

K. Anastasiadis¹, J. Murkin², P. Antonitis¹, A. Bauer³, M. Ranucci⁴, E. Gygax⁵, J. Schaarschmidt³, Y. Fromes⁶, A. Philipp⁷, B. Eberle⁸, P. Punjabi⁹, H. Argiriadou¹, A. Kadner⁵, H. Jenni⁵, G. Albrecht¹⁰, W. van Boven¹¹, A. Liebold¹⁰, F. de Somer¹², H. Hausmann³, A. Deliopoulos¹, A. El-Essawi¹³, V. Mazzei¹⁴, F. Biancarini¹⁵, A. Fernandez¹⁶, P. Weerwind¹⁷, T. Puehler¹⁸, C. Serrick¹⁹, F. Waanders²⁰, S. Gunaydin²¹, S. Ohri²², J. Gummerl¹⁸, G. Angelini^{9,23}, V. Falk²⁴, T. Carrel^{15*}

¹ Klinik für Herz- und Thoraxchirurgie, AHEPA Universitätskrankenhaus, Thessaloniki, Griechenland

² Abteilung für Anästhesiologie und perioperative Medizin, University of Western Ontario, London, Kanada

³ Abteilung für Herz-Thorax-Chirurgie, MediClin Herzzentrum Coswig, Deutschland

⁴ Abteilung für Anästhesie und Intensivpflege, Policlinico S. Donato, Mailand, Italien

⁵ Klinik für Herz- und Gefäßchirurgie, Universität Bern, Schweiz

⁶ Universität Pierre und Marie Curie (Paris 06), Paris, Frankreich

⁷ Klinik für Herzchirurgie, Regensburg, Deutschland

⁸ Klinik für Anästhesiologie und Schmerztherapie, Universität Bern, Schweiz

⁹ Klinik für Herz-Thorax-Chirurgie, Hammersmith Hospital, London, Großbritannien

¹⁰ Klinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie, Universität Ulm, Deutschland

¹¹ Klinik für Herz-Thorax-Chirurgie, Medizinisches Zentrum Amsterdam, Niederlande

¹² Herzzentrum, Universitätskrankenhaus Gent, Belgien

¹³ Klinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie, Braunschweig, Deutschland

¹⁴ Klinik für Herzchirurgie für Erwachsene, Mater Dei Hospital, Bari, Italien

¹⁵ Klinik für Herzchirurgie, Universitätskrankenhaus Oulu, Finnland

¹⁶ Klinik für Chirurgie, Medizinisches Zentrum und Forschungszentrum Sidra, Doha, Katar

¹⁷ Klinik für Herz-Thorax-Chirurgie, Medizinisches Zentrum Universität Maastricht, Niederlande

¹⁸ Klinik für Thorax- und Kardiovaskularchirurgie, Universitätsklinik der Ruhr-Universität Bochum, Bad Oeynhausen, Deutschland

¹⁹ Universitäres Gesundheitsnetzwerk, Toronto, Kanada

²⁰ St.-Antonius-Krankenhaus, Nieuwegein, Niederlande

²¹ Klinik für Kardiovaskularchirurgie, Medline-Kliniken, Türkei

²² Klinik für Herz-Thorax-Chirurgie, Wessex Herzzentrum, Universitätskrankenhaus Southampton, Großbritannien

²³ Klinik für Herzchirurgie, Herzzentrum Bristol, Großbritannien

²⁴ Klinik für Herz-Thorax-Chirurgie, Deutsches Herzzentrum, Berlin, Deutschland

Die Anwendung der minimalinvasiven extrakorporalen Zirkulation in der Herzchirurgie: Grundsätze, Definitionen und potenzieller Nutzen

– ein Positionspapier der internationalen Gesellschaft für minimalinvasive extrakorporale Technologien (MiECTiS)

Diese deutsche Übersetzung des Positionspapiers wurde im Original im *Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery* publiziert: *ICVTS* 2016;22(5):647–662. Wir veröffentlichen die Übersetzung mit freundlicher Genehmigung der Oxford University Press.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Systeme der minimalinvasiven extrakorporalen Zirkulation (MiECC) haben in Wissenschaft und Technik wichtige Impulse gesetzt. Durch die weitere Verbesserung der Biokompatibilität der Komponenten beim kardiopulmonalen Bypass konnten so die unerwünschten Effekte auf ein Minimum beschränkt und der Endorganschutz verbessert werden. Die internationale Gesellschaft für minimalinvasive extrakorporale Technologien (MiECTiS) wurde gegründet, um ein internationales Forum für den Gedankenaustausch über die klinische Anwendung und Erforschung der MiECC-Technologie zu schaffen. Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um ein Konsensuspapier, das dazu dient, die Terminologie und die Definition der MiECC-Technologien zu vereinheitlichen und Empfehlungen für die klinische Praxis aufzustellen. Ziel dieses Manuskriptes ist es, den Einsatz von MiECC-Systemen in der klinischen Praxis als eine multidisziplinäre Strategie zu fördern, an der Herzchirurgen,

Anästhesisten und Klinische Perfusionisten Kardiotechnik mitwirken.

SCHLÜSSELWÖRTER

Extrakorporale Zirkulation, minimalinvasive extrakorporale Zirkulation, kardiopulmonaler Bypass, modulare Systeme, systemisches inflammatorisches Response-Syndrom, Komplikationen

ABSTRACT

Minimal invasive extracorporeal circulation (MiECC) systems have initiated important efforts within science and technology to further improve the biocompatibility of cardiopulmonary bypass components to minimize the adverse effects and improve end-organ protection. The Minimal Invasive Extra-Corporeal Technologies international Society (MiECTiS) was founded to create an international forum for the exchange of ideas on clinical application and research of Minimal Invasive Extra-Corporeal Circulation technology. The present work is a consensus document

developed to standardize the terminology and the definition of minimal invasive extracorporeal circulation technology as well as to provide recommendations for the clinical practice. The goal of this manuscript is to promote the use of MiECC systems into clinical practice as a multidisciplinary strategy involving cardiac surgeons, anaesthesiologists and perfusionists.

KEYWORDS

Extracorporeal circulation, minimal invasive extracorporeal circulation, cardiopulmonary bypass, modular systems, systemic inflammation reaction syndrome, complications

EINLEITUNG

In den vergangenen Jahrzehnten wurden bei Eingriffen am Herzen, bei denen die extrakorporale Zirkulation (EKZ) zum Einsatz kam, umfangreiche Erfahrungen gesammelt. Aufgrund der erreichten technologischen Verbesserungen ist der kardiopulmonale Bypass (cardiopulmonary

bypass, CPB) bei den meisten herzchirurgischen Eingriffen mittlerweile zum Goldstandard geworden. Dies hat trotz steigenden Lebensalters der Patienten und einer steigenden Zahl von Hochrisikopatienten dazu beigetragen, die perioperativen und langfristigen Ergebnisse zu verbessern [1]. Bei dem häufigsten Eingriff, der Koronararterien-Bypass-Operation (coronary artery bypass grafting, CABG), schafft der CPB optimale Bedingungen (blutfreies Operationsfeld und stillgelegtes Herz), um eine möglichst vollständige Myokardrevaskularisation zu erreichen. Darüber hinaus ermöglicht er, weitere Eingriffe vorzunehmen, wie beispielsweise die Reparatur oder den Ersatz von Herzklappen oder Operationen an der Aorta [2].

Wesentliche Nachteile des CPB sind die negativen systemischen Effekte, die durch eine systemische Entzündungsreaktion, das sogenannte systemische inflammatorische Response-Syndrom (SIRS) ausgelöst werden. Ursächlich hierfür ist der Kontakt des Blutes mit Luft und Fremdoberflächen [3, 4]. Auch wenn der CPB nicht als Hauptursache für die postoperative Morbidität angesehen werden kann, zeigen Studien, dass sich die CPB-bedingte Entzündungsreaktion ungünstig auf das klinische Ergebnis auswirken kann [5, 6].

Seit der Einführung der extrakorporalen Perfusion sind die wichtigsten Neuerungen auf ein Ziel ausgerichtet: die Verringerung der negativen Effekte des CPB. Kardiotechniker und Bioingenieure entwickelten optimierte CPB-Systeme, in denen die besten Eigenschaften, die auf den wissenschaftlichen Erkenntnissen zur Perfusion basieren, kombiniert wurden. Beabsichtigt war die Schaffung eines Systems, in dem alle Modifikationen zusammengefasst werden, das sogenannte minimalinvasive extrakorporale Zirkulationssystem (Minimal invasive Extracorporeal Circulation, MiECC) [7]. Dieses Konzept war der Ausgangspunkt wichtiger neuer Anstrengungen, um die Biokompatibilität der CPB-Komponenten zu verbessern und die Nebenwirkungen auf ein Minimum zu beschränken.

Trotz der klinischen Vorteile, die in verschiedenen Arbeiten beschrieben wurden [8], verläuft die Einführung der MiECC-Technologie in die klinische Praxis weiterhin sehr zögerlich. Gleichzeitig bestehen erhebliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Systemen in der klinischen Anwendung. Die MiECC vereint verschiedene Elemente, die interaktiv und/oder selbstständig wirken können, wie bei-

spielsweise beschichtete Oberflächen, geschlossene Systeme, gerinnungshemmende Maßnahmen sowie die Verringerung des Priming-Volumens. Die schwache Implementierung der MiECC könnte darauf zurückzuführen sein, dass es bislang nicht gelungen ist, genau darzulegen, welche der verschiedenen Aspekte der MiECC von Nutzen sind.

Die internationale Gesellschaft für minimalinvasive extrakorporale Technologien (Minimal invasive Extracorporeal Technologies international Society, MiECTiS) wurde mit dem Ziel gegründet, ein internationales Forum für den Gedankenaustausch über die klinische Praxis und Forschung im Bereich der MiECC-Technologie zu schaffen (www.miectis.org). Unter dem Dach eines interdisziplinären Forschungsverbundes führt die Gesellschaft Herzchirurgen, Anästhesisten, Kardiotechniker und Grundlagenforscher zusammen.

Die vorliegende Arbeit ist ein Konsensuspapier, mit dem die Terminologie zur MiECC-Technologie vereinheitlicht und Empfehlungen für die klinische Praxis ausgesprochen werden sollen. Zur Bewertung des Evidenzgrades und der Einordnung der nachfolgend beschriebenen Ergebnisse verwendeten die Autoren die Kriterien, die von der American Heart Association und der Arbeitsgruppe für Praxisleitlinien des American College of Cardiology empfohlen werden (Tab. 1). Die Autoren stellen eine multidisziplinäre Gruppe dar, die es sich zum Ziel gemacht hat, die evidenzbasierten Perfusionspraktiken zu fördern, um die klinischen Ergebnisse zu verbessern.

METHODEN

Grundlage der Initiative zur Analyse der aktuellen Praxis war ein Fragebogen, der vom Lenkungsausschuss der MiECTiS verfasst wurde (Kyriakos Anastasiadis, Adrian Bauer, Thierry Carrel, Erich Gygax, John Murkin, Marco Ranucci, Jan Schaarschmidt). Im Rahmen eines Konsensustreffens von Experten wurden die Aussagen erörtert und anschließend das vorliegende Konsensuspapier erstellt. Jede Aussage basiert auf der bestmöglichen verfügbaren veröffentlichten Evidenz aus Metaanalysen von Literatur mit Peer-Review, randomisierten kontrollierten Studien (Randomized Controlled Trials, RCTs) und Daten aus groß angelegten Kohortenstudien. In PubMed (1975 bis heute), Embase (Januar 1980 bis heute) und Cochrane Reviews mit aggregierten Daten wurde nach relevanten Studien und Berichten in jeder beliebigen Sprache gesucht. Die detaillierte Suchstrategie für

PubMed findet sich in Tabelle 1. Außerdem erfolgte eine Handrecherche oder eine computergestützte Suche in den neuesten Tagungsbänden (1999 bis 2014) der Society of Thoracic Surgeons, der European Association for Cardiothoracic Surgery und der European Society for Cardiovascular Surgery sowie in den Aufzeichnungen der Jahrestreffen der American Association for Thoracic Surgery. Zur Identifizierung von laufenden oder nicht veröffentlichten Studien wurde eine Recherche in ClinicalTrials.gov durchgeführt (Tab. 2).

Empfehlungen und evidenzbasierte Praxisleitlinien

Die Erklärungen der Expertenkommission sind in Tabelle 3 aufgeführt. Evidenzbasierte klinische Praxisleitlinien finden sich in Tabelle 4.

Terminologie

Die minimalinvasive extrakorporale Zirkulation (MiECC) bezieht sich auf eine kombinierte Strategie aus chirurgischem Vorgehen, anästhesiologischem Management und Perfusionsmanagement und ist nicht allein auf den CPB-Kreislauf beschränkt.

Bisher wurden verschiedene Begriffe zur Beschreibung eines minimalinvasiven extrakorporalen Zirkulationskreislaufs verwendet: miniaturisierte extrakorporale Zirkulation (miniaturized extracorporeal circulation, MECC), mini-extrakorporale Zirkulation (mini extracorporeal circulation, mECC), minimierte extrakorporale Zirkulation, mini-kardiopulmonaler Bypass (mCPB, mini-CPB), minimalinvasiver kardiopulmonaler Bypass (minimal invasive cardiopulmonary bypass, MICPB), miniaturisierter kardiopulmonaler Bypass (miniaturized cardiopulmonary bypass, MCPB), venoarterielle extrakorporale Membranoxygenation, minimierter Perfusionskreislauf, minimiertes extrakorporales Lebenserhaltungssystem, minimierter kardiopulmonaler Bypass oder minimalinvasiver extrakorporaler Kreislauf. Diese unterschiedlichen Begriffe sorgen für Verwirrung und Missverständnisse zwischen den Zentren. Das größte Problem besteht jedoch darin, dass der Schwerpunkt ausschließlich auf dem Priming-Volumen des Kreislaufs liegt und nicht auf der Verringerung der negativen Effekte der EKZ.

