie umfasste prä-, peri- und postoperative Haupt- und Nebenzielgrößen. Die Daten wurden aus dem klinikinternen Krankenhaus-Informationssystem ORBIS extrahiert,

einschließlich Arztbriefen, OP-Berichten, Herz-Lungen-Maschinen-Protokollen (HLM), Anästhesiezusammenfassungen und externen Behandlungsdokumentationen.

Die Hauptzielgröße war die echokardiographische Reduktion der TI, die anhand von vier Schweregraden bewertet wurde: leichte Insuffizienz (Grad 1), mäßige/moderate Insuffizienz (Grad 2), schwere Insuffizienz (Grad 3) und sehr schwere/massive Insuffizienz (Grad 4). Die Schweregradeinteilung der TI basiert auf echokardiographischen Kriterien und wird von international anerkannten Leitlinien und Fachorganisationen wie der ESC/EACTS (Vahanian et al., 2022), des ACC/AHA (Otto et al., 2021) und der American Society of Echocardiography (ASE, Zoghbi et al., 2017) verwendet. Diese Einstufungen dienen der standardisierten Bewertung und Behandlung von Patientinnen und Patienten.

Die Schweregrade lassen sich hinsichtlich ihrer klinischen Manifestation wie folgt definieren (Otto et al., 2021): Eine leichte Insuffizienz (Grad 1) stellt sich häufig asymptomatisch dar und bleibt ohne wesentliche Auswirkungen auf die Herzfunktion. Bei einer mäßigen Insuffizienz (Grad 2) können erste unspezifische Beschwerden wie reduzierte Belastbarkeit auftreten. Eine schwere Insuffizienz (Grad 3) verursacht bereits eine deutliche Belastung des rechten Herzens. In der sehr schweren Form (Grad 4) treten typische Zeichen einer Rechtsherzinsuffizienz auf, wie periphere Ödeme, Aszites, gestauten Halsvenen und Belastungsdyspnoe. In diesem Stadium hat die Erkrankung relevante Auswirkungen auf die Herzfunktion und die Lebensqualität der Betroffenen.

Das TVARC empfiehlt zur Bewertung der TI ein fünfstufiges Schweregradschema, bei dem zusätzlich der Grad 5, die sogenannte torrential insufficiency (sintflutartige Insuffizienz), eingeführt wurde (Hahn und Zamorano, 2017; Hahn et al., 2023). Dieses erweiterte Bewertungsschema dient der differenzierten Klassifikation und ermöglicht eine präzisere Behandlungsstrategie (Hahn et al., 2023). In dieser Dissertation wurde hingegen die Einteilung in vier Schweregrade verwendet, da sich die zugrunde liegenden diagnostischen Daten auf dieses Schema bezogen.

Die Nebenzielgrößen unterteilen sich in präoperative Charakteristika der Patientinnen und Patienten, operative Parameter und postoperative Ergebnisse. Präoperative Charakteristika beinhalten die demografischen Daten mit Alter, Geschlecht und BMI; die echokardiographischen Variablen mit LVEF, TAPSE und Aorten- und Mitralklappenvitien; die kardialen und spezifischen Begleiterkrankungen wie Aortenaneurysma, Endokarditis, koronare Herzkrankheit (KHK), Herzinsuffizienz (NYHA-Klassifikation), chronisch obstruktive Lungenerkrankung (COPD), Diabetes mellitus, Niereninsuffizienz, Myokardinfarkt, arterielle Hypertonie, periphere arterielle Verschlusskrankheit (pAVK), Arteria carotis interna (ACI)-Stenose und onkologische Vorerkrankungen; die Reoperationen, definiert als vorangegangene herzchirurgische Eingriffe mit Eröffnung des Perikards und den EuroSCORE II zur präoperativen Risikobewertung. Der EuroSCORE II bezieht mehrere Faktoren ein, die individuell und in Kombination das Operationsrisiko erhöhen können. Zu den relevanten Parametern zählen beispielsweise Geschlecht, Alter, Nierenfunktion, Lungenfunktion und linksventrikuläre Funktion. Auch ein insulinabhängiger Diabetes mellitus wirkt sich negativ auf die Prognose aus (Royal Papworth Hospital NHS Foundation Trust, 2023).

Operative und perioperative Parameter umfassen die chirurgischen Prozeduren wie Myokardrevaskularisation, Klappenrekonstruktion und -ersatz. Operationsdauer, HLM-Zeit und Aortenklemmzeit stellen die zeitlichen Parameter dar.

Postoperative Parameter beinhalten die klinischen Ergebnisse: Verweildauer auf der Intensivstation, Beatmungszeit, ECMO-Therapie, Bluttransfusionen, postoperativer Myokardinfarkt, Wundheilungsstörungen, Schlaganfall und Rethorakotomie. Die Mortalitätsrate wird in zwei Kategorien unterteilt: die Krankenhausmortalität und die 30-Tage-Mortalität. Echokardiographisch werden neben dem postoperativen Schweregrad der TI die LVEF und die TAPSE beurteilt.

Für den Trikuspidalklappenersatz wurden die biologischen Prothesen Medtronic Hancock II Tricuspid Bioprosthesis (Medtronic, Minneapolis, MN, USA) und Edwards Tricuspid

Pericardial Bioprosthesis (Edwards Lifesciences, Irvine, CA, USA) verwendet. Im Rahmen der Trikuspidalklappenrekonstruktion kamen der Medtronic Contour 3D Tricuspid Anuloplastierung (Medtronic, Minneapolis, MN, USA) und der Carpentier-Edwards Physio II Tricuspid Anuloplastierung (Edwards Lifesciences, Irvine, CA, USA) zum Einsatz. Der Mitralklappenersatz erfolgte ebenfalls mit biologischen Prothesen: Medtronic Hancock II Mitral Bioprosthesis (Medtronic, Minneapolis, MN, USA), Edwards Mitral Pericardial Bioprosthesis (Edwards Lifesciences, Irvine, CA, USA) und Abbott Epic (Abbott, Chicago, IL, USA). Für die Mitralklappenrekonstruktion wurden die Anuloplastierungen Medtronic Contour 3D (Medtronic, Minneapolis, MN, USA), Carpentier-Edwards Physio II Mitral (Edwards Lifesciences, Irvine, CA, USA) und LivaNova Memo 3D (LivaNova, London, UK) verwendet. Der Aortenklappenersatz wurde mit den biologischen Prothesen Medtronic Hancock II Aortic Bioprosthesis (Medtronic, Minneapolis, MN, USA), Edwards Perimount Aortic Bioprosthesis (Edwards Lifesciences, Irvine, CA, USA) und LivaNova Perceval (LivaNova, London, UK) durchgeführt.

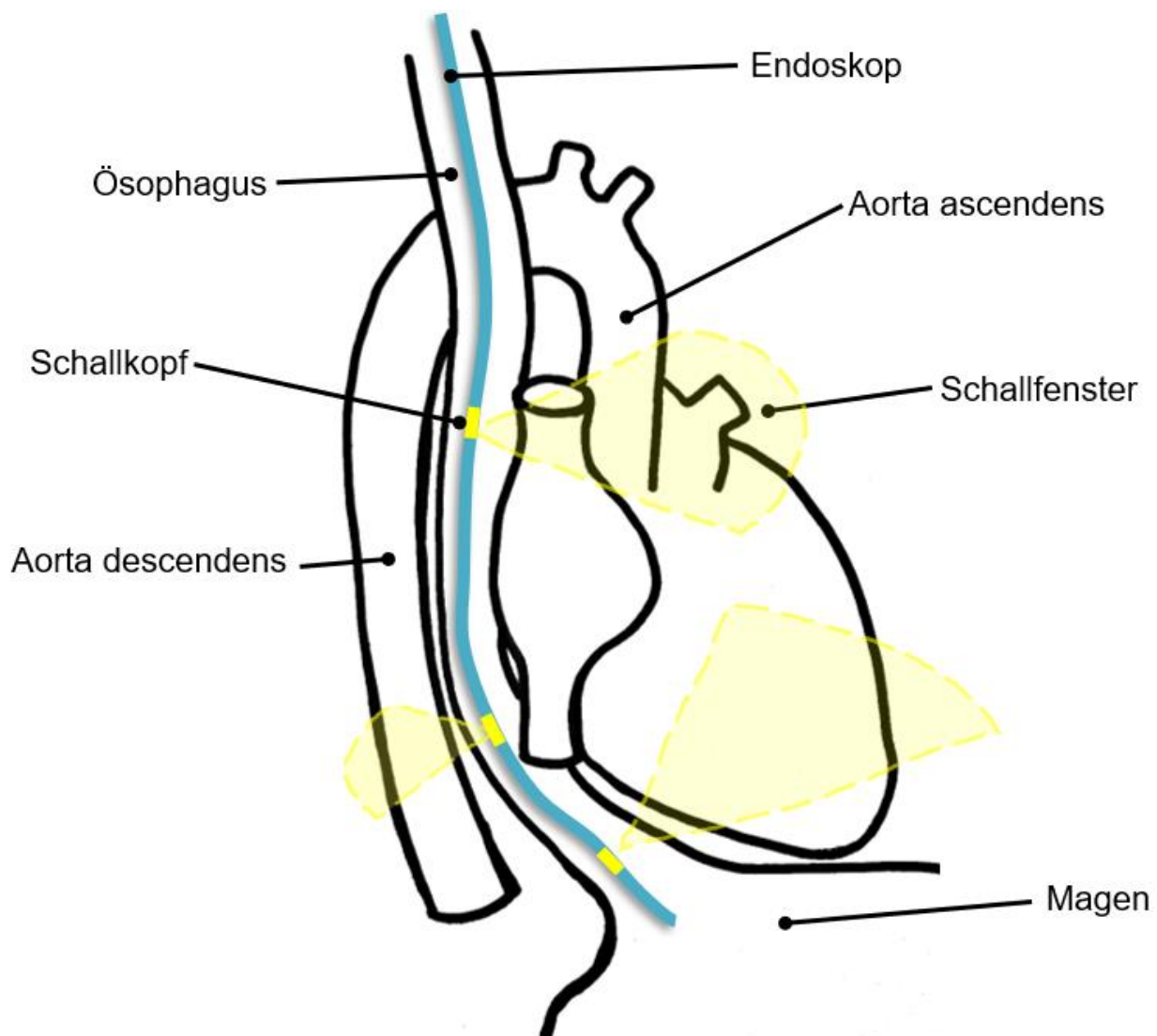
Vor Beginn der Untersuchung wurde eine Zustimmung der lokalen Ethikkommission eingeholt (Aktenzeichen 213/22).

## 2.2 Echokardiographie

Das wichtigste nicht-invasive Verfahren zur Diagnostik von Herzklappenerkrankungen ist die Echokardiographie, eine sonographische Methode zur Darstellung des Herzens (Schünke et al., 2022). Dabei erzeugen piezoelektrische Kristalle im Schallkopf Ultraschallwellen mit einer Frequenz von 2,2–12 MHz, die das Gewebe durchdringen und entsprechend seiner Dichte reflektiert werden. Diese Reflexionen werden im B-Mode-Verfahren (brightness modulation) in ein zweidimensionales Bild umgewandelt, wodurch die anatomische Struktur des Herzens sichtbar gemacht wird (Gödecke et al., 2023; Schünke et al., 2022). Mithilfe des farbkodierten Doppler-Effekts lassen sich die Flussrichtung und -geschwindigkeit des Blutes in Form eines Farbspektrums darstellen (Steffel und Lüscher, 2011). Klappeninsuffizienzen und Shuntvitien können somit

identifiziert werden. Die M-Mode-Darstellung (motion mode) erlaubt eine zeitliche Aufbereitung der reflektierten Signale, sodass die mechanische Funktion der Herzklappen beurteilt und morphologische sowie funktionelle Veränderungen des Herzens diagnostiziert werden können (Gödecke et al., 2023).

Für die echokardiographische Diagnostik stehen zwei grundlegende Techniken zur Verfügung: die TEE (Abb. 5) und die transthorakale Echokardiographie (TTE). Für die Untersuchung der Herzklappen ist die TEE besonders geeignet, da Schallkopf und Herz in enger räumlicher Beziehung stehen und nur durch wenige Gewebeschichten voneinander getrennt sind (Schmitz, 2020). Die Ultraschallsonde wird durch den Rachen in den Ösophagus bis gegebenenfalls in den Magenfundus eingeführt. Vielfältige Schallkopfpositionen und -einstellungen erlauben zudem die Aufnahme in verschiedenen Schnittebenen (Schünke et al., 2022; Steffel und Lüscher, 2011).



**Abb. 5:** Transösophageale Echokardiographie. Eigene Darstellung nach Schünke et al., 2022

Im Gegensatz dazu wird bei der TTE der Schallkopf auf die Brustwand aufgesetzt. Die Bildqualität der TTE wird jedoch durch äußere Strukturen wie Knochen-, Muskel- und Fettgewebe oder durch pulmonale Erkrankungen, die die Ultraschallwellen abschwächen, eingeschränkt. Dies unterstreicht die Bedeutung der TEE, insbesondere in komplexeren diagnostischen Fragestellungen (Schünke et al., 2022).

Die TTE wird in den ACC/AHA-Leitlinien von 2020 als diagnostisches Verfahren mit der höchsten Empfehlungsstufe, der Klasse 1, bewertet (Otto et al., 2021). Qualitative und

quantitative Kriterien liegen der echokardiographischen Diagnostik für die Einteilung des Schweregrades der TI zu Grunde. Zu den qualitativen Aspekten gehören die morphologische Beurteilung der Klappenstrukturen und die Darstellung des Insuffizienzlecks mittels Farbdoppler. Semiquantitative und quantitative Kriterien beziehen sich auf die Strömungsverhältnisse um die insuffiziente Herzklappe und die Ausprägung des Regurgitationsjets. Darüber hinaus werden strukturelle Veränderungen wie die pathologische Dilatation des rechten Ventrikels, des rechten Vorhofs und der V. cava inferior als quantitative Parameter herangezogen (Vahanian et al., 2022).

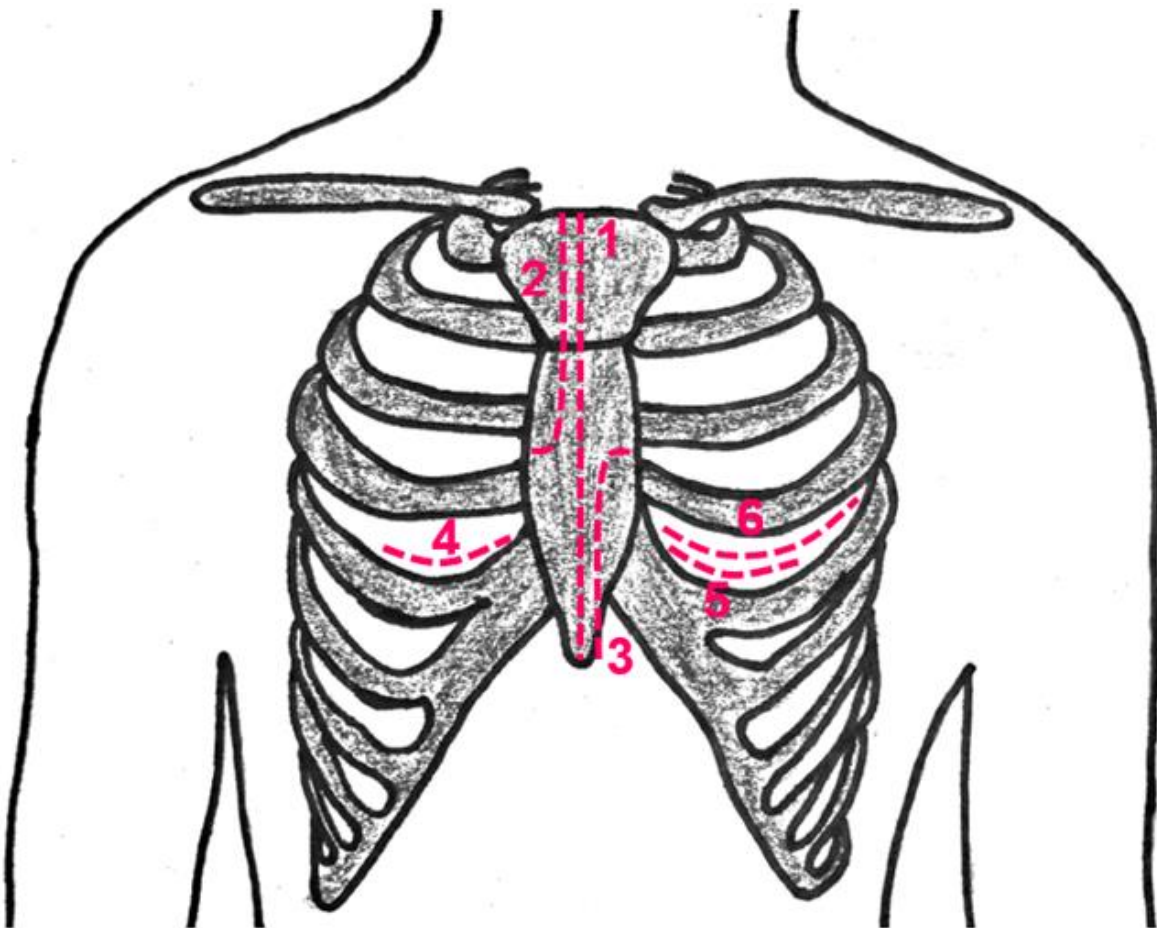
In Tabelle 4 sind ausgewählte echokardiographische Parameter, die ausschlaggebend für die Graduierung des Schweregrades der TI sind, dargestellt. Hierzu zählen die V. contracta width, die effective regurgitant orifice area (EROA) und das regurgitant volume (Hahn et al., 2022). Diese Größen ermöglichen eine Einteilung der TI in die Stadien mild, moderat, schwer, sehr schwer/massiv und sintflutartig (Hahn et al., 2023).

**Tab. 4:** Ausgewählte Kriterien zur Graduierung der Trikuspidalklappeninsuffizienz. Modifiziert nach Hahn et al., 2023

|   | Mild                            | Moderat                     | Schwer  | Sehr schwer/<br>massiv | Sintflut-<br>artig |
|---|---------------------------------|-----------------------------|---|------------------------|--------------------|
| <b>Qualitative Kriterien</b>  |                                 |                             |   |                        |                    |
| Klappenmorphologie  | keine bis geringe Veränderungen | mittelgradige Veränderungen | schwere strukturelle Einschränkungen der Klappensegel und Sehnenfäden |                        |                    |
| <b>Semiquantitative Kriterien</b>   |                                 |                             |   |                        |                    |
| VCW (mm)  | <3                              | 3–6,9                       | 7–13,9  | 14–20,9                | ≥21                |
| PISA Radius (mm)  | ≤5,4                            | 5,5–8,9                     | ≥9  |                        |                    |
| <b>Quantitative Kriterien</b>   |                                 |                             |   |                        |                    |
| PISA EROA (mm <sup>2</sup> )  | <20                             | 20–39                       | 40–59   | 60–79                  | ≥80                |
| Regurgitationsvolumen (mL)  | <30                             | 30–44                       | 45–59   | 60–74                  | ≥75                |
| Regurgitationsfraktion (%)  | ≤15                             | 16–49                       | ≥50   |                        |                    |
| VCW: V. contracta width; PISA: proximal isovelocity surface area; EROA: effective regurgitant orifice area. |                                 |                             |   |                        |                    |

### 2.3 Sternotomie

Die Sternotomie stellt den konventionellen operativen Zugang zum Herzen dar (Abb. 6). Dabei wird das Brustbein entlang seiner Längsachse durchtrennt, wobei zwischen einer kompletten medianen Sternotomie und einer oberen bzw. unteren partiellen Sternotomie unterschieden wird (Lange et al., 2017). Der Verschluss des Sternums erfolgt in der Regel mit Drahtcerclagen aus rostfreiem Stahl, um die Stabilität des Brustkorbs zu gewährleisten (Rieß und Bleese, 2010; Young et al., 2024).



