

Venoarterielle extrakorporale Membranoxygenierung

Indikationen, Limitationen und praktische Anwendung

Abkürzungen	
ARDS	„acute respiratory distress syndrome“
CPR	„cardiopulmonary resuscitation“
ECLS	„extracorporeal life support“
ECMO	extrakorporale Membranoxygenierung
E-CPR	„extracorporeal cardiopulmonary resuscitation“
ELSO	Extracorporeal Life Support Organization
HLM	Herz-Lungen-Maschine
IHCA	„in-hospital cardiac arrest“
MAP	„mean arterial pressure“
NIRS	„near-infrared spectroscopy“
OHCA	„out-of-hospital cardiac arrest“
PTT	„partial thromboplastin time“
VA	venoarteriell
VV	venovenös
ZVD	zentraler Venendruck

Extrakorporale Unterstützungssysteme in Form einer „extracorporeal membrane oxygenation“ (ECMO) stehen seit mehr als 40 Jahren klinisch zur Verfügung. Da ihr Einsatz früher häufig komplikationsträchtig sowie personell und finanziell extrem aufwendig war, wurden sie nur bei speziellen Indikationen angewendet. Insbesondere durch den technischen Wandel und die Weiterentwicklung von Antriebssystemen, Kanülen und

Oxygenatoren hin zu miniaturisierten und transportablen Unterstützungssystemen sind das Einsatzgebiet breiter und die Anwendung häufiger geworden.

Grundsätzlich unterscheidet man ein primär pulmonal-unterstützendes Verfahren (venovenöse, vv-ECMO) von einem primär kardial bzw. kardiozirkulatorisch-unterstützenden System (venoarteriell, va-ECMO). Im angloamerikanischen Schrifttum wird „extracorporeal life support“ (ECLS, [82]) als Oberbegriff synonym für beide Verfahren verwendet.

Weitere Möglichkeiten der kardialen und pulmonalen Unterstützung wurden jüngst an anderer Stelle ausreichend dargestellt und diskutiert [31, 35, 37, 48, 54, 60]. Im Folgenden wird v. a. auf die Möglichkeiten einer va-ECMO eingegangen.

Aufbau

Prinzipiell handelt es sich bei der va-ECMO um eine miniaturisierte Weiterentwicklung der Herz-Lungen-Maschine (HLM), jedoch ohne Kardiotomiesaugung und Reservoir bei gleichzeitig verringertem Fremdoberfläche und verringertem „Priming“-Volumen (Flüssigkeitsmenge zum Füllen des ECMO-Systems). Es werden ein zentraler und ein

periphere Zugangsweg unterschieden (■ Tab. 1):

- Bei der zentralen Kanülierung werden die Kanülen wie bei der Standardherzoperation arteriell in die Aorta und venös in den rechten Vorhof eingebracht. In besonderen Fällen kann die arterielle Kanüle in die A. pulmonalis eingeführt werden. Hier fungiert die va-ECMO dann als Rechtsherzunterstützung bzw. als funktionelle vv-ECMO.
- Bei der peripheren Kanülierung sind die arteriellen Zugangswege die A. subclavia oder femoralis. Als venöser Gefäßzugang dient die V. jugularis interna, femoralis oder subclavia. Unterschieden wird das rein perkutane von dem chirurgischen Vorgehen. Um eine Verlegung des kanülierten Gefäßes zu vermeiden, wird beim chirurgischen Zugang die arterielle Kanüle meist über eine im End-zu-Seit-Verfahren aufgenähte Gefäßprothese eingebracht.

Das Blut wird auf der venösen Seite mit einer Kanüle drainiert, über ein Pumpensystem durch einen Membranoxygenator transportiert und auf der arteriellen Seite wieder zurückgeführt (■ Abb. 1), daher auch die Bezeichnung venoarterielle ECMO (va-ECMO). Die Leistung

Tab. 1 Beispiele für typische Zugangswege zur Kanülierung einer venoarteriellen extrakorporalen Membranoxygenierung. (Mod. nach [26])

Methode	Arteriell		Venös		
	Zugangsweg	Kanülengröße	Zugangsweg	Kanülen-größe	
Zentral	Chirurgisch	Aorta ascendens	19–23 F	Rechtes Herzohr	Zweistufen: 32/40 F
		A. pulmonalis + Gefäßprothese ^a	15–17 (19–21) F 21–23 F		
Peripher		A. femoralis		V. femoralis	19–23 F
		A. subclavia, rechts			
Perkutan		A. femoralis + selektive Beinperfusion	15–17 (19–21) F + 6–14 F		

^aBei Gefäßprothese mit einem Durchmesser von 8 mm.

Tab. 2 Mögliche Ursachen eines therapierefraktären kardiozirkulatorischen und kardiopulmonalen Versagens

Primär kardial	Primär nichtkardial
Akuter Myokardinfarkt	Lungenembolie
Akute Herzklappenerkrankung	Pneumonie
Akute Verschlechterung einer vorbestehenden chronischen Herzinsuffizienz („acute on chronic heart failure“)	„Acute respiratory distress syndrome“ (ARDS)
	Ertrinkungsunfall
	Hypothermie
Maligne Rhythmusstörungen	
Postkardiotomieversagen	Pulmonaler Hypertonus
Myokarditis	Trauma
Kardiopulmonale Reanimation (E-CPR)	Spezielle Störungen und Syndrome: z. B. Phäochromozytom, Taka-Tsubo-Kardiomyopathie
Kardiale Intoxikation	

gen des Systems ergeben sich aus diesem Aufbau und beinhalten Oxygenierung, Kohlenstoffdioxid(CO₂)-Elimination, Generierung eines (Pseudo)-Herzzeitvolumens und – in Kombination mit einem Wärmetauscher – Temperaturregulation [56]. Der Betrieb einer va-ECMO ist neben medizinischen Einschränkungen v. a. durch die festgelegte Zulassungszeit der einzelnen Systeme mit bis zu 28 Tagen beschränkt.

