

Gefäßchirurgie

<https://doi.org/10.1007/s00772-019-00562-x>

© Springer Medizin Verlag GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

M. S Bischoff¹ · A. Gombert² · A. Brcic³ · S. Jungi^{1,4} · K. von Aspern⁵ · M. Wortmann¹ · K. Meisenbacher¹ · D. Böckler¹¹ Klinik für Gefäßchirurgie und Endovaskuläre Chirurgie, Universitätsklinikum Heidelberg, Heidelberg, Deutschland² Europäisches Gefäßzentrum Aachen-Maastricht, Universitätsklinikum RWTH Aachen, Aachen, Deutschland³ Anästhesiologische Klinik, Universitätsklinikum Heidelberg, Heidelberg, Deutschland⁴ Universitätsklinik für Herz- und Gefäßchirurgie, Inselspital, Universitätsspital, Universität Bern, Bern, Schweiz⁵ Klinik für Herzchirurgie, Universitätsklinikum Leipzig, Leipzig, Deutschland

Intraoperatives Monitoring in der konventionellen und endovaskulären Aortenchirurgie – Neue Verfahren

Einleitung

Der hier vorliegende zweite Teil der Übersichtsarbeit zum Thema „Intraoperatives Monitoring in der konventionellen und endovaskulären Aortenchirurgie“ befasst sich mit aktuell in der Entwicklung/Überprüfung befindlichen Monitoringverfahren. Die zugrunde liegende Methodik dieser „new kids on the block“ ist dabei nicht grundlegend neu. Vielmehr wurde ihre Anwendung in die Aortenchirurgie tradiert bzw. für die endovaskuläre Applikation erweitert. Die transkraniale Doppler-Sonographie (TKDS) wird in der Neurologie bereits seit mehreren Dekaden verwendet und aktuell sowohl in der offenen wie endovaskulären Aortenchirurgie reevaluiert. Sie adressiert ein heißes Eisen der endovaskulären Aortenchirurgie: den perioperativen Schlaganfall [34]. Auch die Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) findet als zerebrale NIRS (cNIRS) im Rahmen des Neuromonitorings bereits seit geraumer Zeit in der konventionellen Chirurgie Verwendung [6, 17]. Hierin wird hingegen die neuere Applikation des NIRS im Sinne des Kollateralnetzwerkmonitorings (cnNIRS) dargestellt. Als letzte Monitoringmodalität soll die intraoperative kontrastmittelgestütz-

te Cone-Beam-Computertomographie (KM-CBCT) vorgestellt werden. Im Bereich der infrarenalen Aorta wird die KM-CBCT bereits erfolgreich zur Qualitätssicherung nach EVAR angewandt [28, 33]. Hierin soll auch über ihre Verwendung im Bereich der thorakalen und thorakoabdominellen Aorta berichtet werden.

Die Autoren weisen darauf hin, dass es sich bei dem vorliegenden Artikel um eine Übersichtsarbeit handelt, die spezifisch und akzentuiert auf die o.g. Monitoringverfahren eingeht. Zur Vertiefung der jeweiligen Thematik sei auf die ausführliche Literaturliste verwiesen.

Transkraniale Doppler-Sonographie

Die Einführung der transkranialen Doppler-Sonographie (TKDS) erfolgte in den frühen 1980er-Jahren zur Detektion von Vasospasmen bei Patienten mit Subarachnoidalblutung. Später wurde die Verwendung des Verfahrens auf die Diagnostik von physiologischen/pathologischen Flussmustern im Circulus arteriosus Willisii und Stenosierungen des vorderen (Carotissiphon, Aa. cerebri media und anterior) und hinteren zerebralen Kreislaufs (intra-

kraniale Aa. vertebralis und basilaris) ausgeweitet. Hauptindikationsgebiet der nicht invasiven, ubiquitär einsetzbaren und beliebig wiederholbaren TKDS sind zerebrovaskuläre Erkrankungen [29]. Jedoch kommt der TKDS auch im Rahmen des Neuromonitorings in der

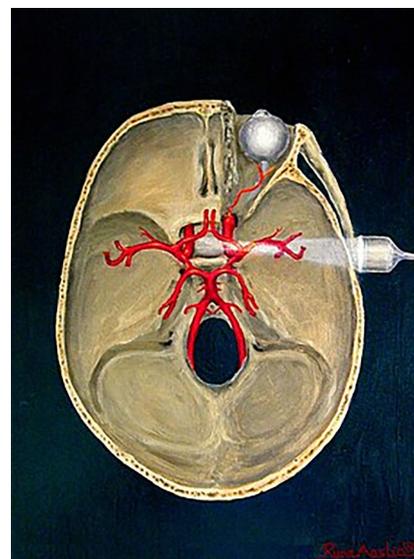


Abb. 1 ▲ Transkraniale Dopplerableitung im Bereich der A. cerebri media. (©Runeaslid at English Wikipedia, aus [40], CC BY-SA 3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/deed.en>). Alle Rechte vorbehalten)

