

P. Geisbüsch\*<sup>1</sup> · H. Schumacher<sup>2</sup> · A. Hyhlik-Dürr<sup>1</sup> · H. von Tengg-Kobligh<sup>3</sup> · T.F. Weber<sup>4</sup> · D. Kotelis<sup>1</sup> · D. Böckler\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Klinik für Gefäßchirurgie, vaskuläre und endovaskuläre Chirurgie, Chirurgische Universitätsklinik Heidelberg

<sup>2</sup> Klinik für Gefäßchirurgie, vaskuläre und endovaskuläre Chirurgie, Klinikum Hanau

<sup>3</sup> Abteilung Radiologie, Deutsches Krebsforschungszentrum, Heidelberg

<sup>4</sup> Abteilung für Diagnostische und Interventionelle Radiologie, Universitätsklinikum Heidelberg

# Hybridverfahren zur Therapie aortaler Bogenpathologien

## Zusammenfassung

Pathologien des Aortenbogens stellen für Herz- und Gefäßchirurgen aufgrund ihrer anatomischen Lage zu Abgängen der supraaortalen Äste eine therapeutische Herausforderung dar. Derzeit stehen 2 chirurgische Verfahren im klinischen Alltag zur Verfügung: (1) Der konventionelle Aortenbogensersatz unter Einsatz einer Herzlungenmaschine mit selektiver antegrader Hirnperfusion und tiefer Hypothermie ist insbesondere beim Hochrisikopatienten mit einer hohen Morbidität und Mortalität assoziiert. (2) Alternativ stehen endovaskuläre Prozeduren, darunter sog. Hybridverfahren zur Verfügung. Diese stellen eine Kombination extraanatomischer konventioneller Revaskularisationsverfahren der Kopf-Hals-Gefäße mit anschließender ein- oder zweizeitiger endovaskulärer Ausschaltung der Aortenbogenpathologie dar. Ziel der Transposition der Kopf-Halsgefäße, des sog. Debranching, ist die Schaffung einer proximalen Verankerungszone  $\geq 2$  cm in der Centerline. Mittelfristige Ergebnisse zeigen, dass Hybridverfahren, insbesondere beim Hochrisiko- und Notfallpatienten, mit einer 30-Tages Letalität unter 10%, einer Schlaganfallrate von 3% und einer 1-Jahres-Überlebensrate von 85% eine potenzielle Alternative zum Standardverfahren des offenen Bogenersatzes darstellen. Endoprothesen mit Seitarmtechnik (sog. „branched endografts“) sind noch nicht kommerziell verfügbar, werden aber in Zukunft die elektive Therapie komplexer Aortenpathologie maßgeblich beeinflussen und evtl. zur Therapie der Wahl avancieren. Bogenhybride werden für Hochrisikopatienten z. B. im Notfall eine zusätzliche Therapieoption bleiben. Große Fallzahlen, Standardisierung und Uniformität der Prozedur sowie Langzeitergebnisse der Methode fehlen (EBM Level III/B).

## Schlüsselwörter

Hybridverfahren · Aortenbogen · Endograft · Aorta · Debranching

## Hybrid aortic procedures for endoluminal arch replacement

### Abstract

Patients with pathologies involving the aortic arch are considered to be a challenge for vascular and cardiovascular surgeons. Conventional open aortic arch replacement using extra-corporal circulation, selective antegrade cerebral perfusion and deep hypothermia is associated with a high morbidity and mortality in high risk patients. Aortic arch hybrid procedures combine supraaortic debranching procedures to create a sufficient proximal landing zone with an endovascular stent graft placement to exclude the aortic arch pathology. Mid-term results with a 30-day mortality rate of less than 10%, a stroke rate of 3% and 1-year survival rate of 85% prove hybrid arch procedures to be an attractive alternative treatment modality for aortic arch pathologies, especially in high risk patients. Long term results are still missing. Until further developments in branched endograft technology arise, hybrid procedures offer an additional surgical approach for high risk patients, especially in emergencies. In summary, thoracic endografts can safely be used to treat a wide variety of thoracic aortic diseases including the arch, but long term data are needed to validate their use (evidence level III/B).

### Keywords

Hybrid procedures · Aortic arch · Endograft · Aorta · Debranching

---

\* P. Geisbüsch und D. Böckler sind gleichberechtigte Autoren („equal contribution“).

- **Endovaskuläre Aortenrekonstruktion (EVAR)**
- **Thorakale endovaskuläre Aortenrekonstruktion (TEVAR)**

Der konventionelle offene Bogenersatz ist mit einer relevanten Morbidität und Mortalität verbunden

- **„Branched endografts“**

Mit Seitenarmen versehene Endoprothesen stehen für den Notfall nicht zur Verfügung

- **„Frozen-elephant-trunk-Technik“**

**Der vorliegende Weiterbildungsartikel trägt den aktuellen Wissensstand zu den Hybridprozeduren im Aortenbogen („Bogenhybriden“) zusammen und geht auf Aspekte der Patientenselektion, der Diagnostik inkl. Planung, der operativen Technik und auf internationale Ergebnisse ein.**

Die endovaskuläre Therapie hat das Management aortaler Pathologien im infrarenalen (► **endovaskuläre Aortenrekonstruktion; EVAR**), aber auch im thorakalen Abschnitt (TEVAR: ► **thorakale endovaskuläre Aortenrekonstruktion**) revolutioniert. Im Gegensatz zu EVAR [15, 16, 3, 32] liegen bei TEVAR keine randomisierten Studienergebnisse (EBM I/A), sondern lediglich Single-center-Studien bzw. Registerdaten (EBM III/B) vor. Multizentrisch randomisiert-kontrollierte Studien (MRCT) werden in Zukunft auch nicht mehr zu erwarten sein, da die geringe perioperative Mortalität und Morbidität in Single-Center-Studien hinreichend belegt wurde und somit eine kontrollierte randomisierte Studie nicht mehr gerechtfertigt erscheint [34].

Der Aortenbogen stellt unabhängig von der zugrunde liegenden Pathologie eine besondere therapeutische Herausforderung dar. Unterschiedliche operative Verfahren (konventionell und endovaskulär) und deren Kombination stehen dabei zur Verfügung.

## Hintergrund und Rationale von „Bogenhybriden“

Prinzipiell stehen 3 Therapieverfahren zur Behandlung aortaler Pathologien zur Verfügung: konventionelle, endovaskuläre und Hybridverfahren.

### Konventionelles Verfahren

Die Standardtherapie stellt bisher der konventionelle offene Bogenersatz unter Einsatz einer Herzlungenmaschine (HLM) mit/ohne selektive antegrade Hirnperfusion und Hypothermie dar. Trotz zahlreicher Fortschritte bleibt diese Methode jedoch aufgrund des operativen Zugangs (Sternotomie/Thorakotomie) und des Einsatzes der HLM (Vollheparinisierung, Aorten-Crossclamping) insbesondere beim Hochrisikopatienten mit einer relevanten Morbidität und Mortalität verbunden. Der elektive, konventionelle Bogenersatz ist selbst in spezialisierten kardiochirurgischen sog. „High-volume-Zentren“ mit einer Krankenhausmortalität von durchschnittlich 7% und einer neurologischen Komplikationsrate von passager 15%, permanent 8% assoziiert [24, 39, 40]. Die Thorakotomie und die Zeitdauer an der Herzlungenmaschine sind dabei unabhängige Risikofaktoren. Hinzu kommen Begleiterkrankungen wie Herzinsuffizienz, COPD oder aortale Voroperationen, die das perioperative Risiko zusätzlich erhöhen. Deshalb wird ein bedeutender Prozentsatz älterer Risikopatienten von einer operativen Maßnahme ausgeschlossen und dem natürlichen Krankheitsverlauf überlassen.

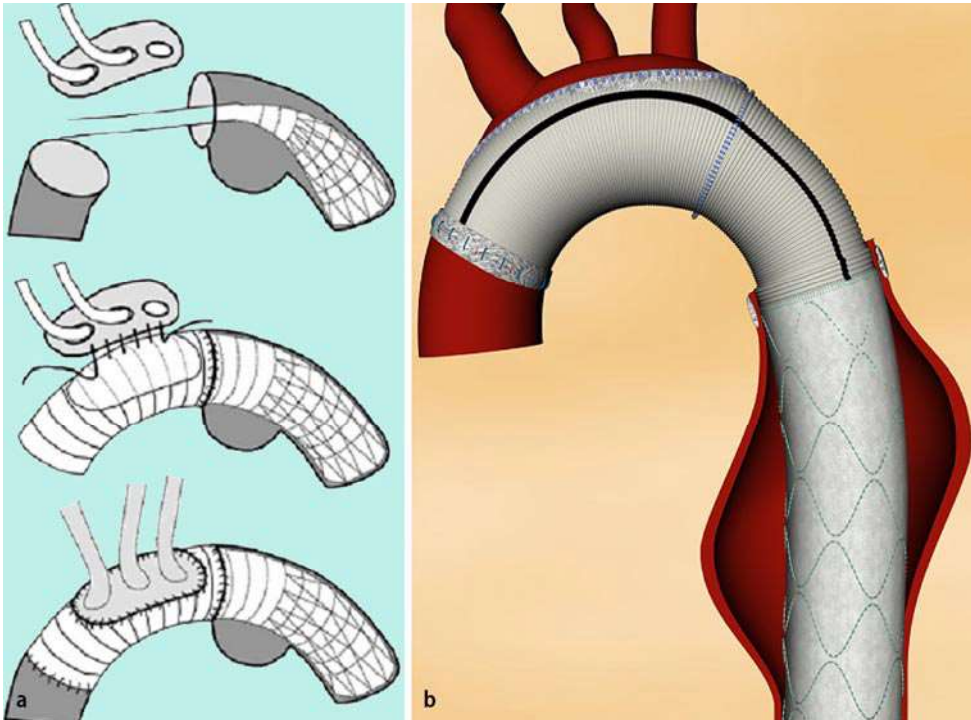
### Endovaskuläre Verfahren

Endovaskuläre Verfahren können diese Versorgungslücke schließen.