**Abb. 6:** Operative Zugänge in der Herzchirurgie. 1: mediane Sternotomie; 2: partielle superiore Sternotomie; 3: partielle inferiore Sternotomie; 4: rechtsanteriore Thorakotomie; 5: linksanteriore Thorakotomie; 6: linksanteriolaterale Thorakotomie. Eigene Darstellung nach Rieß und Bleese, 2010

Aufgrund der hohen Invasivität des Eingriffs sind verschiedene postoperative Komplikationen möglich. Zu den häufigsten zählen Blutungen, Wundheilungsstörungen, ein unvollständiges Zusammenwachsen der Sternumhälften sowie Infektionen und retrosternale Abszesse. Diese Risiken sind insbesondere für multimorbide Hochrisikopatientinnen und -patienten von großer Bedeutung, da diese Gruppe eine erhöhte Anfälligkeit für derartige Komplikationen aufweist (Young et al., 2024).

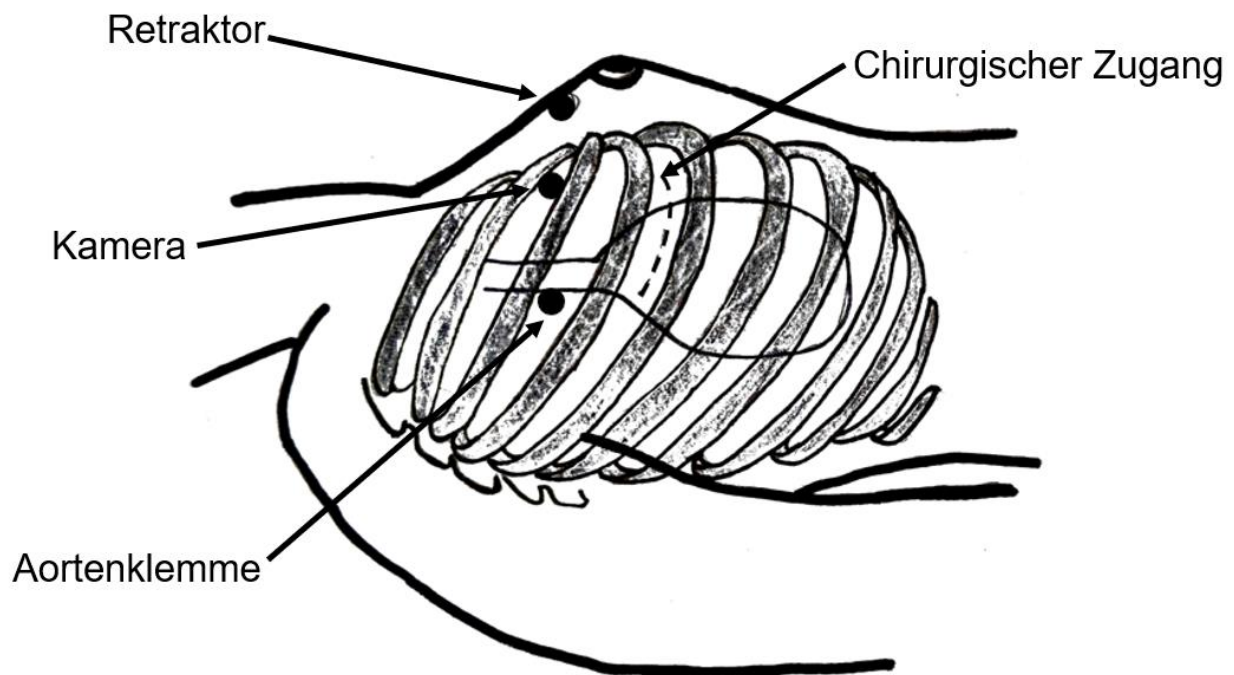
## 2.4 Minimalinvasive Chirurgie

Mit Beginn der 1990er-Jahre etablierte sich die minimalinvasive Chirurgie als eine bedeutende Alternative zur konventionellen Sternotomie. Die MIC hat zum Grundsatz die Invasivität und das operative Risiko des chirurgischen Eingriffs zu reduzieren (Mohr und Garbade, 2010). Dies trägt dazu bei, postoperative Schmerzen zu reduzieren und die Genesung durch frühzeitige Mobilisation zu beschleunigen. Der damit verbundene kürzere Krankenhausaufenthalt sowie die reduzierte stationäre und ambulante Behandlungsdauer bieten zudem ökonomische Vorteile (Mohr und Garbade, 2010). Ziel ist es, die Morbidität und Mortalität in Folge des chirurgischen Traumas zu senken und Komplikationen wie Wundheilungsstörungen oder Infektionen des Mediastinums zu vermeiden. Insbesondere Hochrisikopatientinnen und -patienten mit Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Diabetes mellitus, COPD oder Adipositas können von der minimalinvasiven Technik profitieren (Mohr und Garbade, 2010).

Minimalinvasive Techniken sind zum Beispiel die Ministernotomie (partielle obere oder untere Sternotomie) oder die links- oder rechtsanteriore Minithorakotomie. In der Mitralklappen- und Trikuspidalklappenchirurgie kommt häufig die anterolaterale Minithorakotomie rechts in Höhe des vierten Interkostalraums zur Anwendung (Abb. 7). Zunächst erfolgt die Anlage der extrakorporalen Zirkulation. Für die Kanülierung werden die V. femoralis und die Arteria (A.) femoralis und/oder im Falle der TKC zusätzlich die V. jugularis genutzt (Mohr und Garbade, 2010). Über die V. femoralis wird die Kanüle in die V. cava inferior eingeführt, die vor Eröffnung des rechten Vorhofs temporär okkludiert wird. Die

Möglichkeit der peripheren Kanülierung ist entscheidend für die Eignung des minimalinvasiven Zugangs. Die Sicherstellung des Gefäßstatus erfolgt mittels Computertomographie der Aorta und der peripheren Gefäße (Abdelbar et al., 2021). Mithilfe der TEE wird die korrekte Positionierung der Kanülen intraoperativ überprüft.

Nach erfolgreichem Anschluss der Herz-Lungen-Maschine folgt der Schnitt für die minimalinvasive Thorakotomie. Dieser liegt im vierten Interkostalraum rechts unterhalb der Mamille und umfasst ca. 4–6 cm. Das subkutane Fett- und Muskelgewebe wird präpariert. Für die Videokamera, den Vorhofretraktor und die Einbringung der Aortenklemme sind drei weitere kleine Inzisionen notwendig. Im zweiten Interkostalraum rechts dient ein 1 cm kleiner Schnitt für die Einführung des Videoskops, über den auch eine CO<sub>2</sub>-Insufflation vorgenommen wird. Die Aortenklemme gelangt über eine Hautinzision im zweiten Interkostalraum an der vorderen Axillarlinie zum Operationsgebiet. Bei der Mitralklappenchirurgie wird der linke Vorhof über einen Retraktor dargestellt. Nach Eröffnung des Perikards, Aortenklemmung, Kardioplegiegabe und Eröffnung des rechten bzw. linken Vorhofs kann die Klappenchirurgie durchgeführt werden. Mehrere Bildschirme im Operationssaal zeigen die Aufnahmen des Videoskops in Echtzeit (Mohr und Garbade, 2010).



**Abb. 7:** Rechtsseitiger anterolateraler Zugang für die Mitralklappen- und Trikuspidalklappenchirurgie. Eigene Darstellung nach Mohr und Garbade, 2010

## 2.5 Statistik

Die statistische Auswertung wurde mit den Softwareprogrammen R (Version 4.4.23; R Foundation for Statistical Computing, Wien, Österreich) und IBM SPSS Statistics (Version 29.0.0.0; IBM Corp., Armonk, NY, USA) durchgeführt. Kontinuierliche Variablen wurden als Mittelwert mit Standardabweichung (SD) und einem 95 %-Konfidenzintervall (95 %-KI) beschrieben. Kategorische Daten wurden als absolute Zahlen und prozentuale Verteilungen dargestellt. Sowohl für die Gesamtpopulation als auch für die nach operativem Zugang aufgeteilten Gruppen erfolgten deskriptive Analysen.

Die Propensity-Score-Matching-Analyse sowie die Durchführung der konditionalen logistischen Regression wurden in Zusammenarbeit mit Jennifer Nadal vom Institut für Medizinische Biometrie, Informatik und Epidemiologie (IMBIE) der Universität Bonn durchgeführt.

Für die Paarbildung in der PSM-Analyse wurde jeder Person der minimalinvasiven Gruppe (MIC-Gruppe, Gruppe 2) eine möglichst ähnliche Person aus der Sternotomie-Gruppe (Gruppe 1) zugeordnet. Die Paarbildung erfolgte unter Verwendung des R-Pakets MatchIt (<https://cran.r-project.org/web/packages/MatchIt/index.html>) basierend auf Übereinstimmungen der Variablen Alter, Geschlecht, BMI und EuroScore II. Die Güte des Matchings wurde durch die standardisierten Mittelwertunterschiede geprüft.

Zur Analyse der Daten wurde eine konditionale logistische Regression mit Berücksichtigung der Matching-Paare durchgeführt. Die Ergebnisse wurden als Odds Ratios (OR) mit zugehörigen 95 %-Konfidenzintervallen angegeben. Statistische Signifikanz wurde bei einem p-Wert von  $<0,05$  angenommen.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Präoperative Charakteristika der Gesamtpopulation

Die präoperativen Charakteristika der Patientinnen und Patienten sind in Tabelle 5 dargestellt. Das Patientinnen- und Patientenkollektiv bestand aus insgesamt 180 Personen, wobei die Sternotomie-Gruppe 152 Personen umfasste. Der EuroSCORE II betrug im Mittel in der Sternotomie-Gruppe  $10,44 \pm 8,96$  % und in der MIC-Gruppe  $5,80 \pm 5,01$  %. In beiden Gruppen war insgesamt ein durchschnittlicher BMI von etwa  $26,81 \pm 5,35$  kg/m<sup>2</sup> zu beobachten.

**Tab. 5:** Präoperative Charakteristika der Gesamtpopulation. Modifiziert nach Klocksinn et al., 2025

| Parameter   | Total                               | Gruppe 1<br>(Sternotomie)           | Gruppe 2<br>(MIC)                   |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Patientinnen- und Patientenzahl, N                    | 180                                 | 152                                 | 28                                  |
| Alter (Jahre), M $\pm$ SD [95 % KI]                   | 67,89 $\pm$ 11,21<br>[66,24; 69,54] | 67,69 $\pm$ 11,33<br>[65,88; 69,51] | 68,96 $\pm$ 10,70<br>[64,81; 73,11] |
| Männer, N (%)   | 92 (51)                             | 73 (48)                             | 19 (68)                             |
| Frauen, N (%)   | 88 (49)                             | 79 (52)                             | 9 (32)                              |
| BMI (kg/m <sup>2</sup> ), M $\pm$ SD [95 % KI]        | 26,81 $\pm$ 5,35<br>[26,01; 27,61]  | 26,70 $\pm$ 5,36<br>[25,83; 27,57]  | 27,39 $\pm$ 5,41<br>[25,30; 29,49]  |
| EuroSCORE II (%), M $\pm$ SD [95 % KI]                | 9,72 $\pm$ 8,63<br>[8,45; 10,99]    | 10,44 $\pm$ 8,96<br>[9,00; 11,88]   | 5,80 $\pm$ 5,01<br>[3,86; 7,74]     |
| MIC: minimalinvasive Chirurgie; BMI: Body-Mass-Index. |                                     |                                     |                                     |

Tabelle 6 zeigt die präoperative Verteilung der Klappenvitien. 43 Personen (29 %) aus der Sternotomie-Gruppe wiesen eine moderate (Grad 2), 104 Personen (69 %) eine schwere (Grad 3) und fünf (3 %) Personen eine sehr schwere/kritische TI (Grad 4) auf. In der MIC-Gruppe mit insgesamt 28 Patientinnen und Patienten zeigten sieben Personen (25 %) eine moderate, 16 Personen (57 %) eine schwere und fünf Personen (18 %) eine sehr schwere TI.

In beiden Gruppen lag in den meisten Fällen mindestens ein weiteres Herzklappenitium vor. Nahezu alle Personen beider Gruppen hatten eine mindestens milde Mitralklappeninsuffizienz, die somit die häufigste begleitende Klappenpathologie war. Die Sternotomie-Gruppe zählte 53 Personen (35 %) und die MIC-Gruppe 17 Personen (61 %) mit einer milden oder moderaten Mitralklappeninsuffizienz. 97 Personen (64 %) der Sternotomie-Gruppe und 11 Personen (39 %) der MIC-Gruppe zeigten eine schwere bzw. sehr schwere Mitralklappeninsuffizienz. Eine schwere bis sehr schwere Mitralklappenstenose war bei acht Personen (5 %) in der Sternotomie-Gruppe zu beobachten. Die MIC-Gruppe wies keine schweren Mitralklappenstenosen auf.

**Tab. 6:** Präoperative Verteilung der Klappenvitien in der Gesamtpopulation. Modifiziert nach Klocksın et al., 2025

| Parameter  | Total    | Gruppe 1<br>(Sternotomie) | Gruppe 2<br>(MIC) |
|--|----------|---------------------------|-------------------|
| Patientinnen- und Patientenzahl, N   | 180      | 152                       | 28                |
| <b>Trikuspidalklappeninsuffizienz</b>  |          |                           |                   |
| • Grad 1, N (%)  | 0        | 0                         | 0                 |
| • Grad 2, N (%)  | 50 (28)  | 43 (29)                   | 7 (25)            |
| • Grad 3, N (%)  | 120 (66) | 104 (69)                  | 16 (57)           |
| • Grad 4, N (%)  | 10 (6)   | 5 (3)                     | 5 (18)            |
| <b>Mitralklappeninsuffizienz</b>   |          |                           |                   |
| • Keine Insuffizienz, N (%)  | 2 (1)    | 2 (1)                     | 0                 |
| • Grad 1, N (%)  | 36 (20)  | 25 (16)                   | 11 (39)           |
| • Grad 2, N (%)  | 34 (19)  | 28 (18)                   | 6 (21)            |
| • Grad 3, N (%)  | 96 (53)  | 86 (57)                   | 10 (36)           |
| • Grad 4, N (%)  | 12 (7)   | 11 (7)                    | 1 (4)             |
| <b>Mitralklappenstenose</b>  |          |                           |                   |
| • Keine Stenose, N (%)   | 156 (87) | 129 (85)                  | 27 (96)           |
| • Grad 1, N (%)  | 5 (3)    | 4 (3)                     | 1 (4)             |
| • Grad 2, N (%)  | 11 (6)   | 11 (7)                    | 0                 |
| • Grad 3, N (%)  | 7 (4)    | 7 (5)                     | 0                 |
| • Grad 4, N (%)  | 1 (0,6)  | 1 (1)                     | 0                 |
| <b>Aortenklappeninsuffizienz</b>   |          |                           |                   |
| • Keine Insuffizienz, N (%)  | 89 (50)  | 73 (48)                   | 16 (57)           |
| • Grad 1, N (%)  | 60 (33)  | 48 (32)                   | 12 (43)           |
| • Grad 2, N (%)  | 10 (6)   | 10 (7)                    | 0                 |
| • Grad 3, N (%)  | 20 (11)  | 20 (13)                   | 0                 |
| <b>Aortenklappenstenose</b>  |          |                           |                   |
| • Keine Stenose, N (%)   | 156 (87) | 129 (85)                  | 27 (96)           |
| • Grad 1, N (%)  | 3 (2)    | 2 (1)                     | 1 (4)             |
| • Grad 2, N (%)  | 3 (2)    | 3 (2)                     | 0                 |
| • Grad 3, N (%)  | 12 (7)   | 12 (8)                    | 0                 |
| • Grad 4, N (%)  | 4 (2)    | 4 (3)                     | 0                 |
| MIC: minimalinvasive Chirurgie; Grad 1: leichte Insuffizienz/Stenose; Grad 2: mäßige/moderate Insuffizienz/Stenose; Grad 3: schwere Insuffizienz/Stenose; Grad 4: sehr schwere/kritische Insuffizienz/Stenose. |          |                           |                   |

Weitere Daten inklusive der Begleiterkrankungen des präoperativen Patientinnen- und Patientenkollektivs der Gesamtpopulation sind in Tabelle 7 aufgelistet. In der Sternotomie-Gruppe wurden 24 Personen (16 %) in die NYHA-Klasse 2 und 128 Personen (84 %) in die NYHA-Klassen 3 oder 4 eingestuft. Die MIC-Gruppe wies acht Personen (29 %) in der NYHA-Klasse 2 und 20 Personen (71 %) in den NYHA-Klassen 3 oder 4 auf. Das Vorliegen einer KHK wurde wie folgt in Ein-Gefäß- (KHK 1), Zwei-Gefäß- (KHK 2) und Drei-Gefäß-Erkrankung (KHK 3) gegliedert. Die durchschnittliche LVEF lag in beiden Gruppen im Normbereich.

14 Personen (9 %) in der Sternotomie-Gruppe zeigten in ihrer Krankengeschichte einen Myokardinfarkt. In der MIC-Gruppe dagegen hatte keiner der Patientinnen und Patienten präoperativ einen Myokardinfarkt erlitten. In beiden Gruppen lag mehrheitlich die Diagnose einer arteriellen Hypertonie vor: 72 % der Personen in der Sternotomie-Gruppe und 68 % der Personen in der MIC-Gruppe. Bei 17 Personen (11 %) in der Sternotomie-Gruppe und fünf Personen (18 %) in der MIC-Gruppe wurde eine Endokarditis diagnostiziert.