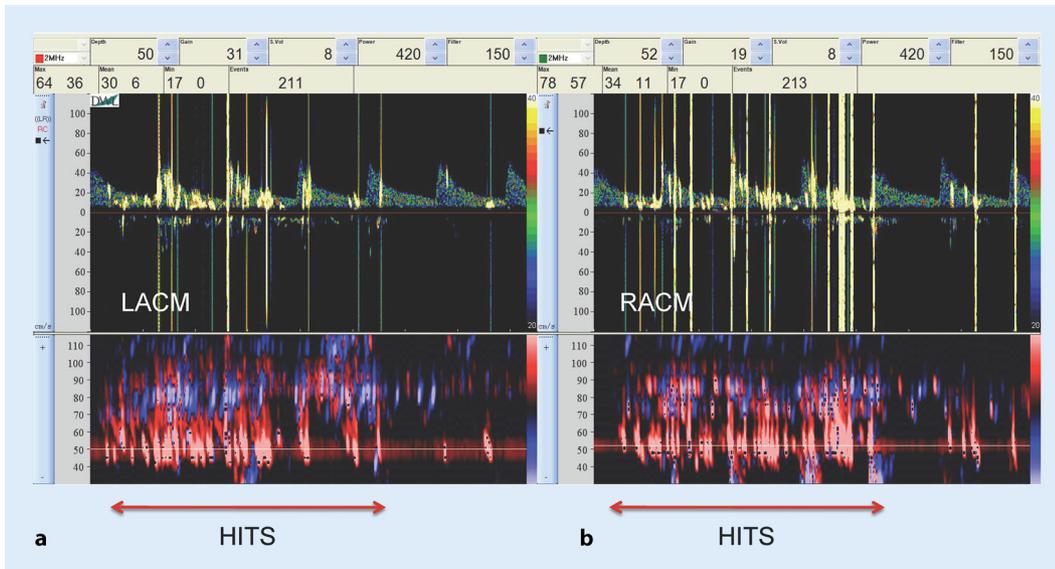


Abb. 2 ◀ Intraoperative transkraniale Doppler-Sonographie der li. und re. A. cerebri media (a LACM, b RACM) im Rahmen einer TEVAR. Der rote Pfeil illustriert die Ausdehnung der während der Endoprothesenfreisetzung aufgezeichneten „high-intensity transient signals“ (HITS) (nach [22], mit freundl. Genehmigung von John Wiley & Sons, Inc. Alle Rechte vorbehalten)

Aorten Chirurgie ein Stellenwert zu [8, 26].

Typischerweise erfolgt hierzu die transtemporale Beschallung der A. cerebri media mittels über dem Os temporale platzierter gepulster 2-MHz-Schallköpfe ([29]; **Abb. 1**). Im Allgemeinen ist die bitemporale Anbringung der Schallköpfe schnell und verlässlich realisierbar. Insbesondere bei Notfalleingriffen oder begrenzten Platzverhältnissen werden jedoch häufig unilaterale Ableitungen verwendet [4]. Hauptlimitation der TKDS ist ihre Untersucherabhängigkeit. In bis zu 16 % der Fälle besteht kein geeignetes Schallfenster [27]. Ableitbare TKDS-Parameter sind: Flussprofil und -richtung, Zirkulationsstillstand, Blutstromgeschwindigkeit und CO₂-Reaktivität. Darüber hinaus ist die TKDS als einziges Neuromonitoringverfahren in der Lage, eine zerebrale Embolie unmittelbar zu detektieren [31]. Mithilfe multifrequenter Schallköpfe (2,0–2,5 MHz) können feste und gasförmige Emboliepartikel unterschieden werden (z. B. bei Manipulation mit steifen Drähten im Aortenbogen oder beim Einbringen einer Endoprothese) [25]. Beide Ereignisse führen zu Veränderungen des Flussgeschwindigkeitsprofils in den Hirnarterien, den sogenannten „high-intensity transient signals/microembolic signals“ (HITS). Dabei sind HITS das Korrelat abgesprengter atherosklerotischer oder thrombotischer Debris aus

dem Aortenbogen [14]. Ein Zusammenhang zwischen der gemessenen Anzahl HITS und dem Auftreten eines postoperativen neurologischen Defizits (bei >50 HITS/h) wurde beispielsweise für die Carotischirurgie bereits beschrieben [16]. Obgleich die wissenschaftlichen Arbeitskreise Kardioanästhesie und Neuroanästhesie, die Cardiovascular and Thoracic Anaesthesia Group sowie die Deutsche Gesellschaft für Thorax-, Herz- und Gefäßchirurgie der TKDS in 2014 keine Empfehlung zur routinemäßigen Anwendung in der offenen aortalen Chirurgie aussprachen [31], wird die Methode in der endovaskulären Aorten Chirurgie, insbesondere bei der HITS-Detektion, aktuell und anhaltend im Sinne der Prozeduroptimierung untersucht. Bismuth und Kollegen berichteten von der Anwendung der TKDS zur HITS-Detektion im Rahmen der TEVAR bei 20 Patienten (hauptsächlich thorakale Aortenaneurysmen, $N=17/20$) ([4]; **Abb. 2**). Die höchste Anzahl HITS wurde bei der Kathetermanipulation im Aortenbogen sowie dem Freisetzen der Prothese beobachtet. In Landungszone 0–2 freigesetzte Prothesen generierten dabei im Vergleich zu Landungszone 3 oder 4 signifikant mehr HITS ($P=0,027$). Die Autoren konnten eine signifikante Assoziation zwischen der HIT-Anzahl und dem Auftreten eines postoperativen Schlaganfalles ($P=0,0055$) bzw. Tod ($P=0,0053$) nachweisen. Benson et al.

identifizierten in einer kürzlich publizierten Arbeit die TEVAR als die von allen endovaskulären Aorteneingriffen am stärksten mit HITS assoziierte Prozedur (mittlere Embolusanzahl TEVAR: 36,2, Chimney-EVAR: 13,39, EVAR: 5,81; $P<0,05$) [3]. Patienten mit erhöhten HITS wiesen in der 90-Tage-Kontrolle in Kognitionstests (u. a. Mini Mental State Examination, Wechsler Abbreviated Scale of Intelligence) kognitive Einschränkungen auf. Eine Reduktion der bei TEVAR in der TKDS detektierten HITS kann während der Draht- und Kathetereinlage durch den Einsatz von Robotertechnik erreicht werden (6 vs. 38 HITS; $P=0,018$) [21]. Ob eine robotergestützte Prothesenfreisetzung, ein weiterer Hochrisikoschritt [13], ebenfalls zu einer Senkung der HITS-Last in der TKDS führt, ist bisher nicht bekannt.