Der Lenkungsausschuss von MiECTiS versteht unter dem Begriff „minimalinvasiv“ eine Vorgehensweise, die nicht nur den CPB-Kreislauf umfasst, sondern vorrangig einen umfassenden Ansatz für das Vorgehen. In diesem Konzept wird unter einem

| Klassifikation der Empfehlungen | Evidenzgrad |
|--|--|
| Klasse I: Zustände, für die Evidenz vorliegt oder bei denen allgemeine Einigkeit besteht (oder beides), dass ein bestimmtes Verfahren oder eine bestimmte Behandlung nützlich und wirksam ist. | Grad A: Daten von mehreren randomisierten klinischen Studien oder Metaanalysen |
| Klasse II: Verfahren bzw. Behandlung sollte durchgeführt bzw. angewendet werden. | Grad B: Daten von einer einzigen randomisierten Studie oder von nicht-randomisierten Studien |
| Klasse IIA: Zusätzliche Studien mit fokussiertem Ziel werden benötigt. | |
| Klasse IIB: Zusätzliche Studien mit breit angelegtem Ziel werden benötigt; zusätzliche Registerdaten wären hilfreich. | Grad C: Konsensusmeinung von Experten oder klinische Praxis |
| Klasse III: Verfahren bzw. Behandlung sollte nicht durchgeführt bzw. angewendet werden, da das Verfahren bzw. die Behandlung nicht hilfreich ist oder schädlich sein kann. | |

Tab 1: Methodik und Grundsätze des American College of Cardiology/Arbeitsgruppe für Praxisleitlinien der American Heart Association [79]

minimalinvasiven Vorgehen etwas anderes verstanden als bei der weithin üblichen Fehlbezeichnung „minimalinvasiv“ für die Anwendung eines begrenzten Operationszugangs. Der Begriff „minimalinvasiv“ ist irreführend, da die Patienten oftmals längere Zeit an den CPB angeschlossen sind. Hinzukommt, dass Abklemmzeit und Narkosedauer verlängert sind. In diesem Sinne bezieht sich der Begriff „minimalinvasiv“ nur auf die Größe der Narbe [9]. Wir sind der Überzeugung, dass der Begriff minimalinvasive extrakorporale Zirkulation besser zu dem oben beschriebenen Konzept passt und daher zur Beschreibung dieser Technologie mit der Abkürzung MiECC (minimal invasive extracorporeal circulation) verwendet werden sollte.

Komponenten des MiECC-Systems

Damit die Bezeichnung MiECC zutrifft, muss das System die folgenden wesentlichen Komponenten enthalten: einen geschlossenen CPB-Kreislauf, biologisch inerte Oberflächen, ein verringertes Priming-Volumen, eine Zentrifugalpumpe, einen Membranoxygenator, einen Wärmetauscher, ein Kardioplegiesystem, eine venöse Blasenfalle bzw. einen venösen Luftabscheider und ein Managementsystem für Wundblut.

Da die verschiedenen Gruppen entweder kommerziell erhältliche oder speziell angefertigte CPB-Kreisläufe mit unterschiedlichen Komponenten verwendet hatten, wurden beim Konsensustreffen die wichtigsten Komponenten des CPB-Kreislaufs definiert, um die Vergleichbarkeit der MiECC-Systeme zu ermöglichen. Der Lenkungsausschuss der MiECTiS betont, dass ein

MiECC-System alle notwendigen Elemente enthalten sollte, damit ein maximaler Nutzen erzielt werden kann.

Ursprünglich war das MiECC-System ein Kreislauf zur extrakorporalen Lebenserhaltung mit der Möglichkeit, eine Kardioplegie anzuwenden (Typ I), und wurde vor allem für Bypass-Operationen genutzt [10]. Sicherheitsbedenken wegen Luft einschließen in der venösen Linie führten dazu, dass eine venöse Blasenfalle bzw. ein venöser Luftabscheider in das System aufgenommen wurde (Typ II). Dies erhöhte die Sicherheit bei Bypass-Operationen und ermöglichte Eingriffe an der Aortenklappe [11]. Da während der Eingriffe an den Herzklappen ein Blutvolumenmanagement erforderlich ist, wurde die Integration eines Weichbeutel- bzw. Weichschalenreservoirs in das System notwendig (Typ III). Dadurch wurde die sichere Durchführung von Aortenklappenoperationen und anderen intrakardialen Eingriffen möglich.

Die Einführung von modularen (hybriden) MiECC-Systemen, die einen zweiten offenen Kreislauf mit einem venösen Reservoir und einem Kardiotomiesauger als Stand-by-Komponente enthalten (Typ IV), ermöglichte die Durchführung von komplexen Eingriffen, bei denen die Wahrscheinlichkeit groß ist, dass unerwartete Perfusionssituationen auftreten [12, 13]. Die Klassifikation der MiECC-Typen ist in Abbildung 1 dargestellt. Beim Konsensustreffen wurde als Voraussetzung festgelegt, dass ein System erst dann als MiECC-System anzusehen ist, wenn es zumindest die Eigenschaften des Typ-II-Kreislaufs aufweist.

Zusätzliche in ein MiECC-System zu integrierende Komponenten sind: 1) Pulmonalarterien-Vent, 2) Aortenwurzel-Vent, 3) Pulmonalvenen-Vent, 4) Weichbeutel- bzw. Weichschalenreservoir, 5) Hartschalenreservoir (modulare Systeme), 6) ein geregeltes intelligentes Saugsystem und 7) ein Filter in der arteriellen Linie.

Modulare Systeme

Die Zurückhaltung hinsichtlich der Erweiterung der Anwendungsbereiche der MiECC ist vor allem auf Sicherheitsüberlegungen für den Fall eines massiven Luftintritts in das System oder eines erheblichen Blutverlustes zurückzuführen. Auch wenn Bypass-Operationen und Eingriffe an den Herzklappen mit dem standardmäßigen MiECC-Kreislauf vom Typ II durchgeführt werden können, ist eine modulare Konfiguration zu empfehlen. Das somit geschaffene Sicherheitsnetz ermöglicht die Erweiterung der MiECC-Systeme für die meisten herzchirurgischen Eingriffe und vereinfacht die Reaktion auf sich unerwartet ändernde intraoperative Situationen. Jüngst veröffentlichte Ergebnisse eines Zentrums deuten darauf hin, dass ein mo-

| Empfehlung |
|---|
| Die minimalinvasive extrakorporale Zirkulation (MiECC) bezieht sich auf eine kombinierte Strategie aus chirurgischem Vorgehen, anästhesiologischem Management sowie Perfusionsmanagement und sollte nicht allein auf den CPB-Kreislauf beschränkt sein. |
| Damit die Bezeichnung MiECC zutrifft, muss das System die folgenden wesentlichen Komponenten enthalten: einen geschlossenen Kreislauf, biologisch inerte Oberflächen für den Blutkontakt, ein verringertes Priming-Volumen, eine Zentrifugalpumpe, einen Membranoxygenator, einen Wärmetauscher, ein Kardioplegiesystem, eine venöse Blasenfalle bzw. einen venösen Luftabscheider und ein Managementsystem für Wundblut. |
| Komponenten, die zusätzlich in ein MiECC-System eingebaut werden können, sind: Pulmonalarterien-Vent, Pulmonalvenen-Vent, Aortenwurzel-Vent, Weichbeutel- bzw. Weichschalenreservoir, Hartschalenreservoir (modulare Systeme), ein geregeltes intelligentes Saugsystem und ein Filter in der arteriellen Linie. |

Tab. 2: Zusammenfassung der vom Expertenausschuss unterstützten Aussagen

| Empfehlung | Evidenzgrad | Literaturverweis |
|---|-------------|---------------------|
| Klasse I | | |
| MiECC-Systeme verringern die Hämodilution, sorgen für eine bessere Aufrechterhaltung des Hämatokrits und verringern postoperative Blutungen sowie den Bedarf an Erythrozytentransfusionen. | A | [18,26,28] |
| MiECC-Systeme verringern die Inzidenz des postoperativen Vorhofflimmerns. | A | [13,18,23,28] |
| MiECC-Systeme erhalten die Nierenfunktion. | A | [18,55] |
| MiECC ist mit einem verbesserten Myokardschutz verbunden. | A | [18,59,60,61] |
| Klasse IIA | | |
| Bei der Anwendung der MiECC ist die anhand von spezifischen Entzündungsmarkern beurteilte Entzündungsreaktion abgeschwächt. | B | [34,36,37,38] |
| MiECC-Systeme können zerebrale Gasmikroembolisationen verringern und die neurokognitive Funktion erhalten. | B | [18,42,43,44,45,46] |
| MiECC hat auf die Endorganfunktion (Lunge, Leber, Darm) einen subklinischen protektiven Effekt, der auf eine verbesserte Wiederherstellung der mikrovaskulären Organperfusion zurückzuführen ist. | B | [55,62,63,64] |
| Klasse IIB | | |
| Im Rahmen der MiECC-Strategie könnte eine geringere Thrombinbildung eine Herabsetzung der Heparindosis mit angestrebten kürzeren ACT-Zeiten erlauben. In diesem Fall sollte die individuelle Heparindosis mithilfe von Heparindosis-Monitoring-Systemen bestimmt werden. | B | [14,15,17,20] |
| Die MiECC scheint einen Überlebensvorteil in Form einer geringeren 30-Tages-Mortalität nach CABG-Operationen zu ermöglichen. | B | [18,65,66,67] |
| Für die Induktion und Aufrechterhaltung der Narkose bei Operationen mit MiECC wird die Anwendung von kurzwirksamen Opioiden in Kombination mit Propofol oder volatilen Anästhetika und eine Überwachung der Narkosetiefe mittels verarbeitetem Elektroenzephalogramm empfohlen. Die Befunde der transösophagealen Echokardiographie, die sich auf das Management der MiECC beziehen, sollten während des präoperativen Team-Time-Out kommuniziert werden. | C | [21,22,23,24,25] |
| ACT: aktivierte Gerinnungszeit (activated clotting time); CABG: Koronararterien-Bypass (coronary artery bypass grafting); MiECC: minimalinvasive extrakorporale Zirkulation (minimal invasive extracorporeal circulation) | | |

Tab. 3: Zusammenfassung der evidenzbasierten Praxisleitlinien

dules Kreislaufsystem bei Hochrisikopatienten eine technische Erfolgsrate (Durchführbarkeit der MiECC) von 100 % bietet, auch wenn diese Patienten sich komplexen Eingriffen unterziehen, wie beispielsweise Reoperationen, isolierten oder multiplen Eingriffen an Herzklappen und Aorta sowie Notfalloperationen [12].

Gerinnungsmanagement

Während der Perfusion mit MiECC könnte aufgrund einer geringeren Thrombinbildung eine Senkung der Heparindosis mit einer angestrebten kürzeren aktivierten Gerinnungszeit (activated clotting time, ACT) möglich sein (Empfehlungs-kategorie IIB, Evidenzgrad B). In diesem Fall sollte die individuelle Heparindosis mithilfe von Heparindosis-Monitoring-Systemen bestimmt werden.

Im Vergleich mit dem Standard-CPB können bei dem MiECC-System verschiedene Faktoren einen günstigen Einfluss auf die Thrombinbildung haben, zum Beispiel

der Einsatz stärker biokompatibler Oberflächen, die Verhinderung der Wechselwirkung zwischen Blut und Luft sowie der Ausschluss einer Reinfusion mit nicht-aufbereitetem Kardiotomieblut [14]. Möglich ist ein Gerinnungsmanagement mit unfractioniertem Heparin (UFH), das an den Patienten und/oder an den Eingriff angepasst wird [15, 16, 17]. Ein Gerinnungsprotokoll mit niedriger Dosis mit angestrebten ACT-Werten von 300–350 Sekunden für Bypass-Operationen und von 400–450 Sekunden für Eingriffe an den Herzklappen und für komplexe herzchirurgische Operationen ist daher sicher [18]. Während des CPB ist eine fortlaufende Kontrolle der ACT-Werte obligatorisch. Bei der Wahl eines Heparinprotokolls mit niedriger Dosis wird eine tritrationsgesteuerte Gerinnungskontrolle empfohlen (zum Beispiel mit dem Hepcon-System), um eine optimale Heparin- und Protamin-Dosis während des CPB zu gewährleisten. Zur Normalisierung der ACT-Werte sollte nach dem CPB eine an-

gemessene Antagonisierung durch Protamin erfolgen. Die kontinuierliche Infusion von UFH kann zu einer schwächeren Verbrauchskoagulopathie und einem geringeren Transfusionsbedarf führen [19, 20].

Narkose bei Eingriffen unter Einsatz der MiECC

Bei allen Patienten, die sich einer Herzoperation mit MiECC unterziehen, wird die Anwendung von kurzwirksamen Opioiden in Kombination mit Propofol oder volatilen Anästhetika und eine Überwachung der Narkosetiefe mittels verarbeitetem Elektroenzephalogramm empfohlen. Die Befunde der transösophagealen Echokardiographie, die sich auf das Management der MiECC beziehen, sollten während des präoperativen Team-Time-Out kommuniziert werden (Empfehlungskategorie IIB, Evidenzgrad C).