Typische venöse Kanülen bei einer peripheren va-ECMO haben einen Durchmesser von 19–23 F bei einer Länge von 38–55 cm; dagegen sind die arteriellen Kanülen zur Minimierung vaskulärer bzw. ischämischer Komplikationen mit 15–17 F (19–21 F) bei einer Länge von 15 cm (17–23 cm) meistens ausreichend (■ Tab. 1). In der Regel sind alle Bestandteile der Systeme wie Kanülen, Oxygenatoren und Schlauchsystem heparinbeschichtet, wodurch das Ausmaß der erforderlichen Antikoagulation minimiert wird.

Indikationen

Individuelles Nutzen-Risiko-Profil

Aufgrund der Invasivität der va-ECMO, den damit einhergehenden potenziell weitreichenden Komplikationen und der medizinisch-ethischen Dimension empfiehlt es sich, die Indikation unter Abwägung des individuellen Nutzen-Risiko-Profiles (interdisziplinär im Team) zu stellen. Die in den Entscheidungsprozess involvierten Mitarbeiter müssen über eine Expertise im Bereich der extrakorporalen Unterstützungssysteme verfügen. Zudem sind die für die weitere intensivmedizinische Versorgung benötigte Ausstattung vorzuhalten sowie ein in Anzahl und Ausbildung adäquates und geschultes Pflege- und ggf. Kardiotechnikerteam zu gewährleisten.

Kardiale Insuffizienz und kardiogener Schock

Grundsätzlich stellt das therapierefraktäre kardiozirkulatorische Versagen die

Hauptindikation für den Beginn einer va-ECMO dar [2, 7, 15, 60]. Ätiologisch unterschiedliche Erkrankungen des Herzens können allein oder in Kombination zu einer kardialen Insuffizienz bzw. Dekompensation führen. Zudem kann eine Reihe von extrakardialen Prozessen ursächlich oder begleitend zu der Unfähigkeit des Herzens führen, die adäquate Versorgung des Körpers sicherzustellen (■ Tab. 2; [20]).

Sind bereits alle konservativen Möglichkeiten ausgeschöpft und/oder können diese aufgrund des raschen Krankheitsprogresses nicht mehr umgesetzt werden, kann der Einsatz einer va-ECMO erwogen werden [2, 7, 15]. Die Ursache des kardiozirkulatorisch(-pulmonalen) Versagens ist in der Akutsituation von sekundärer Bedeutung. Entscheidend ist jedoch, dass jegliche va-ECMO-Anwendung als temporäres „Bridging“-Verfahren verstanden wird, d. h., die jeweilige Grunderkrankung muss potenziell reversibel (Erholung der Ventrikelfunktion: „bridge to recovery“) oder mit einer anderweitigen Therapieoption („bridge to next decision“) verknüpft sein.

„Postcardiotomy low cardiac output syndrome“

Das Auftreten eines „postcardiotomy low cardiac output syndrome“ (Postkardiotomie-LCOS) wird in der aktuellen Literatur mit einer Häufigkeit von ca. 0,5–4,5% angegeben [24, 40, 61, 75]. Die Implementierung einer va-ECMO wird überwiegend auf der Intensivstation (55–60%) oder intraoperativ beim „Weaning“-Versagen vom kardiopulmonalen Bypass durchgeführt [61, 75].

Definitionsgemäß liegt dem Postkardiotomie-LCOS eine hochgradige Einschränkung der kardiozirkulatorischen Leistungsfähigkeit mit einem systolischen Blutdruck von <80 mmHg, einer metabolischen Acidose mit einem pH <7,30, einem Laktatwert >3,0 mmol/l sowie den Zeichen einer Endorganfunktionsstörung (Diurese <0,5 ml/kgKG/h) trotz Einsatz aller konservativen kreislaufunterstützenden Therapieoptionen zugrunde. Ergänzende, erweiterte hämodynamische Kriterien für ein Postkardiotomie-LCOS sind ein reduzierter Herzindex (<1,8 l/

min/m²KOF) bzw. erhöhte linksventrikuläre Füllungsdrücke [“pulmonary capillary wedge pressure“ (PCWP) >20 mmHg]. In dieser meist hochakuten Situation ist der temporäre Einsatz einer va-ECMO eine zunächst lebensrettende Sofortmaßnahme, mit der Zeit für weitere Diagnostik und Therapie gewonnen wird. So erfolgt nach Implementierung einer va-ECMO in ca. 30–50% der Fälle eine erneute kardiochirurgische Intervention [61, 75].