Das Monitoringpotenzial der HITS-Detektion in der endovaskulären Aorten Chirurgie via TKDS ist auf die Beobachtung/Diagnostik begrenzt. Ein unmittelbarer therapeutischer Nutzen ist aus der Methode derzeit nicht abzuleiten. Für zukünftige Studienprojekte mit dem Ziel, die Inzidenz neurologischer Komplikationen bei TEVAR zu senken, ist sie dennoch von Wert. Dies zeigt u. a. eine aktuelle Untersuchung von Groover und Mitarbeitern [13]. Die Autoren beschrieben erstmals den Einsatz eines Protektionssystems für Truncus brachiocephalicus und li. A. carotis communis (Sentinel

Cerebral Protection System, Claret Medical Inc., Santa Rosa, USA) bei TEVAR im Bereich der Landungszone 2–4. Als wichtiges Nebenergebnis ermittelte die TKDS einen erheblichen Anteil gasförmiger Embolien, ein aktuell viel diskutiertes Thema mit (noch) unklarer Signifikanz [24]. Hier qualifiziert sich die TKDS als hervorragendes Monitoringverfahren in der Entwicklung und Evaluation zerebraler Embolieprotektionsstrategien.

Kollateralnetzwerk-Nahinfrarotspektroskopie

Sowohl bei offen-chirurgischer als auch endovaskulärer Therapie aortaler Pathologien mittels Endoprothesen ist das Risiko einer ischämischen Schädigung des Rückenmarks („spinal cord injury“ [SCI]) mit der Konsequenz Paraparese/Paraplegie nach wie vor nicht zu unterschätzen. Für die Versorgung ausgedehnter thorakoabdomineller Aortenaneurysmata (Crawford Typ II) beträgt die SCI-Rate immer noch bis zu 18% [10, 11, 19]. Diese therapieassoziierte Komplikation macht eine peri- und postoperative Überwachung der Rückenmarkversorgung essenziell. Insbesondere bei endovaskulären Eingriffen ist die klinische Überwachung der Extremitätenfunktion die häufigste und reproduzierbarste Methode. Dem Auftreten einer Funktionseinschränkung geht jedoch bereits ein – ggf. reversibler – Schaden voraus. Methoden zur Echtzeitüberwachung der Perfusion sind daher notwendig, um frühzeitig entsprechende therapeutische Maßnahmen einleiten zu können. Eine optimale Überwachungsmethode für das Rückenmark sollte dementsprechend nicht invasiv und sowohl peri- als auch postoperativ nutzbar sein. Des Weiteren sollte sie Rückschlüsse auf die regionale Durchblutung und Sauerstoffversorgung in Echtzeit ermöglichen [35]. Die Nahinfrarotspektroskopie des paraspinalen Kollateralnetzwerks (cnNIRS) erfüllt diese Kriterien.

Das zugrunde liegende Prinzip basiert auf der Anregung von Molekülschwingungen durch elektromagnetische Strahlung im Nahinfrarotbereich (760–2500 nm). Die Interpretation der

Gefäßschirurgie <https://doi.org/10.1007/s00772-019-00562-x>
© Springer Medizin Verlag GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

M. S. Bischoff · A. Gombert · A. Brcic · S. Jungi · K. von Aspern · M. Wortmann · K. Meisenbacher · D. Böckler

Intraoperatives Monitoring in der konventionellen und endovaskulären Aortenchirurgie – Neue Verfahren

Zusammenfassung

Der zweite Teil der Übersichtsarbeit „Intraoperatives Monitoring in der konventionellen und endovaskulären Aortenchirurgie“ befasst sich mit drei neueren Monitoringverfahren, welche aktuell im Rahmen der Aortenchirurgie evaluiert werden. Diese sind (1) die transkranielle Doppler-Sonographie, (2) die Kollateralnetzwerk-Nahinfrarotspektroskopie und (3) die kontrastmittelverstärkte Cone-

Beam-Computertomographie. Jedes Verfahren wird dabei einzeln hinsichtlich Methodik und Evidenz besprochen. Abschließend erfolgt eine zusammenfassende Bewertung.

Schlüsselwörter

Aorta · TEVAR · EVAR · Transkranielle Dopplersonographie · Nahinfrarotspektroskopie · Cone-Beam-Computertomographie

Intraoperative monitoring in conventional and endovascular aortic surgery: new procedures

Abstract

In the second part of the review “Intraoperative monitoring in conventional and endovascular aortic surgery,” three more recent monitoring procedures currently being evaluated in the context of aortic surgery are considered: (1) transcranial Doppler ultrasound, (2) collateral network near-infrared spectroscopy, and (3) contrast-enhanced cone beam computed tomography.

The methodology and evidence for each procedure are discussed in detail. Finally, a summarising assessment is made.

Keywords

Aorta · TEVAR · EVAR · Transcranial Doppler ultrasound · Near-infrared spectroscopy · Cone beam computed tomography

ausgesandten und reflektierten elektromagnetischen Spektren wird anhand von Vergleichsdatensätzen bekannter Stoffkonzentrationen indirekt ermittelt. Aufgrund der leichten Gewebepenetration von Licht im Nahinfrarotbereich (v. a. im Spektrum 630–1350 nm) und der charakteristischen Adsorptionsspektren des oxygenierten und desoxygenierten Hämoglobins kann mittels Nahinfrarotspektroskopie die regionale Sauerstoffversorgung im Gewebe abgebildet werden [35, 36]. Die direkte Anbringung der NIRS-Optoden axial über den Dornfortsätzen der Wirbelsäule ist aufgrund des unvorteilhaften Verhältnisses zwischen Knochen und Gewebe nicht sinnvoll [1, 9]. Um das Verfahren dennoch für eine nicht invasive Überwachung der Rückenmarkoxygenierung zu nutzen, erfolgt die modifizierte Anwendung als indirekte Messung des paraspinalen Kollateralnetzwerks (CN) (Abb. 3). Entsprechend des CN-Kon-

zepts und aufgrund der Annahme, dass eine direkte Proportionalität zwischen intraspinaler und paraspinaler Oxygenierung über das CN existiert, wurde die Nahinfrarotspektroskopie zur Oxygenierungsmessung der paraspinalen Muskulatur eingeführt [37].

