

Aus der Klinik und Poliklinik für Herzchirurgie
der Universität zu Köln
Direktor: Universitätsprofessor Dr. med. Lenard Conradi

Intraoperatives Vorgehen bei Patienten mit einer Porzellanaorta in der Herzchirurgie im Rahmen einer Myokardrevaskularisation

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der ärztlichen Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Universität zu Köln

vorgelegt von
Veselina Ninova
aus Sofia, Bulgarien

promoviert am 16. Dezember 2025

Dekan: Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink
1. Gutachter: Professor Dr. med. N. Mader
2. Gutachter: Professor Dr. med. M. Gawenda

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.¹

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

Prof. Dr. Navid Mader, Dr. Asmae Gassa, PD Dr. Georg Schlachtenberger

Weitere Personen waren an der Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Der dieser Arbeit zugrunde liegenden Datensatz wurde mir als angefangener Datensatz (Porzellanaortdatenbank der Uniklinik Köln) von Frau Dr. Gassa zur Verfügung gestellt und durch meine Mitarbeit in der Herzchirurgie in der Uniklinik Köln an Parameter und Patienten erweitert und komplettiert. Die verwendeten Operationsberichte und Entlassungsbriefe wurden von mir selbst ausgewertet.

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden statistischen Messergebnisse wurden mit meiner Mitarbeit in der Klinik für Herz- und Thoraxchirurgie der Uniklinik Köln sowie mit der Beratungsexpertise, Erklärung und Unterstützung von Herr Georg Schlachtenberger ermittelt.

Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten (Amtliche Mitteilung der Universität zu Köln AM 132/2020) der Universität zu Köln gelesen habe und verpflichtete mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Köln, den 21.08.2025

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt dem gesamten Team der Klinik für Herzchirurgie für die Möglichkeit, meine Dissertation in einem so spannenden Themenfeld anfertigen zu dürfen.

Mein aufrichtiger Dank gilt zudem meinem Betreuer, Herrn Professor Dr. Navid Mader, für die fachliche Unterstützung, die angenehme Zusammenarbeit und die stets offene Kommunikation während der gesamten Projektphase.

Ebenso danke ich Frau Dr. Gassa herzlich, die mich jederzeit motiviert und mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden hat.

Für die tatkräftige Unterstützung danke ich Herrn Priv.-Doz. Dr. Georg Schlachtenberger. Auch bei wiederholten Rückfragen und Fehler hat er mich mit Geduld und Expertise begleitet.

Mein tief empfundener Dank gilt auch meinen Freund*innen und meiner Familie, die mich durch alle Höhen und Tiefen dieser Zeit begleitet haben.

Dass diese Dissertation schließlich ihren Abschluss gefunden hat, verdanke ich nicht zuletzt der Entscheidung, dranzubleiben – auch dann, wenn es manchmal so aussah, als würde der Weg kein Ende nehmen. Dafür danke ich mir selbst.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	6
1. ZUSAMMENFASSUNG	9
2. EINLEITUNG	10
2.1. Die Kalzifikation der Aorta ascendens: von Atherosklerose bis Porzellanaorta	10
2.1.1. Anatomie der Aorta ascendens im herzchirurgischen Kontext	10
2.1.2. Atherosklerose und Pathophysiologie der Porzellanaorta	11
2.1.3. Die Definition und Klassifikation einer Porzellanaorta	12
2.1.4. Prävalenz der Porzellanaorta	14
2.2. Die Herz-Lungen-Maschine und die Porzellanaorta	17
2.2.1. arterielle Zugangswege	17
2.2.2. Klemmen der Aorta	18
2.3. Präoperative Bildgebung bei Verdacht auf Porzellanaorta	20
2.3.1. Röntgen-Thorax	21
2.3.2. Computertomographie (CT)	21
2.3.3. Transösophageale und transthorakale Echokardiographie (TEE, TTE)	22
2.3.4. Magnetresonanztomographie (MRT)	22
2.3.5. Exkurs: intraoperative epiaortale Sonographie	23
2.4. Apoplex im Rahmen einer Herzoperation	23
2.4.1. Apoplexrisiko bei Herzoperationen	23
2.4.2. CABG vs. PCI: Schlaganfallrisiko im Vergleich	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.4.3. Präventive Maßnahmen zur Schlaganfallvermeidung	25
2.5. Fragestellungen und Ziel der Arbeit	25
3. MATERIAL UND METHODEN	26
3.1. Patientenkollektiv	26
3.1.1. Diagnostischer Standard	28
3.2. Studiendesign und Methodik	29
3.2.1. Perioperative Datenerhebung (prä-, intra- und postoperativ)	30

3.2.2.	Erfassung neurologischer Komplikationen	32
3.3.	Präoperative Diagnostik zur Detektion der Porzellanaorta	33
3.4.	Die Operationstechnik	35
3.4.1.	Operation mit Klemmen der Aorta und Kardioplegiegabe	35
3.4.2.	Partielles Klemmen der Aorta	36
3.4.3.	Verwendung vom Heartstring-System	37
3.4.4.	Totalarterielle Myokardrevaskularisation ohne Aortenmanipulation	37
3.5.	Statistische Auswertung	38
4.	ERGEBNISSE	39
4.1.	Patientencharakteristika	39
4.2.	Früherkennung und präoperative Planung bei Porzellanaorta	44
4.3.	Intraoperative Daten	47
4.4.	Neurologische Komplikationen	53
4.5.	Postoperative Komplikationen	56
4.6.	Operation ohne Aortenklemme – Subgruppenanalyse	60
4.6.1.	Demografische Merkmale	60
4.6.2.	Klinische und kardiovaskuläre Risikofaktoren	61
4.6.3.	Präoperative Bildgebung	65
4.6.4.	Intraoperative Befunde	66
4.6.5.	Neurologische Komplikationen	70
4.6.6.	Postoperative Komplikationen	71
5.	DISKUSSION	73
5.1.	Patient*innencharakteristika und präoperative Risikoprofile	74
5.2.	Präoperative Bildgebung und diagnostische Standardisierung bei Porzellanaorta	77
5.3.	Klinische Implikationen intraoperativer Strategien	79
5.4.	Perioperative neurologische Komplikationen: Rolle der Aortenmanipulation und Diagnostik	81
5.5.	Postoperative Komplikationen: Risiken und Vulnerabilität	83

5.6. Subgruppenanalyse: Operationsstrategien ohne Klemmen der Aorta: Differenzierung und Nutzen	85
5.7. Limitationen und Rückschlüsse für zukünftige Diagnostik und Therapie	87
5.7.1. Methodische Limitationen	87
5.7.2. Intraoperative Limitationen	88
5.7.3. Konsequenzen für die klinische Praxis:	88
5.7.4. Ausblick und Forschungsperspektiven:	89
6. LITERATURVERZEICHNIS	89
7. ANHANG	91
4.1 Abbildungsverzeichnis	91
4.2 Tabellenverzeichnis	92
8. VORABVERÖFFENTLICHUNGEN VON ERGEBNISSEN	94

Abkürzungsverzeichnis

1-GE = Eingefäßerkrankung

2-GE = Zweigefäßerkrankung

3D = 3-dimensional

3-GE = Dreigefäßerkrankung

ACVB = Aortakoronare Venenbypassoperation

Angio = Angiographie

BV = Ballonvalvuloplastie

bzw. = beziehungsweise

CABG = coronary artery bypass grafting = koronararterielle Bypassoperation am Herzen

cAVK = cerebrale arterielle Verschlusskrankheit

Cm = Zentimeter

COPD = chronisch obstruktive Lungenerkrankung (pulmonary disease)

CRP = (das) C-reaktive Protein

CT = Computertomographie

CTA = Computertomographie-Angiographie

EKG = Elektrokardiogramm

Et. al. = ‚et alia‘ (Neutrum) bzw. ‚et alii‘ (Maskulinum) oder ‚et aliae‘ (Femininum);

Bedeutung: ‚und andere‘

FKDS = Farbkodierte Dupplexsonographie

ges. = gesamt

ggf. = gegebenenfalls

HAA = hochgradig atherosklerotische Aorta ascendens

HLM = Herz-Lungen-Maschine

ICD-10-GM = International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems 10. Revision, German Modification = Die Internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme, 10. Revision der Klassifikation, Deutsche Modifikation

LDL = Low Density Lipoprotein

LIMA = linke Arteria thoracica interna

MDCT = Multidetector computed tomography

MK = Mit Klemmen: gemeint ist hier die Porzellanaortakohorte, die mit ein totales Querklemmen der Aorta operiert wurde

Mm = Millimeter

MMP = Matrixmetallprotease

MMST = Mini Mental Status Test

MRT = Magnetresonanztomographie

MT = Medikamentöse Therapie ohne Intervention

MW = Mittelwert

NASCET = North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial

NIRS = Nahinfrarotspektroskopie

NO = Stickstoffmonoxid

o.g. = oben genannt

Off-Pump = ohne Einsatz der Herz-Lungen-Maschine (HLM)

OK = Ohne Klemmen: gemeint ist hier die Porzellanaortakohorte, die ohne ein totales Querklemmen der Aorta operiert wurde

ONCAB = on pump coronary artery bypass = Herzbybpassoperation mit HLM

OP = Operation

OPCAB = off-pump coronary artery bypass = Herzbybpassoperation ohne HLM

ORBIS= Organisation, Beratung und innovatives Systemengineering

PA = Porzellanaorta

PARTNER = Placement of AoRTic TraNscathetER Valves

pAVK = periarterielle Verschlusskrankheit

PCI = percutaneous coronary intervention = perkutane Koronarintervention

PDT = Punktionsdilatationstracheotomie

PK = gemeint ist hier die gesamte Porzellanaortakohorte, die sowohl mit als auch ohne ein totales Querklemmen der Aorta eine Myokardrevaskularisation bekommen hat

Präop = präoperativ

RIMA = rechte Arteria thoracica interna

Rö-Tx = Röntgenthorax vom Brustkorb

SAVR = Surgical aortic valve replacement = chirurgischer Aortenklappenersatz

Sdt.Abw. = Standartabweichung

SIRS = systemic inflammatory response syndrome = system-inflammatorisches Antwortsyndrom

Sog. = sogenannt

SOP = standart operating procedure = standardisierte Abläufe im konkreten Krankenhaus, meistens Abteilungsabhängig und als Vorgabe zu folgen

TApik = transapikal

TArt = transarteriell

TAVI = Transcatheter Aortic Valve Implantation = Transkatheteraortenklappenimplantation

TEE = transösophageale Echokardiographie

TF = transfemoral

TIA = transitorisch ischämische Attacke

TTE = Transthorakale Echokardiographie

USA = United States of America

vs. = versus

VSMC = vascular smooth muscle cell

WHST = Wundheilungsstörung

z.B. = zum Beispiel

Zusammenfassung

Diese Arbeit beruht auf einer retrospektiven Analyse von 73 Patient*innen, die zwischen dem 1. Januar 2013 und dem 31. Dezember 2023 an der Klinik für Herz-Thorax-Chirurgie des Universitätsklinikums Köln oder der CardioClinic Köln eine isolierte koronare Bypassoperation (CABG) über mediane Sternotomie erhielten. Intraoperativ wurde in allen Fällen eine zirkulär ausgeprägte Kalzifikation der Aorta im Sinne einer Porzellanaorta durch den Operateur festgestellt, die präoperativ nicht immer bekannt war.

Eine präzise Beurteilung der Aortenmorphologie ist bei herzchirurgischen Eingriffen essenziell, um das Risiko aortaler und zerebraler Komplikationen zu minimieren. Liegt Porzellanaorta vor, müssen operative Strategie und perioperatives Management individuell an die Komorbiditäten (z. B. Vorhofflimmern, pAVK, höhergradige Karotisstenose, chronische Niereninsuffizienz, stattgehabte zerebrovaskuläre Ereignisse) angepasst werden.

Die Studienkohorte wurde in zwei Gruppen eingeteilt: eine mit Aortenklemme (MK) und eine ohne Aortenklemme (OK). Beide Gruppen waren hinsichtlich demografischer Merkmale und Risikofaktoren vergleichbar. Es zeigten sich weder bei der 30-Tages-Mortalität noch bei der Mehrzahl der postoperativen Komplikationen signifikante Unterschiede. Der Verzicht auf das Klemmen der Aorta war jedoch signifikant mit einer längeren Verweildauer auf der Intensivstation assoziiert. Neurologische Komplikationen traten selten auf, sind jedoch aufgrund ihrer prognostischen Relevanz klinisch bedeutsam. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit einer sorgfältigen präoperativen neurologischen Untersuchung, auch zur Erfassung subklinischer zerebraler Läsionen.

Aufgrund dessen wurde im Jahr 2024 an beiden Kliniken ein erweiterter diagnostischer Standard etabliert. Seither erhalten Patient*innen älter als 70 Jahren sowie Personen mit spezifischem Risikoprofil (z. B. pAVK, Karotisstenose, Zustand nach Apoplex, auffälliger Röntgen-Thoraxbefund) ein präoperatives Thorax-CT zur Beurteilung der Aortenmorphologie.

Eine Subgruppenanalyse innerhalb der OK-Gruppe zeigte zwischen den angewandten Techniken der zentralen Anastomosierung keine signifikanten Unterschiede.

Insgesamt zeigt die Studie, dass Patient*innen mit Porzellanaorta von einer eng aufeinander abgestimmten Kombination aus präoperativer Bildgebung, neurologischer Evaluation und sorgfältiger chirurgischer Planung profitieren, um vaskuläre und zerebrale Komplikationen im

Rahmen der koronaren Bypasschirurgie zu minimieren. Die Wahl der intraoperativen Technik sollte unter Berücksichtigung der individuellen Aortenmorphologie, der Begleiterkrankungen und der chirurgischen Erfahrung erfolgen. Die vorliegende Arbeit liefert eine praxisnahe Datengrundlage zur Optimierung der intraoperativen Entscheidungsfindung bei dieser Hochrisikopopulation.

1. Einleitung

2.1. Die Kalzifikation der Aorta ascendens: von Atherosklerose bis Porzellanaorta

Die Atherosklerose ist eine chronisch progrediente Erkrankung der arteriellen Gefäßwand, die mit schwerwiegenden kardiovaskulären Komplikationen wie Myokardinfarkt und Apoplex einhergeht. Pathophysiologisch spielen die endotheliale Dysfunktion, Lipidablagerung und chronische Inflammation eine zentrale Rolle für die sekundäre Kalzifikation der Aorta.¹⁻⁴ Die koronare Herzkrankheit (ICD-10-GM-2023: I25.-)⁵, klinische Manifestation der Atherosklerose, stellt in Deutschland weiterhin die häufigste Todesursachen dar.⁶

Neben den Koronararterien betrifft die Atherosklerose auch große Gefäße wie die Aorta. Die sogenannte Porzellanaorta (PA) stellt eine seltene, aber klinisch hochrelevante Aortenpathologie dar, die durch zirkumferentielle, dichte Kalzifikation der Aortenwand charakterisiert ist.⁷ Die Aortensklerose-Risikofaktoren korrelieren mit den typischen Atherosklerose-Risikofaktoren: hohes Alter, weibliches Geschlecht, Nikotinabusus, Bluthochdruck, Diabetes, Hypercholesterinämie und ungesunder Lebensstil.⁸ Klinisch bedeutsam ist insbesondere das stark erhöhte Risiko perioperativer Komplikationen bei herzchirurgischen Eingriffen, da jede Manipulation der rigiden Gefäßstruktur potenziell embolische Ereignisse auslösen kann.

1.1.1. Anatomie der Aorta ascendens im herzchirurgischen Kontext

Die Aorta ist das größte arterielle Gefäß des Körpers und gliedert sich in Aorta ascendens, Aortenbogen und Aorta descendens. Die Aorta ascendens beginnt am Anulus der Aortenklappe, enthält die Koronarostien und verläuft intraperikardial bis zur sogenannten Rindfleischfalte, kranialer kommt dann der Abgang des Truncus brachiocephalicus. Im Bereich der Aorta ascendens vor dem proximalen Aortenbogen erfolgt bei herzchirurgischen Eingriffen typischerweise das Querklemmen der Aorta. Diese Region ist daher besonders relevant wenn

eine PA vorliegt, da hier die Gefahr intraoperativer Embolien oder Dissektionen erhöht ist.⁹

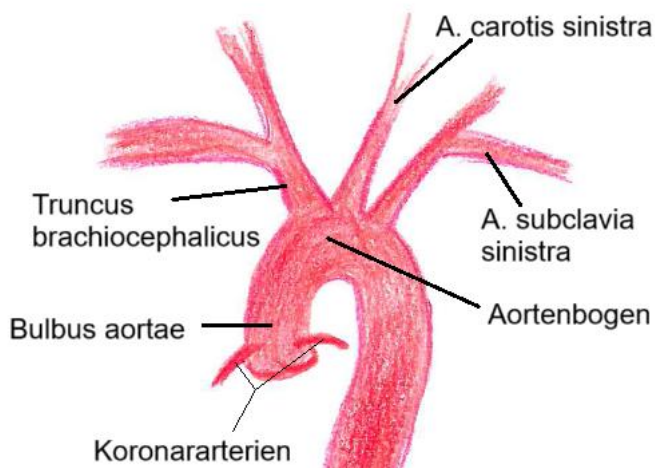


Abbildung 1. Aorta thoracica und ihre Abgänge

1.1.2. Atherosklerose und Pathophysiologie der Porzellanaorta

Die Aorta besteht aus drei Wandschichten: Tunica Intima, Media und Adventitia.¹⁰ Ihre histologische Struktur, charakterisiert durch einen hohen Anteil elastischer Fasern in der Tunica media, verleiht ihr eine zentrale hämodynamische Funktion für die kontinuierliche Aufrechterhaltung des Druckgradienten trotz der pulsatilen Auswurfleistung des Herzens.¹¹ Die zwei inneren Gefäßschichten können unabhängig voneinander kalzifizieren und eine schwere Atherosklerose entwickeln.¹²

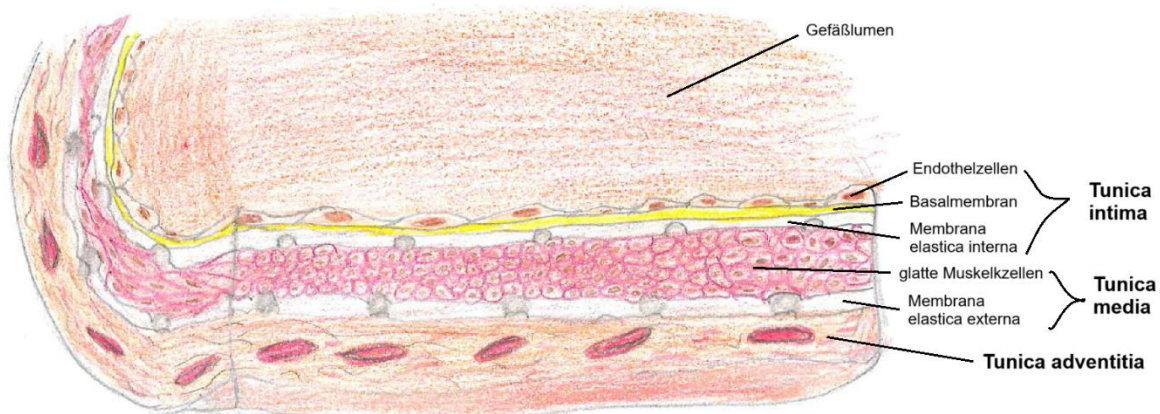


Abbildung 2. Aufbau einer elastischen Arterie, schematische Darstellung

Im Rahmen chronisch entzündlicher Prozesse kann es zur Einlagerung von Lipiden, Infiltration durch Makrophagen und zur Bildung atherosklerotischer Plaques kommen. Diese Plaques bestehen typischerweise aus Lipiden, Cholesterinkristallen, nekrotischem Gewebe und fibrösem Bindegewebe.^{13,14} Im fortgeschrittenen Stadium können sie vollständig verkalken.

Besonders betroffen ist dabei die Intima, wobei eine endotheliale Dysfunktion als zentraler Auslöser gilt.⁴

Die mechanische Dehnbarkeit der Aortenwand wird maßgeblich durch die Tunica media bestimmt.¹⁵ Diese besteht aus glatten Muskelzellen und elastischen Fasern, eingebettet in eine Matrix aus Kollagen, Proteoglykanen und weiteren Strukturproteinen.¹² In bestimmten Fällen wie bei urämischer Stoffwechsellage, nach Strahlentherapie oder bei Vaskulitiden, tritt eine Kalzifikation der Media ohne das klassische Bild einer Atherosklerose auf.¹⁵ Dabei kommt es zur Differenzierung glatter Muskelzellen in osteoblastenähnliche Zellen, die kalzifizierende Matrixproteine exprimieren. Dieser Prozess verstärkt die Aortensteifigkeit und fördert das Risiko vaskulärer Komplikationen. Die sogenannte PA stellt somit eine seltene, aber klinisch hochrelevante Sonderform der Aortenkalzifikation dar. Sie ist durch eine zirkuläre, massive Verkalkung gekennzeichnet, die die operative Manipulation der Aorta erheblich erschwert und das Risiko embolischer Komplikationen deutlich erhöht. Ihre Ätiologie ist multifaktoriell, eine genetische Prädisposition ist bislang nicht gesichert. Eine immunologische Aktivierung durch Makrophagen und Monozyten, die proinflammatorische Zytokine freisetzen, konnte sowohl in Tiermodellen als auch beim Menschen beobachtet werden.¹⁶ Auch das Komplementsystem spielt eine Rolle in der Atherogenese, wobei das C-reaktive Protein (CRP) als zentraler Aktivator des klassischen Komplementweges fungiert.¹⁷

1.1.3. Die Definition und Klassifikation einer Porzellanaorta

Der Begriff PA bezeichnet das typische radiologische Erscheinungsbild einer zirkulär verkalkten Aortenwand, die durch ihre dichte, schalenartige Kalzifikation an gebranntes Porzellan erinnert. Diese bildhafte Beschreibung soll das Ausmaß der Kalzifikation veranschaulichen, wobei sowohl segmentale als auch diffuse Kalzifikationsverteilungen zu beobachten sind.^{7,18} Die Erstbeschreibung erfolgte 1986 von Coselli und Crawford im Rahmen eines Fallberichts verwendet, in dem zwei Patienten mit schwerer Kalzifikation der Aorta ascendens beschrieben wurden.¹⁹ Der Fokus lag dabei eher auf der chirurgischen Technik als auf der Pathophysiologie.

In der klinischen Praxis erfolgt die Klassifikation der PA typischerweise anhand von Lokalisation, Ausdehnung und chirurgischer Relevanz. Bezüglich Lokalisation unterscheidet man klinisch die Kalzifikation der Aorta ascendens, häufig unter Einbeziehung des Aortenbogens, die Kalzifikation des Aortenbogens, ohne Beteiligung der Aorta ascendens und die isolierte Kalzifikation der Aorta descendens. Zusätzlich kann die PA histologisch anhand der betroffenen Wandschichten unterschieden werden: transmural (alle drei Wandschichten

betreffend) vs. parietal (auf Intima und/oder Media begrenzt). Weitere Differenzierungen beziehen sich auf den Zeitpunkt der Diagnosestellung (radiologisch vs. intraoperativ: makroskopisch und palpatorisch). Operativ entscheidend ist, ob Manipulationen wie Klemmen oder Kanülieren ohne erhöhtes Risiko möglich sind. Daher wird zwischen chirurgisch relevanter und nicht-relevanter PA unterschieden. Eine einheitliche, international etablierte Klassifikation existiert bislang nicht. In der Fachliteratur finden sich zahlreiche, teils heterogene Einteilungssysteme, die häufig an spezifischen Zentren entwickelt wurden und klinikinterne Standards widerspiegeln. Die Notwendigkeit einer klaren Definition ist evident: nur auf dieser Grundlage lassen sich Patienten gezielt diagnostizieren und adäquat versorgen. Ein Scoring-System, analog zum EUROScore II, wäre wünschenswert.

Tabelle 1. Historische Entwicklung der Definition und Klassifikation einer Porzellanaorta

Studie	Jahr	Definition Porzellanaorta und Schweregrad der Verkalkung
Coselli und Crawford ¹⁹	1986	Porzellanaorta: keine plaquefreien Areale in der gesamten Zirkumferenz bei der manuellen Palpation der Aorta ascendens, Aorta nicht klemmbar
Mills und Everson ²⁰	1991	Absent: Aorta unauffällig, keine Plaquebildung Mild: vereinzelte kleine Plaques, nicht in der kompletten Zirkumferenz Moderate: Aorta stark verändert, viele Plaques, die eine potenzielle Embolisationsquelle darstellen, nicht in der kompletten Zirkumferenz, Klemmen der Aorta weiterhin möglich Severe: zirkumferentielle Kalzifikation der Aorta ascendens, „Porzellanaorta“, Klemmen hier nicht möglich
Katz et al. ²¹	1992	I: Aorta unauffällig, keine Plaquebildung II: Ausgedehnte Verdickung der Tunica intima III: Vorwölbung eines Atheroms < 5mm in der Aorta IV: Vorwölbung eines Atheroms > 5mm in der Aorta V: Weiche, mobile Atherome
Wareing et al. ²²	1993	Mild: Lokale Intimaverbreitung ≤ 3mm Moderate: Intimaverbreitung 3mm – 5mm Severe: Intimaverbreitung > 5mm + ausgeprägte Kalzifikation, sich vorwölbende oder mobile Atherome, ulzerierte Plaques, sichtbare Thromben, eine nahezu oder komplette zirkumferentielle Beteiligung der Aorta ascendens
Svennson et al. ²³	1996	Porzellanaorta: Kalzifikation der Tunica media in der Aorta ascendens sowie im Aortenbogen

Studie	Jahr	Definition Porzellanaorta und Schweregrad der Verkalkung
Leyh et al. ²⁴	1999	Porzellanaorta: schwere zirkumferentielle Kalzifikation der gesamten Aorta ascendens und des proximalen Aortenbogens <u>Klemmen möglich:</u> im Truncus brachiocephalicus ohne Plaques
Rodés-Cabau et al. ²⁵	2010	Die Porzellanaorta ist als eine extensive zirkumferentielle Kalzifikation der Aorta thoracica definiert. Die Kalzifikation muss durch CT oder Fluoroskopie festgestellt worden sein. Die Diagnosestellung erfolgt subjektiv, basierend auf dem Urteil des behandelnden Arztes.
Nishi et al. ²⁶	2010	Scoring der Kalzifikation in einer Porzellanaorta via Bildgebung CT-Analyse (Virtual Place Liberty, Japan) bestimmt: die Zirkumferenz der Kalzifikation durch die Gesamtzirkumferenz der Aorta ascendens Kalzifikation unter Truncus brachiocephalicus ausgerechnet Scoring <75% -> Klemmen möglich Idealerweise Scoring <50%, ergänzend epiaortale Echokardiographie
Amorim et al. ²⁷	2013	Typ I - Aorta ascendens, Scoring nach Nishi et al. Typ IA - Kalzifikation >75%, Klemmen nicht möglich Typ IB - Kalzifikation <75%, Klemmen bedingt möglich Typ II - Aortenbogen und/oder Aorta descendens
Snow et al. ²⁸	2018	CT-Basiertes Scoring, Aorta in 3 Segmente geteilt, diese einzeln nach visueller Einschätzung der Kalzifikation in Prozent eingestuft Segment 1: Sinotubulärer Übergang zu mittleren Aorta ascendens Segment 2: Mittlere Aorta ascendens bis Truncus brachiocephalicus Segment 3: Truncus brachiocephalicus bis linke Arteria subclavia 0: keine Kalzifikation 1: <25% 2: 25-49% 3: 50-74% 4: 75-99% 5 100%

1.1.4. Prävalenz der Porzellanaorta

Die in der Literatur berichtete Prävalenz der PA variiert erheblich: Angaben reichen von 0,6 % bis zu 40 %.^{25,28} Diese enorme Spannweite ist primär auf die uneinheitliche Definition der PA sowie unterschiedliche bildgebende Verfahren zurückzuführen. Häufig wird nicht klar zwischen

generalisierten Aortenkalzifikationen und zirkumferentiellen, operativ relevanten Veränderungen differenziert.

Frühe Studien, wie die von Wareing et al., zeigten bei 13,6 % der Patient*innen mittels epiaortalem Ultraschall hochgradige Kalzifikationen, ohne dabei den Begriff PA explizit zu verwenden.²⁹ Spätere Arbeiten, wie z. B. von Leyh et al., definierten die PA als vollständige zirkuläre Kalzifikation der Aorta ascendens und fanden eine deutlich niedrigere Prävalenz (1,2 %)²⁴. Auch in großen multizentrischen Studien, wie etwa PARTNER-1, wurde der Begriff verwendet, jedoch uneinheitlich.³⁰

In TAVI-Kollektiven werden tendenziell höhere Raten beschrieben: Rodés-Cabau und Webb et al. berichten Prävalenzen zwischen 16 und 21 %, in einzelnen Hochrisikokollektiven sogar bis zu 40 %.^{25,31,32} Die Bandbreite spiegelt nicht nur die zugrunde liegende Patientenselektion wider, sondern auch die benutzten diagnostischen Verfahren. So ergab etwa die Studie von Buz et al. mittels CT und 3D-Rekonstruktion bei 18 % der Patient*innen hochgradige Aortenkalzifikationen, aber nur bei 6 % eine echte zirkumferentielle PA.³³

Mehrere Studien betonen die Bedeutung einer standardisierten CT-basierten Diagnostik: Zahn et al. fanden in einer multizentrischen Auswertung große Zentrum-zu-Zentrum-Unterschiede (0–70 %) bei einer durchschnittlichen Prävalenz von 10,7 %.³⁴ Van der Linden et al. bezifferten hochgradige Atherosklerose der Aorta ascendens mit 26,2 %, ohne den Begriff PA zu verwenden.³⁵ Snow et al. benutzen eine spezifische Definition („umfangreiche Kalzifikation oder schwerwiegende Plaquerbildung bis in den Aortenbogen“) und erreichten damit eine PA-Prävalenz von 0,6 %.²⁸

Die vorliegenden Daten zeigen, dass ohne eine einheitliche, bildgebungsbasierte Definition der Porzellanaorta keine belastbare Aussage über ihre tatsächliche Prävalenz möglich ist. Eine standardisierte, idealerweise CT-gestützte Klassifikation erscheint essenziell, um die klinische Relevanz dieser Pathologie adäquat erfassen und vergleichen zu können.

Tabelle 2. Prävalenz der Porzellanaorta, chronologisch. Vorhandensein einer Definition der Porzellanaorta; Patientenkollektiv in der Studie

Studie	Jahr	Prävalenz der PA	Patienten	Definition PA	Inzidenz PA und Schlaganfall	Operation
Wareing et al. ²⁹	1992	13.6%*	n=500	nein	1,2%	Allgemein Herz-OP
Leyh et al. ²⁴	1999	1,2%	n=1876	ja	0%	ACVB

Studie	Jahr	Prävalenz der PA	Patienten	Definition PA	Inzidenz PA und Schlaganfall	Operation
Cribier et al. ³⁶	2006	5%	n=36	nein	Keine Angabe	TAVI
Webb et al. ³¹	2007	16%	n=50	nein	Keine Angabe	TAVI
Himbert et al. ³⁷	2009	12% 6% 26%	n=75 n=51 n=24	nein	Keine Angabe	ges. TAVI TF TApik
Webb et al. ³²	2009	21,4% 17,7% 29,1%	n=168 n=113 n=168	nein	Keine Angabe	ges. TAVI TF TApik
Ye et al. ³⁸	2009	40%	n=26	nein	Keine Angabe	TAVI
Gillinov et al. ³⁹	2000	HAA 1.2% PA 18% **	n=4983 n=62 **	ja	10%	AKE
Van der Linden et al. ³⁵	2001	26.2%*	n=921	nein	8,7%	Allgemein Herz-OP
Leon et al. ³⁰	2010	15,1%	n=358	nein	Keine Angabe	TAVI
Rodés-Cabau et al. ²⁵	2010	18%	n=339	ja	1,6%	TAVI
Buz et al. ³³	2011	6%	n=256	ja	6,2%	TApik TAVI
Faggiano et al. ⁴⁰	2012	7,5%	n=240	ja	Keine Angabe	MT BV TAVI SAVR
Zahn et al. ³⁴	2013	10,7%	n=1347	ja	5,5%	TAVI
Snow et al. ²⁸	2018	0,6%	n=175	ja	nein	TAVI präop

* in dieser Studie wird der Begriff Porzellanaorta nicht direkt erwähnt, jedoch spricht man von einer hochgradigen Kalzifikation der Aorta ascendens. Dieses Krankheitsbild wird in anderen Studien als Porzellanaorta klassifiziert, sodass die Prävalenz ebenfalls tabellarisch erfasst wurde

**es handelt sich um einen patientenkollektiv von n= 4983 Patienten, davon haben insgesamt n=62 Patienten (1,2%) eine hochgradige Atherosklerose der Aorta Ascendens. Diese n=62 Patienten formen einen neuen Patientenkollektiv, davon haben insgesamt 18% eine eierschalenartige Porzellanaorta

1.2. Die Herz-Lungen-Maschine und die Porzellanaorta

1.2.1. arterielle Zugangswege

Die Herz-Lungen-Maschine (HLM) ist ein zentraler Bestandteil der modernen Herzchirurgie. Sie übernimmt temporär die Funktion von Herz und Lunge, indem sie Oxygenierung, CO₂-Elimination und systemische Perfusion gewährleistet. Hierzu wird das Blut über eine venöse Kanüle abgeleitet, extrakorporal aufbereitet und über eine arterielle Kanüle dem Kreislauf wieder zugeführt. Diese Technik ermöglicht einen kardioplegischen Herzstillstand und schafft damit die Voraussetzung für komplexe intrakardiale Eingriffe.