Das Anästhesiemanagement für Patienten, bei denen unter Einsatz eines MiECC-Systems eine Herzoperation durchgeführt

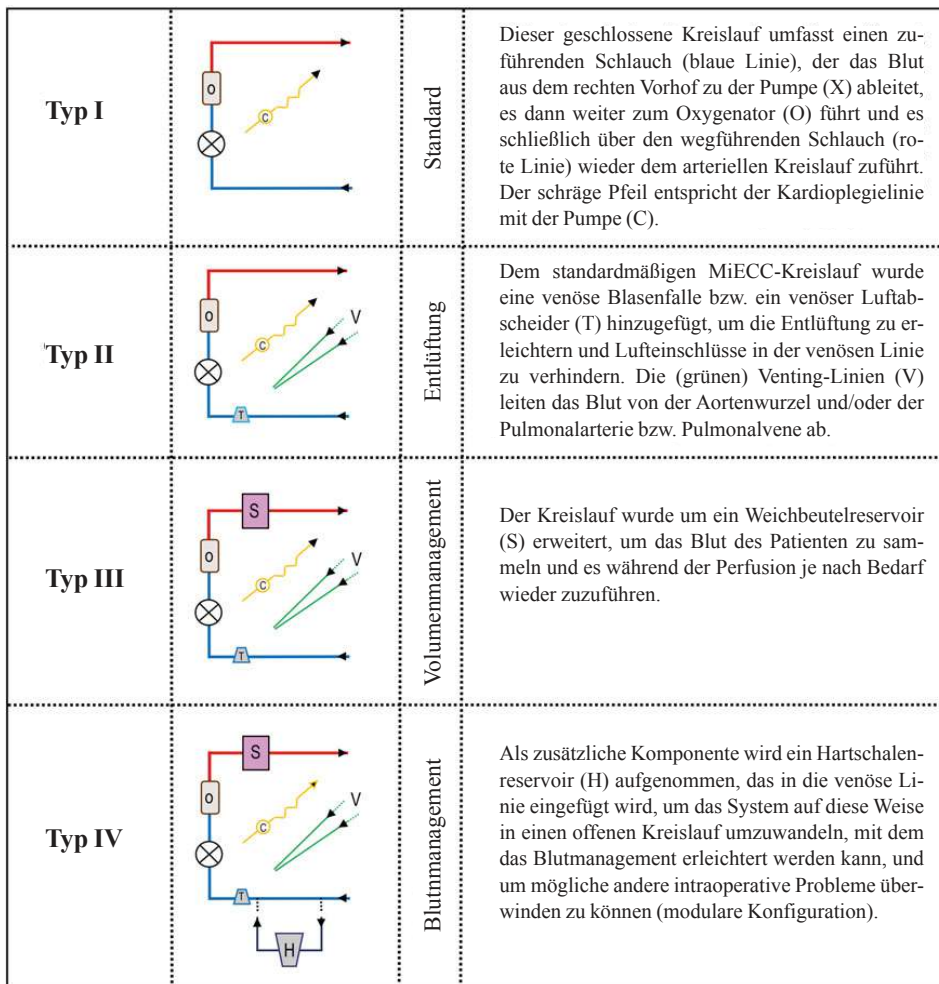


Abb. 1: Klassifikation der MiECC-Kreisläufe [12]. Zu beachten ist, dass es sich bei dem modularen Kreislauf Typ IV praktisch um den Typ III mit einer Stand-by-Komponente handelt, die nur bei Bedarfs eingesetzt wird.

(X: Pumpe; O: Oxygenator; C: Kardioplegie; T: Blasenfalle/Luftabscheider; V: Vent (aortal/pulmonal); S: Weichbeutelreservoir; H: Hartschalenreservoir)

wird, folgt den internationalen Empfehlungen, insbesondere in Bezug auf die Anwendung der transösophagealen Echokardiographie (TEE) [21, 22]. Nach Einleitung der Narkose kann die TEE zusätzliche Informationen liefern, die sich auf die Stelle und/oder den Typ der Kanülierung oder auf die Perfusionsstrategie auswirken können (zum Beispiel ein offenes Foramen ovale, erhebliche pathologische Veränderungen der Mitralklappe oder der Aortenklappe oder eine schwere Atheromatose der Aorta). Diese Informationen sind wichtig, wenn MiECC-Systeme von Typ I oder II verwendet werden, während bei einer Konfiguration von Typ III oder von dem modularen Typ IV jede Modifikation vorgenommen werden kann.

Das Fehlen eines venösen Reservoirs in MiECC-Systemen führt dazu, dass die kompartimentelle venöse Speicherkapazität des Patienten sowohl für die Hämodynamik als auch für das optimale Volumenmanagement von entscheidender Bedeutung ist. Die Lagerung des Patienten (Trendelenburg oder Anti-Trendelenburg)

und die Gabe von niedrig dosierten vasoaktiven Wirkstoffen sind nützliche Maßnahmen, um die intraoperative Hämodynamik zu kontrollieren. Eine übermäßige Verabreichung von Flüssigkeit sollte vermieden werden, um die Hämodilution und Transfusionen von Fremdblutprodukten zu verhindern [16].

Zu den vorteilhaften Effekten der MiECC zählen die Abschwächung der Entzündungsreaktion, ein höherer Hämatokrit, weniger Gerinnungsstörungen und eine verbesserte Endorganfunktion (Gehirn, Nieren, Lungen). Dadurch wird die Umsetzung von Fast-Track-Protokollen erleichtert [23]. Die perioperative Anwendung von kurzwirksamen intravenösen und/oder volatilen Anästhetika wird daher empfohlen. Durch die Dosisanpassung der Anästhetika mithilfe des ausgewerteten EEG wird außerdem eine adäquate Narkosetiefe sichergestellt [24]. Bei mikroporösen Kapillarmembranoxygenatoren ist es möglich, zur Aufrechterhaltung der Narkose volatile Anästhetika zu verwenden,

was bei Diffusionsmembranoxygenatoren nicht möglich ist [25]. Bislang liegen noch keine RCTs vor, in denen unterschiedliche Anästhetikaprotokolle bei Operationen unter Einsatz der MiECC miteinander verglichen wurden.

Hämodilution – Hämatokrit – Transfusion
MiECC-Systeme verringern die Hämodilution, sorgen für eine bessere Aufrechterhaltung des Hämatokrits und verringern postoperative Blutungen sowie den Bedarf an Erythrozytentransfusionen (Empfehlungs-kategorie I, Evidenzgrad A).

Es gibt überzeugende Beweise dafür, dass MiECC-Systeme – vor allem aufgrund des erheblich reduzierten Priming-Volumens des Kreislaufs – die Hämodilution verringern und am Ende der Perfusionsphase zu einem höheren Hämatokritwert führen [26, 27]. Dadurch wird der Bedarf an Erythrozytentransfusionen deutlich gesenkt und die Sauerstoffversorgung während der Perfusion verbessert [13, 18, 26, 28, 29]. Gerinnungsstörungen treten seltener auf [26] und für Zahl und Funktion der Thrombozyten werden nach einer Perfusion mit MiECC-Systemen bessere Ergebnisse festgestellt [30]. Postoperative Blutungen und die Inzidenz für Reexplorationen sind bei Patienten, die unter Einsatz der MiECC operiert werden, signifikant geringer [18]. Da durch die MiECC die Hämodilution verringert wird, erfüllt die MiECC – Klasse I, Evidenzgrad A – die Indikation zur Bluteinsparung gemäß den STS-Leitlinien, insbesondere bei Patienten mit einem hohen Risiko für negative Effekte der Hämodilution (pädiatrische Patienten und kleinwüchsige Erwachsene) [8]. Patienten, die eine Transfusion mit allogenen Blutprodukten ablehnen, wie beispielsweise Zeugen Jehovas, sind optimale Kandidaten für diese Strategie [31].

Abschwächung der Entzündungsreaktion
Bei der Anwendung der MiECC wird die Entzündungsreaktion abgeschwächt (Empfehlungskategorie IIA, Evidenzgrad B).

In mehreren Studien wurde die Entzündungsreaktion untersucht, die durch den konventionellen CPB ausgelöst wird, und mit der Reaktion bei MiECC-Systemen verglichen. Die MiECC-Komponenten sind darauf ausgerichtet, die Schwere des SIRS zu begrenzen. Durch die Beschichtung und die Verkleinerung des Kreislaufs wird der Umfang der Fremdoberflächen verringert, die der Hauptauslöser des SIRS sind. Eine Beobachtung, die in multizentrischen Studien allerdings noch be-

stätigt werden muss [32]. Die Beurteilung der Entzündungsreaktion ist komplex und das klinische Krankheitsbild ist höchst variabel [33]. Einige Studien liefern jedoch Nachweise für die vorteilhaften Effekte der MiECC. Von Fromes wird außerdem eine weniger ausgeprägte intraoperative Abnahme der Monozyten beschrieben, die während der ersten 24 Stunden sowohl bei Patienten mit MiECC als auch bei Patienten mit konventionellem CPB auftritt [34]. In anderen Untersuchungen fanden sich bei Anwendung der MiECC signifikant niedrigere maximale Werte für IL-6 [34–36]. Und mehrere Studien zeigten, dass die Werte der neutrophilen Elastase, einem spezifischen Marker der Neutrophilenaktivierung, bei der Perfusion mittels MiECC signifikant niedriger sind als beim konventionellen CPB [34, 37, 38].

Neurologische Funktion

MiECC-Systeme verringern zerebrale Gasmikroembolisationen und sorgen für eine bessere Erhaltung der neurokognitiven Funktion (Empfehlungsklasse IIA, Evidenzgrad B).

In verschiedenen prospektiven Studien und Metaanalysen wurde beim Vergleich mit dem konventionellen CPB nach der Anwendung der MiECC eine verringerte Schlaganfallinzidenz beschrieben [28, 39, 40]. In einer neueren Metaanalyse fand sich eine tendenzielle Verringerung neurologischer Schäden zugunsten der MiECC [18]. Allerdings sind beim Schlaganfall mehrere Faktoren von Bedeutung und das Perfusionssystem ist neben den Manipulationen an der Aorta und anderen patientenspezifischen Faktoren lediglich ein Aspekt [41]. Eine mögliche Erklärung für den neuroprotektiven Effekt der MiECC ist die deutliche Verringerung von Gasmikroembolisationen [42–46]. Außerdem ermöglicht die MiECC eine bessere zerebrale Perfusion während des CPB; dies zeigt sich an der geringeren Abnahme der mittels Nahinfrarotspektroskopie ermittelten Werte der regionalen zerebralen Sauerstoffsättigung (rScO₂) und den zerebralen Desaturationsepisoden [42, 45, 47, 48]. Die geringere Inzidenz der zerebralen Desaturationsepisoden wirkt sich günstig auf die neurokognitiven Ergebnisse aus [49–51].

Vorhofflimmern

MiECC verringert die Inzidenz des postoperativen Vorhofflimmerns (Empfehlungsklasse I, Evidenzgrad A).

Verschiedene randomisierte Studien zeigten, dass das postoperative Vorhofflim-

mern (VF) nach der MiECC im Vergleich mit dem konventionellen CPB signifikant seltener auftritt [13, 23, 36, 52]. Darüber hinaus findet sich in allen Metaanalysen mit MiECC-Systemen starke Evidenz für eine niedrigere Inzidenz von VF [18, 28, 40]. Eine Erklärung für diesen günstigen Effekt könnten die abgeschwächte Entzündungsreaktion und die geringeren Volumenverschiebungen in Verbindung mit der MiECC sein [53].

Nierenfunktion

MiECC erhält die Nierenfunktion (Empfehlungsklasse I, Evidenzgrad A).

Mehrere Studien zeigten, dass die Anwendung von MiECC-Systemen mit einer besseren Erhaltung der Nierenfunktion verbunden ist [54–56]. Dies bestätigte sich auch in einer Metaanalyse von 24 RCTs, auch wenn weder diese Metaanalyse noch andere Studien eine verringerte Inzidenz des postoperativen Nierenversagens zeigen konnten [18,54,57]. Eine Erklärung für diese Beobachtung könnten eine stabilere Hämodynamik zusammen mit einem höheren Perfusionsdruck und einem geringeren Bedarf an Vasopressoren während der MiECC-Perfusion sein [10,58]. Es bestand ein signifikanter unabhängiger Zusammenhang zwischen dem niedrigsten Hämatokritwert während des Bypasses und einer akuten Nierenschädigung. Die Verringerung des Priming-Volumens zeigte einen deutlichen positiven Effekt auf die Nierenfunktion. Dies könnte zurückzuführen sein auf ein besseres Sauerstoffangebot (DO₂) in Zusammenhang mit einem höheren Hämatokrit beim CPB [29]. Verschiedene Marker zur Beurteilung der Nierenfunktion – die glomeruläre Filtrationsrate und die Konzentrationen des Neutrophilen-Gelatinase-assoziierten Lipocalins – bestätigten einen besseren Nierenschutz bei Anwendung der MiECC. Zur Prüfung der Zusammenhänge dieser protektiven Effekte und dem Auftreten eines akuten Nierenversagens werden umfangreichere Studien benötigt.

Myokardschutz

MiECC ist mit einem verbesserten Myokardschutz verbunden (Empfehlungsklasse I, Evidenzgrad A).

Mehrere Studien zeigten einen günstigen Effekt der MiECC auf den intraoperativen Myokardschutz [10,18,59,60]. Eine Erklärung für diesen vorteilhaften Effekt könnten das verringerte Kardioplegievolumen mit weniger Kristalloiden und die Abschwächung des SIRS sein [34]. Studi-

en mit MiECC und einem intermittierenden Abklemmen zeigen einen vergleichbaren Effekt auf den Myokardschutz [61]. Für den Myokardschutz ist jedoch nicht nur die Ischämiedauer bedeutsam, sondern auch die Reperfusionsphase. Auch ein erhöhter arterieller Druck während des CPB sowie eine volumenkonstante Perfusion mit einem geschlossenen System können dazu beitragen, den Myokardschutz zu verbessern [54,58].

Endorganschutz

MiECC hat auf die Endorganfunktion (Lunge, Leber, Darm) einen subklinischen protektiven Effekt, der auf eine verbesserte mikrovaskuläre Organperfusion zurückzuführen ist (Empfehlungsklasse IIA, Evidenzgrad B).