**Tab. 7:** Präoperative Begleiterkrankungen und echokardiographische Parameter der Gesamtpopulation. Modifiziert nach Klocksin et al., 2025

| Parameter                               | Total                           | Gruppe 1<br>(Sternotomie)       | Gruppe 2<br>(MIC)               |
|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Patientinnen- und Patientenzahl, N      | 180                             | 152                             | 28                              |
| NYHA-Klasse 1, N (%)                    | 0                               | 0                               | 0                               |
| NYHA-Klasse 2, N (%)                    | 32 (18)                         | 24 (16)                         | 8 (29)                          |
| NYHA-Klassen 3 und 4, N (%)             | 148 (82)                        | 128 (84)                        | 20 (71)                         |
| KHK 1, N (%)                            | 24 (13)                         | 21 (14)                         | 3 (11)                          |
| KHK 2, N (%)                            | 25 (14)                         | 21 (14)                         | 4 (14)                          |
| KHK 3, N (%)                            | 25 (14)                         | 22 (15)                         | 3 (11)                          |
| PCI/Stent, N (%)                        | 21 (12)                         | 15 (10)                         | 6 (21)                          |
| TAPSE (mm), M ± SD [95 % KI]            | 18,65 ± 4,34<br>[17,95; 19,35]  | 18,19 ± 4,19<br>[17,45; 18,93]  | 21,27 ± 4,32<br>[19,36; 23,19]  |
| Ejektionsfraktion (%), M ± SD [95 % KI] | 53,12 ± 11,77<br>[51,36; 54,87] | 52,53 ± 11,85<br>[50,61; 54,45] | 56,47 ± 10,87<br>[52,08; 60,86] |
| Herzschrittmacher präoperativ, N (%)    | 35 (19)                         | 26 (17)                         | 9 (32)                          |
| Herzoperation in der Anamnese, N (%)    | 35 (19)                         | 30 (20)                         | 5 (18)                          |
| NIDDM, N (%)                            | 24 (13)                         | 22 (15)                         | 2 (7)                           |
| IDDM, N (%)                             | 10 (6)                          | 8 (5)                           | 2 (7)                           |
| COPD, N (%)                             | 21 (12)                         | 20 (13)                         | 1 (4)                           |
| Niereninsuffizienz, N (%)               | 46 (26)                         | 42 (28)                         | 4 (14)                          |
| Myokardinfarkt präoperativ, N (%)       | 14 (8)                          | 14 (9)                          | 0                               |
| Arterielle Hypertonie, N (%)            | 128 (71)                        | 109 (72)                        | 19 (68)                         |
| pAVK, N (%)                             | 20 (11)                         | 19 (13)                         | 1 (4)                           |
| Endokarditis, N (%)                     | 22 (12)                         | 17 (11)                         | 5 (18)                          |

MIC: minimalinvasive Chirurgie; NYHA: New York Heart Association; KHK: koronare Herzkrankheit; PCI: perkutane Koronarintervention; TAPSE: tricuspid annular plane systolic excursion; IDDM: insulin dependent diabetes mellitus; NIDDM: not insulin dependent diabetes mellitus; COPD: chronisch obstruktive Lungenerkrankung; pAVK: periphere arterielle Verschlusskrankheit.

### 3.2 Operative und postoperative Ergebnisse der Gesamtpopulation

Die operativen Interventionen sind in Tabelle 8 aufgeführt. Die Trikuspidalklappe wurde rekonstruiert oder durch eine biologische Prothese ersetzt. Vier Verfahren kamen im Zuge der Trikuspidalklappenrekonstruktion zur Anwendung: Anuloplastierung, isolierte Segelrekonstruktion, Anuloplastierung in Kombination mit einer Segelrekonstruktion und die Cone Prozedur.

Insgesamt 137 Personen (90 %) in der Sternotomie-Gruppe erhielten eine Trikuspidalklappenrekonstruktion. Davon bekamen 121 Personen (80 %) einen Anuloplastierung, sechs Personen (4 %) eine Segelrekonstruktion, neun Personen (6 %) einen Anuloplastierung in Kombination mit einer Segelrekonstruktion und bei einer Person wurde die Cone Prozedur durchgeführt. In der MIC-Gruppe erhielten insgesamt 22 Personen (79 %) eine Trikuspidalklappenrekonstruktion. Davon bekamen 16 Personen (57 %) einen Anuloplastierung, drei Personen (11 %) eine isolierte Segelrekonstruktion und drei Personen (11 %) einen Anuloplastierung in Kombination mit einer Segelrekonstruktion. Die Cone Prozedur fand hier keine Anwendung. Der biologische Trikuspidalklappenersatz wurde bei 15 Personen (10 %) in der Sternotomie-Gruppe und bei sechs Personen (21 %) in der MIC-Gruppe durchgeführt.

In einigen Fällen wurde eine weitere Begleitprozedur zu der TKC als Kombinationseingriff durchgeführt. Wobei die Mitralklappenchirurgie die häufigste Begleitprozedur war. Insgesamt 56 Personen (37 %) in der Sternotomie-Gruppe und zehn Personen (36 %) in der MIC-Gruppe erhielten eine Mitralklappenrekonstruktion. Folgende Verfahren kamen in diesem Zuge zur Anwendung: Anuloplastierung, isolierte Segelrekonstruktion und Anuloplastierung in Kombination mit einer Segelrekonstruktion. Ein biologischer Mitralklappenersatz erfolgte bei 57 Personen (38 %) in der Sternotomie-Gruppe und bei zwei Personen (7 %) in der MIC-Gruppe.

Aortenklappenoperationen und Myokardrevaskularisationen als Begleitprozeduren erfolgten ausschließlich im Patientinnen- und Patientenkollektiv der Sternotomie-Gruppe. Der biologische Aortenklappenersatz wurde bei 39 Personen (26 %) der Sternotomie-Gruppe durchgeführt. Insgesamt 35 Personen erhielten einen zusätzlichen Koronararterienbypass in der Sternotomie-Gruppe, wobei zwischen 1-facher, 2-facher, 3-facher und 4-facher Myokardrevaskularisation unterschieden wurde.

**Tab. 8:** Operative Interventionen der Gesamtpopulation. Modifiziert nach Klocksin et al., 2025

| Parameter                                       | Total    | Gruppe 1<br>(Sternotomie) | Gruppe 2<br>(MIC) |
|---|----------|---------------------------|-------------------|
| Patientinnen- und Patientenzahl, N              | 180      | 152                       | 28                |
| Trikuspidalklappenersatz, biologisch, N (%)     | 21 (12)  | 15 (10)                   | 6 (21)            |
| Trikuspidalklappenrekonstruktion, N (%)         | 159 (88) | 137 (90)                  | 22 (79)           |
| • Anuloplastierung, N (%)                       | 137 (76) | 121 (80)                  | 16 (57)           |
| • Segelrekonstruktion, N (%)                    | 9 (5)    | 6 (4)                     | 3 (11)            |
| • Anuloplastierung + Segelrekonstruktion, N (%) | 12 (7)   | 9 (6)                     | 3 (11)            |
| • Cone Prozedur, N (%)                          | 1 (0,6)  | 1 (1)                     | 0                 |
| Mitralklappenersatz, biologisch, N (%)          | 59 (33)  | 57 (38)                   | 2 (7)             |
| Mitralklappenrekonstruktion, N (%)              | 66 (37)  | 56 (37)                   | 10 (36)           |
| • Anuloplastierung, N (%)                       | 56 (31)  | 50 (33)                   | 6 (21)            |
| • Segelrekonstruktion, N (%)                    | 1 (0,6)  | 1 (1)                     | 0                 |
| • Anuloplastierung + Segelrekonstruktion, N (%) | 9 (5)    | 5 (3)                     | 4 (14)            |
| Aortenklappenersatz, biologisch, N (%)          | 39 (22)  | 39 (26)                   | 0                 |
| 1-fache Myokardrevaskularisation, N (%)         | 14 (8)   | 14 (9)                    | 0                 |
| 2-fache Myokardrevaskularisation, N (%)         | 12 (7)   | 12 (8)                    | 0                 |
| 3-fache Myokardrevaskularisation, N (%)         | 3 (2)    | 3 (2)                     | 0                 |
| 4-fache Myokardrevaskularisation, N (%)         | 6 (3)    | 6 (4)                     | 0                 |
| MIC: minimalinvasive Chirurgie.                 |          |                           |                   |

In Tabelle 9 sind die peri- und postoperativen Daten dargestellt. Die Dauer der Operation betrug in der Sternotomie-Gruppe durchschnittlich  $6,05 \pm 1,75$  h und in der MIC-Gruppe  $4,61 \pm 2,16$  h. Die HLM-Zeit war im Durchschnitt ebenfalls länger in der Sternotomie-Gruppe als in der MIC-Gruppe ( $176,20 \pm 72,26$  min vs.  $143,68 \pm 93,05$  min).

Postoperativ wurden die stationäre Verweildauer und die Intensivverweildauer ermittelt. Es zeigten sich vergleichbare Werte zwischen den beiden Gruppen. Die Ventilationszeit

hatte in der MIC-Gruppe im Gegensatz zur Sternotomie-Gruppe extreme Ausreißer, sodass diese im Schnitt deutlich höher erschien: 58,18 h [95 %-KI: 6,83; 109,54] in der MIC-Gruppe vs. 32,03 h [95 %-KI: 23,65; 40,41] in der Sternotomie-Gruppe. Die durchschnittliche Anzahl der Bluttransfusionen zeigte einen Unterschied zwischen den beiden Gruppen:  $7,81 \pm 10,71$  Erythrozytenkonzentrate (EKs) wurden in der Sternotomie-Gruppe und  $3,64 \pm 4,85$  EKs in der MIC-Gruppe verabreicht. Bei 20 Personen (13 %) der Sternotomie-Gruppe und bei sieben Personen (25 %) der MIC-Gruppe war eine Rethorakotomie aufgrund von Nachblutungen notwendig.

Insgesamt 20 Personen (13 %) der Sternotomie-Gruppe verstarben. Die Todesursache war ein kardiogener Schock oder eine Sepsis, die zu Multiorganversagen führten. Davon verstarben 13 (9 %) innerhalb der ersten 30 Tage nach der Operation. Insgesamt zwei Personen (7 %) sind in der MIC-Gruppe verstorben, beide während des Krankenhausaufenthalts aufgrund eines kardiogenen Schocks mit folgendem Multiorganversagen. Eine von diesen zwei Personen verstarb innerhalb der ersten 30 Tage postoperativ.

**Tab. 9:** Peri- und postoperative Daten der Gesamtpopulation. Modifiziert nach Klocks in et al., 2025

| Parameter   | Total                              | Gruppe 1<br>(Sternotomie)          | Gruppe 2<br>(MIC)                  |
|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Patientinnen- und Patientenzahl, N  | 180                                | 152                                | 28                                 |
| OP-Dauer (h),<br>M ± SD [95 % KI]   | 5,82 ± 1,89<br>[5,54; 6,10]        | 6,05 ± 1,75<br>[5,77; 6,33]        | 4,61 ± 2,16<br>[3,77; 5,44]        |
| HLM-Zeit (min),<br>M ± SD [95 % KI]   | 171,11 ± 76,51<br>[159,83; 182,40] | 176,20 ± 72,26<br>[164,58; 187,82] | 143,68 ± 93,05<br>[107,60; 179,76] |
| Aortenklammzeit (min),<br>M ± SD [95 % KI]  | 100,10 ± 67,90<br>[90,05; 110,14]  | 109,31 ± 64,59<br>[98,89; 119,73]  | 50,71 ± 64,80<br>[25,59; 75,84]    |
| Stationäre Verweildauer (d),<br>M ± SD [95 % KI]  | 27,72 ± 29,54<br>[23,37; 32,08]    | 28,53 ± 31,24<br>[23,53; 33,54]    | 23,16 ± 16,79<br>[16,52; 29,80]    |
| Intensivverweildauer (d),<br>M ± SD [95 % KI]   | 6,39 ± 6,98<br>[5,35; 7,43]        | 6,55 ± 7,12<br>[5,40; 7,71]        | 5,54 ± 6,20<br>[3,13; 7,94]        |
| Beatmungszeit (h),<br>M ± SD [95 % KI]  | 35,77 ± 58,12<br>[25,80; 45,74]    | 32,03 ± 45,16<br>[23,65; 40,41]    | 58,18 ± 106,55<br>[6,83; 109,54]   |
| Bluttransfusion (EKs),<br>M ± SD [95 % KI]  | 7,16 ± 10,13<br>[5,67; 8,65]       | 7,81 ± 10,71<br>[6,09; 9,53]       | 3,64 ± 4,85<br>[1,76; 5,52]        |
| Rethorakotomie, N (%)   | 27 (15)                            | 20 (13)                            | 7 (25)                             |
| Schlaganfall, N (%)   | 2 (1)                              | 2 (1.3)                            | 0                                  |
| Wundheilungsstörung, N (%)  | 9 (5)                              | 8 (5)                              | 1 (4)                              |
| Krankenhausmortalität, N (%)  | 22 (12)                            | 20 (13)                            | 2 (7)                              |
| 30-Tage-Mortalität, N (%)   | 14 (8)                             | 13 (9)                             | 1 (4)                              |
| Myokardinfarkt postoperativ, N (%)  | 2 (1)                              | 2 (1)                              | 0                                  |
| ECMO-Therapie, N (%)  | 17 (9)                             | 15 (10)                            | 2 (7)                              |
| MIC: minimalinvasive Chirurgie; HLM: Herz-Lungen-Maschine; EK: Erythrozytenkonzentrat; ECMO: extracorporeale Membran-Oxygenation. |                                    |                                    |                                    |

Die in der postoperativen Echokardiographie (Tab. 10) erhobenen Werte für die TAPSE betragen in der Sternotomie-Gruppe im Mittel  $13,30 \pm 4,32$  mm und in der MIC-Gruppe  $15,37 \pm 4,83$  mm. Die postoperativ gemessene LVEF war vergleichbar mit den präoperativ gemessenen Werten. In der Sternotomie-Gruppe betrug sie  $53,67 \pm 11,61$  % und in der MIC-Gruppe  $57,44 \pm 10,90$  %.

Der Erfolg der Trikuspidalklappenoperation wurde echokardiographisch ermittelt, um gegebenenfalls eine postoperativ verbliebene TI einzuschätzen. In der Sternotomie-Gruppe wiesen 129 Personen (85 %) und in der MIC-Gruppe 25 Personen (89 %) keine oder nur eine milde TI auf. Eine moderate TI zeigten in der Sternotomie-Gruppe 22 Personen (14 %) und in der MIC-Gruppe drei Personen (11 %). In der Sternotomie-Gruppe zeigte die intraoperative TEE bei einer Patientin nach Mitral- und Trikuspidalklappenrekonstruktion eine moderate TI, postoperativ entwickelte sich jedoch

eine schwere TI. Angesichts des vorbestehenden schweren pulmonalen Hypertonus wurde die TI Grad 3 belassen, um eine zusätzliche Belastung des rechten Herzens zu vermeiden, da eine vollständige Abdichtung der Klappe das Risiko eines Rechtsherzversagens erhöht hätte. Aufgrund der Multimorbidität der Patientin und des hohen operativen Risikos wurde auf eine erneute Intervention mit Herz-Lungen-Maschine verzichtet. Bei den Patientinnen und Patienten, bei denen eine zusätzliche Mitralklappen- oder Aortenklappenoperation durchgeführt wurde, erwies sich in der postoperativen Echokardiographie ein regelrechtes Ergebnis bezüglich der Aortenklappe bzw. Mitralklappe.

**Tab. 10:** Postoperative echokardiographische Parameter der Gesamtpopulation. Modifiziert nach Klocksin et al., 2025

| Parameter   | Total                           | Gruppe 1<br>(Sternotomie)       | Gruppe 2<br>(MIC)               |
|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Patientinnen- und Patientenzahl, N  | 180                             | 152                             | 28                              |
| TAPSE (mm), M ± SD [95 % KI]  | 13,68 ± 4,47<br>[12,94; 14,41]  | 13,30 ± 4,32<br>[12,52; 14,09]  | 15,37 ± 4,83<br>[13,41; 17,32]  |
| Ejektionsfraktion (%), M ± SD [95 % KI]   | 54,31 ± 11,55<br>[52,48; 56,15] | 53,67 ± 11,61<br>[51,66; 55,71] | 57,44 ± 10,90<br>[53,03; 61,84] |
| Trikuspidalklappeninsuffizienz  |                                 |                                 |                                 |
| • Keine Insuffizienz, N (%)   | 62 (34)                         | 49 (32)                         | 13 (46)                         |
| • Grad 1, N (%)   | 92 (51)                         | 80 (53)                         | 12 (43)                         |
| • Grad 2, N (%)   | 25 (14)                         | 22 (14)                         | 3 (11)                          |
| • Grad 3, N (%)   | 1 (1)                           | 1 (1)                           | 0                               |
| MIC: minimalinvasive Chirurgie; TAPSE: tricuspid annular plane systolic excursion; Grad 1: leichte Insuffizienz/Stenose; Grad 2: mäßige/moderate Insuffizienz/Stenose; Grad 3: schwere Insuffizienz/Stenose; Grad 4: sehr schwere/kritische Insuffizienz/Stenose. |                                 |                                 |                                 |

### 3.3 Präoperative Charakteristika der Matching-Analyse

Tabelle 11 zeigt die Charakteristika und präoperativen Merkmale der zwei Gruppen, die nach Propensity-Score-Matching verglichen wurden: Sternotomie- Gruppe und MIC-Gruppe mit jeweils 24 Patientinnen und Patienten. Mittels der PSM-Analyse wurden die beiden Gruppen hinsichtlich der Faktoren Alter, Geschlecht, BMI und EuroSCORE II gegenübergestellt. Der Anteil an männlichen Patienten war in beiden Gruppen gleich (63 %). Das mittlere Alter war mit  $66,23 \pm 11,89$  Jahren in der Sternotomie-Gruppe und

68,51 ± 11,29 Jahren in der MIC-Gruppe vergleichbar: OR = 0,98 [95 %-KI: 0,93; 1,04]. Der EuroSCORE II war in beiden Gruppen ohne relevanten Unterschied: 5,98 ± 5,26 % vs. 4,26 ± 3,50 %, OR = 0,90 [95 %-KI: 0,77; 1,05]. Auch der BMI war nach dem Matching in beiden Gruppen vergleichbar und lag in der Gesamtkohorte bei 26,49 ± 4,59 kg/m<sup>2</sup>, OR = 0,95 [95 %-KI: 0,83; 1,08].

**Tab. 11:** Präoperative Charakteristika der Matching-Analyse. Modifiziert nach (Klocksinn et al., 2025)

| Parameter   | Total                           | Gruppe 1<br>(Sternotomie)       | Gruppe 2<br>(MIC)               | OR<br>[95 % KI]      | p-Wert |
|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|--------|
| Patientinnen-<br>und Patientenzahl, N                 | 48                              | 24                              | 24                              |                      |        |
| Alter (Jahre),<br>M ± SD [95 % KI]                    | 67,37 ± 11,53<br>[64,03; 70,72] | 66,23 ± 11,89<br>[61,22; 71,25] | 68,51 ± 11,29<br>[63,74; 73,28] | 0,98<br>[0,93; 1,04] | 0,487  |
| Männer, N (%)   | 30 (63)                         | 15 (63)                         | 15 (63)                         | 1,00<br>[0,20; 4,96] | 1,000  |
| Frauen, N (%)   | 18 (38)                         | 9 (38)                          | 9 (38)                          |                      |        |
| BMI (kg/m <sup>2</sup> ),<br>M ± SD [95 % KI]         | 26,49 ± 4,59<br>[25,16; 27,82]  | 25,95 ± 4,58<br>[24,01; 27,88]  | 27,03 ± 4,64<br>[25,07; 28,99]  | 0,95<br>[0,83; 1,08] | 0,405  |
| EuroSCORE II (%),<br>M ± SD [95 % KI]                 | 5,12 ± 4,51<br>[3,81; 6,43]     | 4,26 ± 3,50<br>[2,78; 5,74]     | 5,98 ± 5,26<br>[3,76; 8,20]     | 0,90<br>[0,77; 1,05] | 0,186  |
| MIC: minimalinvasive Chirurgie; BMI: Body-Mass-Index. |                                 |                                 |                                 |                      |        |

Tabelle 12 führt die präoperative Verteilung der Klappenvitien nach der PSM-Analyse auf. Die TI zeigte eine höhere Prävalenz sehr schwerer Fälle (Grad 4) in der MIC-Gruppe (21 % vs. 4 %; OR = 0,37 [95 %-KI: 0,12; 1,11]). Am häufigsten war in beiden Gruppen eine schwere TI feststellbar (jeweils 58 %). Im Hinblick auf die Mitralklappeninsuffizienz wurde Grad 3 am häufigsten beobachtet, wobei sehr schwere Insuffizienzen in der Sternotomie-Gruppe häufiger vorkamen: 13 % vs. 4 %; OR = 1,41 [95 %-KI: 0,71; 2,80].