Während sich bestimmte Eingriffe wie z.B. die Myokardrevaskularisation in OPCAB-Technik prinzipiell auch ohne HLM realisieren lassen, ist ihre Anwendung bei Patient*innen mit PA aufgrund der komplexen Risikokonstellation oftmals notwendig.⁴¹ In solchen Fällen stellt insbesondere die Wahl des arteriellen Zugangswegs eine entscheidende Herausforderung dar.

Der Standardzugang über die Aorta ascendens (zentral-aortale Kanülierung) erlaubt eine direkte Kontrolle des Blutflusses, birgt jedoch bei ausgeprägter Atherosklerose oder zirkulärer Kalzifikation ein hohes Risiko für Plaquelösungen, Embolien und Gefäßverletzungen. Bei Vorliegen einer PA ist diese Form der Kanülierung meistens nicht gut geeignet.⁴²

Als Alternativen kommen periphere Zugänge infrage, insbesondere über die Arteria femoralis oder Arteria axillaris.⁴³ Die femorale Kanülierung, offen chirurgisch oder perkutan mittels Seldinger-Technik durchgeführt, führt zu einer retrograden Perfusion. Diese kann bei kleinen Gefäßdurchmessern hämodynamisch limitierend sein und das Risiko atheroembolischer Komplikationen erhöhen. Die axilläre Kanülierung, häufig bei ausgedehnten thorakalen Aortenpathologien angewendet, erlaubt eine antegrade Perfusion und gilt als schonender für das zerebrale Stromgebiet. Technisch erfordert sie jedoch eine hohe operative Expertise und ist ebenfalls durch eine kleinere Kalibergrenze des Gefäßes limitierend für den HLM-Fluss.⁴⁴

Die Auswahl des optimalen Zugangsweges muss unter Berücksichtigung anatomischer Gegebenheiten, des Ausmaßes der Kalzifikation, des geplanten Eingriffs und des individuellen Risikoprofils erfolgen.⁴⁵ Bei einer PA ist der Anschluss an die HLM mit einem erhöhten Embolierisiko für zerebrale, koronare und viszerale Gefäße sowie mit mechanischen

Herausforderungen durch die rigide, unelastische Aortenwand assoziiert. Das Risiko für Dissektionen und Rupturen ist deutlich erhöht. Trotz dieser Einschränkungen kann der Einsatz der HLM auch beim Vorliegen einer PA sinnvoll sein, z.B. bei komplexen Eingriffen mit hohem Risiko für eine hämodynamische Instabilität. Voraussetzung ist eine modifizierte operative Strategie, die insbesondere die Kanülierung und Manipulation an der Aorta ascendens minimiert. Die Vielzahl verfügbarer Kanülierungstechniken ermöglicht somit eine patientenindividuelle Planung und trägt wesentlich zur Erhöhung der Eingriffssicherheit und Ergebnisqualität der Operationen bei.

1.2.2. Klemmen der Aorta

Bei herzchirurgischen Operationen unter Einsatz der HLM erfolgt üblicherweise das temporäre Abklemmen der Aorta ascendens, um ein blutfreies Operationsfeld zu schaffen und den systemischen Kreislauf vom Herzen zu entkoppeln. Diese Okklusion wird mit einer speziellen Aortenklemme durchgeführt, sodass während der Gabe von kardioplegischer Lösung ein vollständiger Herzstillstand induziert werden kann.⁴⁶ Nach Abschluss der Operation wird die Klemme entfernt und die physiologische Zirkulation wiederhergestellt.

Beim Vorliegen einer PA ist diese Technik mit erheblichen Risiken behaftet. Die zirkumferentielle Kalzifikation führt zu einer rigiden, spröden Aortenwand, wodurch sowohl die mechanische Klemmung als auch jede Form der Manipulation potenziell traumatisch wirken kann. Die Folgen sind ein signifikant erhöhtes Risiko für Dissektionen, Aortenrupturen und vor allem embolische Komplikationen durch Plaqueabrisse, insbesondere im zerebralen Stromgebiet.^{26,39,42}

Die häufigste Technik bleibt das direkte Querklemmen der Aorta ascendens. Die Wahl der Klemmstelle kann je nach Verteilung der Kalzifikationen variieren. Oftmals sind Areale nahe dem Abgang des Truncus brachiocephalicus weniger betroffen und bieten eine potenzielle Zone für eine relativ sichere Okklusion bei einer PA, siehe Abbildung 3.²⁶

Auch die Wahl des Klemmwinkels und des Klemmtyps (z. B. gebogene oder abgewinkelte Modelle nach Crawford oder DeBakey) kann individualisiert erfolgen, um die Manipulation möglichst atraumatisch zu gestalten.

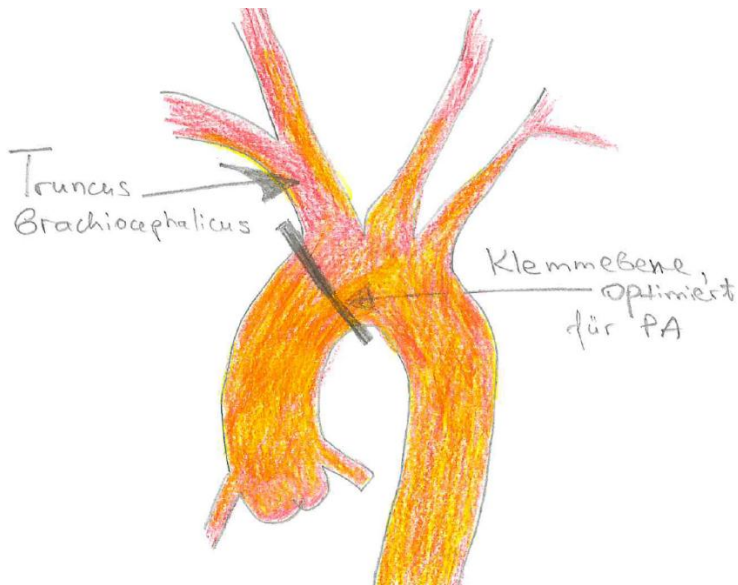


Abbildung 3. Darstellung der Klemmebene für totalem Querklemmen der Aorta, speziell optimiert für eine Porzellanaorta, nach Nishi et. al. Fig. 2²⁶

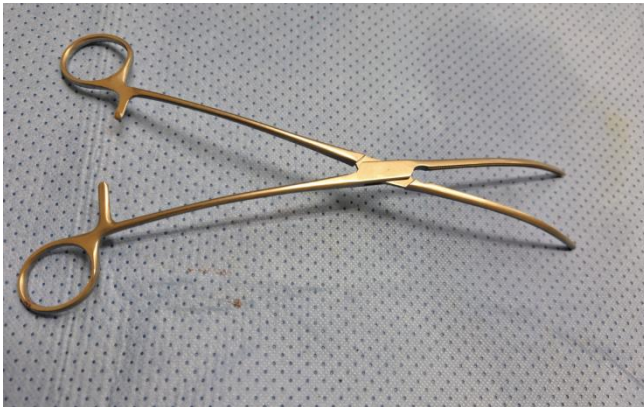


Abbildung 4. Gefäßklemme nach Crawford



Abbildung 5. Gefäßklemme nach De Bakey, inklusive spezieller Bezug zur Gefäßschonung

Darüber hinaus werden vereinzelt endovaskuläre Methoden beschrieben, wie z.B. die temporäre intraluminale Aortenokklusion mittels einem Ballonkatheter. Diese gelten als potenziell weniger invasiv, sind jedoch experimentell und bislang klinisch kaum etabliert.^{47,48}



Abbildung 6. Endovaskuläre Aortenokklusion anstatt Klemmen von extern, Adaptierte Zeichnung nach Fig. 1 aus dem Paper Cosgrove et. al ⁴⁷

Eine weitere Möglichkeit ist die Operation ohne Aortenklemme im Rahmen einer OPCAB. Dabei erfolgt die myokardiale Revaskularisation am schlagenden Herzen, ohne Einsatz der HLM. Diese Technik reduziert das Risiko aortaler Manipulationen erheblich, ist jedoch auf Eingriffe ohne Eröffnung der Herzhöhlen beschränkt.

Eine offene Klappen- oder Aortenchirurgie ist ohne die HLM und Aortenklammung nicht realisierbar. In komplexen Fällen kann ein hybrides Vorgehen erwogen werden, beispielsweise die Kombination einer konventionellen CABG mit minimalinvasiver Klappenimplantation, unter sorgfältiger Risiko-Nutzen-Abwägung.

1.3. Präoperative Bildgebung bei Verdacht auf Porzellanaorta

Eine systematische und strukturierte präoperative Bildgebung ist essenziell für die Detektion aortaler Pathologien, insbesondere bei Verdacht auf eine PA. Leyh et al. (1999) zeigten, dass in einem signifikanten Anteil der Fälle die Diagnose erst intraoperativ durch manuelle Palpation gestellt wurde – mit entsprechend erhöhtem Risiko für perioperative Komplikationen.²⁴ Während konventionelle Verfahren wie der Röntgen-Thorax oder die Cineangiographie heute als obsolet gelten, ermöglichen moderne Modalitäten wie die Computertomographie (CT), Echokardiographie (TEE/TTE) und Magnetresonanztomographie (MRT) eine differenzierte, teils quantitative Beurteilung der Aortenmorphologie.^{49,50} Die diagnostische Wertigkeit dieser Verfahren im Kontext der PA-Diagnostik wird im Folgenden differenziert dargestellt.

1.3.1. Röntgen-Thorax

Die konventionelle Röntgen-Thoraxaufnahme wird trotz begrenzter Sensitivität (ca. 50%) und Spezifität (70–80%) für die Entdeckung einer PA weiterhin routinemäßig in der präoperativen Vorbereitung eingesetzt.⁵¹ Zwar lassen sich ausgeprägte Verkalkungen gelegentlich als Aortensklerose erkennen, doch milde oder fokale Veränderungen bleiben häufig unentdeckt. Der niedrige negative prädiktive Wert (<50%) limitiert den Ausschluss einer PA erheblich. Dennoch bietet das Verfahren bei minimaler Strahlenbelastung wertvolle Zusatzinformationen über Begleitbefunde wie Kardiomegalie, Pleuraergüsse oder pulmonale Pathologien.^{52,53}

1.3.2. Computertomographie (CT)

Die Computertomographie (CT) gilt heute als Goldstandard zur Beurteilung aortaler Pathologien. Sowohl die native CT als auch die kontrastmittelgestützte CT-Angiographie (CTA) ermöglichen eine hochauflösende Darstellung der gesamten thorakalen Aorta sowie ihrer Abgänge.^{52,53}

Durch dreidimensionale Rekonstruktionen kann das Ausmaß aortaler Kalzifikationen präzise erfasst und quantifiziert werden. Dies erlaubt nicht nur eine zuverlässige Identifikation einer PA, sondern auch eine gezielte Planung alternativer Kanülierungsstrategien.⁵⁴ Im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren zeigt die CT eine überlegene Sensitivität und Spezifität, insbesondere gegenüber Echokardiographie und konventionellem Röntgen.

Als potenzieller Nachteil gilt die Strahlenexposition, die jedoch durch den Einsatz der Low-Dose-CT deutlich reduziert werden kann. Durch Anpassung der Scanparameter, Senkung des Röhrenstroms und moderne Rekonstruktionsverfahren lässt sich die Dosis bei weitgehend erhaltener Bildqualität signifikant verringern.⁵⁵ Insbesondere für die präoperative Erstuntersuchung bietet dadurch diese Technik Vorteile, da sie das Risiko strahleninduzierter Schäden und langfristiger Gesundheitsfolgen minimiert.

Die CTA erweitert die Beurteilung um eine kontrastmittelgestützte Darstellung der Gefäßlumina. Dadurch lassen sich Aneurysmen, Dissektionen oder relevante Atherome zuverlässig erkennen.^{56,57} Für die Diagnose einer PA liefert jedoch häufig bereits die native CT ausreichend Information, da Kalzifikationen auch ohne Kontrastmittel deutlich abgebildet werden können. Vor Kontrastmittelapplikation sind mögliche Kontraindikationen wie Nierenfunktionsstörungen oder Allergien sorgfältig abzuwägen. Zudem erfordert die Durchführung entsprechende technische Ausstattung, geschultes Personal und ökonomische

Ressourcen. Trotz dieser Anforderungen bleibt die CT das diagnostische Verfahren der Wahl bei Verdacht auf ausgedehnte Aortenkalzifikationen, insbesondere im Rahmen der präoperativen Abklärung einer PA vor herzchirurgischen Eingriffen.⁵⁸

1.3.3. Transösophageale und transthorakale Echokardiographie (TEE, TTE)

Die transösophageale (TEE) und die transthorakale Echokardiographie (TTE) ermöglichen eine nicht-invasive Echtzeitbeurteilung der Aorta. Aufgrund der anatomischen Nähe zur Aorta ascendens bietet die TEE eine exzellente Bildauflösung, insbesondere zur Erkennung atherosklerotischer Plaques. Verkalkte Wandareale mit einer Dicke von mehr als 4 mm gelten als potenziell emboliegefährlich.^{59,60} Eine diagnostische Einschränkung ergibt sich jedoch im Bereich der Aorta ascendens, da der linke Hauptbronchus zwischen Speiseröhre und Aorta liegt. Dieser sogenannte „Blindbereich“ erschwert gerade dort die Darstellung kritischer Läsionen – also jener Region, in der eine Porzellanaorta häufig auftritt.

Zusätzlich ist die Aussagekraft der Untersuchung stark vom Untersucher abhängig.⁵⁰ Während größere morphologische Veränderungen wie Aneurysmen oder Plaques mit grober Struktur gut darstellbar sind, erlaubt die Sonographie keine zuverlässige Quantifizierung des Kalzifikationsgrades. Daher bleibt bei klinischem Verdacht auf eine PA eine strukturierte bildgebende Abklärung mittels CT unverzichtbar, insbesondere zur präzisen morphologischen Einordnung und Risikobewertung.

1.3.4. Magnetresonanztomographie (MRT)

Die Magnetresonanztomographie (MRT) stellt eine strahlungsfreie Methode der Gefäßbildgebung dar und zeichnet sich durch eine hohe Gewebeauflösung sowie eine exzellente Weichteildarstellung aus. Bei der Beurteilung aortaler Kalzifikationen ist ihr Nutzen jedoch begrenzt: Verkalkungen erscheinen signalarm und können, insbesondere bei turbulenten Flussverhältnissen, durch Artefakte verfälscht oder unzureichend abgebildet werden.⁴⁹

Weitere Einschränkungen betreffen die lange Untersuchungsdauer, die Anfälligkeit für Bewegungsartefakte, die eingeschränkte Verfügbarkeit sowie Kontraindikationen wie implantierte elektronische Geräte. Aufgrund dieser Limitationen ist die MRT für die standardisierte Diagnostik einer Porzellanaorta nicht geeignet und spielt in diesem Kontext keine primäre Rolle.

1.3.5. Exkurs: intraoperative epiaortale Sonographie

Die epiaortale Sonographie wurde in den 1970er-Jahren als intraoperatives Verfahren zur Beurteilung der Aortenwand eingeführt. Mit dem Aufkommen der transösophagealen Echokardiographie (TEE) verlor sie zunehmend an Bedeutung für die Klappendiagnostik, blieb jedoch weiterhin zur Darstellung aortaler Plaques im Einsatz.^{61,62} Dabei wird der Ultraschallkopf direkt auf die freipräparierte Aorta ascendens oder den Aortenbogen aufgesetzt, um Wandveränderungen sichtbar zu machen. Die Methode gilt als kostengünstig und technisch unkompliziert, ist jedoch stark anwenderabhängig. Die Qualität der Bildgebung hängt maßgeblich von der Erfahrung des Operateurs ab. Zu den Nachteilen zählen eine Verlängerung der Operationszeit sowie eine potenzielle Beeinträchtigung der Sterilität im OP-Feld. Kritisch wird zudem diskutiert, dass ihr diagnostischer Mehrwert gegenüber der manuellen Palpation begrenzt ist. Studien zeigen eine vergleichbare Sensitivität beider Verfahren.⁶³ Aus diesen Gründen wird die epiaortale Sonographie heute nur noch vereinzelt eingesetzt und gilt in vielen herzchirurgischen Zentren als obsolet.

1.4. Apoplex im Rahmen einer Herzoperation

1.4.1. Apoplexrisiko bei Herzoperationen

Patienten mit PA weisen ein besonders hohes Risiko für zerebrovaskuläre Komplikationen auf.³⁵ Ein perioperativer Apoplex ist eine der meist gefürchteten perioperativen Komplikationen in der Herzchirurgie und kann nicht nur die stationäre Verweildauer verlängern, sondern auch zu bleibender Pflegebedürftigkeit oder erhöhter Mortalität führen.⁶⁴ Die demografische Entwicklung führt zudem zu älteren und multimorbideren Patientenkollektiven, was das Risiko weiter erhöht – trotz signifikanter Fortschritte in der chirurgischen Technik.

Die meisten Schlaganfälle im Rahmen kardiochirurgischer Eingriffe sind ischämischer Genese.⁶⁵ PlaqueeMBOLIEN entstehen typischerweise durch Manipulationen an der Aorta, insbesondere beim Klemmen der Aorta oder durch die Kanülierung an der HLM. Hämorrhagische Schlaganfälle sind deutlich seltener. Auch der zeitliche Verlauf variiert: sie können intra-, peri- oder postoperativ auftreten. Klinisch manifestiert sich der Schlaganfall durch akute neurologische Ausfälle, die typischerweise beim Aufwachen nach der Operation im Rahmen des Weanings deutlich werden. Vegetative Parameter wie plötzliche Blutdruckveränderungen sind als Frühsymptome wenig spezifisch.

Eine reine zerebrale Minderperfusion als Ursache für Schlaganfälle im Rahmen der HLM wird in der Literatur als unwahrscheinlich angesehen. Späte Apoplexe nach Herzoperationen sind häufiger Folge eines postoperativen Volumenmangels oder systemischer Embolien, etwa durch Fett, Luft oder Thromben.⁶⁴ Auch asymptomatische Karotisstenosen zeigen keinen signifikanten Zusammenhang mit dem Schlaganfallrisiko.⁶⁶

Ein weiterer relevanter Risikofaktor ist die Dringlichkeit des Eingriffs: Notfalloperationen sind häufiger mit erhöhtem Schlaganfallrisiko assoziiert, da präoperative Diagnostik und Optimierung oft unvollständig sind.⁶⁴ Solche Patient*innen befinden sich meist in einem schlechteren Allgemeinzustand, was unvorhergesehene intraoperative Erweiterungen des Eingriffs wahrscheinlicher macht – mit entsprechender Verlängerung der Operationszeit und erhöhtem zerebrovaskulären Risiko. Die Inzidenz eines perioperativen Schlaganfalls hängt zudem von der Art und Komplexität der Operation ab. Während bei isolierten CABG das Risiko zwischen 1,4 % und 3,8 % liegt, kann es sich bei komplexen Kombinationseingriffen nahezu verdoppeln.^{67,68}

In ausgewählten Fällen kann eine perkutane Koronarintervention (PCI) als Alternative oder Ergänzung zur chirurgischen Versorgung erwogen werden, insbesondere wenn das Risiko der Aortenklemmung als prohibitiv hoch eingeschätzt wird.^{69,70} Dennoch bleibt CABG bei komplexer Koronarmorphologie häufig die bevorzugte Strategie, wobei intraoperative Techniken zur Minimierung der Aortenmanipulation entscheidend sind.

Tabelle 3: Apoplexrisiko nach unterschiedlichen chirurgischen Eingriffen, übersetzt aus Tabelle 1. Selim et.al.⁶⁴

Durchgeführte Operation	Apoplexrisiko in %
Allgemeinchirurgische Eingriffe	0,08-0,7%
Periphere Gefäßchirurgie	0,8%-3%
Resektion von Hals- und Kopftumore	4,8%
Endarterektomie der Arteria carotis	5,5-6,1%
Isolierte Bypassoperation	1,4%-3,8%,
Kombieingriff Bypass- sowie Herzklappenoperation	7,4%
Isolierte Herzklappenoperation	4,8-8,8%
Doppel- oder Dreifachherzklappeneingriff	9,7%
Aorteneingriff	8,7%

Tabelle 4. Entstehung von Embolien durch gelöste Plaques und Atherome, daraus resultierenden Komplikationen: mögliche Gründe

Grund für Embolien und Komplikationen	Beschreibung
Übergreifende Palpation der Aorta	Manuelle Abtastung der Aorta während der Kanülierung
Manipulation der Aorta	Eingriffe an der Aorta während der proximalen Transplantatanastomose
Klemmen der Aorta	Anwendung einer Klemme zur Unterbrechung des Blutflusses durch die Aorta
Druckstrahl-Effekt der Aortenkanüle	Hohe Geschwindigkeit des Blutflusses durch die Aortenkanüle verursacht Ablösung von Plaques, auf Englisch bekannt als „sandblasting“

1.4.2. Präventive Maßnahmen zur Schlaganfallvermeidung bei Porzellanaorta

Bei Patient*innen mit Porzellanaorta besteht ein erhöhtes Risiko für zerebrale Embolien während der Myokardrevaskularisation, insbesondere bei jeder Manipulation der Aorta ascendens. Präventive Strategien setzen daher bereits präoperativ an: eine detaillierte CT-Bildgebung der Aorta dient der Erfassung des Kalzifikationsmusters und der Planung aortenschonender Techniken. Zusätzlich wird bei Vorliegen weiterer Risikofaktoren wie Hauptstammstenose oder signifikanter Karotisstenose eine präoperative Duplexsonographie der extrakraniellen Karotiden empfohlen. Dies ermöglicht die Identifikation emboliegefährdeter Plaques und gegebenenfalls eine simultane oder vorgelagerte Intervention.⁷¹

Intraoperativ sollte die Aortenklammung nach Möglichkeit vermieden werden, um das Risiko einer Plaquemobilisierung zu minimieren. Ergänzend sind hämodynamische Stabilität, adäquate Volumentherapie sowie ein konsequentes Rhythmusmanagement wesentliche Elemente der intraoperativen Schlaganfallprävention.

1.5. Fragestellungen und Ziel der Arbeit

Die aortokoronare Bypassoperation bei Patient*innen mit PA stellt eine erhebliche operative Herausforderung dar. Besonders das intraoperative Management wie etwa die Verwendung der HLM sowie die Entscheidung für oder gegen das Klemmen der Aorta, ist mit einem

erhöhten Risiko für perioperative Komplikationen, insbesondere zerebrovaskuläre Ereignisse, verbunden.

Zentrale Fragestellung dieser retrospektiven Analyse ist, welche intraoperative Technik im Rahmen einer isolierten Myokardrevaskularisation bei Porzellanaorta den bestmöglichen perioperativen Outcome erzielt, mit besonderem Fokus auf den Einsatz der Aortenklamme.

Verglichen werden zwei operative Strategien: CABG mit Aortenklammung versus CABG ohne Aortenklammung. Dabei stehen neurologische Komplikationen, 30-Tages-Mortalität, Dauer der intensivmedizinischen Behandlung sowie weitere postoperative Parameter im Mittelpunkt.

Zur weiteren Differenzierung wurden innerhalb der Gruppe ohne Aortenklamme verschiedene Techniken – partielle Klemmen, Heart-String®-System und Enclose®-Verfahren – in einer Subgruppenanalyse auf ihren Einfluss auf intra- und postoperative Komplikationen untersucht.

Aufgrund der geringen Prävalenz, jedoch hohen klinischen Relevanz der Porzellanaorta, ist diese Untersuchung explorativ angelegt. Auch nicht signifikante Ergebnisse können wichtige klinische Hinweise für die zukünftige chirurgische Entscheidungsfindung liefern.

2. Material und Methoden

2.1. Patientenkollektiv

In diese retrospektive Studie wurden insgesamt 73 erwachsene Patient*innen eingeschlossen, bei denen zwischen dem 01.01.2013 und dem 31.12.2023 in der Klinik für Herz- und Thoraxchirurgie des Universitätsklinikums Köln oder in der CardioClinic Köln eine isolierte Myokardrevaskularisation über mediane Sternotomie durchgeführt wurde. Voraussetzung für die Aufnahme war der intraoperative Nachweis einer Porzellanaorta, die im Operationsbericht ausdrücklich dokumentiert wurde.

Im genannten Zeitraum wurden in beiden Einrichtungen insgesamt 8.765 isolierte CABG-Eingriffe durchgeführt, davon 89,26 % mit HLM und 10,74 % im Off-Pump-Verfahren (OPCAB).

Für die vorliegende Analyse berücksichtigt wurden ausschließlich jener Fälle, bei denen die Porzellanaorta intraoperativ diagnostiziert und von der Operateurin bzw. dem Operateur eindeutig als solche vermerkt wurde. Eine radiologische Klassifikation, etwa nach Mills und Everson²⁰, Amorim et al.²⁷ oder Snow et al.²⁸, erfolgte nicht.

Kombinationseingriffe (z. B. Klappenoperationen, Vorhofablationen, Carotisinterventionen oder Tumorresektionen) wurden ausgeschlossen. MIDCAB-Prozeduren wurden ebenfalls aus dem Patientenkollektiv ausgeschlossen.

Es verblieb eine homogene Kohorte von 73 Patient*innen ab 18 Jahren, bei denen ein isolierter CABG bei nachgewiesener Porzellanaorta über mediane Sternotomie durchgeführt worden war. Daraus ergibt sich eine Prävalenz von 0,83 % im Gesamtkollektiv für den definierten Studienzeitraum.

Ein Vergleich mit Patient*innen ohne Aortenverkalkung wurde bewusst nicht vorgenommen, um den Fokus auf das intraoperative Management bei sicher diagnostizierter Porzellanaorta zu legen.

Berücksichtigt wurden sowohl elektive als auch dringliche und notfallmäßige Eingriffe. Die Datenerhebung erfolgte vollständig retrospektiv anhand anonymisierter Krankenakten, sodass eine separate ethikrechtliche Genehmigung nicht erforderlich war.

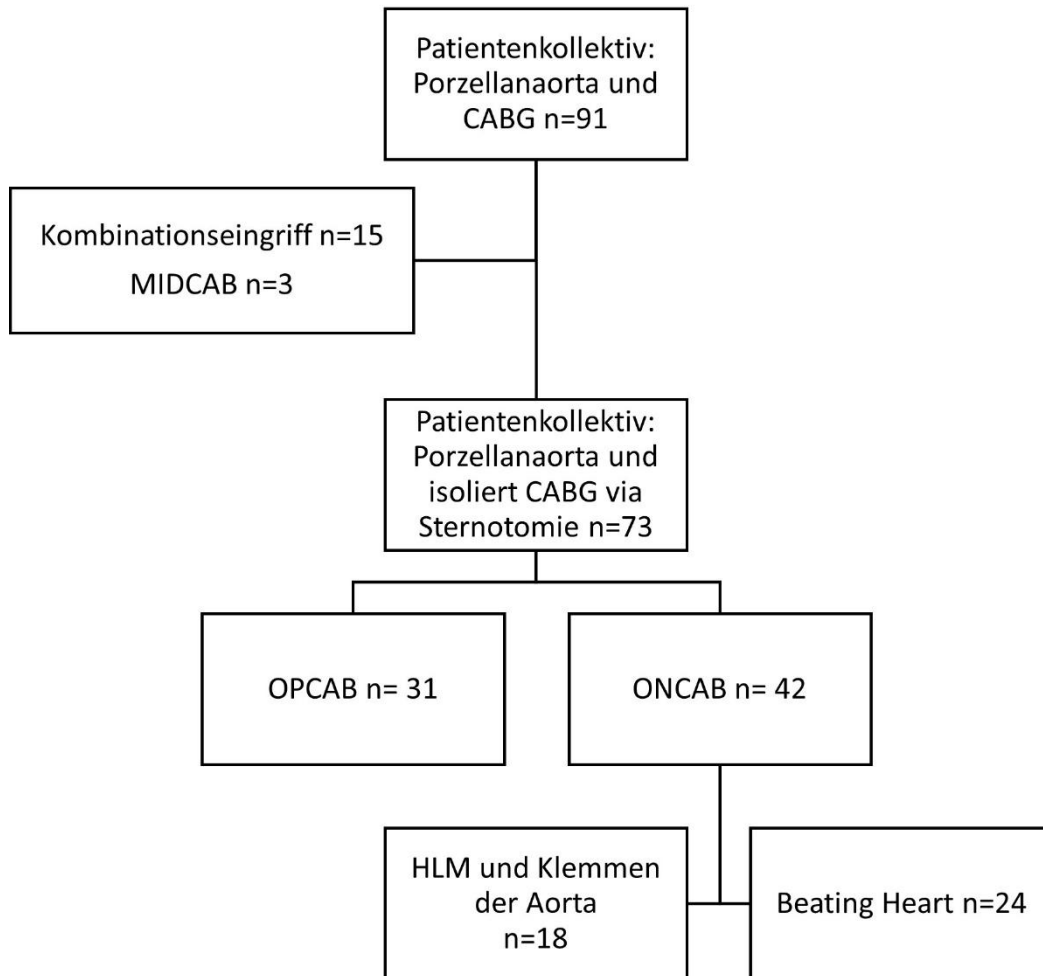


Abbildung 7. Patientenkollektiv: Flow Chart

2.1.1. Diagnostischer Standard

An der Universitätsklinik Köln sowie der CardioClinic Köln bestehen etablierte diagnostische Abläufe zur Abklärung aortaler Kalzifikationen. Standardmäßig wird präoperativ ein konventioneller Röntgen-Thorax in zwei Ebenen angefertigt. Die Bildbefunde werden nicht nur durch die Radiologie, sondern zusätzlich vom aufnehmenden Arzt sowie dem chirurgischen Team beurteilt.

Besteht der Verdacht auf eine fortgeschrittene Aortensklerose, folgt eine weiterführende CT-Angiographie des Thorax: in der Regel kontrastmittelverstärkt und EKG-getriggert. Die Auswertung umfasst neben dem Agatston- bzw. Kalziumscore auch dreidimensionale Rekonstruktionen mit Darstellung zirkulärer Verkalkungen. Diese Datenbasis erlaubt eine

präzise, patientenindividuelle Operationsplanung – inklusive Anpassung des Verfahrens, z. B. im Sinne einer OPCAB-Strategie.

In einzelnen Fällen blieb die Porzellanaorta trotz Bildgebung zunächst unentdeckt und wurde erst intraoperativ bei manueller Palpation der Aorta ascendens diagnostiziert. In solchen Situationen konnte das Vorgehen noch während der Operation angepasst werden.

Entsprechende Änderungen, etwa ein Wechsel von konventioneller HLM-CABG zu Beating-Heart-Techniken oder OPCAB, wurden in der Auswertung als Konversionsereignis dokumentiert.

Bis Ende 2023 erfolgte der Einsatz der erweiterten Bildgebung risikoadaptiert. Seit 2024 gilt eine standardisierte SOP, die bei definierten Risikofaktoren (z. B. pAVK, Kalziumscore > 400, positive Apoplex-Anamnese, Porzellanaorta im Röntgenbild oder Aortensklerose in der Koronarangiographie) die verbindliche Durchführung einer präoperativen CT des Thorax vorsieht.

2.2. Studiendesign und Methodik

Die Datenerhebung erfolgte im Zeitraum vom 01.08.2021 bis zum 10.01.2024. Erfasst wurden 73 Patient*innen mit intraoperativ gesicherter Porzellanaorta, die sich einer isolierten aortokoronaren Bypassoperation unterzogen haben.

Die Patient*innen wurden anhand des jeweils angewandten intraoperativen Vorgehens in zwei Hauptgruppen unterteilt:

- ohne Aortenklammung (n = 55)
- mit Aortenklammung (n = 18).

Die Zuordnung basierte ausschließlich auf den Operationsprotokollen sowie der dort beschriebenen vorgehensspezifischen Dokumentation.

Der Fokus der Analyse lag auf perioperativen Parametern, darunter:

- neurologische Komplikationen,
- 30-Tages-Mortalität,
- intensivmedizinische Verweildauer,
- sowie weitere klinisch relevante Endpunkte.

Innerhalb der Gruppe ohne Aortenklammung (OK) wurde eine Subgruppenanalyse durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Anastomosetechniken zu untersuchen. Berücksichtigt wurden dabei drei Verfahren:

- partielles Ausklemmen,
- das Heart-String®-System
- sowie die Enclose®-Technik.

Ziel war die Identifikation möglicher Unterschiede im intraoperativen Verlauf und bei der postoperativen Komplikationsrate.

Alle Datensätze wurden anhand individueller Patientenidentifikationsnummern vollständig anonymisiert erfasst.

Als Datenquellen dienten:

- elektronische Krankenakten (ORBIS-System),
- Operationsberichte aus dem internen Archiv der Herzchirurgie,
- sowie Entlassungsdokumente mit codierten Diagnosen und vollständiger prä-, intra- und postoperativer Befunddokumentation.

Zusätzlich dokumentiert wurden:

- Anzahl und Art der Anastomosen,
- Verläufe auf der Intensivstation,
- neurologische Ereignisse,
- durchgeführte Bildgebung,
- Veränderungen der Nierenfunktion,
- sowie sämtliche postoperativen Komplikationen.

Die final erhobenen Daten wurden in einer strukturierten, anonymisierten Porzellanaorta-Datenbank am Standort Köln abgelegt und bilden die Grundlage für die vorliegende Analyse.

2.2.1. Perioperative Datenerhebung (prä-, intra- und postoperativ)

Für eine valide statistische Auswertung wurden umfassende prä-, intra- und postoperative Parameter systematisch erfasst. Zu den demografischen Basisdaten zählten Alter, Geschlecht, Körpergröße, Körpergewicht sowie der daraus berechnete Body-Mass-Index (BMI). Auf eine gesonderte Erhebung der Ethnie wurde verzichtet, da es sich um ein ethnisch homogenes Kollektiv handelte (mehrheitlich kaukasische Patient*innen).