Das MiECC-System ist ein geschlossenes System, das bedingt durch einen höheren arteriellen Druck sowie nahezu normalen systemischen Gefäßwiderstand eine bessere periphere Perfusion ermöglicht [54]. Dadurch ergibt sich ein geringerer Bedarf an vasoaktiver Unterstützung [10,58]. Daten aus randomisierten Studien deuten auf einen verbesserten Lungenschutz [62] sowie eine abgeschwächte Leber- und Darmdysfunktion hin [55,62,63]. MiECC können einen positiven Einfluss auf die in diesen Studien untersuchten Surrogatmarker haben. Die für die Endorganfunktion vermuteten Effekte blieben bisher subklinisch. Bei Hochrisikopatienten und Patienten mit länger dauernden Eingriffen könnten diese Effekte jedoch klinisch wahrnehmbar sein, da die MiECC sich in geringerem Maß auf die Mikroperfusion auswirken würde [64].

Mortalität

Die MiECC scheint mit einem Überlebensvorteil in Form einer geringeren 30-Tages-Mortalität nach Bypass-Operationen verbunden zu sein (Empfehlungsklasse IIB, Evidenzgrad B).

Mehrere Studien zeigten eine tendenziell geringere Mortalität bei Bypass-Operationen, die mit MiECC durchgeführt wurden. Eine neuere Metaanalyse von 24 Studien mit 2770 Bypass-Patienten ergab, dass die MiECC im Vergleich mit dem konventionellen CPB mit einer signifikanten Abnahme der Mortalität verbunden war (0,5 % versus 1,7 %; p = 0,02) [18]. Dieses Ergebnis wurde auch durch andere Studien bestätigt [65,66,67]. Eine tendenziell geringere Mortalität zugunsten der MiECC fand sich auch in Metaanalysen [28,40] und in einer Propensity-Score-Analyse [68]. Die-

ser Überlebensvorteil könnte auf die kumulativen günstigen Effekte der MiECC auf den Endorganschutz zurückzuführen sein; zur Klärung ist jedoch eine multizentrische randomisierte kontrollierte Studie mit ausreichend starker Relevanz erforderlich, in der dieser Überlebensvorteil prospektiv untersucht wird.

Kosteneffektivität

Daten aus einer Studie zur Kostenanalyse deuten auf eine Kosteneffektivität der MiECC-Systeme hin, die in verschiedenen Bereichen der Gesundheitsversorgung ökonomische Vorteile bieten [69]. Diese Ergebnisse müssen jedoch in Zusammenhang mit den örtlichen Gegebenheiten betrachtet werden. Erforderlich sind eine genauere Analyse und eine Untersuchung aus Sicht der Kostenträger. Um einen Vergleich von Kosten und ökonomischem Nutzen zu ermöglichen, ist eine stärkere Standardisierung notwendig.

DISKUSSION

Die MiECC-Systeme wurden entwickelt, um alle Vorteile der CPB-Technologie in einem geschlossenen Kreislauf zu kombinieren: Ziele sind die Verbesserung der Biokompatibilität und die Minimierung der Nebenwirkungen des CPB. Die MiECC weist während der Perfusion sowie im Frühstadium nach der Perfusion eine stabilere Hämodynamik auf und ermöglicht einen besseren Endorganschutz. Prospektiven randomisierten Studien und Metaanalysen zufolge bietet sie hinsichtlich der Morbidität und Mortalität bei Bypass-Operationen sowie Eingriffen an den Herzklappen vergleichbare oder bessere Ergebnisse. Ungeachtet verschiedener klinischer Vorteile verläuft die Implementierung der MiECC-Technologie weiterhin nur schleppend, da vermutlich weiterhin Bedenken bestehen, erstens bezüglich der Entlüftung und zweitens bezüglich des Blut- und Volumenmanagements während der Perfusion [12]. Dieses Konsensuspapier dient in erster Linie der Zusammenfassung der zu dieser Technologie vorliegenden Informationen und der Klärung einiger noch offener Fragen. Unter großem Einsatz haben wir die verfügbaren aktuellen Nachweise recherchiert und empfehlen nachdrücklich, sie als eine multidisziplinäre Strategie anzusehen.

Nach wie vor wird über die optimale Entlüftung während der Perfusion sowie über das Volumen- und Blutmanagement bei der Anwendung eines MiECC-Systems diskutiert. Der mittlere arterielle Druck

(mean arterial pressure, MAP) ist während der MiECC gewöhnlich höher als bei vergleichbar durchgeführten CECC. Dies wirft die Frage nach der optimalen Pumprate während der MiECC-Perfusion auf [10, 58]. Ein anhand der Körperoberfläche ermittelter empfohlener Blutfluss ist keine Garantie für eine adäquate Körperperfusion während des CPB. Moderne Protokolle passen den Pumpfluss an, um angemessene DO₂-Werte zu erzielen. In diesem Bereich ist es weiterhin unklar, ob die Anwendung der MiECC, so wie dies neuere Studien nahelegen, womöglich einen niedrigeren Herzindex als gewöhnlich erlaubt, ohne dass Endorganschäden entstehen [70, 71]. Der Einsatz der Nahinfrarotspektroskopie und anderer Parameter zur Überwachung des zerebralen Blutflusses könnte zu einem deutlich individuelleren Perfusionsindex für eine adäquate Endorganperfusion führen [48, 72]. Der geringere Heparinbedarf und die verringerte Hämodilution bei Anwendung der MiECC erleichtern außerdem das Management von postoperativen Blutungen. Die prophylaktische Gabe von Antifibrinolytika in niedriger Dosis [73] und das patientennahe Gerinnungsmanagement mithilfe von Thrombelastometrie und Aggregometrie werden allgemein empfohlen [74]. Bei Patienten mit einem höheren perioperativen Risiko [68], denen mit einer niedrigen Auswurffraktion und in Notfällen, [67, 68, 75] hat sich die MiECC als sicher erwiesen.

Die MiECC kann im Allgemeinen als Kreislauf der Wahl angesehen werden, um den konventionellen CPB zumindest bei CABG-Operationen zu ersetzen. Neuartige modulare Systeme (MiECC Typ IV) könnten bei allen Herzoperationen angewendet werden. Unserer Auffassung nach sollte unterschieden werden zwischen den Begriffen Kreislauf, der auf den CPB verweist, dem MiECC-System, das bestimmte Komponenten eines CPB-Kreislaufs enthält, und der MiECC-Strategie, die sich auf den multidisziplinären Ansatz der MiECC bezieht. Die internationale Gesellschaft für minimalinvasive extrakorporale Technologien (MiECTiS) befürwortet diese Strategie, um den maximalen Nutzen für die Patienten zu erzielen. Die Autoren sind der Überzeugung, dass die MiECC als ein zusätzliches Instrument im Bereich der minimalen Invasivität verstanden werden sollte. Letzteres sollte nicht auf die Chirurgie mit minimalem Zugang beschränkt sein, sondern auch eine Strategie in Richtung auf einen physiologischeren CPB beinhalten. Die Anwendung der MiECC sollte be-

rücksichtigt und aufgenommen werden in Konzepte wie: Fast-Track-Algorithmen, das patientennahe Management von Gerinnungsstörungen zusammen mit jeder Initiative, die zu einer besseren Beurteilung der Aorta führt (epiaortaler Ultraschall), neuartige antiinflammatorische Strategien, ein Kanüledesign mit geringerer Scherbelastung sowie die Umsetzung von zeitgemäßen biologischen Filtrationstechniken.

Da keine großen Datenmengen vorliegen, ist die Schaffung eines Registers erforderlich, um diese Technologie eingehend beurteilen zu können. Außerdem sollten die Unterschiede im Ausmaß der Miniaturisierung/Komplexität der MiECC-Systeme analysiert werden. Zusätzliche RCTs, in deren Mittelpunkt Herzklappen- und andere Herzoperationen stehen, sowie große Patientenkohorten werden weitere Nachweise zu der klinischen Effektivität liefern. Multizentrische Studien mit ausreichender statistischer Relevanz werden benötigt, um die Überlegenheit der MiECC gegenüber dem konventionellen CPB zu belegen.

In der Literatur wurden Bedenken geäußert in Bezug auf den Verlust des Sicherheitsnetzes, die ventrikuläre Dilatation während der Perfusion bei der Verwendung des Standardkreislaufs, den Verlust des blutfreien Operationsfeldes und das Risiko von Luftembolien [76, 77]. Trotz der aufwändigen Literatursichtung kann aufgrund der sehr geringen Anzahl von Einzelbeobachtungen kein erhöhtes intraoperatives Risiko festgestellt werden. Ein Sicherheitsverlust während der Perfusion ist mit den unter „Komponenten des MiECC-Systems“ beschriebenen Typen II–IV nicht gegeben. Darüber hinaus behindern relevante Luftteinschlüsse die Kontinuität der Perfusion mit MiECC oder CECC gleichermaßen. Einer ventrikulären Dilatation, die auf eine unzureichende Entleerung des Herzens zurückzuführen ist, kann ab MiECC Typ II mit einer Volumenentlastung über die Aortenwurzel und/oder die Pulmonalarterie bzw. die Pulmonalvene zuvorgekommen werden. Dasselbe gilt für die Schaffung eines vollkommen blutfreien Operationsfeldes. Spezielle Patientenpopulationen, wie beispielsweise Patienten mit einer größeren Körperoberfläche, die höhere Flussraten benötigen, können einfach versorgt werden, indem eine kinetisch-unterstützte venöse Drainage eingesetzt wird und die Flussrate der Zentrifugalpumpe erhöht wird. Hinsichtlich der Luftembolien lässt die aktuell vorliegende Evidenz vermuten, dass im Vergleich mit dem konventionellen CPB in der arteriel-

len Linie der MiECC-Systeme signifikant weniger Gasmikroembolisationen auftreten [78].

Dennoch muss darauf hingewiesen werden, dass es sich bei der MiECC um ein anspruchsvolles System handelt, das in der Herzchirurgie als eine Strategie und nicht als ein einfacher Kreislauf eingesetzt werden sollte. Eine funktionierende Zusammenarbeit aller Disziplinen des Operationsteams, eine sorgfältige chirurgische Arbeit, ein qualifizierter Kardiotechniker und ein optimales Anästhesiemanagement sind zwingend erforderlich, um eine physiologischere Perfusion zu erreichen, die zu besseren klinischen Ergebnissen führen könnte. Initiativen, die die Erforschung und klinische Anwendung der MiECC-Systeme als Strategie fördern, werden von MiECTiS durch multidisziplinäre Trainingsprogramme unterstützt (Trockenlabore/Hands-on-Simulatoren, Nasslabore, Peer-to-Peer-Workshops). Die Einführung von spezifischen Trainingsprogrammen unter der Aufsicht von MiECTiS wird die Zusammenarbeit zwischen Klinikern anregen und verbessern, während die Industrie gleichzeitig wichtige Informationen erhält, die der kontinuierlichen Verbesserung der Systeme dienen sollen. MiECTiS beabsichtigt, ein umfassendes und strukturiertes Programm zu unterstützen, das zur weiteren Verbesserung der Patientenversorgung beitragen wird.

Abschließend weisen die Autoren darauf hin, dass sie die MiECC als eine physiologisch basierte Strategie ansehen und nicht nur als einen CPB-Kreislauf oder ein bestimmtes Produkt. Aus diesem Grund ist eine multidisziplinäre Vorgehensweise obligatorisch. Die Zusammenarbeit zwischen Chirurgen, Anästhesisten und Kardiotechnikern ist von zentraler Bedeutung, um die wesentlichen Grundsätze von MiECTiS umzusetzen.

Aus dem Englischen von Michael Kraft.

LITERATUR

[1] Song HK, Diggs BS, Slater MS, Guyton SW, Ungerleider RM, Welke KF: Improved quality and cost-effectiveness of coronary artery bypass grafting in United States from 1988 to 2005. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2009;137: 65–69

[2] Anastasiadis K, Antonitsis P, Argiriadou H (Hg): *Principles of Miniaturized Extra-Corporeal Circulation*. Berlin Heidelberg: Springer 2013: 1–8

[3] Schonberger JP, Everts PA, Hoffmann JJ: Systemic blood activation with open and clo-

sed venous reservoir. *Ann Thorac Surg* 1995; 59:1549–55

[4] Butler J, Rocker GM, Westaby S: Inflammatory response to cardiopulmonary bypass. *Ann Thorac Surg* 1993; 55: 552–559

[5] Kirklin JK, Westaby S, Blackstone EH, Kirklin JW, Chenoweth DE, Pacifico AD: Complement and the damaging effects of cardiopulmonary bypass. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1983; 86: 845–857

[6] Speir AM, Kasirajan V, Barnett SD, Foner E Jr: Additive costs of postoperative complications for isolated coronary artery bypass grafting patients in Virginia. *Ann Thorac Surg* 2009; 88: 40–45

[7] Anastasiadis K, Bauer A, Antonitsis P, Gygax E, Schaarschmidt J, Carrel T: Minimal invasive Extra-Corporeal Circulation (MiECC): a revolutionary evolution in perfusion. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2014; 19: 541–542

[8] Society of Thoracic Surgeons Blood Conservation Guideline Task Force, Ferraris VA, Brown JR, Despotis GJ, Hammon JW, Reece TB, Saha SP et al. 2011 update to the Society of Thoracic Surgeons and the Society of Cardiovascular Anesthesiologists blood conservation clinical practice guidelines. *Ann Thorac Surg* 2011; 91: 944–982

[9] Tutschka MP, Bainbridge D, Chu MW, Kiani B, Jones PM: Unilateral postoperative pulmonary edema after minimally invasive cardiac surgical procedures: a case-control study. *Ann Thorac Surg* 2015; 99: 115–122

[10] Wiesenack C, Liebold A, Philipp A, Ritzka M, Koppenberg J, Birnbaum DE et al: Four years' experience with a miniaturized extracorporeal circulation system and its influence on clinical outcome. *Artif Organs* 2004; 28: 1082–88

[11] Yilmaz A, Sjatskig J, van Boven WJ, Wanders FG, Kelder JC, Sonker U et al: Combined coronary artery bypass grafting and aortic valve replacement with minimal extracorporeal closed circuit circulation versus standard cardiopulmonary bypass. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2010; 11: 754–757