Zukünftig werden sog. ► **„branched endografts“** – mit Seitenarmen versehene Endoprothesen – zur Verfügung stehen [8, 9, 21]. Die Tatsache, dass diese neue Technologie sich jedoch noch in der Entwicklungsphase befindet und der Mehrzahl der Gefäßchirurgen/Interventionalisten noch nicht zur Verfügung steht und dass diese Endografts aufgrund langer Herstellungszeiten von bis zu 3 Monaten für den Notfall (in vielen Zentren die Mehrzahl der Eingriffe am Aortenbogen) nicht zur Verfügung stehen, veranlasste konventionell und endovaskulär tätige Chirurgen, nach Alternativen zur Standardtherapie zu suchen.

### Hybridverfahren

Unter der ► **„Frozen-elephant-trunk-Technik“** versteht man den kombinierten einzeitigen konventionellen Aszendens- und Bogenersatz unter Einsatz der HLM mittels Hybridprothese (proximaler Anteil: konventionelle Dacronprothese, distaler Anteil: Endoprothese). Nach Sternotomie erfolgt zunächst die antegrade Stentimplantation über den geöffneten Aortenbogen in die Aorta descendens. Anschließend wird die Prothese distal des Abgangs der linken A. subclavia zirkumferenziell eingenaht, der zunächst eingestülpte konventionelle Prothesenanteil aus der Aorta descendens hinausge-



**Abb. 1** ▲ **a** Implantationsschritte der „Frozen-elefant-trunk-Technik“. **b** Der proximale Anteil der Hybridprothese besteht aus konventionellem Dacron, die supraaortalen Gefäße werden in die Prothese reinseriert, distal ist eine Endoprothese angeschlossen. (Mit freundlicher Genehmigung der Firma Jotec GmbH, Hechingen, Deutschland)

zogen und für einen konventionellen Bogenersatz mit Reimplantation der supraaortalen Äste benutzt (► **Abb. 1**). Vorteile der Methode liegen in einem einzeitigen Vorgehen und einem geringeren Risiko der Thrombusbildung im Bereich des „frozen elephant trunk“. Die Mortalitätsrate dieser Operation liegt bei etwa 7% mit einer Paraplegierate von ca. 3,3%. Hier sei auf Publikationen von M. Karck und Z. Liu verwiesen [22, 26].

### „Bogenhybride“

Bei diesen Hybridprozeduren handelt es sich um eine Kombination extraanatomischer konventioneller Rekonstruktionsverfahren der supraaortalen Äste mittels ► **„debranching“**, d. h. Versetzen durch Transposition bzw. Bypass, und anschließender ein- oder zweizeitiger endovaskulärer Ausschaltung der Aortenbogenpathologie mittels Endograftimplantation.

Mit zunehmender Erfahrung und reduzierten Komplikationsraten nach endovaskulärer Therapie der Aorta descendens sind diese Hybridprozeduren mit Implantationen thorakaler Endografts im Aortenbogen seit 2003 zunehmend in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Erste Erfahrungen wurden vor 5 Jahren berichtet [37]. Mittlerweile haben zahlreiche Zentren ihre Erfahrungen und ersten Ergebnisse zu den sog. Hybridverfahren im Aortenbogen publiziert (s. Ergebnisse; [2, 12, 33, 45]). Insbesondere Hochrisikopatienten mit Deszendens- bzw. Aortenbogenpathologien scheinen von dem minimal invasiven Therapieansatz sowohl perioperativ als auch mittelfristig zu profitieren. Allerdings ist die Anwendung von Endoprothesen im Aortenbogen und im thorakoabdominellen Übergang wegen der Notwendigkeit suffizienter Landungszonen anatomisch bzw. morphologisch durch deren Seitenäste limitiert. Verantwortlich hierfür ist die räumliche Nähe der Abgänge der supraaortalen Äste zur Pathologie.

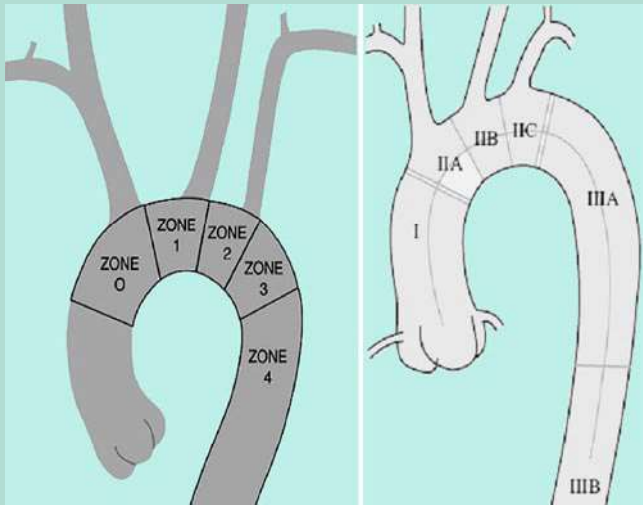
Die Rationale von Bogenhybridprozeduren beinhaltet somit folgende potenzielle Vorteile der endovaskulären Technik in diesem Aortensegment:

- das Vermeiden
- der Thorakotomie bzw. Sternotomie,
- der Herz-Lungen-Maschine mit hypothermem Kreislaufstillstand,
- eines signifikanten Blutverlusts,
- ggf. der Ein-Lungen-Ventilation,
- der hohen Aortenklemmung mit entsprechender kardialer Belastung.

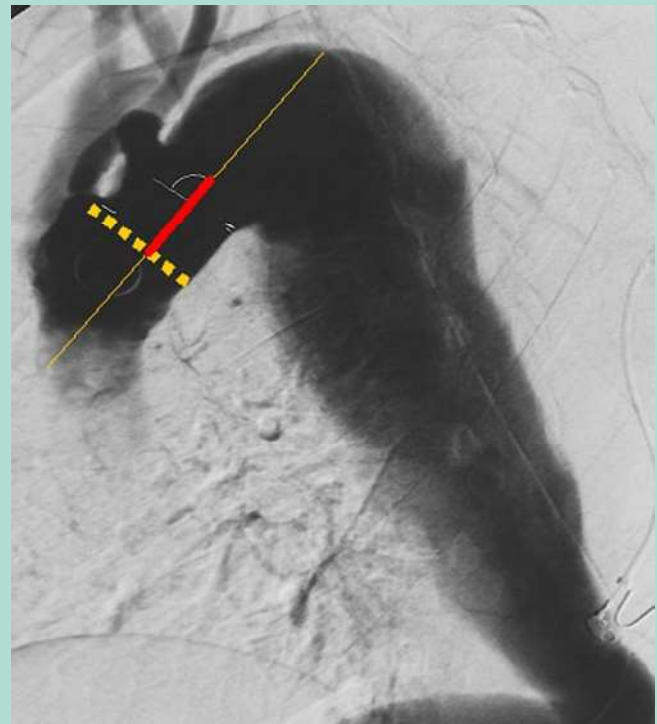
Vorteile der Methode liegen in einem einzeitigen Vorgehen und einem geringeren Risiko der Thrombusbildung

### ► „Debranching“

Insbesondere Hochrisikopatienten mit Deszendens- bzw. Aortenbogenpathologien scheinen von dem minimal invasiven Therapieansatz zu profitieren



**Abb. 2** ▲ Einteilung des Aortenbogens nach Ishimaru [5] bzw. Schumacher [37]. Je nach Morphologie der Pathologie liegt die proximale Verankerungszone in den angegebenen Abschnitten Z0–Z4 bzw. I–IIC



**Abb. 3** ◀ Digitale Subtraktionsangiographie eines Dezendensaneurysmas: Die proximale Landungszone wird in der sog. Centerline orthogonal zum Gefäßverlauf gemessen. Hierzu wird heutzutage Image Postprocessing der CT-Angiographie eingesetzt

Die kardiovaskulären Komorbiditäten definieren das typische Risikoprofil dieser Patienten

- **ASA-Klassifikation**
- **„Logistic EuroScore“**

## Patientenselektion

Für die Patientenselektion zur Durchführung von „Bogenhybriden“ sind folgende Kriterien ausschlaggebend:

- das individuelle Risikoprofil des Patienten (Stichwort: Komorbidität),
- die morphologische Eignung (Stichwort: Landungszone): Die Aorta ascendens muss gesund sein.