Die Ergebnisse sind trotz der fortschreitenden technischen Entwicklung unbefriedigend. Eine aktuell publizierte Metaanalyse von 1182 Patienten mit Postkardiotomie-LCOS und va-ECMO ergab eine Krankenhausentlassungsrate von lediglich 33% [19]. Die mittlere va-ECMO-Behandlungsdauer betrug 105 h; eine Entöhnung konnte nur bei ca. 60% der Patienten durchgeführt werden [19, 61, 75]. Ein anhaltendes kardiales Pumpversagen stellt bei diesen Patienten nach wie vor die Hauptursache für das schlechte Outcome dar und unterstreicht den temporären Charakter des Verfahrens. Mit Ausnahme von jenen Patienten, die über ein „Bridge-to-transplantation“-Programm gerettet werden konnten, verstarben alle nicht von der va-ECMO entwöhnbaren Patienten [19]. Weitere im Behandlungsverlauf auftretende Komplikationen, wie etwa beispielsweise Nierenversagen mit oder ohne Nierenersatztherapie oder Blutungskomplikationen, tragen signifikant zu gesteigerter Morbidität und Letalität sowie zu einer hohen Behandlungsinvasivität und -intensität bei [19]. Darüber hinaus führen zerebrovaskuläre Komplikationen mit bis zu 17% dazu, dass trotz eines primären Überlebens eine signifikante neurologische Beeinträchtigung bestehen bleibt [61].

Hypothermie und Wiedererwärmung

Seltenere Ursache für den Einsatz von einer va-ECMO ist die Wiedererwärmung bei akzidenteller schwerer Hypothermie, wie sie typischerweise in der Berg- und Wasserrettung möglich ist. Bis zu einer Abkühlung der Körperkerntemperatur auf >30°C ist die passive externe Wiedererwärmung ausreichend [76]. Der Einsatz einer va-ECMO bzw. HLM ist bei

Anaesthesist 2014 · 63:625–635 DOI 10.1007/s00101-014-2362-3
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

D. Lunnz · A. Philipp · M. Dolch · F. Born · Y.A. Zausig

Venoarterielle extrakorporale Membranoxygenierung. Indikationen, Limitationen und praktische Anwendung

Zusammenfassung

Dank des technischen Fortschritts, insbesondere bei der Weiterentwicklung der Antriebssysteme, Oxygenatoren und Kanülen, ist die venoarterielle extrakorporale Membranoxygenierung (va-ECMO, angloamerikanischer Oberbegriff für extrakorporale Membranoxygenierung: „extracorporeal life support“, ECLS) in den letzten Jahren zunehmend in der Notfall- und Intensivmedizin breiter eingesetzt und intensiver angewendet worden. Neben anerkannten Einsatzgebieten wie periinterventionellem kardialen Versagen in der Herzchirurgie („postcardiotomy low cardiac output syndrome“) wird die va-ECMO auch in anderen Bereichen, z. B. bei Sepsis mit septischer Kardiomyopathie oder im Rahmen der kardiopulmonalen Reanimation eingesetzt. Die grundsätzliche Indikation ist das therapieresistente kardiozirkulatorische und kardiopulmonale Versagen. Die va-ECMO überbrückt die eingeschränkte kardiopulmonale Organfunktion („bridging“). Diese Maßnahme stellt somit keine kausale Therapie dar,

sondern hilft nur beim zeitlichen Überwinden eines Krankheitsbilds mit dem Ziel der Erholung des betroffenen Organs („bridge to recovery“) oder bei der Entscheidung, die Organfunktion beispielsweise durch ein ventrikuläres „Assist“-System oder durch eine Transplantation zu ersetzen („bridge to decision“). Die ersten Ergebnisse eines erweiterten va-ECMO-Einsatzes sind vielversprechend, dürfen jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass es sich hierbei um ein invasives Verfahren mit potenziell lebensbedrohlichen Komplikationen handelt. Dementsprechend muss der Einsatz unter Abwägung von Nutzen und Risiken individuell entschieden werden. Die entsprechenden Ressourcen sowie ein kompetentes und erfahrenes (interdisziplinäres) Team sind Voraussetzungen.

Schlüsselwörter

„Low cardiac output syndrome“ · Kardiopulmonale Reanimation · Sepsis · Outcome · „Bridging“

Veno-arterial extracorporeal membrane oxygenation. Indications, limitations and practical implementation

Abstract

Due to the technical advances in pumps, oxygenators and cannulas, veno-arterial extracorporeal membrane oxygenation (va-ECMO) or extracorporeal life support (ECLS) has been widely used in emergency medicine and intensive care medicine for several years. An accepted indication is peri-interventional cardiac failure in cardiac surgery (postcardiotomy low cardiac output syndrome). Furthermore, especially the use of va-ECMO for other indications in critical care medicine, such as in patients with severe sepsis with septic cardiomyopathy or in cardiopulmonary resuscitation has tremendously increased. The basic indications for va-ECMO are therapy refractory cardiac or cardiopulmonary failure. The fundamental purpose of va-ECMO is bridging the function of the lungs and/or the heart. Consequently, this support system does not represent a causal therapy by itself; however, it provides enough time for the affected organ to recover (bridge to recovery) or for the decision for a long-lasting organ substitution

by a ventricular assist device or by transplantation (bridge to decision). Although the outcome for bridged patients seems to be favorable, it should not be forgotten that the support system represents an invasive procedure with potentially far-reaching complications. Therefore, the initiation of these systems needs a professional and experienced (interdisciplinary) team, sufficient resources and an individual approach balancing the risks and benefits. This review gives an overview of the indications, complications and contraindications for va-ECMO. It discusses its advantages in organ transplantation and transport of critically ill patients. The reader will learn the differences between peripheral and central cannulation and how to monitor and manage va-ECMO.