[12] Anastasiadis K, Antonitsis P, Argiriadou H, Deliopoulos A, Grosomanidis V, Tossios P: Modular minimally invasive extracorporeal circulation systems; can they become the standard practice for performing cardiac surgery? *Perfusion* 2015; 30:195–200

[13] El-Essawi A, Hajek T, Skorpil J, Böning A, Sabol F, Ostrovsky Y et al: Are minimized perfusion circuits the better heart lung machines? Final results of a prospective randomized multicentre study. *Perfusion* 2011; 26: 470–478

[14] Ovrum E, Holen EA, Tangen G, Brosstad F, Abdelnoor M, Ringdal MA et al: Completely heparinized cardiopulmonary bypass and reduced systemic heparin: clinical and hemostatic effects. *Ann Thorac Surg* 1995; 60: 365–371

[15] Fromes Y, Daghildjian K, Caumartin L, Fischer M, Rouquette I, Deleuze P et al: A comparison of low vs conventional-dose heparin for minimal cardiopulmonary bypass in coronary artery bypass grafting surgery. *Anaesthesia* 2011; 66: 488–492

[16] Anastasiadis K, Antonitsis P, Argiriadou H (Hg): *Principles of Miniaturized Extracorporeal Circulation*. Berlin Heidelberg: Springer 2013: 63–71

[17] Nilsson J, Scicluna S, Malmkvist G, Pierre L, Algotsson L, Paulsson P et al: A randomized study of coronary artery bypass surgery performed with the Resting Heart System utili-

zing a low vs a standard dosage of heparin. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2012; 15: 834–839

[18] Anastasiadis K, Antonitsis P, Haidich AB, Argiriadou H, Deliopoulos A, Papakonstantinou C: Use of minimal extracorporeal circulation improves outcome after heart surgery; a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Int J Cardiol* 2013; 164: 158–169

[19] Hofmann B, Bushnaq H, Kraus FB, Raspe C, Simm A, Silber RE et al: Immediate effects of individualized heparin and protamine management on hemostatic activation and platelet function in adult patients undergoing cardiac surgery with tranexamic acid antifibrinolytic therapy. *Perfusion* 2013; 28: 412–418

[20] Despotis GJ, Joist JH, Hogue CW Jr, Al-soufiev A, Kater K, Goodnough LT et al: The impact of heparin concentration and activated clotting time monitoring on blood conservation. A prospective, randomized evaluation in patients undergoing cardiac operation. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1995; 110: 46–54

[21] Flachskampf FA, Badano L, Daniel WG, Feneck RO, Fox KF, Fraser AG et al: Recommendations for transoesophageal echocardiography: update 2010. *Eur J Echocardiogr* 2010; 11: 557–576

[22] Hahn RT, Abraham T, Adams MS, Bruce CJ, Glas KE, Lang RM et al: Guidelines for performing a comprehensive transesophageal echocardiographic examination: recommendations from the American Society of Echocardiography and the Society of Cardiovascular Anesthesiologists. *Anesth Analg* 2014; 118: 21–68

[23] Anastasiadis K, Asteriou C, Antonitsis P, Argiriadou H, Grosomanidis V, Kyparissa M et al: Enhanced recovery after elective coronary revascularization surgery with minimal versus conventional extracorporeal circulation: a prospective randomized study. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2013; 27: 859–864

[24] Barry AE, Chaney MA, London MJ: Anesthetic management during cardiopulmonary bypass: a systematic review. *Anesth Analg* 2015; 120: 749–769

[25] Pagel PS: Myocardial protection by volatile anesthetics in patients undergoing cardiac surgery: a critical review of the laboratory and clinical evidence. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2013. 27: 972–982

[26] Anastasiadis K, Asteriou C, Deliopoulos A, Argiriadou H, Karapanagiotidis G, Antonitsis P et al: Haematological effects of minimized compared to conventional extracorporeal circulation after coronary revascularization procedures. *Perfusion* 2010; 25: 197–203

[27] Haneya A, Philipp A, Von Suesskind-Schwendi M, Diez C, Hirt SW, Kolat P et al: Impact of minimized extracorporeal circulation on outcome in patients with preoperative anemia undergoing coronary artery bypass surgery. *ASAIO J* 2013; 59: 269–274

[28] Zangrillo A, Garozzo FA, Biondi-Zoccai G, Pappalardo F, Monaco F, Crivellari M et al: Miniaturized cardiopulmonary bypass improves short-term outcome in cardiac surgery: a meta-analysis of randomized controlled studies. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2010; 139: 1162–69

[29] Ranucci M, Romitti F, Isgro G, Cotza M, Brozzi S, Boncilli A et al: Oxygen delivery during cardiopulmonary bypass and acute renal

- failure after coronary operations. *Ann Thorac Surg* 2005; 80: 2213–20
- [30] Rahe-Meyer N, Solomon C, Tokuno ML, Winterhalter M, Shrestha M, Hahn A et al: Comparative assessment of coagulation changes induced by two different types of heart-lung machine. *Artif Organs* 2010; 34: 3–12
- [31] El-Essawi A, Breitenbach I, Ali K, Jungbluth P, Brouwer R, Anssar M et al: Minimized perfusion circuits: an alternative in the surgical treatment of Jehovah's Witnesses. *Perfusion* 2013; 28: 47–53
- [32] Anastasiadis K, Antonitsis P, Argiriadou H (Hg): *Principles of Miniaturized Extracorporeal Circulation*. Berlin Heidelberg: Springer, 2013: 73–99
- [33] Clive Landis R, Murkin JM, Stump DA, Baker RA, Arrowsmith JE, De Somer F et al: Consensus statement: minimal criteria for reporting the systemic inflammatory response to cardiopulmonary bypass. *Heart Surg Forum* 2010; 13: E116–123
- [34] Fromes Y, Gaillard D, Ponzio O, Chauffert M, Gerhardt MF, Deleuze P et al: Reduction of the inflammatory response following coronary bypass grafting with total minimal extracorporeal circulation. *Eur J Cardiothorac Surg* 2002; 22: 527–533
- [35] Liebold A, Reisinger S, Lehle K, Rupprecht L, Philipp A, Birnbaum DE: Reduced invasiveness of perfusion with a minimized extracorporeal circuit (the Jostra MECC System). *Thorac Cardiovasc Surg* 2002; 50(Suppl): S75
- [36] Immer FF, Ackermann A, Gygax E, Stalder M, Englberger L, Eckstein FS et al: Minimal extracorporeal circulation is a promising technique for coronary artery bypass grafting. *Ann Thorac Surg* 2007; 84: 1515–21
- [37] Rahman UA, Ozaslan F, Risteski PS, Martens S, Moritz A, Daraghmeah AA et al: Initial Experience With a Minimized Extracorporeal Bypass System: Is There a Clinical Benefit? *Ann Thorac Surg* 2005; 80: 238–244
- [38] Ohata T, Mitsuno M, Yamamura M, Tanaka H, Kobayashi Y, Ryomoto M et al: Minimal cardiopulmonary bypass attenuates neutrophil activation and cytokine release in coronary artery bypass grafting. *J Artif Organs* 2007; 10: 92–95
- [39] Puehler T, Haneya A, Philipp A, Wiebe K, Keyser A, Rupprecht L et al: Minimal extracorporeal circulation: An alternative for on-pump and off-pump coronary revascularization. *Ann Thorac Surg* 2009; 87: 766–772
- [40] Biancari F, Rimpilainen R: Meta-analysis of randomized trials comparing the effectiveness of miniaturized versus conventional cardiopulmonary bypass in adult cardiac surgery. *Heart* 2009; 95: 964–969
- [41] Murkin JM: Attenuation of neurologic injury during cardiac surgery. *Ann Thorac Surg* 2001; 72: S1838–1844
- [42] Liebold A, Khosravi A, Westphal B, Skrabal C, Choi YH, Stamm C et al: Effect of closed minimized cardiopulmonary bypass on cerebral tissue oxygenation and microembolization. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2006; 131: 268–276
- [43] Zanatta P, Forti A, Minniti G, Comin A, Mazzarolo AP, Chilufya M et al: Brain emboli distribution and differentiation during cardiopulmonary bypass. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2013; 27: 865–875
- [44] Camboni D, Schmidt S, Philipp A, Rupprecht L, Haneya A, Puehler T et al: Microbubble activity in miniaturized and in conventional extracorporeal circulation. *ASAIO J* 2009; 55: 58–62
- [45] Anastasiadis K, Argiriadou H, Kosmidis MH, Megari K, Antonitsis P, Thomaidou E et al: Neurocognitive outcome after coronary artery bypass surgery using minimal versus conventional extracorporeal circulation: a randomized controlled pilot study. *Heart* 2011; 97: 1082–88
- [46] Reineke D, Winkler B, König T, Meszaros K, Sodeck G, Schönhoff F et al: Minimized extracorporeal circulation does not impair cognitive brain function after coronary artery bypass grafting. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2015; 20: 68–73
- [47] Gunaydin S, Sari T, McCusker K, Schonrock U, Zorlutuna Y: Clinical evaluation of minimized extracorporeal circulation in high-risk coronary revascularization: impact on air handling, inflammation, hemodilution and myocardial function. *Perfusion* 2009; 24: 153–162
- [48] Bennett M, Weatherall M, Webb G, Dudnikov S, Lloyd C: The impact of haemodilution and bypass pump flow on cerebral oxygen desaturation during cardiopulmonary bypass - A comparison of two systems of cardiopulmonary bypass. *Perfusion* 2014 Aug 20. pii: 0267659114548256. [Epub ahead of print]
- [49] Murkin JM: Cerebral oximetry: monitoring the brain as the index organ. *Anesthesiology* 2011; 114: 12–13
- [50] Slater JP, Guarino T, Stack J, Vinod K, Bustami RT, Brown JM 3rd et al: Cerebral oxygen desaturation predicts cognitive decline and longer hospital stay after cardiac surgery. *Ann Thorac Surg* 2009; 87: 36–44
- [51] Murkin JM, Adams SJ, Novick RJ, Quantz M, Bainbridge D, Iglesias I et al: Monitoring brain oxygen saturation during coronary bypass surgery: a randomized, prospective study. *Anesth Analg* 2007; 104: 51–58
- [52] Panday GF, Fischer S, Bauer A, Metz D, Schubel J, El-Shouki N et al: Minimal extracorporeal circulation and off-pump compared to conventional cardiopulmonary bypass in coronary surgery. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2009; 9: 832–836
- [53] Remadi JP, Rakotoarivelo Z, Marticho P, Benamar A: Prospective randomized study comparing coronary artery bypass grafting with the new mini-extracorporeal circulation Jostra System or with a standard cardiopulmonary bypass. *Am Heart J* 2006; 151: e1–198
- [54] Diez C, Haneya A, Brunger F, Philipp A, Hirt S, Rupprecht L et al: Minimized extracorporeal circulation cannot prevent acute kidney injury but attenuates early renal dysfunction after coronary bypass grafting. *ASAIO J* 2009; 55: 602–607
- [55] Huybregts RA, Morariu AM, Rakhorsht G, Spiegelenberg SR, Romijn HW, de Vroeghe R et al: Attenuated renal and intestinal injury after use of a mini-cardiopulmonary bypass system. *Ann Thorac Surg* 2007; 83: 1760–66
- [56] Capuano F, Goracci M, Luciani R, Gentile G, Roscitano A, Benedetto U et al: Neutrophil gelatinase-associated lipocalin levels after use of mini-cardiopulmonary bypass system. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2009; 9: 797–801
- [57] Benedetto U, Luciani R, Goracci M, Capuano F, Refice S, Angeloni E et al: Miniaturized cardiopulmonary bypass and acute kidney injury in coronary artery bypass graft surgery. *Ann Thorac Surg* 2009; 88: 529–35
- [58] Bauer A, Diez C, Schubel J, El-Shouki N, Metz D, Eberle T et al: Evaluation of hemodynamic and regional tissue perfusion effects of minimized extracorporeal circulation (MECC). *J Extra Corpor Technol* 2010; 42: 30–39
- [59] Skrabal CA, Steinhoff G, Liebold A: Minimizing cardiopulmonary bypass attenuates myocardial damage after cardiac surgery. *ASAIO J* 2007; 53: 32–35
- [60] van Boven WJ, Gerritsen WB, Driessen AH, Morshuis WJ, Waanders FG, Haas FJ et al: Myocardial oxidative stress, and cell injury comparing three different techniques for coronary artery bypass grafting. *Eur J Cardiothorac Surg* 2008; 34: 969–75
- [61] Nguyen BA, Suleiman MS, Anderson JR, Evans PC, Fiorentino F, Reeves BC et al: Metabolic derangement and cardiac injury early after reperfusion following intermittent cross-clamp fibrillation in patients undergoing coronary artery bypass graft surgery using conventional or miniaturized cardiopulmonary bypass. *Mol Cell Biochem* 2014; 395: 167–175
- [62] van Boven WJ, Gerritsen WB, Driessen AH, van Dongen EP, Klautz RJ, Aarts LP: Minimized closed circuit coronary artery bypass grafting in the elderly is associated with lower levels of organ-specific biomarkers: a prospective randomized study. *Eur J Anaesthesiol* 2013; 30: 685–694
- [63] Prasser C, Abbady M, Keyl C, Liebold A, Tenderich M, Philipp A et al: Effect of a miniaturized extracorporeal circulation (MECC System) on liver function. *Perfusion* 2007; 22: 245–250
- [64] Donndorf P, Kuhn F, Vollmar B, Rösner J, Liebold A, Gierer P et al: Comparing microvascular alterations during minimal extracorporeal circulation and conventional cardiopulmonary bypass in coronary artery bypass graft surgery: a prospective, randomized study. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2012; 144: 677–683
- [65] Haneya A, Philipp A, Schmid C, Diez C, Kobuch R, Hirt S et al: Minimized versus conventional cardiopulmonary bypass: outcome of high-risk patients. *Eur J Cardiothorac Surg* 2009; 36: 844–848
- [66] Kolat P, Ried M, Haneya A, Philipp A, Kobuch R, Hirt S et al: Impact of age on early outcome after coronary bypass graft surgery using minimized versus conventional extracorporeal circulation. *J Cardiothorac Surg* 2014; 9: 143
- [67] Ried M, Haneya A, Kolat P, Philipp A, Kobuch R, Hilker M et al: Emergency coronary artery bypass grafting using minimized versus standard extracorporeal circulation - a propensity score analysis. *J Cardiothorac Surg* 2013; 8: 59
- [68] Koivisto SP, Wistbacka JO, Rimpilainen R, Nissinen J, Lopenon P, Teittinen K et al: Miniaturized versus conventional cardiopulmonary bypass in high-risk patients undergoing coronary artery bypass surgery. *Perfusion* 2010; 25: 65–70
- [69] Anastasiadis K, Fragoulakis V, Antonitsis P, Maniadakis N: Coronary artery bypass grafting with minimal versus conventional extracorporeal circulation; an economic analysis. *Int J Cardiol* 2013; 168: 5336–43
- [70] Fernandes P, MacDonald J, Cleland A, Walsh G, Mayer R: What is optimal flow using

a mini-bypass system? *Perfusion* 2010; 25: 133–137

[71] de Somer F, Mulholland JW, Bryan MR, Aloisio T, Van Nooten GJ, Ranucci M: O₂ delivery and CO₂ production during cardiopulmonary bypass as determinants of acute kidney injury: time for a goal-directed perfusion management? *Crit Care* 2011; 15: R192