## Risikostratifizierung

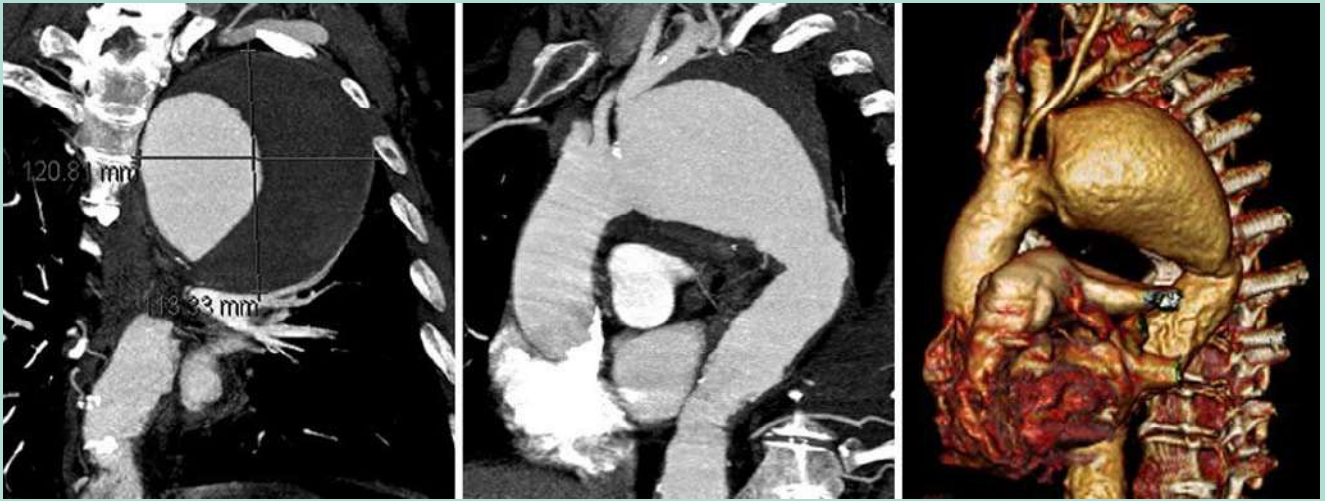
Die Arteriosklerose stellt die wesentliche Grunderkrankung der Patienten mit Aortenbogenpathologien dar. Durch die damit assoziierten kardiovaskulären Komorbiditäten definiert sich auch das typische Risikoprofil dieses Patientengutes.

Zur Beurteilung des perioperativen Risikos stehen neben der bekannten ► **ASA-Klassifikation** der sog. ► **„logistic EuroScore“** zur Verfügung [28, 30]. Der logEuroScore klassifiziert das Risiko für kardiochirurgische und offen-thorakale Aortenchirurgie, dabei gehen demographische, kardiale und operative Variablen in die Berechnung des Werts mit ein. Er gibt die Wahrscheinlichkeit bzw. das Risiko an, das ein Hochrisikopatient mitbringt, an der geplanten Operation zu versterben. In einer Analyse des eigenen Patientenguts zur endovaskulären Behandlung penetrierender Aortenulzera (PAU) lag der mediane logEuroScore bei 20,3 (2,7–94), wobei 79,2% ASA III und 14,5% ASA IV zuzuordnen waren [18]. Dies demonstriert, dass es sich bei den Betroffenen um ein hoch komorbiges und risikobehaftetes Patientengut handelt.

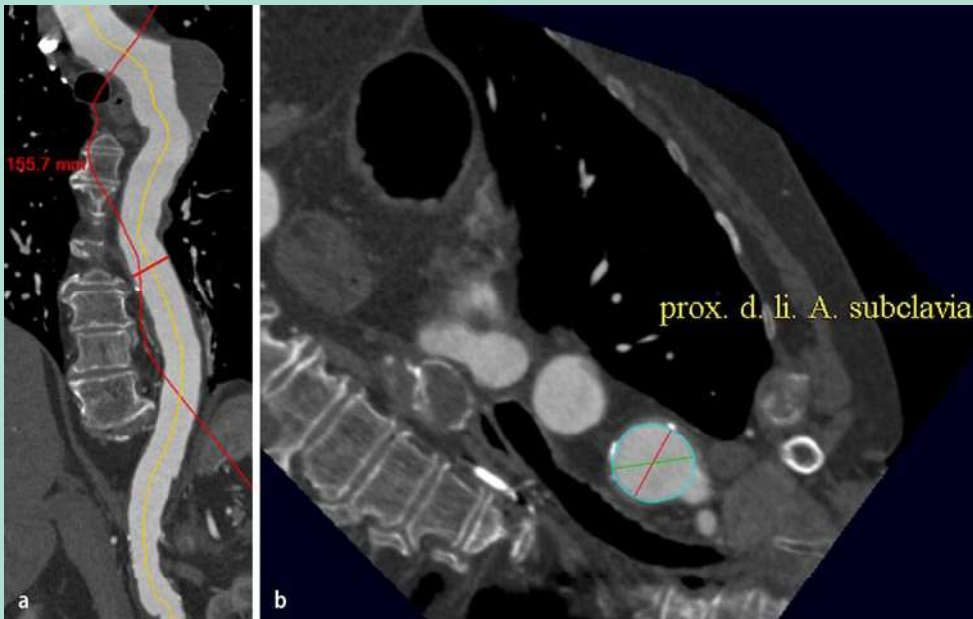
## Morphologische Selektion

Zum Zwecke der Einheitlichkeit und der Vergleichbarkeit von Therapieergebnissen haben Ishimaru et al. und Schumacher et al. jeweils eine Zoneneinteilung des Aortenbogens und seiner angrenzenden

