

Aus der Klinik für Herzchirurgie  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf  
Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. A. Lichtenberg

**Eine einfache Formel zur Auswahl geeigneter Annuloplastieringe für  
die minimal-invasive Mitralklappenrekonstruktion**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin der Medizinischen Fakultät der  
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Chrysanthi Bountola

2022

---

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der  
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.:

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: Prof. Dr. med. Alexander Albert

Zweitgutachter: Priv.-Doz. Dr. med. Stephan Urs Sixt

---

Zu Ehren meiner geliebten Eltern,  
Aikaterinis Goutsiou und Antoniou Bountola

---

Teile dieser Arbeit wurden als Poster veröffentlicht:

Respect or Resect the Mitral Valve Leaflets in order to Reduce the Risk of Systolic Anterior Motion after Mitral Valve Repair? Raweh A., Bountola C., Mhanna E., Albert A., Poster P1488, 2021, 87. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie

Eine einfache Formel zur Auswahl geeigneter Annuloplastieringe für die minimal-invasive Mitralklappenrekonstruktion. Bountola C., Raweh A., Petrov G., Heitzer T., Aubin H., Albert A, Poster. 2022, Symposium der medRSD 2022

---

## Zusammenfassung

Die Mitralklappenrekonstruktion gewann in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung in der Mitralklappenchirurgie. Die Verwendung von Annuloplastierungen ist ein wichtiger Bestandteil der Mitralklappenrekonstruktion. Die Annuloplastie dient der Wiederherstellung der normalen systolischen Form und Größe des Mitralklappenannulus, welche eine wichtige Voraussetzung für eine optimale Segelkoaptation darstellt. Die Durchführung einer präoperativen Echokardiographie ist wichtig für die funktionelle Analyse der vorliegenden Pathologie und Anatomie der Mitralklappe sowie Planung der Mitralklappenrekonstruktion. Trotzdem gibt es keine einheitlichen Methoden zur Vermessung der Mitralklappe und Bestimmung der Größe sowie des Typus des Annuloplastieringes. Es gibt wenige Studien, in denen die verschiedenen Typen und Modelle der Annuloplastieringe verglichen wurden. Die Auswahl des Annuloplastieringes erfolgt auf Grundlage der vorliegenden Pathologie und nach persönlichen Erfahrungswerten der Herzchirurgen. Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine retrospektive Studie an 103 Patienten, die sich im Klinikum Dortmund im Zeitraum von 2018 bis 2021 einer Mitralklappenannuloplastie unterzogen haben. Im Rahmen dieser Studie erfolgte die Bestimmung der Länge des anterioren Mitralklappensegels (AML) im Segment 2, der Länge des posterioren Mitralklappensegels (PML) im Segment 2 und des interkommissuralen Abstandes in der uns vorliegenden echokardiographischen Datenbank. Diese einfachen echokardiographischen Parameter haben wir in Korrelation zur Größe des gewählten Annuloplastieringes gesetzt. Ziel dieses Vergleiches war eine einfache Formel zu erstellen, um die Größe des Annuloplastieringes aus den echokardiographischen Parametern errechnen zu können. Dies soll der standardisierten Anwendung chirurgischer Rekonstruktionstechniken dienen und für den individuellen Patienten die Haltbarkeit der Rekonstruktion optimieren sowie ein Wiederauftreten von Beschwerden und eine unnötige Re-Operation vermeiden.

## Summary

Mitral valve reconstruction has become increasingly important in mitral valve surgery in recent years. The use of annuloplasty rings is an important part of the mitral valve reconstruction. The annuloplasty ring is used to restore the normal systolic shape and size of the mitral valve annulus, which is an important prerequisite for optimal leaflet coaptation. Performing preoperative echocardiography is significant for the functional analysis of the present mitral valve pathology and anatomy, as well as for the planning of the mitral valve reconstruction. Nevertheless, there are no established methods for measuring the mitral valve and determining the size and type of the suitable annuloplasty ring. There are only a few studies that have compared the different types and models of annuloplasty rings. The annuloplasty ring selection is based on the present pathology and personal preferences of the cardiac surgeons. This is a retrospective study on 103 patients who underwent mitral valve annuloplasty at the cardiac surgery department in the Clinic of Dortmund between 2018 and 2021. For purposes of this study, we have analyzed echocardiographic parameters as regards the mitral valve with significant regurgitation from our database (the length of the anterior mitral valve leaflet (AML) in segment 2, the length of the posterior mitral valve leaflet (PML) in segment 2 and the intercommissural distance). Furthermore, we compared these simple echocardiographic parameters with the size of the chosen annuloplasty ring. The aim of this comparison was to create a simple formula to calculate the size of the suitable annuloplasty ring based on preoperative echocardiographic parameters. This should contribute to the standardized application of surgical reconstruction techniques and optimize the durability of the reconstruction for the individual patient and avoid recurrence of complaints and unnecessary reoperation.

## Abkürzungsverzeichnis

<b>2D</b>	2-dimensional
<b>3D</b>	3-dimensional
<b>4D</b>	4-dimensional
<b>A1</b>	Segment 1 des anterioren Mitralklappensegels
<b>A2</b>	Segment 2 des anterioren Mitralklappensegels
<b>A3</b>	Segment 3 des anterioren Mitralklappensegels
<b>Abb.</b>	Abbildung
<b>AC</b>	Anteriore Kommissur
<b>ACC</b>	<i>American College of Cardiology</i>
<b>AH</b>	Arterielle Hypertonie
<b>AHA</b>	<i>American Heart Association</i>
<b>AI</b>	Aortenklappeninsuffizienz
<b>AML</b>	Anteriorer Mitralklappensegel
<b>AMVOA</b>	<i>Anatomical Mitral Valve Orifice Area</i> = Anatomische Öffnungsfläche der Mitralklappe
<b>AP</b>	Anterior-Posterior
<b>BMI</b>	<i>Body Mass Index</i>
<b>BSA</b>	<i>Body Surface Area</i> = Körperoberfläche
<b>Bzw.</b>	Beziehungsweise
<b>Ca.</b>	Circa
<b>CC-Abstand</b>	Interkommissuraler Abstand
<b>CE</b>	<i>Conformité Européenne</i>
<b>COPD</b>	<i>Chronic Obstructive Pulmonary Disease</i>

<b>CPB</b>	<i>Cardiopulmonary Bypass</i>
<b>DGK</b>	Deutsche Gesellschaft für Kardiologie-, Herz- und Kreislaufforschung e.V.
<b>DGTHG</b>	Deutsche Gesellschaft für Thorax-, Herz- und Gefäßchirurgie e.V.
<b>DM</b>	Diabetes mellitus
<b>ECMO</b>	<i>Extracorporeal Membrane Oxygenation</i> = Extrakorporale Membranoxygenierung
<b>EF</b>	Ejektionsfraktion
<b>EROA</b>	<i>Effective Regurgitant Orifice Area</i> = Effektive Regurgitationsöffnungsfläche
<b>ESC</b>	<i>European Society of Cardiology</i> = Europäische Gesellschaft für Kardiologie
<b>ESC-HF-LT-R</b>	<i>European Society of Cardiology Herzinsuffizienz Long Term Registry</i> = Europäische Gesellschaft für Kardiologie Langzeit Register
<b>Et al.</b>	Und andere
<b>FDA</b>	<i>Food and Drug Administration</i>
<b>HF</b>	<i>Heart Failure</i> = Herzinsuffizienz
<b>HFrEF</b>	<i>Heart Failure with reduced Ejection Fraction</i> = Herzinsuffizienz mit hochgradig eingeschränkter linksventrikulärer Funktion
<b>HRST</b>	Herzrhythmusstörungen
<b>IABP</b>	<i>Intra-Aortic Ballon Pump</i> = Intraaortale Ballonpumpe
<b>ICD</b>	Implantierter Kardioverter-Defibrillator
<b>Inkl.</b>	Inklusive
<b>IT</b>	Intertrigonaler Abstand
<b>IVS</b>	Intraventrikuläres Septum
<b>KHK</b>	Koronare Herzerkrankung
<b>Koap-Höhe</b>	Koaptationshöhe = Koaptationslänge
<b>LA</b>	Linkes Atrium = Linker Vorhof

<b>LAA</b>	Linkes Vorhofohr
<b>LAE</b>	Lungenarterienembolie
<b>LV</b>	Linker Ventrikel
<b>LVEDV</b>	Linksventrikuläres enddiastolisches Volumen
<b>LVEF</b>	Linksventrikuläre Ejektionsfraktion
<b>LVESD</b>	Linksventrikulärer endsystolischer Diameter
<b>LVESV</b>	Linksventrikuläres endsystolisches Volumen
<b>MI</b>	Mitralklappeninsuffizienz
<b>Mind.</b>	Mindestens
<b>MK</b>	Mitralklappe
<b>MV</b>	<i>Mitral Valve</i> = Mitralklappe
<b>MV PG Max</b>	Maximaler Mitralklappengradient
<b>MV PG Mean</b>	Mittlerer Mitralklappengradient
<b>NYHA</b>	<i>New York Heart Association</i>
<b>P1</b>	Segment 1 des posterioren Mitralklappensegels
<b>P2</b>	Segment 2 des posterioren Mitralklappensegels
<b>P3</b>	Segment 3 des posterioren Mitralklappensegels
<b>PH</b>	Pulmonale Hypertonie
<b>PISA</b>	<i>Proximal Isovelocity Surface Area</i>
<b>PML</b>	Posteriores Mitralklappensegel
<b>PTFE</b>	Polytetrafluorethylene
<b>PWS</b>	Posteriore Wand
<b>Ring</b>	Annuloplastiering
<b>RF</b>	Regurgitationsfraktion

<b>RVOL</b>	Regurgitationsvolumen
<b>SAM</b>	<i>Systolic Anterior Motion</i>
<b>SM</b>	Schrittmacher
<b>TAPSE</b>	<i>Tricuspid Annular Plane Systolic Excursion</i>
<b>TEER</b>	Transkatheter Edge To Edge Rekonstruktion
<b>TI</b>	Trikuspidalklappeninsuffizienz
<b>U.a.</b>	Unter anderem
<b>VC</b>	Vena contracta
<b>Vs.</b>	Versus
<b>WHST</b>	Wundheilungsstörung
<b>Z.B.</b>	Zum Beispiel
<b>Z.n.</b>	Zustand nach

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung .....	- 1 -
1.1.	Die Mitralklappeninsuffizienz .....	- 1 -
1.1.1.	Definition der Mitralklappeninsuffizienz .....	- 1 -
1.1.2.	Epidemiologie der Mitralklappeninsuffizienz .....	- 1 -
1.1.3.	Anatomie der Mitralklappe .....	- 1 -
1.1.4.	Einteilung und Pathogenese der Mitralklappeninsuffizienz .....	- 3 -
1.1.5.	Echokardiographisch basierte Schweregradeinteilung der Mitralklappeninsuffizienz.....	- 5 -
1.2.	Therapieoptionen der Mitralklappeninsuffizienz .....	- 6 -
1.2.1.	Mitralklappenrekonstruktion .....	- 7 -
1.2.2.	Annuloplastie .....	- 8 -
1.2.3.	Echokardiographische Parameter für das <i>Sizing</i> .....	- 11 -
1.2.4.	Die Bedeutung des Verfahrens der Segelplastik ( <i>respect vs. resect</i> ) für die Auswahl des Annuloplastieringes .....	- 13 -
1.2.4.1.	Segelplastik .....	- 14 -
1.2.5.	Sehnenfadenersatz/-korrektur .....	- 19 -
1.2.6.	Kommissuroplastie .....	- 20 -
1.2.7.	Chirurgischer Mitralklappenersatz .....	- 21 -
1.2.8.	Interventionelle Therapieoptionen .....	- 21 -
1.3.	Mitralklappenchirurgie in Deutschland.....	- 24 -
1.4.	Arbeitshypothese.....	- 25 -
1.5.	Ziele der Arbeit .....	- 26 -
2.	Methode und Patientenauswahl .....	- 26 -
2.1.	Patientenselektion .....	- 26 -
2.2.	Datenerhebung .....	- 27 -
2.3.	Echokardiographie .....	- 33 -

2.4. Statistische Analyse .....	- 35 -
2.5. Ethikvotum.....	- 37 -
3. Ergebnisse.....	- 38 -
3.1. Präoperative Daten .....	- 38 -
3.1.1. Demographische Daten.....	- 38 -
3.1.2. Präoperative Symptomatik und Komorbidität .....	- 38 -
3.2. Intraoperative Daten.....	- 39 -
3.3. Postoperative Daten .....	- 40 -
3.4. Ergebnisse mit Anwendung der Formel.....	- 40 -
4. Diskussion .....	- 43 -
Literatur- und Quellenverzeichnis .....	- 46 -
Anhang.....	- 50 -
Abbildungsverzeichnis.....	- 51 -
Tabellenverzeichnis .....	- 52 -
Danksagung .....	- 54 -

# **1. Einleitung**

## **1.1. Die Mitralklappeninsuffizienz**

### **1.1.1. Definition der Mitralklappeninsuffizienz**

Als Mitralklappeninsuffizienz wird die Schlussunfähigkeit der Mitralklappe bezeichnet. Diese entsteht durch Veränderungen im Bereich des Klappenannulus, eines oder beider Segel, der Chordae tendineae oder der Papillarmuskeln.

Die Einteilung der chronischen Mitralklappeninsuffizienz in primäre und sekundäre Mitralklappeninsuffizienz, insbesondere hinsichtlich chirurgischer und katheterinterventioneller Behandlung, wird von der europäischen Gesellschaft für Kardiologie stark empfohlen [1].

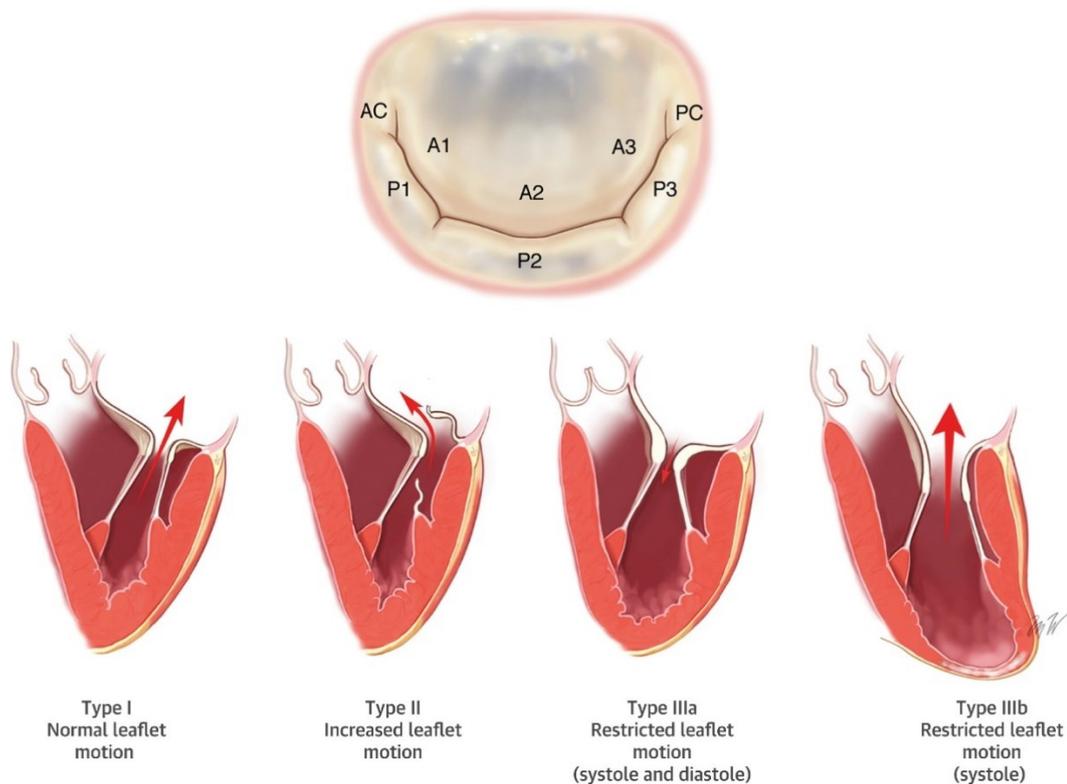
### **1.1.2. Epidemiologie der Mitralklappeninsuffizienz**

Die Mitralklappeninsuffizienz ist nach der Aortenklappenstenose das zweithäufigste Herzklappenitium in Europa [2, 3]. Die Inzidenz und Prävalenz der Mitralklappeninsuffizienz nehmen nach dem 65. Lebensjahr deutlich zu [4]. In der Gruppe der über 75-Jährigen wird bei Männern ein Anteil von bis zu 10 % mit signifikanter Mitralklappeninsuffizienz in der allgemeinen Bevölkerung angegeben [4]. Aus dem Herzinsuffizienz-Register der europäischen Gesellschaft für Kardiologie (ESC-HF-LT-Registry) ergibt sich, dass eine sekundäre mittel- bis hochgradige Mitralklappeninsuffizienz in ca. 36% der Patienten mit hochgradig eingeschränkter linksventrikulärer Funktion (HFrEF) vorliegt [5].

### **1.1.3. Anatomie der Mitralklappe**

Die Mitralklappe ist bikuspid und besteht aus einem anterioren bzw. vorderen sowie einem posterioren bzw. hinteren Segel, dem Annulus, den Chordae tendineae (oder Sehnenfäden) und den Papillarmuskeln. Sowohl das anteriore Mitralklappensegel (AML) als auch das posteriore Mitralklappensegel (PML) werden anatomisch in 3 Segmente (A1,

A2, A3, P1, P2, P3) unterteilt (Abb. 1). Diese Segmente sind unterschiedlich groß. Das mittlere ist das längste und größte Segment. Die anteriore (AC) und posteriore Kommissur (PC) trennen beide Segel (Abb. 1). Der Mitralklappenannulus wird in verschiedenen Arbeiten [6, 7] als sattelförmig beschrieben und weicht in der Systole etwa  $1,4 \pm 0,3$  cm von der planaren Ebene ab [8]. Der linke Ventrikel mit den Papillarmuskeln und Chordae tendineae wird als subvalvulärer Apparat bezeichnet.