In experimentellen Studien konnte zunächst die Korrelation zwischen Perfusion und Oxygenierung im CN im direkten Vergleich zum Rückenmarksgewebe nachgewiesen werden (Abb. 4; [37]). Die klinische Erprobung zeigte die einfache Anwendbarkeit der lumbalen cnNIRS, auch durch nicht-ärztliches Personal ([5, 9]; Abb. 5). Patienten mit SCI nach offenem Aortenersatz zeigten dabei signifikant reduzierte cnNIRS-Messwerte [9]. Vergleichende Arbeiten konnten eine Korrelation von reduzierten cnNIRS-Messwerten mit reduzierten motorisch-evozierten und somatosensiblen Potenzialen nachweisen [5]. Hochthorakale cnNIRS-Messungen (T5–T7)

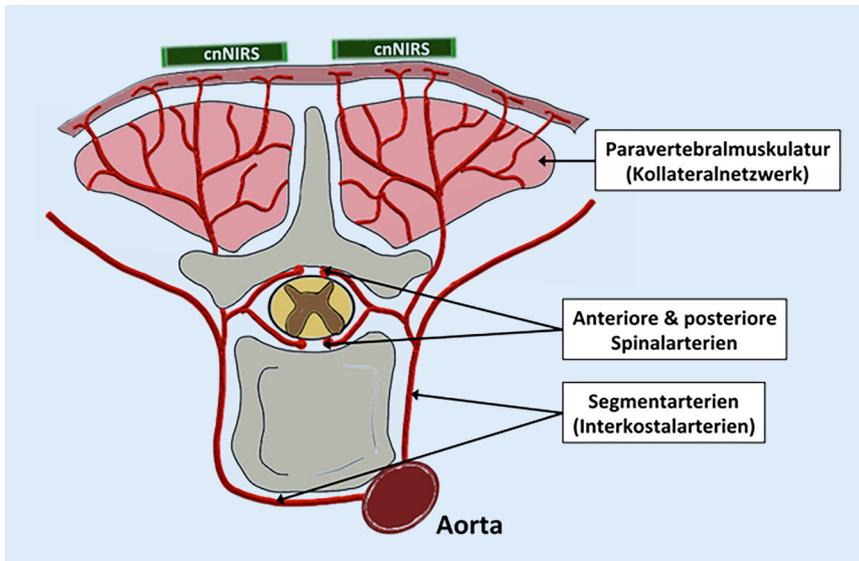


Abb. 3 ▲ Illustration der Kollateralnetzwerk-Nahinfrarotspektroskopie (cnNIRS) paravertebral oberhalb der paraspinalen Muskulatur zur Echtzeit-Oxygenierungsmessung des Kollateralnetzwerks (CN)

zeigen aufgrund guter Kollateralisierung in diesem Bereich keine relevanten Veränderungen nach Ischämie und Reperfusion distal der li. A. subclavia [9]. Die hochthorakale cnNIRS-Messung erscheint daher klinisch nicht sinnvoll. Inwieweit cnNIRS-Messungen im mittleren und im tiefthorakalen Bereich (T8–L1) relevante Rückschlüsse auf die Rückenmarkspertusion ermöglichen, ist Bestandteil aktueller Experimente. In einer kürzlich veröffentlichten Studie wurde cnNIRS erstmalig im chronischen Experiment beim konsekutiven offen-chirurgischen Segmentarterienverschluss (analog zur thorakoabdominellen Stentimplantation) untersucht [38]. Es konnte gezeigt werden, dass lumbales cnNIRS in Echtzeit auf Segmentarterienverschluss reagiert. Des Weiteren besteht eine signifikante Korrelation zum postoperativen neurologischen Outcome. Ein Abfall der cnNIRS-Werte um mehr als 25–30 % des Ausgangswertes korrelierte signifikant mit dem Auftreten einer SCI. In der klinischen Praxis ergibt sich hieraus die (voreingestellte) Alarmgrenze bei einem Abfall von –20 % vom Ausgangswert. Das Hauptaugenmerk zukünftiger Arbeiten zu cnNIRS liegt auf objektiveren, quantitativen und zeitlichen Referenzbereichen hinsichtlich eines relevanten ischämischen Rückenmarkschadens. Weiterhin fehlen bis dato

Daten zu cnNIRS-Änderungen bei Aortenstentimplantation. Hier wurde bisher nur eine begrenzte Anzahl von Patienten untersucht.

Kontrastmittelverstärkte Cone-Beam-Computertomographie

Als verfahrensimmanente Schwachstelle endovaskulärer Aorteneingriffe gilt die erhöhte Rate an Endograft-assoziierten Reinterventionen [20]. Diese erfolgen in bis zu 10 % der Patienten innerhalb der ersten 30 Tage postoperativ [12]. Neue Bildgebungsverfahren mit gesteigerter Bildqualität ermöglichen, potenzielle Komplikationen/Komplikationsursachen wie u.a. interventionspflichtige Endoleckagen, Stenosen oder Knickbildungen bereits intraprozedural zu erkennen und zu therapieren.

Flachdetektor-Angiographiesysteme (z.B. Artis Zeego, Siemens Healthcare, Erlangen) bieten im Hybrid-OP-Saal die Möglichkeit der intraoperativen 3D-Abschlusskontrolle nach Intervention durch eine kontrastmittelunterstützte Kegelstrahl-Computertomographie („contrast-enhanced cone beam computed tomography“, KM-CBCT, z.B. Siemens DynaCT, Siemens Healthcare, Erlangen, Deutschland). Dabei rotiert der C-Arm 200° um den Patienten, um

die notwendigen Bilder für die 3D-Rekonstruktion an einer Workstation zu generieren. Das DynaCT-Programm hat eine Akquisitionsdauer von fünf Sekunden bei 248 Einzelbildern und 0,8 μ Gy/ Einzelbild. Mittels Angiographiepumpe wird dabei ein Kontrastmittelvolumen von 70 ml (z.B. Ultravist 300, Bayer Vital, Leverkusen; 2:1-Verhältnis mit NaCl) mit einer Injektionsdauer von sieben Sekunden bei einer Röntgenverzögerung von zwei Sekunden appliziert. Das Auslösen des KM-CBCT erfolgt, aus personalbezogenen Strahlenschutzgründen, außerhalb des Hybrid-OP-Saals unter Atemstillstand. Nach Aufbereiten des Datensatzes kann das Implantationsergebnis an der Workstation multiplanar evaluiert werden.