Im präoperativen Datensatz wurden relevante Grunderkrankungen und Risikofaktoren dokumentiert, darunter:

- arterielle Hypertonie,
- Diabetes mellitus,
- Hypercholesterinämie,
- Vorhofflimmern und andere Rhythmusstörungen,
- sowie aktiver oder ehemaliger Nikotinkonsum.

Eine bestehende Immunsuppression, z. B. im Rahmen einer systemischen Kortikosteroidtherapie, wurde ebenfalls berücksichtigt.

Ein besonderer Fokus lag auf der neurologischen Anamnese. Erfasst wurden:

- transitorisch ischämische Attacken (TIA),
- manifeste Apoplexien,
- periphere arterielle Verschlusskrankheit (pAVK),
- zerebrale Atherosklerose (cAVK),
- Carotisstenosen
- sowie bekannte Verkalkungen der Aorta ascendens.

Zur Einschätzung der Nierenfunktion wurde präoperativ der Kreatininwert herangezogen. Echokardiographisch dokumentiert wurden die linksventrikuläre Funktion sowie mögliche Klappenvitien.

Bei allen Patient*innen erfolgte eine Erhebung des EuroSCORE II zur Risikostratifikation vor CABG, ebenso wie die Einstufung der Eingriffsdringlichkeit (elektiv, dringlich oder notfallmäßig).

Im intraoperativen Abschnitt wurden neben der grundlegenden Operationsmethode (mit oder ohne HLM) auch spezifische Kennzahlen ausgewertet, jeweils basierend auf den OP-Protokollen:

- Dauer der extrakorporalen Zirkulation,
- Aortenklemmzeit,
- Gesamtoperationsdauer

Der Einsatz von mechanischen Kreislaufunterstützungssystemen wie intraaortaler Ballonpumpe (IABP) oder ECMO wurde ebenfalls dokumentiert.

Ein zentrales Augenmerk galt der manuellen und instrumentellen Manipulation der Aorta. Erfasst wurden:

- Anzahl der proximalen Anastomosen,
- deren Lage,
- sowie die verwendete Technik (z.B. partielles Ausklemmen, Heartstring®, Enclose®).

Insbesondere bei off-pump durchgeführten Eingriffen ohne Aortenklammung stellt die zentrale Anastomosierung ein erhöhtes Embolierisiko dar – mit potenziell entscheidendem Einfluss auf die Prognose.

Im Rahmen der postoperativen Auswertung wurden alle bis zur Entlassung dokumentierten Komplikationen systematisch erfasst. Dazu zählten insbesondere:

- neurologische Ereignisse (Apoplex, TIA, Delir),
- Beatmungsdauer > 24 h,
- Tracheotomie (PDT),
- Reanimationsbedarf,
- Einsatz von Antibiotikatherapie oder Massentransfusionen,
- Wundheilungsstörungen,
- postoperative Dialysepflichtigkeit,
- Aufenthaltsdauer auf Intensiv- und Normalstation
- sowie die 30-Tages-Mortalität.

Ein poststationär eingetretener Todesfall wurde ebenfalls erfasst, sofern dies aus der elektronischen Patientenakte hervorging.

2.2.2. Erfassung neurologischer Komplikationen

Zur besseren Abgrenzung neurologischer Komplikationen wurde gezielt erfasst, ob postoperativ ein neurovaskuläres Ereignis aufgetreten war. Dokumentiert wurden sämtliche transitorisch ischämischen Attacken (TIA), ischämische und hämorrhagische Schlaganfälle, temporäre neurologische Defizite sowie periphere Nervenschädigungen.

Bei Nachweis eines Apoplex erfolgte eine Einteilung nach Ätiologie (ischämisch vs. hämorrhagisch), basierend auf den klinischen Angaben und bildgebenden Befunden in der Patientenakte.

Aufgrund der begrenzten Fallzahl wurde auf eine detaillierte Symptomanalyse – etwa hinsichtlich Sehstörungen, Hemiparesen, Ataxie, Aphasie, Gangunsicherheit oder epileptischer Anfälle – bewusst verzichtet. Eine systematische Ursachenzuordnung (z. B. kardioembolisch, arterioembolisch, multifaktoriell) wurde ebenfalls nicht vorgenommen.

Vorübergehende kognitive Einschränkungen, Verwirrheitszustände oder prolongierte Aufwachphasen wurden nur dann als neurologisches Ereignis gewertet, wenn ein konkreter klinischer Verdacht auf TIA oder Schlaganfall dokumentiert war. Bei isoliertem postoperativem Delir ohne Hinweis auf zerebrovaskuläre Beteiligung wurde kein neurovaskuläres Ereignis angenommen.

2.3. Präoperative Diagnostik zur Detektion der Porzellanaorta

Wie in Kapitel 2.3 dargestellt, stehen zur Diagnostik der Porzellanaorta zahlreiche bildgebende Verfahren mit unterschiedlicher Verfügbarkeit, Sensitivität und Aufwand zur Verfügung. In dieser retrospektiven Analyse lag keine einheitliche präoperative Bildgebung vor. Der Umfang variierte je nach Dringlichkeit, Zuweisungskontext, Alter, Komorbiditäten und klinischer Fragestellung.

Bei elektiv geplanten CABG-Prozeduren war die Bildgebung in der Regel umfassender. Klassische Risikofaktoren wie arterielle Hypertonie, Dyslipidämie, Adipositas und Nikotinabusus lagen bei den meisten Patient*innen vor.⁷²

Die kardiologische Basisdiagnostik umfasste EKG, Lungenfunktion, TTE, Herzkatheteruntersuchung und Röntgen-Thorax in zwei Ebenen.⁷³⁻⁷⁵ Die Koronarangiographie bleibt Goldstandard zur OP-Planung, kann jedoch durch Verfahren wie Myokardszintigraphie oder kardiale CT ergänzt werden. Bei ausgeprägten Aortenkalzifikationen oder auffälligen Röntgenbefunden wurde zusätzlich eine CT-Angiographie des Thorax durchgeführt.

In vielen deutschen Zentren ist diese im Rahmen von TAVI-Planungen bereits Standard. Sie erlaubt nicht nur die Beurteilung der Aorta, sondern auch der peripheren Gefäße und gegebenenfalls der Koronarien. So lassen sich Kontrastmittelgabe und invasive Eingriffe potenziell vermeiden.^{76,77}

Bei isolierter CABG ist die CT bislang nicht Routine – obwohl sie neben Aortenpathologien auch pulmonale und koronare Nebenbefunde detektieren kann. Studien zeigen, dass sie in

vielen Fällen eine verlässliche OP-Planung ermöglicht. In der Arbeit von Serruys et al. konnte dies in 99,1 % der Fälle erreicht werden, mit 92,6 % Übereinstimmung zur invasiven Planung.^{78,79}

Ergänzend bleiben Echokardiographie zur Beurteilung der Pumpfunktion und Klappen, sowie der FKDS der supraaortalen Gefäße zum Ausschluss von Carotisstenosen relevant.

Bei dringlichen oder notfallmäßigen Eingriffen, z. B. bei akutem Myokardinfarkt, beschränkt sich die Diagnostik meist auf EKG, Koronarangiographie und Laborwerte. CT oder Röntgen entfallen häufig. In solchen Fällen wird eine Porzellanaorta oft erst intraoperativ erkannt – mit unmittelbaren Konsequenzen für das operative Vorgehen.

Tabelle 5. Vor- und Nachteile der CT-basierten Planung der koronaren Bypassoperation gegenüber der traditionellen invasiven Koronarangiographie nach ^{76,78-80}

Argument	Pro CT	Kontra CT
Genauigkeit	Hohe Genauigkeit bei der Darstellung der Koronararterien und anderer Herzstrukturen	Mögliche Diskrepanzen in der Beurteilung kleiner Koronararterien
Dauer	Schnelle und weniger belastende Untersuchung	Bei hämodynamisch instabilen Patienten mit Kreislaufunterstützung, Vasopressoren und Beatmung schwieriger durchzuführen
Invasivität	Nicht-invasiv, reduziert das Risiko von Komplikationen im Vergleich zur invasiven Angiographie	Höhere Strahlenexposition durch die CT-Untersuchung (allerdings untersucher- und anatomieabhängig)
Therapieoptionen	Patienten mit niedrigem KHK-Risiko: keine weitere Therapie nötig	Keine Interventionsmöglichkeit, bei hämodynamischer Instabilität nicht geeignet, PCI oder Operation nach CT indiziert
Effektivität	Gute Auflösung, FFR-Messung möglich, 3D Rekonstruktion möglich	Kann bei bestimmten Patienten, z.B. mit starkem Übergewicht, weniger effektiv sein
Planung	Hohe Übereinstimmung mit der traditionellen Planung nach HKU	Herausforderungen bei der Interpretation der CT-Daten, weniger

		Erfahrung im Vergleich zu HKU-Auswertung
Patientensicherheit	Reduzierte Rate an schwerwiegenden kardiovaskulären Ereignissen aufgrund der Durchführung	Nicht geeignet für alle Patienten, z.B. bei schwerer Niereninsuffizienz
Kosten und Verfügbarkeit	Potenziell kostengünstiger und schneller durchführbar als HKU	Verfügbarkeit und Kosten können je nach Region variieren
Spezialfälle (Porzellanaorta)	Besonders nützlich bei der Identifikation und Vermeidung von stark verkalkten Bereichen	Geringere Erfahrungsbasis, HKU könnte in bestimmten komplexen Fällen detailliertere Informationen liefern

2.4. Die Operationstechnik

Nach Abschluss der präoperativen Diagnostik ergibt sich die Indikation zur chirurgischen Myokardrevaskularisation aus der klinischen Gesamtsituation und den bildgebenden Befunden.

Bei präoperativ festgestellter Porzellanaorta kann das operative Vorgehen patientenindividuell angepasst werden, um das Risiko perioperative Komplikationen zu minimieren. Je nach Komorbiditätsprofil und Befundlage stehen dabei verschiedene Verfahren zur Verfügung: die klassische aortokoronare Bypassoperation mit Einsatz der HLM und Kardioplegie, eine sogenannte Beating-Heart-Technik unter HLM, oder die vollständig HLM-freie Operationstechnik (off-pump CABG, OPCAB). Auch intraoperativ – etwa nach manueller Palpation oder epiaortaler Sonographie – kann das operative Vorgehen modifiziert werden, insbesondere im Hinblick auf das Ausmaß aortaler Manipulation.⁸¹

2.4.1. Operation mit Klemmen der Aorta und Kardioplegiegabe

Bei der klassischen aortokoronaren Bypassoperation (CABG) über mediane Sternotomie wird das Herz nach Anschluss an die HLM durch kaliumreiche Kardioplegielösung stillgelegt.

Als Gefäßtransplantate stehen verschiedene autologe Grafts zur Verfügung:

- Vena saphena magna,

- Vena saphena parva,
- Arteria thoracica interna (links/rechts),
- Arteria radialis
- und seltener die Arteria gastroepiploica.

Nach distaler Anastomosierung an den Koronargefäßen werden die proximalen Anastomosen in der Regel direkt an der Aorta ascendens angelegt. Bei Verwendung der Arteria thoracica interna entfällt dieser Schritt, da sie unmittelbar aus der A. subclavia entspringt.

Alternativ können T-, Y- oder Jump-Grafts eingesetzt werden, um direkte Manipulationen an der Aorta zu vermeiden. Nach Abschluss der Anastomosen erfolgt die schrittweise Entwöhnung von der HLM und schließlich der Thoraxverschluss.

Trotz der hohen Erfolgsrate ist die Verwendung der HLM mit spezifischen Risiken verbunden. Der Kontakt des Blutes mit künstlichen Oberflächen kann eine systemische inflammatorische Reaktion (SIRS) hervorrufen, die Mikroembolisation begünstigt. Auch Luftembolien lassen sich trotz technischer Sicherheitsmaßnahmen nicht vollständig ausschließen. Besonders bei ausgeprägter Aortenkalzifikation ist die Kanülierung und Aortenklammung mit einem erhöhten Risiko embolischer Ereignisse assoziiert. In solchen Fällen kann ein Verzicht auf die HLM das Risiko perioperativer Schlaganfälle erheblich senken.⁸²

2.4.2. Partielles Klemmen der Aorta

In bestimmten Situationen, beispielsweise bei eingeschränkter linksventrikulärer Funktion, tief liegenden Koronararterien, hämodynamischer Instabilität oder sehr kleinen Zielgefäßen, ist eine Operation ohne HLM nicht durchführbar.

In solchen Fällen wird die Operation unter HLM, aber ohne Herzstillstand als sogenannte Beating-Heart-Technik durchgeführt. Die proximale Anastomose erfolgt hierbei unter partieller Aortenklammung.

Durch gezielte Auswahl nicht verkalkter Areale lässt sich die Klammung auf einen begrenzten Abschnitt der Aorta beschränken. Dennoch bleibt jede Manipulation – insbesondere bei ausgeprägter Kalzifikation – mit einem relevanten Embolierisiko verbunden.

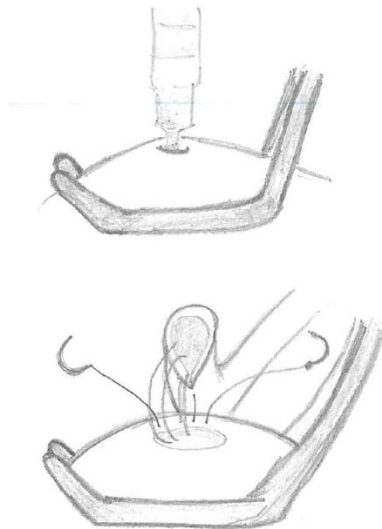


Abbildung 8. Proximale (zentrale) Anastomosenanlage an der Aorta unter partieller Abklemmung der Aorta

2.4.3. Verwendung vom Heartstring-System

Das Heartstring®-System ermöglicht die Anlage proximaler Anastomosen ohne Klemmen der Aorta. Mithilfe eines Applikators mit Dichtungsmembran wird temporär eine blutfreie Zone auf der Aortenwand erzeugt, die eine sichere und kontrollierte Anastomosierung erlaubt.⁸³

Besonders bei Patient*innen mit Porzellanaorta bietet diese Technik entscheidende Vorteile, da das Risiko atheroembolischer Komplikationen durch den vollständigen Verzicht auf Klemmen deutlich reduziert wird.

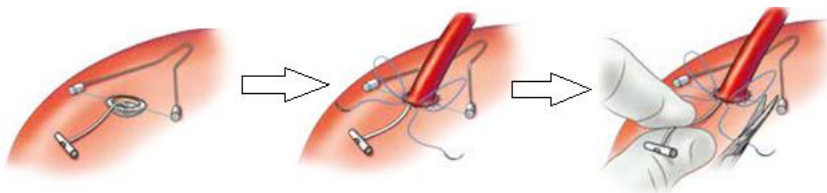


Abbildung 9. Heartstring III in Benutzung: Erstellen der zentralen Anastomose, aus der Heartstring III Broschüre, Seite 7, Firma Getinge, Genehmigung Bildnutzungsrecht liegt vor⁸⁴

2.4.4. Totalarterielle Myokardrevaskularisation ohne Aortenmanipulation

Bei jüngeren Patient*innen mit günstiger Prognose wird die totalarterielle Myokardrevaskularisation zunehmend total arteriell durchgeführt. Sie erfolgt vorzugsweise unter Verwendung beider Arteriae mammae internae (LIMA/RIMA) sowie der Arteria radialis.

Die ESC-Leitlinien von 2018 empfehlen explizit den bilateralen Einsatz der Arteria mammaria interna, sofern kein erhöhtes Risiko für Wundheilungsstörungen vorliegt.⁷⁴

Arterielle Grafts weisen im Langzeitverlauf eine deutlich höhere Offenheitsraten auf als venöse Transplantate.⁸⁵

Auch bei Porzellanaorta bietet eine Technik ohne jegliche Aortenklammung wesentliche Vorteile – obwohl dies bislang nicht explizit in den Leitlinien berücksichtigt wird. Der konsequente Verzicht auf Manipulation der Aorta reduziert das Schlaganfallrisiko erheblich.

In einer Metaanalyse von Edelmann et al. lag die Schlaganfallrate bei OPCAB-Operationen ohne Aortenmanipulation signifikant niedriger als bei konventionellen CABG-Eingriffen (0,38 % vs. 1,87 %; RR 0,27; 95 % CI 0,14–0,58; $p < 0,0001$).⁸⁶

Auch im direkten Vergleich mit OPCAB unter partieller Aortenklammung zeigte sich ein deutlicher Vorteil (0,31 % vs. 1,35 %; RR 0,34; 95 % CI 0,18–0,65; $p = 0,001$). Die postoperative Rate neurologischer Komplikationen wurde um etwa 50 % reduziert (OR 0,46; 95 % CI 0,29–0,72; $p = 0,0008$).⁸⁷

Diese Ergebnisse unterstreichen eindrucksvoll den klinischen Nutzen der vollständigen Vermeidung aortaler Manipulationen – insbesondere bei komplexer Koronarchirurgie und Porzellanaorta.

2.5. Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit IBM SPSS Statistics Version 29. Die Patientenkohorte wurde dichotomisiert in:

- MK-Gruppe (mit Aortenklammung)
- OK-Gruppe (ohne Aortenklammung).

Die Variable „Klemmen der Aorta“ wurde binär codiert (0 = keine Klemmung, 1 = Klemmung).

Zur Prüfung der Verteilung metrischer Daten wurden der Kolmogorov-Smirnov- und Shapiro-Wilk-Test herangezogen. Ein p -Wert $> 0,05$ wurde als Hinweis auf Normalverteilung der Variablen interpretiert. Ergänzend erfolgte eine visuelle Plausibilitätskontrolle mittels Histogramme, da inferenzstatistische Tests bei kleinen Stichproben fehleranfällig sein können.

Bei normalverteilten und homoskedastischen Daten wurde der t-Test für unabhängige Stichproben verwendet, andernfalls der Mann-Whitney-U-Test.

Für nominale Variablen kam der Chi-Quadrat-Test zum Einsatz, sofern alle erwarteten Zellfrequenzen > 5 lagen. Bei Unterschreitungen wurde auf den exakten Fisher-Test zurückgegriffen.

Ergebnisse mit $p < 0,05$ galten als statistisch signifikant. Alle Tests wurden zweiseitig durchgeführt; p-Werte auf zwei Dezimalstellen gerundet. Zur grafischen Darstellung dienten Kreis- und Balkendiagramme.

Zusätzlich wurde eine Subgruppenanalyse innerhalb der OK-Gruppe vorgenommen. Verglichen wurden drei Verfahren zur proximalen Anastomoseanlage:

- Heartstring-System,
- Enclose-System,
- partielle Aortenklammung.

Operationen ohne zentrale Anastomosen wurden nicht berücksichtigt. Ziel war die Identifikation möglicher Unterschiede hinsichtlich patientenspezifischer Merkmale und postoperativer Outcomes.

Aufgrund kleiner und ungleich großer Gruppen (z. B. Enclose: $n = 2$) wurde anstelle einer ANOVA der Kruskal-Wallis-Test verwendet. Die Voraussetzungen (Normalverteilung, Varianzhomogenität) wurden zuvor mit Shapiro-Wilk- und Levene-Test geprüft. Für nominale Variablen kam auch hier bei kleinen Zellfrequenzen der exakte Fisher-Test zur Anwendung.

Ein p-Wert $< 0,05$ wurde durchgehend als signifikant gewertet.

3. Ergebnisse

3.1. Patientencharakteristika

Die folgenden Auswertungen beziehen sich auf die in Kapitel 3 beschriebene Kohorte von 73 Patient*innen mit Porzellanaorta, die zwischen Januar 2013 und Dezember 2023 an der der Universitätsklinik sowie CardioClinic Köln operiert wurden. Alle Patient*innen erhielten eine isolierte Myokardrevaskularisation via medianer Sternotomie. Kombinationseingriffe sowie MIDCAB-Verfahren wurden ausgeschlossen. Das Vorliegen der Porzellanaorta wurde

intraoperativ durch die Operateur*innen dokumentiert. Das Mindestalter betrug 18 Jahre. Die Datenanalyse erfolgte nur für vollständig dokumentierte Parameter. Bei fehlenden Angaben wurden die jeweiligen Fälle in der entsprechenden Einzelanalyse ausgeschlossen.

Das mittlere Alter der Gesamtkohorte betrug $74,23 \pm 6,38$ Jahre. Es erfolgte eine Unterteilung in zwei Gruppen: In der MK-Gruppe ($n=18$) wurde eine Bypass-Operation mit Klemmen der Aorta unter Einsatz der Herz-Lungen-Maschine (HLM) durchgeführt. Die OK-Gruppe ($n=55$) wurde ohne Klemmen der Aorta am schlagenden Herzen operiert. Die Patient*innen der MK-Gruppe waren im Mittel $73,06 \pm 6,46$ Jahre alt, in der OK-Gruppe $74,62 \pm 6,37$ Jahre. Der Unterschied war statistisch nicht signifikant ($p=0,63$).

Das Kollektiv war überwiegend männlich (87,7 %, $n=64$). In der MK-Gruppe waren 94,4 % männlich ($n=17$), in der OK-Gruppe 85,5 % ($n=47$), ohne signifikanten Unterschied ($p=0,29$).

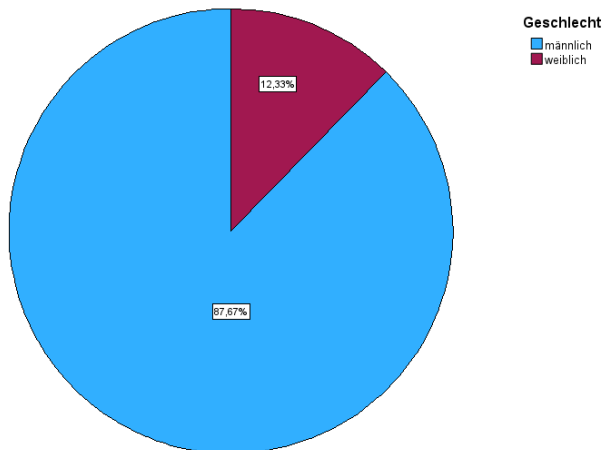


Abbildung 10. Kreisdiagramm: Geschlechtsverteilung in der Studie

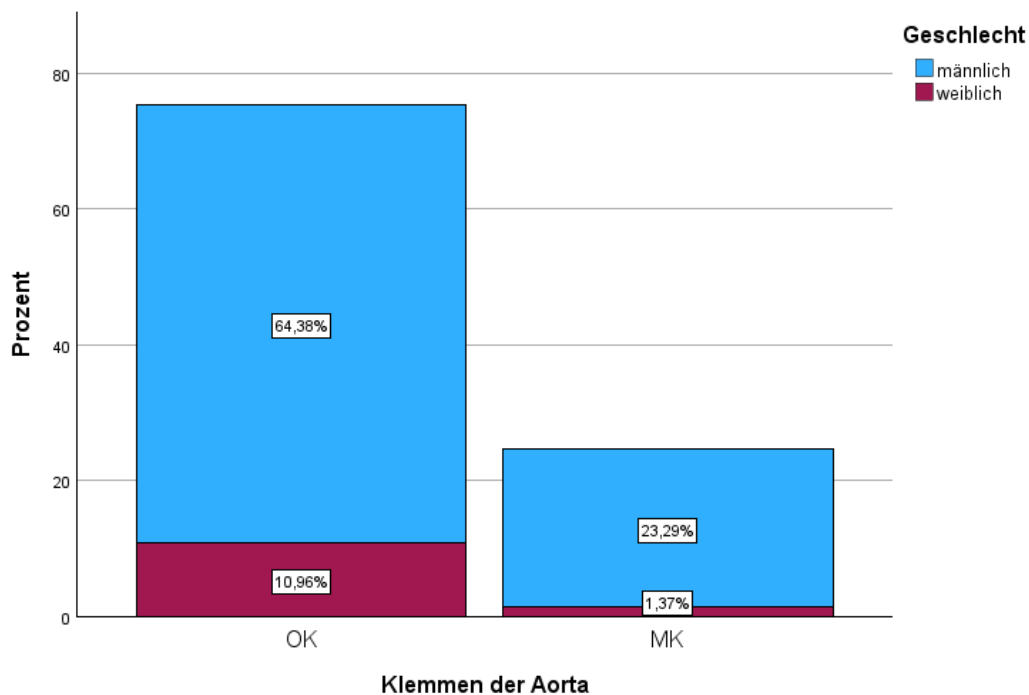


Abbildung 11. Säulendiagramm: Geschlechtsverteilung in der OK- und MK-Gruppe

Tabelle 6 Alter- und Geschlechtsverteilung

	Alle Patienten : Anzahl	Alle Patienten in (%) oder MW± Sdt.Abw.	MK: Anzahl	MK, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	OK Anzahl	OK in (%) oder MW± Sdt.Abw.	p-Wert
Alter	73	74,23±6,38	18	73,06±6,46	55	74,62±6,37	0,629
Geschlecht: männlich	64	87,7%	17	94,4%	47	85,5%	0,29

Der mittlere Body Mass Index (BMI) lag bei $26,75 \pm 3,96 \text{ kg/m}^2$. In der MK-Gruppe betrug er $28,27 \pm 4,53 \text{ kg/m}^2$, in der OK-Gruppe $26,26 \pm 3,76 \text{ kg/m}^2$ ($p=0,13$). Eine koronare DreifäÙerkrankung (3-GE) war die häufigste Befundkonstellation mit insgesamt 78,1 % der Gesamtkohorte, 88,9 % in der MK-Gruppe, 74,5 % in der OK-Gruppe. Der Unterschied war nicht signifikant ($p=0,67$). Der Mittelwert lag bei $2,73 \pm 0,56$ GefäÙen. Die Ejektionsfraktion (EF) wurde bei 24 Patient*innen numerisch dokumentiert (mittlere EF: $37,96 \pm 15,3 \%$). Die MK-Gruppe hatte eine EF von $33,33 \pm 10,41 \%$, die OK-Gruppe $38,62 \pm 15,78 \%$ ($p=0,34$). Ein Diabetes mellitus Typ II bestand bei 31,5 % der Gesamtgruppe ($n=23$): MK-Gruppe 44,4 % ($n=8$), OK-Gruppe 27,3 % ($n=15$), $p=0,14$. Eine Hyperlipoproteinämie lag bei 69,9 % vor: MK-Gruppe 61,1 % ($n=11$), OK-Gruppe 72,7 % ($n=40$), $p=0,38$. Eine arterielle Hypertonie bestand bei 89 % ($n=65$): MK-Gruppe 83,3 %, OK-Gruppe 90,9 %, $p=0,34$. Vorhofflimmern wurde bei 32,9 % festgestellt ($n=24$): MK-Gruppe 27,8 %, OK-Gruppe 39,7 %, $p=0,77$. Adipositas wurde

bei 34,2 % (n=25) dokumentiert: MK-Gruppe 44,4 % (n=8), OK-Gruppe 25,5 % (n=14), p=0,39. Nikotinabusus bestand bei 30,1 % (n=22): MK-Gruppe 33,3 %, OK-Gruppe 22,2 %, p=0,56 (1 fehlender Datensatz, MK). Ex-Nikotinabusus lag bei 24,7 % (n=18): MK-Gruppe 27,8 %, OK-Gruppe 24,1 %, p=0,76 (1 fehlender Datensatz, MK). Eine Stenose der Arteria carotis interna wurde bei 42,5 % (n=31) diagnostiziert: MK-Gruppe 33,3 % (n=6), OK-Gruppe 45,5 % (n=25), p=0,42. Eine pAVK lag bei 43,8 % (n=32) vor: MK-Gruppe 44,4 % (n=8), OK-Gruppe 43,6 % (n=24), p=0,97. Eine bekannte Porzellanaorta war präoperativ bei 20,5 % (n=15) dokumentiert: MK-Gruppe 16,7 % (n=3), OK-Gruppe 21,8 % (n=12), p=0,75. Pulmonale Hypertonie wurde bei 5,5 % (n=4) diagnostiziert: nur in der OK-Gruppe (7,3 %, n=4), MK-Gruppe 0 %, somit p=n.s.. Chronische Niereninsuffizienz bestand bei 32,9 % (n=24): MK-Gruppe 35,3 % (n=6), OK-Gruppe 32,7 % (n=18), p=0,67 (1 fehlender Datensatz, MK). Herzinsuffizienz bestand bei 28,8 % (n=21): MK-Gruppe 16,7 % (n=3), OK-Gruppe 32,7 % (n=18), p=0,45. Ein Herzschrittmacher war präoperativ bei 6,8 % (n=5) vorhanden: MK-Gruppe 5,6 % (n=1), OK-Gruppe 7,3 % (n=4), p=0,67. Neurologische Vorerkrankungen bestanden bei 11 % (n=8): MK-Gruppe 16,7 % (n=3), OK-Gruppe 9,1 % (n=5), p=0,09. Darunter waren 7 ischämische Apoplexe (MK: 3, OK: 4) und 1 MS-Fall (MK). Präoperative Laborwerte wurden ebenfalls erfasst: der Kreatininwert (n=69): Gesamtkohorte $1,43 \pm 1,41$ mg/dl, MK $1,69 \pm 2,05$ mg/dl (n=17), OK $1,36 \pm 1,15$ mg/dl (n=52), p=0,99, sowie die Leukozytenzahl (n=69): Gesamt $9,51 \pm 4,11 \times 10^3/\mu\text{l}$, MK $10,75 \pm 5,71$ (n=17), OK $9,11 \pm 3,42$ (n=52), p=0,17, wurden analysiert.

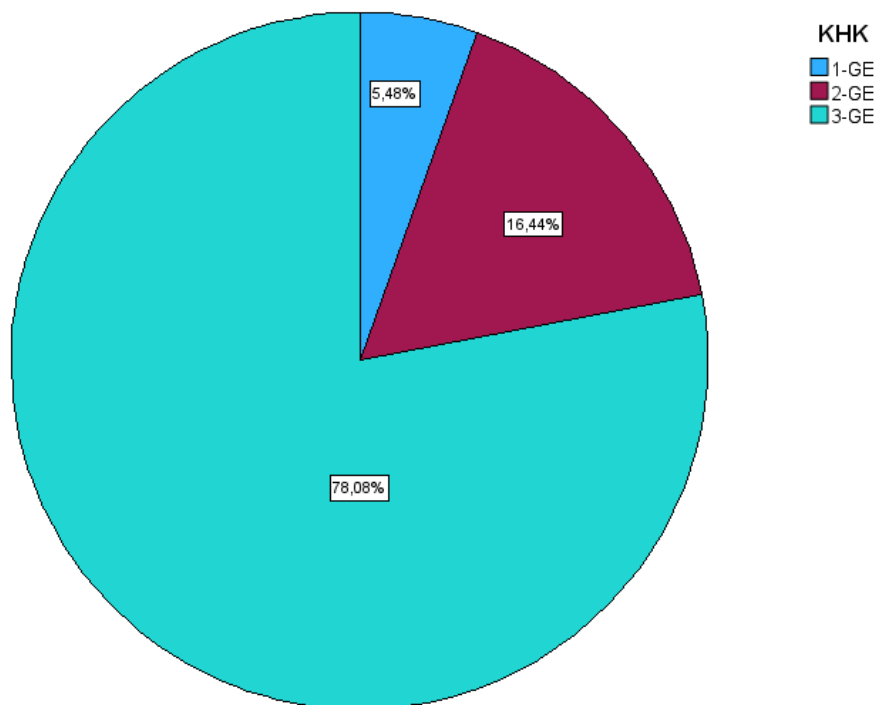


Abbildung 12. Kreisdiagramm: KHK-Verteilung, Gesamtkohorte

Tabelle 7. Risikofaktoren

	PA-Kohorte (Anzahl)	PA-Kohorte, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	Mit Klemme: Anzahl	Mit Klemme, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	Ohne Klemme (Anzahl)	Ohne Klemme in (%) oder MW± Sdt.Abw.	p-Wert
BMI, m/kg ²	73	26,75±3,96	18	28,27±4,53	55	26,26±3,67	0,13
EUROScore, in %	73	6,47±2,89	18	6,50±2,79	55	6,45±2,95	0,72
KHK: 1,2 oder 3 GE	73	2,73±0,56	18	2,83±0,51	55	2,69±0,57	0,67
1 GE, in %		5,5%	1	5,6%	3	5,5%	
2 GE, in %		16,4%	1	5,6%	11	20%	
3 GE, in %		78,1%	16	88,9%	41	74,5%	
Ejektionsfraktion, präoperativ (in %)	24	37,96±15,13	3	33,33±10,41	21	38,62±15,78	0,340
Diabetes mellitus II	23	31,5%	8	44,4%	15	27,3%	0,14
Hyperlipoproteinämie	51	69,9%	11	61,1%	40	72,7%	0,38
Hypertonie	65	89,0%	15	83,3%	50	90,9%	0,34
Vorhofflimmern	24	32,9%	5	27,8%	17	30,9%	0,77
Adipositas in %	25	34,2%	8	44,4%	14	25,5%	0,39
Nikotinabusus in %	22	30,1%	4	22,2%	18*	33,3%	0,56
Ex-nikotin in %	18	24,7%	5	27,8%	13*	24,1%	0,76
Stenose Arteria carotis interna in %	31	42,5%	6	33,3%	25	45,5%	0,42*
pAVK in %	32	43,8%	8	44,4%	24	43,6%	0,97
Porzellanaorta vorbekannt in %	15	20,5%	3	16,7%	12	21,8%	0,75
Pulmonalhypertonie	4	5,48%	0	0%	4	7,3%	n.s.
CNV in %	24	32,9%	6*	35,3%	18	32,7%	0,53
Herzinsuffizienz in %	21	28,8%	3	16,7%	18	32,7%	0,45
SM präoperativ	5	6,8%	1	5,6%	4	7,3%	0,67

* Die Information wurde bei einem Patienten nicht dokumentiert, Statistik anhand bekannter Parameter

	PA-Kohorte (Anzahl)	PA-Kohorte, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	Mit Klemme: Anzahl	Mit Klemme, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	Ohne Klemme (Anzahl)	Ohne Klemme in (%) oder MW± Sdt.Abw.	p-Wert
Neurovaskuläres Ereignis präoperativ							0,09
0=nein	65	89%	15	83,3%	50	90,9%	
1=Apoplex (isch.)	7	9,6%	3	16,7%	4	7,3%	
2= Apoplex Blutung	0	0	0		0	0	
3=TIA	0	0	0		0	0	
4=MS	1	1,37%	0		1	1,8%	
5=Neuropathie	0	0	0		0	0	
Kreatinin, in mg/dl präoperativ	69	1,43±1,41	17	1,69±2,05	52	1,36±1,15	0,99
Leukozyten pro 1000 präoperativ	69	9,51±4,11	17	10,75±5,71	52	9,11±3,42	0,17

3.2. Früherkennung und präoperative Planung bei Porzellanaorta

Die präoperative Diagnostik spielt eine entscheidende Rolle in der chirurgischen Versorgung von Patient*innen mit Porzellanaorta, insbesondere dann, wenn die Kalzifikation der Aorta ascendens im Vorfeld nicht bekannt ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurde analysiert, inwieweit präoperative Begleiterkrankungen und Bildgebungsverfahren mit dem Vorhandensein einer Porzellanaorta sowie der Wahl der Operationsstrategie in Zusammenhang stehen.