**Tab. 12:** Präoperative Verteilung der Klappenvitien in der Matching-Analyse. Modifiziert nach (Klocksinn et al., 2025)

| Parameter  | Total   | Gruppe 1<br>(Sternotomie) | Gruppe 2<br>(MIC) | OR<br>[95 % KI]      | p-<br>Wert |
|--|---------|---------------------------|-------------------|----------------------|------------|
| Patientinnen-<br>und Patientenzahl, N  | 48      | 24                        | 24                |                      |            |
| <b>Trikuspidalklappeninsuffizienz</b>  |         |                           |                   |                      |            |
| • Grad 1, N (%)  | 0       | 0                         | 0                 | 0,37<br>[0,12; 1,11] | 0,075      |
| • Grad 2, N (%)  | 14 (29) | 9 (38)                    | 5 (21)            |                      |            |
| • Grad 3, N (%)  | 28 (58) | 14 (58)                   | 14 (58)           |                      |            |
| • Grad 4, N (%)  | 6 (13)  | 1 (4)                     | 5 (21)            |                      |            |
| <b>Mitralklappeninsuffizienz</b>   |         |                           |                   |                      |            |
| • Keine Insuffizienz, N (%)  | 1 (2)   | 1 (4)                     | 0                 | 1,41<br>[0,71; 2,80] | 0,325      |
| • Grad 1, N (%)  | 12 (25) | 5 (21)                    | 7 (29)            |                      |            |
| • Grad 2, N (%)  | 9 (19)  | 3 (13)                    | 6 (25)            |                      |            |
| • Grad 3, N (%)  | 22 (46) | 12 (50)                   | 10 (42)           |                      |            |
| • Grad 4, N (%)  | 4 (8)   | 3 (13)                    | 1 (4)             |                      |            |
| <b>Mitralklappenstenose</b>  |         |                           |                   |                      |            |
| • Keine Stenose, N (%)   | 47 (98) | 24 (100)                  | 23 (96)           |                      |            |
| • Grad 1, N (%)  | 1 (2)   | 0                         | 1 (4)             |                      |            |
| <b>Aortenklappeninsuffizienz</b>   |         |                           |                   |                      |            |
| • Keine Insuffizienz, N (%)  | 31 (65) | 16 (67)                   | 15 (63)           | 0,83<br>[0,25; 2,73] | 0,763      |
| • Grad 1, N (%)  | 17 (35) | 8 (33)                    | 9 (38)            |                      |            |
| Aortenklappenstenose, N (%)  | 0       | 0                         | 0                 |                      |            |
| MIC: minimalinvasive Chirurgie; Grad 1: leichte Insuffizienz/Stenose; Grad 2: mäßige/moderate Insuffizienz/Stenose; Grad 3: schwere Insuffizienz/Stenose; Grad 4: sehr schwere/kritische Insuffizienz/Stenose. |         |                           |                   |                      |            |

Weitere Daten zum präoperativen Patientinnen- und Patientenkollektiv der PSM-Analyse sind in Tabelle 13 aufgelistet. Hinsichtlich der NYHA-Klassifikation wurden die meisten Patientinnen und Patienten in die Klassen 3 oder 4 eingestuft, was auf eine fortgeschrittene Herzinsuffizienz hindeutet. Die Verteilung war dabei vergleichbar zwischen den Gruppen, wobei 58 % der Sternotomie-Gruppe und 67 % der MIC-Gruppe eine NYHA-Klasse 3 aufwiesen (OR = 0,91 [95 %-KI: 0,39; 2,14]).

Die RV-Funktion, gemessen anhand der TAPSE, war präoperativ in beiden Gruppen vergleichbar:  $19,45 \pm 3,80$  mm in der Sternotomie-Gruppe vs.  $21,11 \pm 4,59$  mm in der MIC-Gruppe (OR = 0,82 [95 %-KI: 0,60; 1,12]). Auch die LVEF zeigte keine ausgeprägten Unterschiede zwischen den Gruppen. Für die gesamte Matching-Kohorte betrug die LVEF  $56,90 \pm 9,09$  %.

Weitere präoperative Begleiterkrankungen wie koronare Herzkrankheit, Diabetes mellitus, COPD, chronische Niereninsuffizienz, arterielle Hypertonie oder Endokarditis waren bei beiden Gruppen in ähnlichem Umfang vertreten. In der Sternotomie-Gruppe wurde eine höhere Prävalenz von pAVK festgestellt (13 % vs. 4 %; OR = 3,00 [95 %-KI: 0,31; 28,84]).

**Tab. 13:** Präoperative Begleiterkrankungen und echokardiographische Parameter der Matching-Analyse. Modifiziert nach (Klocksinn et al., 2025)

| Parameter                                  | Total                          | Gruppe 1<br>(Sternotomie)      | Gruppe 2<br>(MIC)               | OR<br>[95 % KI]       | p-Wert |
|--|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------|
| Patientinnen-<br>und Patientenzahl, N      | 48                             | 24                             | 24                              |                       |        |
| NYHA-Klassifikation                        |                                |                                |                                 |                       |        |
| • Klasse 1, N (%)                          | 0                              | 0                              | 0                               | 0,91<br>[0,39; 2,14]  | 0,827  |
| • Klasse 2, N (%)                          | 10 (21)                        | 7 (29)                         | 6 (25)                          |                       |        |
| • Klasse 3, N (%)                          | 30 (34)                        | 14 (58)                        | 16 (67)                         |                       |        |
| • Klasse 4, N (%)                          | 5 (11)                         | 3 (13)                         | 2 (8)                           |                       |        |
| Koronare Herzkrankheit                     |                                |                                |                                 |                       |        |
| • Keine KHK, N (%)                         | 34 (71)                        | 18 (75)                        | 16 (67)                         | 0,67<br>[0,19; 2,36]  | 0,340  |
| • KHK 1, N (%)                             | 6 (13)                         | 3 (13)                         | 3 (13)                          |                       |        |
| • KHK 2, N (%)                             | 6 (13)                         | 3 (13)                         | 3 (13)                          |                       |        |
| • KHK 3, N (%)                             | 2 (4)                          | 0                              | 2 (8)                           |                       |        |
| PCI/Stent                                  |                                |                                |                                 |                       |        |
| • Kein Stent, N (%)                        | 40 (83)                        | 21 (88)                        | 19 (79)                         | 0,50<br>[0,09; 2,73]  | 0,423  |
| • Stent, N (%)                             | 8 (17)                         | 3 (13)                         | 5 (21)                          |                       |        |
| TAPSE (mm),<br>M ± SD [95 % KI]            | 20,28 ± 4,24<br>[18,88; 21,67] | 19,45 ± 3,80<br>[17,62; 21,28] | 21,11 ± 4,59<br>[18,89; 23,32]  | 0,82<br>[0,60; 1,12]  | 0,215  |
| Ejektionsfraktion (%),<br>M ± SD [95 % KI] | 56,90 ± 9,09<br>[54,20; 59,59] | 57,26 ± 6,43<br>[54,47; 60,04] | 56,54 ± 11,28<br>[51,66; 61,41] | 1,00<br>[0,95; 1,07]  | 0,900  |
| Herzoperation in der Anamnese              |                                |                                |                                 |                       |        |
| • Keine Herzoperation,<br>N (%)            | 43 (90)                        | 22 (92)                        | 21 (88)                         | 0,67<br>[0,11; 3,99]  | 0,657  |
| • MKC, N (%)                               | 2 (4)                          | 0                              | 2 (8)                           |                       |        |
| • TKC, N (%)                               | 2 (4)                          | 1 (4)                          | 1 (4)                           |                       |        |
| • MKC und TKC, N (%)                       | 1 (2)                          | 1 (4)                          | 0                               |                       |        |
| Diabetes mellitus                          |                                |                                |                                 |                       |        |
| • Kein Diabetes mellitus,<br>N (%)         | 41 (85)                        | 21 (88)                        | 20 (83)                         | 0,75<br>[0,17; 3,35]  | 0,706  |
| • IDDM, N (%)                              | 2 (4)                          | 0                              | 2 (8)                           |                       |        |
| • NIDDM, N (%)                             | 5 (10)                         | 3 (13)                         | 2 (8)                           |                       |        |
| Chronisch obstruktive Lungenerkrankung     |                                |                                |                                 |                       |        |
| • Keine COPD, N (%)                        | 45 (94)                        | 23 (96)                        | 22 (92)                         | 2,00<br>[0,18; 22,06] | 0,571  |
| • COPD, N (%)                              | 3 (6)                          | 1 (4)                          | 2 (8)                           |                       |        |
| Niereninsuffizienz                         |                                |                                |                                 |                       |        |
| • Keine<br>Niereninsuffizienz,<br>N (%)    | 42 (88)                        | 22 (92)                        | 20 (83)                         | 0,50<br>[0,09; 2,73]  | 0,423  |
| • Niereninsuffizienz,<br>N (%)             | 6 (13)                         | 2 (8)                          | 4 (17)                          |                       |        |

|   |         |         |         |                       |       |
|---|---------|---------|---------|-----------------------|-------|
| Myokardinfarkt präoperativ, N (%)   | 2 (4)   | 2 (8)   | 0       |                       |       |
| Arterielle Hypertonie   |         |         |         |                       |       |
| • Keine Hypertonie, N (%)   | 15 (31) | 7 (29)  | 8 (33)  | 1,25<br>[0,34; 4,66]  | 0,739 |
| • Hypertonie, N (%)   | 33 (69) | 17 (71) | 16 (67) |                       |       |
| Periphere arterielle Verschlusskrankheit  |         |         |         |                       |       |
| • Keine pAVK, N (%)   | 44 (92) | 21 (88) | 23 (96) | 3,00<br>[0,31; 28,84] | 0,341 |
| • pAVK, N (%)   | 4 (8)   | 3 (13)  | 1 (4)   |                       |       |
| Endokarditis  |         |         |         |                       |       |
| • Keine Endokarditis, N (%)   | 43 (90) | 21 (88) | 22 (92) | 1,50<br>[0,25; 8,98]  | 0,657 |
| • Endokarditis, N (%)   | 5 (10)  | 3 (13)  | 2 (8)   |                       |       |
| MIC: minimalinvasive Chirurgie; NYHA: New York Heart Association; KHK: koronare Herzkrankheit; PCI: perkutane Koronarintervention; TAPSE: tricuspid annular plane systolic excursion; MKC: Mitralklappenchirurgie; TKC: Trikuspidalklappenchirurgie; IDDM: insulin dependent diabetes mellitus; NIDDM: not insulin dependent diabetes mellitus; COPD: chronisch obstruktive Lungenerkrankung; pAVK: periphere arterielle Verschlusskrankheit. |         |         |         |                       |       |

### 3.4 Operative und postoperative Ergebnisse der Matching-Analyse

Die operativen Interventionen der PSM-Analyse sind in Tabelle 14 aufgeführt. Der biologische Trikuspidalklappenersatz wurde in der Sternotomie-Gruppe bei 25 % der Personen und in der MIC-Gruppe bei 21 % durchgeführt (OR = 1,33 [95 %-KI: 0,30; 5,96]). In beiden Gruppen war die Trikuspidalklappenrekonstruktion die dominierende Prozedur, mit 18 Personen (75 %) in der Sternotomie-Gruppe und 19 Personen (79 %) in der MIC-Gruppe. Die Rekonstruktion mit einem Anuloplastierung war die häufigste Rekonstruktionsform: 71 % in der Sternotomie-Gruppe und 63 % in der MIC-Gruppe (OR = 0,75 [95 %-KI: 0,17; 3,35]).

Ein biologischer Mitralklappenersatz wurde häufiger in der Sternotomie-Gruppe durchgeführt: 25 % vs. 8 % (OR = 3,00 [95 %-KI: 0,61; 14,86]) in der MIC-Gruppe. Der Anuloplastierung wurde bei acht Personen (33 %) der Sternotomie-Gruppe und sechs Personen (25 %) der MIC-Gruppe eingesetzt. Aortenklappenprozeduren und andere kardiovaskuläre Eingriffe fanden nicht statt.

**Tab. 14:** Operative Interventionen der Matching-Analyse. Modifiziert nach (Klocksinn et al., 2025)

| Parameter   | Total   | Gruppe 1<br>(Sternotomie) | Gruppe 2<br>(MIC) | OR<br>[95 % KI]       | p-<br>Wert |
|---|---------|---------------------------|-------------------|-----------------------|------------|
| Patientinnen-<br>und Patientenzahl, N                 | 48      | 24                        | 24                |                       |            |
| Trikuspidalklappenersatz,<br>biologisch, N (%)        | 11 (23) | 6 (25)                    | 5 (21)            | 1,33<br>[0,30; 5,96]  | 0,706      |
| Trikuspidalklappenrekonstruktion                      |         |                           |                   |                       |            |
| • Anuloplastierung, N (%)                             | 32 (67) | 17 (71)                   | 15 (63)           | 0,75<br>[0,17; 3,35]  | 0,706      |
| • Segelrekonstruktion,<br>N (%)                       | 2 (4)   | 0                         | 2 (8)             |                       |            |
| • Anuloplastierung +<br>Segelrekonstruktion,<br>N (%) | 3 (6)   | 1 (4)                     | 2 (8)             |                       |            |
| Mitralklappenersatz,<br>biologisch, N (%)             | 8 (17)  | 6 (25)                    | 2 (8)             | 3,00<br>[0,61; 14,86] | 0,178      |
| Mitralklappenrekonstruktion                           |         |                           |                   |                       |            |
| • Anuloplastierung, N (%)                             | 14 (29) | 8 (33)                    | 6 (25)            | 1,00<br>[0,29; 3,45]  | 1,000      |
| • Segelrekonstruktion,<br>N (%)                       | 0       | 0                         | 0                 |                       |            |
| • Anuloplastierung +<br>Segelrekonstruktion,<br>N (%) | 6 (13)  | 2 (8)                     | 4 (17)            |                       |            |
| MIC: minimalinvasive Chirurgie.                       |         |                           |                   |                       |            |

In Tabelle 15 sind die peri- und postoperativen Daten dargestellt. Die Dauer des Eingriffs war in der MIC-Gruppe kürzer, jedoch ohne relevanten Unterschied ( $5,01 \pm 2,05$  h vs.  $5,81 \pm 2,00$  h; OR = 1,28 [95 %-KI: 0,91; 1,79]). Die HLM-Zeit war in beiden Gruppen nahezu identisch (OR = 1,00 [95 %-KI: 0,99; 1,01]). Allerdings war die Aortenklammzeit in der MIC-Gruppe kürzer ( $59,17 \pm 66,39$  min vs.  $99,09 \pm 93,81$  min; OR = 1,01 [95 %-KI: 1,00; 1,02]).

Die Aufenthaltsdauer im Krankenhaus sowie auf der Intensivstation waren in der MIC-Gruppe nicht nennenswert länger. Die Patientinnen und Patienten in der MIC-Gruppe benötigten weniger EKs:  $3,25 \pm 4,54$  EKs vs.  $7,71 \pm 11,67$  EKs in der Sternotomie-Gruppe, OR = 1,07 [95 %-KI: 0,98; 1,17].

Die mittlere Beatmungszeit war in der MIC-Gruppe mit  $63,12 \pm 111,88$  h deutlich höher im Vergleich zur Sternotomie-Gruppe mit  $38,80 \pm 53,80$  h. Diese Differenz war jedoch

statistisch nicht beachtlich (OR = 1,00 [95 %-KI: 0,99; 1,01]) und lässt sich größtenteils durch das Auftreten von vier Ausreißern in der MIC-Gruppe erklären. Ohne Berücksichtigung dieser Ausreißer wäre die mittlere Beatmungszeit in der MIC-Gruppe deutlich niedriger und vergleichbar mit der in der Sternotomie-Gruppe.

Es traten keine Schlaganfälle in beiden Gruppen auf. Die Notwendigkeit einer Rethorakotomie war in der MIC-Gruppe häufiger (21 % vs. 13 %).

Während des Krankenhausaufenthalts starben drei Personen (13 %) in der Sternotomie-Gruppe, alle drei binnen 30 Tagen nach der Operation. In der MIC-Gruppe starben zwei Personen (8 %), davon eine Person binnen 30 Tagen postoperativ. Dieser Unterschied war statistisch nicht erheblich: OR = 1,50 [95 %-KI: 0,25; 8,98].

**Tab. 15:** Peri- und postoperative Daten der Matching-Analyse. Modifiziert nach (Klocksinn et al., 2025)

| Parameter   | Total                                 | Gruppe 1<br>(Sternotomie)             | Gruppe 2<br>(MIC)                     | OR<br>[95 % KI]       | p-<br>Wert |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|------------|
| Patientinnen-<br>und Patientenzahl, N   | 48                                    | 24                                    | 24                                    |                       |            |
| OP-Dauer (h),<br>M ± SD [95 % KI]   | 5,41 ± 2,05<br>[4,82; 6,01]           | 5,81 ± 2,00<br>[4,96; 6,66]           | 5,01 ± 2,05<br>[4,14; 5,88]           | 1,28<br>[0,91; 1,79]  | 0,160      |
| HLM-Zeit (min),<br>M ± SD [95 % KI]   | 157,64 ± 83,16<br>[133,22;<br>182,06] | 156,96 ± 74,08<br>[124,92;<br>188,99] | 158,29 ± 92,64<br>[119,17;<br>197,41] | 1,00<br>[0,99; 1,01]  | 0,954      |
| Aortenklammzeit<br>(min),<br>M ± SD [95 % KI]   | 78,70 ± 82,58<br>[54,46; 102,95]      | 99,09 ± 93,81<br>[58,52; 139,66]      | 59,17 ± 66,39<br>[31,13; 87,20]       | 1,01<br>[1,00; 1,02]  | 0,063      |
| Stationäre<br>Verweildauer (d),<br>M ± SD [95 % KI]   | 20,98 ± 14,17<br>[16,82; 25,14]       | 19,66 ± 12,40<br>[14,42; 24,90]       | 22,36 ± 15,98<br>[15,45; 29,27]       | 0,99<br>[0,95; 1,03]  | 0,571      |
| Intensivverweildauer<br>(d), M ± SD [95 % KI]   | 5,96 ± 6,06<br>[4,20; 7,72]           | 6,21 ± 5,78<br>[3,77; 8,65]           | 5,71 ± 6,44<br>[2,99; 8,43]           | 1,01<br>[0,93; 1,11]  | 0,787      |
| Beatmungszeit (h),<br>M ± SD [95 % KI]  | 51,33 ± 88,13<br>[20,08; 82,58]       | 38,80 ± 53,80<br>[10,13; 67,47]       | 63,12 ± 111,88<br>[5,60; 120,65]      | 1,00<br>[0,99; 1,01]  | 0,933      |
| Bluttransfusion (EKs),<br>M ± SD [95 % KI]  | 5,48 ± 9,05<br>[2,85; 8,11]           | 7,71 ± 11,67<br>[2,78; 12,64]         | 3,25 ± 4,54<br>[1,33; 5,17]           | 1,07<br>[0,98; 1,17]  | 0,149      |
| <b>Rethorakotomie</b>   |                                       |                                       |                                       |                       |            |
| • Keine<br>Rethorakotomie, N<br>(%)   | 40 (83)                               | 21 (88)                               | 19 (79)                               | 0,50<br>[0,09; 2,73]  | 0,423      |
| • Rethorakotomie, N<br>(%)  | 8 (17)                                | 3 (13)                                | 5 (21)                                |                       |            |
| Schlaganfall, N (%)   | 0                                     | 0                                     | 0                                     |                       |            |
| <b>Wundheilungsstörung</b>  |                                       |                                       |                                       |                       |            |
| • Keine WHS, N (%)  | 47 (98)                               | 24 (100)                              | 23 (96)                               |                       |            |
| • WHS, N (%)  | 1 (2)                                 | 0                                     | 1 (4)                                 |                       |            |
| <b>Krankenhausmortalität</b>  |                                       |                                       |                                       |                       |            |
| • Keine<br>Krankenhausmort<br>alität, N (%)   | 43 (90)                               | 21 (88)                               | 22 (92)                               | 1,50<br>[0,25; 8,98]  | 0,657      |
| • Krankenhausmort<br>alität, N (%)  | 5 (10)                                | 3 (13)                                | 2 (8)                                 |                       |            |
| <b>30-Tage-Mortalität</b>   |                                       |                                       |                                       |                       |            |
| • Keine 30-Tage-<br>Mortalität, N (%)   | 44 (92)                               | 21 (88)                               | 23 (96)                               | 3,00<br>[0,31; 28,84] | 0,341      |
| • 30-Tage-Mortalität,<br>N (%)  | 4 (8)                                 | 3 (13)                                | 1 (4)                                 |                       |            |
| Myokardinfarkt<br>postoperativ, N (%)   | 0                                     | 0                                     | 0                                     |                       |            |
| <b>ECMO-Therapie</b>  |                                       |                                       |                                       |                       |            |
| • Keine ECMO-<br>Therapie, N (%)  | 45 (94)                               | 22 (92)                               | 23 (96)                               | 2,00<br>[0,18; 22,06] | 0,571      |
| • ECMO-Therapie,<br>N (%)   | 3 (6)                                 | 2 (8)                                 | 1 (4)                                 |                       |            |
| MIC: minimalinvasive Chirurgie; HLM: Herz-Lungen-Maschine; EK: Erythrozytenkonzentrat; WHS: Wundheilungsstörung; ECMO: extracorporeal membrane oxygenation. |                                       |                                       |                                       |                       |            |

In Tabelle 16 sind die postoperativen echokardiographischen Parameter dargestellt. Die RV-Funktion, gemessen an der TAPSE, blieb postoperativ in beiden Gruppen vergleichbar: OR = 0,99 [95 %-KI: 0,85; 1,16]. Die LVEF zeigte ebenfalls keine nennenswerten Veränderungen: OR = 1,00 [95 %-KI: 0,94; 1,05].