Keywords

Low cardiac output syndrome · Cardiopulmonary resuscitation · Sepsis · Outcome · Bridging

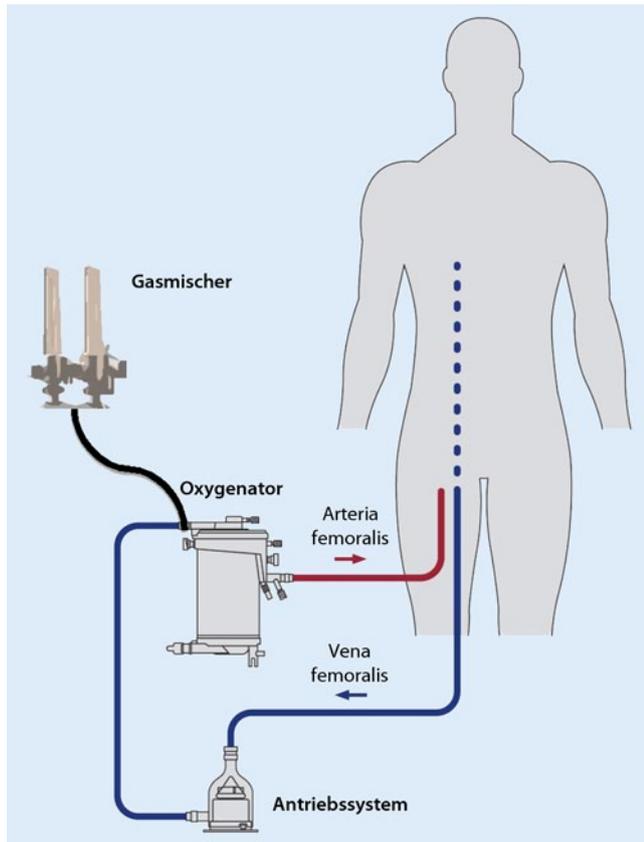


Abb. 1 ◀ Grundsätzlicher Aufbau mit Kanülierung der V. und A. femoralis bei einer venoarteriellen extrakorporalen Membranoxygenierung. (Modifiziert mit freundlicher Genehmigung der Medos Medizintechnik AG)

temperaturbedingter therapierefraktärer Asystolie oder Kammerflimmern indiziert und wird zur Wiedererwärmung bei tiefer Hypothermie als Goldstandard angesehen (<30°C; [71, 78]). Fallserien berichten insgesamt von einem guten Outcome nach akzidenteller tiefer Hypothermie (<25°C). So ermittelten Walpoth et al. [73] eine Überlebensrate von 47%. Nach >6 Jahren hatten sich alle initialen neurologischen und neuropsychologischen Defizite zurückgebildet. Als potenzielle Einflussfaktoren für ein gutes Outcome diskutieren die Kollegen eine tiefe Hypothermie, Normoxie vor Eintritt der Hypothermie, junge bzw. gesunde Patienten, professionelle Rettung und die optimale Wiedererwärmung mithilfe der va-ECMO.

Sepsis und septische Kardiomyopathie

Gemäß den aktuellen Sepsis-Leitlinien ist der Einsatz einer ECMO nach adäquater Flüssigkeits- und Katecholamintherapie fester Bestandteil beim septischen Schock des pädiatrischen Patienten [2, 13, 22]. Grundlage hierfür ist ein überaus posi-

ver Effekt dieses Unterstützungssystems auf das Überleben. Beispielsweise zeigen retrospektive Daten von 2650 Neonaten mit Sepsis bei primär-respiratorischem Versagen und einer erwarteten Letalität von 80–85% ein Überleben von 73% unter ECMO-Unterstützung [5]. Jedoch scheint mit zunehmenden Patientenalter die Überlebenswahrscheinlichkeit abzunehmen. Eine australische retrospektive Analyse an 45 Kleinkindern mit Sepsis und einem mittleren Alter von 2,5 Jahren ergab unter va-ECMO eine Überlebensrate von nur 47% [46]. Diese Zahlen entsprechen denen der Datenbank der Extracorporeal Life Support Organisation (ELSO; ■ Tab. 3; [2]).

Der Einsatz einer va-ECMO beim septischen Schock des Erwachsenen ist nicht Teil der aktuellen Sepsis-Leitlinien [22]. Die wissenschaftliche Datenlage ist derzeit unzureichend und weist nur eingeschränkt Erfolge auf. Beispielsweise fand eine Arbeit mit einem kleinen Patientengut von 59 Patienten mit schwerer Sepsis ein Überleben von lediglich 15% [33]. Darüber hinaus überlebte in dieser Studie keiner der Patienten >60. Lebens-

jahr. Mit Blick auf Fallberichte, die auch nur bei jungen Patienten (18 bis 46 Jahre) Erfolge beschreiben, scheint es, dass ältere Patienten mit Sepsis möglicherweise nicht von einer ECMO-Überbrückung profitieren. Kritisch anzumerken ist jedoch, dass die meisten älteren Patienten bei Einschluss in die Studien bereits mehrere Organversagen aufwiesen und dass der ECMO-Einbau teilweise im Rahmen von Wiederbelebungsmaßnahmen unternommen wurde [33]. Insgesamt ist der Einbau unter Notfallbedingungen mit einem schlechteren Outcome assoziiert (■ Tab. 3; [2]).

Auf dieser Grundlage ist die Indikation einer va-ECMO bei jüngeren, v. a. neonatalen Patienten mit konservativtherapierefraktärer Sepsis sicherlich zu erwägen. Bei erwachsenen Patienten ist dies jedoch nur als Option zu sehen. Voraussetzungen sind nach Meinung der Autoren des vorliegenden Beitrags ein therapierefraktäres Herzversagen wie bei der septischen Kardiomyopathie und ein möglichst frühzeitiger Einbau der va-ECMO vor einem septischen Mehrorganversagen [51].