[72] Murkin JM: Is it better to shine a light, or rather to curse the darkness? *Cerebral near-infrared spectroscopy and cardiac surgery. Eur J Cardiothorac Surg* 2013; 43: 1081–83

[73] Hutton B, Joseph L, Fergusson D, Mazer CD, Shapiro S, Tinmouth A: Risks of harms using antifibrinolytics in cardiac surgery: systematic review and network meta-analysis of randomised and observational studies. *BMJ* 2012; 345: e5798

[74] Gorlinger K, Shore-Lesserson L, Dirkmann D, Hanke AA, Rahe-Meyer N, Tanaka KA: Management of hemorrhage in cardiothoracic surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2013; 27(4 Suppl): S20-34

[75] Puehler T, Haneya A, Philipp A, Camboni D, Hirt S, Zink W et al: Minimized extracorporeal circulation in coronary artery bypass surgery is equivalent to standard extracorporeal circulation in patients with reduced left ventricular function. *Thorac Cardiovasc Surg* 2010; 58: 204–209

[76] Nollert G, Schwabenland I, Maktav D, Kur F, Christ F, Fraunberger P et al: Miniaturized cardiopulmonary bypass in coronary artery bypass surgery: marginal impact on inflammation and coagulation but loss of safety margins. *Ann Thorac Surg* 2005; 80: 2326–32

[77] Aboud A, Liebing K, Börgermann J, Ensminger S, Zittermann A, Renner A et al: Excessive negative venous line pressures and increased arterial air bubble counts during miniaturized cardiopulmonary bypass: an experimental study comparing miniaturized with conventional perfusion systems. *Eur J Cardiothorac Surg* 2014; 45: 69–74

[78] Bauer A, Schaarschmidt J, Anastasiadis K, Carrel T: Reduced amount of gaseous microemboli in the arterial line of minimized extracorporeal circulation systems compared with conventional extracorporeal circulation. *Eur J Cardiothorac Surg* 2014; 46: 152

[79] ACCF/Arbeitsgruppe für Praxisleitlinien der AHA: Methodik-Handbuch und Grundsätze der ACCF/Arbeitsgruppe für Praxisleitlinien der AHA. American College of Cardiology Foundation und American Heart Association, Inc. [cardiosource.org](http://assets.cardiosource.org). 2010. Verfügbar unter: http://assets.cardiosource.org/Methodology_Manual_for_ACC_AHA_Writing_Committees.pdf

INTERESSENKONFLIKT

Die Autoren haben keine finanziellen Interessen oder Beziehungen, die möglicherweise zu irgendwelchen Interessenkonflikten führen könnten.

*Korrespondierender Autor:
Thierry Carrel, MD
Klinik für Herz- und Gefäßchirurgie,
Universitätsklinik Bern und
Universität Bern, CH-3010 Bern, Schweiz
thierry.carrel@insel.ch
+41 31 632 23 75 (Telefon)
+41 31 632 44 43 (Fax)

| Autor, Journal, Datum, [Ref.] | Studientyp | Art des Verfahrens | Patientengruppen | Typ des MiECC-Kreislaufs | Wichtigste Ergebnisse | Kommentare |
|---|----------------------------|--|--|--------------------------|--|--|
| Wiesenack, Artif Organs 2004, [10] | Retrospektive Analyse | CABG | 485 MiECC / 485 konventioneller CPB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - höherer MAP und höhere mittlere Pumprate während der MiECC - seltenere Anwendung von vasoaktiven Substanzen bei MiECC-Patienten ($p < 0,05$) - Höchstwerte der Laktatkonzentration während des Bypasses waren beim konventionellen CPB signifikant höher - Minimalwerte für Hämoglobin als ein Indikator für eine Hämodilution waren bei MiECC-Patienten höher ($p < 0,05$). - Transfusionsmenge von Erythrozytenkonzentraten während der Operation und während des vollständigen perioperativen Verlaufs war beim konventionellen CPB signifikant größer ($p < 0,05$) - 30-Tages-Mortalität bei den Gruppen vergleichbar - Inzidenz der postoperativen Komplikationen beim konventionellen CPB signifikant höher ($p < 0,05$) | erste veröffentlichte große Serie, in der verbesserte Perfusions-eigenschaften und klinische Ergebnisse beschrieben wurden |
| Yilmaz, Interact Cardio-vasc Thorac Surg 2010, [11] | Prospektive Kohortenstudie | CABG + AKE | 65 MiECC / 135 konventioneller CPB | Typ III | <ul style="list-style-type: none"> - mit MiECC geringerer präoperativer Hämoglobinabfall und höherer Hämoglobinwert bei Entlassung ($p = 0,03$) - mit MiECC geringerer Bedarf an Blutprodukten ($p = 0,004$) - keine Unterschiede hinsichtlich pulmonaler Komplikationen, neurologischer Ereignisse oder Mortalität | Machbarkeitsstudie |
| Anastasiadis, Perfusion 2015, [12] | Prospektive Kohortenstudie | Mischung aus unterschiedlichen Herzkrankheiten | 50 konsekutive Patienten | Typ IV | <ul style="list-style-type: none"> - Technischer Erfolg betrug 100 %. - Umwandlungsrate von Typ III zu Typ IV (modulare MiECC) lag bei 4 %. | Klinische Studie zum modularen MiECC-Typ IV bei allen Arten der Herzchirurgie (Machbarkeits- und Sicherheitsstudie) |

| Autor, Journal, Datum, [Ref.] | Studientyp | Art des Verfahrens | Patientengruppen | Typ des MIECC-Kreislaufs | Wichtigste Ergebnisse | Kommentare |
|--|---------------------------------|--------------------|--|--------------------------|---|--|
| El-Essawi, Perfusion 2011, [13] | Multizentrische RCT (6 Zentren) | CABG und/oder AKE | 252 MIECC / 248 konventioneller CPB | Typ IV | <ul style="list-style-type: none"> - keine operative Mortalität oder gerätebezogenen Komplikationen - Kardiomiesauger musste wegen schwerer Blutungen bei zehn Patienten eingesetzt werden. - Bei einem Patienten wurde der Einbau eines Hartschalenreservoirs zur Entlüftung als notwendig angesehen. - Ergebnisse für Transfusionsbedarf ($p = 0,001$), Inzidenz des Vorhofflimmerns ($p = 0,03$) und Inzidenz der schweren unerwünschten Ereignisse ($p = 0,02$) fielen zugunsten der MIECC-Gruppe aus. | Schwerpunkt auf modularem MIECC-Typ IV bei CABG und/oder AKE |
| Fromes, Anaesthesia 2011, [15] | Retrospektive Analyse | CABG | 100 Patienten 300 IU/kg Heparin / 68 Patienten 145 IU/kg Heparin | Typ II | <ul style="list-style-type: none"> - keine thromboembolischen Ereignisse in einer der Gruppen - Gruppe mit niedriger Dosis hatte über 24 Stunden einen geringeren mittleren postoperativen Blutverlust ($p = 0,001$) und eine geringere Transfusionsrate für allogenes Blut ($p = 0,01$). | Umsetzung eines Heparinprotokolls mit niedriger Dosis |
| Nilson, Interact Cardiovasc Thorac Surg 2012, [17] | RCT | CABG | 27 niedrig dosiertes Heparin / 29 Standarddosis | Typ II | <ul style="list-style-type: none"> - In der Kontrollgruppe erhielten vier Patienten insgesamt zehn Einheiten Erythrozytenkonzentrat und in der Gruppe mit niedriger Dosis wurden keine Transfusionen vorgenommen ($p = 0,046$). - Kein Patient wurde aufgrund einer Blutung erneut operiert. - In der Gruppe mit niedriger Dosis war der Aufenthalt auf der Intensivstation signifikant kürzer ($p = 0,020$). - Patienten in der Gruppe mit niedriger Dosis waren am ersten postoperativen Tag weniger auf Sauerstoff angewiesen ($p = 0,034$), besser mobilisiert ($p = 0,006$) und hatten weniger Schmerzen ($p = 0,019$). | Machbarkeit der Anwendung von niedrig dosiertem Heparin |

| Autor, Journal, Datum, [Ref.] | Studientyp | Art des Verfahrens | Patientengruppen | Typ des MIECC-Kreislaufs | Wichtigste Ergebnisse | Kommentare |
|---|-------------------------------|--------------------|---|--------------------------|--|--|
| Anastasiadis, J Cardiothorac Vasc Anesth 2013, [23] | RCT | CABG | 60 MIECC / 60 konventioneller CPB | Typ II | <ul style="list-style-type: none"> - Inzidenz der Fast-Track-Genesung war bei Patienten mit MIECC signifikant höher (p = 0,006). - MIECC erwies sich als ein starker unabhängiger Prädiktor für eine frühe Genesung (p = 0,011). - Dauer der mechanischen Beatmung und Aufenthaltsdauer im Aufwachraum waren bei Patienten mit MIECC signifikant geringer. - Bedarf an Bluttransfusionen, Dauer der inotropen Unterstützung, erforderliche Anwendung der intraaortalen Ballonpumpe, Entwicklung eines postoperativen Vorhofflimmerns und Nierenversagen waren bei Patienten mit MIECC signifikant geringer. | Schwerpunkt auf Fast-Track-Protokollen |
| Anastasiadis, Perfusion 2010, [26] | RCT | CABG | 50 MIECC / 49 konventioneller CPB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - geringere Hämodilution (p = 0,001), deutlich geringere Hämolyse (p < 0,001) und bessere Erhaltung der Integrität des Gerinnungssystems (p = 0,01) zugunsten der MIECC-Gruppe - geringerer Blutbedarf und eine hinsichtlich der mechanischen Beatmung und des Aufenthalts auf der Intensivstation schnellere Genesung in der MIECC-Gruppe | Schwerpunkt auf hämatologischen Effekten |
| Haneya, ASAIO J 2013, [27] | Retrospektive Kohortenanalyse | CABG | 1073 MIECC / 872 konventioneller CPB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - Postoperative Kreatinkinase- und Laktatwerte waren in der MIECC-Gruppe signifikant niedriger (p < 0,001). - keine Unterschiede zwischen den Gruppen hinsichtlich des postoperativen Blutverlustes - Intraoperativer und postoperativer Transfusionsbedarf waren in der MIECC-Gruppe signifikant geringer (p < 0,05). - MIECC-Patienten wiesen niedrigere Inzidenzen für das postoperative akute Nierenversagen und das Low-Cardiac-Output-Syndrom auf, hatten kürzere Aufenthalte auf der Intensivstation und eine verringerte 30-Tages-Mortalität (p < 0,05). | Schwerpunkt auf Patienten mit präoperativer Anämie |

| Autor, Journal, Datum, [Ref.] | Studientyp | Art des Verfahrens | Patientengruppen | Typ des MIECC-Kreislaufs | Wichtigste Ergebnisse | Kommentare |
|--|----------------------------|--------------------|--|--------------------------|---|-------------------------------|
| Zangrillo, J Thorac Cardiovasc Surg 2010, [28] | Metaanalyse (16 RCTs) | CABG oder AKE | 803 MIECC / 816 konventioneller CPB | | <ul style="list-style-type: none"> - MIECC war verbunden mit einer signifikanten Verringerung neurologischer Schäden ($p = 0,008$) sowie einer signifikanten Abnahme des maximalen Wertes für kardiales Troponin ($p < 0,001$) und der Anzahl der transfundierten Patienten ($p < 0,001$). - keine Unterschiede hinsichtlich der Mortalität festgestellt | Metaanalyse |
| Anastasiadis, Int J Cardiol 2013, [18] | Metaanalyse (24 RCTs) | CABG oder AKE | 1387 MIECC / 1383 konventioneller CPB | | <ul style="list-style-type: none"> - MIECC war verbunden mit einer signifikanten Senkung der Mortalität ($p = 0,02$), einer signifikanten Verringerung des postoperativen Myokardinfarktrisikos ($p = 0,03$) und einer verringerten Rate der neurologischen Ereignisse ($p = 0,08$). - MIECC war verbunden mit einer signifikanten Verringerung der systemischen inflammatorischen Response, der Hämodilution, des Bedarfs an Erythrozytentransfusionen, einer Verringerung der maximalen Werte für die Troponinfreisetzung, der Inzidenz für das Low-Cardiac-Output-Syndrom, des Bedarfs an inotroper Unterstützung, des maximalen Kreatininwertes, des Auftretens von postoperativem Vorhofflimmern, der Dauer der mechanischen Beatmung und der Aufenthaltsdauer auf der Intensivstation. | Größte Metaanalyse |
| Rahe-Meyer, Artif Organs 2010, [30] | Prospektive Kohortenstudie | CABG | 44 MIECC / 44 konventioneller CPB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - Aggregation nahm in beiden Gruppen bereits 30 Minuten nach dem Beginn des CPB signifikant ab ($p < 0,05$) und wurde in den ersten 24 Stunden nach der Operation zusammen wiederhergestellt, ohne das präoperative Niveau zu erreichen. - Intraoperative Aggregatmetriewerte zeigten in der Gruppe mit konventionellem CPB eine signifikant stärkere Verringerung der Thrombozytenfunktion ($p < 0,01$). | Schwerpunkt auf Blutgerinnung |