**Abb. 1: Einteilung der Mitralklappeninsuffizienz nach Carpentier**

(oben) Das mittlere Segment des posterioren Segels (PML) wird als P2 bezeichnet. Die angrenzenden lateralen und posterioren Segmente sind als P1 und P3 bezeichnet. Die gegenüberliegenden Segmente des anterioren Segels (AML) werden als A1, A2 und A3 bezeichnet. Die ‚AC‘ und ‚PC‘ repräsentieren die anteriore (AC) und posteriore (PC) Kommissuren.

(unten) Segeldysfunktion (Carpentier Typ I, Typ II, Typ III) wird auf der Grundlage der Bewegung des freien Randes des Segels in Bezug auf die Ringebene klassifiziert.

Stone et al. [9]

mit freundlicher Genehmigung der Oxford University Press

Die Mitralklappe trennt als atrioventrikuläre Klappe das linke Atrium (LA) vom linken Ventrikel (LV) und wirkt als Ventil. Während der Systole bleibt die Mitralklappe

geschlossen und verhindert einen retrograden Blutfluss in das linke Atrium. Während der Diastole öffnet sich die Mitralklappe und ermöglicht den antegraden Fluss des oxygenierten Blutes aus dem linken Atrium in den linken Ventrikel. Eine normale Funktion der Mitralklappe erfordert die präzise und koordinierte Zusammenarbeit beider Mitralklappensegel, des Mitralklappenannulus, des subvalvulären Klappenapparates (Sehnenfäden und Papillarmuskel) und des linken Ventrikels [10]. Jede Dysfunktion an einer dieser Komponenten kann zu einer Mitralklappeninsuffizienz führen. Eine ausreichende Koaptation beider Mitralklappensegel ist für die Kompetenz der Mitralklappe von großer Bedeutung.

#### **1.1.4. Einteilung und Pathogenese der Mitralklappeninsuffizienz**

Zahlreiche Erkrankungen können die normalen anatomischen Eigenschaften der Mitralklappe beeinflussen und zur Mitralklappeninsuffizienz führen. Die primäre oder degenerative chronische Mitralklappeninsuffizienz resultiert aus einer oder mehrerer intrinsischer Veränderungen der Mitralklappe (Segel, Chordae tendineae, Papillarmuskel). Die sekundäre oder funktionelle chronische Mitralklappeninsuffizienz resultiert aus dem Remodelling der dilatierten linksseitigen Herzhöhlen (bzw. des linken Ventrikels und des linken Vorhofs) mit konsekutiver Dilatation des Mitralklappenannulus.

Diese Einteilung wird häufig mit der funktionellen Carpentier-Klassifikation kombiniert [11, 12]. Carpentier's [12] pathophysiologische Trias basiert auf den folgenden Prinzipien:

- 1.) Erkennung der vorliegenden Ätiologie (Ursache der Erkrankung),
- 2.) Erkennung der Klappen-Läsionen als Folge der vorliegenden Erkrankung und
- 3.) Erkennung der Klappen-Dysfunktion als Folge der Läsionen. Die funktionelle Klassifikation nach Carpentier [12] basiert auf der echokardiographischen oder direkten chirurgischen Beurteilung der Segelbewegung (Tabelle 1):

Typ I: Mitralklappeninsuffizienz mit normaler Segelbewegung. Diese ist infolge einer fehlenden Segelkoaptation aufgrund einer Dilatation des Mitralklappenannulus oder einer Segelperforation, eines Segelabrisses bzw. einer Segelvegetation.

Typ II: Mitralklappeninsuffizienz mit übermäßiger/exzessiver Segelbewegung: ‚Segelprolaps‘. Dieser entspricht der systolischen Vorwölbung eines oder beider Mitralklappensegel. Ein Segelprolaps kann durch eine Ruptur oder Elongation der Sehnenfäden oder des Papillarmuskels entstehen.

Typ III: Mitralklappeninsuffizienz mit eingeschränkter Segelbewegung: Restriktion des Mitralklappensegels. Die Bewegung eines oder beider Mitralklappensegel ist primär während der Diastole (Typ IIIa) oder während der Systole (Typ IIIb) eingeschränkt. Die Mitralklappeninsuffizienz vom Typ IIIa wird hauptsächlich durch eine rheumatische Klappenerkrankung verursacht. Die Mitralklappeninsuffizienz vom Typ IIIb wird durch pathologischen Zug auf den Klappenapparat mit Verhinderung einer ausreichenden Segelkoaptation verursacht.

<b>Tabelle 1: Ursachen und Mechanismen der Mitralklappeninsuffizienz</b>				
	<b>Primär (degenerativ bzw. organisch)</b>			<b>Sekundär (funktionell)</b>
	<b>Typ I<sup>a</sup></b>	<b>Typ II<sup>b</sup></b>	<b>Typ IIIa<sup>c</sup></b>	<b>Typ I<sup>a</sup>/Typ IIIb<sup>c</sup></b>
<b>Nicht ischämisch</b>	Degenerativ	Degenerativ („ <i>flail leaflet</i> “)	Rheumatisch (chronisch)	Kardiomyopathie
	Endokarditis (Perforation)	Endokarditis (rupturierte Chordae)	Iatrogen (Bestrahlung, Medikamente)	Myokarditis
	Kongenital	Traumatisch (rupturierte Sehnenfäden, Papillarmuskel)	Inflammatorisch (Lupus, eosinophile Endokarditis, Endomyokardfibrose)	Andere Ursachen der linksventrikulären Dysfunktion
		Rheumatisch (akut)		
<b>Ischämisch</b>		Rupturierte Papillarmuskel		Funktionelle Ischämie
<sup>a</sup> Normale Segelbewegung, <sup>b</sup> übermäßige/exzessive Segelbewegung, <sup>c</sup> restriktive Segelbewegung				
Modifizierte Tabelle basiert auf Nickening et al. [13]				

Eine Mitralklappeninsuffizienz kann auch akut entstehen. Die Ischämie des Haltenapparates der Mitralklappe im Rahmen einer akuten Myokardischämie und der konsekutiv plötzlich einsetzende Sehnenfadenabriss sind die häufigsten Ursachen der akuten Mitralklappeninsuffizienz.

### 1.1.5. Echokardiographisch basierte Schweregradeinteilung der Mitralklappeninsuffizienz

Die Echokardiographie ist ein wichtiges diagnostisches Instrument für die funktionelle Analyse der Ätiologie sowie Läsionen und Dysfunktion der Mitralklappe. Die europäische Gesellschaft für Echokardiographie [14] empfiehlt die Durchführung einer transthorakalen Echokardiographie als primäre Bildgebung für die Bewertung des Schweregrades der Mitralklappeninsuffizienz. Hierbei wird der Mechanismus der Mitralklappeninsuffizienz und ihre Auswirkung auf den linken Ventrikel sowie das linke Atrium und den Lungenkreislauf untersucht. Dabei kann die Möglichkeit einer potenziellen Mitralklappenrekonstruktion ebenso evaluiert werden. Eine Quantifizierung des Insuffizienzgrades wird erst ab einer moderaten Mitralklappeninsuffizienz empfohlen [14, 15]. Wenn die transthorakale Echokardiographie aufgrund von eingeschränkten Schallbedingungen keinen diagnostischen Wert hat, ist die Durchführung erweiterter Bildgebung bzw. einer transösophagealen Echokardiographie erforderlich [14, 15]. Bei komplexer vorliegender Pathologie sollte eine 3D Bildgebung durchgeführt werden [14, 15].

Die echokardiographisch basierte Einteilung des Schweregrades erfolgt nach den folgenden qualitativen bzw. strukturellen Aspekten, semi-quantitativen und quantitativen Kriterien in drei Stufen (Tabelle 2):

<b>Tabelle 2: Echokardiographische Einteilung der Mitralklappeninsuffizienz</b>			
<b>Schweregrad</b>	<b>Gering</b>	<b>Moderat oder mittelgradig bzw. mittel- hochgradig</b>	<b>Hochgradig</b>
<b>Strukturelle Aspekte</b>			
<b>MV-Morphologie</b>	Keine bzw. geringe Klappenveränderungen: - Segelverdickung - Kalzifizierung - Kein Prolaps		Auffallende Klappenveränderungen: - <i>Flail</i> - Papillarmuskelabriss - Perforation (primär)

	- Geringes <i>Tenting</i>		- Ausgeprägtes <i>Tenting</i> - mangelnde Koaptation (sekundär)
<b>LV- und LA-Morphologie</b>	Normal		Dilatation
<b>Semiquantitative Parameter<sup>a</sup></b>			
<b>Vena contracta (cm)</b>	<0.3 cm	0.3-0.7 cm	≥0.7 cm (lange Achse)
<b>Pulmonalvenenfluss</b>	Systolische Dominanz des Vorwärtsflusses	Systolische Abschwächung	Minimaler oder kein systolischer Fluss/systolische Flussumkehr
<b>Transmitraler Einstrom</b>	A-Welle dominant		E-Welle dominant (<1.2 m/s)
<b>Quantitative Parameter</b>			
<b>EROA, 2D-PISA (cm<sup>2</sup>)</b>	<0.2 cm <sup>2</sup>	0,20–0,29 bzw. 0,30–0,39 cm <sup>2</sup>	≥0,40 cm <sup>2</sup> (evtl. geringer bei sekundärer MI mit elliptischer EROA)
<b>RF (%)</b>	<30 %	30-39 bzw. 40-49 %	≥ 50%
<i>Die Beurteilung des Schweregrades nach Jetwolkengröße und in Relation zum linken Atrium sollte generell aus methodischen Gründen nicht angewandt werden und wird nach europäischen Leitlinien daher nicht empfohlen. Bei den quantitativen Parametern wurden die Regurgitationsvolumina nicht aufgeführt, da sie relative Parameter darstellen, die auf die jeweilige Ventrikelgröße und damit auf das totale Schlagvolumen bezogen werden müssen [15].</i>			
MV: Mitralklappe, LV: linker Ventrikel, LA: linkes Atrium, RF: Regurgitationsfraktion, EROA: Effective Regurgitant Orifice Area, PISA: Proximal Isovelocity Surface Area, MI: Mitralklappeninsuffizienz, 2D: 2-dimensional			
Modifizierte Tabelle basiert auf Hagendorff et al. [15]			

## 1.2. Therapieoptionen der Mitralklappeninsuffizienz

Die Therapieoptionen der behandlungsbedürftigen Mitralklappeninsuffizienz neben der medikamentösen Therapie können ohne Berücksichtigung der vorliegenden Pathologie grob in drei Kategorien eingeteilt werden: 1) chirurgische Mitralklappenrekonstruktion, 2) Mitralklappenersatz und 3) interventionelle bzw. transkatheter Klappentherapie [15]. Die Mitralklappenrekonstruktion wird in ausgewählten Fällen primärer Mitralklappeninsuffizienzen favorisiert [15] basierend auf Carpentier's Dogma „Try to

*repair before deciding to replace*‘. Für den Zweck dieser Arbeit wird vor allem die Annuloplastie als Mitralklappenrekonstruktionsmethode analysiert.

### **1.2.1. Mitralklappenrekonstruktion**

Die Mitralklappenrekonstruktion ist nach den aktuellen Leitlinien der Europäischen Gesellschaft für Kardiologie (ESC) die Therapie der Wahl bei der symptomatischen primären Mitralklappeninsuffizienz [1]. Ebenfalls empfehlen die *American Heart Association* (AHA) und *American College of Cardiology* (ACC) [16] die Durchführung einer Mitralklappenrekonstruktion bei Patienten mit schwerer und behandlungsbedürftiger primärer Mitralklappeninsuffizienz, wenn die anatomischen Verhältnisse eine Rekonstruktion ermöglichen. In den vergangenen Jahren haben wissenschaftliche Studien und Metaanalysen [17-21] gezeigt, dass Patienten mit symptomatischer Mitralklappeninsuffizienz, die sich einer Mitralklappenrekonstruktion unterzogen haben, eine höhere Überlebensrate, geringere Mortalität und bessere Langzeitergebnisse haben, im Vergleich zu Patienten, die einen Mitralklappenersatz erhielten. Die Mitralklappenrekonstruktion hat sich als Therapie der primären Mitralklappeninsuffizienz etabliert. Es gibt verschiedene Rekonstruktionstechniken (z.B. Annuloplastie, Segelresektion, Implantation künstlicher Sehnenfäden) diese werden einzeln oder in Kombination abhängig von der vorliegenden Pathologie ausgewählt.

Der minimal invasive Zugang wird seit Mitte der 90er Jahre in zahlreichen spezialisierten Zentren routinemäßig bei der Mitralklappenrekonstruktion verwendet [22-26].

Alain Carpentier beschrieb in seiner Veröffentlichung *‘French Correction*‘ die drei Grundprinzipien für eine erfolgreiche Mitralklappenrekonstruktion [11]:

1. Stabilisierung des Annulus (Annuloplastie)
2. Wiederherstellung einer physiologischen Segelbewegung (Segelplastik)
3. Wiederherstellung einer suffizienten Koaptationsfläche

Zur Wiederherstellung der physiologischen annulären Dimensionen entwickelte Carpentier ein rigides Ringimplantat. Dieses sollte u.a. weitere Deformationen des Klappenannulus verhindern. Eine Resektion exzessiven Klappengewebes sowie der

Transfer bzw. Kürzung von Sehnenfäden wurden u.a. von Carpentier und seinen Kollegen beschrieben. Dagegen wird beim Lawrie-Prinzip (*„respect, not resect“*) [27] der Mitralklappenrekonstruktion in erster Linie die Wiederherstellung der Mitralklappenfunktion angestrebt. Dies beinhaltet minimale oder gar keine Segelresektion, Implantation von Neo Chordae und flexible Annuloplastie.

### 1.2.2. Annuloplastie

Die Verwendung von Annuloplastierungen ist ein wichtiger Bestandteil der modernen Mitralklappenrekonstruktion. Die Annuloplastie dient der Wiederherstellung der normalen systolischen Geometrie des Mitralklappenannulus mit dem Ziel einer ausreichenden Koaptation beider Klappensegel. Darüber hinaus verhindert die richtige Auswahl des Annuloplastierendes weitere Deformationen der Mitralklappe. Das Konzept des Mitralklappen-Remodelling bzw. Rekonstruktion durch Implantation von Annuloplastierungen wurde 1968 von dem Pionier der modernen Mitralklappenchirurgie, Alain Carpentier, eingeführt [11, 28].

Die Annuloplastierendes sind künstliche Ringe, welche mit 12 bis 15 Nähten auf dem Mitralklappenannulus vernäht werden. Die kommerziell verfügbaren Annuloplastierendes und ihre Eigenschaften werden in den folgenden Tabellen (Tabelle 3 und 4) dargestellt.

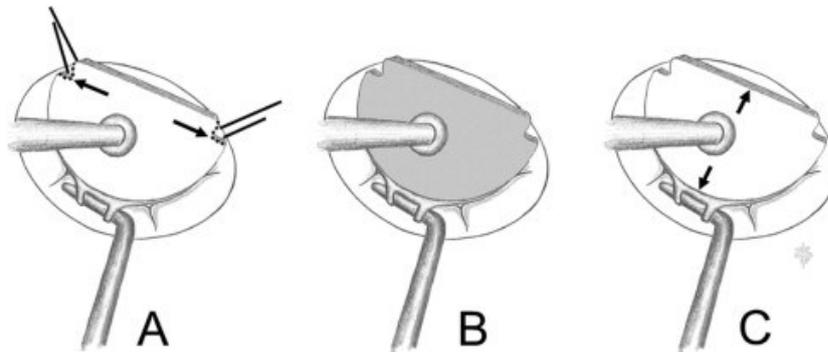
Die Größenbestimmung des Annuloplastierendes erfolgt in der Regel intraoperativ durch die Anwendung eines herstellerepezifischen *Sizer*. Ein *Sizer* ist eine D-förmige Plattform mit zwei Einkerbungen am kranialen Ende und dient zur Einschätzung der Fläche und/oder der Höhe des anterioren Mitralklappensegels (AML) und des interkommissuralen oder intertrigonalen Abstandes (*„CC bzw. IT Abstand“*). Die Wahl der passenden Ringgröße korreliert mit der Fläche des anterioren Mitralklappensegels (AML) und mit dem interkommissuralen Abstand [12].