Für den Stellenwert der intraoperativen KM-CBCT gibt es bis dato nur limitierte Evidenz. Ihr möglicher benefizärer Einsatz bei EVAR-Prozeduren wird in der aktuellen Leitlinie der europäischen Fachgesellschaft erstmals erwähnt [39]. In den amerikanischen Empfehlungen von 2018 findet die Methode hingegen noch keine Beachtung [15]. Eine prospektive Studie konnte zeigen, dass es mittels Kombination aus intraoperativer KM-CBCT und Abschlussangiographie zuverlässig und exakt gelingt, Komplikationen zu erkennen (■ Abb. 6; [33]). Insgesamt wurden bei 51 Patienten alle Komplikationen erkannt, welche auf der CT-Angiographie vier Wochen postoperativ identifiziert wurden. Vier davon konnten während des Primäreingriffs umgehend korrigiert werden. In einer weiteren prospektiven Studie konnte an 98 Patienten gezeigt werden, dass die KM-CBCT alle Endoleckagen, welche in der digitalen Subtraktionsangiographie sowie der CT-Angiographie (CTA) gesehen wurden, identifizieren konnte [28]. Zusätzlich wurden Schenkelstenosen und intraluminale Thromben detektiert. In 7 % der Patienten wurden Probleme erkannt, die umgehend endovaskulär behoben werden konnten. Die Autoren betonen daher das Potenzial der Methode, die postoperative Rate an Reinterventionen zu reduzieren. Weitere Vorteile der KM-CBCT liegen im Vergleich zur CTA in der reduzierten Strahlen- sowie Kontrastmitteldosis [32]. Der erfolgreiche Einsatz

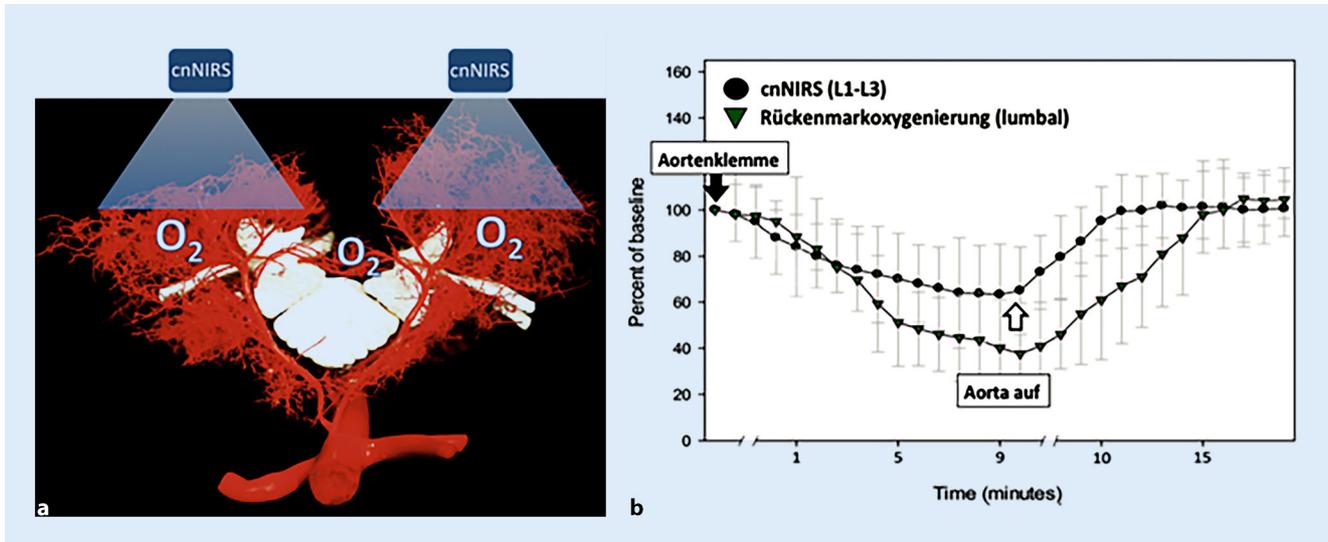


Abb. 4 ▲ a Schematische Darstellung der Proportionalität zwischen cnNIRS-Oxygenierungsmessung im Kollateralsnetzwerk (CN) und im Rückenmark; b experimentelle Messung der Oxygenierung im CN mittels cnNIRS und direkt im Rückenmark mittels Laser-Doppler im Ischämie-/Reperusionsversuch



Abb. 5 ◀ a Positionierung der cnNIRS-Optoden paravertebral und lumbal bds.; b Beispielmessung von lumbalem cnNIRS während thorakoabdominalem Aortenersatz

der KM-CBCT zur Exklusionskontrolle/Komplikationsdetektion wurde auch bereits für komplexe EVAR-Prozeduren mit gebrachten oder fenestrierten Prothesen berichtet [7]. Für die Beurteilung des Stellenwerts der KM-CBCT im Rahmen der TEVAR ist die Datenlage aktuell

unzureichend. Die durch die Herzaktion bedingte Qualitätseinbuße im thorakalen Bereich ist aus Sicht der Autoren in den meisten Fällen für die Evaluation des Implantationsergebnisses akzeptabel (Abb. 7). Die für das aortale Abdominalsegment publizierten Vorteile einer

verminderten Reinterventionsrate wurden für die TEVAR bisher nicht gezeigt. Gerade bei komplexeren TEVAR-Prozeduren, wie z. B. Dissektionen oder endovaskulären Bogenprozeduren mit Versorgung der supraaortalen Gefäße, erscheint die Evaluation der KM-CBCT jedoch sinnvoll. Bezüglich Kosteneffizienz im Vergleich zur postoperativen CTA gibt es bislang keine publizierten Daten. Diese zeigt sich insbesondere abhängig vom postoperativen stationären Nachsorgeprotokoll. Sah das Protokoll bislang jedoch eine postoperative stationäre CTA vor, kann diese nach Ansicht der Autoren durch die intraoperative KM-CBCT eingespart werden.

