

CT-Planung vor kathetergestütztem Mitralklappenersatz (TMVR)

CT Planning prior to Transcatheter Mitral Valve Replacement (TMVR)

Autoren

Linda Heiser¹, Robin F. Gohmann¹ , Thilo Noack², Katharina Renatus^{1,3}, Philipp Lurz^{4,5}, Holger Thiele^{3,4,5}, Patrick Seitz^{1*}, Matthias Gutberlet^{1,3,5*} 

Institute

- 1 Diagnostische und Interventionelle Radiologie, Herzzentrum Leipzig GmbH, Leipzig, Germany
- 2 Herzchirurgie, Herzzentrum Leipzig Universitätsklinik, Leipzig, Germany
- 3 Medizinische Fakultät, Universität Leipzig Medizinische Fakultät, Leipzig, Germany
- 4 Kardiologie, Herzzentrum Leipzig Universitätsklinik Klinik für Kardiologie, Leipzig, Germany
- 5 LHI, Leipzig Heart Institute, Leipzig, Germany

Key words

TMVI, TMVR, transcatheter mitral valve implantation, transcatheter mitral valve replacement, computed tomography, CT

eingereicht 30.07.2021

akzeptiert 09.11.2021

online publiziert 10.03.2022

Bibliografie

Fortschr Röntgenstr 2022; 194: 373–383

DOI 10.1055/a-1718-4182

ISSN 1438-9029

© 2022, Thieme. All rights reserved.

Georg Thieme Verlag KG, Rüdigerstraße 14, 70469 Stuttgart, Germany

Korrespondenzadresse

Frau Dr. Linda Heiser

Diagnostische und Interventionelle Radiologie, Herzzentrum Leipzig GmbH, Strümpellstraße 39, 04289 Leipzig, Germany
Tel.: +49/341/8651702

Linda.Heiser@helios-gesundheit.de

ZUSAMMENFASSUNG

Hintergrund Der Transkatheter-Mitralklappenersatz (TMVR) ist ein interventionelles Verfahren zur Behandlung einer hochgradigen Mitralklappeninsuffizienz bei Patienten mit hohem operativen Risiko.

Während der Intervention ist keine direkte Sicht auf die Mitralklappe gegeben, wodurch beispielweise eine intraoperative Größenauswahl der Mitralklappenprothese nicht möglich ist. Daher sind im Vorfeld der Prozedur sowohl die Bestimmung und Ausmessung der individuellen Mitralklappenanatomie als

auch eine Beurteilung hinsichtlich der morphologischen Eignung bezüglich Ausflusstraktanatomie und der voraussichtlichen Verankerung der geplanten Mitralklappenprothese mittels einer nicht invasiven Darstellung erforderlich.

Ziel dieses Review-Artikels ist es, die Rolle der Computertomografie (CT) im Rahmen der Planung für TMVR einzuordnen.

Methode Begutachtung und Einordnung der aktuellen Behandlungsleitlinien der entsprechenden Fachgesellschaften (European Society of Cardiology [ESC], American Heart Association [AHA/ACC]) sowie von Metaanalysen und Originalstudien, welche den Suchbegriffen „TMVR“ bzw. „TMVI“ und „CT“ enthielten. Ergänzend dazu wurden Erkenntnisse aus der eigenen klinischen Erfahrung der Autoren eingebracht.

Schlussfolgerung Mit der CT sind die Vermessung des Mitralklappenannulus mit hoher räumlicher und adäquater zeitlicher Auflösung und damit eine zuverlässige präinterventionelle Größenbestimmung der zu implantierenden Mitralklappenprothese möglich. Des Weiteren können mittels der CT Aussagen über die Klappen- und Ausflusstraktanatomie, Mitralklappenverkalkungen, die Konfiguration von Papillarmuskeln und des linken Ventrikels getroffen werden. Darüber hinaus können mittels der CT alle potenziellen Zugangswege für die Intervention dargestellt werden.

Kernaussagen:

- Die CT nimmt eine Schlüsselrolle in der Bildgebung vor TMVR ein.
- Eine genaue Prothesen-Größenbestimmung ist anhand von Messwerten aus der CT zuverlässig möglich.
- Mit der CT können zusätzlich LVOT-Anatomie, Mitralklappenverkalkungen und interventionelle Zugangswege beurteilt werden.

Zitierweise

- Heiser L, Gohmann RF, Noack T et al. CT Planning prior to Transcatheter Mitral Valve Replacement (TMVR). Fortschr Röntgenstr 2022; 194: 373–383

ABSTRACT

Background Transcatheter mitral valve replacement (TMVR) is a treatment option for patients with therapy refractory high-grade mitral valve regurgitation and a high perioperative risk. During TMVR, the mitral annulus cannot be visualized directly. Therefore, comprehensive pre-interventional planning and a precise visualization of the patient's specific mitral valve

* Diese Autoren fungierten gleichermaßen als Senior-Autoren.

anatomy, outflow tract anatomy and projected anchoring of the device are necessary.

Aim of this review-article is, to assess the role of pre-procedural computed tomography (CT) for TMVR-planning

Methods Screening and evaluation of relevant guidelines (European Society of Cardiology [ESC], American Heart Association [AHA/ACC]), meta-analyses and original research using the search terms “TMVR” or “TMVI” and “CT”. In addition to this, the authors included insight from their own clinical experience.

Results CT allows for accurate measurement of the mitral annulus with high spatial and adequate temporal resolution

in all cardiac phases. Therefore, CT represents a valuable method for accurate prosthesis-sizing.

In addition to that, CT can provide information about the valvular- and outflow-tract-anatomy, mitral valve calcifications, configuration of the papillary muscles and of the left ventricle. Additionally, the interventional access-route may concomitantly be visualized.

Conclusion CT plays, in addition to echocardiographic imaging, a central role in pre-interventional assessment prior to TMVR. Especially the precise depiction of the left ventricular outflow tract (LVOT) provides relevant additional information, which is very difficult or not possible to be acquired in their entirety with other imaging modalities.

Einleitung

Die Mitralklappeninsuffizienz (MI) stellt die häufigste Herzklappenerkrankung in der westlichen Welt dar. Die Prävalenz ist altersabhängig und nimmt mit steigendem Alter zu. So steigt diese im Alter > 75 Jahre auf bis zu 10 % in der Normalbevölkerung [1].

Hinsichtlich der Genese kann eine Unterteilung in primäre oder sekundäre MI erfolgen. Der primären MI liegen degenerative oder destruktive Ursachen zugrunde, die zu einer pathologischen Veränderung des Klappenannulus und der Klappensegel und schlussendlich zu einem inadäquaten Klappenschluss führen. Als häufigste Ursache ist hier der Mitralklappenprolaps zu nennen [2]. Eine sekundäre Insuffizienz entsteht meist im Rahmen einer Annulusdilatation als Folge einer linksatrialen Erweiterung (atriale MI) oder einer Änderung der linksventrikulären Geometrie als Folge einer primären oder sekundären Kardiomyopathie [3, 4].

Laut den aktuellen europäischen Behandlungsleitlinien werden bei Patienten mit einer symptomatischen hochgradigen primären MI und einer linksventrikulären Ejektionsfraktion (LVEF) > 30 % primär eine frühzeitige chirurgische Mitralklappenrekonstruktion oder ein operativer Klappenersatz empfohlen. Bei Patienten mit schwer eingeschränkter LVEF (< 30 %) wird zunächst eine Optimierung der medikamentösen Therapie empfohlen. Bei fehlendem Therapieerfolg kann eine chirurgische oder interventionelle Therapie nach interdisziplinärer Entscheidungsfindung im Heart Team erfolgen. Die interventionelle oder chirurgische Behandlung der sekundären MI ist Gegenstand anhaltender Diskussion. So ist in den aktuellen Behandlungsempfehlungen eine chirurgische Therapie nur bei gleichzeitiger Durchführung einer Bypassoperation und einer LVEF > 30 % empfohlen (Klasse I, Evidenzlevel C). Eine alleinige chirurgische Mitralklappentherapie kann bei einer LVEF < 30 % sowie niedrigem operativen Risiko in Erwägung gezogen werden (Klasse IIa, Evidenzlevel C). Ist das operative Risiko erhöht, kann eine interventionelle Rekonstruktion/Ersatz erwogen werden (Klasse IIb, Evidenzlevel C) [5].