Tabelle 3: Eigenschaften der Annuloplastierendes		
Eigenschaft	des	Vor- und Nachteile
Ringes		

Sattelform	Reduktion des mechanischen Stresses, der durch Abflachung der Segel entsteht, durch Erhaltung der anatomischen Annulusform.
Asymmetrische Form	Reduktion des mechanischen Stresses im posterioren Annulus der typischerweise bei ischämiebedingter Ventrikeldilatation entsteht, durch regionale Ausbuchtung des Ringes.
3D-Form	Verbesserung des diastolischen Einstroms durch Anpassung an den Herzzyklus.
4D-Form	Funktion wie bei der 3D-Form, zusätzlich verminderte progressive AP-Abstände in Abhängigkeit von der Ringgröße; dadurch geeignet sowohl bei <i>Down Sizing</i> zur Sicherung ausreichender Kooperationsfläche (kleinen Ringgrößen) als auch bei überschüssigem Segel Material (Morbus Barlow) zur Vermeidung von SAM-Phänomen (große Ringgrößen).
Flache Form	Annulus-Stabilisierung, allerdings auf Kosten antianatomischer Annulusform.
Rigide	Entgegenwirken sekundärer Annulusdilatation, allerdings auf Kosten eines schlechteren hämodynamischen Profils und möglicher Einschränkung der Wandbewegung mit möglichen negativen Auswirkungen auf Hämodynamik und LV-Funktion.
Semirigide	Anterior flexibel, um die anatomische Sattelkonfiguration während des Herzzyklus zu unterstützen, dadurch einerseits Stabilisierung des Rekonstruktionsergebnisses, andererseits weniger Risiko einer Überkorrektur.
Flexibel	Weiterentwicklung des Konzepts der Wiederherstellung der Funktion (und nicht der Anatomie), wobei Langzeiterfahrungen noch fehlen.
Offen	Erhaltung der dynamischen Ringform während des Herzzyklus durch posteriore Annulus-Stabilisierung, dadurch einerseits geringe transvalvuläre Gradienten und geringes Risiko einer Ringdehiszenz.
Geschlossen	Effektiveres Downsizing durch Erhöhung der Koaptationsfläche, wobei dieser Vorteil nicht evidenzbasiert ist.
Modifizierte Tabelle basiert auf Albert et al. [29]	

<b>Tabelle 4: Übersicht kommerziell verfügbarer Annuloplastieringe, nach Hersteller sortiert</b>					
<b>Modell</b>	<b>Größen (mm)</b>	<b>Typ</b>	<b>AP-Abstand progressiv*</b>	<b>Flexibilität</b>	<b>Form</b>
<b>Edwards</b>					
<i>Cosgrove</i>	7 Größen, 26-38	offen	nein	flexibel	3D
<i>Physio Flex</i>	9 Größen, 24-40	offen		semirigide	Sattel
<i>Physio II</i>	9 Größen, 24-40	geschlossen	ja	semirigide	Sattel

<i>Physio</i>	9 Größen, 24-40	geschlossen	nein	semirigide	Sattel
<i>IMR ETlogix</i>	6 Größen, 24-34	geschlossen	nein	rigide	asymmetrisch
<b>Medtronic</b>					
<i>Duran</i>	7 Größen, 23-35	offen, geschlossen	nein	flexibel	3D
<i>Simulus</i>	9 Größen, 24-40	offen, geschlossen	nein	semirigide	3D
<i>CG Future</i>	8 Größen, 24-38	offen, geschlossen	nein**	semirigide	3D
<i>Profile 3D</i>	9 Größen, 24-40	geschlossen	nein	rigide	Sattel
<b>LivaNova</b>					
<i>AnnuloFlex</i>	6 Größen, 26-36	sowohl offen, als auch geschlossen	nein	flexibel	flach
<i>Memo 3D</i>	8 Größen, 24-38	geschlossen	nein	semirigide	3D
<i>Memo 4D</i>	10 Größen, 24-42	geschlossen	ja	semirigide	3D
<i>AnnuloFlo</i>	6 Größen, 26-36	sowohl offen, als auch geschlossen	nein	rigide	flach
<p><i>*Diese Ringeigenschaft gibt an, wie sich die Ringform in Abhängigkeit von der Ringgröße verhält. Beim progressiven AP-Abstand im Verhältnis zum CC-Abstand wird der Ring runder mit steigender Ringgröße. Wenn der AP-Abstand im Verhältnis zum CC-Abstand in Abhängigkeit von der Ringgröße gleichbleibt, ändert sich die Ringform nicht. Ringe mit progressivem AP-Abstand eignet sich z.B besonders gut bei Morbus Barlow [29].</i></p> <p><i>**Der AP-Abstand ist bei diesem Ring regressiv, d.h. je größer der Ring, desto kleiner wird der AP-Abstand. Dadurch wird der Ring mehr ellipsoid mit steigender Ringgröße. Ringe mit regressivem AP-Abstand eignen sich z.B. besonders gut zu restriktiver Annuloplastie [29].</i></p>					
Modifizierte Tabelle basiert auf Albert et al. [29]					



**Abb. 2: Bestimmung der Ringgröße mit der Hilfe eines Sizer**

A) Die *Sizer*-Einkerbungen, je nach Ringmodell und Hersteller, können für die Messung des intertrigonalen oder interkommissuralen Abstandes verwendet werden. B) Die Fläche des *Sizer* kann für die Messung der Fläche des anterioren Mitralklappensegels verwendet werden, C) oder für die Messung der Höhe des anterioren Mitralklappensegels.

Bothe et al. [30]

mit freundlicher Genehmigung des Elsevier Verlags

Die Studien, welche die verschiedenen Annuloplastieringe zur Behandlung der degenerativen Mitralklappeninsuffizienz verglichen haben, konnten keinen signifikanten Unterschied in Bezug auf die postoperativen Ergebnisse zeigen [31]. Es ergibt sich aus mehreren Studien, dass die Erfahrung des Operateurs entscheidend für ein gutes Rekonstruktionsergebnis ist [32, 33]. Aus einem im Jahr 2020 publiziertem Review von Lawrie [33] zeigt sich, dass in großen Zentren mit mehr als 23 Mitralklappenrekonstruktionen pro Jahr die Erfolgsrate der Mitralklappenrekonstruktion bei 90% liegt.

### 1.2.3. Echokardiographische Parameter für das *Sizing*

Interessanterweise werden in der Literatur [30] verschiedene Strategien zum Thema Selektion des Annuloplastieringes mit Verwendung eines *Sizer* empfohlen, welche unter anderem den Empfehlungen des Herstellers widersprechen. Im Jahr 1998 haben Choo und seine Kollegen [34] eine Arbeit veröffentlicht, welche eine Verbindung zwischen dem Aortenklappendurchmesser und dem interkommissuralen Abstand gezeigt hat. Die Arbeitsgruppe von Cooray et al. [35] konnte eine Korrelation zwischen dem gewählten Annuloplastiering und dem echokardiographisch gemessenen interkommissuralen Abstand sowie dem Aortenklappendurchmesser feststellen. Eine andere Arbeitsgruppe

(Cook et al. [36]) nutze in den folgenden Jahren diese Theorie zur Ringgrößenbestimmung klinisch angewendet. Hier [36] konnten jedoch nur mäßige postoperative Ergebnisse beobachtet werden. Daraus ließ sich schließen, dass der interkommissurale Abstand allein nicht ausreichend für eine valide Vermittlung des passenden Annuloplastierendes ist.

Bothe et al. [30] haben sich mit den diversen Methoden zur Auswahl der Größe des passenden Annuloplastierendes befasst. Unter Berücksichtigung von mehr als 20 Publikationen zum diesen Thema sind Bothe et al. [30] zu drei Kernbeobachtungen gekommen. Es gibt zahlreiche Strategien zur Bestimmung der passenden Annuloplastierend-Größe. Diese entsprechen häufig nicht die Vorgaben des Herstellers zur *Sizer*-Verwendung; sondern die Erfahrung des jeweiligen Herzchirurges. Außerdem sind die *Sizer* der verschiedenen Hersteller nicht vergleichbar. Keine der Dimensionen der *Sizer* findet sich in der vorgegebenen Ringgröße wieder.

Auch die Anwendungen komplexer Algorithmen zur Erstellung eines virtuellen 3D-Annuloplastierendes basierend auf den echokardiographischen Daten [37] sowie Algorithmen zur computertomographisch basierten Auswertung der Mitralklappe [38] konnten sich als standardisiertes Procedere für die Auswahl des passenden Annuloplastierendes nicht etablieren. Zusammenfassend gibt es keine reproduzierbare und wissenschaftlich bestätigte Herangehensweise für die Auswahl des passenden Annuloplastierendes.

McCarthy et al. [39] haben in einer im Jahr 2020 veröffentlichten Arbeit die Ergebnisse ihrer langjährigen Erfahrung im Bereich der Mitralklappenrekonstruktion präsentiert. Vor allem wurde ein quantitativer, echokardiographisch basierender Algorithmus für die Auswahl des Annuloplastierendes beschrieben. Ziel der Mitralklappenrekonstruktion war eine postoperative Segelkoaptation von 5 bis 10 mm. McCarthy [39] führte primär eine Segelplastik an einem oder an beiden prolabierenden Segeln durch. Ziel war hier die Wiederherstellung des normalen anatomischen Verhältnisses 2:1 in Bezug auf die Länge des anterioren und posterioren Segels. Danach wurde die korrigierte Länge beider Segel echokardiographisch gemessen. Der Annuloplastierend wurde in Bezug auf den AP-Abstand, der am nächsten zu der AML-Länge im Segment 2 war, gewählt. Bei dieser Studie wurde der Abstand des Septums zum Koaptationspunkt berücksichtigt. Bei kleineren Abständen (<25 mm) wurde ein größerer Ring gewählt. Wenn der Abstand des

Septums zum Koaptationspunkt < 25 mm ist, besteht ein höheres Risiko für das Auftreten eines SAM-Phänomens postoperativ. Als SAM-Phänomen wird die systolische Bewegung des anterioren Segels, welche zur Obstruktion führt, beschrieben.

Da ein gutes postoperatives Ergebnis u.a. von der korrekten Auswahl des Annuloplastieringes abhängt, ist die Bestimmung der Ringgröße mit einer reproduzierbaren und präzisen Methode von großem wissenschaftsgeschichtlichem Interesse. Seit mehr als einem Jahrzehnt versuchen Wissenschaftler eine präzise echokardiographisch basierte Bestimmung der Ringgröße zu etablieren [6, 7, 37, 39-42].

Innovative echokardiographische und auf computergestützten dreidimensional basierenden Rekonstruktionsmodelle beschreiben den Mitralklappenannulus als sattelförmig mit dynamischen Veränderungen während des kardialen Zyklus [6, 7, 43-45]. Noack et al. [46] haben diese dynamischen Veränderungen des Mitralklappenannulus während des kardialen Zyklus mittels dreidimensionaler transösophagealer Echokardiographie mit vierdimensionaler Analyse zwischen gesunden Probanden und Patienten mit primärer und sekundärer Mitralklappeninsuffizienz verglichen. In der Gruppe mit der insuffizienten Mitralklappe fiel ein weniger dynamischer, abgeflachter und dilatierter Mitralklappenannulus auf. Zwischen primärer und sekundärer Mitralklappeninsuffizienz gab es kaum Unterschiede. Die gleiche Arbeitsgruppe (Noack et al. [47]) hat die dynamischen Folgen nach Mitralklappenannuloplastie mit der gleichen Methode beobachtet. Hier [47] wurde eine Reduktion der pathologischen Dilatation des Mitralklappenannulus und eine Reduktion der anatomischen Öffnungsfläche der Mitralklappe (*AMVOA: anatomical mitral valve orifice area*) nach Mitralklappenrekonstruktion festgestellt. Die o.g dynamischen Veränderungen des Mitralklappenannulus während des kardialen Zyklus scheinen eine konkrete Bestimmung der Größe des Mitralklappenannulus zu erschweren.

#### **1.2.4. Die Bedeutung des Verfahrens der Segelplastik (*respect vs. resect*) für die Auswahl des Annuloplastieringes**

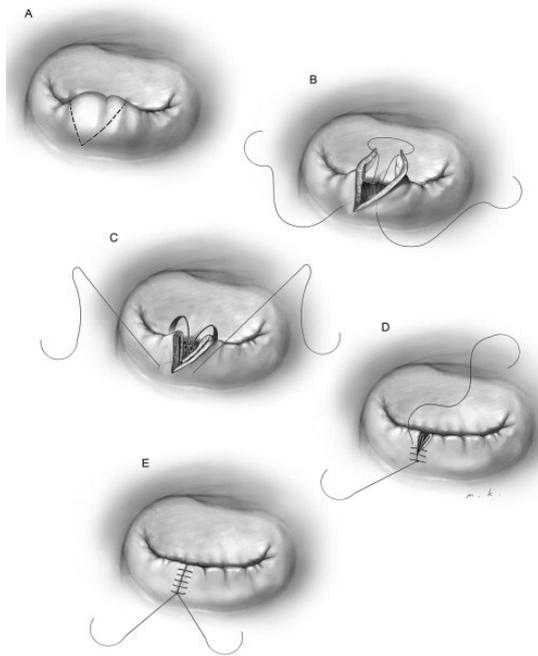
Für die Auswahl des passenden Annuloplastieringes spielt die Durchführung einer Segelplastik oder Sehnenfadenplastik eine wichtige Rolle. Bei der ‚*resect*‘ Methode erfolgt eine Verkürzung eines oder beider Segel durch eine Resektion überschüssigen

Segelgewebes mit einer der verschiedenen Resektionstechniken (siehe §1.2.4.1). Die ‚resect‘ Methode basiert auf Carpentier’s ‚French Correction‘ [11] Veröffentlichung und ist bis heute aktuell. Bei der ‚respect‘ Methode wird, im Gegensatz zur ‚resect‘ Methode, das Segel in seiner natürlichen Dimension erhalten und es erfolgt eine Sehnenfadenplastik (siehe §1.2.5) zur Wiederherstellung der normalen Klappenfunktion. Die ‚respect‘ Methode basiert auf Lawrie’s Prinzip[27] und ist als ‚American Correction‘ bekannt.

#### **1.2.4.1. Segelplastik**

Die Resektion überschüssigen Gewebes wird bei Prolaps der Mitralklappensegel durchgeführt und dient durch die Reduktion der Höhe der Segel zur Wiederherstellung der Koaptation [48]. Hierfür werden verschiedene Resektionstechniken verwendet [49-55].

Bei der triangulären Resektion wird ein kleiner, dreieckiger Gewebeanteil exzidiert [50]. Die freien Ränder werden dann zusammengenäht. Diese Methode wird hauptsächlich bei massiver lokaler Gewebeproliferation durchgeführt.



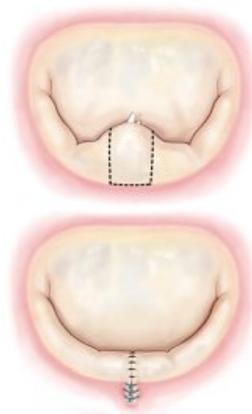
**Abb. 3: Trianguläre Resektion**

(A) Linksatriale "Chirurgen-Ansicht" der Mitralklappe. (B) Nach dreieckiger Resektion im hinteren Segel. (C, D, E) Die freien Ränder werden durch eine Naht zusammengebracht.

Suri et al. [50]

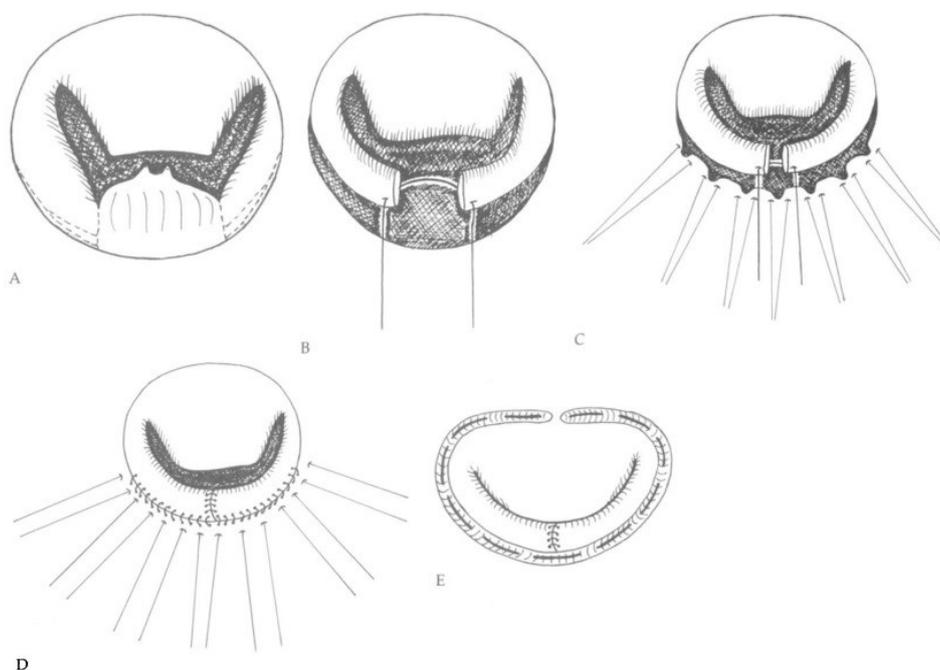
mit freundlicher Genehmigung des Elsevier Verlags

Bei der quadrangulären Resektion wird ein viereckiger Anteil überschüssigen Mitralklappensegels exzidiert und die freien Ränder werden durch eine fortlaufende Naht adaptiert [51]. Diese Methode wird am häufigsten bei Prolaps des posterioren Segels im Segment 2 verwendet.



**Abb. 4: Quadranguläre Resektion**

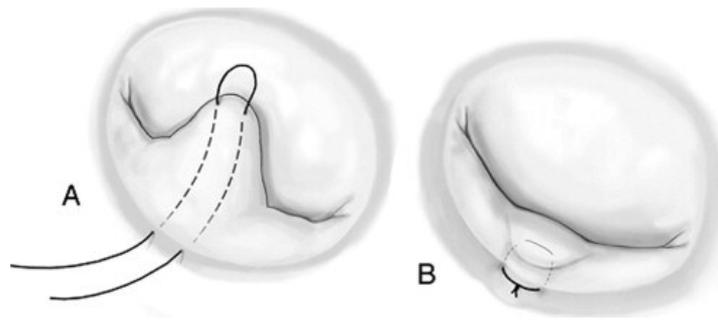
Die Sliding Technik wird im Falle ausgedehnterer Resektion von Mitralklappensegel verwendet [52]. Dabei wird nach der Resektion des überschüssigen Gewebes das verbliebene Mitralklappensegel vom Annulus abgelöst. Nach Raffung der freien Ränder wird das Segel an den Annulus genäht.



**Abb. 5: Sliding Resektion**

A bis E: Operationsschritte der Sliding Resektionstechnik

Die *Folding* Valvuloplastie wird bei Patienten mit isoliertem Prolaps des posterioren Segels im Segment 2 ohne Sehnenfadenriss eingesetzt [56]. Das Ziel dieser Rekonstruktionstechnik besteht darin, den dilatierten Annulus neu zu modellieren, die normale Segelbewegung wiederherzustellen und die Höhe des posterioren Segels zu reduzieren, um das Auftreten von SAM-Phänomen zu verhindern.