Resümee und Bewertung

Die neurologische Komplikation ist nach wie vor die Geißel der Aortenchirurgie, unabhängig vom verwendeten Verfahren. Sowohl der intraoperative Schlaganfall als auch die SCI sind mit hoher Morbidität/Mortalität sowie erheblichen sozioökonomischen Kosten vergesellschaftet. Aktuelle Monitoringverfahren zielen daher auf die direkte, aber auch indirekte Reduktion dieser Komplikationen ab. Ein hohes Potenzial wird dabei sicherlich der cnNIRS zuteil. Aufgrund der bereits gewonnenen klinischen und experimentellen Ergebnisse erscheint die Nutzung dieser nicht-invasiven Mo-

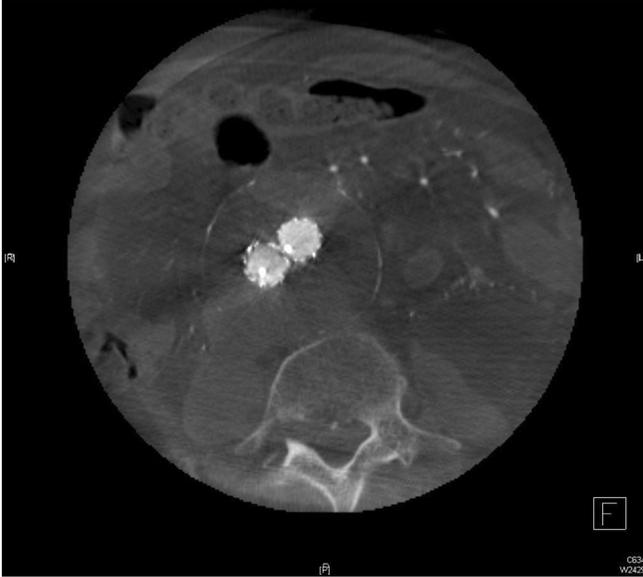


Abb. 6 ▲ Axiale Darstellung der KM-CBCT zur Abschlusskontrolle nach EVAR. Die EVAR-Schenkel sind offen perfundiert und frei von Thromben. Ferner zeigt sich kein Anhalt für eine Endoleckage

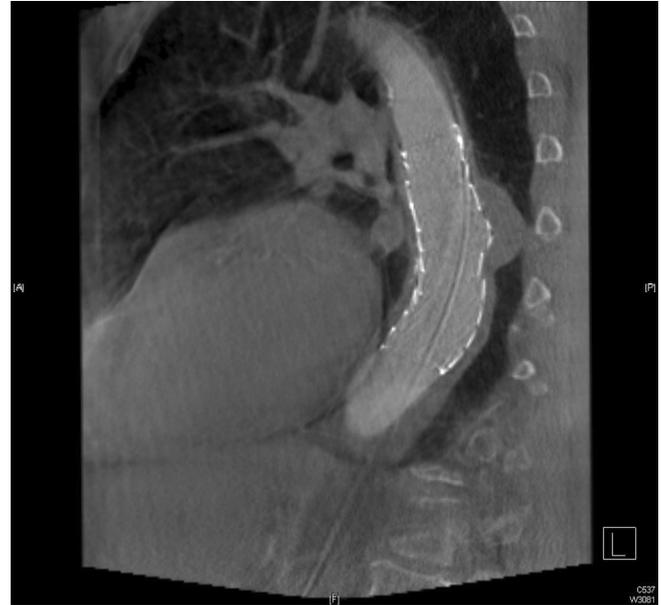


Abb. 7 ▲ Sagittale Rekonstruktion der KM-CBCT nach TEVAR zur Ausschaltung eines penetrierenden Aortenulkus. Die Pathologie zeigt sich komplett exkludiert

monitoringmethode während und nach Eingriffen an der thorakoabdominellen Aorta sinnvoll. Da es sich bei der cnNIRS um eine nicht-invasive und einfach anwendbare Methode handelt, ist für die Zukunft mit einer potenziell zentrenübergreifenden Anwendung zu rechnen. Bei (noch) relativ geringer Erfahrung zur standardisierten Anwendung in der klinischen Praxis (z. B. exakte Optodenspositionierung/Interpretation der Messwerte/Referenzwerte) bedarf es jedoch zur weiteren Validierung und Etablierung des Verfahrens weitere Studien. Eine solche Studie ist die randomisierte, prospektive Multicenterstudie *PAPA-ARTiS* (NCT03434314) [23]. Bestandteil von *PAPA-ARTiS* ist u. a. das peri- und postoperative cnNIRS-Monitoring. Das hierbei standardisiert ausgewertete Patientenkollektiv verspricht aufschlussreiche Daten in hoher Quantität und Qualität.