Aufgrund der steigenden Prävalenz der MI im höheren Lebensalter und dem damit verbundenen Anstieg des operativen Risikos sind verschiedene interventionelle Verfahren als Alternative zur alleinigen medikamentösen oder chirurgischen Therapie entwickelt worden. Zur interventionellen Versorgung der Mitralklappe

stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Es kann grundsätzlich zwischen der Transkatheter-Mitralklappenrekonstruktion und dem Transkatheter-Mitralklappenersatz (TMVR) unterschieden werden. Die rekonstruktiven interventionellen Verfahren können nach ihrem Therapieansatz in Ringannuloplastie- (z. B.: CardioBand), Koaptations- (z. B.: MitraClip, PASCAL) und Neochordverfahren (z. B.: NeoChord, Harpoon) unterteilt werden [6]. Alle Verfahren unterliegen anatomischen und morphologischen Selektionskriterien. Sind diese nicht erfüllt, stellt die TMVR eine weitere Behandlungsoption dar.

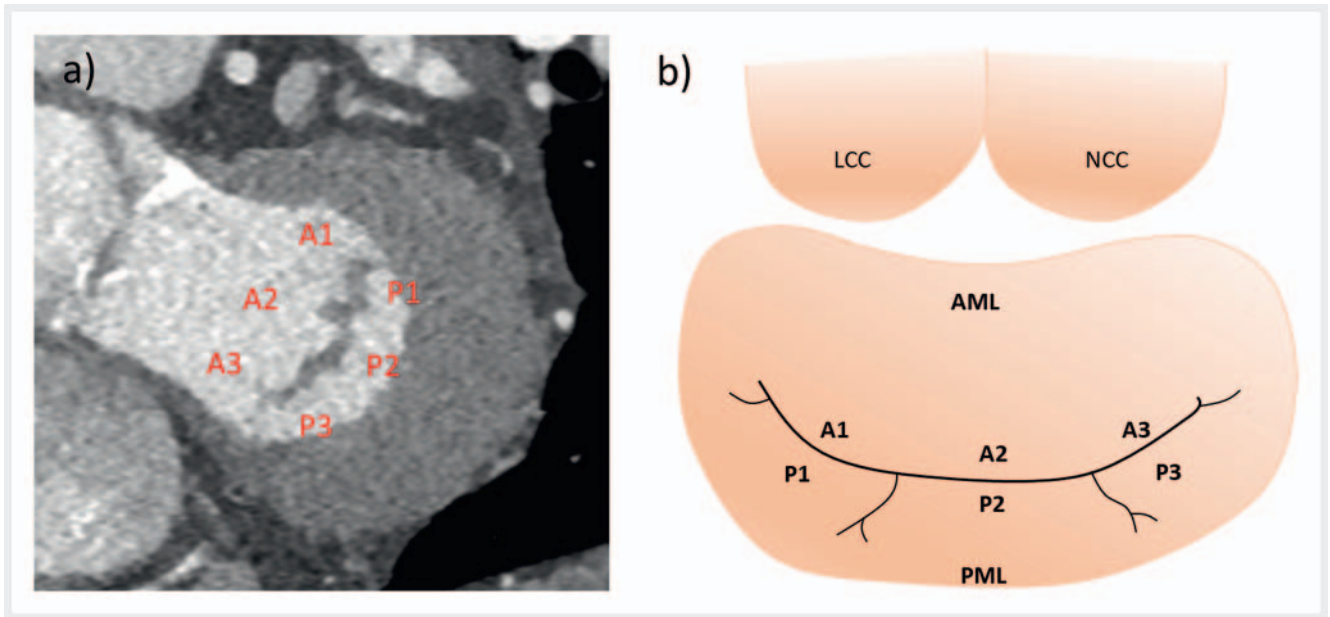
Ein TMVR kann neben der Behandlung der MI auch zur Therapie der kalzifizierten Mitralklappenstenose oder im Rahmen einer „Valve-in-Ring“- oder „Valve-in-Valve“-Prozedur eingesetzt werden [7].

Zur präinterventionellen Planung eines TMVR sind spezifische Messungen der komplexen dreidimensionalen Anatomie des Mitralklappenannulus und der umgebenden Strukturen notwendig, für deren Erhebung eine CT-Untersuchung mit EKG-Gating aufgrund ihrer hohen räumlichen und adäquaten zeitlichen Auflösung ein sehr gut geeignetes Verfahren darstellt.

Hinsichtlich der Vermessung des Annulus und der Größenauswahl (Sizing) der Klappenprothese zeigt die CT eine höhere Zuverlässigkeit im Vergleich zur Echokardiografie [8]. Den entscheidenden Vorteil der CT-Untersuchung gegenüber anderen nicht-invasiven bildgebenden Verfahren stellt die Möglichkeit der Visualisierung der gesamten kardialen Anatomie einschließlich der Koronararterien und der potenziellen Zugangswege sowie der Abschätzung des postinterventionell veränderten linksventrikulären Ausflusstraktes („Neo-LVOT“) in einem einzigen Untersuchungsgang innerhalb weniger Sekunden dar.

Besonderheiten der Mitralklappenanatomie

Die Mitralklappe besteht aus 2 bindegewebigen Segeln: Einem anterioren (AML) und posterioren (PML) Mitralklappensegel, welche jeweils in 3 Segmente unterteilt werden können (► **Abb. 1**). Beide Klappensegel gehen an der medialen und lateralen Kommissur ineinander über. Die funktionelle Einheit der Mitralklappe wird neben den Segeln durch den Annulus sowie den Halteapparat ergänzt. Das anteriore Drittel des Annulus wird durch den fibrösen Anteil gebildet, an dessen Ende sich 2 bindegewebsverdichtete



► **Abb. 1** Mitralklappe (geschlossen, systolisch erfasst) und Segmente im Kurzachsen-Schnitt im CT-Bild (a) und schematisch (b). Im Kurzachsen-Schnitt durch die Ebene der Mitralklappe lassen sich die 3 anterioren (A1–A3) und posterioren (P1–3) Segmente der Klappe wie abgebildet zuordnen, die zugrunde liegende Anatomie im CT (a) wird in der Schemazeichnung (b, modifiziert nach Capoulade *et al.* [37]) verdeutlicht. (AML = Anteriores Mitralklappensegel, PML = Posteriores Mitralklappensegel, LCC = Linkskoronare Tasche der Aortenklappe, NCC = Akoronare Tasche der Aortenklappe).

Areale finden: das mediale und laterale Trigonum. Diese Trigona bilden gemeinsam mit dem AML und durch die direkte Beziehung zur Aortenklappe und dem linksventrikulären Ausflusstrakt (LVOT) die sogenannte aortomitrale Kontinuität. Die posterioren 2 Drittel bilden den muskulären Anteil des Annulus. Der subvalvuläre Anteil der Klappe setzt sich aus den Chorda tendinae und den Papillarmuskeln zusammen, die die Mitralklappensegel mit dem linksventrikulären Myokard verbinden [9–11].

Die Komplexität der Mitralklappenanatomie beruht auf ihrer dreidimensionalen dynamischen Form des Annulus, dem sogenannten „saddle-shape“ (► **Abb. 2a, b**). Dieser sattelförmige Annulus hat seinen höchsten Punkt in der Mitte des anterioren Drittels und erstreckt sich bis auf Höhe der Aortenklappe, genauer gesagt bis zur Insertion der linkskoronaren und der akoronaren Tasche. Eine weitere, geringere Erhebung findet sich an der Insertion des posterioren Segels. Die tiefsten Punkte des Annulus werden durch die Trigona gebildet [12, 13].

Verfügbare Devices

Die Herausforderungen für eine sichere Platzierung und Verankerung der Prothese während einer TMVR liegen unter anderem in der komplexen Anatomie der Mitralklappe, der Annulusdynamik und der aortomitralen Kontinuität. Beispielsweise erfährt der Annulus in der Systole eine Größenzunahme von bis zu 20% [14]. Zudem besteht bei Implantation der Prothese aufgrund der engen räumlichen Beziehung des Mitralklappenannulus zum LVOT das Risiko einer Obstruktion.