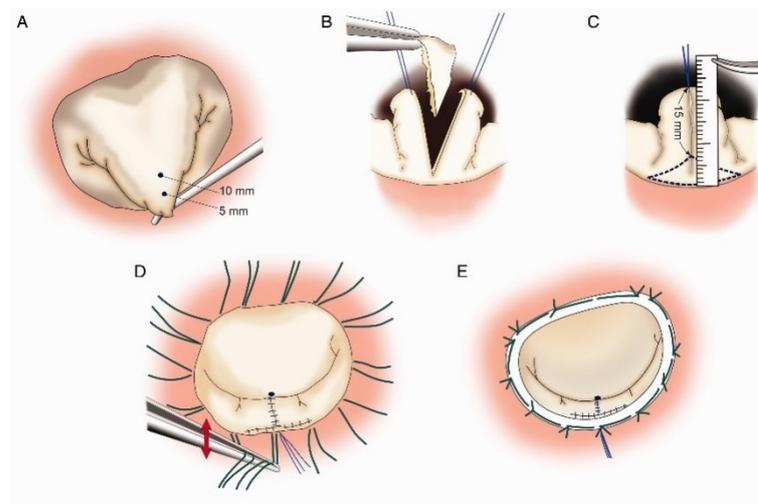
**Abb. 6: Folding Valvuloplastie**

(A) Eine doppelarmige Naht wird von der Spitze des prolabierten Segels zum Annulus gelegt. (B) Eine Naht wird gebunden, um das Segel nach unten zu falten.

Tabata et al. [56]

mit freundlicher Genehmigung des Elsevier Verlags

Die *Butterfly* Technik wurde von Asai et al. [53] beschrieben. Diese kombiniert eine dreieckige Resektion vom prolabierendem Segel und eine zweite Resektionslinie, die bis zum Annulus reicht. Die freien Ränder des Segels werden in Richtung Annulus gedreht und mit 5-0 Polypropylennähten vernäht. Eine Annuloplastie vervollständigt die Reparatur. Diese Technik hat akzeptable frühe Ergebnisse; es gibt jedoch nur begrenzte Daten zur Langzeithaltbarkeit dieses Ansatzes.



**Abb. 7: Butterfly Technik**

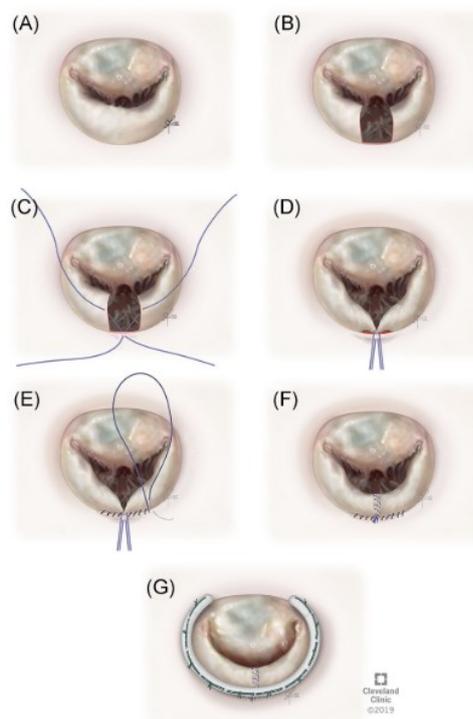
(A) Markierung des anterioren Segels im mittleren Segment 5 mm und 10 mm von der freien Kante des mittleren Segments des anterioren Mitralklappensegels (bzw. des A2 Segments). (B) Am prolabierten Segment wird eine dreieckige Resektion durchgeführt. (C) Die *Butterfly* Technik ist indiziert, wenn die

eingeschätzte Höhe über 20 mm liegt. (D) Um den antero-posterioren Durchmesser einzustellen, zieht man an den ringförmigen Nähten um 5 bis 7 Uhr, während man die markierten Punkte sorgfältig beobachtet. Die Größe des passenden Annuloplastieringes wird gewählt, wenn nur ein Markierungspunkt zu sehen ist, der auf 5 bis 10 mm Koaptation hindeutet. (E) Die Annuloplastie wird vervollständigt.

Asai et al. [53]

mit freundlicher Genehmigung des SAGE Verlags

Die *Folding* Technik ist ein Kombinationsverfahren, welches mit einer quadrangulären Resektion des prolabierte Segels beginnt. Nach der Resektion werden die Nähte durch die Mitte der Schnittkante eines jeden Segels geführt und anschließend werden die Nähte durch den Ring geführt. Diese Nähte "falten" die Segel in Richtung des Ringes und verringern die Höhe der Segel. Dann werden ähnlich wie bei der *Sliding* Technik die Segel an den Annulus genäht. Die Annuloplastie vervollständigt den Eingriff. Diese Methode sollte durch die Reduktion der Länge der Klappensegel ein SAM-Phänomen verhindern. Die postoperativen Ergebnisse dieser Methode sind in Bezug auf Re-Operation aufgrund von Rezidiv der Mitralklappeninsuffizienz positiv [54, 55].



**Abb. 8: Folding Technik**

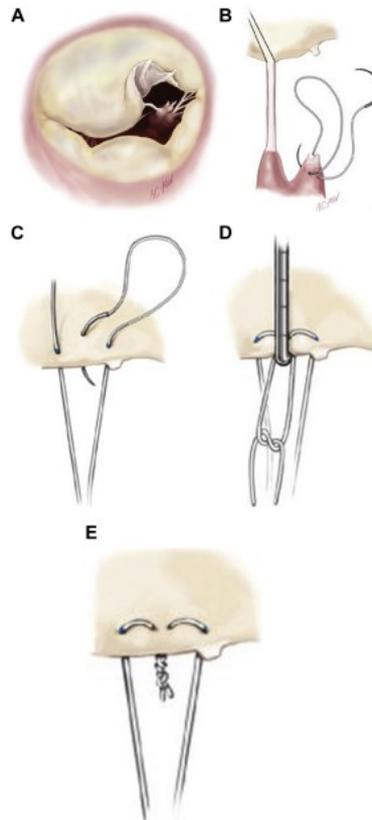
Mitralklappenrekonstruktion mit der *Folding* Technik bei Patienten mit isoliertem Prolaps im Segment 2 des posterioren Segels (P2). Nach der Resektion des prolabierte P2-Segments (A-B) werden die Nähte durch die Mitte der Schnittkante jedes Segelrestes (C) geführt und dann werden die Nähte durch den Ring (D) geführt; Diese Nähte "falten" die Segel in Richtung des Annuloplastieringes und verringern die Höhe der Segel (E). Die Segel werden dann am Ring befestigt (F). Die Reparatur wird mit einer Annuloplastie vervollständigt (G).

Chemtob et al. [31]

mit freundlicher Genehmigung des John Wiley and Sons Verlags

### **1.2.5. Sehnenfadenersatz/-korrektur**

Zu den Rekonstruktionsmethoden des subvalvulären Apparates gehören die Papillarmuskelreposition, ein Sehnenfadentransfer, die Reimplantation von Sehnenfäden sowie ein künstlicher Sehnenfadenersatz. Aktuell wird der künstliche Sehnenfadenersatz mit Fäden aus Polytetrafluorethylene (PTFE), Neo Chordae, zur Korrektur rupturierter oder elongierter Sehnenfäden [24, 26] am häufigsten angewendet. Dieser basiert auf der Philosophie ‚*respect rather than resect*‘ [48, 57].



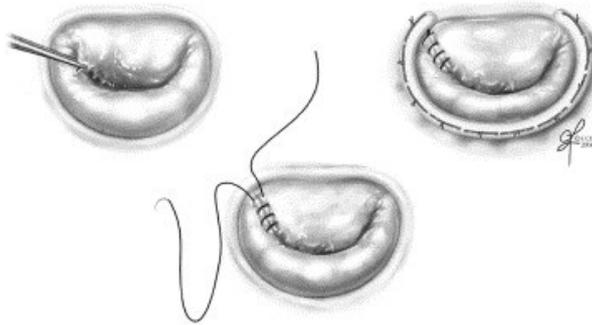
**Abb. 9: Implantation von künstlichen Sehnenfäden**

Schubert et al. [58]

mit freundlicher Genehmigung des Elsevier Verlags

### 1.2.6. Kommissuroplastie

Ein kommissuraler Prolaps kann durch Chordae-Dehnung oder Ruptur des anterioren oder posterioren Segels an der Kommissur verursacht werden. Ein einfacher Nahtverschluss der Kommissur ermöglicht eine schnelle und zuverlässige Reparatur [59]. Diese Technik ist besonders effizient für myxomatöse Mitralklappe mit großer Öffnung.



**Abb. 10: Kommissuroplastie**

Gillinov et al. [59]

mit freundlicher Genehmigung des Elsevier Verlags

### 1.2.7. Chirurgischer Mitralklappenersatz

Obwohl die Rekonstruktion der Mitralklappe gegenüber dem Ersatz zur Behandlung der Mitralklappeninsuffizienz bevorzugt wird, ist die Durchführung einer erfolgreichen Rekonstruktion bei moderat bis hochgradig kalzifizierten und stenotischen Mitralklappen erheblich erschwert bis unmöglich. Ein Mitralklappenersatz ist auch bei signifikanter Schädigung der Mitralklappe infolge einer infektiösen Endokarditis indiziert. Prinzipiell gibt es zwei unterschiedliche Klappenprothesentypen, die biologische und die mechanische Klappenprothese. Die mechanische Klappenprothese wird bei jüngeren Patienten mit einem Lebensalter von unten 65-70 und ohne Kontraindikation für eine lebenslange orale Antikoagulationstherapie bevorzugt. Entsprechend wird eine biologische Klappenprothese bei älteren Patienten mit einem Lebensalter von über 65-70 oder bei Patienten verwendet, die keine dauerhafte orale Antikoagulationstherapie erhalten dürfen [60, 61].

### 1.2.8. Interventionelle Therapieoptionen

Neben den chirurgischen Therapieoptionen der Mitralklappeninsuffizienz sind in den letzten Jahren verschiedene interventionelle Therapieverfahren entwickelt worden. Die perkutane kathetergestützte Implantation eines Clips (MitralClip®) basiert auf dem ‚Edge to edge‘ Rekonstruktionsprinzip des italienischen Herzchirurgen Alfieri [62, 63] und hat sich als interventionelles Therapieverfahren in vielen Zentren etabliert. Ziel dieses

Verfahrens ist die Reduktion der Mitralklappeninsuffizienz durch Raffung des anterioren und posterioren Segels mit einem oder mehreren Clips, sodass dadurch zwei statt einer Öffnung entstehen. Die Durchführung dieses Eingriffes ist technisch einfach. Wichtig für ein gutes postoperatives Ergebnis ist die präoperative echokardiographische Selektion der Patienten. In einem kürzlich veröffentlichten Artikel von Salvatore et al. [64] werden u.a. eine Koaptationslänge von mind. 2 mm und eine Länge vom posterioren Segel von mind. 10 mm als optimale Kriterien für dieses Verfahren beschrieben.

Das PASCAL™ System ist eine alternative perkutane kathetergestützte Therapie, die ähnlich wie bei MitralClip® per Kathetersystem angewendet wird. Die Implantation des PASCAL™ Systems wird ebenfalls unter echokardiographischer Steuerung zwischen den beiden Mitralklappensegeln befestigt.

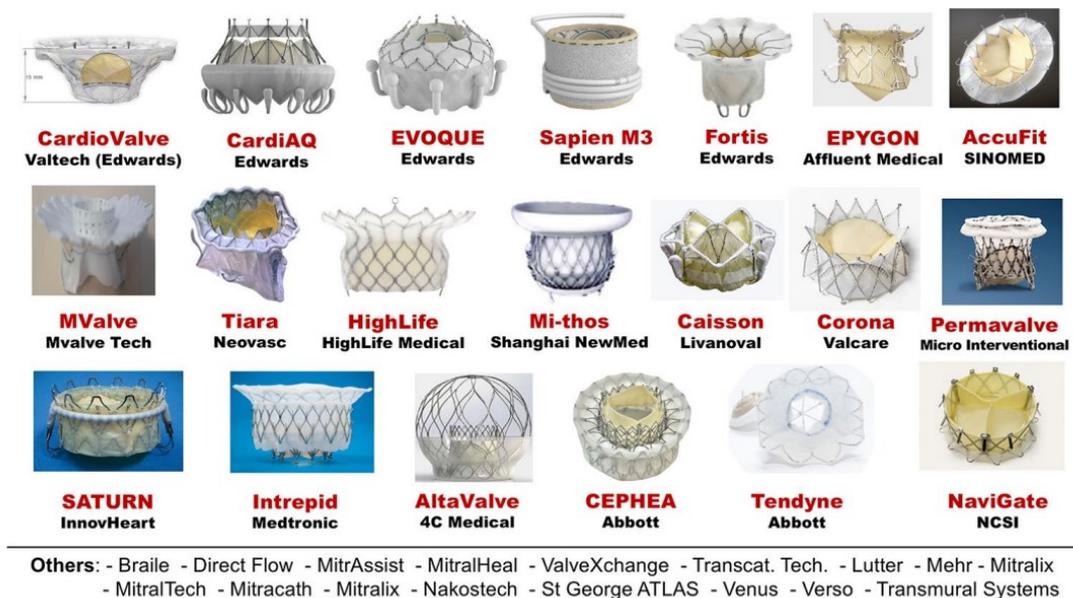
Ein weiteres interventionelles Therapieverfahren ist das Cardioband®-System, welches auf dem Prinzip der Annuloplastie beruht. Das System besteht aus einem Teleskopkatheter sowie dem Implantat selbst, dem eigentlichen Cardioband®.

Die europäische Gesellschaft für Kardiologie empfiehlt eine transkatheter *Edge to Edge* Rekonstruktion (TEER) bei ausgewählten symptomatischen Patienten, die für eine Operation nicht in Frage kommen und Kriterien erfüllen, die eine erhöhte Chance auf ein Ansprechen auf die Behandlung erwarten lassen [1].

Das Tendyne™-Verfahren stellt beim Mitralklappenersatz durch eine Klappenprothese eine weniger invasive Alternative zur Operation bzw. ein Hybrid-Verfahren dar. Diese Klappenprothese wird von einem Herzchirurgen durch einen kleinen Schnitt eingesetzt und mit Hilfe eines Katheters in das Herz eingeführt, ohne die Unterstützung einer Herz-Lungen-Maschine.

Es gibt weitere Devices, die für die perkutane Mitralklappenrekonstruktion und für den perkutanen Mitralklappenersatz entwickelt wurden [65, 66]. Die meisten dieser Devices befinden sich in der frühen Entwicklungsphase und haben weder die Zulassung der *Food and Drug Administration* (FDA) noch das CE Zeichen. In der folgenden Tabelle (Tabelle 5) und Abbildung (Abb. 12) sind die aktuellen perkutanen Devices und Klappen aufgelistet, die sich derzeit in der Entwicklung befinden oder bereits zertifiziert sind [65, 66].