Ein potenzieller Risikofaktor für das Vorliegen einer Porzellanaorta ist die periphere arterielle Verschlusskrankheit (pAVK). In der Gesamtkohorte wurde bei 32 Patientinnen (43,8 %) eine pAVK diagnostiziert. Der Vergleich zwischen den Gruppen zeigte keine relevanten Unterschiede: In der MK-Gruppe hatten 44,4 % der Patientinnen (n = 8) eine pAVK, in der OK-Gruppe 43,6 % (n = 24). Der Unterschied war statistisch nicht signifikant (p = 0,97).

Die präoperative Diagnose einer Porzellanaorta lag in nur wenigen Fällen vor: Lediglich 15 Patientinnen der Gesamtkohorte (20,5 %) wiesen eine vorbekannte PA auf. In der MK-Gruppe waren dies 3 Patientinnen (16,7 %), in der OK-Gruppe 12 Patient*innen (21,8 %). Auch hier ergab sich kein signifikanter Unterschied (p = 0,75).

Etwa die Hälfte aller Patientinnen erhielt vor der Operation ein präoperatives Röntgen-Thorax im stationären Aufenthalt an der Uniklinik Köln. Insgesamt wurde dies bei 34 Patientinnen (46,6 %) durchgeführt. Der Vergleich zwischen MK- und OK-Gruppe zeigte einen signifikanten Unterschied: Nur 5 Patientinnen der MK-Gruppe (27,8 %) erhielten ein präoperatives Röntgen, während dies bei 29 Patientinnen der OK-Gruppe (52,7 %) der Fall war ($p = 0,004$).

Auch die Durchführung einer präoperativen Computertomographie (CT) zeigte signifikante Unterschiede: Insgesamt 8 Patientinnen (11 %) erhielten im Rahmen des stationären Aufenthalts eine präoperative CT. In der MK-Gruppe war dies nur bei einer Patientin der Fall (5,6 %), während in der OK-Gruppe 7 Patientinnen (12,7 %) eine CT-Bildgebung erhielten ($p = 0,03$).

Ein zusätzlicher radiologischer Hinweis auf eine Aortenverkalkung ist die im Röntgen-Thorax beschriebene Aortensklerose. Für 64 der 73 Patientinnen (87,7 %) lag ein entsprechender radiologischer Befund vor. In dieser analysierten Teilgruppe wurde bei 22 Patientinnen (30,1 %) eine Aortensklerose im Röntgenbild dokumentiert. Die Ergebnisse zeigten signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen: In der MK-Gruppe wurde die Aortensklerose bei 2 von 13 ausgewerteten Fällen beschrieben (15,4 %), in der OK-Gruppe bei 20 von 51 Patient*innen (39,2 %). Dieser Unterschied war statistisch signifikant ($p = 0,001$).

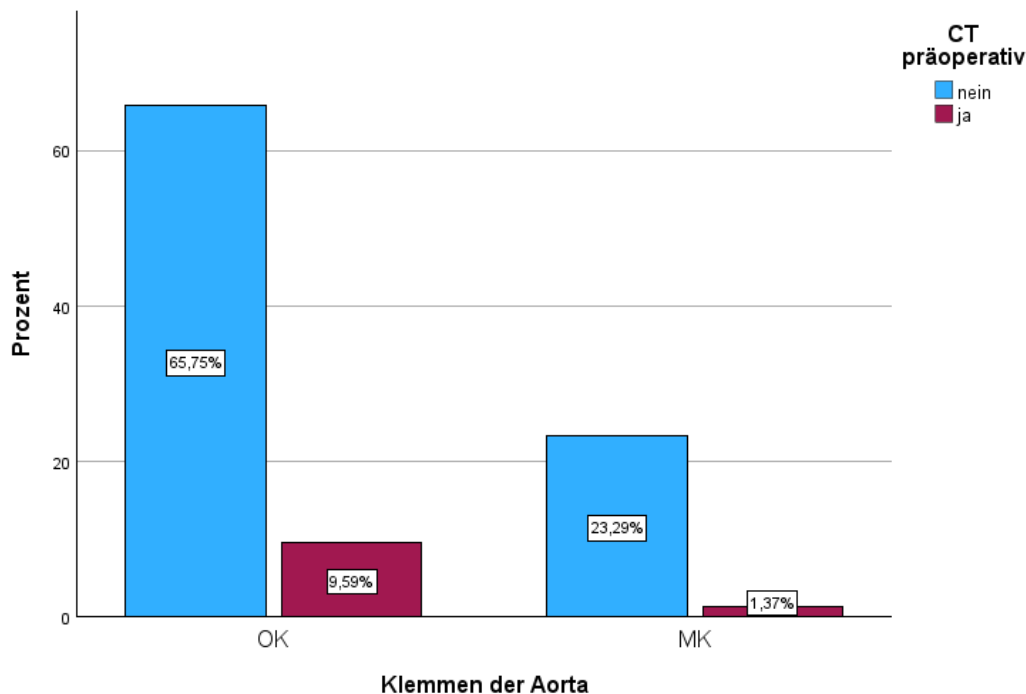


Abbildung 13. Durchgeführte präoperative CT

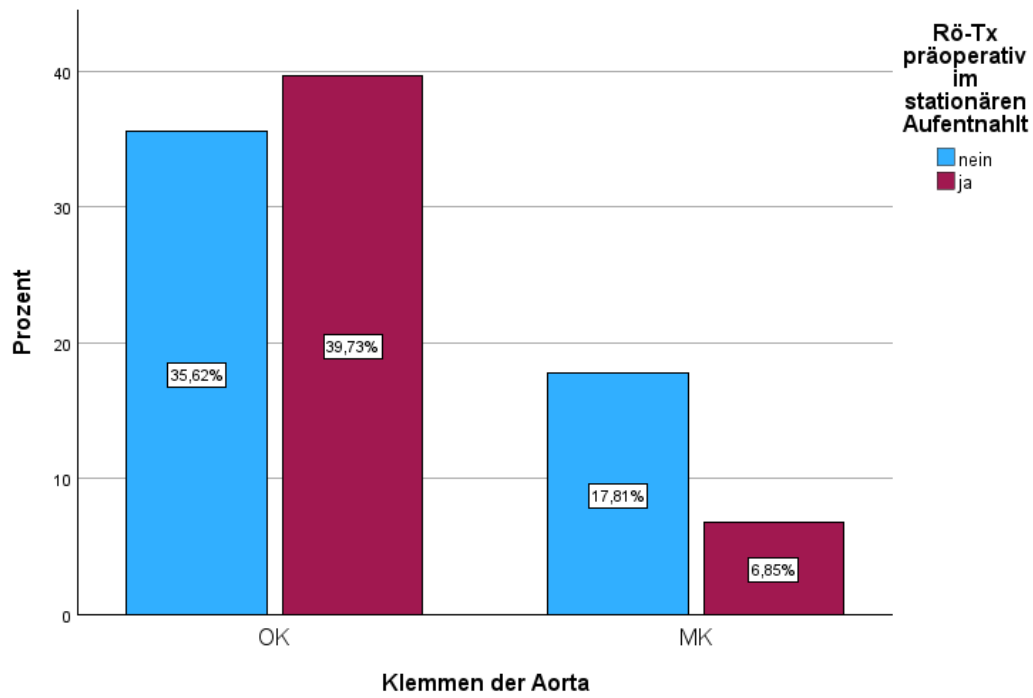


Abbildung 14. Durchgeführte präoperative RöTx im stationären Aufenthalt

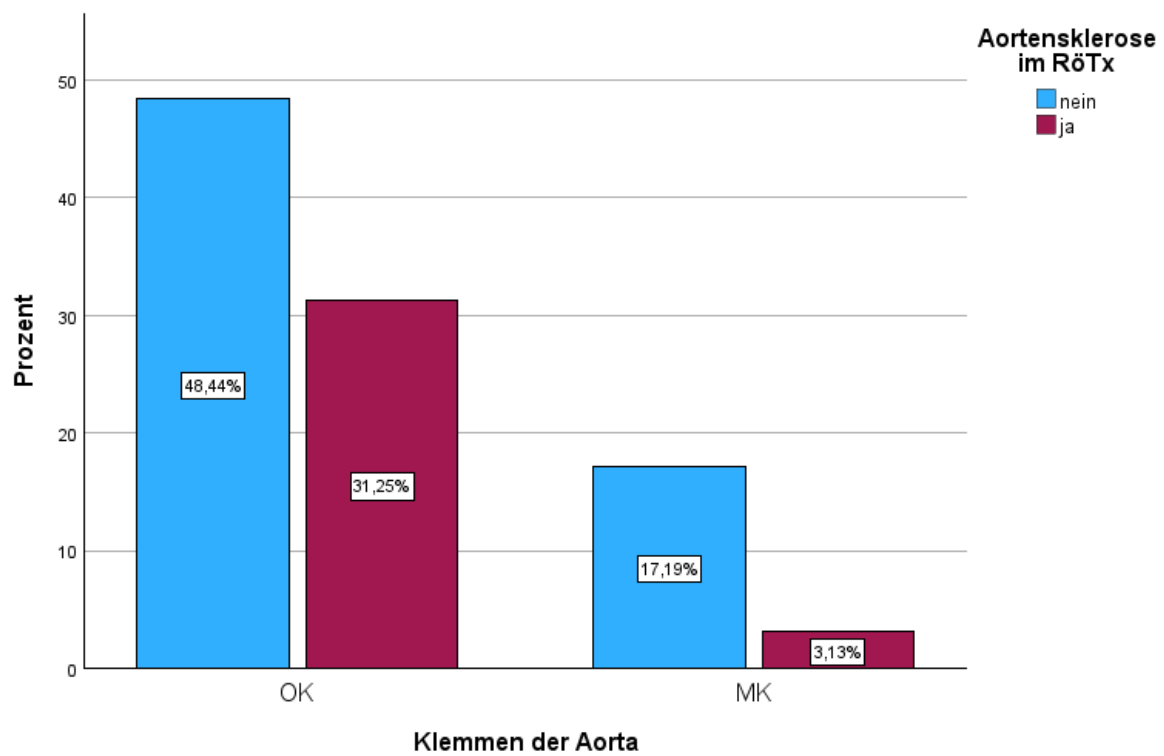


Abbildung 15. Säulendiagramm: Aortensklerose in der MK und OK Gruppe

Tabelle 8. PA-bezogene Daten

	PA-Kohorte (Anzahl)	PA-Kohorte, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	Mit Klemme: Anzahl	Mit Klemme, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	Ohne Klemme (Anzahl)	Ohne Klemme in (%) oder MW± Sdt.Abw.	p-Wert
pAVK in %	32	43,8%	8	44,4%	24	43,6%	0,97
Porzellanaorta vorbekannt in %	15	20,5%	3	16,7%	12	21,8%	0,75
Präoperatives Rö Tx stationär	34	46,6%	5	27,8%	29	52,7%	0,004
Präoperatives CT	8	11,0%	1	5,6%	7	12,7%	0,03
Aortensklerose in Rö Tx, in %	22 [#]	30,1%	2 ⁺	15,4%	20 ^{****}	39,2%	0,001

3.3. Intraoperative Daten

Im Rahmen dieser Arbeit wurde analysiert, unter welchen Bedingungen die Operationen bei Porzellanaortapatienten (PA) durchgeführt wurden. Ein besonderer Fokus lag auf der Operationsdringlichkeit, der Anzahl und Technik der Anastomosen sowie auf intraoperativen Modifikationen und verwendeten Hilfsmitteln.

Von den insgesamt 73 PA-Patienten wurden 55 (75,3 %) elektiv operiert. In der Gruppe mit totalem Aortenquerklemmen (MK-Gruppe, n = 18) waren es 66,7 % (n = 12), in der Gruppe ohne Klemmen (OK-Gruppe, n = 55) deutlich mehr mit 78,2 % (n = 43). Der Unterschied zwischen den Gruppen ist statistisch signifikant (p = 0,03). Dringliche Eingriffe betrafen 12,3 % der Gesamtkohorte (n = 9) und traten signifikant häufiger in der MK-Gruppe auf (27,8 %, n = 5) als in der OK-Gruppe (7,3 %, n = 4; p < 0,001). Notfalloperationen wurden ebenfalls bei 12,3 % aller Patienten durchgeführt. Auch hier zeigten sich signifikante Unterschiede: In der MK-Gruppe erhielten 27,8 % der Patienten (n = 5) einen Notfalleingriff, in der OK-Gruppe nur 7,3 % (n = 4; p < 0,001).

[#] Die Information wurde bei neun Patienten nicht dokumentiert, Statistik anhand bekannter Parameter

⁺ Die Information wurde bei fünf Patienten nicht dokumentiert, Statistik anhand bekannter Parameter

^{****} Die Information wurde bei vier Patienten nicht dokumentiert, Statistik anhand bekannter Parameter

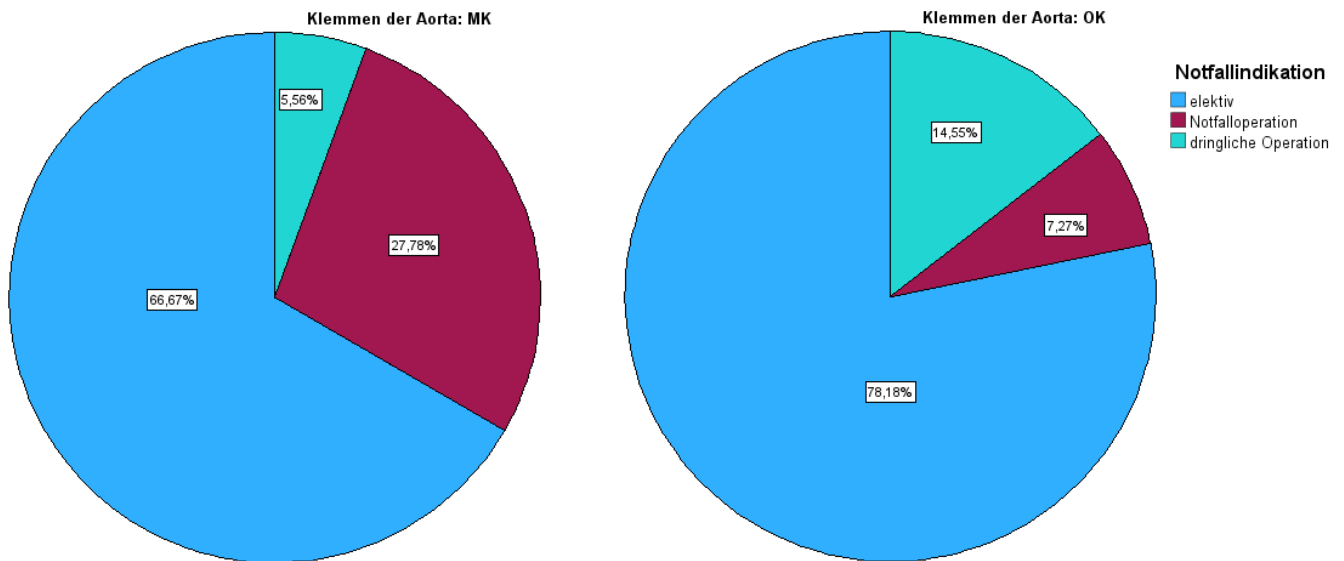


Abbildung 16. Kreisdiagramm zur Verteilung der Operationsdringlichkeit in beiden Gruppen: In der MK-Gruppe waren Notfalloperationen deutlich häufiger (27,8 %) als in der OK-Gruppe (7,3 %; $p < 0,001$).

Die durchschnittliche Anzahl venöser Anastomosen betrug $1,82 \pm 1,79$ in der Gesamtkohorte. In der MK-Gruppe lag der Mittelwert bei $2,39 \pm 1,85$, in der OK-Gruppe bei $1,64 \pm 1,78$. Dieser Unterschied war signifikant ($p = 0,009$).

Betrachtet man die Technik der venösen Anastomosen in der Gesamtkohorte, so erhielten 21,9 % der Patienten ($n = 16$) keine venöse Anastomose. Ein einzelner venöser Bypass wurde bei 31,5 % ($n = 23$), ein sequenzieller (Jump) Bypass bei 20,5 % ($n = 15$), und eine T- oder Y-Anastomose an die LIMA bei 13,7 % ($n = 10$) durchgeführt. Weitere Varianten umfassten LIMA-zu-Vene-Verbindungen (5,5 %) oder Vene-zu-Vene-Anastomosen (1,4 %).

In der MK-Gruppe wurden keine Patienten vollständig ohne venöse Anastomose operiert. Ein einzelner venöser Bypass wurde bei 38,9 % ($n = 7$), ein sequenzieller Bypass bei 33,3 % ($n = 6$) verwendet. Je ein Patient (jeweils 5,6 %) erhielt eine der selteneren Techniken (LIMA-Vene, Vene-LIMA oder LIMA-LAD ohne Vene).

In der OK-Gruppe erhielten 29,1 % der Patienten ($n = 16$) keinen venösen Graft. Ein einzelner Bypass wurde ebenfalls bei 29,1 % eingesetzt ($p = 0,04$ im Vergleich zur MK-Gruppe). Sequenzielle Bypässe sowie T- oder Y-Anastomosen zwischen Vene und LIMA wurden jeweils bei 16,4 % ($n = 9$) verwendet ($p = 0,02$ bzw. $p = 0,03$ gegenüber MK). Die Technik LIMA zu Vene war in der OK-Gruppe bei 3,6 % ($n = 2$) vertreten ($p = 0,001$).

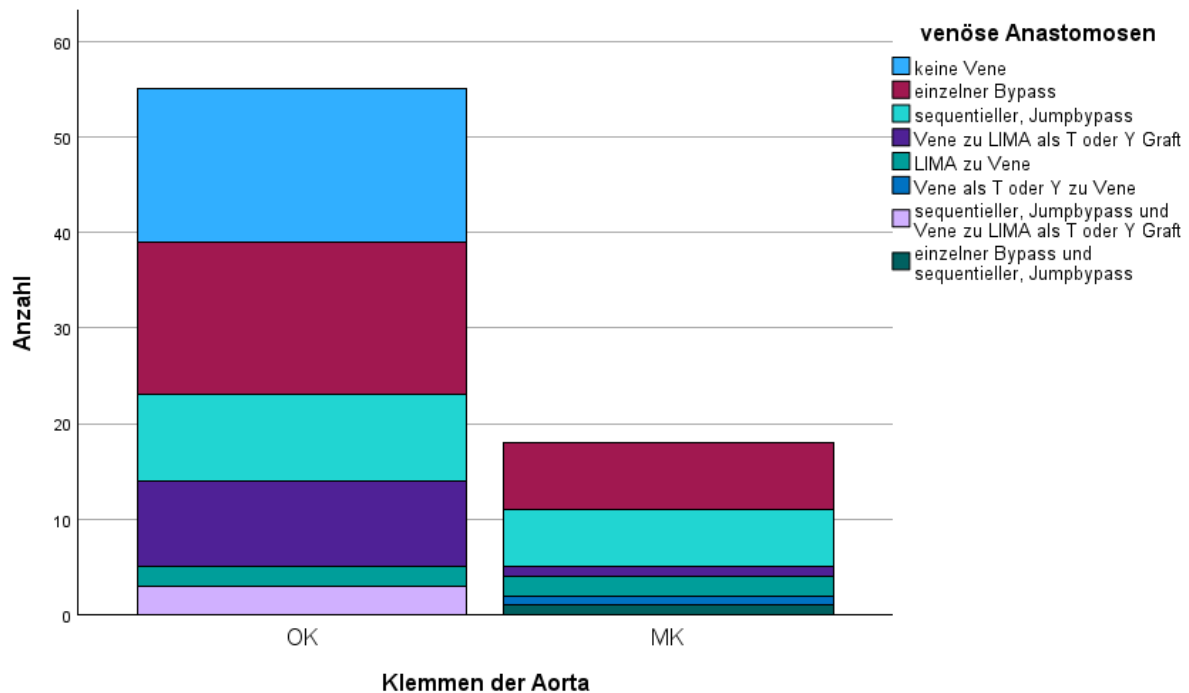


Abbildung 17. Säulendiagramm der verwendeten Anastomosentechniken für die venösen Bypässe (einzeln, sequenziell, T/Y) – nach Gruppen getrennt. Die sequenziellen Anastomosen und T/Y-Techniken mit venösen Grafts wurden häufiger in der OK-Gruppe eingesetzt ($p < 0,05$).

Die Entnahme der LIMA erfolgte bei 94,5 % ($n = 69$) aller PA-Patienten, mit einem leichten Unterschied zwischen MK (88,9 %) und OK (94,6 %) ohne statistische Signifikanz ($p = 0,25$). Die Verwendung als freier Graft wurde bei 6,8 % ($n = 5$) dokumentiert (MK: 11,1 %; OK: 5,5 %; $p = 0,38$). Nur ein Patient erhielt zusätzlich eine RIMA (1,4 %).

Die mittlere Anzahl zentraler Anastomosen war in der MK-Gruppe signifikant höher ($1,16 \pm 0,62$) als in der OK-Gruppe ($0,55 \pm 0,57$; $p = 0,01$). In der Gesamtkohorte hatten 39,7 % ($n = 29$) keine zentrale Anastomose, 50,7 % ($n = 37$) eine und 9,6 % ($n = 7$) zwei. In der MK-Gruppe wurden zwei zentrale Anastomosen bei 27,8 % durchgeführt, in der OK-Gruppe nur bei 3,6 %.

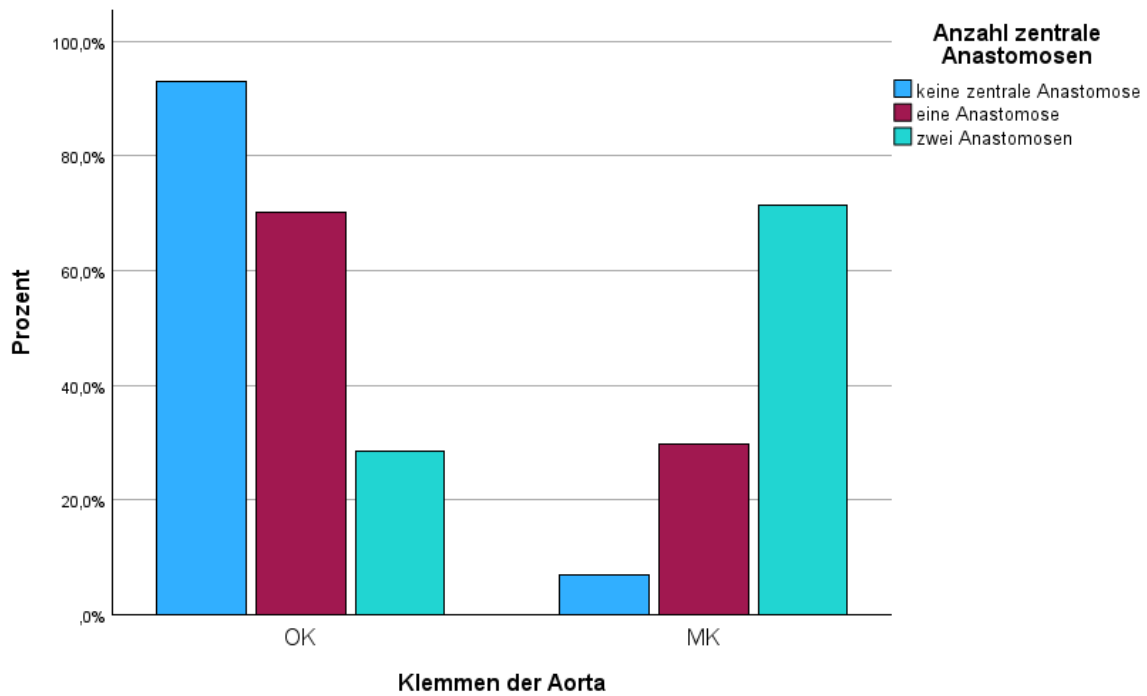


Abbildung 18. Balkendiagramm zur Anzahl zentraler Anastomosen in MK- und OK-Gruppe: Die Anzahl zentraler Anastomosen war in der MK-Gruppe signifikant höher als in der OK-Gruppe ($p = 0,01$). In der OK-Gruppe wurden bei 49,1 % der Patient*innen keine zentralen Anastomosen durchgeführt.

Die Gesamtanzahl aller Anastomosen war in der MK-Gruppe höher ($2,89 \pm 0,76$) als in der OK-Gruppe ($2,07 \pm 0,90$), der Unterschied war jedoch nicht signifikant ($p = 0,07$).

Eine komplette Revaskularisation wurde bei 57,5 % der Patienten erreicht (MK: 77,8 %; OK: 50,9 %; $p = 0,04$).

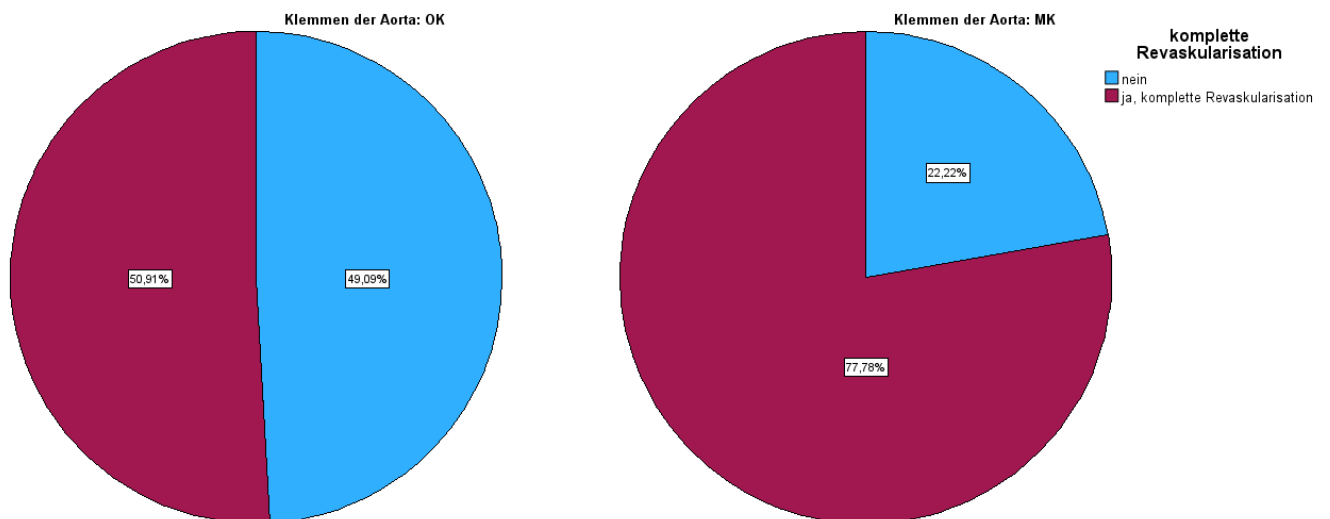


Abbildung 19. Kreisdiagramm: Vergleich der kompletten Revaskularisation (MK: 77,8 %; OK: 50,9 %; $p = 0,04$).

Reoperationen wurden bei 6,8 % der Patienten vorgenommen, ohne signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen.

Wie zu erwarten, wurde in der MK-Gruppe bei allen Patienten eine Aortenklamme eingesetzt (100 %). In der OK-Gruppe kam die Technik bei keinem Patienten zur Anwendung. Das Nähen unter totalem Klemmen der Aorta erfolgte ausschließlich in der MK-Gruppe (66,7 %). Partielle Aortenklammung wurde bei 19,2 % der Gesamtgruppe durchgeführt (MK: 27 %; OK: 16,4 %), der Unterschied war nicht signifikant ($p = 0,09$).

Das Heartstring-System wurde insgesamt bei 28,8 % ($n = 21$) verwendet, häufiger in der OK-Gruppe (32,7 %) als in der MK-Gruppe (16,7 %), ohne signifikanten Unterschied ($p = 0,16$). Das Enclose-System kam bei zwei OK-Patienten (3,6 %) zum Einsatz ($p = 0,41$).

Die mittlere Operationszeit betrug $187,55 \pm 51,50$ Minuten, dabei war die Dauer in der MK-Gruppe ($208,28 \pm 42,17$ min) tendenziell länger als in der OK-Gruppe ($180,76 \pm 52,79$ min), jedoch nicht signifikant ($p = 0,61$).

Die HLM-Zeit war erwartungsgemäß in der MK-Gruppe deutlich länger ($98,5 \pm 30,49$ min) als in der OK-Gruppe ($42,55 \pm 54,08$ min), mit einem signifikanten Unterschied ($p < 0,001$). Eine Ischämiezeit wurde nur in der MK-Gruppe dokumentiert ($52,83 \pm 19,66$ min).

Bei 79,5 % ($n = 58$) der Patienten war ursprünglich eine Operation unter HLM geplant (MK: 100 %, OK: 72,7 %; $p = 0,14$). Ein intraoperativer Technikwechsel zur Beating-Heart- oder OPCAB-Technik erfolgte bei 43,6 % der OK-Patienten. Diese Änderungen waren definitionsgemäß in der MK-Gruppe nicht möglich.

Ein Operationsabbruch wurde bei keinem der 73 Patienten dokumentiert.

Tabelle 9. Operationsdaten

	PA-Kohorte (Anzahl)	PA-Kohorte, in (%) oder MW \pm Sdt.Abw.	Mit Klemme: Anzahl	Mit Klemme, in (%) oder MW \pm Sdt.Abw.	Ohne Klemme (Anzahl)	Ohne Klemme in (%) oder MW \pm Sdt.Abw.	p-Wert
Elektive Operation, in %	55	75,3%	12	66,7%	43	78,2%	0,03
dringliche Operation, in %	9	12,3%	1	5,6%	8	14,5%	<0,001

	PA-Kohorte (Anzahl)	PA-Kohorte, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	Mit Klemme: Anzahl	Mit Klemme, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	Ohne Klemme (Anzahl)	Ohne Klemme in (%) oder MW± Sdt.Abw.	p-Wert
Notfalloperation, in %	9	12,3%	5	27,8%	4	7,3%	<0,001
venöse Anastomosen	57	1,82±1,79	18	2,39±1,85	55	1,64±1,78	0,009
Anastomosen, in %:							
1. Keine Vene	16	21,9%	0	0	16	29,1%	n.s
2. Einzelner Bypass	23	31,5%	7	38,9%	16	29,1%	0,04
3. Sequenziell, Jump	15	20,5%	6	33,9%	9	16,4%	0,02
4. Vene zu LIMA	10	13,7%	1	5,6%	9	16,4%	0,03
5. LIMA zu Vene	4	5,5%	2	11,1%	2	3,6%	0,001
6. Vene zu Vene	1	1,4%	1	5,6%	0	3,6%	n.s.
7. 2 und 3	3	4,1%	0	0	3	5,5%	n.s.
8. 1 und 2	1	1,4%	1	5,6%	0	3,6%	n.s.
LIMA als T-Graft, in %	18	24,7%	4	22,2%	14	25,5%	0,53
RIMA entnommen, in %	1	1,4%	0	0%	1	1,8%	n.s.
LIMA entnommen, in %	69	94,5%	16	88,9%	53	94,6%	0,25
LIMA als free graft, in %	5	6,8%	2	11,1%	3	5,5%	0,38
Zentr. Anastomosen	73	0,70±0,63	18	1,17±0,62	55	0,55±0,57	0,01
Keine, in %	29	39,7%	2	11,1%	27	49,1%	
Eine, in %	37	50,7%	11	61,1%	26	47,3%	
zwei, in %	7	9,6%	5	27,8%	2	3,6%	
Anastomosenanzahl	73	2,27±0,93	18	2,89±0,76	55	2,07±0,9	0,07
Eine, in %	16	21,9%	0	0%	16	29,1%	
Zwei, in %	28	38,4%	6	33,3%	22	40%	
Drei, in %	23	31,5%	8	44,4%	15	27,3%	
Vier, in %	5	6,8%	4	22,2%	1	1,8%	
Fünf, in %	1	1,4%	0	0%	1	1,8%	
Komplette Revaskularisation in %	42	57,5%	14	77,8%	28	50,9%	0,04

	PA-Kohorte (Anzahl)	PA-Kohorte, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	Mit Klemme: Anzahl	Mit Klemme, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	Ohne Klemme (Anzahl)	Ohne Klemme in (%) oder MW± Sdt.Abw.	p-Wert
Operation als Reoperation, in %	5	6,8%	1	5,6%	4	7,3%	0,64
Aortenklappen Cross Clamp in %	18	24,7%	18	100%	0	0%	n.s.
Zentrale Anastomose in Ischämie Cross clamp genäht in %	12	16,4%	12	66,7%	0	0%	n.s.
Partielles, tangential es Ausklappen der Aorta in %	14	19,2%	5	27%	9	16,4%	0,09
Enclose in %	2	2,7%	0	0%	2	3,6%	0,41
Heart String in %	21	28,8%	3	16,7%	18	32,7%	0,16
Operationszeit in Minuten	73	187,55±51,50	18	208,28±42,17	55	180,76±52,79	0,609
HLM-Zeit in Minuten	73	56,34±54,79	18	98,50±30,49	55	42,55±54,08	<0.001
Ischämiezeit in Minuten	73	13,40±24,84	18	52,83±19,66	55	0	n.s.
HLM geplant	58	79,5%	18	100%	40	72,7%	0,14
HLM-CABG to Beating Heart Switch	24	32,9%	0	0%	24	43,6%	n.s.
OPCAB zu Beating Heart Switch	1	1,4%	0	0%	1	1,8%	n.s.
HLM-CABG to OPCAB Switch (ohne HLM)	19	26,0%	0	0%	19	34,5%	n.s.
Procedure Dropout	0	0%	0	0%	0	0%	n.s.