Nach der Operation wurde in der Sternotomie-Gruppe bei 54 % der Patientinnen und Patienten keine Insuffizienz festgestellt, verglichen mit 50 % in der MIC-Gruppe (OR = 0,73 [95 %-KI: 0,32; 1,63]). Leichtgradige Insuffizienzen waren in beiden Gruppen ähnlich verteilt: 38 % in der Sternotomie-Gruppe vs. 42 % in der MIC-Gruppe. Moderate Insuffizienzen traten jeweils bei zwei Personen (8 %) in beiden Gruppen auf. Eine schwere Insuffizienz wurde nicht festgestellt.

**Tab. 16:** Postoperative echokardiographische Parameter der Matching-Analyse. Modifiziert nach (Klocksinn et al., 2025)

| Parameter  | Total                           | Gruppe 1<br>(Sternotomie)       | Gruppe 2<br>(MIC)               | OR<br>[95 % KI]      | p-<br>Wert |
|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|------------|
| Patientinnen-<br>und Patientenzahl, N  | 48                              | 24                              | 24                              |                      |            |
| TAPSE (mm),<br>M ± SD [95 % KI]  | 14,61 ± 4,25<br>[13,30; 15,91]  | 14,43 ± 3,61<br>[12,74; 16,12]  | 14,76 ± 4,82<br>[12,67; 16,85]  | 0,99<br>[0,85; 1,16] | 0,935      |
| Ejektionsfraktion (%),<br>M ± SD [95 % KI]   | 56,88 ± 10,95<br>[53,63; 60,13] | 56,42 ± 10,58<br>[51,84; 60,99] | 57,35 ± 11,53<br>[52,36; 62,33] | 1,00<br>[0,94; 1,05] | 0,888      |
| Trikuspidalklappeninsuffizienz   |                                 |                                 |                                 |                      |            |
| • Keine Insuffizienz,<br>N (%)   | 24 (50)                         | 13 (54)                         | 12 (50)                         | 0,73<br>[0,32; 1,63] | 0,440      |
| • Grad 1, N (%)  | 19 (40)                         | 9 (38)                          | 10 (42)                         |                      |            |
| • Grad 2, N (%)  | 4 (8)                           | 2 (8)                           | 2 (8)                           |                      |            |
| • Grad 3, N (%)  | 0                               | 0                               | 0                               |                      |            |
| MIC: minimalinvasive Chirurgie; TAPSE: tricuspid annular plane systolic excursion; Grad 1: leichte Insuffizienz; Grad 2: mäßige/moderate Insuffizienz; Grad 3: schwere Insuffizienz. |                                 |                                 |                                 |                      |            |

## 4. Diskussion

### 4.1 Behandlung der Trikuspidalklappeninsuffizienz

Die TI ist eine bedeutsame kardiovaskuläre Erkrankung, die in den letzten Jahren zunehmend die Aufmerksamkeit der medizinischen Fachwelt auf sich gezogen hat (Beckhoff et al., 2018). Die alters- und geschlechtsadjustierte Prävalenz von  $\geq$  moderater TI lag in einer US-amerikanischen Bevölkerungsstudie bei 0,55 % und stieg mit zunehmendem Alter deutlich an (Topilsky et al., 2019). So zeigen rund 4 % der Personen im Alter von 75 Jahren oder älter eine mindestens moderate TI (Topilsky et al., 2019). In der hier vorgelegten Studie wiesen 28 % der Teilnehmenden eine moderate und 72 % eine schwere bis sehr schwere TI auf. Risikofaktoren wie VHF und die Implantation intrakardialer Geräte spielen eine wesentliche Rolle bei der Pathogenese der TI (Arsalan et al., 2017).

Frühere Annahmen gingen davon aus, dass ein chirurgischer Ersatz der Trikuspidalklappe selten notwendig sei, da sich eine TI nach erfolgreicher Mitralklappenoperation häufig spontan bessern würde (Braunwald et al., 1967). Diese Einschätzung hat jedoch in den letzten Jahrzehnten zunehmend an Gültigkeit verloren, da immer mehr Studien die klinische Bedeutung der unbehandelten TI betonen (Abdelbar et al., 2021; Brescia et al., 2020), trotz der teilweise bestehenden Unklarheit hinsichtlich des Nutzens und des optimalen Zeitpunkts von Trikuspidalklappeninterventionen (Margari et al., 2021). Übereinstimmung besteht, dass die TI mit einer schlechten Prognose assoziiert ist und unbehandelt zu schwerwiegenden Spätfolgen führen kann, darunter Leber- und Nierenschädigungen, die das operative Risiko weiter erhöhen (Abdelbar et al., 2021). Auch in der hier vorgelegten Studie wiesen bereits 26 % der 180 untersuchten Personen eine chronische Niereninsuffizienz auf.

In der Meta-Analyse von Wang et al. (2019) wurde festgestellt, dass mit steigendem Grad der TI ein tendenziell höheres Risiko für Sterblichkeit einhergeht im Vergleich zu Patientinnen und Patienten mit keinem oder nur geringfügigem Grad der Insuffizienz ( $p < 0,001$ ). Offen et al. (2022) legten dar, dass Personen mit einer milden bis schweren TI ein 1,3- bis 3,2-fach erhöhtes Risiko für die Gesamtmortalität hatten, verglichen mit Personen ohne oder mit nur minimaler Insuffizienz ( $p < 0,001$  für alle Vergleiche). Trotz der erheblichen Auswirkungen dieser Erkrankung auf die Gesundheit und die Lebenserwartung ist die chirurgische Behandlung nach wie vor unzureichend (Abdelbar et al., 2021; Topilsky et al., 2019; Vahanian et al., 2022). Häufig wird eine Intervention erst in späten Krankheitsstadien durchgeführt (Vahanian et al., 2022). Abdelbar et al. (2020) wiesen darauf hin, dass Empfehlungen für eine isolierte Trikuspidalklappenoperation zurückhaltend formuliert werden, da in der Fachliteratur negative Ergebnisse für solche Eingriffe beschrieben sind. Diese Annahme stützt sich unter anderem auf die Studie von Rankin et al. (2006), die Trikuspidalklappeninterventionen in Zusammenhang mit einem hohen operativen Risiko beschrieben (OR 2,26 im Vergleich zum Aortenklappenersatz). Die zugrunde liegende Fallzahl für diese Studie war begrenzt, was potenzielle Einschränkungen der Übertragbarkeit der Ergebnisse zur Folge hat (Rankin et al., 2006). Dies muss berücksichtigt werden.

Zusätzlich berichteten frühere Studien über eine erhöhte Sterblichkeitsrate im Zusammenhang mit einem Trikuspidalklappenersatz (Filsoufi et al., 2005; Iscan et al., 2007; Mangoni et al., 2001; Van Nooten et al., 1995). Van Nooten et al. (1995) untersuchten die postoperativen Langzeitergebnisse von 146 Patientinnen und Patienten, die einen Trikuspidalklappenersatz im Zeitraum von 1967 bis 1987 erhielten. Die Sterblichkeitsrate im Krankenhaus war hoch (16,4 %) und wurde durch folgende Risikofaktoren begünstigt: Ikterus ( $p < 0,005$ ), präoperative Hepatomegalie ( $p = 0,012$ ) und NYHA-Klasse IV ( $p = 0,013$ ) (Van Nooten et al., 1995). Mangoni et al. (2001) berichteten ebenfalls ungünstige Verläufe sowohl in der Früh- als auch Langzeitphase nach isoliertem Trikuspidalklappenersatz bei einer kleinen Kohorte von 15 Patientinnen und Patienten, die zwischen 1984 und 1996 operiert wurden. Die mittlere Überlebensdauer betrug lediglich 1,2 Jahre. Innerhalb der ersten 30 Tage nach dem

Eingriff verstarben 20 % der behandelten Personen und nach drei Jahren war die Mortalitätsrate bereits auf 40 % angestiegen (Mangoni et al., 2001). Besonders auffällig war der Einfluss von Anasarka auf die frühe Sterblichkeit, wobei sich dieser Parameter als einziger relevanter Risikofaktor für die Kurzzeitmortalität erwies ( $p = 0,04$ ). Im Hinblick auf die langfristige Prognose identifizierte dieselbe Untersuchung andere bedeutende Risikofaktoren wie Anämie ( $p = 0,01$ ), rheumatische Herzkrankheit ( $p = 0,04$ ), frühere Schlaganfälle ( $p = 0,04$ ) und vorangegangene Mitralklappeneingriffe ( $p = 0,04$ ) (Mangoni et al., 2001). Auch Iscan et al. (2007) beschrieben eine hohe Krankenhausmortalität: In ihrer Studie von 42 Fällen zwischen 1987 und 2004 lag diese nach isolierter oder kombinierter Trikuspidalklappenoperation bei 26 %.

In den letzten zwei Jahrzehnten zeichnen sich jedoch zunehmend positivere Entwicklungen ab. Verbesserungen in der operativen Technik, der perioperativen Betreuung und eine gezieltere Patientinnen- und Patientenselektion haben wesentlich zu verbesserten Ergebnissen beigetragen (Fröjd et al., 2021; Weiss et al., 2022). Dies zeigt sich insbesondere in deutlich gesunkenen postoperativen Komplikationsraten und einer niedrigeren Mortalität (Brescia et al., 2020; Fröjd et al., 2021; Weiss et al., 2022). Auch die Ergebnisse in der hier vorgelegten Studie spiegeln diesen Fortschritt wider: Die in der PSM-Analyse ermittelte Krankenhaussterblichkeit lag bei 10 %, die 30-Tage-Mortalität bei 8 %. Diese Werte stimmen mit aktuellen Literaturangaben gut überein und unterstreichen die zunehmende Sicherheit der TKC.

Fröjd et al. (2021) konnten in einer Auswertung von 392 Fällen aus dem Zeitraum 1989 bis 2015 nachweisen, dass kombinierte Trikuspidalklappeneingriffe, etwa gemeinsam mit Mitralklappen- oder Bypass-Operationen, hinsichtlich des Überlebens nicht schlechter abschnitten als andere Klappenoperationen. Eine erhöhte Mortalität ließ sich in diesem Kontext nicht belegen (Fröjd et al., 2021). Die Studienpopulation wurde in die zwei Zeiträume 1989–2005 und 2006–2015 unterteilt, um zeitliche Entwicklungen zu analysieren. Es zeigte sich ein deutlicher Rückgang der Mortalitätsraten. Die 30-Tage-Mortalität sank von 16,1 % auf 7,3 % ( $p = 0,009$ ) und die 90-Tage-Mortalität reduzierte sich von 19,6 % auf 8,7 % ( $p = 0,002$ ). Auch die Ein-Jahres-Mortalität sank merklich von

24,4 % auf 11,2 % ( $p < 0,001$ ), während die Fünf-Jahres-Überlebensrate sich von 61 % auf 79 % verbesserte ( $p < 0,001$ ). Das verbesserte Überleben demonstriert den Fortschritt der TKC über die Zeit, die nun mit anderen Klappenoperationen vergleichbar ist (Fröjd et al., 2021).

In ihrer Studie eines Kollektivs von 171 operierten Personen, die im Zeitraum von 2012 bis 2016 eine kombinierte TKC erhielten, bestätigten Brescia et al. (2020) die positiven Entwicklungen der vergangenen Jahre. In zahlreichen Fällen wurden gleichzeitig Operationen an der Mitral- oder Aortenklappe durchgeführt. Besonders auffällig war die niedrige 30-Tage-Mortalität: Lediglich eine Person verstarb postoperativ, was einer Rate von nur 0,6 % entspricht (Brescia et al., 2020). Die geschätzte Überlebensrate nach einem Jahr betrug  $95 \pm 4$  %, nach fünf Jahren lag sie immer noch bei  $92 \pm 5$  % (Brescia et al., 2020). Ein leichter Anstieg moderater oder schwerer TI wurde beobachtet, wobei der Anteil nach sechs Monaten bei  $7 \pm 6$  % und nach drei Jahren bei  $11 \pm 8$  % lag (Brescia et al., 2020). Die vorliegenden Ergebnisse sprechen für einen anhaltenden therapeutischen Erfolg, wobei gleichzeitig eine engmaschige postoperative Nachsorge unverzichtbar bleibt.

Weiss et al. (2022) trugen zusätzliche Erkenntnisse zur isolierten TKC bei. In ihrer Kohorte von 43 Patientinnen und Patienten, die im Zeitraum von 2013 bis 2019 operiert wurden, kam es innerhalb der ersten 90 Tage nach dem Eingriff zu keinem Todesfall. Im Verlauf des ersten Jahres verstarben jedoch vier Personen (9,3 %), was die Bedeutung einer perioperativen Betreuung unterstreicht (Weiss et al., 2022). Dennoch bestätigen die Ergebnisse insgesamt die hohe Sicherheit dieser chirurgischen Eingriffe.

Die bisherigen Auswertungen zeigen, dass sich die operative Therapie der TI in den letzten Jahrzehnten erheblich weiterentwickelt hat und heute als etablierte Behandlungsoption zur Verbesserung der Krankheitsprognose gilt (Abdelbar et al., 2021). Neben der grundsätzlichen Frage der Operationsindikation gewinnt die Wahl des operativen Zugangs zunehmend an Bedeutung. Die Entscheidung zwischen einer

medianen Sternotomie und einem minimalinvasiven Vorgehen ist dabei bedeutsam, da sie sowohl das Risiko für perioperative Komplikationen als auch die Dauer der postoperativen Erholungszeit maßgeblich beeinflussen kann (Lin et al., 2023). Obwohl minimalinvasive Eingriffe offensichtliche Vorteile bieten, wird kritisch hinterfragt, ob sie hinsichtlich der Ergebnisse mit konventionellen Operationen gleichziehen können (Holzhey et al., 2013). Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Einführung minimalinvasiver Techniken ist die notwenige Lernkurve. Studien zeigen, dass es einer erheblichen Anzahl an Eingriffen bedarf, um die Lernkurve bei minimalinvasiven Operationen zu überwinden (Holzhey et al., 2013).

Bekannt ist, dass der chirurgische Zugang über eine mediane Sternotomie mit einem erhöhten Risiko für Komplikationen und eine gesteigerte Mortalität verbunden sein kann (Abdelbar et al., 2020). Minimalinvasive Verfahren rücken zunehmend in den Fokus, da sie mit einer geringeren operativen Belastung und potenziell niedrigeren Mortalitätsraten einhergehen (Abdelbar et al., 2020). Insbesondere Hochrisikopatientinnen und -patienten (Alnajar et al., 2024) sowie Reoperationen (Pfanmüller et al., 2012; Ricci et al., 2014) könnten von einem minimalinvasiven Zugang profitieren. Vor diesem Hintergrund wurde in der hier vorgelegten Studie gezielt der Einfluss unterschiedlicher Zugangswege bei isolierten sowie kombinierten Eingriffen an der Trikuspidalklappe auf die klinischen Ergebnisse untersucht. Die Eingriffe erfolgten entweder über eine mediane Sternotomie (Sternotomie-Gruppe, N = 152) oder minimalinvasiv über eine Minithorakotomie rechts (MIC-Gruppe, N = 28). Aufgrund der unterschiedlichen Gruppengrößen in der Gesamtpopulation (N = 180) wurde eine PSM-Analyse durchgeführt, um die Ergebnisse zwischen den beiden Zugangsarten möglichst präzise zu vergleichen. Die Grundlage für das Propensity-Score-Matching bildeten die Variablen Alter, Geschlecht, BMI und EuroSCORE II. Dank dieser Methode war es möglich, je 24 Patientinnen und Patienten aus der Sternotomie-Gruppe sowie der MIC-Gruppe auf Grundlage ähnlicher präoperativer Merkmale einander gegenüberzustellen. Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile der beiden Zugangswege sowie die Ergebnisse der hier vorgelegten Studie ausführlich erörtert. Die aufgeführten Vergleiche beziehen sich, sofern nicht ausdrücklich auf die Gesamtpopulation verwiesen wird, auf die Gruppen der PSM-Analyse.

## 4.2 Operative Zeiten

Ein Aspekt in der hier vorgelegten Studie war der Vergleich der Operationszeiten zwischen minimalinvasiven Eingriffen und den konventionellen Eingriffen. In diesem Zusammenhang wurden die Gesamtdauer der Operation sowie die HLM- und Aortenklammzeit berücksichtigt, da diese Parameter in der Literatur häufig als mögliche Einflussfaktoren für intra- und postoperative Komplikationen diskutiert werden (Abdelbar et al., 2020; Rustum et al., 2017). Insbesondere bestehen Zusammenhänge zwischen langen kardiopulmonalen HLM-Zeiten und schweren intra- und postoperativen Komplikationen sowie einer höheren Sterblichkeit (Rustum et al., 2017). Obwohl die HLM- und Klemmzeiten bei minimalinvasiven Verfahren oft länger sind, wie von Qiu et al. (2018) für Mitralklappenoperationen beschrieben, wurden dennoch vergleichbare postoperative Ergebnisse erzielt. Auch Abdelbar et al. (2020) sowie Paparella et al. (2020, 2022) führten ähnliche Beobachtungen durch und fanden keinen negativen Einfluss längerer Zeiten bei minimalinvasiven Eingriffen auf die Ergebnisse. Dagegen berichteten Lin et al. (2023) von kürzeren HLM- und Aortenklammzeiten sowie einer reduzierten Gesamtdauer bei thorakoskopischen Trikuspidalklappenrekonstruktionen im Vergleich zu konventionellen Verfahren. Zu beachten ist allerdings auch, dass die Operationszeiten von verschiedenen Faktoren abhängen können, wie etwa von der verwendeten Technik, dem operativen Setting und nicht zuletzt der Auswahl der Patientinnen- und Patienten.