Extrakorporale kardiopulmonale Reanimation

Hintergrund

Wie bereits Anfang der 1990er Jahre experimentell durch Safar und Kollegen propagiert, mag der Vorteil einer va-ECMO („extracorporeal cardiopulmonary resuscitation“, E-CPR) gegenüber dem konventionellen Vorgehen in einer prompten Schaffung von suffizienten Perfusions- und Gasaustauschverhältnissen bei Erhöhung des koronaren und womöglich zerebralen Perfusionsdrucks sowie zeitgleicher Entlastung des rechten Ventrikels liegen [63, 72]. Unzureichende „Hands-on“-Zeiten, Drucktiefe und -frequenz oder ein Missverhältnis zwischen Kompression und Dekompression bei konventioneller kardiopulmonaler Reanimation (K-CPR) spielen bei E-CPR keine Rolle [1, 75]. Die Leitlinien der American Heart Association zur CPR empfehlen, sofern ein System vorgehalten wird, dieses bei kardialem Stillstand mit reversibler Ursache als Option anzusehen (Klasse IIB, Evidenzniveau C, [16]).

Die meisten Studien zu E-CPR sind retrospektive Analysen; vergleichende Untersuchungen zwischen K-CPR und E-CPR sind selten. In einer aktuellen Übersichtsarbeit von Wang et al. [75] wurden die vorhandenen Studien zusammengefasst. Dabei stellte sich ein insgesamt positiver Trend zu einem verbesserten Outcome nach E-CPR dar (■ **Tab. 4**). In diesen Studien konnte bei 92–98% („intra-hospital cardiac arrest“, IHCA) bzw. 82–100% („out-of-hospital cardiac arrest“, OHCA) aller Patienten eine va-ECMO eingebaut werden. Ein Einbau nach „return of spontaneous circulation“ (ROSC) erbringt jedoch keinen zusätzlichen Vorteil [45]. Eigene Zahlen aus Regensburg bestätigen diese Ergebnisse. So zeigen Haneya et al. [29] ein Überleben von 14% (OHCA) und 39% (IHCA) nach E-CPR. Ein initial niedriger pH-Wert, eine erhöhte Laktatkonzentration und eine prolongierte CPR-Dauer (>30 min) waren mit einem schlechten Outcome assoziiert; hingegen stellte das Patientenalter keinen Risikofaktor dar.

Es muss angemerkt werden, dass es sich bei E-CPR um ein hochselektives Patientengut mit nichtvalidierten Indikationen handelt. Vergleicht man die Studien zwischen K-CPR und E-CPR, fällt zudem auf, dass in der E-CPR-Gruppe teilweise mehr Interventionen (13 vs. 61%, z. B. Herzkatheter, ventrikuläres Unterstützungssystem, Herztransplantation) durchgeführt wurden. Dieser, das Outcome beeinflussende Unterschied muss bei der Gesamtbewertung berücksichtigt werden [17].

Indikation und Kontraindikation

Auf der Grundlage der derzeitigen Daten können folgende Einschlusskriterien für eine E-CPR formuliert werden:

- beobachteter Herz-Kreislauf-Stillstand und kurze Zeit bis zum Beginn der (Laien-)CPR (insbesondere bei OHCA),
- reversible kardiale Erkrankung,
- prolongierte CPR-Dauer (>10–30 min) ohne ROSC und
- Patientenalter 18 bis 75 Jahre.

Patienten mit einem initial defibrillierbaren Rhythmus könnten von diesem Vorgehen möglicherweise am meisten profitieren. Bei diesen Patienten zeigt sich bei nur 22% ein ROSC, jedoch insgesamt das beste Outcome [65]. Ausschlusskriterien sollten sein: „Do-not-resuscitate“ (DNR)-Order, wahrscheinlicher oder vorhandener ausgeprägter neurologischer Schaden, schweres Trauma, akute Blutungen und palliative Zustände [16, 18, 23, 75].

Der Einsatz einer va-ECMO im Rahmen einer Wiederbelebung hat zusätzlich den Vorteil eines „Bridging“-Verfahrens. So können weitere Untersuchungen oder Interventionen, wie beispielsweise im Herzkatheter mit Koronarintervention, unter stabilen Verhältnissen durchgeführt werden. Zudem kann dieses System auch zur Prophylaxe des sekundären therapierefraktären kardiogenen Schocks oder zur raschen Erzeugung einer Hypothermie zur zerebralen Protektion eingesetzt werden [17].

Hier steht eine Anzeige.

Tab. 3 Ergebnisse der Therapie mit venoarterieller und venovenöser extrakorporaler Membranoxygenierung gemäß Extracorporeal Life Support Organisation. (Modifiziert nach [2]; abgerufen am 18.02.2014)

	Anzahl (n) der Patienten	Entwöhnt von ECLS		Überlebend entlassen oder verlegt	
		Anteil (n)	Anteil (%)	Anteil (n)	Anteil (%)
Neonatal					
Pulmonal	27.007	22.782	84	20.093	74
Kardial	5425	3339	62	2206	41
Notfall-ECLS	980	626	64	388	40
Kinder					
Pulmonal	6149	4034	66	3496	57
Kardial	6784	4443	65	3388	50
Notfall-ECLS	2071	1123	54	840	41
Erwachsene					
Pulmonal	5146	3317	64	2905	56
Kardial	4042	2255	56	1636	40
Notfall-ECLS	1238	476	38	355	29
Gesamt	58.842	42.395	72	35.307	60

ECLS „extracorporeal life support“, ECMO extrakorporale Membranoxygenierung.