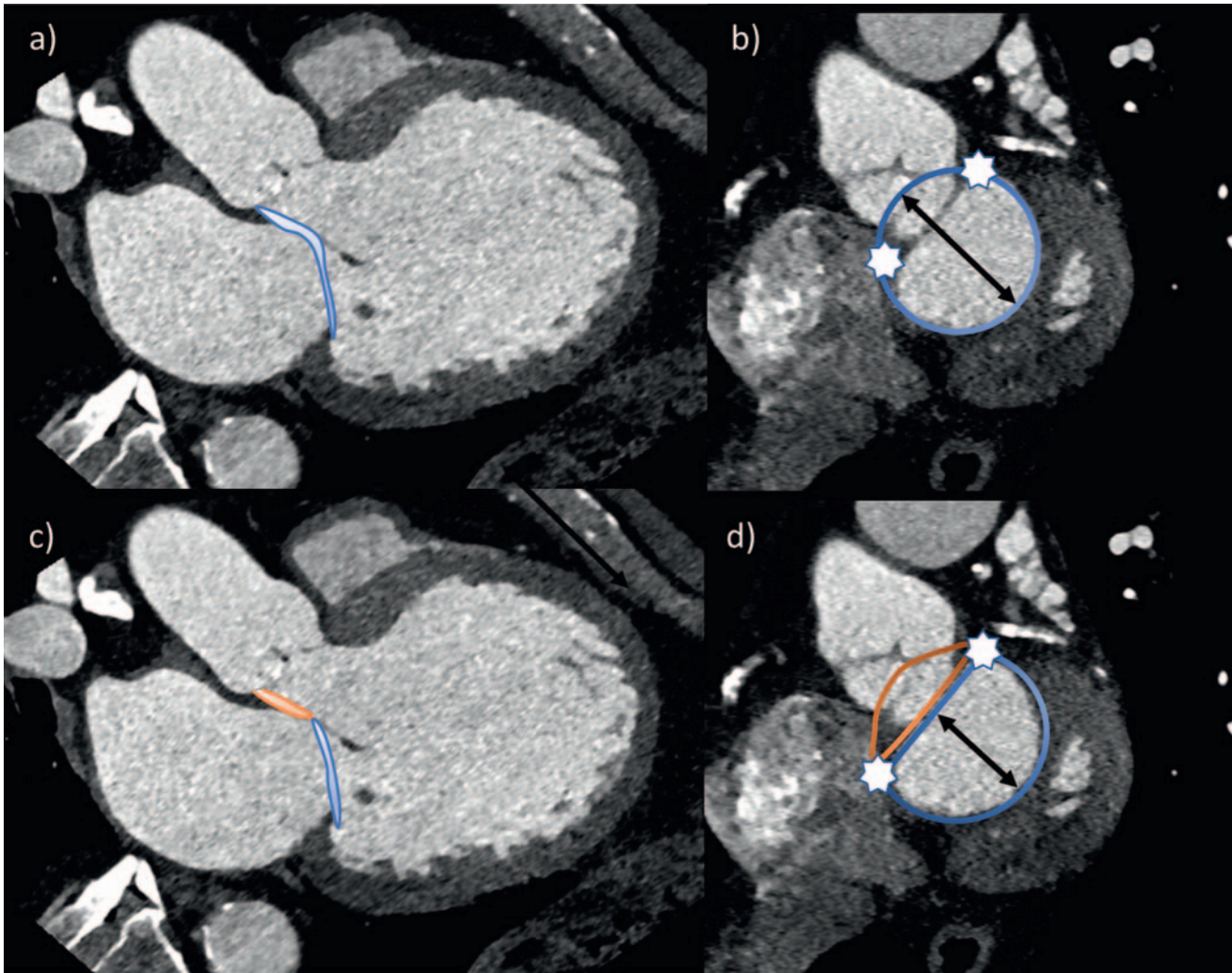
Die verschiedenen denkbaren Lösungsansätze zur Berücksichtigung dieser anatomischen und physiologischen Gegebenheiten resultieren in einer Vielzahl von Devices, die sich vor allem durch

den Verankerungsmechanismus und in ihrer Position zum Annulus unterscheiden (► **Tab. 1**, ► **Abb. 3**).

Aktuell existieren bereits mehr als 30 Devices, von denen einige gebräuchlichere in ► **Tab. 1** zusammengefasst sind [10, 15–18]. Derzeit ist das Tendyne-Device (Abbott Cardiovascular, Plymouth, USA), welches derzeit als einziges über eine CE-Zertifizierung zum Einsatz in der klinischen Routine verfügt, das verbreitetste Device. Des Weiteren ist auch ein „off-label-use“ mit einer Prothese für Transkatheter-Aortenklappen-Implantation, z. B. der Sapien 3 (Edwards Lifesciences, Irvine, CA, USA), möglich [19]. Die übrigen Devices befinden sich gegenwärtig in der Phase der klinischen Erprobung.

Um eine optimale Entfaltung und Verankerung des Devices zu erreichen und somit das Risiko einer LVOT-Obstruktion oder eines paravalvulären Lecks zu reduzieren, sollte der gewählte Zugangsweg möglichst senkrecht zum Annulus erfolgen. Hierfür kann einerseits ein transapikaler Zugangsweg gewählt werden, da hier die gedachte zentrale Achse zwischen Annulus und Apex des linken Ventrikels (LV) meist gut projiziert und mittels CT bestimmt werden kann (► **Abb. 4**) [20–23]. Andererseits stellt auch der weniger invasive transfemorale-transseptale Zugangsweg eine Möglichkeit zur Prothesenimplantation dar, bei der keine Eröffnung des Thorax mittels Mini-Thorakotomie wie beim transapikalen Zugangsweg erforderlich ist, womit ein rein endovaskuläres Vorgehen möglich ist [24]. Für die Visualisierung des bestmöglichen Vorgehens hinsichtlich des Zugangs zum linken Atrium und der Mitralklappe im Rahmen der transseptalen Punktion kann die CT hilfreiche Zusatzinformationen bieten [10].

In einer Metaanalyse von del Val *et al.* aus 2017 betrug der Anteil an erfolgreichen Implantationen in den untersuchten Studien ca. 92% der insgesamt erfolgten Prozeduren. Eine LVOT-Obstruktion zeigte sich nur bei 0,4% der Patienten [25].

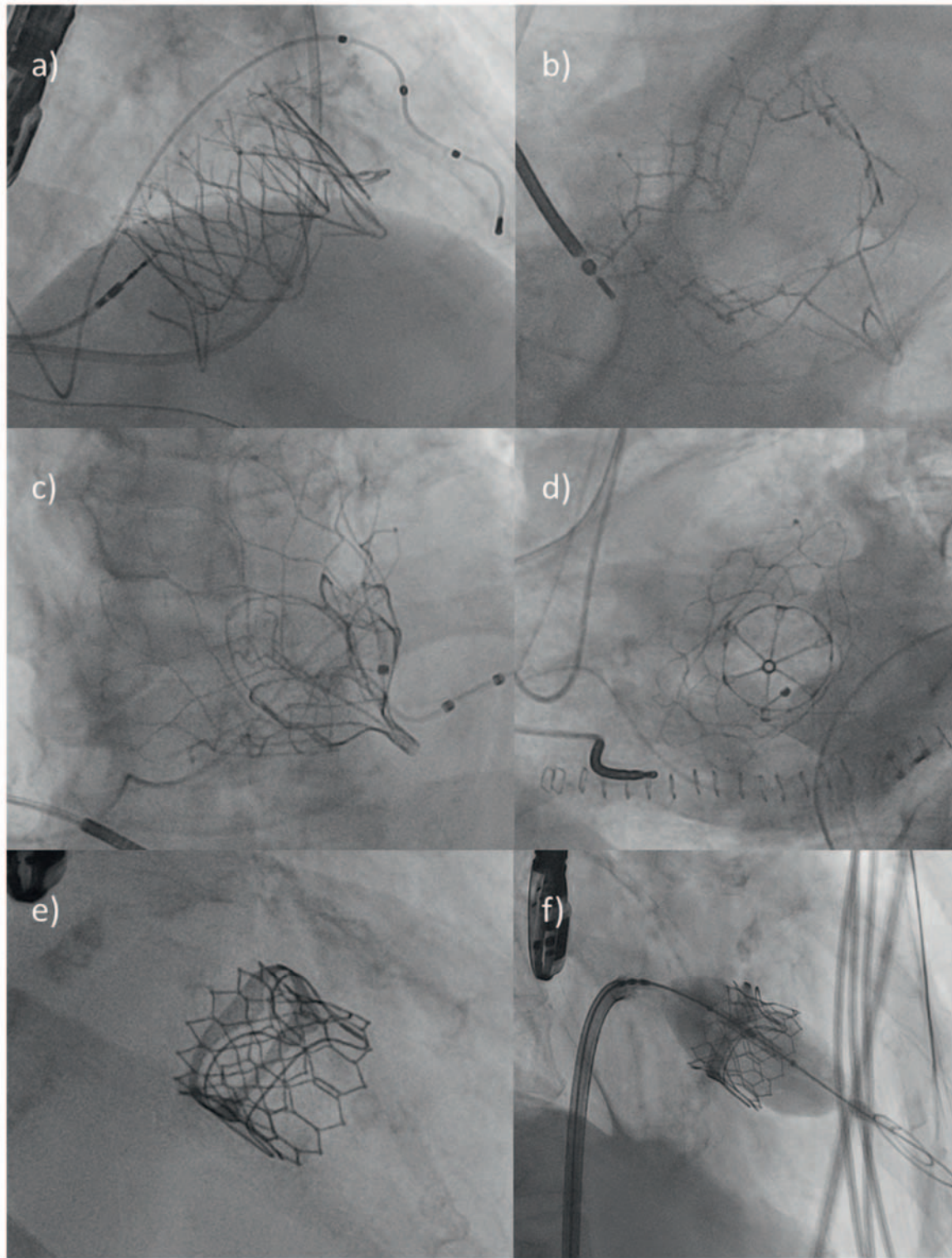


► **Abb. 2** Mitralklappenannulus im saddle-shape (**a, b**) und im D-Shape (**c, d**). Bei der saddle-shape-Konfiguration (blaue Kontur in **a** und **b**) wird der anteriore Anteil des Mitralklappenannulus einbezogen, daher ist hier AP (schwarze Linie in **b** und **d**) größer als bei der Einstellung des Annulus im D-Shape (blaue Kontur in **c** und **d**). Bei der Einstellung im D-Shape wird der anteriore Anteil (orange Kontur in **c** und **d**) nicht miteinbezogen. Die weißen Sterne in **b** und **d** markieren die Trigona fibrosa. (AP = Anterior-Posteriorer Diameter).