<b>Tabelle 5: Übersicht verfügbarer transkatheter Devices</b>			
<b>Edge to Edge Repair</b>	<b>Annuloplastie</b>	<b>Mitralklappenersatz</b>	<b>Andere</b>
<i>Mitral Clip (Abbott Vaskular)</i>	<i>Cardioband (Edwards Lifesciences)</i>	<i>Tendyne (Abbott Vascular)</i>	<i>NeoChord DS1000 (NeoChord, Inc.)</i>
<i>PASCAL (Edwards Lifesciences)</i>	<i>Millipede IRIS (Millipede)</i>	<i>Tiara (Neovasc Inc)</i>	<i>Harpoon TDS-5 (Edwards Lifesciences)</i>
	<i>Carillon (Cardiac Dimensions)</i>	<i>EVOQUE (Edwards Lifesciences)</i>	<i>ChordArt (CoreMedic)</i>
	<i>ARTO (MVRx)</i>	<i>Intrepid (Medtronic)</i>	<i>V-Chordal (Valtech Cardio Ltd.)</i>
	<i>AccuCinch (Ancora Heart)</i>	<i>Caisson (Caisson Interventional LLC)</i>	<i>Pipeline (Gore Medical)</i>
	<i>Amend (Valcare Medical)</i>	<i>HighLife (HighLife Medical)</i>	<i>CardioMech (CardioMech AS)</i>
		<i>CardiAQ (Edwards Lifesciences)</i>	<i>Mitral Butterfly (Angel Valve)</i>
		<i>MV Valve (Boston Scientific)</i>	
		<i>SAPIEN M3 (Edwards Lifesciences)</i>	
		<i>NAVI (NaviGate Cardiac Structures Inc.)</i>	
		<i>AltaValve (4C Medical Technologies Inc.;</i>	
		<i>CardioValve (Valtech)</i>	
		<i>Fortis (Edwards Lifesciences)</i>	
		<i>EPYGON (Affluent Medical)</i>	
		<i>AccuFit (SINNOMED)</i>	
		<i>Mi-thos (Shangai NewMed)</i>	
		<i>Corona (Valvecare)</i>	
		<i>Permavalve (Micro International)</i>	
		<i>SATURN (InnovHeart)</i>	
		<i>Intrepid (Medtronic)</i>	
		<i>CEPHEA (Abbott)</i>	



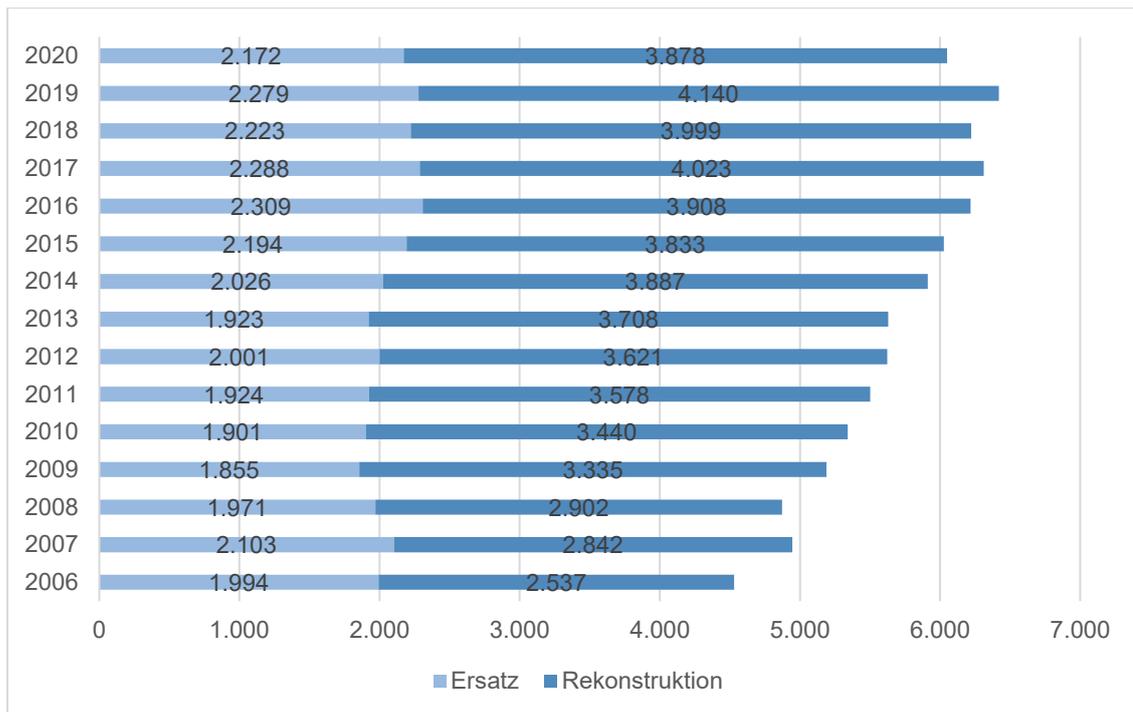
**Abb. 11: Verfügbare Klappen für Transkatheterersatz**

Scotti et al. [66]

gemäß der ‚Creative Commons licence‘ ist eine Reproduktion/Publikation des o.g. Bildes möglich

### 1.3. Mitralklappenchirurgie in Deutschland

Die Deutsche Gesellschaft für Thorax-, Herz- und Gefäßchirurgie e.V. (DGTHG) publiziert jährlich die in 79 deutschen herzchirurgischen Kliniken durchgeführten herzchirurgischen Eingriffe und deren Komplikationen als Grafiken und als Jahresreport [67]. Gemäß der von DGTHG publizierten Daten wurden im Jahr 2020 in Deutschland 6.050 isolierte Mitralklappenoperationen (Ersatz/Rekonstruktion) durchgeführt. Betrachtet man die isolierten Mitralklappeneingriffe getrennt, so wurden bei 64,1% (n = 3.878) Rekonstruktionen und entsprechend bei 35,9 % (n = 2.172) Klappenersatzoperationen vorgenommen (Abb. 11). Die intrahospitale Mortalität betrug bei den isolierten Mitralklappenrekonstruktionen im Jahr 2020 1,2 %.



**Abb. 12: Isolierte Mitralklappeneingriffe in Deutschland 2006-2020**

Modifiziertes Diagramm basiert auf der Leistungsstatistik der Deutschen Gesellschaft für Thorax-, Herz- und Gefäßchirurgie e.V.

## 1.4. Arbeitshypothese

Obwohl die chirurgische Mitralklappenrekonstruktion der Goldstandard in der Behandlung der schwergradigen primären Mitralklappeninsuffizienz ist, gibt es keine reproduzierbaren und etablierten Methoden zur Vermessung der Mitralklappe und Auswahl des passenden Annuloplastieringes. Erfahrene Herzchirurgen teilen ihre Expertise in einzelnen Studien mit [11, 12, 30, 31, 39, 61, 68-70]. In einer publizierten [29] Umfrage von 7 Experten im Bereich der Mitralklappenchirurgie zum Thema Auswahlmethode des passenden Annuloplastieringes, welche vom Prof. Dr. med. Albert durchgeführt wurde, zeigt sich, dass die Auswahl des Annuloplastieringes auf der jeweiligen Präferenz der Experten sowie auf der vorliegenden Pathologie der Mitralklappeninsuffizienz basiert.

Aus der kardiologischen Perspektive möchten wir von den herzchirurgischen Ergebnissen das Verhältnis zwischen den Mitralklappeneigenschaften, den geometrischen Daten der Ringe und der postoperative Koaptation analysieren. Das Ziel einer erfolgreichen Mitralklappenrekonstruktion ist die Wiederherstellung der Schließfähigkeit der

Mitralklappe, welche auf eine ausreichende Koaptation beider Mitralklappensegel basiert. Eine Koaptationshöhe soll im optimalen Fall  $\geq 8$  mm und mindestens 2 mm betragen; dies bedeutet ein gutes Ergebnis nach Mitralklappenrekonstruktion und korreliert in klinischen Studien mit guten Langzeitergebnissen [12, 71-75]. Der Mechanismus der chirurgischen und interventionellen Annuloplastien besteht in erster Linie in einer Verkürzung des durch eine Annulusdilatation vergrößerten anterior-posterioren (AP) Abstandes. Bei den kommerziell erhältlichen Annuloplastierungen ist der AP-Abstand des Annuloplastieringes vorgegeben. Somit sollten – nach echokardiographischer Bestimmung der Längen beider Mitralklappensegel - die erzielte Koaptationshöhe durch den AP-Abstand des gewählten Ringes determiniert sein. Diesbezüglich haben wir zwei Arbeitshypothesen gestellt. Einerseits, ob sich die postoperative Koaptation durch die einfach zu bestimmenden präoperativen Parameter AP- und CC-Abstand, Länge des anterioren und postoperativen Segels und der Geometrie des Ringes vorhersagen lässt und andererseits, ob das Ausmaß der Koaptation mit diesen Parametern korreliert und welche Formel das am besten voraussagt.

## **1.5.Ziele der Arbeit**

Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung einer einfachen mathematischen Formel aus den echokardiographischen Parametern zur Auswahl der Größe des passenden Annuloplastieringes. Dies soll der standardisierten Anwendung chirurgischer Rekonstruktionstechniken dienen.

## **2. Methode und Patientenauswahl**

### **2.1. Patientenselektion**

In dieser Studie wurden alle Patienten mit primärer Mitralklappeninsuffizienz (Carpentier Typ 2) erfasst, die sich im Zeitraum von Januar 2018 bis Dezember 2021 im Klinikum Dortmund einer Mitralklappenrekonstruktion unterzogen haben. Patienten ohne verfügbare oder unscharfe präoperative oder postoperative echokardiographische Daten wurden von unserer Studie ausgeschlossen.

## 2.2. Datenerhebung

Für die Zwecke dieser Studie haben wir retrospektiv demographische Daten (z.B. Alter, Geschlecht), Begleiterkrankungen (z.B. andere Klappenvitien, koronare Herzerkrankung, pulmonale Hypertonie), präoperative echokardiographische Daten, intraoperative Daten, postoperative Komplikationen und postoperative echokardiographische Parameter erhoben. Diese Daten wurden aus der elektronischen Akte des jeweiligen Patienten entnommen. In den folgenden Tabellen werden die erfassten patientenbezogenen Parameter aufgelistet (Tabelle 6-10).

<b>Tabelle 6: Präoperativ erfasste patientenbezogene Parameter</b>		
<b>Parameter</b>	<b>Abkürzung</b>	<b>Legende</b>
Alter		Alter in Jahren zur Zeit der Operation
Geschlecht		weiblich, männlich
Körpergröße		in m
Körpergewicht		in kg
Body Mass Index	BMI	in kg/m <sup>2</sup>
<i>Body Surface Area</i>	BSA	in m <sup>2</sup>
<p><i>NYHA (New York Heart Association) Klassifikation*</i></p> <p>* Die NYHA-Klassifikation geht auf Empfehlungen der New York Heart Association zurück und ist bis heute ein etabliertes Klassifikationssystem der Herzinsuffizienz.</p>		<p><i>Stadium I: Herzerkrankung ohne körperliche Limitation. Alltägliche körperliche Belastung verursacht keine inadäquate Erschöpfung, Rhythmusstörungen, Luftnot oder Angina pectoris.</i></p> <p><i>Stadium II: Herzerkrankung mit leichter Einschränkung der körperlichen Leistungsfähigkeit. Keine Beschwerden in Ruhe. Alltägliche körperliche Belastung verursacht Erschöpfung, Rhythmusstörungen, Luftnot oder Angina pectoris.</i></p> <p><i>Stadium III: Herzerkrankung mit höhergradiger Einschränkung der körperlichen Leistungsfähigkeit bereits bei leichter Tätigkeit. Keine Beschwerden in Ruhe. Geringe körperliche Belastung verursacht</i></p>

		<p><i>Erschöpfung, Rhythmusstörungen, Luftnot oder Angina pectoris.</i></p> <p><i>Stadium IV: Herzerkrankung mit Beschwerden bei allen körperlichen Aktivitäten und in Ruhe. Bettlägerigkeit.</i></p> <p><i>*übernommen von der Nationalen Versorgungs-Leitlinie für chronische Herzinsuffizienz, 3. Auflage, Version 3, AWMF-Register-Nr. nvl-006[76]</i></p>
Vorhofflimmern	VHF	
Trikuspidalklappeninsuffizienz	TI	
Aortenklappeninsuffizienz	AI	
Arterielle Hypertonie	AH	
Diabetes mellitus aller Typen	DM	
Pulmonale Hypertonie	PH	
Endokarditis an Mitral- oder Aortenklappen		
Koronare Herzerkrankung	KHK	
Dialyse		
Z.n. Schlaganfall		
Schrittmacher oder Defibrillator Träger	SM oder ICD	

<b>Tabelle 7: Postoperativ erfasste patientenbezogene Parameter</b>		
<b>Parameter</b>	<b>Abkürzung</b>	<b>Legende</b>
Wundheilungsstörung	WHST	
Nachblutungen		
Rethorakatomie		
Herzrhythmusstörungen	HRST	
Zwerchfellhochstand, phrenicus Läsion		
Ventilation >48h		
Dialyse		
Sepsis		
Lungenembolie	LAE	
Schlaganfall		
Klappenrandleck		
Klappenendokarditis		

Reanimation		
Dissektion		
Verletzung der Koronargefäße		
Postoperativ neue Schrittmacher oder Defibrillator Implantation	SM oder ICD	
Andere Komplikationen		
Mortalität im Krankenhaus		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Nein</li> <li>○ Ja, intraoperativ</li> <li>○ Ja, im Krankenhaus innerhalb 30 Tagen</li> </ul>
Todesursache		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Tamponade</li> <li>○ Multiorganversagen</li> <li>○ Dialyse</li> <li>○ Nicht kardiale Ursache</li> <li>○ Kardiogener Schock</li> <li>○ Herzrhythmusstörungen</li> <li>○ unbekannt</li> </ul>

<b>Tabelle 8: Präoperativ erfasste echokardiographische Parameter</b>		
<b>Parameter</b>	<b>Abkürzung</b>	<b>Legende</b>
Mitralklappenpathologie		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Mitralklappenstenose</li> <li>○ Mitralklappeninsuffizienz</li> <li>○ Kombiniertes Mitralklappenvitium</li> <li>○ Mitralklappenendokarditis</li> </ul>
Präoperative linksventrikuläre Funktion	LVEF	in %
Präoperative linksventrikuläre Funktion	LVEF	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Normale LVEF, &gt;55%</li> <li>○ Leichtgradig reduzierte LVEF, 45-55%</li> <li>○ Mittelgradig reduzierte LVEF, 30-44%</li> <li>○ Hochgradig reduzierte LVEF, &lt;30%</li> </ul>
Größe des linken Atriums	LA	in ml
Intraventrikuläres Septum	IVS	in mm
Posteriore Wand	PWS	in mm
Rechtsventrikuläre Funktion	TAPSE	in mm
Trikuspidalklappeninsuffizienz	TI	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Keine oder minimale TI</li> <li>○ Leichtgradige TI</li> <li>○ Mittelgradige TI</li> <li>○ Schwergradige TI</li> </ul>

Präoperative Mitralklappenregurgitation bzw. Mitralklappeninsuffizienz	MI	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Keine oder minimale MI</li> <li>○ Leichtgradige MI</li> <li>○ Mittelgradige MI</li> <li>○ Schwergradige MI</li> </ul>
Präoperativer systolischer pulmonalarterieller Druck		in mmHg
Effektive Mitralklappen- Regurgitationsfläche	MK EROA	in cm <sup>2</sup>
Mitralklappen- Regurgitationsvolumen	MK RVOL	in ml
<i>Vena contracta</i>	VC	in mm
Linksventrikulärer endsystolischer Diameter	LVESD	in mm
Linksventrikuläres endsystolisches Volumen	LVESV	in ml
Linksventrikuläres enddiastolisches Volumen	LVEDV	in ml
Länge des anterioren Mitralklappensegels		in mm
Länge des posterioren Mitralklappensegels		in mm
Abstand der Kommissuren	CC-Abstand	in mm
Anterio-posteriore Abstand	AP-Abstand	in mm
<i>Tenting Height</i>		in mm

<b>Tabelle 9: Postoperativ erfasste echokardiographische Parameter</b>		
<b>Parameter</b>	<b>Abkürzung</b>	<b>Legende</b>
Postoperative Mitralklappeninsuffizienz	MI	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Keine oder minimale MI</li> <li>○ Leichtgradige MI</li> <li>○ Mittelgradige MI</li> <li>○ Schwergradige MI</li> <li>○ Unbekannt</li> </ul>
Postoperatives Klappenrandleck		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Keine</li> <li>○ Ja</li> <li>○ Unbekannt</li> </ul>
Linksventrikuläre Funktion vor der Entlassung	LVEF	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Normale LVEF, &gt;55%</li> <li>○ Leichtgradig reduzierte LVEF, 45-55%</li> <li>○ Mittelgradig reduzierte LVEF, 30-44%</li> <li>○ Hochgradig reduzierte LVEF, &lt;30%</li> </ul>

		○ Unbekannt
Linksventrikuläre Funktion vor der Entlassung	LVEF	in %
Linksventrikuläres endsystolisches Volumen	LVESV	in ml
Linksventrikuläres enddiastolisches Volumen	LVEDV	in ml
Mittlerer Mitralklappengradient	MV PG Mean	in mmHg
Maximaler Mitralklappengradient	MV PG Max	in mmHg
Anterio-posteriorer Abstand	AP-Abstand	in mm
Koaptationshöhe	Koap-Höhe	in mm