Tab. 4 Outcome nach K-CPR und E-CPR. (Nach [23, 32, 49, 65, 75])

Ort	K-CPR		E-CPR	
	IHCA	OHCA	IHCA	OHCA
„Überleben“	18% (11–37%)	10% (0,3–33%)	40% (34–46%)	14% (4–36%)
„Gute Neurologie“ ^a	75% (70–80%)	45%	84% (82–90%)	94% (86–100%)

E-CPR extrakorporal unterstützte kardiopulmonale Reanimation, IHCA „in-hospital cardiac arrest“, K-CPR konventionelle kardiopulmonale Reanimation, OHCA „out-of-hospital cardiac arrest“^a ≤ 2 im Glasgow-Pittsburgh Cerebral Performance Categories Score.

„Cardiac Survival Network“

Patienten, die außerhalb eines ECLS-Zentrums einen Herz-Kreislauf-Stillstand erlitten und somit erst verzögert eine va-ECMO erhielten, hatten mit einem 4- bis 13%igen Überleben eine besonders schlechte Prognose. Dagegen führte im Vergleich ein mobiles ECLS-Team zu einem Überleben von bis zu 55% [27, 34]. Insbesondere vor dem Hintergrund eines im Trend besseren neurologischen Outcomes erscheint die Etablierung von mobilen ECLS-Teams – im Sinne eines „Cardiac Survival Network“ an Kompetenzzentren – zur Verbesserung der insbesondere außerklinischen Reanimationsversorgung vielversprechend [75].

Bei therapierefraktärer kardiozirkulatorisch(-pulmonaler) Dekompensation bzw. Herz-Kreislauf-Stillstand fährt ein ECLS-Team zu dem Patienten und implantiert die ECMO vor Ort [4, 10, 12, 27]. Derzeit befinden sich wenige zugelassene Systeme auf dem Markt, die bezüglich ihres Handlings sowie ihrer Biokompatibilität und Bedienbarkeit für den mobi-

len ECLS-Einsatz geeignet sind. Die Optimierung der Zeitabläufe, beispielsweise durch Schulung von Krankenhausärzten bezüglich Indikation, Alarmierungsweg sowie Bereitstellung einer 24 h-Bereitschaft und eines Einsatzfahrzeugs durch das ECLS-Zentrum, wird für den Erfolg des Konzeptes ausschlaggebend sein [10].

Transport

Eine weitere ECMO-Indikation stellt mittlerweile auch allein die oftmals dringend benötigte Transportfähigkeit für innerklinische oder interhospital Transporte dar [3, 36]. Für die Entscheidung dafür müssen eine fundierte Nutzen-Risiko-Abwägung der möglichen Gefahren und Komplikationen durch das System und ein kardiopulmonal stabiler und sicherer Transport gewährleistet sein. Mithilfe dieser Unterstützungstechnik wurden durch die Universitätsklinik Regensburg 64 Patienten mit va-ECMO und 160 Patienten mit vv-ECMO (2008–2013) sowie durch das Klinikum der Universität München – Campus Großhadern 56 Pa-

tienten mit vv-ECMO (2005–2013) und 26 Patienten mit va-ECMO (2012–2013) extern versorgt und transportiert. Dank des technischen Fortschritts sind die hierfür geeigneten Systeme auch deutlich sicherer geworden. Noch 2002 dokumentierte die Arbeitsgruppe um Foley und Bartlett eine Inzidenz transportbezogener technischer Zwischenfälle von 17%; dagegen berichten aktuelle Untersuchungen mobiler ECMO-Teams einen komplikationsfreien Interhospitaltransfer [25, 30].

Organspende

In Russland, Japan, verschiedenen Staaten Europas und der USA ist es aufgrund der Organknappheit inzwischen Standard, Organe(-teile) nach Herz-Kreislauf-Stillstand zu explantieren („non-heart beating donors“; Maastricht-Klassifikation; [38]). In Deutschland ist dieses Vorgehen gegenwärtig nicht erlaubt.

Die Entnahme von Organen wie Leber oder Nieren nach bereits eingetretenem Herz-Kreislauf-Stillstand birgt jedoch die Gefahr eines deutlich schlechteren Transplantatzustands aufgrund der langen (normothermen) Ischämie [6]. Experimentelle Untersuchungen haben sich seit den 1960er Jahren und erste klinische, jedoch meist retrospektive Analysen seit Ende der 1980er Jahren mit diesem Thema ausreichend befasst [39].

Bei diesem Konzept werden nach Feststellung des Todes innerhalb von 5–60 min die abdominalen Organe nach proximaler Okklusion der Aorta mithilfe einer va-ECMO und einer Flussrate von ca. 2–3 l/min perfundiert. Dieses Vorgehen führt zu einer Verminderung des zellulären Schadens. Hierdurch ist eine Steigerung der Zahl von Nieren- und Leberangeboten bei einem insgesamt gleichwertigen bis verbesserten Transplantatzustand im Vergleich zum herkömmlichen Vorgehen möglich [6].