3.4. Neurologische Komplikationen

In der präoperativen Beurteilung zeigten sich bei der Mehrheit der Patient*innen mit Porzellanaorta keine neurologischen Vorerkrankungen. Insgesamt 69 von 73 Patient*innen

(94,5 %) wiesen keine dokumentierten neurovaskulären Ereignisse in der Vorgeschichte auf. In der MK-Gruppe traf dies auf 15 von 18 Patient*innen (83,3 %) zu, in der OK-Gruppe auf 54 von 55 (90,9 %). Dieser Unterschied war statistisch nicht signifikant ($p = 0,09$).

Ein ischämischer Apoplex in der Vorgeschichte wurde bei sieben Patient*innen in der Gesamtkohorte (9,6 %) dokumentiert. In der MK-Gruppe betraf dies drei Patient*innen (16,7 %), in der OK-Gruppe vier Patient*innen (7,3 %) – ebenfalls ohne signifikanten Unterschied. Weitere präoperative neurologische Ereignisse wie hämorrhagischer Schlaganfall, transitorische ischämische Attacken (TIA), periphere Neuropathien oder neurodegenerative Erkrankungen traten nicht auf, mit Ausnahme eines dokumentierten Falls von multipler Sklerose (1,8 %) in der OK-Gruppe.

Postoperativ kam es bei insgesamt fünf Patient*innen (6,8 %) zu einem neurologischen Ereignis. In der MK-Gruppe waren zwei Patient*innen (11,1 %) betroffen, in der OK-Gruppe drei (5,5 %). Der Unterschied war signifikant ($p = 0,04$). Ein ischämischer Apoplex trat bei drei Patient*innen auf (4,2 % der Gesamtkohorte). Da jedoch jeweils ein Datensatz in der MK- und der OK-Gruppe fehlte, wurde die Analyse auf 71 Fälle beschränkt. In der MK-Gruppe traten bei zwei von 17 Patient*innen (11,8 %) ischämische Apoplexe auf, in der OK-Gruppe bei einer von 54 Patient*innen (1,9 %). Der Unterschied war statistisch nicht signifikant ($p = 0,87$). Hämorrhagische Apoplexe wurden postoperativ nicht beobachtet.

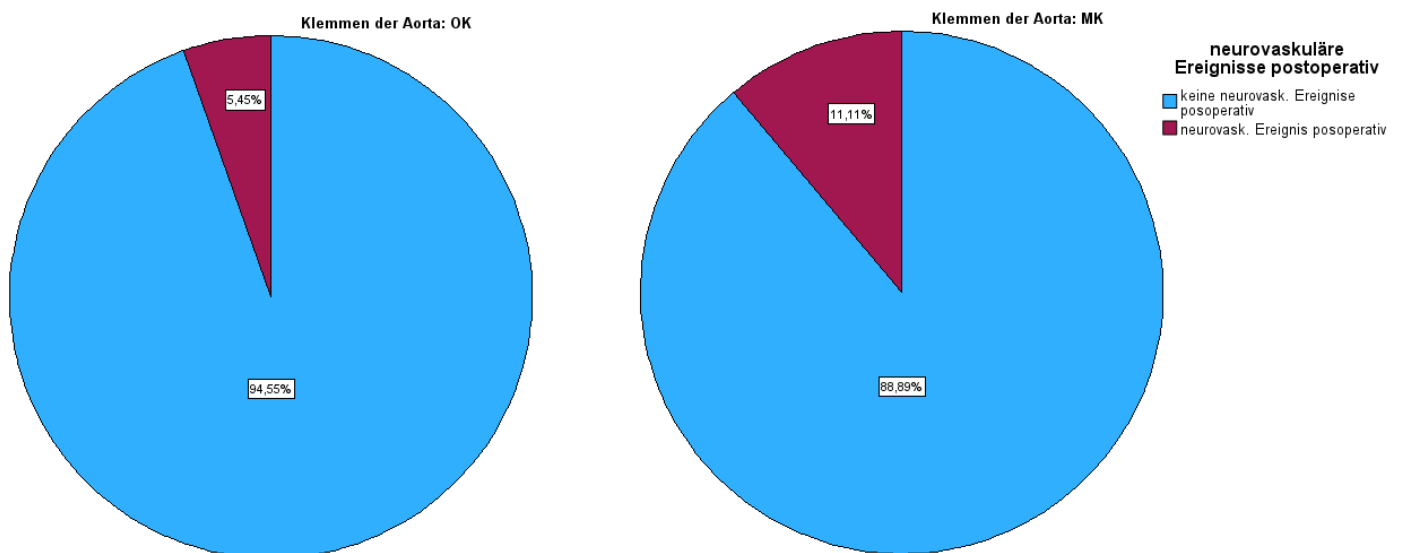


Abbildung 20. Neurovaskuläre Ereignisse postoperativ: 11,1 % OK, 5,5 % MK, $p = 0,04$.

Ein postoperatives Delir wurde in zehn Fällen (14,1 %) dokumentiert. Die Analyse basiert auf 71 dokumentierten Patient*innen. In der MK-Gruppe traten bei drei von 17 Patient*innen

(17,6 %) Delirien auf, in der OK-Gruppe bei sieben von 54 Patient*innen (12,7 %). Der Unterschied erreichte die Grenze zur Signifikanz ($p = 0,05$). Eine TIA wurde im postoperativen Verlauf bei keinem Patienten dokumentiert.

Tabelle 10. Neurologische Daten

	PA-Kohorte (Anzahl)	PA-Kohorte, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	Mit Klemme: Anzahl	Mit Klemme, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	Ohne Klemme (Anzahl)	Ohne Klemme in (%) oder MW± Sdt.Abw.	p-Wert
Neurovaskuläres Ereignis präoperativ 0=nein	69	94,5%	15	83,3%	54	90,9%	0,09
1=Apoplex, isch.	7	9,59%	3	16,7%	4	7,3%	n.s.
2= Apoplex Blutung	0	0	0	0	0	0	n.s.
3=TIA	0	0	0	0	0	0	n.s.
4=MS	0	0	0	0	1	1,8%	n.s.
5=Neuropathie	0	0	0	0	0	0	n.s.
Neurovaskuläres Ereignis postoperativ, in %	5	6,8%	2	11,1%	3	5,5%	0,04
Apoplex ischämisch postoperativ, in %	3	4,2%**	1*	5,9%	2*	3,7%	0,87
Apoplex Blutung, in %	0	0	0	0%	0	0%	n.s.
Delir postoperativ, in %	10	14,1% **	3*	17,6%	7*	12,7%	0,05
TIA postoperativ, in %	0	0**	0%	0*	0*	0%	n.s.

** Die Information wurde bei zwei Patienten nicht dokumentiert, Statistik anhand bekannter Parameter

* Die Information wurde bei einem Patienten nicht dokumentiert, Statistik anhand bekannter Parameter

3.5. Postoperative Komplikationen

Ein postoperativer Myokardinfarkt wurde bei vier Patient*innen (5,6 %) diagnostiziert. Auch hier lagen bei je einem Patienten aus MK- und OK-Gruppe keine Daten vor. In der MK-Gruppe war ein Patient betroffen (5,6 %), in der OK-Gruppe drei (5,6 %; $p = 0,99$).

Wundheilungsstörungen (WHST) traten bei sechs Patient*innen (8,5 %) auf. Davon betrafen vier Fälle das Sternum (5,6 %) und zwei die Saphenektomiewunde (2,8 %). In der MK-Gruppe wurde bei jeweils einem Patienten (5,9 %) eine sternale und eine Saphenektomie-Wundheilungsstörung dokumentiert. In der OK-Gruppe traten drei sternale (5,6 %) und eine Beinwundheilungsstörung (1,9 %) auf. Der Unterschied war nicht signifikant ($p = 0,89$).

Eine kardiopulmonale Reanimation (CPR) war bei fünf Patient*innen (6,8 %) erforderlich (Datenlücken in je einer Gruppe). In der MK-Gruppe betraf dies einen Patienten (5,9 %), in der OK-Gruppe vier (7,4 %; $p = 0,86$).

Eine postoperative Anwendung der intraaortalen Ballonpumpe (IABP) war bei fünf Patient*innen (6,8 %) notwendig – ebenfalls mit fehlenden Daten je Gruppe. In der MK-Gruppe wurde bei einem Patienten (5,9 %) eine IABP implantiert, in der OK-Gruppe bei vier (7,4 %; $p = 0,45$). Eine extrakorporale Membranoxygenierung (ECMO) wurde bei zwei Patient*innen eingesetzt (2,7 %), je einer pro Gruppe (MK: 5,9 %, OK: 1,9 %; $p = 0,15$).

Eine schwere postoperative Blutung mit Massentransfusion trat bei zwei Patient*innen (2,7 %) auf – ein Fall in der MK-Gruppe (5,6 %), zwei in der OK-Gruppe (3,6 %). Aufgrund fehlender Daten in der OK-Gruppe war der Unterschied nicht signifikant ($p = 0,21$).

Eine prolongierte Beatmung mit nachfolgender Punktionsdilatationstracheotomie (PDT) wurde bei 13 Patient*innen (17,8 %) durchgeführt (MK: 11,8 %; OK: 20,4 %; $p = 0,12$). Eine antibiotische Therapie wurde bei 27 Patient*innen (37,0 %) erforderlich. In der MK-Gruppe betraf dies drei Patient*innen (17,6 %), in der OK-Gruppe 24 (44,4 %). Der Unterschied war signifikant ($p = 0,01$).

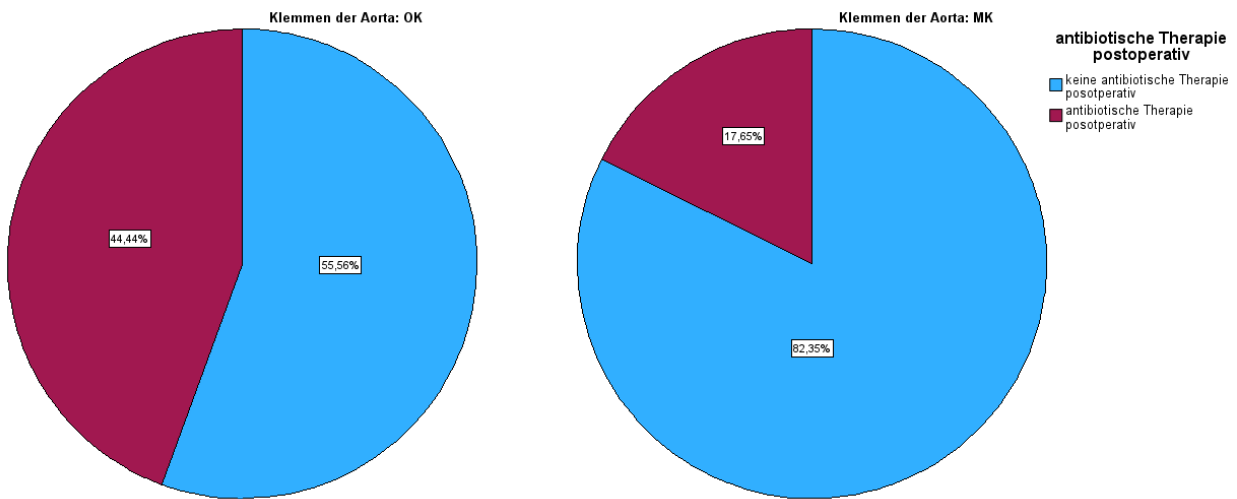


Abbildung 21. Kreisdiagramm: postoperative antibiotische Therapie: 44,4 % OK vs. 17,6 % MK, $p=0,01$

Ein akutes Nierenversagen trat bei 20 Patient*innen (27,4 %) auf (MK: 29,4 %; OK: 27,8 %; $p = 0,67$). Eine Intubationsdauer von über 24 Stunden wurde bei 19 Patient*innen (26,0 %) verzeichnet (MK: 17,6 %; OK: 29,6 %; $p = 0,10$).

Die mittlere Verweildauer auf der Intensivstation betrug $6,12 \pm 8,09$ Tage. In der MK-Gruppe lag sie bei $3,5 \pm 3,71$ Tagen, in der OK-Gruppe bei $6,98 \pm 8,94$ Tagen. Der Unterschied war signifikant ($p = 0,02$). Der durchschnittliche stationäre Aufenthalt betrug $14,37 \pm 8,76$ Tage (MK: $15,61 \pm 10,01$ Tage; OK: $13,96 \pm 8,37$ Tage; $p = 0,82$).

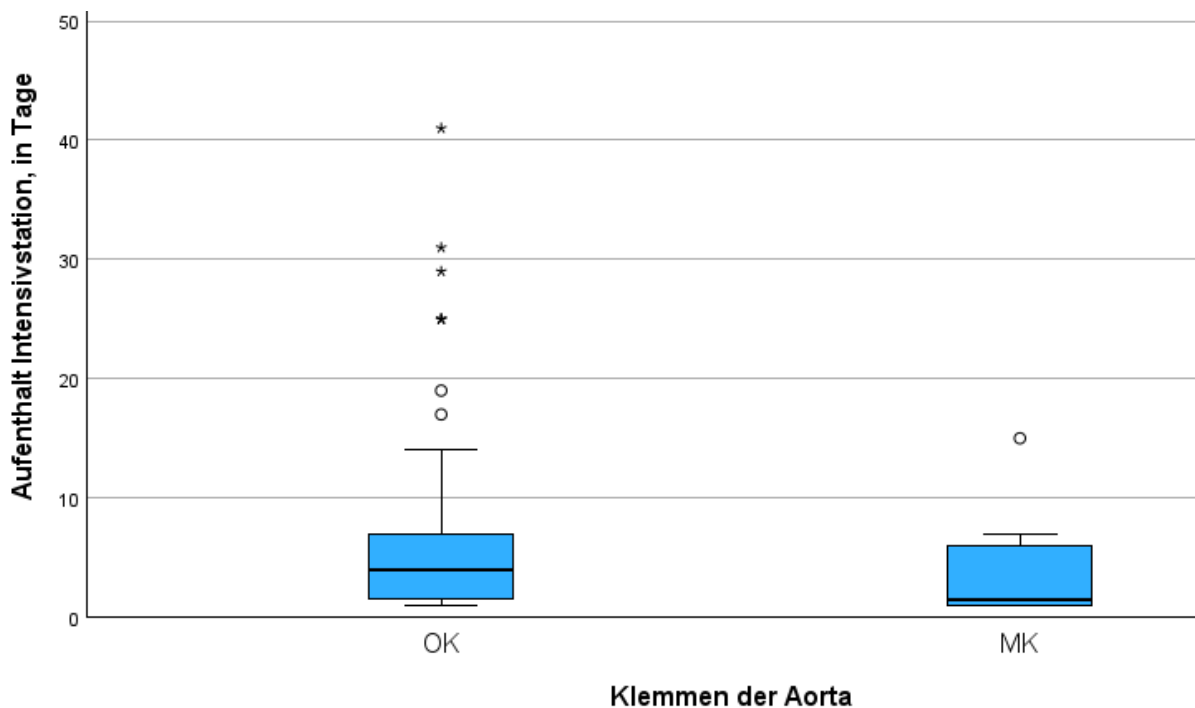


Abbildung 22. Boxplot: Verweildauer auf der Intensivstation in Tage: OK-Gruppe bei $6,98 \pm 8,94$ Tage, MK-Gruppe: $3,5 \pm 3,71$ Tage, $p = 0,02$.

Die 30-Tages-Mortalität lag bei 12 Patient*innen (16,4 %). In der MK-Gruppe verstarben zwei Patient*innen (11,1 %), in der OK-Gruppe zehn (18,2 %; p = 0,38).

Laborchemisch zeigte sich ein mittlerer Entlassungs-Kreatininwert von $1,51 \pm 1,05$ mg/dl (MK: $1,59 \pm 1,27$ mg/dl; OK: $1,49 \pm 0,99$ mg/dl; p = 0,56). Der postoperative CRP-Wert lag im Mittel bei $67,63 \pm 54,05$ mg/l (MK: $63,02 \pm 45,12$ mg/l; OK: $69,09 \pm 56,89$ mg/l), wobei der Unterschied signifikant war (p = 0,02). Die mittlere Leukozytenzahl betrug $10,72 \pm 4,71 \times 10^3/\mu\text{l}$ (MK: $10,63 \pm 2,91$; OK: $10,75 \pm 5,18$; p = 0,29). Der postoperative Albuminwert betrug im Mittel $29,83 \pm 7,68$ g/l (MK: $33,38 \pm 7,33$; OK: $28,75 \pm 7,53$; p = 0,56).

Tabelle 11. Postoperative Komplikationen

	PA-Kohorte (Anzahl)	PA-Kohorte, in (%) oder MW \pm Sdt.Abw.	Mit Klemme: Anzahl	Mit Klemme, in (%) oder MW \pm Sdt.Abw.	Ohne Klemme (Anzahl)	Ohne Klemme in (%) oder MW \pm Sdt.Abw.	p-Wert
Herzinfarkt postoperativ, in %	4	5,6% **	1	5,6%*	3*	5,6%	0,99
WHST postoperativ, in %	71	**	17		54		0,89
Keine Sternal Saphenektomie beides	65	91,5%	15	88,2%	50	92,6%	
	4	5,6%	1	5,9%	3	5,6%	
	2	2,8%	1	5,9%	1	1,9%	
			0	0%	0	0%	
CPR im KH, in %	71	6,8%	1	5,9%*	4*	7,4%	0,86
IABP postoperativ, in %	71	6,8%	1	5,9%*	4*	7,4%	0,45

* Die Information wurde bei einem Patienten nicht dokumentiert, Statistik anhand bekannter Parameter

** Die Information wurde bei zwei Patienten nicht dokumentiert, Statistik anhand bekannter Parameter

	PA-Kohorte (Anzahl)	PA-Kohorte, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	Mit Klemme: Anzahl	Mit Klemme, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	Ohne Klemme (Anzahl)	Ohne Klemme in (%) oder MW± Sdt.Abw.	p-Wert
ECMO postoperativ, in %	2	2,7%	1	5,9% *	1*	1,9%	0,15
Schwere Blutung postoperativ, in %	2	2,7%	1	5,6%	2*	3,6%	0,21
PDT, in %	13	17,8%	2	11,8% *	11*	20,4%	0,12
antibiotische Therapie postoperativ, in %	27	37,0%	3	17,6% *	24*	44,4%	0,01
akutes Nierenversagen postoperativ, in %	20	27,4%	5	29,4% *	15	27,8% *	0,67
Intubation länger als 24h, in %	19	26,0%	3	17,6% *	16	29,6% *	0,10
ITS-Aufenthalt, Tage	73	6,12±8,09	18	3,5±3,71	55	6,98±8,94	0,02
Krankenhausaufenthalt in Tage	73	14,37±8,76	18	15,61±10,01	55	13,96±8,37	0,82
30-Tages Mortalität, in %	12	16,4%	2	11,1%	10	18,2%	0,38
Krea bei E bzw le Wert bei Exitus	71	1,51±1,05	17	1,59±1,27	54	1,49±0,99	0,562
CRP mg/dl postoperativ	71	67,63±54,05	17	63,02±45,12	54	69,09±56,89	0,02

* Die Information wurde bei einem Patienten nicht dokumentiert, Statistik anhand bekannter Parameter

				Mit Klemme, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	Ohne Klemme (Anzahl)	Ohne Klemme in (%) oder MW± Sdt.Abw.	p-Wert
	PA- Kohorte (Anzahl)	PA-Kohorte, in (%) oder MW± Sdt.Abw.	Mit Klemme: Anzahl				
Leucocytes /1000 postoperativ	71	10,72±4,71	17	10,63±2,91	54	10,75±5,18	0,29
Albumin mg/dl postoperativ	69	29,83±7,68	16	33,38±7,33	53	28,75±7,53	0,562

3.6. Operation ohne Aortenklemme – Subgruppenanalyse

Zur genaueren Bewertung der Operationstechniken bei Patient*innen mit Porzellanaorta, die ohne Aortenklemme (OK) operiert wurden, erfolgte eine differenzierte Analyse innerhalb dieser Gruppe. Die OK-Kohorte umfasst insgesamt 55 Patient*innen. Davon wurden drei operative Strategien anhand der verwendeten Technik zur zentralen Anastomosierung näher betrachtet: partielles Ausklemmen der Aorta (n = 9), Heartstring-System (n = 18) sowie Enclose-System (n = 2). Eine vierte Gruppe innerhalb der OK-Kohorte, bei der vollständig arteriell und ohne jegliche Aortamanipulation operiert wurde („no-touch“), wurde aufgrund abweichender Methodik aus der Subgruppenbetrachtung ausgeschlossen. Daher sind in der Gesamtkohorte Angaben enthalten, die nicht in den drei hier analysierten Gruppen erscheinen.

Obwohl die meisten p-Werte über 0,05 lagen und somit statistisch nicht signifikant sind, erlaubt die Analyse eine differenzierte Betrachtung potenzieller Unterschiede. Im Folgenden werden die Ergebnisse inhaltlich geordnet und klar strukturiert dargestellt.

3.6.1. Demografische Merkmale

Das durchschnittliche Alter der Gesamtkohorte betrug $74,6 \pm 6,4$ Jahre. In der Gruppe mit partiellem Ausklemmen lag der Mittelwert bei $75,1 \pm 4,1$ Jahren, in der Heartstring-Gruppe bei $75,2 \pm 6,4$ Jahren. Die Enclose-Gruppe war mit $71,5 \pm 3,5$ Jahren im Mittel jünger. Der Unterschied war nicht signifikant ($p = 0,77$).

Der Männeranteil in der OK-Kohorte betrug insgesamt 85,5 %. Innerhalb der Subgruppen lag dieser bei 88,9 % (partiell ausklemmen), 77,8 % (Heartstring) und 50 % (Enclose). Auch hier zeigte sich kein signifikanter Unterschied ($p = 0,16$).

Tabelle 12. Analyse der Operationen ohne Klemme: Alter- und Geschlechtsverteilung

	Gesamtkohorte n=55	Partielles ausklemmen n=9	Heart string n=18	Enclose n=2	p-Wert
Alter (Jahre)	74,62 ± 6,37	75,11 ± 4,11	75,22 ± 6,39	71,5 ± 3,54	0,77
Geschlecht männlich	85,5%	88,9%	77,8%	50%	0,16

3.6.2. Klinische und kardiovaskuläre Risikofaktoren

Der Body-Mass-Index (BMI) betrug im Durchschnitt $26,3 \pm 3,7 \text{ kg/m}^2$. Die höchsten Werte fanden sich in der Enclose-Gruppe ($28,2 \pm 6,8 \text{ kg/m}^2$), gefolgt von der partiellen Ausklemmung ($27,2 \pm 4,6 \text{ kg/m}^2$) und der Heartstring-Gruppe ($26,0 \pm 3,2 \text{ kg/m}^2$) ($p = 0,98$).

Der präoperative EuroSCORE lag im Gesamtkollektiv bei $6,45 \pm 2,95 \%$. Die Werte innerhalb der Subgruppen reichten von 6,67 % (partiell ausklemmen) über 6,61 % (Heartstring) bis 7,50 % (Enclose; $p = 0,87$).

Hinsichtlich der koronaren Gefäßerkrankung zeigte sich eine Dominanz der Dreifäßerkrankung mit 74,5 % in der Gesamtkohorte. In der Heartstring-Gruppe lag der Anteil bei 72,2 %, in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen bei 66,6%. In der Enclose-Gruppe hatten alle Patient*innen eine Zweifäßerkrankung, in der Heartstring-Gruppe hatten 33,3% eine Zweifäßerkrankung, die Gesamtkohorte lag bei 20%. Eine Einfäßerkrankung kam nur in der Gesamtkohorte vor, mit einer Prävalenz von 5,5%. Das KHK-Ausmaß unterscheidet sich in den drei Gruppen nicht signifikant ($p = 0,84$).

Die präoperative Ejektionsfraktion (EF) lag in der OK-Kohorte bei $38,62 \pm 15,78 \%$. Die niedrigsten Werte fanden sich in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen ($28,33 \pm 7,64 \%$), während sie in der Heart-String-Gruppe mit $32,67 \pm 22,51 \%$ etwas höher waren. In der Enclose-Gruppe fehlten Angaben zur Ejektionsfraktion, sodass diese in der Analyse nicht berücksichtigt werden konnte. Der Unterschied zwischen den Gruppen war statistisch nicht signifikant ($p = 0,23$), deutet aber auf tendenziell eingeschränkte linksventrikuläre Pumpfunktion in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen hin.

Die Prävalenz eines Diabetes mellitus Typ II lag in der Gesamtkohorte bei 27,3 %. In der Gruppe mit partiellem Ausklemmen war der Anteil mit 55,6 % am höchsten, während er in der Heart-String-Gruppe 22,2 % betrug. In der Enclose-Gruppe waren alle Patient*innen betroffen (100 %). Der Unterschied war jedoch nicht signifikant ($p = 0,10$), was vermutlich auf die geringe Gruppengröße zurückzuführen ist.

Eine Hyperlipoproteinämie wurde bei 72,7 % der Gesamtpopulation festgestellt. Die Gruppe mit partiellem Ausklemmen wies mit 77,8 % die höchste Prävalenz auf, gefolgt von der Heart-String-Gruppe (66,7 %) und der Enclose-Gruppe (50 %) ($p = 0,67$). Ähnlich zeigte sich auch bei der arteriellen Hypertonie eine hohe Gesamtprävalenz von 90,9 %, mit vollständiger Betroffenheit (100 %) in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen und der Enclose-Gruppe sowie 88,9 % in der Heart-String-Gruppe ($p = 0,75$).

Vorhofflimmern wurde in 30,9 % der Gesamtpopulation dokumentiert. Während der Anteil in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen nur 11,1 % betrug, lag er in der Heart-String-Gruppe bei 38,9 % und in der Enclose-Gruppe bei 100 %. Trotz der deutlichen Unterschiede wurde keine statistische Signifikanz erreicht ($p = 0,29$).

Adipositas war in 25,5 % der Gesamtpopulation vorhanden. Die Gruppe mit partiellem Ausklemmen zeigte mit 33,3 % eine moderate Prävalenz, während sie in der Heart-String- und Enclose-Gruppe jeweils 50 % betrug ($p = 0,67$). Der Nikotinabusus lag in 33,3 % der Fälle vor. In der Gruppe mit partiellem Ausklemmen war der Anteil mit 22,2 % am niedrigsten, während er in der Heart-String- und Enclose-Gruppe jeweils 50 % betrug ($p = 0,23$).

Der Anteil ehemaliger Raucher*innen (Ex-Nikotinabusus) lag insgesamt bei 24,1 %. In der Gruppe mit partiellem Ausklemmen waren 33,3 % betroffen, in der Heart-String-Gruppe 5,6 %, in der Enclose-Gruppe 0 %. Auch hier wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt ($p = 0,71$).

Eine Stenose der Arteria carotis interna wurde bei 45,5 % der Gesamtpopulation dokumentiert. In der Gruppe mit partiellem Ausklemmen lag der Anteil bei 55,6 %, in der Heart-String-Gruppe bei 44,4 %. In der Enclose-Gruppe wurde keine Stenose beschrieben. Die Unterschiede zwischen den Gruppen waren statistisch nicht signifikant ($p = 0,71$).

Die Prävalenz der peripheren arteriellen Verschlusskrankheit (pAVK) betrug in der Gesamtgruppe 43,6 %. Die Gruppe mit partiellem Ausklemmen wies einen Anteil von 44,4 %

auf, die Heart-String-Gruppe 38,9 %. In der Enclose-Gruppe wurde keine pAVK dokumentiert ($p = 0,67$).

Die Porzellanaorta war bei 21,8 % der Patient*innen bereits präoperativ bekannt. Der Anteil lag in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen bei 22,2 %, in der Heart-String-Gruppe bei 27,8 %, in der Enclose-Gruppe wurde kein Fall vorbekannter PA dokumentiert ($p = 0,94$). Eine pulmonale Hypertonie wurde selten festgestellt (7,3 % der Gesamtgruppe), ausschließlich in der Heart-String-Gruppe (11,1 %). In den übrigen Gruppen trat sie nicht auf ($p = 0,84$).

Die chronische Niereninsuffizienz wurde bei 32,7 % der Patient*innen dokumentiert. Die höchste Prävalenz fand sich in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen (44,4 %), gefolgt von der Heart-String-Gruppe (38,9 %). In der Enclose-Gruppe wurde keine chronische Niereninsuffizienz dokumentiert ($p = 0,54$).

Eine Herzinsuffizienz wurde in 32,7 % der Gesamtpopulation festgestellt. In der Gruppe mit partiellem Ausklemmen lag der Anteil bei 22,2 %, in der Heart-String-Gruppe bei 38,9 %, während in der Enclose-Gruppe kein Fall vorlag ($p = 0,79$).

Ein präoperativer Herzschrittmacher wurde bei 7,3 % der Patient*innen dokumentiert – ausschließlich in der Heart-String-Gruppe (5,6 %), während in den anderen Gruppen keine Angaben gemacht wurden. Auch hier lag kein signifikanter Unterschied vor ($p = 0,70$).

Präoperative neurologische Ereignisse (Apoplex, TIA, MS oder Neuropathien) traten in 9,1 % der Gesamtpopulation auf. In der Gruppe mit partiellem Ausklemmen wurden ischämische Apoplexe bei 22,2 % dokumentiert. In der Heart-String- und Enclose-Gruppe wurden keine präoperativen neurovaskulären Ereignisse festgestellt ($p = 0,31$).

Der mittlere präoperative Kreatininwert in der Gesamtgruppe betrug $1,36 \pm 1,15$ mg/dl. Die höchsten Werte fanden sich in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen ($1,92 \pm 2,08$ mg/dl), gefolgt von der Heart-String-Gruppe ($1,07 \pm 0,32$ mg/dl) und der Enclose-Gruppe ($0,72 \pm 0,01$ mg/dl) ($p = 0,89$). Die Leukozytenzahl präoperativ lag insgesamt bei $9,11 \pm 3,42 \times 1000/\mu\text{l}$. In der Gruppe mit partiellem Ausklemmen war sie mit $10,04 \pm 4,68 \times 1000/\mu\text{l}$ am höchsten, gefolgt von der Enclose-Gruppe ($8,56 \pm 4,52 \times 1000/\mu\text{l}$) und der Heart-String-Gruppe ($7,82 \pm 2,57 \times 1000/\mu\text{l}$) ($p = 0,42$).

Tabelle 13. Risikofaktoren der Patienten, die ohne Klemmen der Aorta operiert wurden

	Gesamtkohorte n=55	Partielles ausklemmen n=9	Heart string n=18	Enclose n=2	p- Wert
BMI, m/kg ²	26,26 ± 3,67	27,15 ± 4,56	25,99 ± 3,15	28,22 ± 6,84	0,98
EUROScore, in %	6,45 ± 2,95	6,67 ± 3,43	6,61 ± 3,22	7,50 ± 0,71	0,87
KHK: 1,2 oder 3-GE	2,69 ± 0,57	2,67 ± 0,50	2,72 ± 0,46	2	0,84
1-GE, in %	5,5%	0	0	0	-
2-GE, in %	20%	33,3%	27,8%	100%	-
3-GE, in %	74,5%	66,6%	72,2%	0	-
Ejektionsfraktion präoperativ (%)	38,62 ± 15,78%	28,33 ± 7,64%	32,67 ± 22,51%	Unb.	0,23
Diabetes mellitus	27,3%	55,6%	22,2%	100%	0,1
Hyperlipoproteinämie	72,7%	77,8%	66,7%	50%	0,67
Hypertonie	90,9%	100%	88,9%	100%	0,75
Vorhofflimmern	30,9%	11,1%	38,9%	100%	0,29
Adipositas in %	25,5%	33,3%	50%	50%	0,67
Nikotinabusus in %	33,3%	22,2%	50%	50%	0,23
Ex-nikotin in %	24,1%	33,3%	5,6%	0%	0,71
Stenose Arteria carotis interna in %	45,5%	55,6%	44,4%	0%	0,71
pAVK in %	43,6%	44,4%	38,9%	0%	0,67
Porzellanaorta vorbekannt in %	21,8%	22,2%	27,8%	0%	0,94
Pulmonalhypertonie in %	7,3%	0%	11,1%	0%	0,84
CNV in %	32,7%	44,4%	38,9%	0%	0,54
Herzinsuffizienz in %	32,7%	22,2%	38,9%	0%	0,79
SM präoperativ in %	7,3%	Unbekannt	5,6%	0%	0,7
Neurovaskuläres Ereignis präoperativ in %					0,31
0=nein	90,9%	77,8%	100%	100%	-
1= Apoplex Ischämisch	7,3%	22,2%	0	0	-
2= Apoplex Blutung	0	0	0	0	-
3=TIA	0	0	0	0	-
4=MS	1,8%	0	0	0	-
5=Neuropathie	0	0	0	0	-

	Gesamtkohorte n=55	Partielles ausklemmen n=9	Heart string n=18	Enclose n=2	p- Wert
Kreatinin, in mg/dl präoperativ	1,36 ± 1,15	1,92 ± 2,08	1,07 ± 0,32	0,72 ± 0,01	0,89
Leukozyten pro 1000 präoperativ	9,11 ± 3,42	10,04 ± 4,68	7,82 ± 2,57	8,56 ± 4,52	0,42

3.6.3. Präoperative Bildgebung

Im Folgenden werden die präoperativen Daten der untersuchten Patient*innen analysiert. Es ist zu beachten, dass keiner der verglichenen Parameter statistisch signifikant war.