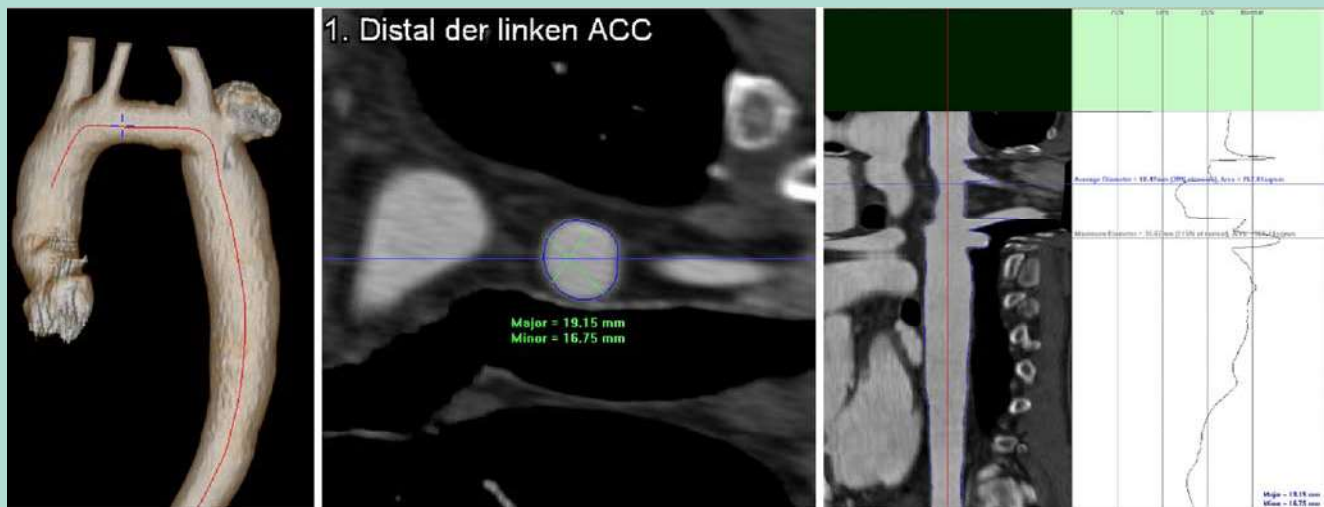




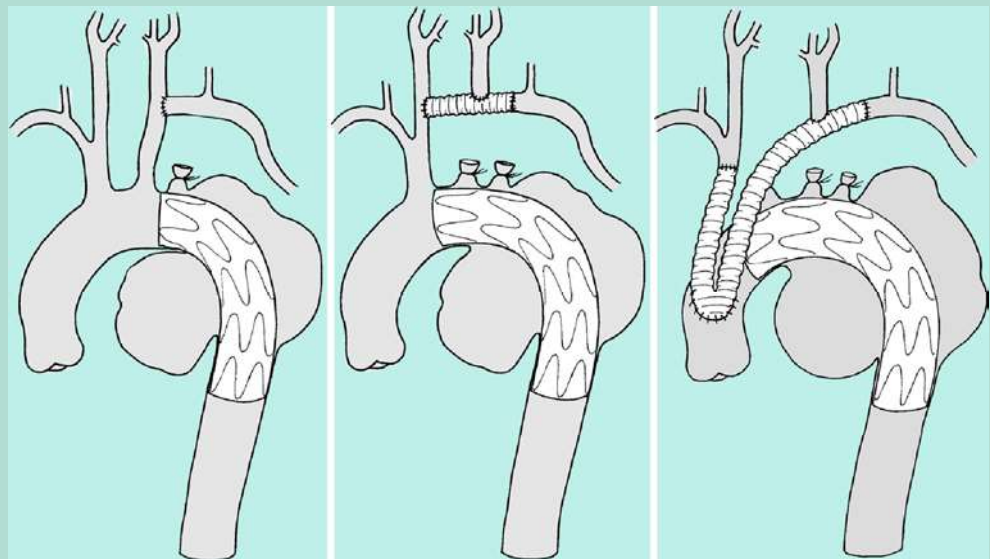
**Abb. 4** ▲ CT-Angiographie eines 83-jährigen männlichen Patienten (ASA IV) mit symptomatischem 12 cm großem Aortenbogenaneurysma, der aufgrund beider Kriterien, dem Risikoprofil und der Morphologie, von einer Hybridoperation ausgeschlossen wurde. Die CT-Angiographie bestätigt die Diagnose und zeigt in der gekrümmten MPR- und 3D-Volume-rendering-Darstellung die Pathologie in Zone 2 und 3 sowie die potenzielle proximale Verankerungszone in gesunder Zone 0. Damit wäre ein komplettes Debranching notwendig



**Abb. 5** ▲ Darstellung der gekrümmten multiplanaren Reformatierung als Centerline-Berechnung innerhalb des Lumens (gelbe Linie in **a**) und dem daraus ablesbaren orthogonalen Durchmesser (**b**) basierend auf einer 3D-CT-Angiographie. Hierbei wird der exakte Durchmesser der Aorta orthogonal zum berechneten Mittelpunkt der jeweiligen Schnittebene bestimmt. Zusätzlich kann die Länge der Pathologie (Strecke zwischen den beiden roten Querstrichen) entlang der Centerline abgelesen werden (**a**)



**Abb. 6** ▲ Image Postprocessing mit Centerline-Analyse zur Berechnung des maximalen Durchmessers der proximalen Landungszone in Höhe der linken A. carotis communis bei einem 54-jährigen Patienten mit falschem Patchaneurysma nach Operation einer Aortenisthmusstenose vor 20 Jahren



**Abb. 7** ▲ Debranchingverfahren zur Verlängerung der proximalen Landungszone in Abhängigkeit von der Ausdehnung der Pathologie in der Aorta descendens bzw. im Aortenbogen: *Links*: Subklaviatransposition mit End-zu-Seit-Anastomose der linken A. subclavia auf die linke A. carotis communis. *Mitte*: Karotido-karotidaler Cross-over-Bypass, Aortennahe Ligatur der A. subclavia links sowie der linken A. carotis communis, Dacronbypass von der rechten A. carotis communis (E/S) auf die linke A. subclavia (E/E), Reimplantation der linken A. carotis communis end zu seit in die Prothese. *rechts*: Ascendensbypass mit Anlage einer Bifurkationsprothese auf die Aorta ascendens. Der rechte Prothesenschenkel versorgt über eine End-zu-End-Anastomose den Truncus brachiocephalicus. Der linke Prothesenschenkel verläuft subklavikulär zur linken A. subclavia (E/E), die linke A. carotis communis wird in die Prothese reimplantiert (E/S). Dabei sind je nach Morphologie diverse Variationen möglich

#### ► Suffiziente proximale Landungszone

Segmente eingeführt (■ Abb. 2; [29, 37]). Die jeweiligen Landungszonen müssen gesund sein, um eine ► **suffiziente proximale Landungszone** darzustellen. In diese Beurteilung fließen neben dem größten Durchmesser, der ca. 15% unter dem größten (Diameter) verfügbaren „stent graft“ liegen sollte, auch die Qualität der Aortenwand hinsichtlich Lumen, Thrombus und Kalzifikation mit ein. Bei vielen Patienten fehlt die für eine sichere endovaskuläre Exklusion notwendige proximale gesun-

Tab. 1 Bogenhybridprozeduren	
Subklaviarevaskularisation	Transposition der linken A. subclavia bzw. karotido-subklavialer Bypass
Partielles Debranching	Transposition der linken A. subclavia und der linken A. carotis communis durch extrathorakale extraanatomische Revaskularisation/Bypassverfahren
Komplettes Debranching	Aszendensbypass durch partielle Sternotomie und partielles Clamping der Aorta ascendens

Tab. 2 Indikationen zur selektiven Revaskularisation der linken A. subclavia	
Linker Mammaria-Bypass	
Arteria lusoria (Prävalenz 0,5%)	
Verschluss oder Stenose des Truncus brachiocephalicus, der rechten A. subclavia oder A. vertebralis	
Ostium commune der linken A. subclavia und A. carotis communis	
AV-Fistel zur Hämodialyse am linken Arm	
Professionelle Linkshänder (z. B. Pianist)	

de Verankerungszone von mindestens 2 cm in der aortalen ► **Centerline** (■ Abb. 3). Die Centerline entspricht dabei einer virtuellen Strecke mitten im Aortenlumen orthogonal zum Gefäßverlauf (multiplanare Bildnachverarbeitung). Die Frage nach der morphologischen Eignung für die Durchführung eines „Bogenhybrids“ (= Patientenselektion) lässt sich deshalb nur anhand einer exzellenten, modernen Schnittbildgebung v. a. mittels CT-Angiographie (CTA) und dessen Nachverarbeitung („image postprocessing“) beantworten (■ Abb. 4).

## Diagnostik und Planung

Der Erfolg der endovaskulären Ausschaltung ist von einer adäquaten proximalen und distalen Landungszone abhängig. Diese ist definiert als nichtaneurysmatische, nicht verkalkte Gefäßwand ohne wandständige Thromben. Während bei der Versorgung des infrarenalen Aortenaneurysmas eine proximale Halslänge von 15 mm als ausreichend akzeptiert ist, beträgt diese im thorakalen Abschnitt 20 mm. Die Ausmessung und Bestimmung der proximalen Landungszone in der CTA stellt hierbei aufgrund der Krümmung bzw. anatomischen Lage des Aortenbogens sowie möglicher Bewegungsartefakte eine radiologische Herausforderung dar. Die präoperative Bildgebung ist deshalb für die Patientenselektion und die Operationsplanung und letztendlich auch für das Erreichen eines optimalen Therapieergebnisses essenziell. Neben der Diagnosesicherung stehen Ausdehnung und Lokalisation der Pathologie, deren Beziehung zu den Abgängen der supraaortalen Äste, die Beschaffenheit und der Aortendurchmesser der Landungszonen im Fokus der Bildbeurteilung und quantitativen Vermessung der Geometrien.

Von diesen Parametern wiederum hängt das Ausmaß des „supraaortalen Debranching“ (partiell oder komplett) sowie die Wahl und Dimensionierung der Endoprothese ab. Das Hybridverfahren – offen chirurgisch sowie endovaskulär – erfordert eine CTA mit einer Schichtdicke von 1 mm und eine anschließende präzise Bildnachverarbeitung („image postprocessing“) mit multiplanarer Reformatierung (MPR) orthogonal zum Gefäßverlauf kombiniert mit 3D-Gesamtansichten der Pathologie als Volumenrekonstruktion („volume rendering“; ■ Abb. 4; [41, 42]). ► **Image Postprocessing** (<http://www.ipoper.de>) beinhaltet die sog. Mittellinienberechnung („centerline“), mit der die Ausmessung der Länge und des Durchmessers der Pathologie erfolgt, die Lagebeziehung zu den supraaortalen Ästen, d. h. der Distanz zwischen linker A. subclavia (LAS) bzw. linker A. carotis communis (ACC) und Truncus brachiocephalicus (TBC) zu Beginn der Pathologie (■ Abb. 5) bestimmt wird und damit die Landungszonen definiert werden.

Mit der ► **Centerline-Berechnung** wird orthogonal der maximale Durchmesser der proximalen und distalen Verankerungszone erfasst (■ Abb. 6). Dies erlaubt bzw. erleichtert eine individuelle Auswahl der Endoprothese (Typ, Anzahl, Länge und Durchmesser) und zum anderen die Wahl des Debranching-Verfahrens (komplett/partiell). Weitere Faktoren sind in der präoperativen Bildgebung zu berücksichtigen: So muss z. B. vor einem bewussten Überstenten der LAS ohne vorherige Revaskularisation die Offenheit der rechten A. vertebralis zur Vermeidung neurologischer Komplikationen geklärt sein. Weiterhin kann in gleicher Sitzung die CT-morphologische Beurteilung der extrakraniellen Karotidgabel erfolgen. Aufgrund der bis zu 24 Fr. großen Schleusensysteme müssen die Zugangsgefäße (femoral/iliakal) mitbeurteilt werden.