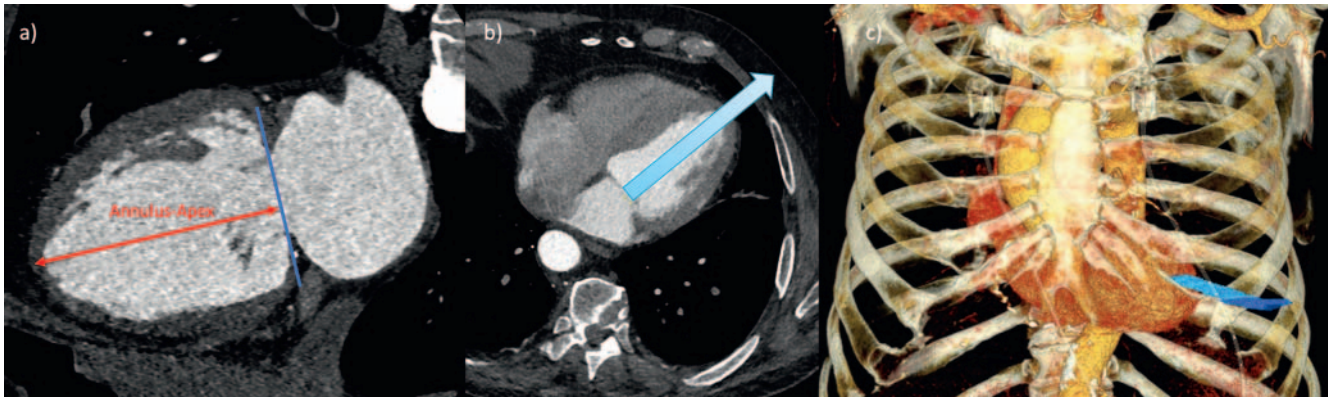
► **Tab. 1** Übersicht der am häufigsten verwendeten Devices für TMVR.

Device (Hersteller)	Implantations-Erfolgsrate (%)	LVOT-Obstruktion (%)	Implantationsweg	Verankerungsmechanismus	Relevante Sizing-Parameter
Tendyne (Abbott)	93,3	0	transapikal	„apical tether“	AP; LM
Tiara (Neovasc)	84,2	0	transapikal	Erfassung der Trigona	Perimeter; LM
Intrepid (Medtronic)	96	0	transapikal	Radialkräfte	Perimeter; AP; LM
Sapien III (Edwards)	76,7	N/A	transseptal-transfemorale	Radialkräfte	Fläche, Perimeter, max. Diameter

Übersicht gängiger Prothesentypen für TMVR, deren Komplikationsraten und wichtige Parameter zur Implantation/Planung (modifiziert nach Ranganath et al. [10] (TMVR = Transkatheter-Mitralklappenersatz, LVOT = Linksventrikulärer Ausflusstrakt, AP = Anterior-posteriorer Diameter, LM = Lateromedialer Diameter, N/A = keine Angaben).



► **Abb. 3** Periinterventionelle fluoroskopische Darstellung verschiedener TMVR-Devices. **a, b** TIARA-Device, welches kronenförmig konfiguriert ist. Die Verankerung erfolgt über Erfassung der Trigona unter Ausnutzung des myocardial shelves. **c, d** Das Tendyne-Device ist konisch konfiguriert. Die Verankerung erfolgt mittels eines „apical-tethers“ im linksventrikulären Apex. **e, f** Sapien 3 in Mitralposition (hier als Valve-in-Valve-Implantation in eine vorbestehende biologische Mitralklappenprothese). Im Gegensatz zu den übrigen Prothesenmodellen wird die Sapien 3 mittels eines Ballons expandiert (**f**). (TMVR = Kathetergestützter Mitralklappenersatz).



► **Abb. 4** Zugangspforten für den transapikalen Zugangsweg im CT. **a** Im Zweikammer-Blick kann die Annulus-Apex-Distanz (rote Linie) bestimmt werden. Diese entspricht der Distanz von der Mitte der Mitralklappenebene (blaue Linie) und dem LV-Apex. **b** Verlängert man diese Linie weiter bis sie die Thoraxwand schneidet (blauer Pfeil), kann man die optimale Trajektion für eine TMVR im transapikalen Zugangsweg planen. Zur korrekten Bestimmung des Interkostalraums sollte die Planung anhand eines Scans des gesamten Thorax erfolgen. Im dargestellten Fall liegt der optimale transapikale Zugangsweg im 5. ICR. **c** Dies kann durch eine 3D-Rekonstruktion visualisiert werden.

CT-Scanprotokoll

Aufgrund der Notwendigkeit der möglichst artefaktfreien Darstellung der kardialen Strukturen über den gesamten Herzzyklus ist ein CT-Gerät mit möglichst hoher zeitlicher Auflösung von Vorteil.

Um eine Messung in mehreren Herzphasen zu ermöglichen und dynamische Rekonstruktionen der Mitralklappenbewegung als bewegte Bildserie über den Herzzyklus erstellen zu können, ist mit nur wenigen Ausnahmen die Herzspirale mit retrospektivem EKG-Gating zu verwenden. Zur Planung des kardialen Scanfensters und zur zweifelsfreien Identifikation von Kalzifikationen der Mitralklappe sollte die ergänzende Durchführung eines kardialen Calciums-Scoring erwogen werden [26].

Zusätzlich ist eine Darstellung des voraussichtlichen Zugangsweges sinnvoll. Bei einem geplanten transapikalen Zugangsweg kann ggf. eine ergänzende Darstellung bzw. Rekonstruktion des Thorax von Nutzen sein.

Optimalerweise sollte die Darstellung der kardialen Anatomie als Herzspirale mittels retrospektivem EKG-Gating und die Darstellung des Zugangsweges als zeitlich unmittelbar angeschlossenen ungetriggerten Scan unter Ausnutzung desselben Kontrastmittelbolus erfolgen. Dahingehend ist eine Anpassung der Kontrastmittelmenge an die Scanzeit und ggf. das Herz-Zeit-Volumen des Patienten zu empfehlen, um eine ausreichende Kontrastierung zu erzielen. Der typischerweise abgeflachten Kontrastmittelkinetik bei Patienten mit hochgradiger MI kann mit einer entsprechend hohen Flussrate (> 5 ml/s) entgegengewirkt werden.

Die Rekonstruktion der Herzspirale sollte in 5%-Schritten in Bezug auf das RR-Intervall erfolgen, wobei die Verwendung einer möglichst geringen Schichtdicke und eines möglichst kleinen Inkrements zu empfehlen sind.