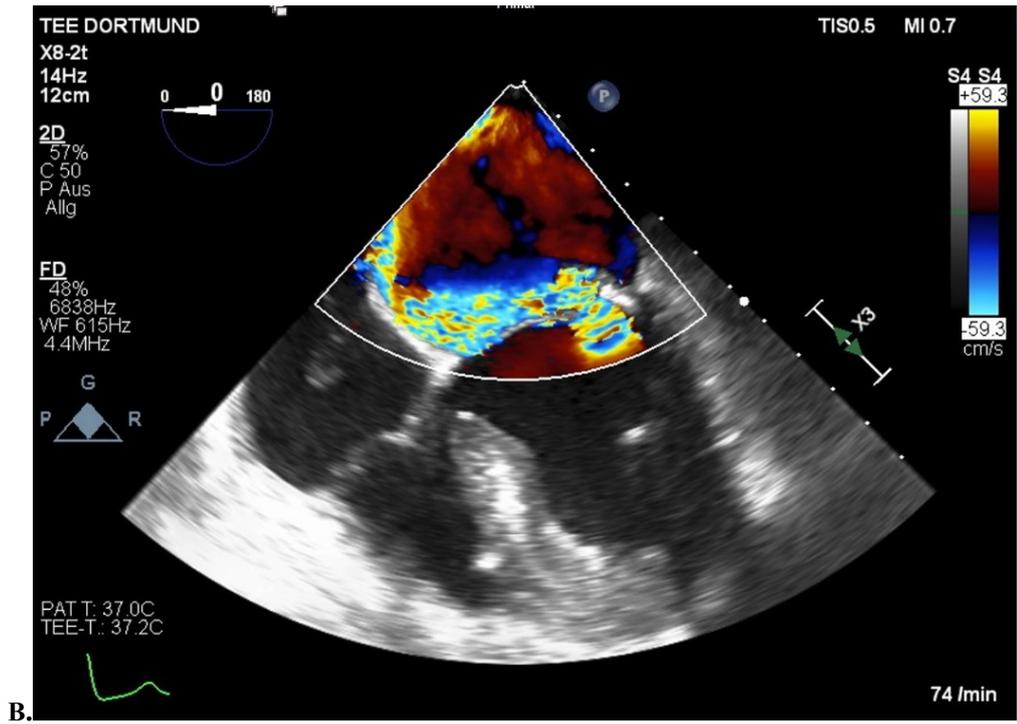
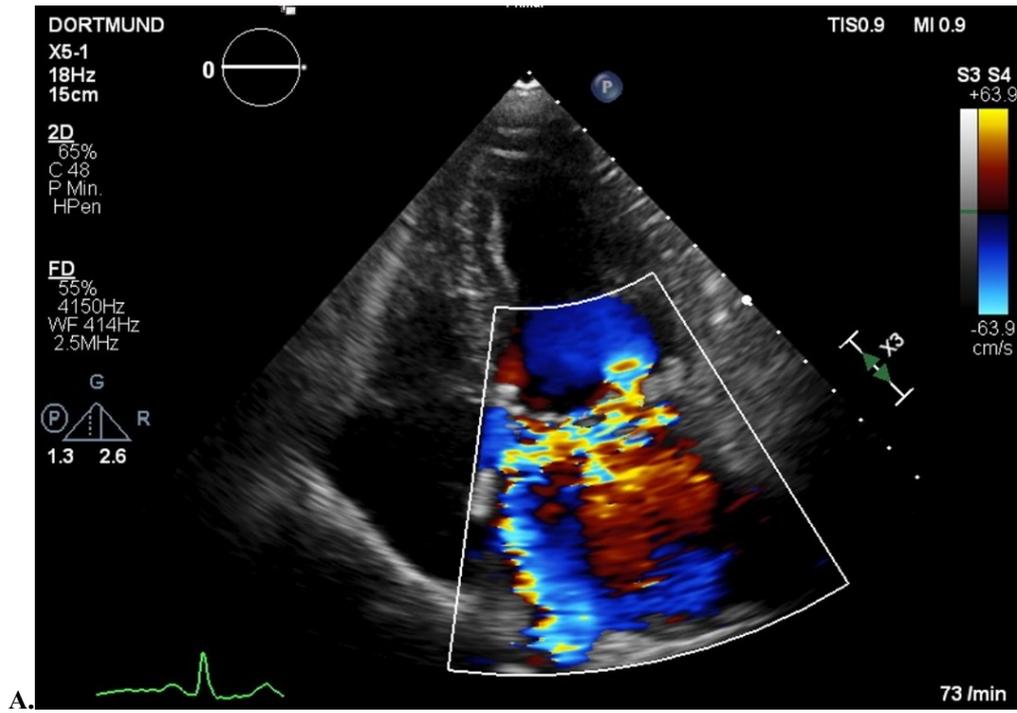
<b>Tabelle 10: Intraoperative Daten</b>		
<b>Parameter</b>	<b>Abkürzung</b>	<b>Legende</b>
Zugang		○ Minimalinvasiv (durch laterale Thorakotomie) ○ Sternotomie (offen chirurgisch)
Aortale Okklusion		○ Aortenklemme ○ intraaortales Okklusionssystem mit Kammerflimmern ○ unbekannt
Begleitverfahren		○ Aortenklappenersatz ○ Trikuspidalklappenrekonstruktion ○ PFO-Verschluss ○ Kryoablation ○ Bypass Operation ○ LAA-Verschluss
Intraoperative Komplikationen	SAM: systolische anteriore Bewegung	○ Koronargefäßverschluss ○ Aortendissektion ○ Mitralklappeninsuffizienz $\geq$ II° ○ Ruptur/Perforation einer Herzhöhle ○ Dekompensation ○ Rhythmusstörungen ○ Vaskuläre Komplikation ○ <i>Low cardiac output</i> Syndrom ○ SAM-Phänomen ○ andere
Therapie des <i>low cardiac output</i> Syndroms		○ Keine mechanische Therapie ○ IABP ○ ECMO ○ Impella ○ Sonstiges
Nur nach Rekonstruktion, Postoperatives SAM-Phänomen		○ Ja ○ Nein ○ Maßnahmen
Konversion zur Sternotomie		○ Nein ○ Ja ○ unbekannt

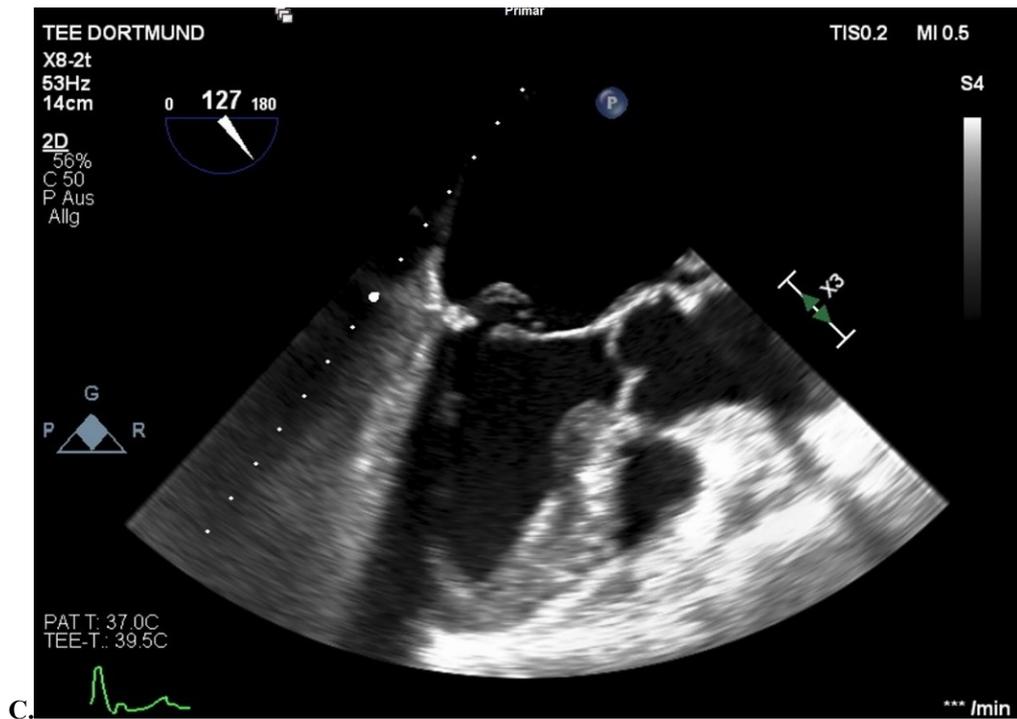
Grund für Konversion		○
Mitralklappenrekonstruktion		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Rekonstruktion ohne Ring</li> <li>○ Rekonstruktion mit Edwards Physio I Ring</li> <li>○ Rekonstruktion mit Edwards Physio II Ring</li> <li>○ Rekonstruktion mit Medtronic Simulus Annuloplastie-Ring</li> <li>○ Rekonstruktion mit Medtronic FUTURE BAND</li> <li>○ GeoForm Annuloplasty-Ring</li> <li>○ Sorin MEMO 3D Ring</li> <li>○ Sonstiges</li> </ul>
Größe des Annuloplastieringes		24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40
Prolaps in welchem Segment		A1, A2, A3, P1, P2, P3
Mitralklappe Rekonstruktion Methode		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <i>GoreTex</i> Nähte</li> <li>○ <i>Fertig Loops</i></li> <li>○ <i>Keil Resection</i></li> <li>○ <i>Cleft formation</i></li> <li>○ <i>Chordal transfer</i> von PML an AML</li> <li>○ <i>Leaflet Augmentation</i></li> </ul>
Präoperativ Annulus Charakteristika		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Normal</li> <li>○ Dilatiert</li> <li>○ Kalzifiziert</li> <li>○ unbekannt</li> </ul>
Führende Genese der Mitralklappeninsuffizienz		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Primär</li> <li>○ Sekundär</li> <li>○ Gemischt, überwiegend valvulär degenerative</li> <li>○ gemischt, überwiegend funktionell</li> <li>○ unbekannt</li> </ul>
Präoperative Klassifikation nach Carpentier		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Type I</li> <li>○ Type II</li> <li>○ Type IIIa</li> <li>○ Type IIIb</li> <li>○ unbekannt</li> </ul>
Grund für die Mitralklappeninsuffizienz		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Normal</li> <li>○ Prolaps</li> <li>○ Perforation</li> <li>○ Verkalkung/ Sklerosierung</li> <li>○ <i>Cleft formation</i></li> <li>○ <i>Flail Leaflet</i></li> <li>○ Papillarmuskelruptur</li> <li>○ Erhebliche Koaptationslücke</li> <li>○ Fibrotische Verdickung</li> <li>○ Vegetation</li> <li>○ Kommissurenfusionen</li> <li>○ Andere</li> </ul>
Indikation für die Operation		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Symptome</li> <li>○ EF ≤ 60%</li> <li>○ EF ≤ 30%</li> <li>○ LVESD ≥ 45 mm</li> <li>○ Neu aufgetretenes Vorhofflimmern</li> <li>○ Systolischer pulmonalarterieller Druck &gt;40 mmHg</li> </ul>
Barlow Erkrankung, fibroelastisches Defizit		

Charakteristika der Chordae		<input type="radio"/> normal <input type="radio"/> rupturiert <input type="radio"/> elongiert <input type="radio"/> fusioniert <input type="radio"/> unbekannt
Risiko für postoperatives SAM-Phänomen		<input type="radio"/> Kein Risiko <input type="radio"/> Leichtes Risiko <input type="radio"/> Moderates Risiko <input type="radio"/> Hohes Risiko <input type="radio"/> unbekannt
Nur nach Rekonstruktion, postoperatives SAM-Phänomen		<input type="radio"/> Ja <input type="radio"/> Nein <input type="radio"/> Maßnahmen

### 2.3. Echokardiographie

Alle Patienten bekamen präoperativ eine transthorakale und transösophageale Echokardiographie mit dem gleichen Echokardiographiegerät (Philips epiq 7) gemäß der Empfehlung der europäischen Leitlinien für Echokardiographie [14] inkl. der Quantifizierung der Mitralklappeninsuffizienz. Retrospektiv erfolgte die Bestimmung bzw. Messung der Länge des anterioren Mitralklappensegels (AML) im Segment 2, der Länge des posterioren Mitralklappensegels (PML) im Segment 2 und des interkommissuralen Abstandes aus der uns vorliegenden echokardiographischen Datenbank (Abb. 13). Ausführlicher erfolgte die Bestimmung der AML- und PML-Länge auf einer transösophagealen Ebene mit einer 120-140° Angulation und des interkommissuralen Abstandes in der transösophagealen Anlotung bei 50-90°. In der Tabelle 8 werden detailliert alle präoperativ erfassten echokardiographische Daten aufgelistet. Postoperativ wurde das Ergebnis der Mitralklappenrekonstruktion (Rest-Insuffizienz, Gradienten) sowie die linksventrikuläre Funktion evaluiert. Retrospektiv wurde die postoperative Koaptationshöhe gemessen (Tabelle 9). Die postoperativen transthorakalen echokardiographischen Untersuchungen wurden mit dem Philips epiq 7 Gerät und/oder mit dem GE Vivid E 95 Gerät durchgeführt.





**Abb. 13: Echokardiographische Bilder aus unserer Datenbank**

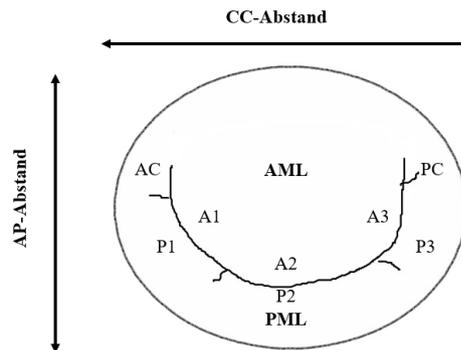
- A. Hochgradige primäre Mitralklappeninsuffizienz (transthorakales Bild, 4 Kammerblick)
- B. Hochgradige primäre Mitralklappeninsuffizienz (transösophageales Bild, 0° Angulation)
- C. Mitralklappenprolaps des posterioren Segels ‚flail-leaflet‘ (transösophageales Bild, 127° Angulation)

## 2.4. Statistische Analyse

Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung eines mathematischen Zusammenhangs zwischen echokardiographischen Parametern und implantiertem Annuloplastierung. Bei den kommerziell erhältlichen Annuloplastierungen ist der AP-Abstand vorgegeben. Da der Mechanismus der Annuloplastie in erster Linie in einer Verkürzung des durch einer Annulusdilatation vergrößerten anterior-posterioren Abstandes besteht, sollte nach echokardiographischer Bestimmung der Längen beider Mitralklappensegel die erzielte Koaptationshöhe durch den AP-Abstand determiniert sein. Daher, je kürzer der AP-Abstand ist, desto größer wird die Koaptationshöhe. Damit könnte, entgegen dem bisher üblichen Vorgehen, bereits präoperativ nach echokardiographischen Messungen der Mitralklappen, der passende Annuloplastierung ausgewählt werden; dieser ließe sich hypothetisch nach folgender Formel berechnen:

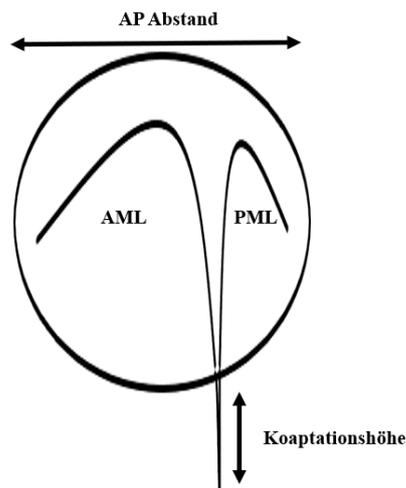
Länge des anterioren Mitralklappensegels (AML) im 2. Segment + Länge des posterioren Mitralklappensegels (PML) im 2. Segment – 2 x erzielte postoperative Koap-Höhe = erforderlicher AP-Abstand des Ringes.

$$\text{AML Länge} + \text{PML Länge} - 2 \times \text{erzielte postoperative Koap-Höhe} = \text{erforderlicher AP-Abstand des Ringes.}$$



A.

B. Formel:  $\text{AML Länge} + \text{PML Länge} - 2 \times \text{erzielte postoperative Koap-Höhe} = \text{erforderlicher AP-Abstand des Ringes.}$



C

Abb. 14: Skizze der Mitralklappe

AP-Abstand: anterior-posteriore Abstand, CC-Abstand: interkommissuraler Abstand, AML: anteriores Mitralklappensegel, PML: posteriores Mitralklappensegel, AC: anteriore Kommissur, PC: posteriore Kommissur, Koapt-Höhe = Koaptationshöhe

Nun haben wir retrospektiv bei 103 Patienten, die sich im Klinikum Dortmund im Zeitraum 2018 bis 2021 einer Mitralklappenannuloplastie wegen primärer Mitralklappeninsuffizienz (Carpentier Typ 2) unterzogen haben, die vorhandenen transösophagealen Echokardiographien ausgewertet und die Längen des AML, PML, den Abstand der Kommissuren (CC-Abstand) und die postoperative Koaptationshöhe (Koap-Höhe) gemessen. Im ersten Schritt haben wir die sich aus der o.g. Formel errechnete Koaptationshöhe mit der tatsächlichen verglichen und den Korrelationskoeffizienten ermittelt. Anschließend wurden die Faktoren ermittelt, die zu einer relevanten Fehleinschätzung der Koaptationshöhe durch die Anwendung der Formel führen. Wir betrachten eine Abweichung von mehr als 6 mm als relevant, weil bei einer gewünschten Koaptationshöhe von mind. 8 mm dann im negativen Fall eine unzureichende Koaptation von  $< 2$  mm resultieren würde. Für die in Frage kommenden Risikofaktoren haben wir *univariate* logistische Regression auf den Endpunkt Abweichung  $> 6$  mm angewendet und Verläufe von *Odds Ratios* ermittelt, welche das Risiko von Fehleinschätzungen über die Werteverteilung der jeweiligen Variablen darstellen, um so Schwellenwerte zu identifizieren (*Restricted Cubic Splines*).

## 2.5. Ethikvotum

Die Durchführung dieser Studie wurde von der Ethikkommission der Ärztekammer Westfalen-Lippe der Westfälischen Wilhelms-Universität genehmigt. Die Studiennummer lautet 2021-008-f-S. Ein Amendment-Votum in Bezug auf das Zeitfenster der Datenanalyse wurde von der Ethikkommission der Ärztekammer Westfalen-Lippe der Westfälischen Wilhelms-Universität am 01.08.2022 genehmigt.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Präoperative Daten

##### 3.1.1. Demographische Daten

In dieser Studie wurden 103 Patienten, davon 64 Männer (62.1%) und 39 Frauen (37,9%) eingeschlossen. Das Durchschnittsalter der Patienten zum Operationszeitpunkt betrug hier  $61.5 \pm 11.4$  Jahre. In der folgenden Tabelle (Tabelle 11) sind die demographischen Daten des Patientenkollektivs aufgelistet.

<b>Tabelle 11: Demographische Daten</b>		
Parameter	Mittelwert	Häufigkeit in %
Männliches Geschlecht	64	62.14
Weibliches Geschlecht	39	37,86
Alter	$61.5 \pm 11.4$	
BMI	$25.70 \pm 4.5$	

##### 3.1.2. Präoperative Symptomatik und Komorbidität

Die Mehrheit der Patienten (82,3%) hat präoperativ eine symptomatische Mitralklappeninsuffizienz mit Beschwerden unter leichter und stärkerer Belastung und befand sich somit in einem klinischen Stadium NYHA II bis III (Tabelle 12).

<b>Tabelle 12: Präoperative Symptomatik nach NYHA-Klassifikation</b>	
Parameter	Häufigkeit in %
NYHA I	15.7
NYHA II	43.1
NYHA III	39.2
NYHA IV	2

In der Tabelle 13 sind die wichtigsten präoperativen Komorbiditäten, die wir berücksichtigt haben und deren Häufigkeit aufgelistet. In etwa 70% unseres

Patientenkollektivs wurde zum Zeitpunkt der präoperativen Vorbereitung eine begleitende Trikuspidalklappeninsuffizienz unterschiedlichen Schweregrades beobachtet. Ein Drittel davon wies präoperativ eine koronare Herzerkrankung oder Vorhofflimmern auf. Eine pulmonale Hypertonie wurde in der Hälfte unserer Patienten beobachtet.