Ein präoperatives Röntgen-Thorax wurde bei insgesamt 52,7 % der Patient*innen stationär durchgeführt. In der Gruppe mit partiellem Ausklemmen lag der Anteil bei 44,4 %, in der Heart-String-Gruppe bei 38,9 %, während in der Enclose-Gruppe 50 % eine Röntx-Untersuchung erhielten ($p = 0,23$).

Ein präoperatives CT-Thorax wurde bei 12,7 % der Patient*innen durchgeführt. In der Gruppe mit partiellem Ausklemmen betrug der Anteil 11,1 %, in der Heart-String-Gruppe 16,7 %. In der Enclose-Gruppe wurde kein CT durchgeführt (0 %), $p = 0,89$.

Radiologische Hinweise auf eine Aortensklerose im Röntgen-Thorax lagen bei 39,2 % der gesamten OK-Gruppe vor. In der Gruppe mit partiellem Ausklemmen wurde in 22,2 % der Fälle eine Aortensklerose dokumentiert, in der Heart-String-Gruppe bei 29,4 %. In der Enclose-Gruppe war der Anteil mit 50 % am höchsten, bei einem Fall fehlten die Angaben ($p = 0,32$).

Tabelle 14. Präoperative Bildgebung

	Gesamtkohorte n=55	Partielles ausklemmen n=9	Heart string n=18	Enclose n=2	p- Wert
Präoperatives Rö Tx stationär	52,7%	44,4%	38,9%	50%	0,23
Präoperatives CT	12,7%	11,1%	16,7%	0%	0,89
Aortensklerose in Röntx, in %	39,2%	22,2%	29,4% *	50%	0,32

* Die Information wurde bei einem Patienten nicht dokumentiert, Statistik anhand bekannter Parameter

3.6.4. Intraoperative Befunde

Nachdem die präoperativen Parameter der OK-Kohorte und ihrer Subgruppen dargestellt wurden, folgt nun die Analyse der intraoperativen und postoperativen Ergebnisse. Die Unterteilung in partielles Ausklemmen, Heartstring-System und Enclose-System bleibt bestehen. Statistisch signifikante Unterschiede zeigten sich insbesondere bei der Anzahl der genähten Bypassanastomosen.

Eine elektive Operation wurde bei 78,2 % aller OK- Patient*innen durchgeführt. Der Anteil lag in der Subgruppe mit partiellem Ausklemmen bei 77,8 %, in der Heartstring-Gruppe bei 72,2 % und in der Enclose-Gruppe bei 50 % ($p = 0,23$). Notfalloperationen wurden bei 7,3 % der Patient*innen dokumentiert. Die Subgruppen mit partiellem Ausklemmen und Heartstring zeigten jeweils einen Anteil von 11,1 %, während in der Enclose-Gruppe die Hälfte der Eingriffe notfallmäßig durchgeführt wurde ($p = 0,23$). Dringliche Eingriffe machten 14,5 % der Fälle aus, wobei in der Enclose-Gruppe keine dringliche Operation erfolgte ($p = 0,23$).

Die durchschnittliche Anzahl venöser Bypassanastomosen betrug in der OK-Gesamtkohorte $1,64 \pm 1,78$. In der Subgruppe mit partiellem Ausklemmen lag der Mittelwert bei $2,11 \pm 1,27$, in der Heartstring-Gruppe bei $1,72 \pm 1,45$ und in der Enclose-Gruppe bei $1,5 \pm 0,71$. Die Unterschiede waren hochsignifikant ($p < 0,001$).

Die LIMA wurde in 96,4 % der OK-Operationen verwendet. In der Gruppe mit partiellem Ausklemmen sowie der Enclose-Gruppe erfolgte die LIMA-Entnahme in allen Fällen (100 %), während sie in der Heartstring-Gruppe bei 88,9 % entnommen wurde ($p = 0,12$). Als T-Graft wurde die LIMA bei 25,5 % aller Patient*innen verwendet, mit geringeren Anteilen in den Subgruppen: 11,1 % (partiell), 11,1 % (Heartstring) und 0 % (Enclose) ($p = 0,71$). Die Verwendung als freier Graft erfolgte in 5,5 % der Gesamtkohorte – in der Subgruppe mit partiellem Ausklemmen deutlich häufiger (22,2 %) als in der Heartstring- (5,6 %) oder Enclose-Gruppe (0 %) ($p = 0,75$). Eine RIMA wurde in keiner der Subgruppen entnommen.

Die Anzahl zentraler Anastomosen an der Aorta betrug in der OK-Kohorte $0,55 \pm 0,57$. Signifikant höhere Mittelwerte fanden sich in der Heartstring-Gruppe ($1,72 \pm 1,45$) und bei partiellem Ausklemmen ($1,0 \pm 0,5$), während in der Enclose-Gruppe 50 % der Patient*innen eine, 50 % zwei zentrale Anastomosen erhielten ($p < 0,001$). Die Gesamtanzahl der Bypassanastomosen betrug durchschnittlich $2,07 \pm 0,9$, mit signifikanten Unterschieden zwischen den Subgruppen: $2,78 \pm 0,97$ (partiell), $2,28 \pm 0,56$ (Heartstring) und 3,0 (Enclose) ($p < 0,001$).

Eine komplette Revaskularisation wurde bei 50,9 % der OK- Patient*innen erreicht. Der Anteil betrug 77,8 % (partiell), 61,1 % (Heartstring) und 100 % (Enclose), ohne statistische Signifikanz ($p = 0,13$). Reoperationen wurden insgesamt bei 7,3 % durchgeführt, davon 11,1 % in der Heartstring-Gruppe, keine in den anderen Gruppen ($p = 0,85$).

Die Verwendung der Herz-Lungen-Maschine (HLM) erfolgte in 43,6 % der Fälle, mit höchsten Anteilen in der Enclose-Gruppe (100 %) ($p = 0,83$). Ein Einsatz der HLM in Beating-Heart-Technik fand bei 43,6 % der Patient*innen statt. In der Enclose-Gruppe wurde dieses Vorgehen konsequent gewählt (100 %) ($p = 0,18$).

Die durchschnittliche Operationszeit betrug $180,76 \pm 52,79$ Minuten. Die Enclose-Gruppe wies mit $295 \pm 77,78$ Minuten die längste Zeit auf, jedoch ohne signifikanten Unterschied ($p = 0,93$). Die HLM-Zeit war ebenfalls in der Enclose-Gruppe am längsten ($153 \pm 59,39$ Minuten; $p = 0,16$). Ein Wechsel von geplanter HLM-CABG zu Beating Heart erfolgte bei 43,6 % der Patient*innen, in der Enclose-Gruppe bei allen ($p = 0,17$). Der Wechsel von HLM-CABG zu OPCAB war signifikant ($p = 0,03$), mit höchsten Anteilen in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen (55,6 %). In keiner Gruppe kam es zu einem Operationsabbruch.

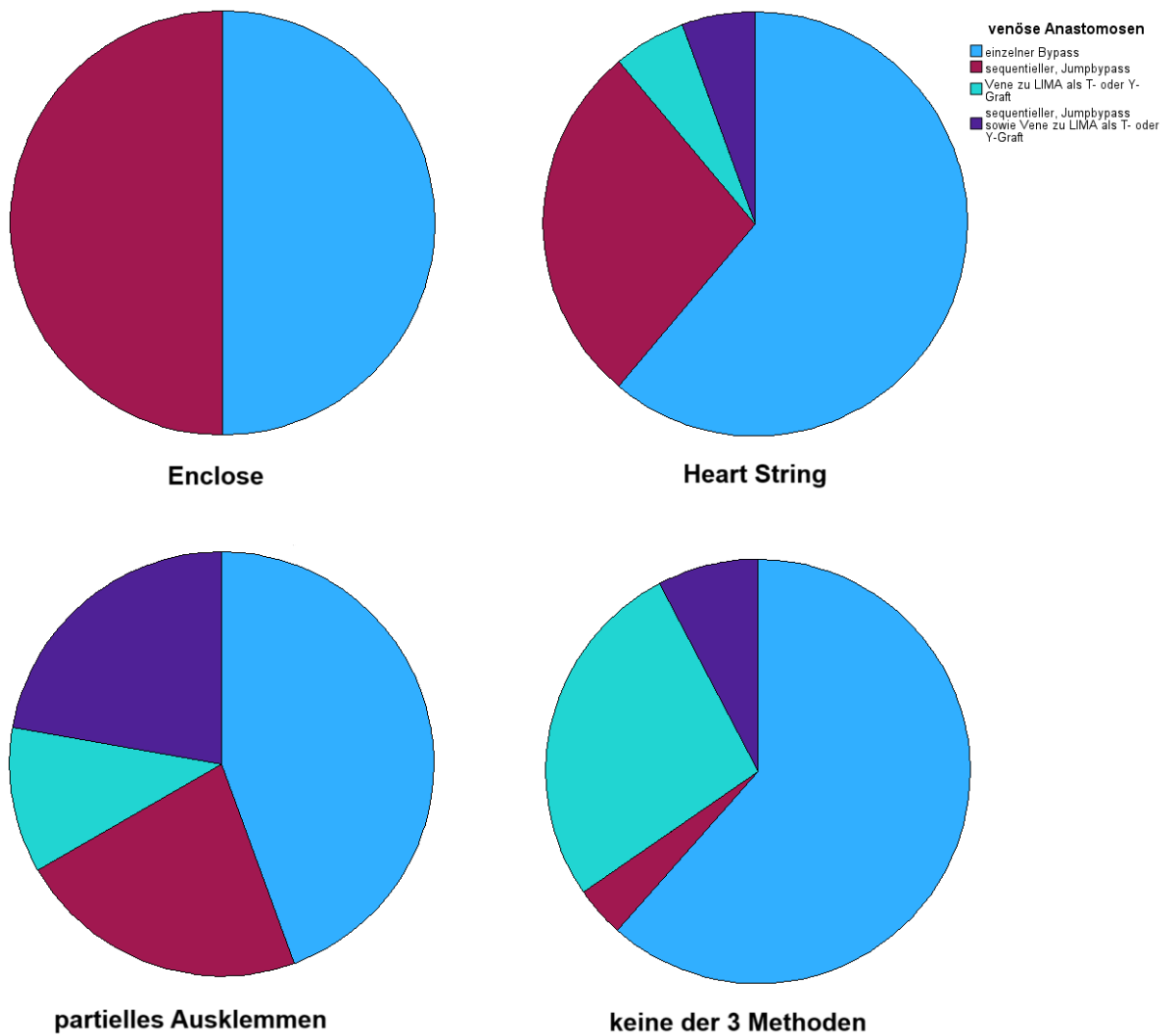


Abbildung 23. Anzahl venöser Bypassanastomosen bei Operationen ohne Klemmen der Aorta

Tabelle 15. Analyse der Operationen ohne Klemme: intraoperative Daten

	Gesamtkohorte n=55	Partielles ausklemmen n=9	Heart string n=18	Enclose n=2	p- Wert
Elektive Operation, in %	78,2%	77,8%	72,2%	50%	0,23
Notfalloperation, in %	7,3%	11,1%	11,1%	50%	0,23
dringliche Operation, in %	14,5%	11,1%	16,6%	0%	0,23
venöse Anastomosen	1,64±1,78	2,11 ± 1,27	1,72 ± 1,45	1,5 ± 0,71	<0,001
Venöse Anastomosen, in %					<,001
Keine Vene	29,1%	0%	0%	0%	-
Einzelner Bypass	29,1%	44,4%	61,1%	50%	-
Sequenzieller (Jump) Bypass	16,4%	22,2%	27,8%	50%	-
Vene zu LIMA als T oder Y Graft	16,4%	11,1%	5,6%	0	-

	Gesamtkohorte n=55	Partielles ausklemmen n=9	Heart string n=18	Enclose n=2	p- Wert
LIMA zu Vene	3,6%	22,2%	0	0	-
Vene zu Vene, als T oder Y	0%	0	0	0	-
Sequenzieller (Jump) Bypass und Vene zu LIMA als T oder Y Graft	5,5%	0	5,6%	0	-
Einzelner Bypass und Sequenzieller (Jump) Bypass	0%	0	0	0	-
LIMA als T-Graft, in %	25,5%	11,1%	11,1%	0%	0,71
RIMA entnommen, in %	1,8%	0%	0%	0%	1,0
LIMA entnommen, in %	96,4%	100%	88,9%	100%	0,12
LIMA als free graft, in %	5,5%	22,2%	5,6%	0%	0,75
Anzahl zentrale Anastomosen	0,55 ± 0,57	1,0 ± 0,5	1,72 ± 1,45	0,5	<0,001
Keine, in %	49,1%	11,1%	0	0	
Eine, in %	47,3%	77,8%	100%	50%	
zwei, in %	3,6%	11,1%	0	50%	
Anzahl Anastomosen	2,07 ± 0,9	2,78 ± 0,97	2,28 ± 0,56	3	<0,001
Eine, in %	29,1%	0	5,6%	0	-
Zwei, in %	40%	44,4%	61,1%	0	-
Drei, in %	27,3%	44,4%	33,3%	100%	-
Vier, in %	1,8%	11,1%	0	0	-
Fünf, in %	1,8%	0	0	0	-
Komplette Revaskularisation in %	50,9%	77,8%	61,1%	100%	0,13
Operation als Reoperation, in %	7,3%	0%	11,1%	0%	0,85
mit HLM, in %	43,64%	44,4%	55,6%	100%	0,83
Mit HLM, ohne Klemme, in Beating Heart Technik in %	43,64%	22,2%	27,8%	100%	0,18
OPCAB in %	56,36%	55,6%	44,4%	0%	0,83
Aortenklappen Cross Clamp in %	0%	0%	0%	0%	-
Zentrale Anastomose in Ischämie Cross clamp genäht in %	0%	0%	0%	0%	-
Partielles, tangenciales Ausklemmen der Aorta in %	16,4%	100%	0%	0%	-
Enclose in %	3,6%	0%	0%	100%	-
Heart String in %	32,7%	0%	100%	0%	-
Operationszeit in Minuten	180,76 ± 52,79	183,44 ± 41,89	185,50 ± 43,32	295 ± 77,78	0,93
HLM-Zeit in Minuten	42,55 ± 54,08	65,33 ± 65,57	47,89 ± 46,93	153 ± 59,39	0,16

	Gesamtkohorte n=55	Partielles ausklemmen n=9	Heart string n=18	Enclose n=2	p- Wert
HLM geplant	72,7%	77,8%	61,1%	100%	0,65
HLM-CABG to Beating Heart Switch	43,6%	77,8%	50%	100%	0,17
OPCAB zu Beating Heart Switch	1,8%	0%	5,6%	0%	-
HLM-CABG to OPCAB Switch (ohne HLM)	34,5%	55,6%	11,1%	0%	0,03
Procedure Dropout	0%	0%	0%	0%	-

3.6.5. Neurologische Komplikationen

Präoperative neurovaskuläre Ereignisse traten bei 9,1 % der Patient*innen auf. Der Anteil lag in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen bei 22,2 %, während in den übrigen Gruppen keine Ereignisse verzeichnet wurden ($p = 0,31$). Postoperativ wurden neurovaskuläre Ereignisse bei 5,5 % der Patient*innen dokumentiert, ausschließlich in der Heartstring-Gruppe (11,1 %, $p = 0,19$). Ein ischämischer Apoplex trat bei 3,6 % auf, ebenfalls nur in der Heartstring-Gruppe. Apoplexe durch Blutung, TIA oder MS wurden postoperativ nicht dokumentiert. Delir trat bei 12,7 % auf – am häufigsten in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen (22,2 %) ($p = 0,8$).

Tabelle 16. Analyse der Operationen ohne Klemme: neurologische Komplikationen

	Gesamtkohorte n=55	Partielles ausklemmen n=9	Heart string n=18	Enclose n=2	p- Wert
Neurovaskuläres Ereignis präoperativ, in % 0=nein	90,9%	77,8%	0%	0%	0,31
1=Apoplex: Ischämie	7,3%	22,2%	0%	0%	-
2= Apoplex: Blutung	0%	0%	0%	0%	-
3=TIA	0%	0%	0%	0%	-
4=MS	1,8%	0%	0%	0%	-
5=Neuropathie	0%	0%	0%	0%	-
Neurovaskuläres Ereignis postoperativ, in %	5,5%	0%	11,1%	0%	1
Apoplex ischämisch postoperativ, in %	3,6%	0%	11,1%	0%	0,19
Apoplex Blutung, in %	0%	0%	0%	0%	-
Delir postoperativ, in %	12,7%	22,2%	11,1%	0%	0,8

	Gesamtkohorte n=55	Partielles ausklemmen n=9	Heart string n=18	Enclose n=2	p- Wert
TIA postoperativ, in %	0%	0%	0% *	0%	-

3.6.6. Postoperative Komplikationen

Ein postoperativer Myokardinfarkt trat in 5,6 % der Gesamtgruppe auf, überwiegend in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen (11,1 %) ($p = 0,47$). Eine Wundheilungsstörung (WHST) zeigte sich bei 7,4 % der Patient*innen, v. a. in der Heartstring-Gruppe ($p = 0,17$). Reanimationen (CPR) waren bei 7,4 % erforderlich, mit einem höheren Anteil in der Subgruppe mit partiellem Ausklemmen (22,2 %, $p = 0,24$).

Der postoperative Einsatz einer IABP erfolgte in 7,4 %, am häufigsten bei partiellem Ausklemmen (22,2 %, $p = 0,33$). Eine ECMO wurde bei nur 1,9 % notwendig. Eine Blutung trat in 3,6 % auf, vorwiegend in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen ($p = 0,46$).

Eine Punktionsdilatastracheotomie (PDT) war in 20,4 % notwendig, ohne signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen ($p = 0,88$). Eine postoperative Antibiose wurde in 44,4 % der Fälle verabreicht, gleichmäßig über die Subgruppen verteilt ($p = 1,0$). Ein akutes Nierenversagen trat in 27,8 % auf, am häufigsten in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen (22,2 %, $p = 0,34$).

Eine Intubationsdauer >24 Stunden zeigte sich bei 29,6 %, ohne signifikante Unterschiede ($p = 0,96$). Die durchschnittliche Intensivaufenthaltsdauer lag bei $6,98 \pm 8,94$ Tagen; am kürzesten in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen ($2,33 \pm 1,94$ Tage, $p = 0,14$). Die Gesamtdauer des Krankenhausaufenthalts betrug durchschnittlich $13,96 \pm 8,37$ Tage ($p = 0,23$). Die 30-Tages-Mortalität lag bei 18,2 %, mit 22,2 % in der partiellem Ausklemmen- und Heartstring-Gruppe ($p = 0,81$).

Der Kreatininwert bei Entlassung oder Exitus war mit $2,24 \pm 1,26$ mg/dl in der Subgruppe mit partiellem Ausklemmen signifikant höher als in den übrigen Gruppen ($p = 0,009$). Der CRP-Wert postoperativ lag im Gesamtkollektiv bei $69,09 \pm 56,89$ mg/dl, am höchsten bei partiellem Ausklemmen ($90,39 \pm 64,23$ mg/dl, $p = 0,11$). Die postoperative Leukozytenzahl zeigte keine

* Die Information wurde bei einem Patienten nicht dokumentiert, Statistik anhand bekannter Parameter

signifikanten Unterschiede ($p = 0,92$). Die Albuminwerte lagen mit $35,5 \pm 6,34$ mg/dl in der Enclose-Gruppe am höchsten, ebenfalls ohne Signifikanz ($p = 0,52$).

Tabelle 17. Analyse der Operationen ohne Klemme: postoperative Komplikationen

	Gesamtkohorte n=55	Partielles ausklemmen n=9	Heart string n=18	Enclose n=2	p- Wert
Herzinfarkt postoperativ, in %	5,6%	11,1%	0%*	0%	0,47
WHST postoperativ, in %	7,4%	0%	0%*	50%	0,17
Keine	92,6%	-	-	50%	-
Sternal	5,6%	-	-	50%	-
Saphenektomie	1,9%	-	-	0%	-
Sternal und Saphenektomie	0%	0%	0%	0%	-
CPR im KH, in %	7,4%	22,2%	0%*	0%	0,24
IABP postoperativ, in %	7,4%	22,2%	5,6%	0%	0,33
ECMO postoperativ, in %	1,9%	0%	0%*	0%	1
Blutung postoperativ, in %	3,6%	11,1%	0%*	0%	0,46
PDT, in %	20,4%	11,1%	22,2%	0%	0,88
antibiotische Therapie postoperativ, in %	44,4%	44,4%	38,9%	50%	1
akutes Nierenversagen postoperativ, in %	27,8%*	22,2%	16,7%*	0%	0,34
Intubation länger als 24h, in %	29,6%*	22,2%	33,3%	0%	0,96
ITS-Aufenthalt, Tage	6,98±8,94	2,33 ± 1,94	7,28 ± 7,68	5 ± 2,83	0,14
Krankenhausaufenthalt in Tage	13,96±8,37	9,56 ± 6,97	12,94 ± 6,48	14,5 ± 6,34	0,23
30-Tages Mortalität, in %	18,2%	22,2%	22,2%	0%	0,81
Krea bei E bzw le Wert bei Exitus	1,49±0,99	2,24 ± 1,26	1,22 ± 0,43	0,85 ± 0,99	0,009
CRP mg/dl postoperativ	69,09±56,89	90,39 ± 64,23	61,73 ± 65,26	16,1 ± 13,72	0,11

* Die Information wurde bei einem Patienten nicht dokumentiert, Statistik anhand bekannter Parameter

	Gesamtkohorte n=55	Partielles ausklemmen n=9	Heart string n=18	Enclose n=2	p- Wert
Leucocytes /1000 postoperativ	10,75±5,18	11,23 ± 6,70	11,01 ± 6,74	10,54 ± 4,53	0,92
Albumin mg/dl postoperativ	28,75±7,53	30,22 ± 5,74	27,94 ± 7,63	35,5 ± 6,34	0,52

4. Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurden Patient*innen mit Porzellanaorta hinsichtlich ihrer präoperativen Charakteristika, intraoperativen Strategien sowie postoperativen neurologischen und klinischen Outcomes systematisch untersucht. Im Mittelpunkt stand der Vergleich zwischen koronaren Bypassoperationen mit und ohne Aortenklammung, um die Auswirkungen unterschiedlicher chirurgischer Techniken auf das perioperative Risiko sowie auf neurologische und allgemeine Komplikationen besser zu verstehen. Die besondere Herausforderung bei dieser Patient*innengruppe ergibt sich aus der diffusen und hochgradigen Verkalkung der Aorta ascendens, die sowohl technische Limitationen als auch prognostische Relevanz für das operative Vorgehen besitzt.

Ziel der Analyse war es, potenzielle Vorteile einer aortenschonenden, klemmfreien Technik zu identifizieren und zugleich relevante präoperative Risikofaktoren für Komplikationen zu erkennen. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf neurologische Ereignisse, die als eine der gravierendsten Folgen einer aortalen Manipulation gelten, gelegt. Die vorliegende retrospektive Studie analysiert Daten von insgesamt 73 Patient*innen mit intraoperativ dokumentierter Porzellanaorta, die im Zeitraum von 2013 bis 2023 an der Herzchirurgischen Klinik der Uniklinik Köln sowie der Tochterklinik CardioClinic Köln operiert wurden.

Verglichen wurden zwei Kohorten: Eine Gruppe von 18 Patientinnen wurde trotz Porzellanaorta unter Einsatz einer totalen Aortenklamme operiert (MK-Gruppe), während bei 55 Patientinnen (OK-Gruppe) bewusst auf ein Aortenklammern verzichtet wurde. Die Ergebnisse zeigen eine detaillierte Charakterisierung beider Gruppen in Bezug auf präoperative Risikofaktoren, intraoperative Vorgehensweise und postoperative Komplikationen, mit besonderem Fokus auf das neurologische Outcome.

Obwohl viele der untersuchten Parameter keine statistische Signifikanz aufwiesen – möglicherweise bedingt durch die begrenzte Fallzahl oder durch eine weitgehend homogene Patient*innenpopulation – lassen sich dennoch klinisch relevante Tendenzen erkennen. Diese

Trends werden im Folgenden kritisch im Licht der aktuellen internationalen Literatur diskutiert. Der Diskussionsteil bezieht sich dabei primär auf den perioperativen Zeitraum, der als 30 Tage postoperativ definiert wurde.

4.1. Patient*innencharakteristika und präoperative Risikoprofile

Das untersuchte Patient*innenkollektiv umfasste 73 Personen mit intraoperativ diagnostizierter Porzellanaorta, die im Durchschnitt 74 Jahre alt waren. Ein signifikanter Altersunterschied zwischen der OK-Gruppe ($74,62 \pm 6,37$ Jahre) und der MK-Gruppe ($73,06 \pm 6,46$ Jahre) bestand nicht ($p=0,63$), was auf eine demografisch homogene Verteilung hindeutet.

Die altersabhängige Zunahme der Aortenkalzifikation ist pathophysiologisch gut belegt. Eliot et al. dokumentierten eine Kalziumakkumulation von $1,4 \mu\text{g Ca/mg}$ Gewebe bei 20-Jährigen gegenüber $49,5 \mu\text{g Ca/mg}$ bei 90-Jährigen.⁸⁸ Auch Phosphor- und Magnesiumgehalte steigen mit dem Alter, während der Schwefelgehalt abnimmt – ein Hinweis auf strukturelle Umbauprozesse, die die Kalzifikation fördern.⁸⁹ Vor diesem Hintergrund erscheint die Anwendung kalkspezifischer Scores wie des Agatston-Score auch außerhalb der Koronardiagnostik ein vielversprechender Ansatz zur objektiveren Aortenrisikostratifizierung. Ergänzend könnten altersassoziierte kognitive Einschränkungen – unabhängig von manifesten Apoplexen – durch präoperative neurokognitive Baseline-Untersuchungen systematisch erfasst und in die OP-Planung einbezogen werden.

Das Geschlechterverhältnis war deutlich männlich dominiert (87,7 % in der Gesamtkohorte), mit einem höheren Männeranteil in der MK-Gruppe (94,4 %) im Vergleich zur OK-Gruppe (85,5 %). Zwar war dieser Unterschied statistisch nicht signifikant ($p=0,29$), könnte jedoch auf eine geschlechtsassoziierte Entscheidungsfindung zugunsten der Aortenklammung hinweisen. Mögliche Ursachen könnten anatomische Unterschiede oder ein insgesamt niedrigeres operatives Risiko bei Männern sein, wie es Studien zur erhöhten Morbidität und Mortalität bei Frauen nach koronarer Bypassoperation beschreiben.^{90,91} Ob Männer auch eine höhere Prävalenz für die Entwicklung einer Porzellanaorta aufweisen, bleibt ungeklärt, da belastbare epidemiologische Daten hierzu bislang fehlen.⁹²

Der durchschnittliche Body-Mass-Index (BMI) betrug in der Gesamtkohorte $26,75 \pm 3,96 \text{ kg/m}^2$. Auch wenn kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen bestand ($p=0,13$), stellt Adipositas einen etablierten Risikofaktor für koronare Herzerkrankung, arterielle Kalzifikation und möglicherweise auch für die Entstehung der Porzellanaorta dar.⁹³ Eine systematische Untersuchung dieser Korrelation in größeren Kohorten steht bislang aus.

Der präoperative EuroScore II lag bei durchschnittlich $6,47 \pm 2,89$ % und unterschied sich ebenfalls nicht signifikant zwischen den Gruppen ($p=0,65$). Dies spricht für eine vergleichbare Risikostruktur im Hinblick auf die frühzeitige, operationassoziierte Mortalität.⁹⁴ Da der EuroScore II primär auf die 30-Tages-Mortalität abzielt, bleiben potenzielle Unterschiede in Bezug auf funktionelle Outcomes oder Langzeitprognosen unberücksichtigt.

Bei allen Patient*innen lag eine koronare Herzerkrankung als Operationsindikation vor. Die hohe Prävalenz der Dreigeßerkrankung unterstreicht den systemischen Charakter der Atherosklerose, die auch in der Pathogenese der Porzellanaorta eine Rolle spielt. Die mittlere Ejektionsfraktion betrug $37,96 \pm 15,3$ % mit einem Trend zu besseren Werten in der OK-Gruppe (38,62 %) im Vergleich zur MK-Gruppe (33,33 %, $p=0,34$). Dieser Unterschied, obwohl nicht signifikant, könnte darauf hinweisen, dass eine stabilere linksventrikuläre Funktion eher die Wahl eines Verfahrens ohne Aortenklammung ermöglicht.

Diabetes mellitus Typ II war bei 31,5 % der Patient*innen dokumentiert, mit höherer, wenngleich nicht signifikanter Prävalenz in der MK-Gruppe (44,4 % vs. 27,3 %, $p=0,14$). Diabetes mellitus ist für seine pro-atherosklerotische und pro-kalzifizierende Wirkung auf das Gefäßsystem bekannt.⁹⁵

Eine Hyperlipoproteinämie (69,9 %) und arterielle Hypertonie (89 %) waren in der Gesamtpopulation häufig vertreten. Insbesondere die arterielle Hypertonie gilt als zentraler Risikofaktor für endotheliale Dysfunktion, inflammatorische Gefäßveränderungen und nachfolgende Verkalkung der Aorta.³

Vorhofflimmern trat bei 32,9 % der Patient*innen auf, wobei die Prävalenz in der OK-Gruppe höher lag (39,7 % vs. 27,8 %, $p=0,77$). Als potenzielle Quelle zerebraler Mikroembolien kann Vorhofflimmern insbesondere bei bestehender Porzellanaorta ein zusätzliches neurologisches Risiko darstellen.⁹⁶

Ein dokumentierter Nikotinabusus lag bei 30,1 % der Patient*innen vor, mit einer leicht erhöhten Rate in der MK-Gruppe – ohne signifikanten Unterschied. Die Rolle des Rauchens als Risikofaktor für atherosklerotische Gefäßveränderungen und Kalzifikationen ist gut belegt.⁹⁷

Weitere relevante Komorbiditäten wie eine Stenose der Arteria carotis interna oder eine pAVK waren in beiden Gruppen gleichmäßig verteilt. Diese Erkrankungen reflektieren das Ausmaß

systemischer Atherosklerose, die auch die Entwicklung einer Porzellanaorta begünstigen kann.

Eine präoperativ bekannte Porzellanaorta lag lediglich bei 20,5 % der Patient*innen vor. Dieser geringe Anteil dürfte auf die bisher eingeschränkte Verfügbarkeit sensitiver Bildgebungsverfahren wie CT und die zurückhaltende Indikationsstellung zurückzuführen sein. Mit einer konsequenteren Integration präoperativer Bildgebung und interdisziplinärer Heart-Team-Besprechungen könnte die Detektionsrate künftig erhöht und damit perioperative Risiken besser antizipiert werden.^{28,54}

Die chronische Niereninsuffizienz war bei über einem Drittel der Patient*innen dokumentiert. Die Assoziation zwischen eingeschränkter Nierenfunktion, sekundärem Hyperparathyreoidismus und vaskulärer Kalzifikation ist bekannt und könnte eine Rolle in der Pathogenese der Porzellanaorta spielen.⁹⁸

Präoperative neurologische Vorerkrankungen waren selten. Dennoch könnten frühere Schlaganfälle oder kognitive Defizite die Entscheidung für ein Operationsverfahren ohne Aortenklammung begünstigt haben. Eine standardisierte präoperative neurologische Risikostratifizierung erscheint daher sinnvoll.

Insgesamt bestätigt die Analyse eine weitgehend homogene Verteilung relevanter Risikofaktoren zwischen den Gruppen. Die hohe atherosklerotische Belastung des Gesamtkollektivs unterstreicht die komplexe, multifaktorielle Genese der Porzellanaorta. Perspektivisch sollten prospektive Studien prüfen, ob gezielte medikamentöse Interventionen die Progression der Aortenkalzifikation verlangsamen können und inwieweit präoperative Bildgebung, insbesondere mittels CT, die individuelle Risikoabschätzung verbessern kann.

Zusätzlich zur klassischen kardiovaskulären Risikostratifizierung könnten in Zukunft auch funktionelle Parameter, insbesondere der Gebrechlichkeitsstatus, eine relevante Rolle bei der präoperativen Einschätzung von Patientinnen mit Porzellanaorta spielen. Gerade im höheren Lebensalter hat sich die Gebrechlichkeit als unabhängiger Prädiktor für postoperative Komplikationen, Prolongation des Intensivaufenthalts sowie für die Gesamtmortalität nach kardiochirurgischen Eingriffen erwiesen.⁹⁹ Die Einbindung validierter Tests zum Einschätzen der Gebrechlichkeit könnte helfen, vulnerable Patientinnen mit erhöhtem Risiko frühzeitig zu identifizieren, das perioperative Management zu optimieren und die Indikationsstellung zur Aortenmanipulation präziser zu gestalten.¹⁰⁰ Insbesondere bei komplexen atherosklerotischen Veränderungen wie der Porzellanaorta erscheint eine multidimensionale Einschätzung von

hoher Relevanz, da bereits geringe hämodynamische oder neurologische Instabilitäten zu gravierenden Komplikationen führen können.