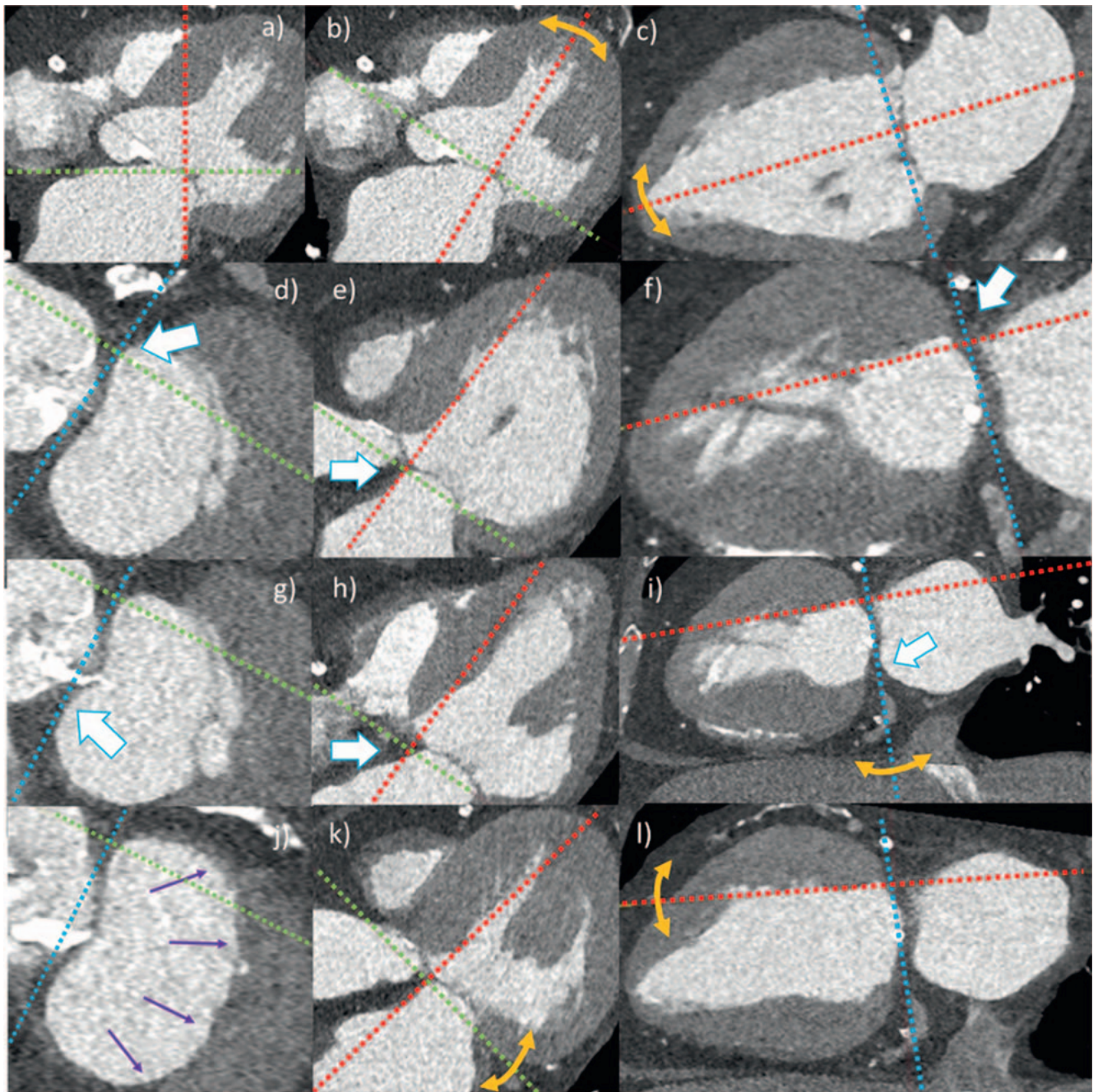
Zur Verkürzung der Umschaltzeit kann es sinnvoll sein, die Scanrichtung zu variieren, sodass z. B. die Herzspirale in kaudokranieler Scanrichtung und die des übrigen Scanvolumens in entgegengesetzter Richtung erfolgt.

Durch die Verwendung eines Scanmodus mit retrospektivem EKG-Gating besteht eine vergleichsweise hohe Wahrscheinlich-

keit, dass eine diagnostische Beurteilung der Koronararterien möglich ist, da eine Korrektur von Arrhythmien mittels manueller Editierung der EKG-basierten Rekonstruktionsparameter möglich ist [27]. Des Weiteren ist auch bei höheren Herzfrequenzen oder Arrhythmien eine diagnostische Koronardarstellung in diesem Scanmodus eher möglich als bei der Nutzung prospektiver EKG-Triggerung [28]. Daher sollte bei der Auswertung einer CT-Untersuchung zur Planung einer TMVR die Betrachtung der Koronararterien hinsichtlich ihres Verlaufs und möglicher Stenosen erfolgen.

Saddle-Shape vs. D-Shape

Die genaue Messung des Mitralklappenannulus steht im Zentrum der präinterventionellen CT-Planung. Die anatomisch sattelförmige Form des Annulus erschwert die Einstellung einer gut messbaren zweidimensionalen Ebene. Daher ist es vorteilhaft, die komplexe 3-dimensionale Form des Annulus durch Projektion geeigneter Landmarken zu einer 2-dimensionalen Form zu vereinfachen. Diese Projektion nimmt dann die vereinfachte Form eines virtuellen „D“ an (► **Abb. 2c, d**). Bei dieser D-förmigen Konfiguration („D-Shape“) werden die Trigona fibrosa durch eine virtuelle Linie verbunden und das anteriore Horn, welches sich nicht in der 2-dimensionalen Ebene befindet, vernachlässigt [11, 12]. Betrachtet man die Form der am häufigsten verwendeten Devices, wie Tiara oder Tendyne, so entspricht der Querschnitt auf Höhe der Landezone ebenfalls am ehesten einer D-förmigen Konfiguration. Auch ist die Verwendung des „D-Shapes“ hinsichtlich der korrekten Evaluation einer möglichen LVOT-Obstruktion von Vorteil. Durch die Vernachlässigung des anterioren Horns wird zum einen die Wahrscheinlichkeit einer zu groß bemessenen Prothese („Oversizing“) reduziert und zum anderen, unter der Annahme einer annähernd tubulären Entfaltung der Prothese, eine realistischere Repräsentation der tatsächlichen Lage des implantierten Devices ermöglicht, insbesondere hinsichtlich der Lagebeziehung zum LVOT bzw. der anzunehmenden Konfiguration des „Neo-LVOT“ nach der Implantation [29].



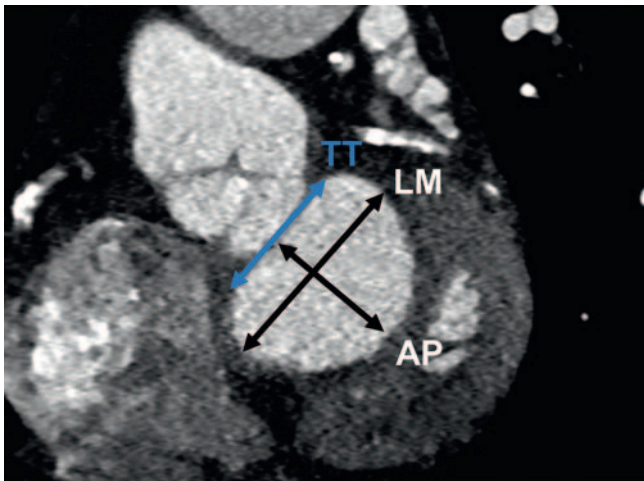
► **Abb. 5** Schritt-für-Schritt-Anleitung zur Einstellung des Mitralklappenannulus in der CT: Für jeden Einstellungsschritt sollten sämtliche verfügbaren Ebenen simultan betrachtet werden. Hierfür ist die Verwendung eines Auswertungsprogramms mit der Möglichkeit zur Erstellung multiplanarer Rekonstruktionen zu verwenden.

Schritt 1 (**a–c**): Grobe Annäherung an die Mitralklappen-Ebene: Das Fadenkreuz wird auf die Mitte der Mitralklappenebene zentriert (**a**). Anschließend werden die zweite und dritte (**b, c**) Ebene entlang der AV-Klappenebene ausgerichtet. Hilfreich für die Ausrichtung in basal-apikaler Richtung ist eine grobe Orientierung zum LV-Apex.

Schritt 2 (**d–f**): Einstellung des linken Trigonums: Im Kurzachsenschnitt wird die Lokalisation des linken Trigonums identifiziert und das Fadenkreuz hierauf eingestellt (weißer Pfeil in **d, e, f**). Dieses stellt sich bei korrekter Einstellung als triangulär konfigurierte, klar definierte Struktur dar.

Schritt 3 (**g–i**): Einstellung des rechten Trigonums: Durch Rotieren der zweiten Ebene (**i**) wird in der Kurzachse (**g**) auch das rechte Trigonum fibrosum (weißer Pfeil in **g, h, i**) so eingestellt, bis es als klar abgrenzbare, trianguläre Struktur zu erkennen ist. Sobald dies erfolgt ist, sind TT und somit die Septum-seitige Kontur des Mitralklappen-Annulus korrekt eingestellt.

Schritt 4 (**j–l**): Einstellung der lateralen Annuluskontur: In der Kurzachse (**j**) wird das Fadenkreuz auf die TT eingestellt.