<b>Tabelle 13: Präoperative Komorbiditäten</b>	
<b>Parameter</b>	<b>Häufigkeit in %</b>
Vorhofflimmern	34.0
Trikuspidalklappeninsuffizienz	69.9
Aortenklappeninsuffizienz	21.4
Arterielle Hypertonie	57.3
Pulmonale Hypertonie	50
Diabetes mellitus	4.9
Koronare Herzerkrankung	28.2
Endokarditis an Mitral- oder Aortenklappe	1.9
Dialyse	0
Schrittmacher oder Defibrillator-Träger	1

### **3.2. Intraoperative Daten**

Ein Annuloplastierung wurde im gesamten Patientenkollektiv (103 Patienten) implantiert. Vier Annuloplastieringe unterschiedlicher Größe und mit unterschiedlichen Eigenschaften wurden intraoperativ ausgewählt (Tabelle 14).

<b>Tabelle 14: Annuloplastieringe</b>		
<b>Parameter</b>	<b>n</b>	<b>Häufigkeit in %</b>
CG Future	26	25.3
Physio I	13	12.6
Physio II	54	52.4
Simulus	10	9.7

### 3.3. Postoperative Daten

In 14,6% unserer Fälle kam es in den ersten 30 postoperativen Tagen zu einer Nachblutung und/oder Rethorakotomie. Am häufigsten sind neu aufgetretene Herzrhythmusstörungen (22,3%, n = 23) in den ersten 30 postoperativen Tagen beobachtet worden. In 4,9% (n = 5) aller Fälle war die Implantation eines permanenten Schrittmachers mit/ohne Defibrillatorfunktion notwendig. Die übrigen Komplikationen und ihrer Häufigkeit sind in der folgenden Tabelle (Tabelle 15) dargestellt.

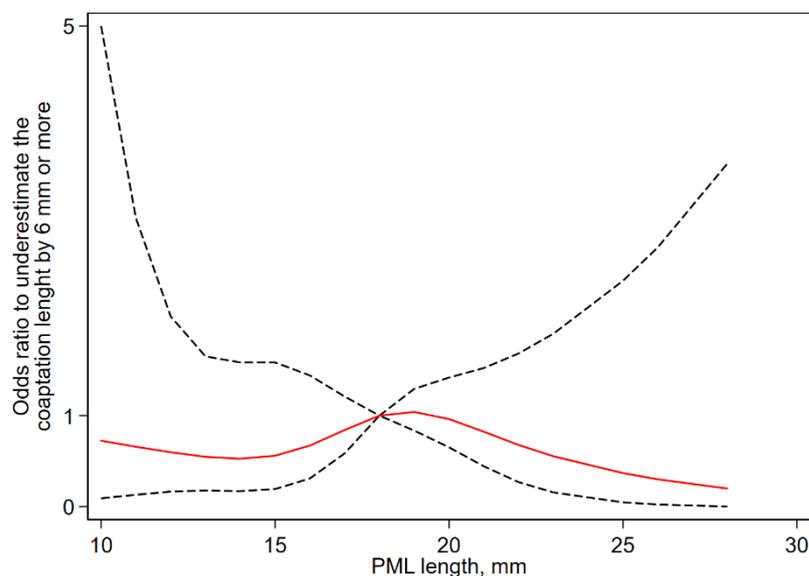
<b>Tabelle 15: Postoperative Komplikationen (in den ersten 30 Tagen)</b>		
<b>Parameter</b>	<b>n</b>	<b>Häufigkeit in %</b>
Wundheilungsstörung	0	0
Nachblutungen/Rethorakotomie	15	14.6
Herzrhythmusstörungen	23	22.3
Zwerchfellhochstand, phrenicus Läsion	8	7.8
Postoperativ Ventilation >48h	5	4.9
Dialyse	2	1.9
Sepsis	5	4.9
Lungenembolie	0	0
Schlaganfall	3	2.9
Klappenrandleck	2	1.9
Klappenendokarditis	1	1.0
Reanimation	2	1.9
Dissektion	2	1.9
Verletzung der Koronargefäße	0	0
Postoperativ neue Schrittmacher oder Defibrillator Implantation	5	4.9

### 3.4. Ergebnisse mit Anwendung der Formel

Die mit unserer hypothetischen Formel (Länge des anterioren Mitralklappensegels + Länge des posterioren Mitralklappensegels - 2 x erzielte postoperative Koaptationshöhe = erforderlicher AP-Abstand des Ringes) errechneten Koaptationshöhen korrelieren

signifikant mit den postoperativ beobachteten Koaptationshöhen ( $p < 0.05$ ). In ca. 2/3 der Fälle konnte die Koaptationshöhe mit der Anwendung unserer Formel ausreichend ermittelt werden.

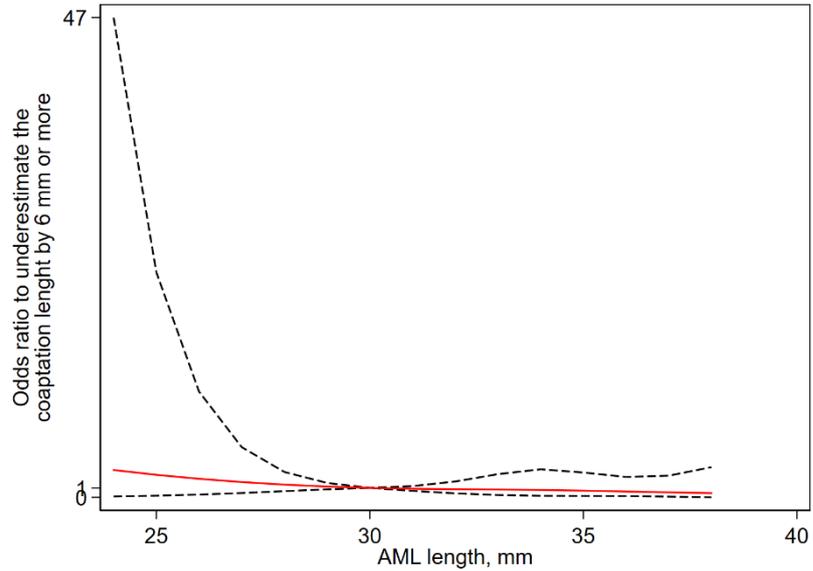
Für die in Frage kommenden Risikofaktoren haben wir univariate logistische Regression auf den Endpunkt Abweichung  $> 6\text{mm}$  angewendet und Verläufe von *Odds Ratios* ermittelt, welche das Risiko von Fehleinschätzungen über die Werteverteilung der jeweiligen Variablen darstellen, um so Schwellenwerte zu identifizieren (*Restricted Cubic Splines*). Die Länge des posterioren Mitralklappensegels hat keinen Einfluss auf unsere Formel gehabt. Dieses Verhältnis wird im folgenden Diagramm dargestellt (Abb. 15).



**Abb. 15: Verhältnis zwischen PML Länge und Abweichung  $>6\text{ mm}$  in Bezug auf unsere Formel**

Formel: Länge des anterioren Mitralklappensegels + Länge des posterioren Mitralklappensegels - 2 x erzielte postoperative Koaptationshöhe = erforderlicher AP-Abstand des Ringes  
PML: posteriores Mitralklappensegel

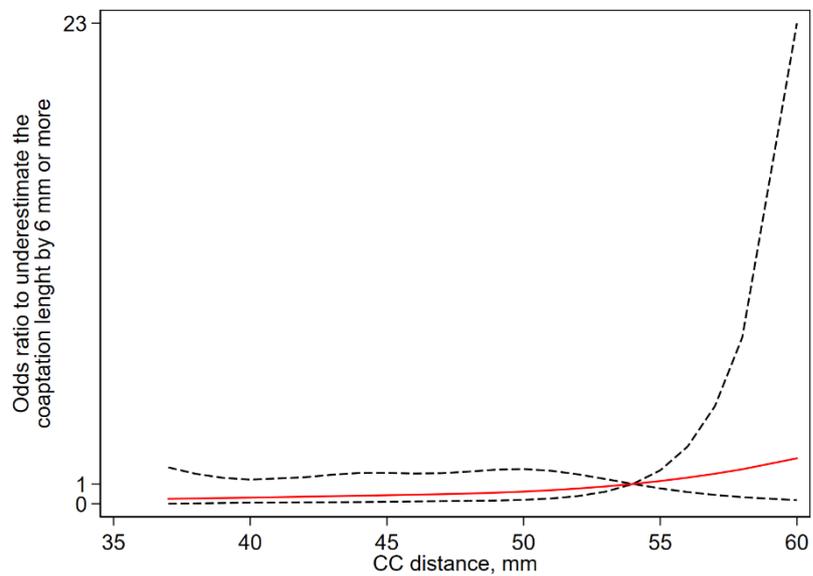
Bei größeren CC-Abständen und kürzeren AML Längen nimmt die Diskrepanz zwischen errechneter und beobachteter Koaptationshöhe zu ( $p < 0.001$  resp.  $p < 0.05$ ) (Abb. 16 und 17).



**Abb. 16: Verhältnis zwischen AML Länge und Abweichung >6 mm in Bezug auf unsere Formel**

Formel: Länge des anterioren Mitralklappensegels + Länge des posterioren Mitralklappensegels - 2 x erzielte postoperative Koaptationshöhe = erforderlicher AP-Abstand des Ringes

AML: anteriores Mitralklappensegel



**Abb. 17: Verhältnis zwischen CC-Abstand und Abweichung >6 mm in Bezug auf unsere Formel**

Formel: Länge des anterioren Mitralklappensegels + Länge des posterioren Mitralklappensegels - 2 x erzielte postoperative Koaptationshöhe = erforderlicher AP-Abstand des Ringes

CC-Abstand: Interkommissuraler Abstand

## 4. Diskussion

Die Mitralklappenrekonstruktion ist eine etablierte herzchirurgische Methode zur Behandlung der Mitralklappeninsuffizienz. Für ein gutes postoperatives Langzeitergebnis ist die richtige Auswahl des passenden Annuloplastierendes entscheidend. Trotz zahlreicher Publikationen und Vergleichsstudien der verschiedenen Rekonstruktionstechniken gibt es keine reproduzierbare und wissenschaftlich validierte Herangehensweise für die Auswahl des passenden Annuloplastierendes. Die Auswahl des Annuloplastierendes erfolgt auf Grundlage der vorliegenden Pathologie unter direkter Sicht und nach persönlichen Präferenzen der Herzchirurgen. Mit dieser Arbeit haben wir versucht, einen Zusammenhang zwischen einfachen echokardiographischen Parametern und implantierten Annuloplastierungen zu erstellen. Dies soll einen Beitrag zu einer standardisierten Anwendung von herzchirurgischen Rekonstruktionstechniken leisten sowie für den individuellen Patienten die Haltbarkeit der Rekonstruktion optimieren und ein Wiederauftreten von Beschwerden und eine unnötige Re-Operation vermeiden.

Zum Zwecke dieser Studie haben wir retrospektiv echokardiographische und perioperative Daten 103 Patienten analysiert, die sich im Zeitraum von 2018 bis 2021 einer Mitralklappenrekonstruktion im Klinikum Dortmund unterzogen haben. Die Bildqualität der echokardiographischen Bilder war entscheidend für unsere Analyse. Patienten ohne verfügbare präoperative oder postoperative echokardiographische Daten oder mit unscharfen verfügbaren Bildern wurden vor Beginn der Studie ausgeschlossen. Die Herzchirurgie im Klinikum Dortmund gilt mit mehr als 25 Mitralklappenrekonstruktionen pro Jahr und mit vielen internationalen Gästen als Referenzzentrum für die Mitralklappenchirurgie. Unser Ziel war anhand von mindestens 100 erfolgreich durchgeführten Mitralklappenrekonstruktionen eine anwendbare Formel für die klinische Praxis zu erstellen.

Die präzise Vermessung der Mitralklappe ist aufgrund ihrer dynamischen Veränderungen während des kardialen Zyklus herausfordernd. Dennoch konnten wir mit der Anwendung unserer echokardiographisch basierten Formel: **Länge des anterioren Mitralklappensegels + Länge des posterioren Mitralklappensegels – 2 x erzielte Koaptationshöhe = erforderlicher antero-posteriorer Abstand** des Annuloplastierendes in 2/3 unserer Fälle die postoperative Koaptationshöhe erfolgreich ermitteln. Diese Formel unterstützt die präoperative Auswahl eines passenden

Annuloplastierendes in Fällen mit einem ausreichend großen anterioren Segel und einem noch nicht so weit dilatierten Annulus. In ca. 1/3 der Fälle, wenn das AML  $\leq 30$ mm und der CC-Abstand  $> 54$ mm ist, kommt es zu einer relevanten Fehleinschätzung. Wichtig ist hier zu betonen, dass die Auswahl des Annuloplastierendes auf die anatomisch natürliche Länge beider Mitralklappensegel basierte. Das bedeutet, dass unsere Rekonstruktionstechniken auf das ‚respect‘ Prinzip basierten.

In der klinischen Praxis wenden wir bereits unsere Formel mit guten Ergebnissen an. In einzelnen Fällen, wenn zwischen 2 Annuloplastierendgrößen gewählt werden muss, wird der Ring gewählt, der am nächsten zum CC-Abstand herankommt. Prospektiv entwickeln wir eine modifizierte Formel, die den CC-Abstand und die AML-Länge  $< 30$  mm bei dieser Auswahl berücksichtigt. Prospektive Studien mit einem größeren Patientenkollektiv sind notwendig für die mathematische Optimierung unserer Formel (u.a. Berücksichtigung des CC-Abstandes und AML-Länge  $< 30$  mm). Außerdem wäre die Anpassung der Formel evtl. für die verschiedenen Ringtypen von großer Bedeutung.

In der Literatur findet sich wenige Publikationen zur klinischen Anwendung der echokardiographisch gesteuerten Auswahl des passenden Annuloplastierendes. Ein international anerkannter Herzchirurg, McCarthy [39], publizierte im Jahr 2020 gute postoperative Ergebnisse nach Mitralklappenrekonstruktion basierend auf einem quantitativen Algorithmus zur Auswahl des passenden Annuloplastierendes. McCarthy [39] führt gemäß seiner Publikation vom Jahr 2020 primär eine Segelplastik an einem oder an beiden prolabierten Segeln durch. Dann wählt McCarthy den passenden Annuloplastierend unter echokardiographischer Bestimmung des korrigierten AP-Abstandes basierend auf der korrigierten Länge beider Mitralklappensegel nach der Segelplastik (vor allem des AML) mit dem Ziel einer postoperativen Koaptationslänge von 5-10 mm. Diese Formel wurde perioperativ bei mehr als 1.000 Patienten angewendet. Die guten postoperativen Ergebnisse deuten darauf hin, dass der von McCarthy entwickelte Algorithmus und vor allem der AP-Abstand und die Länge des AML entscheidend für ein gutes postoperatives Ergebnis sind. Im Gegensatz zu uns führte die McCarthy's Arbeitsgruppe die Annuloplastierend-Auswahl nach dem ‚resect‘ Prinzip durch.

In einem systematischen Review und nach Durchsicht von mehr als 20 Publikationen zum Thema *Sizing* für die Mitralklappenrekonstruktion haben Bothe und seine Kollegen [30]

festgestellt, dass die Mehrheit der Herzchirurgen die Größe des Annuloplastierendes intraoperativ unter direkter Sicht und Anwendung des Hersteller-spezifischen *Sizer* auswählen.

Sowohl unsere Arbeit als auch die Arbeit von McCarthy zeigen, dass eine echokardiographische Bestimmung des passenden Annuloplastierendes möglich ist. Eine mathematische Modifizierung/Optimierung unserer Formel könnte das Anwendungsgebiet für chirurgische oder interventionelle Annuloplastien erweitert und dem Herzchirurgen eine Orientierung zur Auswahl des passenden Annuloplastierendes helfen.

## Literatur- und Quellenverzeichnis

1. Vahanian, A., et al., *2021 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease*. Eur Heart J, 2022. **43**(7): p. 561-632.
2. Iung, B., et al., *Contemporary Presentation and Management of Valvular Heart Disease: The EURObservational Research Programme Valvular Heart Disease II Survey*. Circulation, 2019. **140**(14): p. 1156-1169.
3. Yadgir, S., et al., *Global, Regional, and National Burden of Calcific Aortic Valve and Degenerative Mitral Valve Diseases, 1990-2017*. Circulation, 2020. **141**(21): p. 1670-1680.
4. Nkomo, V.T., et al., *Burden of valvular heart diseases: a population-based study*. The Lancet, 2006. **368**(9540): p. 1005-1011.
5. Chioncel, O., et al., *Epidemiology and one-year outcomes in patients with chronic heart failure and preserved, mid-range and reduced ejection fraction: an analysis of the ESC Heart Failure Long-Term Registry*. European journal of heart failure, 2017. **19**(12): p. 1574-1585.
6. Levack, M.M., et al., *Three-dimensional echocardiographic analysis of mitral annular dynamics: implication for annuloplasty selection*. Circulation, 2012. **126**(11 Suppl 1): p. S183-8.
7. Mak, G.J., et al., *Three-Dimensional Echocardiography Compared With Computed Tomography to Determine Mitral Annulus Size Before Transcatheter Mitral Valve Implantation*. Circ Cardiovasc Imaging, 2016. **9**(6).
8. Levine, R.A., et al., *Three-dimensional echocardiographic reconstruction of the mitral valve, with implications for the diagnosis of mitral valve prolapse*. Circulation, 1989. **80**(3): p. 589-98.
9. Stone, G.W., et al., *Clinical Trial Design Principles and Endpoint Definitions for Transcatheter Mitral Valve Repair and Replacement: Part 1: Clinical Trial Design Principles: A Consensus Document From the Mitral Valve Academic Research Consortium*. J Am Coll Cardiol, 2015. **66**(3): p. 278-307.
10. Prisker, S. and J. Dusleag, *Klappeninsuffizienzen: Mitral- und Aorteninsuffizienz*. Journal für Kardiologie - Austrian Journal of Cardiology, 2014. **21** (1-2), **20-28**.
11. Carpentier, A., *Cardiac valve surgery--the "French correction"*. J Thorac Cardiovasc Surg, 1983. **86**(3): p. 323-37.
12. Carpentier, A., D.H. Adams, and F. Filsoofi, *Carpentier's Reconstructive Valve Surgery From Valve Analysis to Valve Reconstruction*. 2010: SAUNDERS ELSEVIER.
13. Nickenig, G., et al., *Konsensus der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie – Herz- und Kreislaufforschung – und der Deutschen Gesellschaft für Thorax-, Herz- und Gefäßchirurgie zur Behandlung der Mitralklappeninsuffizienz*. Der Kardiologe, 2013. **7**(2): p. 76-90.
14. Lancellotti, P., et al., *European Association of Echocardiography recommendations for the assessment of valvular regurgitation. Part 2: mitral and tricuspid regurgitation (native valve disease)*. Eur J Echocardiogr, 2010. **11**(4): p. 307-32.
15. Hagendorff, A., et al., *Manual zur Indikation und Durchführung der Echokardiographie – Update 2020 der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie*. Der Kardiologe, 2020. **14**(5): p. 396-431.
16. Otto, C.M., et al., *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**(5): p. e72-e227.
17. Gaur, P., et al., *Mitral valve repair versus replacement in the elderly: short-term and long-term outcomes*. J Thorac Cardiovasc Surg, 2014. **148**(4): p. 1400-6.