Die Rolle der TKDS im Rahmen des Monitorings, außerhalb der konventionellen Aortenbogenchirurgie [30], ist aktuell sicher limitiert. Im aktuellen *Konsensusdokument der European Association for Cardio-Thoracic Surgery/European Society for Vascular Surgery* findet die Methode daher keine Erwähnung [6]. Das Potenzial der TKDS, ein durch Mikroembolien ausgelöstes postoperatives

neurologisches Defizit zu reduzieren, ist gering [18]. Leitlinien weisen das Verfahren daher lediglich als Klasse-III-Indikator für das Monitoring der zerebralen Hypoperfusion/Embolisation aus [2, 17]. Nichtsdestotrotz besitzt die TKDS, wie Arbeiten zu Embolieprotektionssystemen bei TEVAR zeigen konnten, ein wissenschaftlich-methodisches Potenzial [13]. Somit könnte das Verfahren für das bessere Verständnis von cerebralen Emboliemechanismen und zukünftigen Operationsstrategien eingesetzt werden. Dies gilt insbesondere für endovaskuläre Aorteneingriffe.

Die spezifische Achillesferse der endovaskulären Aortenchirurgie, die Reintervention, lässt sich wie hierin dargestellt, sehr gut durch den Einsatz der KM-CBCT adressieren. Sie erlaubt es, noch auf dem Operationstisch Komplikationen wie Endoleckagen, Stenosen, Knickbildungen oder Thromben frühzeitig und zuverlässig zu erkennen und zu therapieren. Die weitere technische Verbesserung der Methode ist aufgrund der steigenden Anzahl von Hybrid-OP-Einrichtungen mit einhergehender Verbesserung von Bildqualität und Bildakquisition zu erwarten. Hierdurch werden aktuelle Limitierungen, wie z. B. der reduzierte Weichteilkontrast oder das einge-

schränkte Sichtfeld reduziert werden. Mit Spannung zu erwarten ist insbesondere die Anwendungsmöglichkeit der KM-CBCT in der endovaskulären Bogenchirurgie.

Fazit für die Praxis

Für alle vorgestellten Verfahren gilt, dass zu ihrer erfolgreichen Evaluation, Validierung und klinischen Anwendung die entsprechenden logistischen, personellen und materiellen Voraussetzungen gegeben sein müssen. Methodik, Datenakquise und Dateninterpretation sowie die anschließende Translation in den klinischen Kontext benötigen größtmögliche Expertise. Daher sollten diese Techniken in Aortenzentren Verwendung finden.

Korrespondenzadresse



PD Dr. med. M. S Bischoff
Klinik für Gefäßchirurgie und Endovaskuläre Chirurgie, Universitätsklinikum Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 110, 69120 Heidelberg, Deutschland
moritz.bischoff@med.uni-heidelberg.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. M. S. Bischoff, A. Gombert, A. Br-
cic, S. Jungi, K. von Aspern, M. Wortmann, K. Meisen-
bacher und D. Böckler geben an, dass kein Interessen-
konflikt besteht.

Für diesen Beitrag wurden von den Autoren keine
Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für
die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort ange-
gebenen ethischen Richtlinien. Für Bildmaterial oder
anderweitige Angaben innerhalb des Manuskripts,
über die Patienten zu identifizieren sind, liegt von
ihnen und/oder ihren gesetzlichen Vertretern eine
schriftliche Einwilligung vor.