Durch den zunehmenden Einsatz von extrakorporalen Verfahren insbesondere nach Herz-Kreislauf-Stillstand wird sich zwangsläufig eine neue Situation auf bundesdeutschen Intensivstationen entwickeln. Es werden nun Patienten mit Herz-Kreislauf-Stillstand unter va-ECMO-Unterstützung als potenzielle Spender infrage kommen.



Abb. 2 ▲ Distale Perfusion der kanülierten Extremität mit in die linke A. femoralis eingebrachter zusätzlicher Kanüle zur Vermeidung einer Beinischämie. Drainage des desoxygenierten Blutes über die rechtsseitige V. femoralis; Rückführung des oxygenierten und decarboxylierten Blutes über die linksseitige A. femoralis. Im rückführenden Schenkel der va-ECMO ist ein Abgang zur zusätzlich eingebrachten Kanüle für eine regelhafte distale Perfusion des linken Beins

Kontraindikationen

Medizinisch-fachliche und ethisch-soziale Aspekte

Die Entscheidung zugunsten oder gegen ein extrakorporales Unterstützungsverfahren kann im Einzelfall sehr schwierig sein. Hier sind sowohl medizinisch-fachliche als auch ethisch-soziale Aspekte zu berücksichtigen. Im Allgemeinen muss gefordert werden, dass sich der Patient in einem potenziell reversiblen Zustand befindet oder einer längerfristigen Therapie (z. B. „assist device“, Transplantation) mit akzeptabler Lebensqualität zugänglich ist. Das irreversible Multiorganversagen, schwerste, austherapierte und palliative Erkrankungen [z. B. chronisch-obstruktive Lungenerkrankung, „chronic obstructive pulmonary disease“ (COPD), Leberzirrhose] und ein ausgeprägter neurologischer Schaden stellen nach Meinung der Autoren somit absolute Kontraindikationen dar. Weitere patientenspezifische Kontraindikationen wie Alter, Körpergewicht, Gerinnungsstörungen oder ein vorhandenes Malignom werden eher nur als relativ eingestuft und bedürfen der sorgfältigen Nutzen-Risiko-Abwägung [2]. Diesbezüglich wären prädiktive Modelle, die den zu erwartenden Nutzen widerspiegeln, wünschenswert [77].

Patientenalter

Daten aus der ELSO-Registrierung zeigen einen zunehmenden Einsatz von va-ECMO bei älteren Patienten. Insbesondere die Anwendung von E-CPR bei Patienten, die älter als 65 Jahre sind, hat in den vergangenen Jahren zugenommen [2]. Das Outcome dieser Patienten wird momentan allerdings uneinheitlich dargestellt. Eine aktuelle retrospektive Datenanalyse bei 65- bis 85-jährigen Patienten ermittelte eine Überlebensrate nach E-CPR von lediglich 22% [50]. Andere Arbeiten ergaben bei der Gruppe der 17- bis 40-Jährigen ein Überleben von 56%; dagegen beträgt bei den über 41-Jährigen die Überlebensrate nur 34% [14]. Jedoch scheinen im Alter v. a. Begleiterkrankungen bzw. Organausfälle und die Indikationsstellung bzw. der Zeitpunkt der Implantation wichtige Rollen zu spielen. So ist das Überleben nach „elektivem“ va-ECMO-Einbau gegenüber dem Notfall deutlich höher (41 vs. 22–27%, ■ **Tab. 3**, [50, 64, 69]). Eigene Erfahrungen aus Regensburg bestätigen diese Ergebnisse [29]. Somit scheint das Alter per se nicht grundsätzlich eine Kontraindikation darzustellen, vielmehr muss im Hinblick auf Ursache bzw. Indikation und bestehende Begleiterkrankungen bzw. Organausfälle der Einsatz extrakorporaler Technologien kritisch abgewogen werden.

Komplikationen

Bei den mit va-ECMO assoziierten Komplikationen kann grundsätzlich zwischen technischen und medizinischen Störungen unterschieden werden. Von technischer Seite steht die Problematik einer Hämolyse im Vordergrund. Sie wird mit einer Häufigkeit von 13–18% angegeben [81]. Sie entsteht im va-ECMO-Kreislauf durch mechanische Interaktion zwischen Kanülen, Oxygenator sowie Pumpe und dem hierauf einwirkenden Perfusionsdruck bzw. -fluss [52, 68]. Das freigesetzte Hämoglobin gilt als Stickstoffmonoxid(NO)-Fänger und ist mit einer Reihe von vaskulären und endothelialen Störungen assoziiert [62]. Zudem besteht die Gefahr einer Aktivierung des Gerinnungssystems bzw. der Induktion von Entzündungsreaktionen, thrombozytärer Funktionsstörungen und Gerinnsel-Clot-Bildung durch das System [70]. Neuere Systeme mit modernen Zentrifugalpumpen, einem verminderten Priming-Volumen und heutigen Oxygenatoren vermögen diese Gefahr zu vermindern [28, 44, 52]. Eine weitere schwerwiegende technische Komplikation ist die Oxygenatordysfunktion mit erforderlichem Austausch, die mit bis zu 29% angegeben wird [81]. Die damit möglicherweise verbundenen Folgekomplikationen wie klinische Instabilität, Gefahr der Luftembolisation, bakterielle Kontamination oder Entzündungsreaktion durch die neue Fremdoberfläche sind weniger gut beschrieben. In der Studie Conventional ventilatory support versus extracorporeal membrane oxygenation for severe adult respiratory failure (CESAR, [59]), in der nur die vv-ECMO zum Einsatz kam, betrug die rein technisch bedingte Letalität 1,5%.