18. Silaschi, M., et al., *Is Mitral Valve Repair Superior to Mitral Valve Replacement in Elderly Patients? Comparison of Short- and Long-Term Outcomes in a Propensity-Matched Cohort*. J Am Heart Assoc, 2016. **5**(8).
19. Sundermann, S.H., et al., *Mitral valve surgery: right lateral minithoracotomy or sternotomy? A systematic review and meta-analysis*. J Thorac Cardiovasc Surg, 2014. **148**(5): p. 1989-1995 e4.
20. Holzhey, D.M., et al., *Minimally invasive versus sternotomy approach for mitral valve surgery in patients greater than 70 years old: a propensity-matched comparison*. Ann Thorac Surg, 2011. **91**(2): p. 401-5.
21. Raanani, E., et al., *Quality of mitral valve repair: median sternotomy versus port-access approach*. J Thorac Cardiovasc Surg, 2010. **140**(1): p. 86-90.
22. Onnasch, J.F., et al., *Five years of less invasive mitral valve surgery: from experimental to routine approach*. Heart Surg Forum, 2002. **5**(2): p. 132-5.
23. Detter, C., D.H. Boehm, and H. Reichenspurner, *Minimally invasive valve surgery: different techniques and approaches*. Expert Rev Cardiovasc Ther, 2004. **2**(2): p. 239-51.
24. Davierwala, P.M., et al., *Minimally invasive mitral valve surgery: "The Leipzig experience"*. Ann Cardiothorac Surg, 2013. **2**(6): p. 744-50.
25. Sundermann, S.H., V. Falk, and S. Jacobs, *Mitral valve reconstruction - timing, surgical techniques and results*. Swiss Med Wkly, 2012. **142**: p. w13715.
26. Van Praet, K.M., et al., *Minimally Invasive Surgical Mitral Valve Repair: State of the Art Review*. Interv Cardiol, 2018. **13**(1): p. 14-19.
27. Lawrie, G.M., *'American correction' resembles the 'respect or resect' approach*. J Heart Valve Dis, 2012. **21**(5):686-7.
28. Carpentier, A., et al., *A new reconstructive operation for correction of mitral and tricuspid insufficiency*. J Thorac Cardiovasc Surg, 1971. **61**(1): p. 1-13.
29. Albert, A.P., P; Perrier P, *Anuloplastierende für die (minimalinvasive) Mitralklappenrekonstruktion*, in *Referenz Herzchirurgie*. 2022, Thieme. p. 595-605.
30. Bothe, W., D.C. Miller, and T. Doenst, *Sizing for mitral annuloplasty: where does science stop and voodoo begin?* Ann Thorac Surg, 2013. **95**(4): p. 1475-83.
31. Chemtob, R.A., et al., *Choosing the "Best" surgical techniques for mitral valve repair: Lessons from the literature*. J Card Surg, 2019. **34**(8): p. 717-727.
32. Chikwe, J., et al., *Relation of Mitral Valve Surgery Volume to Repair Rate, Durability, and Survival*. J Am Coll Cardiol, 2017.
33. Lawrie, G.M., *Surgical treatment of mitral regurgitation*. Curr Opin Cardiol, 2020. **35**(5): p. 491-499.
34. Choo, S.J., et al., *An in vitro study of the correlation between aortic valve diameter and mitral intertrigonal distance: a simple method to select the correct mitral annuloplasty ring size*. J Heart Valve Dis, 1998. **7**(5): p. 593-7.
35. Cooray, S.D., et al., *Echocardiographic measurement of mitral intertrigonal distance is an adjunct to annuloplasty ring sizing*. J Heart Valve Dis, 2009. **18**(1): p. 106-10.
36. Cook, R.C., et al., *Echocardiographic measurements alone do not provide accurate non-invasive selection of annuloplasty band size for robotic mitral valve repair*. J Heart Valve Dis, 2006. **15**(4): p. 524-7; discussion 527.
37. Ender, J., et al., *Value of augmented reality-enhanced transesophageal echocardiography (TEE) for determining optimal annuloplasty ring size during mitral valve repair*. Ann Thorac Surg, 2008. **86**(5): p. 1473-8.
38. Theriault-Lauzier, P., et al., *Quantitative multi-slice computed tomography assessment of the mitral valvular complex for transcatheter mitral valve interventions part 2: geometrical measurements in patients with functional mitral regurgitation*. EuroIntervention, 2016. **12**(8): p. e1021-e1030.
39. McCarthy, P.M., et al., *A multiparameter algorithm to guide repair of degenerative mitral regurgitation*. J Thorac Cardiovasc Surg, 2022. **164**(3): p. 867-876 e5.

40. Ender, J., et al., *Prediction of the annuloplasty ring size in patients undergoing mitral valve repair using real-time three-dimensional transoesophageal echocardiography*. Eur J Echocardiogr, 2011. **12**(6): p. 445-53.
41. Fujii, T., et al., *Sizing of mitral annuloplasty rings using real-time three-dimensional transesophageal echocardiography and the difference between patients with and without recurrent mitral regurgitation: retrospective cohort study*. J Echocardiogr, 2020. **18**(3): p. 169-174.
42. Okamoto, H., Y. Fujimoto, and C. Teramoto, *Novel Trigone-Based Sizing Method for Mitral Ring Annuloplasty*. Ann Thorac Surg, 2020. **109**(5): p. 1385-1393.
43. Mahmood, F., et al., *Changes in mitral valve annular geometry after repair: saddle-shaped versus flat annuloplasty rings*. Ann Thorac Surg, 2010. **90**(4): p. 1212-20.
44. Grewal, J., et al., *Mitral annular dynamics in myxomatous valve disease: new insights with real-time 3-dimensional echocardiography*. Circulation, 2010. **121**(12): p. 1423-31.
45. Naoum, C., et al., *Mitral Annular Dimensions and Geometry in Patients With Functional Mitral Regurgitation and Mitral Valve Prolapse: Implications for Transcatheter Mitral Valve Implantation*. JACC Cardiovasc Imaging, 2016. **9**(3): p. 269-80.
46. Noack, T., et al., *Dynamic mitral valve geometry in patients with primary and secondary mitral regurgitation: implications for mitral valve repair*. Eur J Cardiothorac Surg, 2019. **56**(5): p. 983-992.
47. Noack, T., et al., *Acute Effect of Mitral Valve Repair on Mitral Valve Geometry*. Thorac Cardiovasc Surg, 2019. **67**(7): p. 516-523.
48. Perier, P., et al., *Prolapse of the posterior leaflet: resect or respect*. Ann Cardiothorac Surg, 2015. **4**(3): p. 273-7.
49. Seeburger, J., et al., *Minimal invasive mitral valve repair for mitral regurgitation: results of 1339 consecutive patients*. Eur J Cardiothorac Surg, 2008. **34**(4): p. 760-5.
50. Suri, R.M., H.M. Burkhart, and H.V. Schaff, *A novel method of leaflet reconstruction after triangular resection for posterior mitral valve prolapse*. Ann Thorac Surg, 2010. **89**(6): p. e53-6.
51. Padala, M., et al., *Mitral valve hemodynamics after repair of acute posterior leaflet prolapse: quadrangular resection versus triangular resection versus neochordoplasty*. J Thorac Cardiovasc Surg, 2009. **138**(2): p. 309-15.
52. Perier, P., B. Clausnizer, and K. Mistarz, *Carpentier "sliding leaflet" technique for repair of the mitral valve: early results*. Ann Thorac Surg, 1994. **57**(2): p. 383-6.
53. Asai, T., *The butterfly technique*. Ann Cardiothorac Surg, 2015. **4**(4): p. 370-5.
54. Gosev, I., et al., *Long term outcomes of posterior leaflet folding valvuloplasty for mitral valve regurgitation*. Ann Cardiothorac Surg, 2015. **4**(5): p. 428-32.
55. Grossi, E.A., et al., *Early results of posterior leaflet folding plasty for mitral valve reconstruction*. Ann Thorac Surg, 1998. **65**(4): p. 1057-9.
56. Tabata, M., et al., *Early and midterm outcomes of folding valvuloplasty without leaflet resection for myxomatous mitral valve disease*. Ann Thorac Surg, 2008. **86**(4): p. 1388-90.
57. Perier, P., et al., *Toward a new paradigm for the reconstruction of posterior leaflet prolapse: midterm results of the "respect rather than resect" approach*. Ann Thorac Surg, 2008. **86**(3): p. 718-25; discussion 718-25.
58. Schubert, S.A., et al., *Mitral Valve Repair: The French Correction Versus the American Correction*. Surg Clin North Am, 2017. **97**(4): p. 867-888.
59. Gillinov, A.M., K.G. Shortt, and D.M. Cosgrove, 3rd, *Commissural closure for repair of mitral commissural prolapse*. Ann Thorac Surg, 2005. **80**(3): p. 1135-6.
60. Cetinkaya, A., et al., *Long-term outcome after mitral valve replacement using biological versus mechanical valves*. J Cardiothorac Surg, 2019. **14**(1): p. 120.

61. Goldstone, A.B., et al., *Mechanical or Biologic Prostheses for Aortic-Valve and Mitral-Valve Replacement*. N Engl J Med, 2017. **377**(19): p. 1847-1857.
62. Maisano, F., et al., *The edge-to-edge technique: a simplified method to correct mitral insufficiency*. Eur J Cardiothorac Surg, 1998. **13**(3): p. 240-5; discussion 245-6.
63. Whitlow, P.L., et al., *Acute and 12-month results with catheter-based mitral valve leaflet repair: the EVEREST II (Endovascular Valve Edge-to-Edge Repair) High Risk Study*. J Am Coll Cardiol, 2012. **59**(2): p. 130-9.
64. Salvatore, T., et al., *Selection of the Optimal Candidate to MitraClip for Secondary Mitral Regurgitation: Beyond Mitral Valve Morphology*. Front Cardiovasc Med, 2021. **8**: p. 585415.
65. Gheorghe, L., et al., *Current Devices in Mitral Valve Replacement and Their Potential Complications*. Front Cardiovasc Med, 2020. **7**: p. 531843.
66. Scotti, A., et al., *Transcatheter therapies for secondary mitral regurgitation in advanced heart failure: what are we aiming for?* Heart Fail Rev, 2021.
67. Beckmann, A., et al., *German Heart Surgery Report 2019: The Annual Updated Registry of the German Society for Thoracic and Cardiovascular Surgery*. Thorac Cardiovasc Surg, 2020. **68**(4): p. 263-276.
68. Fattouch, K., et al., *A Comparison of 2 Mitral Annuloplasty Rings for Severe Ischemic Mitral Regurgitation: Clinical and Echocardiographic Outcomes*. Semin Thorac Cardiovasc Surg, 2016. **28**(2): p. 261-268.
69. Maisano, F., et al., *Mitral annuloplasty*. Multimed Man Cardiothorac Surg, 2009. **2009**(918): p. mmcts 2008 003640.
70. Dreyfus, G.D., et al., *"Respect when you can, resect when you should": A realistic approach to posterior leaflet mitral valve repair*. J Thorac Cardiovasc Surg, 2018. **156**(5): p. 1856-1866 e3.
71. Gelsomino, S., et al., *Insights on left ventricular and valvular mechanisms of recurrent ischemic mitral regurgitation after restrictive annuloplasty and coronary artery bypass grafting*. J Thorac Cardiovasc Surg, 2008. **136**(2): p. 507-18.
72. Ciarka, A., et al., *Predictors of mitral regurgitation recurrence in patients with heart failure undergoing mitral valve annuloplasty*. Am J Cardiol, 2010. **106**(3): p. 395-401.
73. Maisano, F., et al., *Improving mitral valve coaptation with adjustable rings: outcomes from a European multicentre feasibility study with a new-generation adjustable annuloplasty ring system*. Eur J Cardiothorac Surg, 2013. **44**(5): p. 913-8.
74. Sasaki, H., et al., *Short Coaptation Length is a Predictor of Recurrent Mitral Regurgitation After Mitral Valve Plasty*. Heart Lung Circ, 2021. **30**(9): p. 1414-1421.
75. Hage, F., et al., *Coaptation length predicts early- and intermediate-term durability following degenerative mitral repair*. European Journal of Cardio-Thoracic Surgery, 2022. **62**(3).
76. (AWMF), B.B.K.B.K.A.d.W.M.F., *Nationale VersorgungsLeitlinie Chronische Herzinsuffizienz–Langfassung*. 2019.

# Anhang

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Einteilung der Mitralklappeninsuffizienz nach Carpentier.....	- 2 -
Abb. 2: Bestimmung der Ringgröße mit der Hilfe eines <i>Sizer</i> .....	- 11 -
Abb. 3: Trianguläre Resektion.....	- 15 -
Abb. 4: Quadranguläre Resektion.....	- 15 -
Abb. 5: <i>Sliding</i> Resektion .....	- 16 -
Abb. 6: <i>Folding</i> Valvuloplastie .....	- 17 -
Abb. 7: <i>Butterfly</i> Technik .....	- 17 -
Abb. 8: <i>Folding</i> Technik.....	- 18 -
Abb. 9: Implantation von künstlichen Sehnenfaden.....	- 20 -
Abb. 10: Kommissuroplastie .....	- 21 -
Abb. 11: Verfügbare Klappen für Transkatheterersatz.....	- 24 -
Abb. 12: Isolierte Mitralklappeneingriffe in Deutschland 2006-2020 .....	- 25 -
Abb. 13: Echokardiographische Bilder aus unserer Datenbank .....	- 35 -
Abb. 14: Skizze der Mitralklappe .....	- 36 -
Abb. 15: Verhältnis zwischen PML Länge und Abweichung >6 mm in Bezug auf unsere Formel.....	- 41 -
Abb. 16: Verhältnis zwischen AML Länge und Abweichung >6 mm in Bezug auf unsere Formel .....	- 42 -
Abb. 17: Verhältnis zwischen CC-Abstand und Abweichung >6 mm in Bezug auf unsere Formel .....	- 42 -

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ursachen und Mechanismen der Mitralklappeninsuffizienz .....	- 4 -
Tabelle 2: Echokardiographische Einteilung der Mitralklappeninsuffizienz .....	- 5 -
Tabelle 3: Eigenschaften der Annuloplastieringe .....	- 8 -
Tabelle 4: Übersicht kommerziell verfügbarer Annuloplastieringe, nach Hersteller sortiert .....	- 9 -
Tabelle 5: Übersicht verfügbarer transkatheter Devices .....	- 23 -
Tabelle 6: Präoperativ erfasste patientenbezogene Parameter .....	- 27 -
Tabelle 7: Postoperativ erfasste patientenbezogene Parameter .....	- 28 -
Tabelle 8: Präoperativ erfasste echokardiographische Parameter .....	- 29 -
Tabelle 9: Postoperativ erfasste echokardiographische Parameter .....	- 30 -
Tabelle 10: Intraoperative Daten .....	- 31 -
Tabelle 11: Demographische Daten .....	- 38 -
Tabelle 12: Präoperative Symptomatik nach NYHA-Klassifikation .....	- 38 -
Tabelle 13: Präoperative Komorbiditäten .....	- 39 -
Tabelle 14: Annuloplastieringe .....	- 39 -
Tabelle 15: Postoperative Komplikationen (in den ersten 30 Tagen) .....	- 40 -

## **Danksagung**

„Γηράσκω δ' αἰεὶ πολλά διδασκόμενος“ sind die Wörter des weisen Altgriechen, Solon und bedeuten „Älter werde ich stets, niemals doch lerne ich aus“. Die Erstellung dieser Dissertation ist Teil meiner abenteuerlichen wissenschaftlichen Reise und basiert auf Solons Worten. Nun wäre diese ohne die Unterstützung der folgenden Menschen nicht möglich gewesen. Ich möchte mich bei meinem Doktorvater, Prof. Dr. med. Albert, für seine Bereitschaft und geduldige Betreuung meiner Dissertation herzlich bedanken. Ebenso gilt mein Dank meinen Co-Betreuer, Priv.-Doz. Dr. med. Aubin. Für ihre Unterstützung bei der statistischen Auswertung möchte ich den Kollegen der Herzchirurgie, Dr. med. Petrov und Dr. med. Raweh herzlich danken. Ein besonderer Dank gilt meinen Chefarzt Prof. Dr. med. Heitzer für seine langjährige Unterstützung.

Diese Arbeit widme ich meinen Eltern für ihre bedingungslose Liebe, ihre lebenslange Unterstützung und unerschütterlichen Glauben an mich. Zu guter Letzt möchte ich vom ganzen Herzen meinen Ehemann, Nikolao, und meinen Bruder, Ioanni, für ihre endlose Geduld und moralische Unterstützung danken!

---