► **Abb. 6** Kurzachsen-Schnitt eines Mitralklappenannulus im D-Shape: Zentrale Messwerte sind hier TT, LM und AP. (TT = inter-trigonaler Abstand, LM = Lateral-medialer Diameter, AP = Anterior-Posteriorer Diameter).

Schritt-für-Schritt-Anleitung

Für die Einstellung der korrekten Annulus-Ebene ist eine dezidierte Auswertungssoftware sinnvoll, die die Anfertigung multiplanarer Rekonstruktionen (MPR) in mehreren Ebenen ermöglicht. Dies kann jedoch z. B. auch mit den meisten radiologischen Bildablage- und Kommunikationssystemen (PACS) erfolgen. Hierfür empfiehlt es sich, die entsprechenden Ebenen zu koppeln und deren Ausrichtung durch ein Fadenkreuz zu visualisieren.

Eine Bild-für-Bild-Darstellung der zuvor beschriebenen Schritte findet sich in ► **Abb. 5**.

Diese erstellte Schnittebene ermöglicht nun die Bestimmung der relevanten Messwerte für die Größenbestimmung der Klappenprothese (► **Abb. 6**), welche analog in Systole und Diastole erfolgen sollte.

Die gebräuchlichsten zu bestimmenden Messwerte sind in ► **Abb. 6** dargestellt und in Liste 1 zusammengefasst [29].

Risikofaktoren einer LVOT-Obstruktion

Da die LVOT-Obstruktion eine mögliche und relevante Komplikation eines TMVR darstellt, ist die korrekte Auswahl der Prothesenart und -größe von Bedeutung.

Der native LVOT befindet sich zwischen dem basalen interventrikulären Septum und der aortomitralen Kontinuität (► **Abb. 7a**). Durch die Protrusion der Prothese in den linken Ventrikel, die resultierende Elongation des nativen LVOT und durch die Interaktion mit dem AML wird ein sogenannter „Neo-LVOT“ gebildet (► **Abb. 7b, c**).

Das Risiko einer Obstruktion steigt mit zunehmender Größe und Protrusion des Devices. Grenzwerte der Fläche des „Neo-LVOT“ betragen nach aktuellem Kenntnisstand 1,7–1,9 cm² und sind Device-spezifisch [30].

Patienten-spezifische Charakteristika umfassen unter anderem die aortomitrale Angulation (► **Abb. 7 d**), die Dimension des linken Ventrikels und die Dicke des basalen Septums (► **Tab. 1**).

Die aortomitrale Angulation beeinflusst die spätere Lage und Ausrichtung der Prothese. Sie beschreibt den Winkel zwischen den jeweiligen Orthogonalen zur Mitralklappen- und der Aortenklappenebene (► **Abb. 7 d**). Theoretisch wäre eine annähernd parallele Ausrichtung beider Achsen optimal, wohingegen das Risiko einer Obstruktion deutlich steigt, wenn sich diese 90° annähert oder überschreitet [29, 31].

Auch eine Hypertrophie des basalen interventrikulären Septums (> 15 mm) kann zu einer Einengung des LVOT (bzw. des Neo-LVOT) führen. Zudem stellt ein kleines LV-Cavum einen weiteren Risikofaktor hierfür dar. Bei Patienten mit sekundärer MI ist der LV meist deutlich dilatiert, wohingegen bei Patienten mit primärer MI die meist hyperdynamische LV-Funktion systolisch zu einer Verkleinerung des LV-Cavums führt [12].

Landezone – „landing zone“

Die CT liefert auch Informationen zur sogenannten Landezone – „landing zone“ des Devices. Viele Faktoren, wie das Vorhandensein/die Verteilung einer annulären Kalzifizierung oder die Entstehung eines „myocardial shelf“, beeinflussen diese.

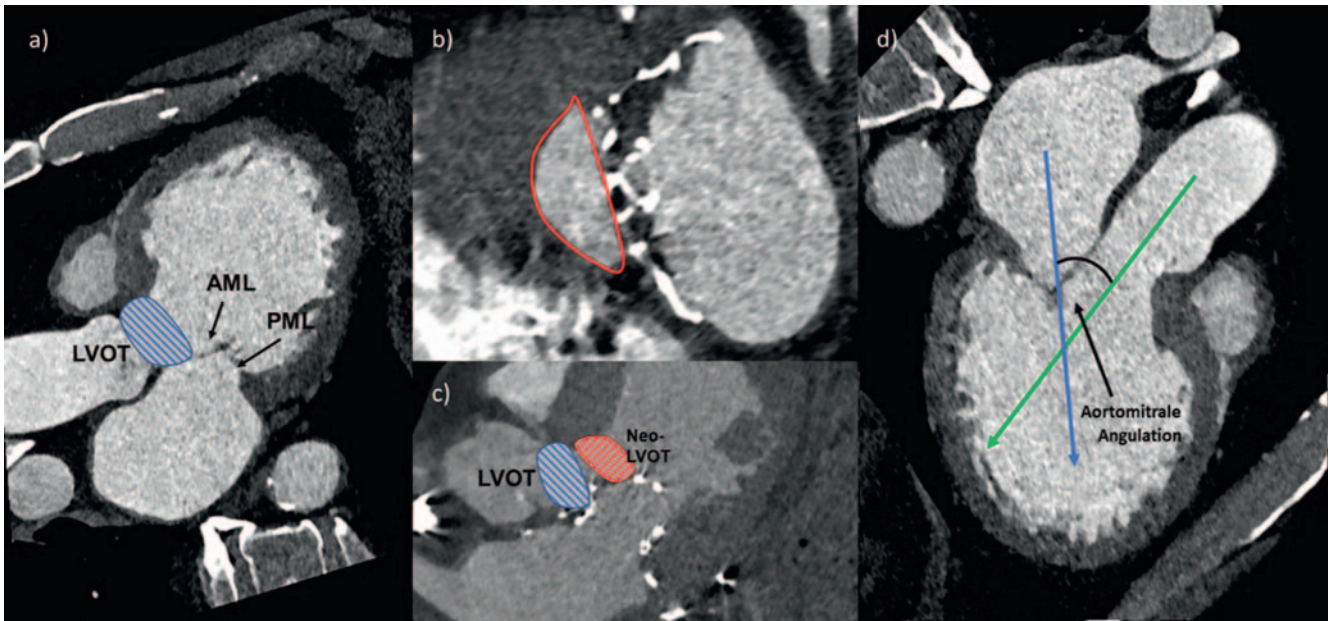
Myocardial shelf

Von Bedeutung bei der präinterventionellen Planung ist der anatomische Unterschied der Landezone bei primärer oder sekundärer MI. Die sekundäre MI geht oft mit regionalen Wandbewegungsstörungen und einer Dilatation des LV einher. Dies führt einerseits zu einer Verlagerung der Papillarmuskeln und letztendlich zur Annulusdilatation. Andererseits wird durch Remodelling des basalen Myokards auch die eigentlich lineare Verbindung zwischen linksatrialem und linksventrikulärem Myokard gestört, woraus das sogenannte „myocardial shelf“ entsteht. Die Größe des „myocardial shelves“ ist von verschiedenen Faktoren abhängig; typischerweise ist es bei Vorliegen einer LV-Dilatation in Kombination mit einem Hinterwandinfarkt am größten. Wichtig ist, dass auch das „myocardial shelf“ einer dynamischen Größenänderung unterliegt und systolisch sogar gänzlich verschwinden kann. Die Bestimmung des genauen Ausmaßes des „myocardial shelf“ ist dahingehend von Bedeutung, dass bei einigen selbstexpandierenden Systemen ein persistierendes Shelf zur Verankerung benötigt wird. Bei Patienten mit primärer MI ist typischerweise kein „myocardial shelf“ vorhanden [29, 32, 33].