Alternativ kann die Schnittbildgebung auch mittels hochauflösender ► **MR-Angiographie** (MRA) und anschließender Reformatierung erfolgen. Die derzeitigen Nachteile der MRA sind – methodisch

### ► Centerline

Die Landungszone ist definiert als nichtaneurysmatische, nicht verkalkte Gefäßwand ohne Thromben

Die präoperative Bildgebung ist für die Patientenselektion und Operationsplanung essenziell

Die CTA erfolgt mit präziser Bildnachverarbeitung, multiplanarer Reformatierung und Volumenrekonstruktion

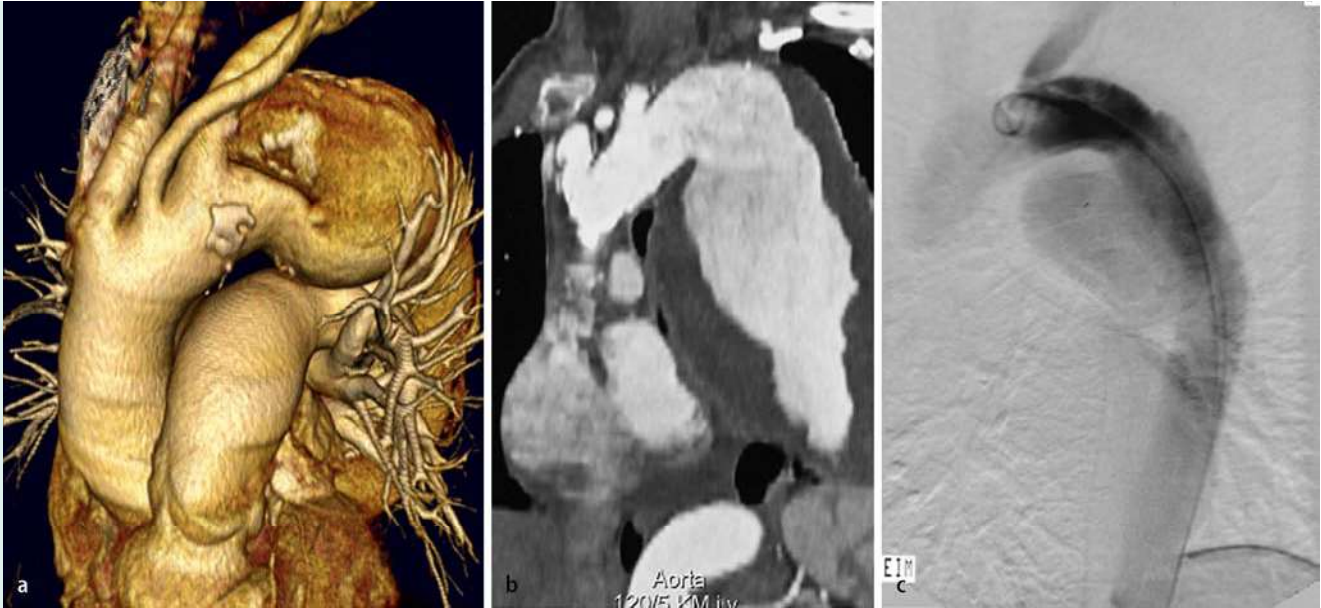
### ► Image Postprocessing

### ► Centerline-Berechnung

Zur Vermeidung neurologischer Komplikationen muss die Offenheit der rechten A. vertebralis geklärt sein

### ► MR-Angiographie





**Abb. 8** ▲ Läsionen der parasubklavialen Aorta descendens in der CT-Angiographie. **a** Chronisch expandierende B-Dissektion, **b** Aneurysma des Aortenbogens, **c** traumatischer Aortenabriss in der intraoperativen DSA

bedingt – längere Untersuchungszeiten, höhere Kosten, Ausschluss beatmeter Intensivpatienten bzw. Schrittmacher-/ Defibrillatorpatienten, eingeschränkte Verfügbarkeit im Notfall, aber auch qualitativ bedingt z. B. durch fehlenden Kalknachweis. Ausführliche Informationen über die Methode und den derzeitigen Goldstandard der modernen Schnittbildgebung gibt ein aktuell publizierter Review-Artikel unserer Arbeitsgruppe [42].

### Operative Techniken

Die Mehrzahl der Aortenpathologien sind in der proximalen Deszendens oder im Aortenbogen selbst lokalisiert. Um eine ausreichend lange und qualitativ gesunde Verankerungszone im Aortenbogen zu erreichen, sind verschiedene operative Techniken und Strategien entwickelt und publiziert worden [11, 14, 38]. Die Bogenhybridprozeduren unterscheiden sich nach ihrem Ausmaß des Debranching. Man unterscheidet die Subklaviarevaskularisation, das partielle und komplette „Debranching“ (■ Tab. 1, ■ Abb. 7).

### Operative Versorgung der linken A. subclavia (LAS)

Zahlreiche Läsionen befinden sich typischer Weise in der parasubklavialen Aorta descendens. Beispiele sind die Typ-B-Dissektion, das Bogenaneurysma und der traumatische Abriss (■ Abb. 8). Das bewusste Überstenten der LAS oder deren regelmäßige Revaskularisation ist und bleibt ein Streitpunkt. Zahlreiche Autoren berichten, dass das primäre Überstenten der linken A. subclavia durchführbar ist und von Patienten gut toleriert wird [11, 19, 25]. Die zuletzt publizierten Daten des EUROSTAR-Registers haben jedoch gezeigt, dass dieses Manöver bei einer „odds ratio“ von 4 mit einem erhöhten Paraplegierisiko assoziiert ist [6], sodass wiederum von anderen Kollegen argumentiert wird, dass die LAS stets vorangeschaltet revaskularisiert werden muss. Die statistischen Analysen des EUROSTAR-Registers beinhalten nach wie vor methodische Einschränkungen, sodass die Diskussion anhält und eine eindeutige und endgültige Antwort aussteht.

Die Subklaviatransposition bzw. der karotido-subklaviale Bypass ist nämlich ebenfalls mit einer kombinierten Morbidität und Mortalität von 3,8% assoziiert [10]. Bezüglich der Armdurchblutung ist die A. subclavia gut kollateralisiert und verursacht selten eine Armclaudicatio (<5%). Die Inzidenz eines klinisch relevanten ► **Subclavian-steal-Syndroms** nach Überstenten der LAS ist mit 2,3% selten, auch wenn ein retrograder Fluss in der Duplexsonographie der linken A. vertebralis nachzuweisen ist. Weiterhin ist die Gefahr ► **vertebrobasilärer Infarkte** zu nennen, diese sind aber meist em-

Die Bogenhybridprozeduren unterscheiden sich nach ihrem Ausmaß des Debranching

Das primäre Überstenten der linken A. subclavia ist mit einem erhöhten Paraplegierisiko assoziiert

► **Subclavian-steal-Syndroms**  
► **Vertebrobasiläre Infarkte**





**Abb. 9** ▲ Schnittführung für das komplette Debranching

us / infrahyale Muskulatur) oder retropharyngeal/prävertebral erfolgen. Letztere ist technisch nicht schwierig, kosmetisch ansprechend und stellt den direkten Weg zwischen den Gefäßen dar. Extern beringte Prothesen sollten wegen einer möglichen Dysphagie vermieden werden. Bei ausreichender Länge kann die linke ACC auch proximal transponiert werden. Bei einem ► **Truncus bicaroticus** (engl. „bovine arch“ – Prävalenz bis zu 10%) muss ein komplettes Debranching erfolgen. Bei Durchführung des karotido-subklavialen Bypasses müssen rechte proximale ACC und LAS zur Vermeidung einer Typ-II-Endoleckage ligiert werden.

### Operative Versorgung des Truncus brachiocephalicus

Bei Notwendigkeit der Transposition aller 3 supraaortischen Gefäße erfolgt die Revaskularisation durch einen Bypass von der proximalen Aorta ascendens zum Truncus brachiocephalicus. Ein Crossover-Bypass zur linken A. subclavia mit Reinsertion der linken A. carotis communis komplettiert die Transposition. Zugang ist die partielle Sternotomie mit partiellem Ausklemmen der Aorta ascendens und eine linksseitige supraklavikuläre Inzision (■ **Abb. 9**). Die supraaortalen Äste werden sequenziell präpariert und jeweils end-zu-end anastomosiert (■ **Abb. 10**). Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, über ein Conduit in antegrader Implantationstechnik simultan den Endograft zu positionieren.