Darüber hinaus rücken präventive medikamentöse Strategien zunehmend in den Fokus der atherosklerosemodulierenden Therapie. Verschiedene Substanzen – darunter Statine, die neben ihrer lipidsenkenden Wirkung auch entzündungshemmende und plaque-stabilisierende Effekte besitzen, können vaskuläre Kalzifikationsprozesse verlangsamen. Zusätzliche Statinvorteile bei CABG-Patient*innen wie Prävention eines postoperativen Vorhofflimmerns und reduzierte Krankenhausverweildauer konnten in einer Metaanalyse von 20 randomisierten Studien gezeigt werden.¹⁰¹ Ebenso weisen SGLT2-Inhibitoren, die ursprünglich zur Diabetestherapie entwickelt wurden, in jüngeren Studien eine potenzielle Reduktion vaskulärer Endothelin- und Kalzifikationsmarker auf.¹⁰² Ob durch eine konsequente Sekundärprävention tatsächlich das Fortschreiten einer Porzellanaorta gebremst – oder gar ihre chirurgische Relevanz reduziert – werden kann, sollte im Rahmen prospektiver, kontrollierter Studien weiter untersucht werden.

4.2. Präoperative Bildgebung und diagnostische Standardisierung bei Porzellanaorta

Eine präzise präoperative Diagnostik ist essenziell für die sichere Planung der operativen Strategie bei Patient*innen mit Porzellanaorta, insbesondere wenn die Diagnose nicht bereits vor dem Eingriff bekannt ist. In der vorliegenden Studie wurden zwischen MK- und OK-Gruppe keine signifikanten Unterschiede in der präoperativen Bildgebung festgestellt. Aufgrund der geringen Fallzahl kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass dies klinisch trügerisch ist. Die Detektion aortaler Verkalkungen durch geeignete Bildgebungsverfahren ist für die Wahl der Technik (z. B. totale Aortenklammung vs. aortenschonendes Vorgehen) entscheidend.

Die Assoziation zwischen pAVK und Porzellanaorta war statistisch nicht signifikant, dennoch spricht die Pathophysiologie für eine klinische Korrelation. Da Patientinnen mit pAVK häufig eine generalisierte Atherosklerose aufweisen, ist eine Beteiligung der Aorta ascendens wahrscheinlich. Eine strukturierte präoperative Ausschlussdiagnostik einer Porzellanaorta bei dieser Patient*innengruppe wäre daher sinnvoll.

Auffällig war die höhere Frequenz präoperativer Röntgen-Thorax-Untersuchungen in der OK-Gruppe. Dies könnte Ausdruck einer selektiven, klinisch getriggerten Indikationsstellung sein. Auch wenn die Befundung einer Aortensklerose im Röntgenbild in dieser Studie signifikant

häufiger in der OK-Gruppe dokumentiert wurden ($p = 0,001$), ist die diagnostische Sensitivität des Röntgen-Thorax für das Erkennen einer Porzellanaorta insgesamt begrenzt.¹⁰³ Zudem lagen in beiden Gruppen fehlende Dokumentationen vor, was zu einem potenziellen Bias führt. Eine CT-Untersuchung des Thorax – als Goldstandard zur quantitativen und qualitativen Beurteilung von Gefäßkalzifikationen – wurde präoperativ nur in 11 % der Fälle durchgeführt. Diese selektive Durchführung bei auffälligen Risikokonstellationen deutet auf das Fehlen eines standardisierten, risikobasierten Algorithmus hin. Mit der Weiterentwicklung bildgebender Verfahren und reduzierter Strahlenexposition ist die CT-Diagnostik bei Risikopatient*innen inzwischen ein unerlässlicher Bestandteil der Operationsplanung.^{51,104}

An der Klinik für Herz-Thorax-Chirurgie des Universitätsklinikums Köln sowie der CardioClinic Köln wurde zum 01.01.2024 ein interdisziplinäres Standardprotokoll etabliert, das eine präoperative CT-Diagnostik bei Patient*innen ≥ 70 Jahren oder bei Risikokonstellationen (pAVK, Karotisstenose, Reoperation, mediastinale Bestrahlung, Apoplex in der Anamnese) vorsieht. Ergänzend erfolgt eine farbkodierte Duplexsonographie der supraaortalen Gefäße zur Detektion und prozentueller NASCET-Klassifizierung asymptomatischer Stenosen.

Zukünftig erscheint die Etablierung eines standardisierten Aortenalk-Scores, analog zum Agatston-Score für koronare Verkalkungen, vielversprechend. Ein solcher Score könnte neben der Kalklast auch Muster (ringförmig, fokal, diffus) und lokale Gefäßveränderungen (z. B. Wandthromben, Ulzerationen) systematisch quantifizieren und zur präoperativen Risikoabschätzung beitragen.^{28,105}

Darüber hinaus sollte die Bildgebung durch funktionelle Parameter ergänzt werden: Gebrechlichkeits-Scores, kognitive Tests und geriatrische Evaluationen könnten besonders bei älteren Patient*innen mit Porzellanaorta helfen, die Indikationsstellung zu individualisieren. Gerade die Kombination aus hochgradiger Verkalkung, kognitiver Einschränkung und funktioneller Gebrechlichkeit erhöht das Risiko für intra- und postoperative Komplikationen deutlich.

Die Analyse zeigt, dass in der untersuchten Kohorte lediglich 11 % der Patient*innen eine CT erhielten – trotz der anerkannten Bedeutung dieser Bildgebung. Nur bei einem Bruchteil der Patient*innen mit Porzellanaorta wurde die CT eingesetzt – obwohl dieses Verfahren die zuverlässigsten Informationen über Verkalkungsausmaß und Aortenintegrität liefert. Die signifikant häufigere Nutzung von CT und Röntgen-Thorax in der OK-Gruppe lässt auf eine verzerrte, indikationsabhängige Zuweisung schließen, was das Risiko einer Unterdiagnostik in anderen Fällen birgt.

Zur Vermeidung intraoperativer Überraschungsbefunde und zur Verbesserung der Patient*innensicherheit sollte in zukünftigen Kohorten eine verpflichtende, strukturierte CT-Bildgebung bei allen Hochrisikopatientinnen erwogen werden.^{76,104} Ergänzend könnten prospektive Studien die diagnostische Treffsicherheit, prognostische Validität und Kosteneffektivität der CT im Vergleich zum Röntgen-Thorax und zur Echokardiographie bei Patient*innen mit Verdacht auf Porzellanaorta untersuchen.

4.3. Klinische Implikationen intraoperativer Strategien

Die operative Behandlung von Patient*innen mit Porzellanaorta erfordert eine hochindividuelle Entscheidungsfindung, insbesondere im Hinblick auf die Wahl der intraoperativen Technik. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen signifikante Unterschiede zwischen der MK- und OK-Gruppe, die sich weniger aus der Aortenpathologie selbst als vielmehr aus klinischen Rahmenbedingungen, institutionellen Strukturen und der präoperativen Diagnostik ableiten lassen.

Die MK-Gruppe wies signifikant häufiger dringliche oder notfallmäßige Eingriffe auf – eine Beobachtung, die nicht zwingend auf die Aortenverkalkung, sondern auf eine höhere klinische Instabilität oder frühere OP-Protokolle an der Uniklinik Köln und der CardioClinic Köln zurückzuführen sein könnte, wo bis 2024 elektive CABG-Eingriffe standardisiert unter Einsatz der HLM durchgeführt wurden.¹⁰⁶

Ein zentrales Ergebnis war die höhere Anzahl an Anastomosen in der MK-Gruppe, was auf eine Tendenz zu komplexeren Revaskularisationsstrategien bei Einsatz der HLM hinweist. Diese Strategie ermöglicht durch extrakorporale Zirkulation ein kontrolliertes OP-Feld, während in der OK-Gruppe mit schlagendem Herzen primär bei günstiger Anatomie oder begrenztem Myokardversorgungsbedarf interveniert wurde. Der signifikant häufigere Einsatz zentraler Anastomosen in der MK-Gruppe bestätigt dies, da eine sichere Aortenmanipulation Voraussetzung für diese Technik ist.

Ein auffälliger Befund war die geringere Rate vollständiger Revaskularisation in der OK-Gruppe. Während dies technisch erklärbar ist, sollte die klinische Relevanz differenziert betrachtet werden. Studien wie SYNTAX oder FAME II zeigen, dass eine unvollständige Revaskularisation mit einer erhöhten kardiovaskulären Ereignisrate assoziiert ist.^{69,107} In Hochrisikokollektiven wie PA-Patient*innen kann jedoch ein sicherheitsorientiertes Vorgehen, das Komplikationen minimiert, im Sinne eines individualisierten „Heart-Team“-Konzepts durchaus gerechtfertigt sein.

Ein zentrales Problem besteht in der unzureichenden präoperativen Detektion einer Porzellanaorta, die intraoperativ zur Änderung der Strategie zwingt. In dieser Kohorte wurden häufiger intraoperative Technikwechsel in der OK-Gruppe dokumentiert, insbesondere von HLM-CABG zu OPCAB oder Beating Heart, was dementsprechend eine flexible Entscheidungsfindung und chirurgische Erfahrung voraussetzt. Dieser Befund zeigt exemplarisch: nicht die Technikwahl selbst bestimmt den Operationserfolg, sondern die präzise Bildgebung und ein adaptives, situationsabhängiges Vorgehen.

Die Diskussion um embolische Komplikationen ist zentral: Studien wie die Metaanalyse von Misfeld et al. zeigen, dass „no-touch“-Techniken die Inzidenz postoperativer Schlaganfälle signifikant senken.⁸⁷ Bei Porzellanaorta ist daher jede Aortenmanipulation kritisch zu hinterfragen. Die präoperative CT-Aortographie bietet hier einen entscheidenden Vorteil: Ihre selektive Nutzung birgt jedoch das Risiko, pathologische Verkalkungen zu übersehen – insbesondere dann, wenn intraoperativ eine Aortenklammung plötzlich kontraindiziert ist. Auch die Wahl der Kanülierung bei nicht klemmbarer Aorta stellt eine Herausforderung dar. Femoral oder axillär kann kanüliert werden – wobei retrograde Embolien bei femoralem Zugang und technischer Mehraufwand bei axillärer Kanülierung gegeneinander abzuwägen sind.⁴¹ Eine frühzeitige interdisziplinäre Planung (Herzchirurgie, Anästhesie, Kardiologie) ist hier essenziell.

Die Operationszeiten unterschieden sich nicht signifikant – was für standardisierte Abläufe und chirurgische Expertise spricht. Ebenso gab es keine Unterschiede bei der Graftwahl: Die LIMA wurde in über 90 % der Fälle genutzt, RIMA und T-Grafts selektiv, unabhängig von der Technikwahl – was für eine konstant hohe Versorgungsqualität spricht.

Eine der zentralen Limitationen dieser Studie betrifft die fehlende Differenzierung zwischen Aortenverkalkungsmustern: ob eine manifeste Porzellanaorta mit zirkulärer Kalzifikation oder lediglich eine fokale Verkalkung, die als PA bezeichnet wurde, vorlag, wurde nicht systematisch dokumentiert.²⁸ Diese Unschärfe erschwert valide Korrelationen zwischen Morphologie, Technikwahl und Komplikationsrisiko. Eine standardisierte intraoperative Beschreibung der Aortenbeschaffenheit – idealerweise in Kombination mit präoperativer CT – sollte in zukünftigen Protokollen verpflichtend etabliert werden.

Auch die geringe Rate an Hybridstrategien wirft Fragen auf. Die Kombination aus chirurgischer und interventioneller Revaskularisation wäre gerade bei Porzellanaorta eine Option, um vollständige Revaskularisation zu erreichen und gleichzeitig das Risiko massiver Aortenmanipulation zu umgehen. Zukünftig könnte die Integration von Hybridverfahren in die

präoperative Strategieplanung – unterstützt durch bildgebende Befunde und Herzteam-Entscheidung – eine patient*innenzentrierte Optimierung darstellen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass erfolgreiche Revaskularisationen bei Patient*innen mit Porzellanaorta sowohl mit als auch ohne Aortenklamme möglich sind – vorausgesetzt, das operative Vorgehen wird individuell geplant, präoperativ strukturiert vorbereitet und intraoperativ flexibel angepasst. Die Technikwahl sollte sich dabei nicht an starren Schemata, sondern an der Aortenmorphologie, klinischer Stabilität und der interdisziplinären Gesamtbeurteilung orientieren. Eine konsequente Standardisierung der präoperativen Diagnostik, inklusive CT-Bildgebung und funktioneller Risikoparameter, ist essenziell, um Sicherheit, Effektivität und Langzeitergebnisse gleichermaßen zu optimieren.

4.4. Perioperative neurologische Komplikationen: Rolle der Aortenmanipulation und Diagnostik

Das Risiko zerebrovaskulärer Komplikationen stellt bei Patient*innen mit Porzellanaorta eine der gravierendsten perioperativen Herausforderungen dar. Bereits 1994 wurde die ausgedehnte Verkalkung der Aorta ascendens als unabhängiger Risikofaktor für postoperative Schlaganfälle identifiziert.¹⁰⁵ Nachfolgende Studien bestätigen die enge Korrelation zwischen Aortensklerose und zerebralen Ischämien, insbesondere im Rahmen kardiopulmonaler Bypassverfahren.¹⁰⁸

In der vorliegenden Kohorte traten manifeste Schlaganfälle nur vereinzelt auf. Dennoch darf das Risiko nicht unterschätzt werden, da subklinische Ereignisse – sog. „stumme Schlaganfälle“ – ohne gezielte bildgebende Diagnostik unerkant bleiben können.¹⁰⁹ Besonders gefährdet sind Patient*innen mit einer Stenose der Arteria carotis interna, persistierendem Vorhofflimmern oder generalisierter Atherosklerose. Mikroembolisationen, etwa durch minimale Aortenmanipulation, erhöhen das Risiko zusätzlich.

Eine systematische präoperative neurologische Risikoerfassung wurde in dieser Studie nicht standardisiert durchgeführt. Gerade bei Hochrisikokonstellationen – bekannte Karotisstenose, Vorhofflimmern oder Apoplex in der Anamnese – hätte eine gezielte präoperative Bildgebung (cCT oder cMRT) sowie Duplexsonographie der supraaortalen Gefäße zur Risikostratifizierung beitragen können.^{54,76} Die Etablierung neurokognitiver Baseline-Messungen – z. B. mittels einen Mini Mental Status Test – erscheint sinnvoll, um postoperative Veränderungen valide zu identifizieren.

Trotz adäquater Vorbereitung lässt sich die Aortenmanipulation intraoperativ nicht immer vermeiden – etwa bei zentralen Anastomosen oder Kanülierungen. Selbst minimale Plaqueverschiebungen bergen das Risiko zerebraler Mikroinfarkte. Die konsequente Vermeidung direkter Aortenmanipulation ist insbesondere bei PA-Patient*innen indiziert. Intraoperative Schutzstrategien wie Near-Infrared-Spectroscopy (NIRS), Emboliefilter in der HLM oder temporäre Karotiskompression bei Aortenmanipulation sind prinzipiell verfügbar, wurden jedoch in dieser Kohorte nicht standardisiert eingesetzt.¹¹⁰ Dies stellt einen möglichen Ansatzpunkt für zukünftige Qualitätsverbesserungen dar. Unklar bleibt bislang, inwieweit solche Maßnahmen flächendeckend implementiert und evidenzbasiert evaluiert werden.

Von besonderer klinischer Relevanz ist die Feststellung, dass die Porzellanaorta in nur rund einem Fünftel der Fälle präoperativ bekannt war. Die intraoperative Entdeckung kann zu gravierenden Umplanungen führen – bis hin zu Technikwechseln (z. B. HLM-CABG zu OPCAB) oder sogar Abbruch des Eingriffs. Dies unterstreicht erneut die Bedeutung einer frühzeitigen CT-basierten Diagnostik.

Die Etablierung strukturierter Screening-Protokolle ist daher dringend erforderlich. Diese sollten neben einer standardisierten Thorax-CT auch die Duplexsonographie der Karotiden, die neurologische Anamnese (TIA, Apoplex) sowie ein kognitives Screening umfassen. Perspektivisch könnte ein multimodales Präventionskonzept helfen, neurologische Komplikationen bei PA-Patient*innen gezielt zu reduzieren.

Zusammenfassend zeigt sich, dass neurologische Ereignisse bei Porzellanaorta das Ergebnis eines komplexen Risikoprofils sind – beeinflusst durch präoperative Diagnostik, intraoperative Technik und postoperative Überwachung. Die konsequente Anwendung aortenschonender Verfahren, ergänzt durch individualisierte diagnostische Algorithmen, könnte in Zukunft helfen, die cerebrale Sicherheit bei diesen Hochrisikopatient*innen substanziell zu verbessern.

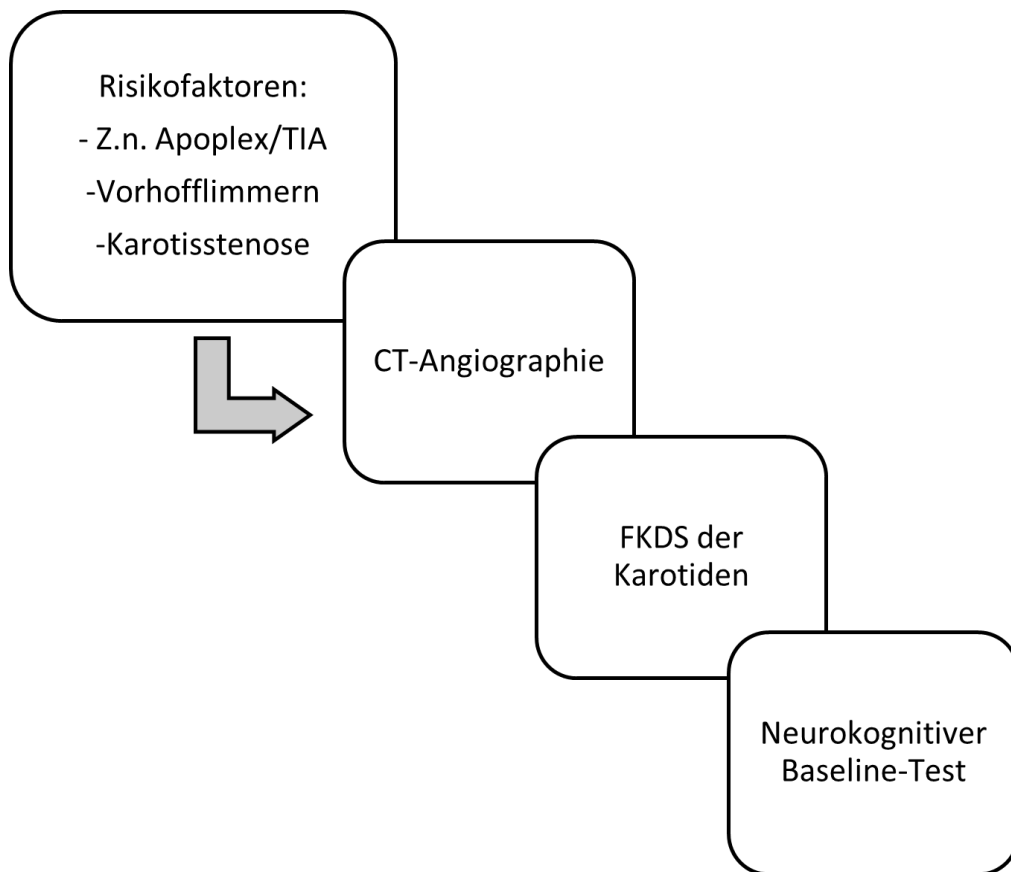


Abbildung 24. Diagnostisches Screening für Patient*innen mit V.a. Porzellanaorta

4.5. Postoperative Komplikationen: Risiken und Vulnerabilität

Im Vergleich der postoperativen Komplikationen zwischen MK- und OK-Gruppe zeigten sich bei den meisten Parametern keine signifikanten Unterschiede. Myokardinfarkte, kardiopulmonale Reanimation (CPR) im stationären Verlauf, ECMO-Einsatz, sternale oder periphere Wundheilungsstörungen, Transfusionsbedarf und längere Beatmungsdauer inkl. PDT traten in beiden Gruppen in vergleichbarer Häufigkeit auf. Dies spricht für eine adäquate intraoperative Schutzstrategie – unabhängig vom Einsatz einer Aortenklamme. Auch der Einsatz einer intraaortalen Ballonpumpe (IABP) war in der MK-Gruppe nur tendenziell höher, aber nicht signifikant. Trotz theoretischer Überlegungen, dass die Aortenklammung eine höhere ischämische Belastung mit sich bringt, bestätigte sich dies in dieser Kohorte nicht.

Das Auftreten eines postoperativen akuten Nierenversagens (ANV) zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen. Die postoperativen Kreatininwerte verliefen funktionell stabil. Dies widerspricht der Hypothese, dass die Aortenklammung eine renale Hypoperfusion verursachen könnte, dies könnte möglicherweise ein Ausdruck sorgfältiger Volumen- und Perfusionsstrategien im OP-Management sein.

Auffällig war der signifikant häufigere Einsatz postoperativer Antibiotikatherapie in der OK-Gruppe. Parallel fanden sich erhöhte CRP-Werte, während die Leukozytenzahlen vergleichbar blieben. Obwohl systemische Inflammationsreaktionen typischerweise unter HLM auftreten, betraf diese Konstellation hier gerade die aortenklappenfreie Gruppe. Dies könnte auf eine vorbestehende inflammatorische Aktivierung oder auf Plaque-assoziierte Prozesse im Rahmen der Operation hindeuten – auch ohne HLM-Einsatz.² Es ist denkbar, dass die entzündliche Reaktion durch manipulierte kalzifizierte Gefäße, schwere Atherosklerose, oder durch präoperative Komorbiditäten getriggert wurde. Der prophylaktische Einsatz von Antibiotika könnte dabei auch entzündungsmodulierende Effekte entfaltet und Folgekomplikationen reduziert haben: eine Hypothese, die in zukünftigen Studien genauer validiert werden sollte.

Signifikant war der Unterschied in der postoperativen Aufenthaltsdauer auf der Intensivstation. Patient*innen der OK-Gruppe verblieben länger intensivpflichtig. Dies könnte ein indirekter Hinweis auf eine höhere gebrechliche Konstitution („Frailty“) und reduzierte physiologische Reserve sein. Die Porzellanaorta gilt als Marker generalisierter Atherosklerose und könnte mit systemischen Alterungsvorgängen, kognitiven Defiziten oder Malnutrition assoziiert sein. Wie bereits durch eine Metaanalyse von Lee et al. bestätigt, kann eine strukturierte präoperative Gebrechlichkeitsevaluation wertvolle Informationen liefern.¹⁰⁰ Trotz der längeren Intensivverweildauer war die Gesamtdauer des Krankenhausaufenthalts in der OK-Gruppe tendenziell kürzer. Diese Beobachtung lässt vermuten, dass die Operation ohne Aortenklammer möglicherweise eine raschere Rekonvaleszenz im Gesamtkontext begünstigt – sei es durch geringere neurologische Belastung, hämodynamische Stabilität oder reduzierten postoperativen Stress.

Die 30-Tages-Mortalität unterschied sich zwischen MK- und OK-Gruppe nicht signifikant. Dies unterstreicht, dass sich kurzfristige Überlebensvorteile nicht allein aus der Technik ableiten lassen. Vielmehr beeinflussen präoperative Komorbiditäten, intraoperative Ereignisse und postoperative Resilienz das Ergebnis maßgeblich. Langfristig entscheidender als die Mortalität sind funktionelle Endpunkte: Lebensqualität, Mobilität und Selbstständigkeit. In der klinischen Routine finden sich dazu oft keine standardisierten Erhebungen. Instrumente, die Alltagsfunktionen wie der klinikimplementierte Barthel-Index bewerten, könnten helfen, postoperativ relevante Funktionseinschränkungen abzubilden.¹¹¹

Zerebrale Komplikationen wie Schlaganfälle sind nur die Spitze des Eisbergs. Studien belegen, dass bis zu 25 % älterer kardialer Patient*innen „stumme Schlaganfälle“ aufweisen –

subklinische Infarkte, die ohne Bildgebung unentdeckt bleiben.¹¹² Auch in dieser Kohorte könnte eine relevante Zahl solcher Ereignisse vorgelegen haben.

Kombinierte Risikofaktoren wie Vorhofflimmern, chronische Niereninsuffizienz und bekannte Atherosklerose führen zu einer doppelten Embolierisiko-Konstellation – kardial und aortal bedingt. Das Fehlen einer systematischen präoperativen neurologischen Bildgebung (z. B. cCT, Duplex-Sonographie) stellt eine diagnostische Lücke dar.⁵⁴ Diese könnte durch konsequente Integration von Mini Mental Test, Delir-Screenings und bildgebender Diagnostik geschlossen werden.

Auch entzündliche Marker wie CRP oder Leukozyten präoperativ können Hinweise auf instabile Plaques oder subklinische Infektionen geben, die das Embolierisiko potenzieren.¹¹³ Die Beobachtungen in dieser Arbeit stützen diese Hypothese.

Die Technik ohne Klemmen der Aorta erweist sich als sichere Alternative zur MK, ohne signifikante Nachteile bei den klassischen postoperativen Komplikationen. Einzelne Unterschiede – wie längere Intensivaufenthalt oder höhere Entzündungswerte – deuten auf eine höhere Vulnerabilität in der OK-Gruppe hin, was jedoch nicht mit erhöhter Mortalität einherging.

Zukünftig sollten in der operativen Entscheidungsfindung nicht nur technische Aspekte (MK vs. OK), sondern insbesondere funktionelle, inflammatorische und neurologische Risikokonstellationen systematisch berücksichtigt werden. Eine präoperative Standarddiagnostik, die neben CT auch neurokognitive Baselines, CRP, Nierenparameter und Frailty-Scores umfasst, könnte dazu beitragen, stille Komplikationen frühzeitig zu identifizieren und zu verhindern.

4.6. Subgruppenanalyse: Operationsstrategien ohne Klemmen der Aorta: Differenzierung und Nutzen

Zur genaueren Analyse intraoperativer Strategien wurde innerhalb der OK-Gruppe (n = 55) eine differenzierte Subgruppenanalyse durchgeführt. Obwohl alle Patient*innen ohne vollständige Aortenklammung operiert wurden, variierten die Verfahren hinsichtlich der Art der proximalen Aortenmanipulation: Neben der völligen Vermeidung kamen auch partielle Ausklemmen sowie Hilfsgeräte wie HeartString oder Enclose zum Einsatz. Diese Unterschiede sind für die Beurteilung klinischer Sicherheit und operativer Anpassungspotenziale relevant.

Die demografischen Daten (Alter, Geschlecht, BMI) und kardiale Risikoprofile (EUROScore II, Ausmaß der KHK, Ejektionsfraktion, Begleiterkrankungen) waren zwischen den Subgruppen weitgehend homogen. Eine leicht erhöhte Prävalenz von Diabetes mellitus Typ II in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen war nicht signifikant, könnte jedoch einen selektiven Einsatz dieser Technik bei metabolisch vulnerablen Patient*innen widerspiegeln.

Bemerkenswert war die 100 %ige Rate von Vorhofflimmern in der Enclose-Gruppe – angesichts der kleinen Fallzahl statistisch nicht belastbar, aber möglicherweise ein Hinweis auf die gezielte Wahl dieser Methode bei embolisch vorbelasteten Patient*innen. Auch andere vaskuläre Komorbiditäten (Nikotinabusus, pAVK, Hyperlipidämie) variierten leicht, hatten jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Technikselektion.

Die präoperative Bildgebung war uneinheitlich: Ein Röntgen-Thorax wurde bei etwa der Hälfte der Patient*innen durchgeführt, eine CT-Untersuchung bei lediglich 12 %. Nur 21,8 % der Porzellanaorten wurden präoperativ erkannt. In der HeartString-Gruppe lag dieser Anteil etwas höher – möglicherweise Ausdruck einer gezielten Device-Wahl bei vorbekannter Aortopathie. In der Enclose-Gruppe fehlten dokumentierte PA-Diagnosen vollständig. Diese Daten spiegeln die fehlende Standardisierung und strukturelle Bildgebungsdefizite wider, wie sie im Kapitel 5.2 bereits ausführlich diskutiert wurden.

Besonders in der Gruppe mit partiellem Ausklemmen kam es signifikant häufiger zu einem Switch von geplanter HLM-CABG zu OPCAB ($p = 0,03$). Dies zeigt die hohe Bedeutung intraoperativer Flexibilität, insbesondere wenn sich die Aortenbeschaffenheit erst im OP als ungeeignet für Klemmen/Kanülierung erweist. Die Verwendung von Heart String oder Enclose erlaubte hingegen eine stabile Durchführung der geplanten Technik. Beide Hilfsmittel ermöglichen eine sichere Anastomose ohne vollflächige Aortenmanipulation. Ihr Einsatz könnte insbesondere bei unklarer Aortenmorphologie eine sichere Zwischenlösung darstellen, um operative Risiken zu minimieren.

Die Wahl des Verfahrens wurde nicht primär durch präoperative Risikofaktoren, sondern vor allem durch intraoperative Befunde (Visualisierung, Palpation, Kanülierbarkeit) bestimmt. Das bestätigt die Bedeutung situativer Anpassungsfähigkeit im OP bei komplexen Aortaverhältnissen.

Trotz fehlender signifikanter Unterschiede in der Morbidität zwischen den Subgruppen legen die Daten nahe, dass technische Hilfen wie HeartString oder Enclose zur Stabilität und

Sicherheit beitragen können – insbesondere bei fragiler, punktuell verkalkter Aorta ascendens, bei der eine vollständige Aortenklammung nicht möglich oder zu riskant erscheint.

Die Ergebnisse sprechen dafür, dass Device-basierte Verfahren eine sichere und effektive Alternative zur Aortenklamme darstellen können – vorausgesetzt, eine präzise Beurteilung der Aorta sowie Schulungsexpertise zum Umgang mit dem Device liegen vor. Um die optimale Technik präoperativ zu antizipieren, erscheint die Standardisierung der CT-basierten Aortenbildgebung unabdingbar. Der Einsatz dieser Devices könnte auch systematisch in High-Risk-Kollektiven geprüft und prospektiv mit klassischen Techniken verglichen werden. Die Wahl der optimalen OP-Technik bei Porzellanaorta erfordert mehr als nur technische Fertigkeit – sie verlangt präoperative Voraussicht, intraoperative Flexibilität und eine gezielte Device-Strategie bei anatomisch riskanter Aorta. Zukünftige Studien sollten adressieren, ob eine Device-basierte Anastomosentechnik mit niedrigeren neurologischen oder vaskulären Komplikationen assoziiert ist. Ebenfalls interessant sind die funktionelle Langzeitoutcomes (z. B. Delir, Lebensqualität, kognitive Erholung) bei den einzelnen Strategien. Ein anderes Thema für zukünftigen Studien ist die Kombination aus präoperativer Bildgebung und intraoperativem Assessment, die die höchste Entscheidungssicherheit bietet.

4.7. Limitationen und Rückschlüsse für zukünftige Diagnostik und Therapie

Der strukturelle Umbau in Diagnostik und Operationsplanung bei Patient*innen mit Porzellanaorta erfordert ein präzises Zusammenspiel aus bildgebender Exaktheit, funktioneller Risikostratifizierung und patientenzentrierten Outcomes. Die vorliegende Arbeit zeigt dabei sowohl die praktischen Herausforderungen als auch das klinische Potenzial individualisierter Strategien – insbesondere im Hinblick auf die Wahl und Vermeidung der aortalen Manipulation. Gleichzeitig unterliegt diese retrospektive Analyse methodischen Limitationen, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen.

4.7.1. Methodische Limitationen

Die Aussagekraft dieser Arbeit wird durch mehrere methodischen Faktoren eingeschränkt. Erstens ist die Fallzahl von $n = 73$ zu gering, um seltene, aber klinisch bedeutsame Ereignisse wie Schlaganfall, Myokardinfarkt oder ECMO-Therapie differenziert analysieren zu können. Zweitens handelt es sich um ein retrospektives Studiendesign, das keine kausalen Schlussfolgerungen zulässt. Die Zuweisung der Operationsmethode erfolgte nicht randomisiert, sondern war abhängig von operativer Erfahrung, anatomischen Gegebenheiten und dem klinischen Zustand der Patient*innen – eine potenzielle Quelle für Selektionsbias.

Ein weiterer kritischer Punkt betrifft die fehlende Standardisierung der präoperativen Diagnostik: Nur 11 % der Patient*innen erhielten eine CT-Untersuchung des Thorax, obwohl diese als Goldstandard zur Beurteilung der Aortenkalzifikation gilt. Stattdessen basierte die Risikoabschätzung häufig auf konventionellen Röntgen-Thorax-Aufnahmen oder intraoperativer Palpation, die das Ausmaß der Verkalkung unter Umständen unterschätzten. Darüber hinaus wurden neurokognitive Einschränkungen weder systematisch noch standardisiert erfasst. Weder bildgebende Verfahren wie cCT oder MRT noch strukturierte Assessments, wie der Mini Mental Status Test, wurden regelhaft durchgeführt. Somit besteht die Möglichkeit, dass präexistente Hirninfarkte oder sogenannte „stumme Schlaganfälle“ unerkant blieben.

4.7.2. Intraoperative Limitationen

Auch intraoperativ zeigte sich eine gewisse Heterogenität in der Anwendung technischer Strategien. Maßnahmen zur Embolieprävention – etwa die kontinuierliche Messung der zerebralen Sauerstoffsättigung mittels Near-Infrared-Spectroscopy (NIRS), der Einsatz von Emboliefiltern oder ein gezieltes Aortenklappenmanagement – wurden nicht standardisiert eingesetzt. Dies erschwert die Beurteilung des tatsächlichen Einflusses solcher Schutzmaßnahmen auf neurologische oder systemische Komplikationen.

Zudem erfolgte keine strukturierte intraoperative Dokumentation der Aortenqualität, insbesondere hinsichtlich der Unterscheidung zwischen segmentalen, ringförmigen oder zirkulären Kalzifikationen. Eine solche Beschreibung wäre jedoch essenziell, um die Wahl der Operationstechnik in Relation zur morphologischen Beschaffenheit der Aorta nachvollziehbar zu machen. Auch Umstellungen der OP-Strategie während des Eingriffs – etwa von HLM-CABG zu OPCAB – wurden nicht systematisch erfasst oder nachvollziehbar begründet, was die retrospektive Analyse erschwert und künftige Qualitätsvergleiche limitiert.