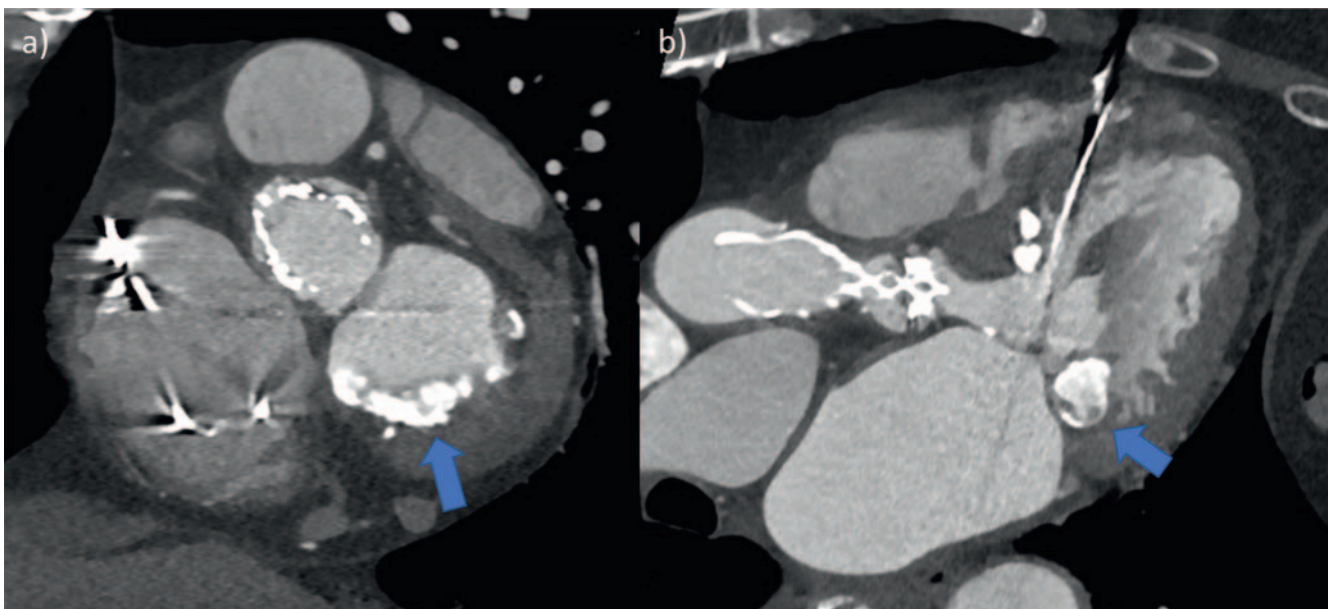
Mitralklappenkalk

Kalzifikationen des Mitralklappenannulus, der Trigona fibrosa oder der Klappensegel können die Interventionsplanung ebenfalls beeinflussen und lassen sich mittels der CT gut visualisieren (► **Abb. 8**). Meist finden sich Verkalkungen im posterioren Anteil des Annulus fibrosus und liegen insbesondere bei älteren Patienten vor [34, 35].

Computertomografisch eignet sich insbesondere die Darstellung in Kurzachsenschnitten (► **Abb. 8a**) zur Beschreibung der Kalzifikationen. Laut Guerrero *et al.* [36] fand sich ein Zusammen-



► **Abb. 7** Linksventrikulärer Ausflusstrakt vor und nach TMVR und aortomitraler Angulation. CT-Schnitte im 3-Kammerblick (a, c, d) und Kurz-Achsen-Schnitt (b) vor (a, d) und nach TMVR (b, c). **a** Nativer LVOT (blau schraffierte Fläche) mit gut erkennbarem AML und PML. **b, c** Der native LVOT (blau schraffierte Fläche) bleibt im distalen Anteil auch nach TMVR unverändert. Nach TMVR wird jedoch die Ausflusstrakt-Anatomie durch die Begrenzung der Klappenprothese verändert. Die laterale Kontur des nun entstehenden Neo-LVOT (rot umrandete Fläche in b und rot schraffierte Fläche in c) wird nun durch die Klappenprothese gebildet und ist hierdurch im Vergleich zum nativen LVOT deutlich verschmälert. **d** Die aortomitraler Angulation ergibt sich am Überkreuzungspunkt der Orthogonalen zur Mitte der Aortenklappenebene (grüner Pfeil) und der Mitralklappenebene (blauer Pfeil). In diesem Fall ergibt sich hier ein spitzer Winkel von 49°. (LVOT = linksventrikulärer Ausflusstrakt, TMVR = Transkatheter-Mitralklappenersatz, AML = Anteriores Mitralklappensegel, PML = Posteriores Mitralklappensegel).



► **Abb. 8** Deutlich kalzifizierter Mitralklappenannulus (blaue Pfeile). Sowohl im Kurzachsenschnitt (a) als auch im Dreikammer-Blick (b) sind ausgeprägte Verkalkungen des Mitralklappenannulus (blaue Pfeile) zu erkennen. Am ausgeprägtesten sind diese nahe der Segmente P2 und P3. In diesem Fall handelt es sich um sogenannte „verkäsende Kalzifikationen“ des Mitralklappenannulus (blauer Pfeil in b).

hang von geringen Kalzifikationen der Mitralklappe und einer erhöhten Wahrscheinlichkeit einer Migration des TMVR-Device, wobei hierfür zur Quantifizierung und standardisierten Erfassung der Kalzifikationen ein Score verwendet wurde. Dieser Score

bezieht sich auf die Dicke der annulären Verkalkungen, deren Ausdehnung in Bezug auf die Zirkumferenz, die Beteiligung der Trigona und die Klappensegel [36].

Annulus-Apex-Verbindung

Die Orientierung und die Länge der Annulus-Apex-Linie stellen (► **Abb. 4a**) für die Planung der TMVR eine weitere relevante Information dar. Hierfür wird eine orthogonale Verbindungslinie von der Mitte der Mitralklappebene zur epikardialen Kontur des LV-Apex gezogen (► **Abb. 4a**) [31]. Dies erleichtert die Planung eines transapikalen Zugangsweges, da hier die notwendige Länge und die Orientierung der Schleuse beurteilt werden können (► **Abb. 4**).

Die Lokalisation des LV-Apex in Bezug zur Mitte der Mitralklappebene kann inter-individuell variieren [31]. Eine Visualisierung der tatsächlichen Lageverhältnisse kann Informationen darüber geben, ob ein Abweichen von einem streng transapikalen Zugangsweg eine bessere Ausrichtung der Schleuse ermöglicht.

In Verlängerung der Annulus-Apex-Linie sollte der entsprechende Interkostalraum angegeben werden, in dem diese die Thoraxwand schneidet (► **Abb. 4b**). Dies kann bei der Planung des genauen transapikalen Zugangsweges hilfreich sein. Zur Illustration ist eine 3D-Rekonstruktion besonders geeignet (► **Abb. 4c**).

Report und Dokumentation

Aufgrund der Komplexität der Auswertung ist zur besseren Übersicht die Verwendung einer standardisierten Befundvorlage und einer einheitlichen Bilddokumentation zu empfehlen.

Einerseits sollten zur generellen Übersicht MPRs im Kurzachsenschnitt sowie im 2- und 3-Kammer-Schnitt angefertigt werden. Andererseits sollten auch bewegte Bildserien über den Herzzyklus entlang des Mitralklappenannulus sowie im 2-Kammer- und 3-Kammer-Blick zur Visualisierung der Dynamik und anatomischer Veränderungen innerhalb des Herzzyklus erstellt werden.

Es ist empfehlenswert, die Messung des Mitralklappenannulus anhand der zuvor beschrieben standardisierten Einstellung der Mitralklappen-Ebene und im „D-Shape“ durchzuführen. Eine Übersicht relevanter Messwerte findet sich in Liste 1, diese sollten anschließend an die Messungen auch als Bildbefund dokumentiert werden.

LISTE 1: RELEVANTE PARAMETER FÜR DIE BEFUNDUNG EINES TMVR-PLANUNGS-CT

Mitralklappenannulus (Ausmessung in Diastole und Systole)

- TT, AP, LM
- Perimeter und Fläche
- Morphologie der Leaflets

Zusätzliche Parameter

LVOT (Ausmessung in Systole und Diastole)

- Minimaler/maximaler Diameter
- Perimeter und Fläche
- Aortomitrale Angulation
- Enddiastolische Septumdicke
- Minimaler Durchmesser des LV

Landungszone

- Vorhandensein, Lokalisation und Quantifizierung von Mitralklappenkalk
- „myocardial shelf“

Zugangsweg

- Transapikal: Annulus-Apex-Abstand, ICR für optimale Trajektion
- Transfemoral-transseptal: Verlauf der Vv. femorales, Vv. Iliacales und der V. cava inferior

Sonstiges

Koronarien

- Im Falle einer diagnostischen Koronardarstellung: Ausschluss obstruktiver KHK möglich?
- (Ggf. Kalzium-Score)

Thorax/Abdomen

- Etwaige auffällige Befunde im sonstigen, miterfassten Scanvolumen

(TMVR = Transkatheter Mitralklappenersatz, TT = inter-trigonale Distanz, AP = Anterior-posteriorer Diameter, LM = Lateromedialer Diameter, ICR = Interkostalraum, LV = Linker Ventrikel, LVOT = Linksventrikulärer Ausflusstrakt, KHK = Koronare Herzkrankheit).