### Implantation von Endografts im Aortenbogen

Bezüglich der standardisierten endovaskulären Implantationsschritte verweisen wir auf die publizierten CME-Artikel zur Versorgung des thorakalen Aortenaneurysmas, der Stanford-B-Dissektion und des traumatischen Aortenabrisses [4, 5, 36]. Die Auswahl der Endograft-Größe („sizing“) erfolgt wie beschrieben anhand der Ausmessungen der CTA in der Centerline-Messung. Die Implantation in Zone 3 kann in örtlicher Betäubung bzw. rückenmarknaher Narkose im Operationssaal erfolgen. In Zone 0–2 ist im Falle der Anwendung eines ► **adenosininduzierten Herzstillstands** die Vollnarkose zwingend erforderlich. Bei Pathologien, die im Aortenbogen selbst oder im distalen Abschnitt gelegen sind, kann der Einsatz eines temporären durch Adenosin induzierten Herzstillstands von großem Nutzen sein. Ziel ist die Vermeidung einer distalen Endograftmigration und Fehlplatzierung während der Freisetzung, verursacht durch die propulsiven systolischen Flusskräfte (aortale Compliance und Windkesseneffekt). In der Stillstandzeit von 20–30 s kann die Endoprothese präzise freigesetzt werden. Der Herzstillstand ist selbstlimitierend. Das Adenosin wird rasch abgebaut, wonach wieder ein spontaner Sinusrhythmus eintritt. Als Sicherheitsleine wird ein externer Schrittmacher eingesetzt, über dessen Aktivierung der Stillstand jederzeit aufgehoben werden kann. Andere

bolisch und nicht hämodynamisch bedingt. ■ **Tab. 2** gibt Indikationen zur selektiven Revaskularisation der LAS an.

### Operative Versorgung der linken A. carotis communis

Im Regelfall wird die linke A. carotis communis (ACC) zusammen mit der linken A. subclavia durch einen extrathorakalen karotidalen Crossover-Bypass von rechts nach links versorgt. Die linke ACC wird E/S in den Bypass reinsertiert. Die Bypassführung kann entweder prätracheal bzw. submuskulär (M. sternocleidomastoideus

Der extrathorakale karotidale Crossover-Bypass kann retropharyngeal/prävertebral erfolgen

### ► Truncus bicaroticus

Die Implantation in Zone 3 kann in örtlicher Betäubung bzw. rückenmarknaher Narkose erfolgen

### ► Adenosininduzierter Herzstillstand

In der Stillstandzeit von 20–30 s kann die Endoprothese präzise freigesetzt werden

Zugangsgefäß ist typischerweise die A. femoralis communis

► „Nose cone“

Durchschnittlich beträgt die 30-Tage-Letalität 9,8% und die Schlaganfallrate 3%

► Proximale Typ-I-Endoleckage

Ein Zuwarten mit engmaschigen CTA-Kontrollen ist im Einzelfall gerechtfertigt

► Bypassfrühverschlüsse

**Tab. 3 Internationale Ergebnisse des Hybridverfahrens**

Erstautor/ Zentrum	Jahr	Pati- enten (n)	Krankenhaus- letalität [%]	1-Jahres- Überle- bensrate [%]	Apoplex- rate [%]	Nicht letale Kompli- kationen [%]	Persistie- rende Typ- I-Endole- ckagen	Follow- up in Mona- ten
Schumacher/ Heidelberg [38]	2006	25	16	80	0	44	12	21
Bergeron/ Paris [2]	2006	25	8	88	8	12	12	15
Melissano/ Mailand [27]	2007	37	11	86	5,4	9,4	21	19
Czerny/ Wien [13]	2007	27	7,4	83	0	72	7,5	15
Heidelberg	2008	40	7,5	87,5	2,5	35	10	28
Summe			10	85	3	35	13	20

Ausgewählte Literatur: Studien mit mehr als 20 Patienten.

Zentren führen lediglich eine Absenkung des systemischen Spitzendrucks zum Zeitpunkt der Freisetzung durch.

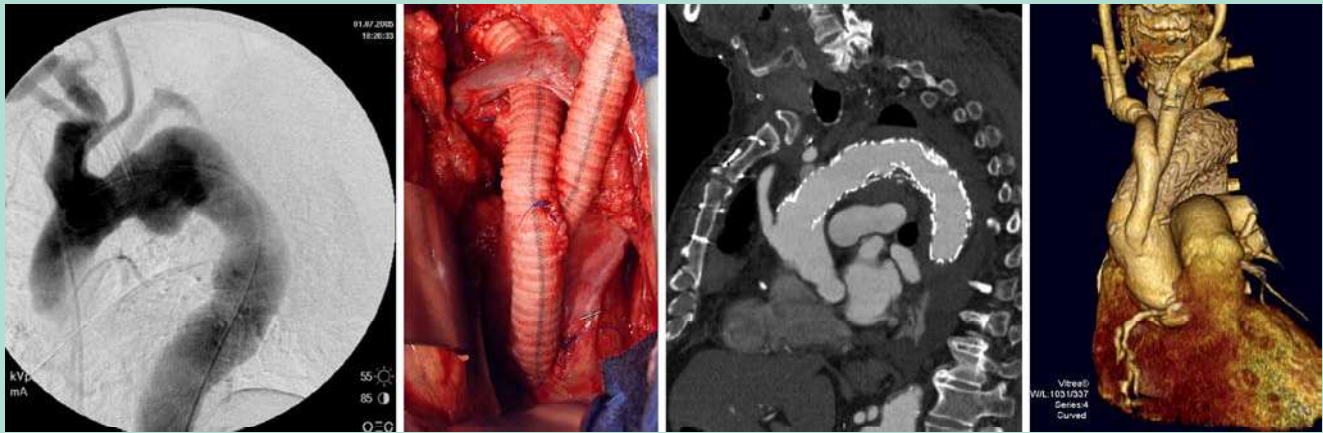
Die meisten Zentren planen bei Elektivpatienten den endovaskulären Eingriff in einer 2. Operation, obwohl keine eindeutige Datenlage zum zeitlichen Vorgehen ein- vs. zweizeitig vorliegt. Zugangsgefäß ist typischerweise die A. femoralis communis, selten auch ein iliakales Conduit. Allgemein erfordert der Aortenbogen ein flexibles Endograftsystem mit weicher Spitze (► „nose cone“). Proximale „bare stents“, d. h. nicht prothesengeschützte freie Metallstreben sollten aus Sicht der Autoren im Aortenbogen wegen der Gefahr einer retrograden Dissektion vermieden werden.

## Ergebnisse

Nach Erstbeschreibung Ende der 1990er Jahre durch J. Buth et al. konnte in einigen kleineren Fallserien die technische Machbarkeit dieser Hybridverfahren beim Hochrisikopatienten gezeigt werden [7, 12, 37, 38, 45]. Eine aktuelle Literaturübersicht von Publikationen mit mehr als 20 Patienten zeigt ► **Tab. 3** [2, 13, 27]. Bei 47% der hier erfassten 129 Patienten wurde eine komplette Transposition der supraaortalen Äste durchgeführt. Durchschnittlich beträgt die 30-Tage-Letalität 9,8% (Spannbreite 7,4–11%) und die Schlaganfallrate 3%. Als potenzielle Apoplexursachen kommen hierbei Embolien durch Draht- bzw. Kathetermanipulationen im oftmals kalzifizierten Aortenbogen und Embolien im Rahmen der Ausklemmung supraaortaler Äste in Frage. Neurologische Komplikationen sind deshalb von besondere Bedeutung, da der perioperative bzw. periinterventionelle Schlaganfall einen direkten und signifikanten Einfluss auf die perioperative Sterblichkeit hat [31]. Paraplegien und Paraparesen wurden nicht beobachtet. Die derzeitig publizierten 1- bzw. 3-Jahres Überlebensraten betragen 88% bzw. 72% [2, 27, 38].

Die „Achillesferse“ der endovaskulären Therapie im Aortenbogen stellt sicher das Problem der ► **proximalen Typ-I-Endoleckage** dar. Dies ist zum einen durch die anatomische Situation (oftmals steiler Bogen, sog. „gothic arch“), zum anderen aber auch durch die nicht für die Aortenbogenanatomie konstruierten Endograftsysteme bedingt. Endoleckageraten nach Bogenhybridverfahren werden zwischen 14,8% und 19,2% angegeben, wobei hier mit 93% proximale Typ-Ia-Endoleckagen im Vordergrund stehen [2, 13, 27]. Melissano et al. konnten dabei zeigen, dass eine proximale Verankerung in Zone 0 zwar die Endoleckagerate senkt, dafür aber (nicht signifikant) die Schlaganfallrate und 30-Tage-Letalität steigt [27]. Da es sich oftmals um kleinere Endoleckagen handelt und eine proximale Verlängerung selten möglich ist, erscheint ein Zuwarten mit engmaschigen CTA-Kontrollen im Einzelfall unter Umständen gerechtfertigt, da alternativ nur der bereits initial ausgeschlossene offene Bogenersatz in Frage käme.

► **Bypassfrühverschlüsse** extranatomischer Rekonstruktionen sind im Einzelfall beschrieben und können zu schwerwiegenden neurologischen Komplikationen führen [2]. Im Rahmen der Nachsorge sollte neben der Stentbeurteilung daher unbedingt auf Offenheit, Stenose- und Thrombusbildung im Bypass geachtet werden.