4.7.3. Konsequenzen für die klinische Praxis:

Die identifizierten Limitationen machen deutlich, dass eine strukturierte und standardisierte präoperative Diagnostik künftig unverzichtbar ist. Im Zentrum sollte die routinemäßige Durchführung einer nativ-CT oder CT-Angiographie des Thorax stehen – insbesondere bei Patient*innen über 70 Jahren, bei bekannter pAVK, Karotisstenose, Zustand nach Apoplex oder geplanter Reoperation. Diese Maßnahme würde analog zur TAVI-Diagnostik eine

objektive Beurteilung der Aortenkalzifikation ermöglichen und die präoperative Risikostratifizierung erheblich verbessern.

Ergänzend sollte eine farbkodierte Duplexsonographie der supraaortalen Gefäße erfolgen, idealerweise unter NASCET-Klassifizierung, um asymptotische Karotisstenosen frühzeitig zu erkennen. Auch funktionelle Parameter sind künftig stärker zu berücksichtigen: Die systematische Integration eines Frailty-Scores wie der Clinical Frailty Scale sowie eines neurokognitiven Assessments (z. B. Montreal Cognitive Assessment) erlaubt eine individuell angepasste Operationsplanung. Gerade bei vulnerablen Patient*innen könnten dadurch postoperativ relevante Komplikationen – etwa Delir, prolongiertes Weaning oder funktioneller Abbau – besser vorhergesagt und präventiv adressiert werden.

Ein solcher diagnostischer Pfad sollte interdisziplinär abgestimmt und standardisiert implementiert werden, um intraoperative Unsicherheiten zu reduzieren und perioperative Risiken gezielt zu minimieren.

4.7.4. Ausblick und Forschungsperspektiven:

Zur Weiterentwicklung der chirurgischen Strategie bei Patient*innen mit Porzellanaorta bedarf es gut konzipierter, prospektiver und multizentrischer Studien mit ausreichend hoher Fallzahl. Ziel sollte es sein, konventionelle Verfahren, aortenschonende Techniken sowie device-gestützte Strategien (z. B. Enclose, HeartString) unter standardisierten Bedingungen systematisch miteinander zu vergleichen.

Ein zentraler Fortschritt wäre die Entwicklung eines CT-basierten Aortenalk-Scores – analog zum etablierten Agatston-Score für koronare Plaques. Ein solcher Score könnte neben der Kalziumdichte auch morphologische Muster (z. B. fokal, ringförmig, diffus) und zusätzliche Befunde wie Ulzerationen oder Wandthromben einbeziehen. Diese Quantifizierung würde eine evidenzbasierte Entscheidungsgrundlage für die Wahl der OP-Technik schaffen.

Darüber hinaus sollten zukünftige Studien funktionelle und patientenzentrierte Endpunkte wie Mobilität, Delirinzidenz, Lebensqualität und kognitive Erholung nach CABG konsequent berücksichtigen. Nur so lassen sich langfristige Therapieziele erfassen, die über die klassische Betrachtung von Mortalität oder Intensivverweildauer hinausgehen.

5. Literaturverzeichnis

Als Zitierprogramm werden Citavi oder EndNote empfohlen. Zur Erstellung der Literaturreferenzen soll die Zitiervorlage „Lancet“ verwendet werden.

Internetzitate werden folgendermaßen angegeben:

Lawrence, R. A. A review of the medical benefits and contraindications to breastfeeding in the United States. Arlington (VA): National Center of Education in Maternal and Child Health. <http://www.ncemch.org/pubs/PDFs/breastfeedingTIB.pdf> (Zuletzt abgerufen am 12.11.2008)

6. Anhang

4.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Aorta thoracica und ihre Abgänge.....	11
Abbildung 2. Aufbau einer elastischen Arterie, schematische Darstellung	11
Abbildung 3. Darstellung der Klemmebene für totalem Querklemmen der Aorta, speziell optimiert für eine Porzellanaorta, nach Nishi et. al. Fig. 2 ²⁶	19
Abbildung 4. Gefäßklemme nach Crawford	19
Abbildung 5. Gefäßklemme nach De Bakey, inklusive spezieller Bezug zur Gefäßschonung	19
Abbildung 6. Endovaskuläre Aortenokklusion anstatt Klemmen von extern, Adaptierte Zeichnung nach Fig. 1 aus dem Paper Cosgrove et. al ⁴⁷	20
Abbildung 7. Patientenkollektiv: Flow Chart.....	28
Abbildung 8. Proximale (zentrale) Anastomosenanlage an der Aorta unter partieller Abklemmung der Aorta.....	37
Abbildung 9. Heartstring III in Benutzung: Erstellen der zentralen Anastomose, aus der Heartstring III Broschüre, Seite 7, Firma Getinge, Genehmigung Bildnutzungsrecht liegt vor ⁸⁷	37
Abbildung 10. Kreisdiagramm: Geschlechtsverteilung in der Studie	40
Abbildung 11. Säulendiagramm: Geschlechtsverteilung in der OK- und MK-Gruppe.....	41
Abbildung 12. Kreisdiagramm: KHK-Verteilung, Gesamtkohorte	42
Abbildung 13. Durchgeführte präoperative CT.....	45
Abbildung 14. Durchgeführte präoperative Röntgen im stationären Aufenthalt	46
Abbildung 15. Säulendiagramm: Aortensklerose in der MK und OK Gruppe	46
Abbildung 16. Kreisdiagramm zur Verteilung der Operationsdringlichkeit in beiden Gruppen: In der MK-Gruppe waren Notfalloperationen deutlich häufiger (27,8 %) als in der OK-Gruppe (7,3 %; $p < 0,001$).....	48
Abbildung 17. Säulendiagramm der verwendeten Anastomosentechniken für die venösen Bypässe (einzeln, sequenziell, T/Y) – nach Gruppen getrennt. Die sequenziellen Anastomosen und T/Y-Techniken mit venösen Grafts wurden häufiger in der OK-Gruppe eingesetzt ($p < 0,05$).	49
Abbildung 18. Balkendiagramm zur Anzahl zentraler Anastomosen in MK- und OK-Gruppe: Die Anzahl zentraler Anastomosen war in der MK-Gruppe signifikant höher als in der OK-Gruppe ($p = 0,01$). In der OK-Gruppe wurden bei 49,1 % der Patient*innen keine zentralen Anastomosen durchgeführt.....	50

Abbildung 19. Kreisdiagramm: Vergleich der kompletten Revaskularisation (MK: 77,8 %; OK: 50,9 %; p = 0,04).....	50
Abbildung 20. Neurovaskuläre Ereignisse postoperativ: 11,1 % OK, 5,5 % MK, p = 0,04.	54
Abbildung 21. Kreisdiagramm: postoperative antibiotische Therapie: 44,4 % OK vs. 17,6 % MK, p=0,01.....	57
Abbildung 22. Boxplot: Verweildauer auf der Intensivstation in Tage: OK-Gruppe bei 6,98 ± 8,94 Tage, MK-Gruppe: 3,5 ± 3,71 Tage, p = 0,02.	57
Abbildung 23. Anzahl venöser Bypassanastomosen bei Operationen ohne Klemmen der Aorta	68
Abbildung 24. Diagnostisches Screening für Patient*innen mit V.a. Porzellanaorta	83

4.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Historische Entwicklung der Definition und Klassifikation einer Porzellanaorta	13
Tabelle 2. Prävalenz der Porzellanaorta, chronologisch. Vorhandensein einer Definition der Porzellanaorta; Patientenkollektiv in der Studie	15
Tabelle 3: Apoplexrisiko nach unterschiedlichen chirurgischen Eingriffen, übersetzt aus Tabelle 1. Selim et.al. ⁶⁴	24
Tabelle 4. Entstehung von Embolien durch gelöste Plaques und Atherome, daraus resultierenden Komplikationen: mögliche Gründe.....	25
Tabelle 5. Vor- und Nachteile der CT-basierten Planung der koronaren Bypassoperation gegenüber der traditionellen invasiven Koronarangiographie nach ^{79,81-83}	34
Tabelle 6 Alter- und Geschlechtsverteilung	41
Tabelle 7. Risikofaktoren	43
Tabelle 8. PA-bezogene Daten.....	47
Tabelle 9. Operationsdaten	51
Tabelle 10. Neurologische Daten	55
Tabelle 11. Postoperative Komplikationen.....	58
Tabelle 12. Analyse der Operationen ohne Klemme: Alter- und Geschlechtsverteilung.....	61
Tabelle 13. Risikofaktoren der Patienten, die ohne Klemmen der Aorta operiert wurden.....	64
Tabelle 14. Präoperative Bildgebung.....	65
Tabelle 15. Analyse der Operationen ohne Klemme: intraoperative Daten	68
Tabelle 16. Analyse der Operationen ohne Klemme: neurologische Komplikationen.....	70
Tabelle 17. Analyse der Operationen ohne Klemme: postoperative Komplikationen	72

7. Vorabveröffentlichungen von Ergebnissen

1. Libby P, Ridker PM, Hansson GK. Progress and challenges in translating the biology of atherosclerosis. *Nature* 2011; **473**(7347): 317-25.
2. Hansson GK. Inflammation, atherosclerosis, and coronary artery disease. *N Engl J Med* 2005; **352**(16): 1685-95.
3. Ross R. Atherosclerosis--an inflammatory disease. *N Engl J Med* 1999; **340**(2): 115-26.
4. Falk E. Pathogenesis of atherosclerosis. *J Am Coll Cardiol* 2006; **47**(8 Suppl): C7-12.
5. (BfArM) DBfAuM. ICD-10-GM: Internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme, German Modification. In: (BfArM) DBfAuM, editor. In https://www.bfarm.de/DE/Kodiersysteme/Klassifikationen/ICD/ICD-10-GM/_node.html; 2023.
6. Sterbefälle 2021 durch Herz-Kreislauf-Erkrankungen insgesamt nach den 10 häufigsten Todesfälle durch ICD-10 Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2023. 16.12.2022 ed. In <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Gesundheit/Todesursachen/Tabellen/sterbefaelle-herz-kreislauf-erkrankungen-insgesamt.html>: Statistisches Bundesamt 2021.
7. Erbel R, Aboyans V, Boileau C, et al. 2014 ESC Guidelines on the diagnosis and treatment of aortic diseases: Document covering acute and chronic aortic diseases of the thoracic and abdominal aorta of the adult. The Task Force for the Diagnosis and Treatment of Aortic Diseases of the European Society of Cardiology (ESC). *Eur Heart J* 2014; **35**(41): 2873-926.
8. Takasu J, Katz R, Nasir K, et al. Relationships of thoracic aortic wall calcification to cardiovascular risk factors: the Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis (MESA). *Am Heart J* 2008; **155**(4): 765-71.
9. Arteriosclerotic and acquired inflammatory and congenital diseases of the thoracic aorta(I). *Vascular Medicine*. 2nd edition ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2014.
10. Shadwick RE. Mechanical design in arteries. *Journal of Experimental Biology* 1999; **202**(23): 3305-13.
11. Mescher AL. The Circulatory System. Junqueira's Basic Histology: Text and Atlas, 17th Edition. New York, NY: McGraw Hill; 2024.
12. Proudfoot D, Shanahan CM. Biology of calcification in vascular cells: intima versus media. *Herz* 2001; **26**(4): 245-51.
13. Athanasiou LS, Fotiadis DI, Michalis LK. 1 - Introduction. In: Athanasiou LS, Fotiadis DI, Michalis LK, eds. *Atherosclerotic Plaque Characterization Methods Based on Coronary Imaging*. Oxford: Academic Press; 2017: 1-21.
14. Stary HC, Chandler AB, Dinsmore RE, et al. A definition of advanced types of atherosclerotic lesions and a histological classification of atherosclerosis. A report from the Committee on Vascular Lesions of the Council on Arteriosclerosis, American Heart Association. *Circulation* 1995; **92**(5): 1355-74.
15. Abramowitz Y, Jilaihawi H, Chakravarty T, Mack MJ, Makkar RR. Porcelain aorta: a comprehensive review. *Circulation* 2015; **131**(9): 827-36.
16. Wolf D, Ley K. Immunität und Entzündung bei Arteriosklerose. *Herz* 2019; **44**(2): 107-20.
17. Frauenknecht V, Schroeder V. [Complement--a phylogenetically old system as a new player in the development of atherosclerosis]. *Hamostaseologie* 2012; **32**(4): 276-85.
18. Erbel R, Eggebrecht H, Falk V, Haverich A, Sechtem U, Nienaber CA. Leitlinien der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie – Herz- und Kreislaufforschung e.V.(2015) ESC Pocket Guidelines. Aortenerkrankungen, Version 2014. Börm Bruckmeier Verlag GmbH, Grünwald
Kurzfassung der „ESC Guidelines on the Diagnosis and Treatment of Aortic Diseases" (European Heart Journal; 2014 - doi/10.1093/eurheartj/ehu281). Deutsche Gesellschaft für Kardiologie – Herz-und Kreislaufforschung e.V.; 2015.

19. Coselli JS, Crawford ES. Aortic valve replacement in the patient with extensive calcification of the ascending aorta (the porcelain aorta). *J Thorac Cardiovasc Surg* 1986; **91**(2): 184-7.
20. Mills NL, Everson CT. Atherosclerosis of the ascending aorta and coronary artery bypass. Pathology, clinical correlates, and operative management. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1991; **102**(4): 546-53.
21. Katz ES, Tunick PA, Rusinek H, Ribakove G, Spencer FC, Kronzon I. Protruding aortic atheromas predict stroke in elderly patients undergoing cardiopulmonary bypass: experience with intraoperative transesophageal echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 1992; **20**(1): 70-7.
22. Wareing TH, Davila-Roman VG, Daily BB, et al. Strategy for the reduction of stroke incidence in cardiac surgical patients. *Ann Thorac Surg* 1993; **55**(6): 1400-7; discussion 7-8.
23. Svensson LG, Sun J, Cruz HA, Shahian DM. Endarterectomy for calcified porcelain aorta associated with aortic valve stenosis. *Ann Thorac Surg* 1996; **61**(1): 149-52.
24. Leyh RG, Bartels C, Nötzold A, Sievers HH. Management of porcelain aorta during coronary artery bypass grafting. *Ann Thorac Surg* 1999; **67**(4): 986-8.
25. Rodés-Cabau J, Webb JG, Cheung A, et al. Transcatheter Aortic Valve Implantation for the Treatment of Severe Symptomatic Aortic Stenosis in Patients at Very High or Prohibitive Surgical Risk: Acute and Late Outcomes of the Multicenter Canadian Experience. *Journal of the American College of Cardiology* 2010; **55**(11): 1080-90.
26. Nishi H, Mitsuno M, Ryomoto M, Miyamoto Y. Comprehensive approach for clamping severely calcified ascending aorta using computed tomography. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2010; **10**(1): 18-20.
27. Amorim PA, Penov K, Lehmkuhl L, Haensig M, Mohr FW, Rastan AJ. Not all porcelain is the same: classification of circular aortic calcifications (porcelain aorta) according to the impact on therapeutic approach. *Thorac Cardiovasc Surg* 2013; **61**(7): 559-63.
28. Snow T, Semple T, Duncan A, et al. 'Porcelain aorta': A proposed definition and classification of ascending aortic calcification. *Open Heart* 2018; **5**: e000703.
29. Wareing TH, Davila-Roman VG, Barzilai B, Murphy SF, Kouchoukos NT. Management of the severely atherosclerotic ascending aorta during cardiac operations. A strategy for detection and treatment. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1992; **103**(3): 453-62.
30. Leon MB, Smith CR, Mack M, et al. Transcatheter Aortic-Valve Implantation for Aortic Stenosis in Patients Who Cannot Undergo Surgery. *New England Journal of Medicine* 2010; **363**(17): 1597-607.
31. Webb JG, Pasupati S, Humphries K, et al. Percutaneous transarterial aortic valve replacement in selected high-risk patients with aortic stenosis. *Circulation* 2007; **116**(7): 755-63.
32. Webb JG, Altwegg L, Boone RH, et al. Transcatheter aortic valve implantation: impact on clinical and valve-related outcomes. *Circulation* 2009; **119**(23): 3009-16.
33. Buz S, Pasic M, Unbehaun A, et al. Trans-apical aortic valve implantation in patients with severe calcification of the ascending aorta. *Eur J Cardiothorac Surg* 2011; **40**(2): 463-8.
34. Zahn R, Schiele R, Gerckens U, et al. Transcatheter aortic valve implantation in patients with "porcelain" aorta (from a Multicenter Real World Registry). *Am J Cardiol* 2013; **111**(4): 602-8.
35. van der Linden J, Hadjinikolaou L, Bergman P, Lindblom D. Postoperative stroke in cardiac surgery is related to the location and extent of atherosclerotic disease in the ascending aorta. *J Am Coll Cardiol* 2001; **38**(1): 131-5.
36. Cribier A, Eltchaninoff H, Tron C, et al. Treatment of calcific aortic stenosis with the percutaneous heart valve: mid-term follow-up from the initial feasibility studies: the French experience. *J Am Coll Cardiol* 2006; **47**(6): 1214-23.
37. Himbert D, Descoutures F, Al-Attar N, et al. Results of transfemoral or transapical aortic valve implantation following a uniform assessment in high-risk patients with aortic stenosis. *J Am Coll Cardiol* 2009; **54**(4): 303-11.
38. Ye J, Cheung A, Lichtenstein SV, et al. Transapical transcatheter aortic valve implantation: 1-year outcome in 26 patients. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2009; **137**(1): 167-73.
39. Gillinov AM, Lytle BW, Hoang V, et al. The atherosclerotic aorta at aortic valve replacement: surgical strategies and results. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2000; **120**(5): 957-63.

40. Faggiano P, Frattini S, Zilioli V, et al. Prevalence of comorbidities and associated cardiac diseases in patients with valve aortic stenosis. Potential implications for the decision-making process. *Int J Cardiol* 2012; **159**(2): 94-9.
41. Lev-Ran O, Ben-Gal Y, Matsa M, et al. 'No touch' techniques for porcelain ascending aorta: comparison between cardiopulmonary bypass with femoral artery cannulation and off-pump myocardial revascularization. *J Card Surg* 2002; **17**(5): 370-6.
42. Sirin G. Surgical strategies for severely atherosclerotic (porcelain) aorta during coronary artery bypass grafting. *World J Cardiol* 2021; **13**(8): 309-24.
43. Toeg H, Rubens FD. Chapter 2 - Cannulation Techniques for Cardiopulmonary Bypass. In: Sellke FW, Ruel M, eds. *Atlas of Cardiac Surgical Techniques (Second Edition)*: Elsevier; 2019: 14-30.
44. Chung MM, Filtz K, Simpson M, et al. Central aortic versus axillary artery cannulation for aortic arch surgery. *JTCVS Open* 2023; **14**: 14-25.
45. Osaka S, Tanaka M. Strategy for Porcelain Ascending Aorta in Cardiac Surgery. *Ann Thorac Cardiovasc Surg* 2018; **24**(2): 57-64.
46. Zammert M, Gelman S. The pathophysiology of aortic cross-clamping. *Best Pract Res Clin Anaesthesiol* 2016; **30**(3): 257-69.
47. Cosgrove DM. Management of the calcified aorta: an alternative method of occlusion. *Ann Thorac Surg* 1983; **36**(6): 718-9.
48. Ooi A, Iyenger S, Langley SM, Haw MP. Endovascular clamping of porcelain aorta in aortic valve surgery using Foley Catheter. *Heart Lung Circ* 2006; **15**(3): 194-6.
49. Mantella LE, Liblik K, Johri AM. Vascular imaging of atherosclerosis: Strengths and weaknesses. *Atherosclerosis* 2021; **319**: 42-50.
50. Evangelista A, Sitges M, Jondeau G, et al. Multimodality imaging in thoracic aortic diseases: a clinical consensus statement from the European Association of Cardiovascular Imaging and the European Society of Cardiology working group on aorta and peripheral vascular diseases. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2023; **24**(5): e65-e85.
51. Messerli M, Giannopoulos AA, Leschka S, et al. Diagnostic accuracy of chest X-ray dose-equivalent CT for assessing calcified atherosclerotic burden of the thoracic aorta. *Br J Radiol* 2017; **90**(1080): 20170469.
52. Kurugol S, Come CE, Diaz AA, et al. Automated quantitative 3D analysis of aorta size, morphology, and mural calcification distributions. *Med Phys* 2015; **42**(9): 5467-78.
53. Mori S, Takaya T, Kinugasa M, et al. Three-dimensional quantification and visualization of aortic calcification by multidetector-row computed tomography: a simple approach using a volume-rendering method. *Atherosclerosis* 2015; **239**(2): 622-8.
54. Leonard JR, Henry M, Rahouma M, et al. Systematic preoperative CT scan is associated with reduced risk of stroke in minimally invasive mitral valve surgery: A meta-analysis. *Int J Cardiol* 2019; **278**: 300-6.
55. den Harder AM, de Heer LM, Maurovich-Horvat P, et al. Ultra low-dose chest ct with iterative reconstructions as an alternative to conventional chest x-ray prior to heart surgery (CRICKET study): Rationale and design of a multicenter randomized trial. *J Cardiovasc Comput Tomogr* 2016; **10**(3): 242-5.
56. Craiem D, Casciaro ME, Graf S, Chironi G, Simon A, Armentano RL. Effects of aging on thoracic aorta size and shape: a non-contrast CT study. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc* 2012; **2012**: 4986-9.
57. Craiem D, Chironi G, Casciaro ME, Graf S, Simon A. Calcifications of the thoracic aorta on extended non-contrast-enhanced cardiac CT. *PLoS One* 2014; **9**(10): e109584.
58. den Harder AM, de Heer LM, Meijer RCA, et al. Effect of computed tomography before cardiac surgery on surgical strategy, mortality and stroke. *European Journal of Radiology* 2016; **85**(4): 744-50.
59. Van Zaane B, Zuithoff NP, Reitsma JB, Bax L, Nierich AP, Moons KG. Meta-analysis of the diagnostic accuracy of transesophageal echocardiography for assessment of atherosclerosis in the ascending aorta in patients undergoing cardiac surgery. *Acta Anaesthesiol Scand* 2008; **52**(9): 1179-87.
60. Kronzon I, Tunick PA. Transesophageal echocardiography as a tool in the evaluation of patients with embolic disorders. *Prog Cardiovasc Dis* 1993; **36**(1): 39-60.

61. Royse AG, Royse CF. Epi-aortic ultrasound assessment of the aorta in cardiac surgery. *Best Pract Res Clin Anaesthesiol* 2009; **23**(3): 335-41.
62. Niklewski T, Zembala M, Puszczewicz D, Nadziakiewicz P, Karolak W, Zembala M. The use of intraoperative epi-aortic ultrasonography in monitoring patients over 75 years old treated with aortic valve replacement. *Kardiochir Torakochirurgia Pol* 2017; **14**(1): 10-5.
63. Shapeton AD, Leissner KB, Zorca SM, et al. Epi-aortic Ultrasound for Assessment of Intraluminal Atheroma; Insights from the REGROUP Trial. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2020; **34**(3): 726-32.
64. Selim M. Perioperative stroke. *N Engl J Med* 2007; **356**(7): 706-13.
65. Mackensen GB, Ti LK, Phillips-Bute BG, Mathew JP, Newman MF, Grocott HP. Cerebral embolization during cardiac surgery: impact of aortic atheroma burden. *Br J Anaesth* 2003; **91**(5): 656-61.
66. Elias-Smale SE, Odink AE, Wieberdink RG, et al. Carotid, aortic arch and coronary calcification are related to history of stroke: the Rotterdam Study. *Atherosclerosis* 2010; **212**(2): 656-60.
67. Bucarius J, Gummert JF, Borger MA, et al. Stroke after cardiac surgery: a risk factor analysis of 16,184 consecutive adult patients. *Ann Thorac Surg* 2003; **75**(2): 472-8.
68. McKhann GM, Grega MA, Borowicz LM, Jr., Baumgartner WA, Selnes OA. Stroke and encephalopathy after cardiac surgery: an update. *Stroke* 2006; **37**(2): 562-71.
69. Mack MJ, Head SJ, Holmes DR, et al. Analysis of Stroke Occurring in the SYNTAX Trial Comparing Coronary Artery Bypass Surgery and Percutaneous Coronary Intervention in the Treatment of Complex Coronary Artery Disease. *JACC: Cardiovascular Interventions* 2013; **6**(4): 344-54.
70. Modolo R, Chichareon P, Kogame N, et al. Contemporary Outcomes Following Coronary Artery Bypass Graft Surgery for Left Main Disease. *Journal of the American College of Cardiology* 2019; **73**(15): 1877-86.
71. Pinho-Gomes AC, Taggart DP. Coronary artery bypass grafting for left main disease and the risk of stroke: Incidence, aetiology and prevention. *Surgeon* 2017; **15**(3): 155-60.
72. Herold G. *Innere Medizin* 2022. Berlin/Boston, GERMANY: Walter de Gruyter GmbH; 2021.
73. Montalescot G, Sechtem U, Achenbach S, et al. 2013 ESC guidelines on the management of stable coronary artery disease: the Task Force on the management of stable coronary artery disease of the European Society of Cardiology. *Eur Heart J* 2013; **34**(38): 2949-3003.
74. Neumann FJ, Sousa-Uva M, Ahlsson A, et al. 2018 ESC/EACTS Guidelines on myocardial revascularization. *Eur Heart J* 2019; **40**(2): 87-165.
75. Lawton JS, Tamis-Holland JE, Bangalore S, et al. 2021 ACC/AHA/SCAI Guideline for Coronary Artery Revascularization: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on Clinical Practice Guidelines. *Circulation* 2022; **145**(3): e18-e114.
76. Miller CL, Kocher M, Koweek LH, Zwischenberger BA. Use of computed tomography (CT) for preoperative planning in patients undergoing coronary artery bypass grafting (CABG). *J Card Surg* 2022; **37**(12): 4150-7.
77. Gatti M, Gallone G, Poggi V, et al. Diagnostic accuracy of coronary computed tomography angiography for the evaluation of obstructive coronary artery disease in patients referred for transcatheter aortic valve implantation: a systematic review and meta-analysis. *Eur Radiol* 2022; **32**(8): 5189-200.
78. Serruys PW, Kageyama S, Pompilio G, et al. Coronary bypass surgery guided by computed tomography in a low-risk population. *Eur Heart J* 2024; **45**(20): 1804-15.
79. Collet C, Onuma Y, Andreini D, et al. Coronary computed tomography angiography for heart team decision-making in multivessel coronary artery disease. *Eur Heart J* 2018; **39**(41): 3689-98.
80. Maurovich-Horvat P, Bossert M, Kofoed KF, et al. CT or Invasive Coronary Angiography in Stable Chest Pain. *N Engl J Med* 2022; **386**(17): 1591-602.
81. Manabe S, Fukui T, Miyajima K, et al. Impact of proximal anastomosis procedures on stroke in off-pump coronary artery bypass grafting. *J Card Surg* 2009; **24**(6): 644-9.

82. Axel Haverich GZ. Herzchirurgie (eBook)
Die Eingriffe am Herzen und an den herznahen Gefäßen. 3 ed: Springer Verlag; 2010.
83. Emmert MY, Grünenfelder J, Scherman J, et al. HEARTSTRING enabled no-touch proximal anastomosis for off-pump coronary artery bypass grafting: current evidence and technique. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2013; **17**(3): 538-41.
84. Getinge. Heartstring III Proximal-Dichtungssystem Technik. In: Getinge F, editor.; 2020.
85. Gaudino M, Benedetto U, Fremes S, et al. Radial-Artery or Saphenous-Vein Grafts in Coronary-Artery Bypass Surgery. *N Engl J Med* 2018; **378**(22): 2069-77.
86. Edelman JJ, Yan TD, Bannon PG, Wilson MK, Valley MP. Coronary artery bypass grafting with and without manipulation of the ascending aorta--a meta-analysis. *Heart Lung Circ* 2011; **20**(5): 318-24.
87. Misfeld M, Brereton RJ, Sweetman EA, Doig GS. Neurologic complications after off-pump coronary artery bypass grafting with and without aortic manipulation: meta-analysis of 11,398 cases from 8 studies. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2011; **142**(2): e11-7.
88. Elliott RJ, McGrath LT. Calcification of the human thoracic aorta during aging. *Calcified Tissue International* 1994; **54**(4): 268-73.
89. Tohno Y, Tohno S, Minami T, et al. Age-related change of mineral content in the human thoracic aorta and in the human cerebral artery. *Biological Trace Element Research* 1996; **54**(1): 23-31.
90. Ladwig KH, Waller C. Geschlechtsspezifische Aspekte bei der koronaren Herzkrankheit. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* 2014; **57**(9): 1083-91.
91. Baessler A, Bauer P, Becker M, et al. Geschlechterspezifische Aspekte kardiovaskulärer Erkrankungen. *Die Kardiologie* 2024; **18**(4): 293-321.
92. Merkel M. Gender Health Gap: Unterbehandlung kardiovaskulärer Erkrankungen bei Frauen. *Die Gynäkologie* 2024; **57**(7): 454-9.
93. Jensen MD, Ryan DH, Apovian CM, et al. 2013 AHA/ACC/TOS guideline for the management of overweight and obesity in adults: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines and The Obesity Society. *Circulation* 2014; **129**(25 Suppl 2): S102-38.
94. Nashef SA, Roques F, Sharples LD, et al. EuroSCORE II. *Eur J Cardiothorac Surg* 2012; **41**(4): 734-44; discussion 44-5.
95. Beckman JA, Creager MA, Libby P. Diabetes and atherosclerosis: epidemiology, pathophysiology, and management. *Jama* 2002; **287**(19): 2570-81.
96. Feng Z, Liu W, Liu Y, et al. Factors associated with cognitive impairment in patients with atrial fibrillation: A systematic review and meta-analysis. *Archives of Gerontology and Geriatrics* 2025; **128**: 105619.
97. Aune D, Schlesinger S, Norat T, Riboli E. Tobacco smoking and the risk of atrial fibrillation: A systematic review and meta-analysis of prospective studies. *Eur J Prev Cardiol* 2018; **25**(13): 1437-51.
98. Dos Santos VP, Pozzan G, Castelli V, Caffaro RA. Arteriosclerosis, atherosclerosis, arteriolosclerosis, and Monckeberg medial calcific sclerosis: what is the difference? *J Vasc Bras* 2021; **20**: e20200211.
99. Afilalo J, Alexander KP, Mack MJ, et al. Frailty assessment in the cardiovascular care of older adults. *J Am Coll Cardiol* 2014; **63**(8): 747-62.
100. Lee JA, Yanagawa B, An KR, Arora RC, Verma S, Friedrich JO. Frailty and pre-frailty in cardiac surgery: a systematic review and meta-analysis of 66,448 patients. *J Cardiothorac Surg* 2021; **16**(1): 184.
101. Yuan X, Du J, Liu Q, Zhang L. Defining the role of perioperative statin treatment in patients after cardiac surgery: A meta-analysis and systematic review of 20 randomized controlled trials. *Int J Cardiol* 2017; **228**: 958-66.
102. Liu L, Ni YQ, Zhan JK, Liu YS. The Role of SGLT2 Inhibitors in Vascular Aging. *Aging Dis* 2021; **12**(5): 1323-36.
103. Knol WG, Bogers A, Braun LMM, et al. Aortic calcifications on routine preoperative chest X-ray and perioperative stroke during cardiac surgery: a nested matched case-control study. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2020; **30**(4): 507-14.

104. Nishi H, Mitsuno M, Tanaka H, Ryomoto M, Fukui S, Miyamoto Y. Who needs preoperative routine chest computed tomography for prevention of stroke in cardiac surgery? *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2010; **11**(1): 30-3.
105. Pedrosa JF, Barreto SM, Bittencourt MS, Ribeiro ALP. Anatomical References to Evaluate Thoracic Aorta Calcium by Computed Tomography. *Current Atherosclerosis Reports* 2019; **21**(12): 51.
106. Biancari F, Onorati F, Rubino AS, et al. Outcome of emergency coronary artery bypass grafting. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2015; **29**(2): 275-82.
107. Bruyne BD, Pijls NHJ, Kalesan B, et al. Fractional Flow Reserve–Guided PCI versus Medical Therapy in Stable Coronary Disease. *New England Journal of Medicine* 2012; **367**(11): 991-1001.
108. Dávila-Román VG, Barzilai B, Wareing TH, Murphy SF, Schechtman KB, Kouchoukos NT. Atherosclerosis of the ascending aorta. Prevalence and role as an independent predictor of cerebrovascular events in cardiac patients. *Stroke* 1994; **25**(10): 2010-6.
109. Daniel WT, 3rd, Kilgo P, Puskas JD, et al. Trends in aortic clamp use during coronary artery bypass surgery: effect of aortic clamping strategies on neurologic outcomes. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2014; **147**(2): 652-7.
110. Kamenskaya O, Klinkova A, Loginova I, Lomivorotov VV, Shmyrev V, Chernyavskiy A. Brain Oxygen Supply in Older Adults During Coronary Artery Bypass Grafting. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2020; **34**(12): 3275-81.
111. Maze Y, Tokui T, Narukawa T, et al. Impact of the Barthel Index Score and Prognosis on Patients Undergoing Transcatheter Aortic Valve Replacement and Surgical Aortic Valve Replacement. *Circ J* 2024; **88**(4): 483-91.
112. Vermeer SE, Prins ND, den Heijer T, Hofman A, Koudstaal PJ, Breteler MM. Silent brain infarcts and the risk of dementia and cognitive decline. *N Engl J Med* 2003; **348**(13): 1215-22.
113. Kelly PJ, Lemmens R, Tsvigoulis G. Inflammation and Stroke Risk: A New Target for Prevention. *Stroke* 2021; **52**(8): 2697-706.