| Autor, Journal, Datum, [Ref.] | Studientyp | Art des Verfahrens | Patientengruppen | Typ des MiECC-Kreislaufs | Wichtigste Ergebnisse | Kommentare |
|--|---------------------------------|--|---|----------------------------------|---|---------------------------------------|
| El-Essawi, Perfusion 2013, [31] | Kohortenstudie (Zeugen Jehovas) | Mischung aus unterschiedlichen Herzerkrankheiten | 29 Patienten 22 CABG +/- AKE 7 Mischung aus unterschiedlichen Krankheiten | Typ IV | <ul style="list-style-type: none"> - Mittlere Hämoglobinabnahme lag während des CPB bei $2,1 \pm 1,3$ g/dl und bei der Entlassung bei $3,4 \pm 1,4$ g/dl. - Niedrigster postoperativer Hämoglobinwert war $9,3 \pm 1,8$ g/dl. | Machbarkeitsstudie mit Zeugen Jehovas |
| Fromes, Eur J Cardiothorac Surg 2002, [34] | RCT | CABG | 30 MiECC/ 30 konventioneller CPB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - MiECC-System ermöglichte eine geringere Hämodilution ($p < 0,05$). - Mononukleäre Phagozyten nahmen in der Gruppe mit konventionellem CPB stärker ab ($p = 0,002$). - In keiner der Gruppen wurde eine signifikante Freisetzung von IL-1b beobachtet. - Am Ende des CPB waren die IL-6-Werte in der MiECC-Gruppe signifikant niedriger ($p = 0,04$) trotz einer höheren Monozytenzahl. - Plasmawerte von TNF-α nahmen in der Gruppe mit konventionellem CPB signifikant zu ($p = 0,002$). - Die Freisetzung von neutrophiler Elastase war in der MiECC-Gruppe signifikant verringert ($p = 0,001$). - Mit MiECC waren die Werte für die Thrombozytenzahl weiterhin hoch. - Die β-Thromboglobulin-Werte zeigten in der MiECC-Gruppe eine etwas schwächere Thrombozytenaktivierung ($p = 0,10$). | Schwerpunkt auf SIRS |
| Immer, Ann Thorac Surg 2007, [36] | Vergleichende Kohortenstudie | CABG | 1053 MiECC/ 353 konventioneller CPB | Typ I + intelligentes Saugsystem | <ul style="list-style-type: none"> - TnI-Wert war in der MiECC-Gruppe signifikant niedriger ($p < 0,05$). - Mit MiECC war die Inzidenz von VF signifikant verringert ($p < 0,05$). - Werte für Entzündungsmarker (IL-6, SC5b-9) waren bei MiECC-Patienten niedriger ($p < 0,05$). - Propensity-Score-Analyse bestätigte eine schnellere Genesung bei MiECC-Patienten und eine niedrigere Inzidenz von VF. | Machbarkeits-/Sicherheitsstudie |

| Autor, Journal, Datum, [Ref.] | Studientyp | Art des Verfahrens | Patientengruppen | Typ des MIECC-Kreislaufs | Wichtigste Ergebnisse | Kommentare |
|--|------------------------------|--------------------|---|--------------------------|--|---------------------------------|
| Abdel-Rahman, Ann Thorac Surg 2005, [37] | RCT | CABG | 101 MIECC / 103 konventioneller CPB | Typ II | <ul style="list-style-type: none"> - Sowohl der intraoperative Blutverlust war in der Gruppe mit konventionellem CPB signifikant höher ($p < 0,0001$) als auch der Bedarf an gefrorenem Frischplasma. - kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen hinsichtlich postoperativer Thoraxdrainage - Eine Stunde nach dem CPB waren sowohl die Werte für die polymorphe Elastase als auch die Werte für den terminalen Komplementkomplex in der MIECC-Gruppe signifikant niedriger ($p < 0,0001$). | Machbarkeits-/Sicherheitsstudie |
| Ohata, J Artif Organs 2007, [38] | RCT | CABG | 15 MIECC / 15 konventioneller CPB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - Die Werte für die neutrophile Elastase waren in der MIECC-Gruppe am 1. und 2. postoperativen Tag niedriger ($p = 0,013$). - IL-8-Werte waren bei MIECC-Patienten am 1. postoperativen Tag verringert ($p = 0,016$). - Intraoperativer Blutverlust und Transfusionsvolumen waren in der MIECC-Gruppe signifikant geringer ($p = 0,012$). | Schwerpunkt auf SIRS |
| Puehler, Ann Thorac Surg 2009, [39] | Vergleichende Kohortenstudie | CABG | 558 MIECC / 558 konventioneller CPB / 558 OPCAB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - Krankenhausmortalität bei Patienten mit elektiver und dringender/notfallmäßiger Behandlung war in der MIECC- und der OPCAB-Gruppe niedriger ($p < 0,05$). - Anzahl der distalen Anastomosen war in der OPCAB-Gruppe am niedrigsten, aber bei MIECC-Patienten und Patienten mit konventionellem CPB vergleichbar. - Postoperative Beatmungsdauer, Freisetzung von Kreatinkinase, Katecholamintherapie, Drainageverlust und Transfusionsbedarf waren in der MIECC- und der OPCAB-Gruppe geringer, während die Aufenthaltsdauer auf der Intensivstation nur in der letztgenannten Gruppe kürzer war ($p < 0,05$). | Machbarkeits-/Sicherheitsstudie |

| Autor, Journal, Datum, [Ref.] | Studientyp | Art des Verfahrens | Patientengruppen | Typ des MIECC-Kreislaufs | Wichtigste Ergebnisse | Kommentare |
|--|-----------------------|--------------------|--|--------------------------|--|---------------------------------------|
| Biancari, Heart 2009, [40] | Metaanalyse (13 RCTs) | CABG oder AKE | 562 MIECC / 599 konventioneller CPB | | <ul style="list-style-type: none"> - MIECC war während der unmittelbaren postoperativen Phase mit einer verringerten Mortalität verbunden, das Ergebnis war jedoch statistisch nicht signifikant (p = 0,25). - Die postoperative Schlaganfallrate war in der MIECC-Gruppe signifikant niedriger (p = 0,05). - Die Aufenthaltsdauer auf der Intensivstation war in beiden Gruppen ähnlich (p = 0,87). - MIECC war mit einem signifikant geringeren postoperativen Blutverlust verbunden (p = 0,0002) sowie einer höheren Thrombozytenzahl sechs Stunden nach der Operation (p = 0,03). | Metaanalyse |
| Liebold, J Thorac Cardiovasc Surg 2006, [42] | RCT | CABG | 20 MIECC / 20 konventioneller CPB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - Gruppe mit konventionellem CPB zeigte vom Beginn bis zum Ende des CPB eine hochsignifikante Abnahme sowohl des zerebralen oxygenierten Hämoglobins als auch des Gewebeoxygenierungsindex (p < 0,01). - Zerebrales oxygeniertes Hämoglobin nahm nach aortaler Kanülierung in der Gruppe mit konventionellem CPB schneller ab (p < 0,001). - In der MIECC-Gruppe kam es, außer am Beginn der Wiedererwärmung, zu keinen signifikanten Veränderungen hinsichtlich des zerebralen oxygenierten Hämoglobins oder des Gewebeoxygenierungsindex (p < 0,01). - Die Gesamtzahl der Embolien sowie die Anzahl der Gasembolien in der linken und der rechten mittleren Hirnarterie waren in der MIECC-Gruppe signifikant niedriger (alle p < 0,05). - In der Gruppe mit konventionellem CPB waren die postoperativen Blutungen stärker (p < 0,05) und die Transfusionsraten höher (p < 0,05). | Schwerpunkt auf zerebraler Protektion |

| Autor, Journal, Datum, [Ref.] | Studientyp | Art des Verfahrens | Patientengruppen | Typ des MIECC-Kreislaufs | Wichtigste Ergebnisse | Kommentare |
|---|-----------------------|--------------------|---|----------------------------------|---|---|
| Zanatta, J Cardiothorac Vasc Anesth 2013, [43] | Retrospektive Kohorte | CABG | 19 MIECC (CABG) / 18 konventioneller CPB (AKE oder MKE) / 18 Portzugang MKE | Typ I | - Die Anzahl der soliden Mikroembolien und der Gasmikroembolien war in der MIECC-Gruppe signifikant verringert (p < 0,001). | Schwerpunkt auf zerebraler Protektion |
| Camboni, ASAIO J 2009, [44] | RCT | CABG | 42 MIECC Typ I 10 MIECC Typ II 41 konventioneller CPB | Typ I und II | - MIECC führte im Vergleich zum konventionellen CPB zu einer geringeren Mikroblassenaktivität (p = 0,02). - keine Gruppenunterschiede in Bezug auf postoperative neuropsychologische Funktionsstörungen (p = 0,45), renale Dysfunktion (p = 0,67), Krankenhaustage (p = 0,27) und 30-Tages-Mortalität (p = 0,30) | Schwerpunkt auf zerebraler Protektion |
| Anastasiadis, Heart 2011, [45] | RCT | CABG | 29 MIECC / 31 konventioneller CPB | Typ I | - MIECC war mit einer verbesserten zerebralen Perfusion während des CPB verbunden. - Weniger Patienten mit MIECC erlebten mindestens eine zerebrale Desaturationsperiode (p = 0,04) mit ähnlicher Dauer. - Bei der Entlassung zeigten Patienten mit MIECC eine signifikant verbesserte Leistungsfähigkeit in Bezug auf komplexe Scans, visuelles Tracking, fokussierte Aufmerksamkeit und Langzeitgedächtnis. - Nach drei Monaten zeigte sich auch in Bezug auf die visuell-räumliche Wahrnehmung, die exekutive Funktion, das verbale Arbeitsgedächtnis und das Kurzzeitgedächtnis eine signifikant verbesserte Leistungsfähigkeit. | Schwerpunkt auf neurokognitiven Ergebnissen |
| Reineke, Interact Cardiovasc Thorac Surg 2014, [46] | Kohortenstudie | CABG | 31 MIECC | Typ I + intelligentes Saugsystem | - Patienten mit MIECC hatten ein signifikant niedrigeres Risiko für einen frühen kognitiven Abbau sowohl bei der Entlassung (p = 0,03) als auch bei der Untersuchung nach drei Monaten (p < 0,01). - MIECC hatte keine negativen Auswirkungen auf die kognitive Hirnfunktion nach CABG. | Schwerpunkt auf Neurokognition |

| Autor, Journal, Datum, [Ref.] | Studientyp | Art des Verfahrens | Patientengruppen | Typ des MIECC-Kreislaufs | Wichtigste Ergebnisse | Kommentare |
|--------------------------------|----------------|--------------------|-------------------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|
| Gynaydin, Perfusion 2009, [47] | RCT | CABG | 20 MIECC/ 20 konventioneller CPB | Typ IV | <ul style="list-style-type: none"> - Serum-IL-6-Werte waren in der MIECC-Gruppe signifikant niedriger ($p < 0,05$). - C3a-Werte waren in der Gruppe mit Mini-CPB signifikant niedriger ($p < 0,01$). - CK-MB-Werte im Koronarsinusblut belegten gut erhaltenes Myokard in der MIECC-Gruppe. - Prozentuale Expression der neutrophilen CD11b/CD18-Werte war in der MIECC-Gruppe signifikant geringer ($p < 0,05$). - Keine signifikanten Unterschiede zwischen den Kreisläufen hinsichtlich der Entlüftungseigenschaften oder der Werte für das freie Hämoglobin im Plasma. - rSO₂-Messwerte in der MIECC-Gruppe signifikant besser ($p < 0,05$) - Die Adsorptionsanalyse der Blutproteine an den Oxygenatormembranen zeigte eine signifikant erhöhte Menge von Mikroalbumin auf den Fasern des konventionellen CPB ($p < 0,05$). | Schwerpunkt auf SIRS und Hämodilution |
| Bennett, Perfusion 2014, [48] | Kohortenstudie | CABG und/oder AKE | 39 MIECC 41 konventioneller CPB | Typ II | <ul style="list-style-type: none"> - Die durchschnittliche indexierte Pumprate im Bypass war mit MIECC bei derselben durchschnittlichen Sauerstoffversorgung signifikant niedriger. - Bei den Patienten in der Gruppe mit konventionellem CPB hielt die zerebrale Desaturation länger an und war stärker ausgeprägt, was signifikant mit niedrigen Flüssen während des CPB verbunden war, während die Desaturation mit MIECC mit einer niedrigen peripheren Hämoglobinkonzentration assoziiert war. | Schwerpunkt auf zerebraler Protektion |