Die Ergebnisse der hier vorgelegten Studie sind weitgehend mit den Erkenntnissen der Fachliteratur konsistent. Die MIC-Gruppe wies in der Gesamtpopulation im Vergleich zur Sternotomie-Gruppe kürzere Operationszeiten ( $4,61 \pm 2,16$  h vs.  $6,05 \pm 1,75$  h), HLM-Zeiten ( $143,68 \pm 93,05$  min vs.  $176,20 \pm 72,26$  min) und Aortenklammzeiten ( $50,71 \pm 64,80$  min vs.  $109,31 \pm 64,59$  min) auf. Die Unterschiede können wahrscheinlich durch Art und Anzahl der Eingriffe in den Gruppen erklärt werden. Bei den Patientinnen und Patienten der Sternotomie-Gruppe wurden bei 74 % zusätzliche Mitralklappeninterventionen durchgeführt, zudem erhielten einige auch Myokardrevaskularisationen oder Aortenklappenoperationen. Bei der MIC-Gruppe

wurden hingegen keine Myokardrevaskularisationen oder Aortenklappenoperationen vorgenommen, und der Anteil der Mitralklappenoperationen betrug lediglich 43 %.

Die PSM-Analyse zeigte dagegen keine bedeutenden Unterschiede zwischen den Gruppen. Die OP-Dauer (OR = 1,28 [95 %-KI: 0,91; 1,79]), HLM-Zeit (OR = 1,00 [95 %-KI: 0,99; 1,01]) und Aortenklemmzeit (OR = 1,01 [95 %-KI: 1,00; 1,02]) waren in der PSM-Analyse ausgeglichen, was darauf hindeutet, dass die Unterschiede in der Gesamtpopulation hauptsächlich durch die unterschiedliche Komplexität der durchgeführten Eingriffe bedingt waren. Diese Ergebnisse betonen die Bedeutung einer sorgfältigen Patientinnen- und Patientenselektion und zeigen, dass minimalinvasive Techniken hinsichtlich der Operationszeiten nicht unbedingt nachteilig sind, wenn vergleichbare Bedingungen gegeben sind.

Die Beatmungsdauer ist ein weiterer Aspekt, der in dieser Arbeit betrachtet wurde. In der Gesamtpopulation war die durchschnittliche Beatmungsdauer in der Sternotomie-Gruppe kürzer ( $32,03 \pm 45,16$  h) als in der MIC-Gruppe ( $58,18 \pm 106,55$  h). Dieser Unterschied lässt darauf schließen, dass in der MIC-Gruppe mehr Personen mit längerer Beatmungszeit vertreten waren, was möglicherweise auf komplexere postoperative Verläufe oder individuelle Unterschiede in der Patientinnen- und Patientenpopulation hindeuten könnte. Die Durchführung der PSM-Analyse ergab, dass die Beatmungsdauer in der MIC-Gruppe ( $63,12 \pm 111,88$  h) tendenziell länger war als in der Sternotomie-Gruppe ( $38,80 \pm 53,80$  h). Allerdings war dieser Unterschied nicht relevant ausgeprägt (OR = 1,00 [95 %-KI: 0,99; 1,01];  $p = 0,933$ ). Dies zeigt, dass die höhere Beatmungszeit in der MIC-Gruppe auch nach Angleichung der Gruppenvariablen nicht klar auf den Zugang selbst zurückzuführen ist, sondern möglicherweise durch andere Faktoren, wie individuelle postoperative Komplikationen oder präoperative Ausgangszustände, beeinflusst wird.

Die großen Standardabweichungen in beiden Gruppen und insbesondere in der MIC-Gruppe weisen auf eine erhebliche Streuung der Beatmungszeiten hin. Dies wird durch

das Vorliegen von Ausreißern verstärkt, insbesondere durch einzelne Patientinnen und Patienten in der MIC-Gruppe, die sehr lange Beatmungszeiten hatten. Ausreißer dieser Art können die statistische Analyse und die Gesamtdarstellung verzerren.

#### 4.3 Bluttransfusion und postoperative Versorgung

Ein weiterer wesentlicher Gegenstand in der hier vorgelegten Studie betraf die Unterschiede zwischen der Sternotomie- und der MIC-Gruppe im Hinblick auf den Bedarf an Bluttransfusionen sowie die postoperative Aufenthaltsdauer auf der Intensivstation und im Krankenhaus. Bluttransfusionen im Rahmen kardiochirurgischer Eingriffe sind mit einem erhöhten Risiko für postoperative Infektionen, Morbidität, Mortalität und einem längeren Klinikaufenthalt assoziiert (Murphy et al., 2007). Daher kommt der Vermeidung größerer Blutverluste und dem sparsamen Einsatz von EKs eine besondere Bedeutung zu.

In der Fachliteratur wird betont, dass minimalinvasive Zugänge wie die Minithorakotomie helfen können, das Risiko von intraoperativen Blutungen zu reduzieren und dadurch den Bedarf an Transfusionen zu verringern (Lin et al., 2023). Laut der Studie von Lin et al. (2023) ist ein thorakoskopisch durchgeführter Trikuspidalklappenersatz im Vergleich zur herkömmlichen Methode mit einem geringeren Blutverlust und einem reduzierten Drainagevolumen verbunden. Dadurch wurden Bluttransfusionen deutlich seltener angewandt. Außerdem waren die postoperativen Verweildauern auf der Intensivstation sowie im Krankenhaus insgesamt kürzer (Lin et al., 2023). Vergleichbare Ergebnisse wurden auch von Wang et al. (2018) berichtet, die den geringeren Blutverlust und Transfusionsbedarf bei minimalinvasiven Verfahren ebenfalls hervorhoben und diese mit kürzeren postoperativen Verweildauern in Verbindung brachten. Die Studien von Hanedan et al. (2017) und Maimaiti et al. (2017) bestätigten diese Beobachtungen, insbesondere bei isolierten Reoperationen, die über eine rechts anterolaterale Minithorakotomie durchgeführt wurden.

In der Gesamtpopulation der hier vorgelegten Studie konnte ein wahrnehmbarer Unterschied hinsichtlich des Transfusionsbedarfs festgestellt werden: In der MIC-Gruppe wurden im Durchschnitt  $3,64 \pm 4,85$  EKs benötigt, verglichen mit  $7,81 \pm 10,71$  EKs in der Sternotomie-Gruppe. Dieser Unterschied konnte jedoch nicht in eine eindeutige Verkürzung der Verweildauer auf der Intensivstation oder im Krankenhaus übersetzt werden. Obwohl die MIC-Gruppe tendenziell kürzere Verweildauern aufwies, waren diese Unterschiede nicht erheblich.

Die PSM-Analyse ergab ebenfalls keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Gruppen. Während in der MIC-Gruppe weniger Bluttransfusionen erforderlich waren (OR = 1,07 [95 %-KI: 0,98; 1,17]), blieben die Intensivstation- und Krankenhausaufenthaltsdauer vergleichbar. Diese Resultate stimmen mit den Erkenntnissen der PSM-Analyse von Paparella et al. (2022) überein, die ebenfalls keine relevanten Unterschiede in Bezug auf Aufenthaltsdauer und Transfusionsbedarf zwischen einer vollständigen Sternotomie und einem minimalinvasiven Zugang feststellen konnte. Auf der anderen Seite demonstrierten Paparella et al. (2020) in einer PSM-Analyse von Mitralklappenoperationen, dass minimalinvasive Verfahren mit einem deutlich reduzierten Transfusionsbedarf verbunden waren, was den Ergebnissen von Lin et al. (2023) entspricht.

Das reduzierte Blutungsrisiko und den geringeren Bedarf an Bluttransfusionen wird auf die geringere Invasivität der Minithorakotomie zurückgeführt (Wang et al., 2018). Zudem wird dies häufig mit kürzeren Operations- und HLM-Zeiten sowie einer insgesamt schnelleren postoperativen Erholung in Verbindung gebracht (Lin et al., 2023; Wang et al., 2018). Die Ergebnisse der hier vorgelegten Studie zeigten ebenfalls einen niedrigeren Bluttransfusionsbedarf in der MIC-Gruppe. Jedoch spiegelte sich dies nicht in merklich verkürzten Aufenthaltszeiten wider, was darauf hindeutet, dass zusätzliche Faktoren, wie die Art der kombinierten Eingriffe oder personenbezogene Parameter, eine wichtige Rolle spielen. Des Weiteren unterstreichen diese Ergebnisse, dass minimalinvasive Verfahren das Potenzial haben, den Blutverlust und den Bedarf an Bluttransfusionen zu reduzieren. Gleichzeitig zeigt sich, dass diese Vorteile nicht immer unmittelbar mit einer bedeutend

kürzeren postoperativen Verweildauer in Zusammenhang stehen. Die genauen Vorteile minimalinvasiver Ansätze sollten daher weiterhin vor dem Hintergrund der individuellen Charakteristika der Patientinnen und Patienten und des Operationsumfeldes untersucht werden.

#### 4.4 Mortalitätsraten

Die Mortalitätsraten in der hier vorgelegten Studie liefern wichtige Einblicke in die Ergebnisse der TKC in Bezug auf die präoperativen Eigenschaften der Patientinnen und Patienten und den chirurgischen Zugang. In der Gesamtpopulation waren die Mortalitätsrate im Krankenhaus (13 % vs. 7 %) und die 30-Tage-Mortalität (9 % vs. 4 %) in der Sternotomie-Gruppe höher als in der MIC-Gruppe. Dies könnte darauf hindeuten, dass die MIC mit einem gewissen Vorteil hinsichtlich der kurzfristigen Überlebensraten verbunden ist. Auch nach Adjustierung der Gruppen durch Propensity-Score-Matching waren die Mortalitätsraten in der MIC-Gruppe weiterhin niedriger. Allerdings waren die Unterschiede statistisch nicht ausgeprägt: Krankenhausmortalität (13 % vs. 8%; OR = 1,50 [95 %-KI: 0,25; 8,98]) und 30-Tage-Mortalität (13 % vs. 4 %; OR = 3,00 [95 %-KI: 0,31; 28,84]). Die Unterschiede in der Gesamtpopulation könnten möglicherweise auf ungleich verteilte präoperative Risikofaktoren zurückzuführen sein, die in der PSM-Analyse besser ausgeglichen wurden, sodass statistisch beide Gruppen vergleichbar waren. Die Todesursachen in den PSM-Gruppen waren vorwiegend auf schwerwiegende postoperative Komplikationen und präexistierende Multisystemerkrankungen zurückzuführen. In der Sternotomie-Gruppe waren Multiorganversagen, schwere kardiopulmonale Dekompensation und hämorrhagischer Schock die Hauptursachen. Ähnlich war in der MIC-Gruppe Multiorganversagen, häufig begleitet von hämodynamischer und pulmonaler Dekompensation sowie terminaler Niereninsuffizienz, die führende Todesursache.

In der PSM-Analyse war der EuroSCORE II, ein anerkannter prädiktiver Marker für das perioperative Mortalitätsrisiko, in der MIC-Gruppe höher ( $5,98 \pm 5,26$  %) als in der

Sternotomie-Gruppe ( $4,26 \pm 3,50$  %). Dies weist darauf hin, dass die Patientinnen und Patienten der MIC-Gruppe präoperativ ein höheres operatives Risiko hatten. Trotz dieses höheren Risikos zeigte die MIC-Gruppe dennoch tendenziell niedrigere Mortalitätsraten, was für die Effektivität und Sicherheit des minimalinvasiven Zugangs sprechen könnte. In beiden Gruppen war die NYHA-Klasse 3 oder 4 stark vertreten (71 % in der Sternotomie-Gruppe, 75 % in der MIC-Gruppe), was den Schweregrad der Herzinsuffizienz vor der Operation verdeutlicht und das generelle Risiko für beide Gruppen erhöht. Die Sternotomie-Gruppe umfasste mehr Personen mit zusätzlichen Eingriffen, wie einer Mitralklappenrekonstruktion oder einem -ersatz (67 % vs. 50 %). Diese komplexeren Operationen könnten einen Einfluss auf die höheren Mortalitätsraten in dieser Gruppe gehabt haben.

Die Ergebnisse der hier vorgelegten Studie, die auf niedrige Mortalitätsraten in der MIC-Gruppe hinweisen, stehen im Einklang mit einer Reihe anderer Studien, die ebenfalls Vorteile der minimalinvasiven Technik beschreiben. Abdelbar et al. (2020) fanden bei isolierten Trikuspidalklappenoperationen über minimalinvasive Zugänge eine 30-Tage-Mortalität von 4,1 %, was mit der adjustierten MIC-Gruppe (4 %) der hier vorgelegten Studie übereinstimmt. Sie stellten außerdem fest, dass diese Rate niedriger ist als bei Sternotomie-Verfahren in der Literatur (Abdelbar et al., 2020). Dies stimmt mit den Beobachtungen der hier vorgelegten Studie überein, dass minimalinvasive Zugänge mit einer niedrigen Mortalitätsrate verbunden sind. Pfannmüller et al. (2012) berichteten bei minimalinvasiven Trikuspidalklappenoperationen ebenfalls über eine niedrige Mortalitätsrate (4,2 %), auch wenn alle Patientinnen und Patienten bereits voroperiert waren. Diese Ergebnisse unterstreichen die Sicherheit minimalinvasiver Techniken selbst in komplexeren Fällen wie Reoperationen. Dieser These schließen sich die Studien von Wang et al. (2018) und Lin et al. (2023) an. Wang et al. (2018) untersuchten Trikuspidalklappen-/Mitralklappen-Reoperationen und berichteten über eine Krankenhausmortalität von 11,9 % in der Sternotomie-Gruppe im Vergleich zu 7,1 % in der MIC-Gruppe. Lin et al. (2023) analysierten vollständig thorakoskopische Trikuspidalklappenersatzverfahren bei Patientinnen und Patienten nach vorhergehenden Linksherzoperationen und berichteten über eine Krankenhausmortalität von 8 %. Diese

Ergebnisse sind ebenfalls vergleichbar mit den in der hier vorgelegten Studie beobachteten Trends, die ebenfalls niedrige Mortalitätsraten in der MIC-Gruppe zeigten.

Bei ihrer Untersuchung der minimalinvasiven TKC bei Hochrisikopatientinnen und -patienten berichteten Ricci et al. (2014) von einer Gesamtmortalitätsrate im Krankenhaus von 7,8 %, die als Tod vor der Entlassung oder innerhalb von 30 Tagen nach der Operation definiert ist. Die Rate stimmt weitgehend mit der von uns beobachteten Krankenhausmortalitätsrate von 8 % in der MIC-Gruppe überein.

Maimaiti et al. (2017) beobachteten Mortalitätsraten von 5 % in beiden Gruppen (minimalinvasiver Zugang und Sternotomie) und fanden keine eindeutigen Unterschiede zwischen den Zugängen und postoperativen Komplikationen. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den Resultaten der hier vorgelegten PSM-Analyse sowie mit der von Paparella et al. (2022), bei der die Mortalitätsunterschiede ebenfalls statistisch nicht von Bedeutung waren. Allerdings zeigte die Untersuchung von Paparella et al. (2022), dass die tatsächliche Sterblichkeit in der Sternotomie-Gruppe vor dem Matching trotz eines höheren präoperativen Risikos deutlich unter den durch den EuroSCORE II geschätzten Werten lag ( $p < 0,001$ ). Auch in der MIC-Gruppe war dies in geringerem Maß zu beobachten ( $p = 0,208$ ). Infolge des durchgeführten Matchings wiesen beide Gruppen keine wesentlichen Unterschiede zwischen der beobachteten Mortalität und den EuroSCORE-II-Vorhersagen auf (Paparella et al., 2022). Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass sowohl die Sternotomie als auch die minimalinvasive Technik sichere operative Strategien sind.

In der Studie von Chen et al. (2020) zeigte sich, dass die Einführung der minimalinvasiven Technik über die Jahre zu einer erheblichen Reduktion der Mortalitätsrate führte (von 23,3 % auf 3,4 %,  $p < 0,001$ ). Dies unterstreicht die Relevanz der chirurgischen Erfahrung hinsichtlich des operativen Zugangs für die Verbesserung der Ergebnisse. Alnajar et al. (2024) bestätigten diese positiven Entwicklungen mit ihrer retrospektiven Studie der minimalinvasiven isolierten TKC, die eine Krankenhausmortalität von 4 % und eine 30-

Tage-Mortalitätsrate von 6 % ergab. Diese Werte sind vergleichbar mit den Beobachtungen anderer Studien, wie beispielsweise Wang et al. (2018) und Lin et al. (2023), die ebenfalls auf eine reduzierte Mortalität bei minimalinvasiven Ansätzen hinwiesen. Die Ergebnisse der hier vorgelegten Studie spiegeln diesen positiven Trend wider, auch wenn die Unterschiede nach Propensity-Score-Matching geringer ausfielen und im statistischen Vergleich nicht ins Gewicht fallen. Die Interpretation der Mortalitätsraten sollte daher immer im Kontext der Patientinnen- und Patientenselektion, des präoperativen Risikos (z.B. EuroSCORE II) und der Komplexität und des Ausmaßes der Eingriffe erfolgen.

#### 4.5 Echokardiographische Ergebnisse

Die Analyse der echokardiographischen Parameter zeigt, dass die LVEF sowohl prä- als auch postoperativ in den adjustierten Gruppen vergleichbar war. Der durchschnittliche präoperative Wert lag bei  $56,90 \% \pm 9,09 \%$ , und postoperativ zeigte sich mit  $56,88 \% \pm 10,95 \%$  keine bedeutende Veränderung. Dies deutet darauf hin, dass die linksventrikuläre Funktion durch die Eingriffe nicht wesentlich beeinträchtigt wurde. Die Ergebnisse von Lin et al. (2023) zeigten ebenfalls prä- und postoperativ vergleichbare Werte für die LVEF ( $55,02 \pm 5,42 \%$  vs.  $54,23 \pm 5,42 \%$ ) ohne wesentliche Unterschiede zwischen der minimalinvasiven Technik und dem Sternotomie-Verfahren. Dies bestätigt, dass sowohl minimalinvasive als auch konventionelle Verfahren die linksventrikuläre Funktion weitgehend erhalten können, unabhängig vom chirurgischen Zugang. Maimaiti et al. (2017) beobachteten eine präoperativ niedrigere LVEF in der Minithorakotomie-Gruppe im Vergleich zur Sternotomie-Gruppe ( $p < 0,05$ ). Trotz dieser Ausgangsbedingungen erreichten beide Gruppen ähnliche postoperative Ergebnisse (Maimaiti et al., 2017). Dies unterstreicht, dass auch bei eingeschränkter linksventrikulärer Funktion der minimalinvasive Ansatz nicht zwangsläufig zu schlechteren Ergebnissen führt, sondern eine gleichwertige Alternative darstellen kann (Maimaiti et al., 2017).