Literatur

- Aldrete JA, Mushin AU, Zapata JC et al (1998) Skin to cervical epidural space distances as read from magnetic resonance imaging films: consideration of the "hump pad". *J Clin Anesth* 10:309–313
- Alexandrov AV, Sloan MA, Tegeler CH et al (2012) Practice standards for transcranial Doppler (TCD) ultrasound. Part II. Clinical indications and expected outcomes. *J Neuroimaging* 22:215–224
- Benson RA, Matthews D, Loftus V et al (2018) Cerebral embolization during endovascular infrarenal, juxtarenal, and suprarenal aortic aneurysm repair, high-risk maneuvers, and associated neurologic outcomes. *J Vasc Surg* 68:1374–1381
- Bismuth J, Garami Z, Anaya-Ayala JE et al (2011) Transcranial Doppler findings during thoracic endovascular aortic repair. *J Vasc Surg* 54:364–369
- Boezeman RP, Van Dongen EP, Morshuis WJ et al (2015) Spinal near-infrared spectroscopy measurements during and after thoracoabdominal aortic aneurysm repair: a pilot study. *Ann Thorac Surg* 99:1267–1274
- Czerny M, Schmidli J, Adler S et al (2019) Editor's choice—current options and recommendations for the treatment of thoracic aortic pathologies involving the aortic arch: an expert consensus document of the European association for Cardiothoracic surgery (EACTS) & the European society for vascular surgery (ESVS). *Eur J Vasc Endovasc Surg* 57:165–198
- Dijkstra ML, Eagleton MJ, Greenberg RK et al (2011) Intraoperative C-arm cone-beam computed tomography in fenestrated/branched aortic endografting. *J Vasc Surg* 53:583–590
- Estrera AL, Garami Z, Miller CC 3rd et al (2005) Cerebral monitoring with transcranial Doppler ultrasonography improves neurologic outcome during repairs of acute type A aortic dissection. *J Thorac Cardiovasc Surg* 129:277–285
- Etz CD, Von Aspern K, Gudehus S et al (2013) Near-infrared spectroscopy monitoring of the collateral network prior to, during, and after thoracoabdominal aortic repair: a pilot study. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 46:651–656
- Etz CD, Weigang E, Hartert M et al (2015) Contemporary spinal cord protection during thoracic and thoracoabdominal aortic surgery and endovascular aortic repair: a position paper of the vascular domain of the European Association for Cardio-Thoracic Surgery. *Eur J Cardiothorac Surg* 47:943–957
- Ferrer C, Cao P, De Rango P et al (2016) A propensity-matched comparison for endovascular and open repair of thoracoabdominal aortic aneurysms. *J Vasc Surg* 63:1201–1207
- Greenhalgh RM, Brown LC, Kwong GP et al (2004) Comparison of endovascular aneurysm repair with open repair in patients with abdominal aortic aneurysm (EVAR trial 1), 30-day operative mortality results: randomised controlled trial. *Lancet* 364:843–848
- Grover G, Perera AH, Hamady M et al (2018) Cerebral embolic protection in thoracic endovascular aortic repair. *J Vasc Surg* 68:1656–1666
- Kotelis D, Bischoff MS, Jobst B et al (2012) Morphological risk factors of stroke during thoracic endovascular aortic repair. *Langenbecks Arch Surg* 397:1267–1273
- Lazaris AM (2019) Regarding "The Society for Vascular Surgery practice guidelines on the care of patients with an abdominal aortic aneurysm". *J Vasc Surg* 69:975
- Levi CR, Roberts AK, Fell G et al (1997) Transcranial Doppler microembolus detection in the identification of patients at high risk of perioperative stroke. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 14:170–176
- Lewis C, Parulkar SD, Bebawy J et al (2018) Cerebral Neuromonitoring during cardiac surgery: a critical appraisal with an emphasis on near-infrared spectroscopy. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 32:2313–2322
- Martin KK, Wigginton JB, Babikian VL et al (2009) Intraoperative cerebral high-intensity transient signals and postoperative cognitive function: a systematic review. *Am J Surg* 197:55–63
- Panthee N, Ono M (2015) Spinal cord injury following thoracic and thoracoabdominal aortic repairs. *Asian Cardiovasc Thorac Ann* 23:235–246
- Paravastu SC, Jayarajasingam R, Cottam R et al (2014) Endovascular repair of abdominal aortic aneurysm. *Cochrane Database Syst Rev* 23(1):CD004178. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD004178.pub2>
- Perera AH, Riga CV, Monzon L et al (2017) Robotic arch catheter placement reduces cerebral embolization during thoracic Endovascular aortic repair (TEVAR). *Eur J Vasc Endovasc Surg* 53:362–369
- Perera AH, Rudarakanchana N, Monzon L et al (2018) Cerebral embolization, silent cerebral infarction and neurocognitive decline after thoracic endovascular aortic repair. *Br J Surg* 105:366–378
- Petroff D, Czerny M, Kolbel T et al (2019) Paraplegia prevention in aortic aneurysm repair by thoracoabdominal staging with 'minimally invasive staged segmental artery coil embolisation' (MIS(2)ACE): trial protocol for a randomised controlled multicentre trial. *BMJ Open* 9:e25488
- Rohlfs F, Trepte C, Ivancek K et al (2019) Air embolism during TEVAR: liquid Perfluorocarbon absorbs carbon dioxide in a combined flushing technique and decreases the amount of gas released from thoracic Stent-grafts during deployment in an experimental setting. *J Endovasc Ther* 26:76–80
- Russell D, Brucher R (2002) Online automatic discrimination between solid and gaseous cerebral microemboli with the first multifrequency transcranial Doppler. *Stroke* 33:1975–1980
- Saidi N, Murkin JM (2005) Applied neuromonitoring in cardiac surgery: patient specific management. *Semin Cardiothorac Vasc Anesth* 9:17–23
- Schreuder FH, Hoeks AP, Mess WH (2009) Inadequate acoustical temporal bone window in patients with transient ischemic attack or minor stroke: role of skull thickness and bone density. *Ultrasound Med Biol* 35:1229 (author reply 1230)
- Schulz CJ, Schmitt M, Böckler D et al (2016) Intraoperative contrast-enhanced cone beam computed tomography to assess technical success during endovascular aneurysm repair. *J Vasc Surg* 64:577–584
- Seidel G, Klöttsch C, Mäurer M et al (2001) Stellenwert der transkraniellen Farbduplexsonographie. *Dtsch Arztebl Int* 98:686–690
- Smith T, Jafrancesco G, Surace G et al (2019) A functional assessment of the circle of Willis before aortic arch surgery using transcranial Doppler. *J Thorac Cardiovasc Surg* Jan 11:pii:S0022–5223(19)30030-3. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2019.01.007>
- Söhle M (2014) Neuromonitoring in der Kardioanästhesie. *Anästhesiologie* 55:521–538
- Steuwe A, Geisbüsch P, Schulz CJ et al (2016) Comparison of radiation exposure associated with Intraoperative cone-beam computed Tomography and follow-up Multidetector computed Tomography Angiography for evaluating Endovascular aneurysm repairs. *J Endovasc Ther* 23:583–592
- Tornqvist P, Dias N, Sonesson B et al (2015) Intraoperative cone beam computed tomography can help avoid reinterventions and reduce CT follow up after infrarenal EVAR. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 49:390–395
- Von Allmen RS, Gahl B, Powell JT (2017) Editor's choice—incidence of stroke following thoracic Endovascular aortic repair for descending aortic aneurysm: a systematic review of the literature with Meta-analysis. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 53:176–184
- Von Aspern K, Bakhtiari F, Misfeld M et al (2017) Paraspinal Nahinfrarotspektroskopie zur indirekten Überwachung der Rückenmarkoxygenierung. *Gefäßschirurgie* 22. <https://doi.org/10.1007/s00772-017-0244-0>
- Von Aspern K, Etz CD (2017) Prophylaxe der Rückenmarkschämie bei Therapie von Aortenaneurysmen. *Gefäßmedizin Scan* 1:41–56
- Von Aspern K, Haunschild J, Hoyer A et al (2016) Non-invasive spinal cord oxygenation monitoring: validating collateral network near-infrared spectroscopy for thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *Eur J Cardiothorac Surg* 50:675–683
- Von Aspern K, Haunschild J, Ziemann M et al (2018) Evaluation of collateral network near-infrared spectroscopy during and after segmental artery occlusion in a chronic large animal model. *J Thorac Cardiovasc Surg* 158(1):155–164.e5. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2018.11.105>
- Wanhainen A, Verzini F, Van Herzele I et al (2019) Editor's choice—European society for vascular surgery (ESVS) 2019 clinical practice guidelines on the management of abdominal Aorto-iliac artery aneurysms. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 57:8–93 https://en.wikipedia.org/wiki/Transcranial_Doppler. Zugriffen: 22. April 2019