**Abb. 10** ▲ Operative Versorgung des Truncus brachiocephalicus. **a** Intraoperative Angiographie des Bogenaneurysmas, **b** intraoperativer Situs nach Anlage eines Ascendensbypass, **c** postoperative curved-MPR-CT-Angiographie, **d** 3-D-Rekonstruktion nach Ascendensersatz und thorakaler endovaskulärer Aortenrekonstruktion

## Diskussion

Hybridverfahren stellen eine neue Alternative des Aortenbogensersatzes beim Risikopatienten dar. Die überwiegende Mehrzahl der thorakalen Pathologien ist am distalen Aortenbogen lokalisiert oder bezieht diesen mit ein. Dilatative Erkrankungen (Aneurysma, Dissektion, Plaqueruptur) des Aortenbogens erforderten bisher eine offen-chirurgische, transthorakale Rekonstruktion zumeist unter Einsatz der Herz-Lungen-Maschine zur Aufrechterhaltung der zerebralen Perfusion. Die Weiterentwicklung endovaskulärer Techniken insbesondere in den vergangenen 5 Jahren hat gezeigt, dass auch etablierte invasive chirurgische Standardverfahren zur Therapie pathologischer Veränderungen der thorakalen Aorta überdacht und durch endoluminale Strategien ergänzt und erweitert werden können. Dies gilt für den kardiopulmonalen Risikopatienten nach vorausgegangenem kardiochirurgischen Eingriffen, insbesondere jedoch für den Notfallpatienten im Stadium der Ruptur mit hämorrhagischem Schock. Die Ergebnisse der offenen Chirurgie sind für diese Patienten noch unbefriedigend und mit einer hohen Morbiditäts- und Mortalitätsrate verbunden. Die aktuellen publizierten Daten für den konventionellen kompletten Aortenbogensersatz mit hypothermer extrakorporaler Zirkulation zeigen eine frühe Mortalität von 8,5–25,2% bei elektiven Operationen und bis zu 53,3% bei Notfalleingriffen [20]. Die Inzidenz des postoperativen permanenten neurologischen Defizits betrug 12,8% bzw. 46,7%. Schepens et al. berichten über eine 4%ige permanente und 2%ige temporäre neurologische Komplikationsrate bei 100 Patienten in einer retrospektiven Studie über die Elefant-trunk-Technik. In einer univariaten Analyse waren vor allem Notfalleingriffe mit einem erhöhten Risiko assoziiert ( $p=0,018$ ; [35]). Kazui et al. berichtet beim offenen Bogenersatz trotz antegrader selektiver Zerebralperfusion eine neurologische Komplikationsrate von 4,2%. Die zerebrale Protektion und Prävention von Embolisierungen bleiben die Herausforderung für den offenen Bogenersatz [23].

Vor diesem Hintergrund muss der Stellenwert der minimal-invasiven endovaskulären Rekonstruktion für die Behandlung von Pathologien am Aortenbogen (Aneurysmen, Plaquerupturen, Dissektionen) evaluiert werden. Die anatomische Lagebeziehung zu den supraaortischen Gefäßen führt dazu, dass die meisten thorakalen Läsionen am distalen Aortenbogen eine Positionierung der Endoprothese über den Abgang der A. subclavia links als Regelfall, in einigen Fällen auch der linken A. carotis oder auch des Truncus brachiocephalicus erforderlich machen, um eine ausreichend lange proximale Landungszone von mehr als 15 mm zu erreichen [19]. In Übereinstimmung mit der internationalen Literatur zeigen auch unsere Erfahrungen, dass ein ostialer Subklaviaverschluss klinisch toleriert wird, eine Revaskularisation ist nur in seltenen Ausnahmefällen erforderlich [25]. Die sog. ► **„Off-pump-Gefäßchirurgie“** (ohne Einsatz der Herz-Lungen-Maschine) kombiniert die minimal-invasive endovaskuläre Aortenrekonstruktion mit etablierter konventioneller supraaortischer Bypasschirurgie. Diese offen-chirurgische Transposition der Kopf-Hals-Gefäße wird zur Schaffung einer sicheren, ausreichend langen proximalen aortalen Verankerungszone für die thorakale Endoprothese notwendig. Entscheidend für den Erfolg der endovaskulären thorakalen Aortenrekonstruktion ist in besonderem Maße die enge Kooperation mit dem diagnostischen Radiologen und dem

Die offene Chirurgie ist für Notfallpatienten mit einer hohen Morbiditäts- und Mortalitätsrate verbunden

Die zerebrale Protektion und Prävention von Embolisierungen bleiben die Herausforderung für den offenen Bogenersatz

► **„Off-pump-Gefäßchirurgie“**



Durch pharmakologisch induzierten temporären Herzstillstand wird es möglich, die Endoprothese sehr präzise zu positionieren

Bisherige Studien zu „branched endografts“ lassen keine Rückschlüsse hinsichtlich mittel- oder langfristigen Ergebnissen zu

#### ► „Custom-made devices“

Hybridverfahren stellen individuell oft die einzige Therapiealternative dar

Anästhesisten. Durch pharmakologisch induzierten (intravenöses Adenosin) temporären Herzstillstand (AIHS) wird es möglich, auch bei schwieriger aortaler Morphologie (Kinking am distalen Bogen), die Endoprothese sehr präzise ohne Störung durch die pulsilen aortalen Windkesselkräfte und dislozierenden intraaortalen High-Flow-Dislokationskräfte zu positionieren und abzusetzen. Andere Arbeitsgruppen setzen einen intraarteriellen Ballon, eine kontrollierte Hypotension, ventrikuläre Fibrillation oder den kardiopulmonalen Bypass ein, um die dislozierenden Kräfte zu reduzieren. Wir haben unseren ersten Patienten unter kontrollierter Hypotension wegen eines konsekutiven Herzinfarkts verloren und halten den AIHS für eine geeignete und sichere Methode [44].

Ein Vergleich des konventionellen Bogenersatzes mit den Ergebnissen der hier vorgestellten Bogenhybridverfahren ist schwierig, da Bogenhybridverfahren oftmals nur solchen Hochrisikopatienten angeboten werden, die kardiologisch, kardiochirurgisch und/oder anästhesiologisch als primär nicht geeignet für einen konventionellen Bogenersatz mit „elefant – oder „frozen elefant trunk“ angesehen werden.

Seit Einführung sog. „Branched-endograft-Systeme“ Ende der 1990er Jahre findet eine kontinuierliche Entwicklung dieser Technik statt. Trotzdem ist die Evidenz dieser Methode im Aortenbogen auf wenige kleine Fallserien und Fallberichte limitiert [1, 8, 17, 21, 43]. Diese belegen zwar die technische Machbarkeit lassen jedoch keine Rückschlüsse hinsichtlich mittel- oder gar langfristigen Ergebnissen zu. Derzeit ist kein Branched-endograft-System kommerziell erhältlich, sodass es sich hierbei immer um individuell angefertigte, ► „custom-made devices“ handelt. Die maßgeschneiderte Anfertigung dieser Prothesen benötigt in der Regel mehrere Wochen bis Monate, sodass aktuell keine Verfügbarkeit dieser Methode im Notfall besteht. Trotzdem bietet diese Methode sicher zukünftig das größte Potential in der Therapie komplexer Aortenbogenpathologien.

Trotz geringer Fallzahlen stellen Hybridverfahren für Risikopatienten eine potenziell effiziente Therapieoption von Aortenbogenläsionen dar. Diese Verfahren sind technisch anspruchsvoll, sie stellen individuell oft die einzige Therapiealternative dar. Sie erfordern zur Planung eine perfekte Schnittbildgebung und Nachverarbeitung. Die morphologische Klassifikation der Verankerungszonen ist eine gute Hilfestellung zur Wahl der Rekonstruktionsverfahren. Die ideale Endoprothese für dieses morphologisch sehr anspruchsvolle Aortensegment existiert noch nicht.

## Offene Fragen

Folgende Fragen bleiben derzeit unbeantwortet und müssen durch größere Fallzahlen, längere Auswertungszeiträume und den technischen Fortschritt untersucht werden:

- Sind kommerzielle „branched endografts“ zukünftig kurzfristig verfügbar?
- Ist der antegrade simultane oder retrograde (transfemorale) Zugang besser?
- Ist ein ein- oder zweizeitiges Vorgehen indiziert?
- Wie sieht der ideale Stentgraft für den Aortenbogen aus?
- Was macht einen Patienten zum Hochrisikopatient?

## Fazit für die Praxis

Standardtherapie proximaler und mittlerer Aortenbogenpathologien bleibt der konventionell offene Bogenersatz. Hybridverfahren bieten jedoch, insbesondere beim Hochrisikopatienten, eine Alternative mit guten perioperativen und mittelfristigen Ergebnissen. Es handelt sich, besonders beim kompletten Debranching, um technisch sehr anspruchsvolle Operationen, die einer sorgfältigen präoperativen Planung bedürfen. Zumindest bis zur Entwicklung kommerzieller „Branched-endograft-Systeme“ bieten Bogenhybridverfahren u. a. im Notfall eine zusätzliche Therapieoption.