Die TAPSE war präoperativ in der MIC-Gruppe der hier vorgelegten Studie leicht höher, jedoch ohne nennenswerten Unterschied zur Sternotomie-Gruppe: OR = 0,82 [95 %-KI: 0,60; 1,12]. Der durchschnittliche Wert in der Gesamtpopulation der PSM-Analyse lag bei  $20,28 \pm 4,24$  mm. Postoperativ zeigte sich jedoch ein Abfall der TAPSE auf  $14,61 \pm 4,25$  mm in der gesamten Matching-Kohorte, wobei zwischen den Gruppen erneut kein relevanter Unterschied bestand (OR = 0,99 [95 %-KI: 0,85; 1,16]). Der Abfall der TAPSE postoperativ weist auf eine vorübergehende Einschränkung der RV-Funktion hin, die als normale Reaktion auf die Operation und deren Belastungen interpretiert werden kann. Lin et al. (2023) berichteten von präoperativ niedrigeren TAPSE-Werten im Vergleich zu denen in der hier vorgelegten Studie. Allerdings ergab sich postoperativ eine deutliche Verbesserung der TAPSE, vor allem in der Thorakoskopie-Gruppe im Vergleich zur Sternotomie-Gruppe (Lin et al., 2023). Sie führten die schnellere Erholung der TAPSE in der MIC-Gruppe auf kürzere Operations- und HLM-Zeiten sowie auf die Möglichkeit zurück, das Herz während der Operation weiter schlagen zu lassen, anstatt es vorübergehend stillzulegen (Lin et al., 2023). Diese Faktoren könnten die myokardiale Belastung verringern und die Regeneration der RV-Funktion unterstützen (Lin et al., 2023). Die TAPSE ist ein entscheidenden Parameter zur Beurteilung der rechtsventrikulären Funktion (Sun et al., 2016). Durch die Kombination mit anderen echokardiographischen Parametern kann die TAPSE wertvolle Hinweise für die Prognose der Erkrankung und Bewertung der Therapie liefern (Sun et al., 2016).

Die hier vorgelegte Studie zeigt, dass sowohl die konventionelle Sternotomie als auch der minimalinvasive Zugang zu einer bedeutsamen Verbesserung des Schweregrads der TI führten. Die Verteilung der Schweregrade war vor der Intervention vergleichbar zwischen den Gruppen (OR = 0,37 [95 %-KI: 0,12; 1,11]). Präoperativ wiesen über 60 % der Patientinnen und Patienten in beiden Gruppen mindestens eine TI Grad 3 auf, was eine schwere Klappeninsuffizienz widerspiegelt. Dagegen war eine TI Grad 1 in keiner der Gruppen dokumentiert, da die Indikation zur operativen Behandlung erst bei einer gewissen Schwere der zugrunde liegenden Erkrankung besteht. Postoperativ erreichten sowohl in der Sternotomie-Gruppe als auch in der MIC-Gruppe jeweils 92 % der Personen eine TI Grad  $\leq 1$ . Diese Ergebnisse demonstrieren, dass sowohl die konventionelle

Sternotomie als auch die MIC eine effektive Reduktion des TI-Schweregrads ermöglichen. Die hohen Anteile an Personen ohne oder mit nur geringgradiger TI unterstreichen den therapeutischen Erfolg in beiden Gruppen. Der minimalinvasive Ansatz liefert vergleichbar gute Ergebnisse wie das Sternotomie-Verfahren, obwohl die MIC potenziell technisch anspruchsvoller ist.

Paparella et al. (2022) bestätigten in ihrer PSM-Analyse von 192 Personen mit Sternotomie-Zugang und 192 Personen mit minimalinvasivem Zugang ebenfalls die Effektivität beider Ansätze. Auch hier hatten die meisten Patientinnen und Patienten präoperativ eine moderate bis schwere TI. Postoperativ war die TI in beiden Gruppen deutlich reduziert, wobei bei der Entlassung nur noch zehn Personen eine moderate TI aufwiesen, sechs in der MIC-Gruppe und vier in der Sternotomie-Gruppe (Paparella et al., 2022). Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den Erkenntnissen der hier vorgelegten Studie und unterstützen die Schlussfolgerung, dass der minimalinvasive Zugang vergleichbare Ergebnisse wie die Sternotomie erzielen kann. Der nahezu gleiche Anteil an erfolgreichen Interventionen unterstreicht die Machbarkeit und Sicherheit des minimalinvasiven Verfahrens. Paparella et al. (2022) hoben hervor, dass beide Ansätze für die chirurgische Behandlung der TI als gleichwertig betrachtet werden können. Allerdings räumten die Autoren auch ein, dass ihre Studie aufgrund der Stichprobengröße möglicherweise nicht in der Lage ist, die potenziellen klinischen Vorteile der minimalinvasiven Technik im Vergleich zur konventionellen Sternotomie eindeutig zu belegen (Paparella et al., 2022). Dieser Punkt trifft auch auf die hier vorgelegte Studie zu und unterstreicht die Bedeutung weiterer Studien mit größeren Patientinnen- und Patientenkollektiven, um die Vorteile der MIC klar zu bestätigen.

Weitere Studien unterstützen die Erkenntnisse der hier vorgelegten Studie und beschreiben ähnliche therapeutische Erfolge nach der minimalinvasiven TKC. Alnajar et al. (2024) unterstrichen die eindeutigen Verbesserungen des TI-Schweregrads nach der TKC dadurch, dass die postoperative Reoperationsrate innerhalb des ersten Monats bei 0 % lag und erst nach ein bis zwei Jahren auf 7,3 % anstieg. Dies deutet darauf hin, dass Reoperationen eher mit anderen Faktoren wie hämodynamischer Verschlechterung oder

Begleiterkrankungen zusammenhängen könnten (Alnajar et al., 2024). Die Ergebnisse der adjustierten MIC-Gruppe der hier vorgelegten Studie stimmen mit dieser niedrigen Rate überein. In der retrospektiven Studie von Lee et al. (2009) wurde ebenfalls gezeigt, dass Patientinnen und Patienten mit moderater bis schwerer TI und Symptomen einer Rechtsherzinsuffizienz von der minimalinvasiven TKC profitierten. Ihre Ergebnisse wiesen auf eine nahezu vollständige Beseitigung der Regurgitation innerhalb eines Jahres nach der Operation hin (Lee et al., 2009). Dies deckt sich mit den hohen Anteilen an Personen mit TI Grad  $\leq 1$  in der hier vorgelegten Studie und zeigt, dass minimalinvasive Eingriffe eine effektive Behandlungsoption darstellen. Margari et al. (2021) beschrieben ebenfalls vielversprechende Ergebnisse für die minimalinvasive TKC. Während sich gelegentlich Rezidive einer klinisch relevanten TI zeigten, waren bei den meisten Patientinnen und Patienten auch sechs Jahre nach der Operation nur milde oder keine Insuffizienzen nachweisbar (Margari et al., 2021). Diese Ergebnisse unterstreichen die Nachhaltigkeit der operativen Behandlung. Pfannmüller et al. (2012) und Ricci et al. (2014) berichteten über ähnliche Ergebnisse in Bezug auf die Effektivität minimalinvasiver Trikuspidalklappeneingriffe. Beide Studien zeigten, dass die Mehrheit der Patientinnen und Patienten nach der Operation keine oder nur eine milde TI aufwies und die Freiheit von Reoperationen in vielen Fällen über mehrere Jahre hoch blieb (Pfannmüller et al., 2012; Ricci et al., 2014).

Die hier vorgelegte Studie weist mehrere Limitationen auf, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden sollten. Zunächst handelt es sich um eine retrospektive Single-Center-Analyse, die anfällig für Selektionseffekte ist. Sowohl die Patientinnen- und Patientenauswahl als auch die Wahl der Operationstechnik könnten zu Verzerrungen führen und schränken die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Bevölkerung ein. Ein weiterer wichtiger Punkt sind die Unterschiede in der Gruppengröße und der Art der Interventionen. In der Sternotomie-Gruppe wurden deutlich komplexere Eingriffe durchgeführt, was eine direkte Vergleichbarkeit erschwert. Zwar sollte die PSM-Analyse diesen Unterschieden entgegenwirken, jedoch führte sie zu sehr kleinen Stichprobengrößen und damit zu einer eingeschränkten statistischen Power. Darüber hinaus liegt der Schwerpunkt der hier vorgelegten Studie auf kurzfristigen postoperativen

Komplikationen. Langzeitdaten, die den nachhaltigen Effekt der TKC bewerten könnten, fehlen. Um die Evidenz zu verbessern, wären prospektive, multizentrische Studien mit längerer Nachbeobachtungszeit notwendig. Insbesondere randomisierte kontrollierte Studien (RCTs) könnten helfen, die langfristige Effektivität und Sicherheit minimalinvasiver sowie konventioneller Zugänge besser zu verstehen.

Insgesamt bestätigen die Daten aus der hier vorgelegten Studie und den genannten Publikationen, dass minimalinvasive Verfahren eine vergleichbare Effektivität und Sicherheit zur konventionellen Sternotomie bieten, insbesondere hinsichtlich der Reduktion des TI-Schweregrads und der Reoperationsraten. Die zunehmende Anzahl minimalinvasiver Eingriffe bekräftigt, dass kein erhöhtes Risiko für kurzfristige Mortalität und Morbidität besteht und deutet auf eine erfolgreiche Anwendung hin (Paparella et al., 2022). Die minimalinvasive Herzchirurgie bietet zahlreiche Vorteile, darunter reduzierter Blutverlust, reduziertes Drainagevolumen, kürzere Beatmungsdauer, geringere postoperative Schmerzen, schnellere Erholung durch das geringere operative Trauma und somit insgesamt kürzere Aufenthalte auf der Intensivstation und im Krankenhaus (Abdelbar et al., 2021; Hawkins et al., 2018; Lin et al., 2023; Qiu et al., 2018; Sakaguchi, 2016). Sternale Infektionen und Sternuminstabilität spielen bei der Minithorakotomie keine Rolle, was ebenfalls die postoperative Erholung begünstigt und eine schnellere Wiederaufnahme von Alltagsaktivitäten ermöglicht (Lin et al., 2023).

Schon Lee et al. (2009) beschrieben vor über einem Jahrzehnt eine unzureichende Datenlage zu minimalinvasiven Trikuspidalklappenoperationen. Nach Abdelbar et al. (2020) bestehe dies weiterhin, obwohl die positiven Ergebnisse der MIC im Vergleich zum Sternotomie-Verfahren überwiegen. Allerdings verwiesen sie auf die Notwendigkeit größerer multizentrischer Studien, um die Langzeitergebnisse zu evaluieren und damit die Vorteile der MIC weiter zu untermauern (Abdelbar et al., 2020). Auch heute fehlen prospektive, randomisierte Studien, die minimalinvasive Eingriffe mit der herkömmlichen Sternotomie vergleichen (Abdelbar et al., 2021).

Wie Alnajar et al. (2024) betonen, ist jedoch unabhängig vom Zugangsweg, Sternotomie oder minimalinvasiver Ansatz, ein wichtiger prognostischer Faktor der Zeitpunkt der Operation. Die Folgen einer fortgeschrittenen TI, beispielsweise RV-Dysfunktion und Endorganschäden wie Leber- und Niereninsuffizienz, erhöhen das operative Risiko (Abdelbar et al., 2021). Dies wird auch in den ESC/EACTS-Leitlinien (Vahanian et al., 2022) thematisiert. Sie empfehlen, dass eine chirurgische Behandlung der TI frühzeitig erfolgen sollte (Vahanian et al., 2022). Insbesondere wird eine Intervention bei moderater oder schwerer TI empfohlen, wenn sie in Kombination mit einer linksseitigen Herzoperation durchgeführt werden kann oder wenn Symptome sowie RV-Dysfunktion nachweisbar sind (Vahanian et al., 2022). Außerdem wird herausgestellt, dass eine isolierte chirurgische Behandlung der TI erwogen werden sollte, bevor es zu einer fortgeschrittenen RV-Dysfunktion oder einer schweren Symptomatik kommt (Vahanian et al., 2022).

Die Leitlinien heben hervor, dass ein proaktives Vorgehen entscheidend ist, um die Progression der Erkrankung zu verhindern und die postoperative Prognose zu verbessern (Otto et al., 2021; Vahanian et al., 2022). Die Ergebnisse der hier vorgelegten Studie und anderer Publikationen unterstreichen, dass minimalinvasive Ansätze nicht nur eine Alternative zur Sternotomie darstellen, sondern auch ein sicherer und effektiver Weg sind, um die chirurgische Behandlung der TI gemäß den Leitlinien zu realisieren.

## 5. Zusammenfassung

Diese Dissertation befasst sich mit einer explorativen, retrospektiven Untersuchung klinischer und echokardiographischer Parameter im Kontext der isolierten und kombinierten chirurgischen Behandlung der Trikuspidalklappe. Ziel ist es, die minimalinvasive Chirurgie (MIC) und die konventionelle Sternotomie hinsichtlich Wirksamkeit und Sicherheit zu vergleichen. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Untersuchung mit dem aktuellen Wissensstand aus der Fachliteratur verglichen und hinsichtlich ihrer Übereinstimmungen, Unterschiede und klinischen Relevanz diskutiert.

Untersuchungsgrundlage waren 180 Patientinnen und Patienten, die zwischen 2017 und 2021 in der Klinik für Herzchirurgie des Universitätsklinikums Bonn operiert wurden. Die Population wurde in eine Sternotomie-Gruppe (N = 152) und eine MIC-Gruppe (N = 28) unterteilt. Aufgrund der ungleichen Gruppenverteilung erfolgte eine Propensity-Score-Matching (PSM)-Analyse, bei der je 24 Patientinnen und Patienten auf Basis von Alter, Geschlecht, Body-Mass-Index und EuroSCORE II verglichen wurden. Beide Verfahren zeigten eine effektive Reduktion der Trikuspidalklappeninsuffizienz. Persistierende oder rezidivierende Fälle schwerer TI waren selten. Auch hinsichtlich linksventrikulärer Ejektionsfraktion und TAPSE zeigten sich keine relevanten Unterschiede. Für eine abschließende Bewertung möglicher Vorteile der MIC hinsichtlich rechtsventrikulärer Funktion sind jedoch langfristige Verlaufsdaten erforderlich. Die Ergebnisse stimmen mit den aktuellen Studien überein. So berichten Paparella et al. (2022) und Wang et al. (2018), dass die MIC bei kombinierten Mitral- und Trikuspidaleingriffen vergleichbare Ergebnisse wie die Sternotomie erzielt und zusätzliche Vorteile wie geringeren Blutverlust und kürzere Krankenhausaufenthalte bietet. Alnajar et al. (2024) und Margari et al. (2021) betonen die Bedeutung einer frühzeitigen chirurgischen Intervention, um irreversible Schäden wie rechtsventrikuläre Dysfunktion oder Endorganschäden zu vermeiden. Die aktuellen ACC/AHA- und ESC/EACTS-Leitlinien liefern klare Handlungsempfehlungen. Die ACC/AHA-Leitlinien verweisen neben medikamentösen Maßnahmen auch auf die Behandlung der zugrunde liegenden Erkrankungen, z. B. Rhythmuskontrolle bei Vorhofflimmern und Senkung des pulmonalen Gefäßwiderstands (Otto et al., 2021). Die

ESC/EACTS-Leitlinien betonen, dass die medikamentöse Therapie eine chirurgische oder transkatheterbasierte Intervention bei geeigneten Patientinnen und Patienten nicht ersetzen sollte (Vahanian et al., 2022). Eine frühe Operation bei schwerer TI im Rahmen einer Linksherzchirurgie wird klar empfohlen, um irreversible Folgeschäden und hohe Operationsrisiken zu vermeiden (Vahanian et al., 2022). Die individuelle Therapieplanung unter Berücksichtigung des Schweregrads und der Begleiterkrankungen bleibt dabei essenziell (Vahanian et al., 2022). Als Limitation ist die retrospektive Single-Center-Analyse mit möglicher Selektion zu nennen. Die PSM-Analyse mindert diese Verzerrung, schränkt jedoch die Fallzahl und statistische Aussagekraft ein.

Zusammenfassend zeigt diese Arbeit, dass die minimalinvasive Trikuspidalklappenchirurgie eine sichere und effiziente Alternative zur konventionellen Sternotomie darstellt. Zukünftige prospektive, multizentrische Studien mit längerer Nachbeobachtungszeit sind erforderlich, um die Ergebnisse zu untermauern und den nachhaltigen Nutzen minimalinvasiver Verfahren weiter zu untersuchen.