| Autor, Journal, Datum, [Ref.] | Studientyp | Art des Verfahrens | Patientengruppen | Typ des MiECC-Kreislaufs | Wichtigste Ergebnisse | Kommentare |
|---|----------------------------|--------------------|---|--------------------------|--|---------------------------------|
| Panday, Interact Cardio-vasc Thorac Surg 2009, [52] | Prospektive Kohortenstudie | CABG | 220 MiECC 1.143 konventioneller CPB 109 OPCAB | Typ II | <ul style="list-style-type: none"> - Die operativen Mortalitätsraten waren in allen drei Gruppen vergleichbar. - Die mittlere Anzahl der distalen Anastomosen war in der MiECC-Gruppe und der Gruppe mit konventionellem CPB höher als in der OPCAB-Gruppe ($p = 0,01$). - Herzrhythmusstörungen traten auf bei 25 % der MiECC-Gruppe, 35,6 % der Gruppe mit konventionellem CPB ($p = 0,05$) und 21,7 % der OPCAB-Gruppe. - 3 % der MiECC-Gruppe litten perioperativ an neurokognitiven Störungen im Vergleich zu 7 % der Gruppe mit konventionellem CPB ($p = 0,05$) und 3 % der OPCAB-Gruppe. - Die mediane Anzahl der Bluttransfusionen pro Patient war in der MiECC- und der OPCAB-Gruppe niedriger ($p < 0,0001$). | Schwerpunkt auf Bluttransfusion |
| Remadi, Am Heart J 2006, [53] | RCT | CABG | 200 MiECC/ 200 konventioneller CPB | Typ I + Saugsystem | <ul style="list-style-type: none"> - Die operative Mortalitätsrate war bei den Gruppen vergleichbar. - Low-Cardiac-Output-Syndrom war in der MiECC-Gruppe seltener ($p < 0,001$). - Die Entzündungsreaktion war in der MiECC-Gruppe signifikant verringert; die postoperative Freisetzung von C-reaktivem Protein war in der Gruppe mit konventionellem CPB signifikant höher. - In der Gruppe mit konventionellem CPB gab es eine signifikant höhere Abnahme des Hämatokrit- und des Hämoglobinanteils. - In der MiECC-Gruppe war die intraoperative Transfusionsrate verringert ($p < 0,001$). - Patienten in der Gruppe mit konventionellem CPB hatten signifikant höhere postoperative Werte für Blutkreatinin und Harnstoff. | Machbarkeits-/Sicherheitsstudie |

| Autor, Journal, Datum, [Ref.] | Studientyp | Art des Verfahrens | Patientengruppen | Typ des MIECC-Kreislaufs | Wichtigste Ergebnisse | Kommentare |
|---|----------------------------------|--------------------|--|--------------------------|---|--|
| Diez, ASAIO J 2009, [54] | Retrospektive Beobachtungsstudie | CABG | 1.685 MIECC / 3.046 konventioneller CPB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - MIECC hatte günstige hämodynamische Effekte, verhinderte jedoch keine AKI. - Mit MIECC kam es bei weniger Patienten zu einer Abnahme der eGFR <60 ml/min/1,73 m² (p < 0,001). - Es gab keine Unterschiede hinsichtlich der Inzidenz der eGFR-Abnahme um >50 % (p = 0,20) - Temporäre Dialyse war in der MIECC-Gruppe reduziert (p < 0,001). - MIECC ist in der frühen postoperativen Phase renoprotektiv, kann aber eine AKI nicht verhindern. | Schwerpunkt auf Nierenfunktion |
| Huybregts, Ann Thorac Surg 2007, [55] | RCT | CABG | 25 MIECC / 24 konventioneller CPB | Typ II | <ul style="list-style-type: none"> - MIECC war verbunden mit einer abgeschwächten Hämodilution mit Herz-Lungen-Maschine, einem verbesserten hämostatischen Zustand mit verringertem Thrombozytenverbrauch und verringerter Thrombozytenaktivierung, verminderten postoperativen Blutungen und minimiertem Transfusionsbedarf. - MIECC-Patienten zeigten eine geringere Leukozytose und niedrigere Interleukin-6-Werte im Urin. - Bei Patienten mit MIECC waren die NGAL-Werte im Urin durchschnittlich dreimal niedriger und die IFABP-Werte im Urin 40 % niedriger. | Schwerpunkt auf Nieren- und Darmfunktion |
| Capuano, Interact Cardiovasc Thorac Surg 2009, [56] | Prospektive Kohortenstudie | CABG | 30 MIECC / 30 konventioneller CPB | Typ II | <ul style="list-style-type: none"> - Die Gruppe mit konventionellem CPB zeigte im Vergleich mit den präoperativen Werten während des ersten postoperativen Tages einen signifikanten Anstieg der NGAL-Konzentration (p < 0,05). - Kein Patient in der MIECC-Gruppe entwickelte eine AKI. - NGAL-Konzentrationen zeigten, dass die Nierenfunktion während der MIECC besser geschützt ist. | Schwerpunkt auf Nierenschädigung |
| Benedetto, Ann Thorac Surg 2009, [57] | Prospektive Kohortenstudie | CABG | 104 MIECC / 601 konventioneller CPB | Typ II | <ul style="list-style-type: none"> - Gesamtinzidenz der AKI war bei Patienten mit MIECC verringert (p = 0,03). | Schwerpunkt auf Nierenschädigung |

| Autor, Journal, Datum, [Ref.] | Studientyp | Art des Verfahrens | Patientengruppen | Typ des MIECC-Kreislaufs | Wichtigste Ergebnisse | Kommentare |
|---|------------|--------------------|--|--------------------------|---|---|
| Bauer, J Extra Corpor Technol 2010, [58] | RCT | CABG | 18 MIECC / 22 konventioneller CPB | Typ II | <ul style="list-style-type: none"> - MAP-Werte waren in der MIECC-Gruppe signifikant höher (p = 0,002). - MIECC-Patienten erhielten signifikant weniger Norepinephrin (p = 0,045) | Schwerpunkt auf Perfusionsseigenschaften |
| Skrabal, ASAIO J 2007, [59] | RCT | CABG | 30 MIECC / 30 konventioneller CPB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - MIECC-Patienten hatten signifikant niedrigere TnT-Werte nach 6, 12 und 24 Stunden und CK-MB-Werte nach 6 und 12 Stunden. | Schwerpunkt auf Myokardschutz |
| Van Boven, Eur J Cardiothorac Surg 2008, [60] | RCT | CABG | 10 MIECC 10 CCP 10 OPCAB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - Die Werte der Marker für oxidativen Stress des Myokards oder oxidative Aktivität waren in der MIECC-Gruppe signifikant niedriger als bei konventionellem CPB bzw. OPCAB (p = 0,04 bzw. 0,03). | Schwerpunkt auf Myokardschutz |
| Nguyen, Mol Cell Biochem 2014, [61] | RCT | CABG | 13 MIECC / 13 konventioneller CPB (intermittierendes Abklemmen) | Typ III | <ul style="list-style-type: none"> - Die anhand der TnT-Werte beurteilte kardiale Gesamtschädigung war in der MIECC-Gruppe signifikant geringer (p = 0,02). | Schwerpunkt auf Myokardschutz |
| Van Boven, Eur J Anaesthesiol 2013, [62] | RCT | CABG | 20 MIECC 20 CCP 20 OPCAB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - Die MIECC-Gruppe zeigte signifikant niedrigere mediane TnT-Werte als die Gruppe mit konventionellem CPB und die OPCAB-Gruppe (p < 0,003). - Werte für HFABP, IFABP und a-GST waren während des konventionellen CPB signifikant höher als mit OPCAB und MIECC (p < 0,009). - In der Gruppe mit konventionellem CPB gab es tendenziell höhere mediane CC16-Werte (p < 0,07). | Schwerpunkt auf Endorganschutz |
| Prasser, Perfusion 2007, [63] | RCT | CABG | 10 MIECC / 10 konventioneller CPB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - Die anhand der Verschwinderate von Indocyaningrün gemessene Leberfunktion war nach der Herzoperation deutlich erhöht ohne signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen. | Schwerpunkt auf Leberfunktion |
| Donndorf, J Thorac Cardiovasc Surg 2012, [64] | RCT | CABG | 20 MIECC / 20 konventioneller CPB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - Während des konventionellen CPB war die mikrovaskuläre Perfusion beeinträchtigt (p = 0,034). - Veränderungen der funktionellen Kapillardichte deuteten auf eine schnellere Wiederherstellung der mikrovaskulären Perfusion bei MIECC während der Reperfusionperiode hin (p = 0,017). | Schwerpunkt auf mikrovaskulärer Perfusion |

| Autor, Journal, Datum, [Ref.] | Studientyp | Art des Verfahrens | Patientengruppen | Typ des MIECC-Kreislaufs | Wichtigste Ergebnisse | Kommentare |
|--|-------------------------------|--------------------|---|--------------------------|---|---|
| Haneya, Eur J Cardiothorac Surg 2009, [65] | Retrospektive Kohortenstudie | CABG | 105 MIECC / 139 konventioneller CPB (Hochrisikopatienten) | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - CK-Werte waren in der MIECC-Gruppe sechs Stunden nach der Operation signifikant niedriger ($p < 0,05$). - Bedarf an Erythrozytentransfusionen war nach Operation mit MIECC signifikant geringer ($p < 0,05$). - 30-Tages-Mortalität war in der MIECC-Gruppe signifikant niedriger ($p < 0,01$). | Schwerpunkt auf Hochrisikopatienten |
| Kolatz, J Cardiothorac Surg 2014, [66] | Retrospektive Kohortenanalyse | CABG | 1137 MIECC / 1137 konventioneller CPB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - Postoperative Notwendigkeit einer Nierersatztherapie ($p = 0,01$), respiratorische Insuffizienz ($p = 0,004$) und Inzidenz des Low-Cardiac-Output-Syndroms ($p = 0,003$) waren bei Patienten mit konventionellem CPB signifikant erhöht. | Schwerpunkt auf klinischen Ergebnissen |
| Ried, J Cardiothorac Surg 2013, [67] | Propensity-Score-Analyse | Notfall- CABG | 146 MIECC / 175 konventioneller CPB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - 30-Tages-Mortalität war bei Patienten mit MIECC verringert ($p = 0,03$). - Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Gruppen hinsichtlich der Aufenthaltsdauer auf der Intensivstation ($p = 0,70$), der Aufenthaltsdauer im Krankenhaus ($p = 0,40$) und des postoperativen Low-Cardiac-Output-Syndroms ($p = 0,83$). | Schwerpunkt auf notfallmäßigen CABG-Operationen |
| Koivisto, Perfusion 2010, [68] | Propensity-Score-Analyse | CABG | 89 MIECC / 147 konventioneller CPB | Typ II | <ul style="list-style-type: none"> - Schlaganfallrate war bei Patienten mit konventionellem CPB signifikant höher ($p = 0,026$). - Die Krankenhausmortalität, die kombinierte Rate für unerwünschte Endpunkte, die postoperativen Blutungen und der Transfusionsbedarf waren in den Studiengruppen statistisch insignifikant. | Schwerpunkt auf Hochrisikopatienten |

| Autor, Journal, Datum, [Ref.] | Studientyp | Art des Verfahrens | Patientengruppen | Typ des MIECC-Kreislaufs | Wichtigste Ergebnisse | Kommentare |
|--|--|--------------------|---|--------------------------|---|--|
| Anastasiadis, Int J Cardiol 2013, [69] | Kostenanalyse | CABG | 1.026 MIECC / 1.023 konventioneller CPB | | <ul style="list-style-type: none"> - In Bezug auf die Gesamtbehandlungskosten pro Patient fiel der Vergleich in allen Ländern zugunsten der MIECC aus. - MIECC war mit geringeren Kosten verbunden in Höhe von € 635 in Griechenland, € 297 in Deutschland, € 1.590 in den Niederlanden und € 375 in der Schweiz. - Was die Effektivität anbelangt, war die Anzahl der insgesamt gewonnenen Lebensjahre bei der MIECC etwas höher. | Schwerpunkt auf Kosteneffektivität |
| Fernandes, Perfusion 2010, [70] | Retrospektive Kohortenstudie | CABG | 15 MIECC | Typ II | <ul style="list-style-type: none"> - Bei der Anwendung von niedrigeren als vorausgesagten Flüssen wurde eine adäquate Perfusion erzielt. | Schwerpunkt auf Perfusionsseigenschaften |
| Puehler, Thorac Cardiovasc Surg 2010, [75] | Retrospektive vergleichende Kohortenstudie | CABG | 119 MIECC / 119 konventioneller CPB | Typ I | <ul style="list-style-type: none"> - MIECC-Patienten zeigten tendenziell eine niedrigere 30-Tages-Mortalitätsrate, eine bessere postoperative Nierenfunktion und eine verringerte Beatmungsdauer. - CPB-Zeit und postoperative hochdosierte inotrope Unterstützung waren in der MIECC-Gruppe signifikant geringer. - Die Aufenthaltsdauer auf der Intensivstation und im Krankenhaus war bei beiden Gruppen vergleichbar. | Schwerpunkt auf Hochrisikopatienten |

a-GST: a-Glutathion-S-Transferase; AKE: Aortenklappenersatz; AKI: akute Nierenschädigung (acute kidney injury); CABG: Koronararterien-Bypass (coronary artery bypass grafting); CPB: kardiopulmonaler Bypass (cardiopulmonary bypass); HFABP: fettsäurebindendes Protein, Herztyp (heart type fatty acid binding protein); IFABP: fettsäurebindendes Protein, Darmtyp (intestinal type fatty acid binding protein); IL: Interleukin; MAP: mittlerer arterieller Druck (mean arterial pressure); MIECC: minimalinvasive extrakorporale Zirkulation (minimal invasive extracorporeal circulation); MKE: Mitralklappenersatz; NGAL: Neutrophilen-Gelatinase-assoziiertes Lipocalin; OPCAB: Koronararterien-Bypass-Operation ohne Herz-Lungen-Maschine (off-pump coronary artery bypass grafting); RCT: randomisierte kontrollierte Studie (randomized controlled trial); SIRS: systemisches inflammatorisches Response-Syndrom; TnI: Troponin-T; TnI: Troponin-I; VF: Vorhofflimmern

Tab. 4: Zusammenfassung der Studien, die für das Konsensuspapier verwendet wurden