## Korrespondenzadresse

Prof. Dr. D. Böckler\*



Klinik für Gefäßchirurgie, vaskuläre und endovaskuläre Chirurgie,  
Chirurgische Universitätsklinik Heidelberg  
Im Neuenheimer Feld 110, 69120 Heidelberg  
dittmar.boeckler@med.uni-heidelberg.de

**Interessenkonflikt.** Der korrespondierende Autor gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.



## Literatur

- Baldwin ZK, Chuter TA, Hiramoto JS et al. (2008) Double-barrel technique for endovascular exclusion of an aortic arch aneurysm without sternotomy. *J Endovasc Ther* 15: 161–165
- Bergeron P, Coulon P, De Chaumray T et al. (2005) Great vessels transposition and aortic arch exclusion. *J Cardiovasc Surg (Torino)* 46: 141–147
- Blankensteijn JD, Jong SE de, Prinssen M et al. (2005) Two-year outcomes after conventional or endovascular repair of abdominal aortic aneurysms. *N Engl J Med* 352: 2398–2405
- Böckler D, Schumacher H, Leszczynski et al. (2007) Endovaskuläre Therapie des traumatischen Aortenabrisse. *Gefäßchirurgie* 12: 139–150
- Böckler D, Schumacher H, von Tengg-Kobligk et al. (2005) Endovaskuläre Therapie akuter und chronischer Stanford B-Dissektionen. *Gefäßchirurgie* 10: 293–313
- Buth J, Harris PL, Hobo R et al. (2007) Neurologic complications associated with endovascular repair of thoracic aortic pathology: Incidence and risk factors. A study from the European Collaborators on Stent/Graft Techniques for Aortic Aneurysm Repair (EUROSTAR) registry. *J Vasc Surg* 46: 1103–1110; discussion 1110–1101
- Buth J, Penn O, Tielbeek A et al. (1998) Combined approach to stent-graft treatment of an aortic arch aneurysm. *J Endovasc Surg* 5: 329–332
- Chuter TA, Buck DG, Schneider DB et al. (2003) Development of a branched stent-graft for endovascular repair of aortic arch aneurysms. *J Endovasc Ther* 10: 940–945
- Chuter TA, Schneider DB, Reilly LM et al. (2003) Modular branched stent graft for endovascular repair of aortic arch aneurysm and dissection. *J Vasc Surg* 38: 859–863
- Cina CS, Safar HA, Lagana A et al. (2002) Subclavian carotid transposition and bypass grafting: consecutive cohort study and systematic review. *J Vasc Surg* 35: 422–429
- Criado FJ, Barnatan MF, Rizk Y et al. (2002) Technical strategies to expand stent-graft applicability in the aortic arch and proximal descending thoracic aorta. *J Endovasc Ther* 9 (Suppl 2): II32–38
- Czerny M, Gottardi R, Zimpfer D et al. (2006) Transposition of the supraaortic branches for extended endovascular arch repair. *Eur J Cardiothorac Surg* 29: 709–713
- Czerny M, Gottardi R, Zimpfer D et al. (2007) Mid-term results of supraaortic transpositions for extended endovascular repair of aortic arch pathologies. *Eur J Cardiothorac Surg* 31: 623–627
- Eskandari MK (2006) Aortic debranching procedures to facilitate endografting. *Perspect Vasc Surg Endovasc Ther* 18: 287–292
- EVAR trial participants (2005) Endovascular aneurysm repair and outcome in patients unfit for open repair of abdominal aortic aneurysm (EVAR trial 2): randomised controlled trial. *Lancet* 365: 2187–2192
- EVAR trial participants (2005) Endovascular aneurysm repair versus open repair in patients with abdominal aortic aneurysm (EVAR trial 1): randomised controlled trial. *Lancet* 365: 2179–2186
- Ferreira M, Chuter T, Hartley D et al. (2007) Hybrid repair of aortic arch aneurysms: a totally extrathoracic approach with branched endografts in two patients. *Vascular* 15: 79–83
- Geisbüsch P, Kotelis D, Weber T et al. (2008) Early and midterm results after endovascular stent graft repair of penetrating aortic ulcers. *J Vasc Surg (in press)*
- Gorich J, Asquan Y, Seifarth H et al. (2002) Initial experience with intentional stent-graft coverage of the subclavian artery during endovascular thoracic aortic repairs. *J Endovasc Ther* 9 (Suppl 2): II39–43
- Hayashi J, Eguchi S, Yasuda K et al. (1997) Operation for nondissecting aneurysm in the descending thoracic aorta. *Ann Thorac Surg* 63: 93–97
- Inoue K, Hosokawa H, Iwase T et al. (1999) Aortic arch reconstruction by transluminally placed endovascular branched stent graft. *Circulation* 100: II316–321
- Karck M, Chavan A, Khaladj N et al. (2005) The frozen elephant trunk technique for the treatment of extensive thoracic aortic aneurysms: operative results and follow-up. *Eur J Cardiothorac Surg* 28: 286–290
- Kazui T, Yamashita K, Washiyama N et al. (2002) Usefulness of antegrade selective cerebral perfusion during aortic arch operations. *Ann Thorac Surg* 74: S1806–1809
- Kazui T, Yamashita K, Washiyama N et al. (2007) Aortic arch replacement using selective cerebral perfusion. *Ann Thorac Surg* 83: S796–798
- Kotelis D, Geisbüsch P, Von Tengg-Kobligk H et al. (2008) Paraplegie nach endovaskulärer Therapie der thorakalen Aorta. *Zentralbl Chir (in press)*
- Liu ZG, Sun LZ, Chang Q et al. (2006) Should the „elephant trunk“ be skeletonized? Total arch replacement combined with stented elephant trunk implantation for Stanford type A aortic dissection. *J Thorac Cardiovasc Surg* 131: 107–113
- Melissano G, Civilini E, Bertoglio L et al. (2007) Results of endografting of the aortic arch in different landing zones. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 33: 561–566
- Michel P, Roques F, Nashef SA (2003) Logistic or additive EuroSCORE for high-risk patients? *Eur J Cardiothorac Surg* 23: 684–687
- Mitchell RS, Ishimaru S, Ehrlich MP et al. (2002) First International Summit on Thoracic Aortic Endografting: roundtable on thoracic aortic dissection as an indication for endografting. *J Endovasc Ther* 9 (Suppl 2): II98–105
- Nashef SA, Roques F, Michel P et al. (1999) European system for cardiac operative risk evaluation (EuroSCORE). *Eur J Cardiothorac Surg* 16: 9–13
- Okita Y, Ando M, Minatoya K et al. (1999) Predictive factors for mortality and cerebral complications in arteriosclerotic aneurysm of the aortic arch. *Ann Thorac Surg* 67: 72–78
- Prinssen M, Verhoeven EL, Buth J et al. (2004) A randomized trial comparing conventional and endovascular repair of abdominal aortic aneurysms. *N Engl J Med* 351: 1607–1618
- Saleh HM, Inglese L (2006) Combined surgical and endovascular treatment of aortic arch aneurysms. *J Vasc Surg* 44: 460–466
- Sayed S, Thompson MM (2005) Endovascular repair of the descending thoracic aorta: evidence for the change in clinical practice. *Vascular* 13: 148–157
- Schepens MA, Dossche KM, Morshuis WJ et al. (2002) The elephant trunk technique: operative results in 100 consecutive patients. *Eur J Cardiothorac Surg* 21: 276–281
- Schumacher H, Böckler D, Allenberg JR (2005) Endovaskuläre Therapie thorakaler Aortenaneurysmen. *Gefäßchirurgie* 10: 203–220
- Schumacher H, Böckler D, Bardenheuer H et al. (2003) Endovascular aortic arch reconstruction with supra-aortic transposition for symptomatic contained rupture and dissection: early experience in 8 high-risk patients. *J Endovasc Ther* 10: 1066–1074
- Schumacher H, Von Tengg-Kobligk H, Ostovic M et al. (2006) Hybrid aortic procedures for endoluminal arch replacement in thoracic aneurysms and type B dissections. *J Cardiovasc Surg (Torino)* 47: 509–517
- Spielvogel D, Halstead JC, Meier M et al. (2005) Aortic arch replacement using a trifurcated graft: simple, versatile, and safe. *Ann Thorac Surg* 80: 90–95
- Strauch JT, Spielvogel D, Lauten A et al. (2004) Technical advances in total aortic arch replacement. *Ann Thorac Surg* 77: 581–589
- von Tengg-Kobligk H, Weber TF, Rengier F et al. (2007) Image postprocessing of aortic CTA and MRA. *Radiologie* 47: 1003–1011
- Von Tengg-Kobligk H, Weber TF, Rengier F et al. (2008) Imaging modalities for the thoracic aorta. *J Cardiovasc Surg (Torino)* 49: 429–447
- Wang ZG, Li C (2005) Single-branch endograft for treating stanford type B aortic dissections with entry tears in proximity to the left subclavian artery. *J Endovasc Ther* 12: 588–593
- Weigand MA, Schumacher H, Allenberg JR et al. (1999) Adenosine-induced heart arrest for endovascular reconstruction of thoracic aneurysms of the aorta. *Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther* 34: 372–375
- Zhou W, Reardon M, Peden EK et al. (2006) Hybrid approach to complex thoracic aortic aneurysms in high-risk patients: surgical challenges and clinical outcomes. *J Vasc Surg* 44: 688–693