## 6. Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1: Blutkreislauf im Herzen  | 8  |
| Abbildung 2: Ausprägungsformen der Trikuspidalklappe  | 11 |
| Abbildung 3: Intraoperative Aufnahme von einer MIC-TKR mit Ring-Anuloplastie                          | 22 |
| Abbildung 4: Intraoperative Aufnahme von einer MIC-TKE mit<br>biologischer Prothese                   | 24 |
| Abbildung 5: Transösophageale Echokardiographie   | 32 |
| Abbildung 6: Operative Zugänge in der Herzchirurgie   | 34 |
| Abbildung 7: Rechtsseitiger anterolateraler Zugang für die Mitral- und<br>Trikuspidalklappenchirurgie | 37 |

## 7. Tabellenverzeichnis

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tabelle 1:  | Ätiologie der Trikuspidalklappeninsuffizienz  | 14 |
| Tabelle 2:  | Empfehlungen zur Trikuspidalklappenerkrankung nach den<br>ESC/EACTS-Leitlinien 2021                 | 18 |
| Tabelle 3:  | Übersicht der chirurgischen und interventionellen Techniken bei<br>Trikuspidalklappeninterventionen | 20 |
| Tabelle 4:  | Ausgewählte Kriterien zur Graduierung der<br>Trikuspidalklappeninsuffizienz                         | 33 |
| Tabelle 5:  | Präoperative Charakteristika der Gesamtpopulation   | 39 |
| Tabelle 6:  | Präoperative Verteilung der Klappenvitien in der Gesamtpopulation                                   | 41 |
| Tabelle 7:  | Präoperative Begleiterkrankungen und echokardiographische<br>Parameter der Gesamtpopulation         | 42 |
| Tabelle 8:  | Operative Interventionen der Gesamtpopulation   | 44 |
| Tabelle 9:  | Peri- und postoperative Daten der Gesamtpopulation  | 46 |
| Tabelle 10: | Postoperative echokardiographische Parameter der<br>Gesamtpopulation                                | 47 |
| Tabelle 11: | Präoperative Charakteristika der Matching-Analyse   | 48 |
| Tabelle 12: | Präoperative Verteilung der Klappenvitien in der Matching-Analyse                                   | 49 |
| Tabelle 13: | Präoperative Begleiterkrankungen und echokardiographische<br>Parameter der Matching-Analyse         | 50 |
| Tabelle 14: | Operative Interventionen der Matching-Analyse   | 52 |
| Tabelle 15: | Peri- und postoperative Daten der Matching-Analyse  | 54 |
| Tabelle 16: | Postoperative echokardiographische Parameter der<br>Matching-Analyse                                | 55 |

## 8. Literaturverzeichnis

Abdelbar A, Kenawy A, Zacharias J. Minimally invasive tricuspid valve surgery. *J Thorac Dis* 2021; 13: 1982–1992

Abdelbar A, Niranjana G, Tynnson C, Saravanan P, Knowles A, Laskowski G, Zacharias J. Endoscopic Tricuspid Valve Surgery is a Safe and Effective Option. *Innovations (Phila)* 2020; 15: 66–73

Alnajjar A, Chatterjee S, Olive JK, Kaymakci MS, Gray L, Gray Z, Breda JR, Lamelas J. Outcomes of minimally invasive isolated tricuspid valve repair and replacement through right mini-thoracotomy. *JTCVS open* 2024; 17: 98–110

Arsalan M, Walther T, Smith RL2, Grayburn PA. Tricuspid regurgitation diagnosis and treatment. *Eur Heart J* 2017; 38: 634–638

Baumgartner H, Hung J, Bermejo J, Chambers JB, Evangelista A, Griffin BP, Lung B, Otto CM, Pellikka PA, Quiñones M. Echocardiographic assessment of valve stenosis: EAE/ASE recommendations for clinical practice. *J Am Soc Echocardiogr* 2009; 22: 1-23; quiz 101-2

Beckhoff F, Alushi B, Jung C, Navarese E, Franz M, Kretzschmar D, Wernly B, Lichtenauer M, Lauten A. Tricuspid Regurgitation - Medical Management and Evolving Interventional Concepts. *Front Cardiovasc Med* 2018; 5: 49

Beckmann A, Meyer R, Eberhardt J, Gummert J, Falk V. German Heart Surgery Report 2023: The Annual Updated Registry of the German Society for Thoracic and Cardiovascular Surgery. *Thorac Cardiovasc Surg* 2024; 72: 329–345

Beckmann A, Meyer R, Lewandowski J, Markewitz A, Gummert J. German Heart Surgery Report 2019: The Annual Updated Registry of the German Society for Thoracic and Cardiovascular Surgery. *Thorac Cardiovasc Surg* 2020; 68: 263–276

Braunwald NS, Ross J, JR, Morrow AG. Conservative management of tricuspid regurgitation in patients undergoing mitral valve replacement. *Circulation* 1967; 35: 163-169

Brescia AA, Ward ST, Watt TMF, Rosenbloom LM, Baker M, Khan S, Ziese E, Romano MA, Bolling SF. Outcomes of Guideline-Directed Concomitant Annuloplasty for Functional Tricuspid Regurgitation. *Ann Thorac Surg* 2020; 109: 1227–1232

Chen J, Hu K, Ma W, Lv M, Shi Y, Liu J, Wei L, Lin Y, Hong T, Wang C. Isolated reoperation for tricuspid regurgitation after left-sided valve surgery: technique evolution. *Eur J Cardiothorac Surg* 2020; 57: 142–150

Condello F, Gitto M, Stefanini GG. Etiology, epidemiology, pathophysiology and management of tricuspid regurgitation: an overview. *Rev Cardiovasc Med* 2021; 22: 1115–1142

Färber G, Tkebuchava S, Dawson RS, Kirov H, Diab M, Schlattmann P, Doenst T. Minimally Invasive, Isolated Tricuspid Valve Redo Surgery: A Safety and Outcome Analysis. *Thorac Cardiovasc Surg* 2018; 66: 564–571

Filsoufi F, Anyanwu AC, Salzberg SP, Frankel T, Cohn LH, Adams DH. Long-term outcomes of tricuspid valve replacement in the current era. *Ann Thorac Surg* 2005; 80: 845–850

Fröjd V, Folino G, Jeppsson A, Dellgren G. Mortality after tricuspid valve procedures: A 27-year, single-center experience. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2021; 161: 1239-1248.e1

Gödecke A, Schrader J, Kelm M. Das Herz. In: Pape H-C, Kurtz A, Silbernagl S, Hrsg. *Physiologie*. Stuttgart: Thieme, 2023: 181–227

Haddad F, Doyle R, Murphy DJ, Hunt SA. Right ventricular function in cardiovascular disease, part II: pathophysiology, clinical importance, and management of right ventricular failure. *Circulation* 2008; 117: 1717–1731

Hahn RT, Badano LP, Bartko PE, Muraru D, Maisano F, Zamorano JL, Donal E. Tricuspid regurgitation: recent advances in understanding pathophysiology, severity grading and outcome. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2022; 23: 913–929

Hahn RT, Lawlor MK, Davidson CJ, ..., Hausleiter J. Tricuspid Valve Academic Research Consortium Definitions for Tricuspid Regurgitation and Trial Endpoints. *J Am Coll Cardiol* 2023; 82: 1711–1735

Hahn RT, Weckbach LT, Noack T, ..., Nabauer M. Proposal for a Standard Echocardiographic Tricuspid Valve Nomenclature. *JACC Cardiovasc Imaging* 2021; 14: 1299–1305

Hahn RT, Zamorano JL. The need for a new tricuspid regurgitation grading scheme. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2017; 18: 1342–1343

Hanedan MO, Çiçekçioğlu F, Aksöyek A, Diken Aİ, Ünal EU, Parlar Aİ, Katırcıoğlu SF. Tricuspid Valve Replacement Through Right Thoracotomy has Better Outcomes in Redo Cases. *Heart Lung Circ* 2017; 26: 88–93

Hawkins RB, Mehaffey JH, Kessel SM, Dahl JJ, Kron IL, Kern JA, Yarboro LT, Ailawadi G. Minimally invasive mitral valve surgery is associated with excellent resource utilization, cost, and outcomes. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2018; 156: 611-616.e3

Holzhey DM, Seeburger J, Misfeld M, Borger MA, Mohr FW. Learning minimally invasive mitral valve surgery: a cumulative sum sequential probability analysis of 3895 operations from a single high-volume center. *Circulation* 2013; 128: 483–491

Iscan ZH, Vural KM, Bahar I, Mavioglu L, Saritas A. What to expect after tricuspid valve replacement? Long-term results. *Eur J Cardiothorac Surg* 2007; 32: 296–300

Klocksın C, Nadal J, Bakhtiary F, Monsefi N. Postoperative Results of Patients Undergoing Minimally Invasive Tricuspid Valve Procedure. *Thorac Cardiovasc Surg*. 2026 Mar;74(2):129-140. doi: 10.1055/a-2749-9342. Epub 2025 Nov 19. PMID: 41260584

Lange R, Piazza N, Günther T. Tricuspid valve regurgitation: Indications and operative techniques. *Herz* 2017; 42: 653–661

Lee TC, Desai B, Glower DD. Results of 141 consecutive minimally invasive tricuspid valve operations: an 11-year experience. *Ann Thorac Surg* 2009; 88: 1845–1850

Lin Z, Xu Z, Chen X, Lin F, Chen L, Dai X. Safety and efficacy of total thoracoscopic surgery for patients with tricuspid regurgitation and reduced right ventricular function after left heart valves replacement: a retrospective comparative study. *BMC Cardiovasc Disord* 2023; 23: 400

Maimaiti A, Wei L, Yang Y, Liu H, Wang C. Benefits of a right anterolateral minithoracotomy rather than a median sternotomy in isolated tricuspid redo procedures. *J Thorac Dis* 2017; 9: 1281–1288

Mangoni AA, DiSalvo TG, Vlahakes GJ, Polanczyk CA, Fifer MA. Outcome following isolated tricuspid valve replacement. *Eur J Cardiothorac Surg* 2001; 19: 68–73

Margari V, Malvindi PG, Santis A de, Kounakis G, Visicchio G, Mastrototaro G, Dambruoso P, Carbone C, Paparella D. Minimally invasive tricuspid valve surgery without caval occlusion: Short and midterm results. *J Card Surg* 2021; 36: 618–623

Mohr F-W, Garbade J. Alternative Zugangswege und minimal-invasive Herzchirurgie. In: Haverich A, Ziemer G, Hrsg. *Herzchirurgie: Die Eingriffe am Herzen und an den herznahen Gefäßen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010: 665–690

Möllmann H, Bardeleben RS von, Dreger H, ..., Baldus S. Trikuspidalklappeninsuffizienz. *Kardiologie* 2022; 16: 372–382

Murphy GJ, Reeves BC, Rogers CA, Rizvi SIA, Culliford L, Angelini GD. Increased mortality, postoperative morbidity, and cost after red blood cell transfusion in patients having cardiac surgery. *Circulation* 2007; 116: 2544–2552

Neuhold S, Huelsmann M, Pernicka E, Graf A, Bonderman D, Adlbrecht C, Binder T, Maurer G, Pacher R, Mascherbauer J. Impact of tricuspid regurgitation on survival in patients with chronic heart failure: unexpected findings of a long-term observational study. *Eur Heart J* 2013; 34: 844–852

Offen S, Playford D, Strange G, Stewart S, Celermajer DS. Adverse Prognostic Impact of Even Mild or Moderate Tricuspid Regurgitation: Insights from the National Echocardiography Database of Australia. *J Am Soc Echocardiogr* 2022; 35: 810–817

Otto CM, Nishimura RA, Bonow RO, ..., Toly C. 2020 ACC/AHA Guideline for the Management of Patients With Valvular Heart Disease: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on Clinical Practice Guidelines. *Circulation* 2021; 143: e72-e227

Paparella D, Fattouch K, Moscarelli M, ..., Speziale G. Current trends in mitral valve surgery: A multicenter national comparison between full-sternotomy and minimally-invasive approach. *Int J Cardiol* 2020; 306: 147–151

Paparella D, Margari V, Santarpino G, ..., Speziale G. Comparison of a full sternotomy with a minimally invasive approach for concomitant mitral and tricuspid valve surgery. *Eur J Cardiothorac Surg* 2022; 62: ezac167

Pfannmüller B, Misfeld M, Borger MA, Etz CD, Funkat A-K, Garbade J, Mohr FW. Isolated reoperative minimally invasive tricuspid valve operations. *Ann Thorac Surg* 2012; 94: 2005–2010

Qiu Z, Chen X, Xu Y, Huang F, Xiao L, Yang T, Yin L. Does full sternotomy have more significant impact than the cardiopulmonary bypass time in patients of mitral valve surgery? *J Cardiothorac Surg* 2018; 13: 29

Rankin JS, Hammill BG, Ferguson TB, JR, Glower DD, O'Brien SM, DeLong ER, Peterson ED, Edwards FH. Determinants of operative mortality in valvular heart surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2006; 131: 547–557

Ricci D, Boffini M, Barbero C, El Qarra S, Marchetto G, Rinaldi M. Minimally invasive tricuspid valve surgery in patients at high risk. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2014; 147: 996–1001

Rieß F-C, Bleese N. Herz. In: Schumpelick V, Bleese N, Mommsen P, Hrsg. *Kurzlehrbuch Chirurgie*: Thieme, 2010: 523–557

Royal Papworth Hospital NHS Foundation Trust. 2023. about EuroSCORE. Verfügbar unter <https://euroscore.org/index.php?id=37&lang=en> (Zugriffsdatum: 23.11.2023)

Rustum S, Fleissner F, Beckmann E, Ius F, Wilhelmi M, Cebotari S, Haverich A, Ismail I. Is There an Upper Limit to Cardiopulmonary Bypass Times? *Annals of Circulation* 2017; 2: 3–7

Sakaguchi T. Minimally invasive mitral valve surgery through a right mini-thoracotomy. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* 2016; 64: 699–706

Schmitz F. Herz und Herzbeutel. In: Aumüller G, Aust G, Conrad A, ..., Wurzinger LJ, Hrsg. *Duale Reihe Anatomie*. Stuttgart: Thieme, 2020: 578–626

Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker K. Organe des Kreislaufsystems und ihre Leitungsbahnen. In: Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker K, Hrsg. Prometheus LernAtlas - Innere Organe. Stuttgart: Thieme, 2022: 96–137

Silaschi M, Treede H. Chirurgische Behandlung der Trikuspidalklappeninsuffizienz. CardioVasc 2020; 20: 31–34

Stähli BE, Lauten A. Trikuspidalklappenstenose. In: Lehnert H, Hrsg. DGIM Innere Medizin. Berlin, Heidelberg: Springer Reference Medizin, 2019: 1–7

Starck CT, Kempfert J, Falk V. Tricuspid valve interventions: surgical techniques and outcomes. EuroIntervention 2015; 11 Suppl W: W128-132

Steffel J, Lüscher TF. Herz-Kreislauf. Heidelberg: Springer-Verlag 2011

Sun X, Zhang H, Aike B, Yang S, Yang Z, Dong L, Wang F, Wang C. Tricuspid annular plane systolic excursion (TAPSE) can predict the outcome of isolated tricuspid valve surgery in patients with previous cardiac surgery? J Thorac Dis 2016; 8: 369–374

Topilsky Y, Khanna A, Le Tourneau T, Park S, Michelena H, Suri RM, Mahoney DW, Enriquez-Sarano M. Clinical Context and Mechanism of Functional Tricuspid Regurgitation in Patients With and Without Pulmonary Hypertension. Circ Cardiovasc Imaging 2012; 5: 314–323

Topilsky Y, Maltais S, Inojosa JM, Oguz D, Michelena H, Maalouf J, Mahoney DW, Enriquez-Sarano M. Burden of Tricuspid Regurgitation in Patients Diagnosed in the Community Setting. JACC Cardiovasc Imaging 2019; 12: 433–442

Tugtekin S-M, Schöne P, Alexiou K, Matschke K, Kappert U, Wilbring M. Aktuelle Weiterentwicklungen und Fortschritte in der Herzchirurgie. Kardiologie up2date 2023; 19: 229–243

Vahanian A, Beyersdorf F, Praz F, ..., ESC/EACTS Scientific Document Group. 2021 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease: Developed by the Task Force for the management of valvular heart disease of the European Society of Cardiology (ESC) and the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS). Eur Heart J 2022; 43: 561–632

Van Nooten GJ, Caes F, Taeymans Y, Van Belleghem Y, François K, Bacquer D de, Deuvaert FE, Wellens F, Primo G. Tricuspid valve replacement: postoperative and long-term results. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1995; 110: 672–679

Wahlers T, Strauch JT. Chirurgie der erworbenen AV-Klappen-Erkrankungen. In: Haverich A, Ziemer G, Hrsg. *Herzchirurgie: Die Eingriffe am Herzen und an den herznahen Gefäßen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010: 635–663

Wang N, Fulcher J, Abeysuriya N, McGrady M, Wilcox I, Celermajer D, Lal S. Tricuspid regurgitation is associated with increased mortality independent of pulmonary pressures and right heart failure: a systematic review and meta-analysis. *Eur Heart J* 2019; 40: 476–484

Wang Q, Xue X, Yang J, ..., Wang Z. Right mini-thoracotomy approach reduces hospital stay and transfusion of mitral or tricuspid valve reoperation with non-inferior efficacy: evidence from propensity-matched study. *J Thorac Dis* 2018; 10: 4789–4800

Weber M, Vogelhuber J, Öztürk C, Zimmer S. Interventionelle Therapie der Trikuspidalklappeninsuffizienz. *CardioVasc* 2020; 20: 35–38

Weiss T, Villadsen PR, Jensen JK, Lehnert P, Nielsen PH, Modrau IS. Outcomes of isolated tricuspid valve surgery in contemporary practice. *Eur J Cardiothorac Surg* 2022; 62: ezac077

World Health Organization. 2024. Noncommunicable diseases – Key facts. Verfügbar unter <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases> (Zugriffsdatum: 15.05.2025)

Young A, Goga U, Aktuerk D, Aziz Z, Cross S, Balan A. A radiologist's guide to median sternotomy. *Clin Radiol* 2024; 79: 33–40

Zoghbi WA, Adams D, Bonow RO, ..., Weissman NJ. Recommendations for Noninvasive Evaluation of Native Valvular Regurgitation: A Report from the American Society of Echocardiography Developed in Collaboration with the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance. *J Am Soc Echocardiogr* 2017; 30: 303–371

## 9. Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde in der Klinik für Herzchirurgie unter Betreuung von Prof. Dr. med. Farhad Bakhtiary durchgeführt. Die Planung der wissenschaftlichen Arbeit erfolgte unter meiner gleichzeitigen aktiven Mitwirkung in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. med. Nadejda Monsefi, Oberärztin der Klinik und Poliklinik für Herzchirurgie des Universitätsklinikums Bonn und Prof. Dr. med. Farhad Bakhtiary, Direktor der Klinik und Poliklinik für Herzchirurgie des Universitätsklinikums Bonn. Das zur Auswertung verwendete Datenmaterial stammte aus dem klinikinternen Krankenhaus-Informationssystem ORBIS, einschließlich Arztbriefen, OP-Berichten, Herz-Lungen-Maschinen-Protokollen (HLM), externen Behandlungsdokumentationen und Anästhesiezusammenfassungen. Die Aufarbeitung und das Zusammentragen der Daten in Excel-Tabellen führte ich selbstständig durch. Die statistische Auswertung erfolgte unter meiner aktiven Mitwirkung in Zusammenarbeit mit Jennifer Nadal, Mitarbeiterin des Instituts für Medizinische Biometrie, Informatik und Epidemiologie (IMBIE), und Prof. Dr. med. Nadejda Monsefi. Die deskriptiven Analysen wurden nach Einarbeitung durch Jennifer Nadal von mir eigenständig durchgeführt. Die Propensity-Score-Matching-Analyse sowie die Durchführung der konditionalen logistischen Regression fanden in Zusammenarbeit mit Jennifer Nadal statt. Die Interpretation der ausgewerteten Daten habe ich vorgenommen. Prof. Dr. med. Nadejda Monsefi und Prof. Dr. med. Farhad Bakhtiary haben an der Interpretation mitgewirkt.

Zur Optimierung der sprachlichen Klarheit und zur Formulierungshilfe einzelner Textpassagen nutzte ich ChatGPT (ein von OpenAI entwickeltes LLM). Nach der Verwendung dieses Tools habe ich die entsprechenden Passagen überprüft und bearbeitet. Inhaltliche Struktur, wissenschaftliche Argumentation sowie alle Analysen und Bewertungen wurden eigenständig von mir erarbeitet und liegen in meiner Verantwortung.

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

## 10. Veröffentlichung

Teile der Inhalte der vorliegenden Dissertationsschrift wurden bereits in der folgenden Publikation veröffentlicht:

Klocksinn C, Nadal J, Bakhtiary F, Monsefi N. Postoperative Results of Patients Undergoing Minimally Invasive Tricuspid Valve Procedure. *Thorac Cardiovasc Surg.* 2026 Mar;74(2):129-140. doi: 10.1055/a-2749-9342. Epub 2025 Nov 19. PMID: 41260584.

<https://doi.org/10.1055/a-2749-9342>

## 11. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich den Menschen danken, die zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Ich danke Prof. Dr. med. Farhad Bakhtiary für die Möglichkeit, meine Forschung im Rahmen seiner Klinik durchzuführen.

Mein besonderer Dank gilt meiner Betreuerin Prof. Dr. med. Nadejda Monsefi, die mich mit ihrer wissenschaftlichen Expertise und ihren Anregungen unterstützt hat. Durch ihr konstruktives Feedback und ihre fachliche Begleitung konnte diese Arbeit in ihrer vorliegenden Form entstehen.

Besonderer Dank gilt auch Jennifer Nadal am Institut für Medizinische Biometrie, Informatik und Epidemiologie in Bonn für die Zusammenarbeit, die Diskussionen und den fachlichen Austausch. Insbesondere möchte ich ihr danken für die Beratung, Anleitung und Unterstützung bei der statistischen Auswertung meiner Daten.

Auch meiner Familie und meinen Freundinnen danke ich für die Unterstützung und Geduld während der Promotionszeit.