Zusammenfassung

Die CT stellt das zentrale bildgebende Verfahren zur Planung der TMVR dar. Sowohl eine Visualisierung der anatomischen Verhältnisse als auch eine individuelle und patientenzentrierte interventionelle Planung und Prothesenauswahl sind mit dieser Bildgebungsmodalität zuverlässig möglich.

Die Einstellung des Mitralklappenannulus sollte aus Gründen der Reproduzierbarkeit der zweidimensionalen Größenbestimmung in einer D-Shape-Konfiguration und anhand klarer anatomischer Landmarken erfolgen. Kalzifizierungen des Annulus können computertomografisch sehr gut eingeschätzt und hinsichtlich Lage und Verteilung klar beschrieben werden.

Des Weiteren erlaubt die CT eine detaillierte Darstellung von Größe und Konfiguration des LVOT und erlaubt somit die Wahrscheinlichkeit einer postinterventionellen LVOT-Obstruktion abzuschätzen.

Sowohl für einen transapikalen als auch für einen transfemoral-transseptalen Zugangsweg stehen geeignete Visualisierungsmöglichkeiten zur Verfügung, welche die Planung des optimalen interventionellen Vorgehens ermöglichen.

Die erhobenen Messwerte und qualitativen Aussagen zur Interventionsplanung sollten in einem standardisierten Befundtext erfasst werden.

Interessenkonflikt

Die Autorinnen/Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

- [1] Nkomo VT et al. Burden of valvular heart diseases: a population-based study. *Lancet* 2006; 368: 1005–1011
- [2] Nishimura RA, Bonow RO. Percutaneous Repair of Secondary Mitral Regurgitation – A Tale of Two Trials. *N Engl J Med* 2018; 379: 2374–2376
- [3] Levine RA et al. Mitral valve disease – morphology and mechanisms. *Nat Rev Cardiol* 2015; 12: 689–710
- [4] Delgado V et al. Assessment of mitral valve anatomy and geometry with multislice computed tomography. *JACC Cardiovasc Imaging* 2009; 2: 556–565
- [5] Baumgartner H et al. 2017 ESC/EACTS Guidelines for the Management of Valvular Heart Disease. *Rev Esp Cardiol (Engl Ed)* 2018; 71: 110
- [6] Noack T et al. Transcatheter mitral valve repair: review of current techniques. *Indian J Thorac Cardiovasc Surg* 2020; 36 (Suppl. 1): 53–63
- [7] Yoon SH et al. Transcatheter Mitral Valve Replacement for Degenerated Bioprosthetic Valves and Failed Annuloplasty Rings. *J Am Coll Cardiol* 2017; 70: 1121–1131
- [8] Binder RK, Webb JG. Percutaneous mitral and aortic paravalvular leak repair: indications, current application, and future directions. *Curr Cardiol Rep* 2013; 15: 342
- [9] Garbi M, Monaghan MJ. Quantitative mitral valve anatomy and pathology. *Echo Res Pract* 2015; 2: R63–R72
- [10] Ranganath P et al. CT for Pre- and Postprocedural Evaluation of Transcatheter Mitral Valve Replacement. *Radiographics* 2020; 40: 1528–1553
- [11] Blanke P et al. A simplified D-shaped model of the mitral annulus to facilitate CT-based sizing before transcatheter mitral valve implantation. *J Cardiovasc Comput Tomogr* 2014; 8: 459–467
- [12] Blanke P et al. Multimodality Imaging in the Context of Transcatheter Mitral Valve Replacement: Establishing Consensus Among Modalities and Disciplines. *JACC Cardiovasc Imaging* 2015; 8: 1191–1208
- [13] Asgar AW. Sizing the Mitral Annulus: Is CT the Future? *JACC Cardiovasc Imaging* 2016; 9: 281–282
- [14] Noack T et al. Dynamic mitral valve geometry in patients with primary and secondary mitral regurgitation: implications for mitral valve repair-dagger. *Eur J Cardiothorac Surg* 2019; 56: 983–992
- [15] Muller DWM et al. Transcatheter Mitral Valve Replacement for Patients With Symptomatic Mitral Regurgitation: A Global Feasibility Trial. *J Am Coll Cardiol* 2017; 69: 381–391
- [16] Bapat V et al. Early Experience With New Transcatheter Mitral Valve Replacement. *J Am Coll Cardiol* 2018; 71: 12–21
- [17] Guerrero M et al. 1-Year Outcomes of Transcatheter Mitral Valve Replacement in Patients With Severe Mitral Annular Calcification. *J Am Coll Cardiol* 2018; 71: 1841–1853
- [18] Cheung A. Early experience of TIARA transcatheter mitral valve replacement system. *Ann Cardiothorac Surg* 2018; 7: 787–791
- [19] Guerrero M et al. Thirty-Day Outcomes of Transcatheter Mitral Valve Replacement for Degenerated Mitral Bioprostheses (Valve-in-Valve), Failed Surgical Rings (Valve-in-Ring), and Native Valve With Severe Mitral Annular Calcification (Valve-in-Mitral Annular Calcification) in the United States: Data From the Society of Thoracic Surgeons/American College of Cardiology/Transcatheter Valve Therapy Registry. *Circ Cardiovasc Interv* 2020; 13: e008425
- [20] Vahanian A, Urena M, Himbert D. Transcatheter Mitral Valve Replacement: The End of the Beginning? *J Am Coll Cardiol* 2019; 73: 1261–1263
- [21] Sondergaard L et al. Transcatheter mitral valve implantation via transapical approach: an early experience. *Eur J Cardiothorac Surg* 2015; 48: 873–877; discussion 877–878
- [22] Cheung A et al. Short-term results of transapical transcatheter mitral valve implantation for mitral regurgitation. *J Am Coll Cardiol* 2014; 64: 1814–1819
- [23] Regueiro A et al. Transcatheter Mitral Valve Replacement: Insights From Early Clinical Experience and Future Challenges. *J Am Coll Cardiol* 2017; 69: 2175–2192
- [24] Urena M et al. Transseptal Transcatheter Mitral Valve Replacement Using Balloon-Expandable Transcatheter Heart Valves: A Step-by-Step Approach. *JACC Cardiovasc Interv* 2017; 10: 1905–1919
- [25] Del Val D et al. Early Experience With Transcatheter Mitral Valve Replacement: A Systematic Review. *J Am Heart Assoc* 2019; 8: e013332
- [26] Leschka S et al. Scan length adjustment of CT coronary angiography using the calcium scoring scan: effect on radiation dose. *Am J Roentgenol* 2010; 194: W272–W277
- [27] Gohmann RF et al. Combined Coronary CT-Angiography and TAVI-Planning: A Contrast-Neutral Routine Approach for Ruling-out Significant Coronary Artery Disease. *J Clin Med* 2020; 9: 1623
- [28] Seitz P, Gottschling S, Lücke C et al. Pre-procedural high-pitch coronary CT angiography assessment of patients undergoing transcatheter aortic valve implantation (TAVI) without patient-specific adjustment: analysis of diagnostic performance. *Clinical Radiology* 2021; 76: 862.e29–862.e36
- [29] Blanke P et al. Mitral Annular Evaluation With CT in the Context of Transcatheter Mitral Valve Replacement. *JACC Cardiovasc Imaging* 2015; 8: 612–615
- [30] Reid A et al. Neo-LVOT and Transcatheter Mitral Valve Replacement: Expert Recommendations. *JACC Cardiovasc Imaging* 2021; 14: 854–866
- [31] Blanke P et al. Predicting LVOT Obstruction in Transcatheter Mitral Valve Implantation: Concept of the Neo-LVOT. *JACC Cardiovasc Imaging* 2017; 10: 482–485
- [32] 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: 269–280
- [33] Faggioni L et al. Preprocedural planning of transcatheter mitral valve interventions by multidetector CT: What the radiologist needs to know. *Eur J Radiol Open* 2018; 5: 131–140
- [34] Korn D, Desanctis RW, Sell S. Massive calcification of the mitral annulus. A clinicopathological study of fourteen cases. *N Engl J Med* 1962; 267: 900–909
- [35] Abramowitz Y et al. Concomitant mitral annular calcification and severe aortic stenosis: prevalence, characteristics and outcome following transcatheter aortic valve replacement. *Eur Heart J* 2017; 38: 1194–1203
- [36] Guerrero M et al. A Cardiac Computed Tomography-Based Score to Categorize Mitral Annular Calcification Severity and Predict Valve Embolization. *JACC Cardiovasc Imaging* 2020; 13: 1945–1957
- [37] Capoulade R et al. Multimodality imaging assessment of mitral valve anatomy in planning for mitral valve repair in secondary mitral regurgitation. *J Thorac Dis* 2017; 9 (Suppl. 7): S640–S660