Medizinisch können in Anlehnung des Zugangswegs wiederum zentrale von peripheren Komplikationen unterschieden werden. Zentral eingebrachte Kanülen sind mit einer höheren Inzidenz an Blutungen und Infektionen verbunden. Bei peripheren Zugängen stehen v. a. eine Minderperfusion und Abflussstörung der kanülierten Extremität im Vordergrund. Retrospektive Analysen zeigen abhängig vom gewählten System eine Ischämie der Extremität von



Abb. 3 ◀ Computertomographische Aufnahme eines Patienten mit venoarterieller extrakorporaler Membranoxygenierung und vorhandener kardialer Restfunktion. Es besteht die Gefahr eines „Harlekin-Syndroms“

3,2–20%. Insbesondere die arterielle Kanülierung, ein Missverhältnis zwischen Katheter- und Gefäßlumen sowie eine arterielle Verschlusskrankheit sind hier Risikofaktoren [11, 26, 81]. Eine prophylaktische oder therapeutische Fasziotomie bei (drohendem) Kompartmentsyndrom wurde in 50–100% der beschriebenen Fälle durchgeführt. Eine Amputation war in 0,2–1,4% der Fälle notwendig. Venöse Thrombosen werden mit 10% angegeben [81]. Weitere typische Komplikationen sind hoher Materialverbrauch bei der Anlage (5,4%), intrakardiale Thrombenbildung (0,8–6,5%), Blutungskomplikationen (6,9%) mit operativer Gefäßintervention (0,4%), fremdkörperbedingte Aktivierung des Komplement- und Gerinnungssystems sowie Thromboembolien [11, 26, 29, 37, 41, 66, 67].

Zur Vermeidung einer Unterversorgung der punktierten Extremität bei peripherer va-ECMO empfehlen sich eine sorgfältige Ultraschalluntersuchung der Gefäße vor der Punktion und ein Überwachungsprotokoll der betroffenen Extremität nach Punktion (s. unten). Als Prophylaxe oder Therapie einer Ischämie kann eine zusätzliche Kanüle in die A. femoralis zur distalen Perfusion der kanülierten Extremität eingebracht werden (ca. 100–300 ml/min; ■ **Abb. 2**; [11, 42, 47]). Die Uniklinik Regensburg verwendet hierzu beispielsweise eine 7-F-Schleuse (Super-Arrow-Flex®-Einführbesteck, Fa. Teleflex Medical, Kernen) zur Punktion.

Management

Monitoring

Das Basismonitoring eines Patienten an va-ECMO unterscheidet sich nicht grundsätzlich von dem anderer Intensivpatienten [15]. Zusätzliche Aspekte müssen jedoch bei der Überwachung der va-ECMO-Unterstützung berücksichtigt werden.

Bei allen peripheren va-ECMO-Verfahren und Rückführung des oxygenierten Bluts über die Femoralarterie ist eine invasive Druckmessung bzw. die arterielle Blutgasanalyse der rechten oberen Extremität Pflicht. Grund hierfür ist die Gefahr, dass im distalen Aortenbogen unzureichend oxygeniertes Blut aus dem Herzen mit dem oxygenierten Blut der va-ECMO bei den ersten Abgängen der Aorta in Konkurrenz tritt. Folglich kann eine myokardiale und brachiozephalere Hypoxämie entstehen. Da aus dem ersten Abgang der Aorta auch die obere rechte Extremität versorgt wird, empfiehlt sich dementsprechend hier die Überwachung. In Anlehnung an eine häufig harmlose vegetative Störung mit meist halbseitiger Hautrötung von Gesicht, Arm und Thorax wird dieses Aufeinandertreffen als „Harlekin-Syndrom“ bezeichnet [43, 80]. Beispielhaft ist in ■ **Abb. 3** die Computertomographiaufnahme eines Patienten mit va-ECMO (Kanülierung: A. und V. femoralis) und vorhandener kardialer Restfunktion dargestellt. Nach Gabe eines Kontrastmittels über die va-ECMO zeigt sich auf Höhe des Aortenbogens ein Aufein-

andertreffen des mit Kontrastmittel versetzten va-ECMO-Bluts mit dem Blut aus dem Herzen.

Echokardiographien einmal pro Schicht und nach Bedarf werden zur Überwachung der kardialen Funktion, einer möglichen Blutstase bzw. Spontanthrombenbildung im Bereich von linkem Vorhof, Ventrikel und Aortenwurzel empfohlen. Hiervon abhängig wird die Indikation zur linksventrikulären Entlastung, sei es durch Eskalation der inotropen Unterstützung, Anlage einer zusätzlichen Kanüle in linkem Vorhof oder Pulmonalarterie oder einer zusätzlichen transaortalen Axialpumpe (Impella®, Fa. Abiomed Europe GmbH, Aachen) gestellt.

Im Fall eines peripheren va-ECMO-Verfahrens ist außerdem die engmaschige Überwachung der Perfusionsverhältnisse der unteren Extremitäten – unabhängig von der Lage der arteriellen Kanüle – mithilfe der klinischen Kontrolle, Doppler- und Farbduplexsonographie unabdingbar. Nur so lässt sich eine drohende Minderperfusion mit Kompartmentsyndrom, Rhabdomyolyse und konsekutivem Multiorganversagen rechtzeitig erkennen. Eine klinisch gut praktikable, wenn auch noch nicht ausreichend validierte Überwachungsmöglichkeit stellt eine kontinuierliche Messung der Gewebsoxygenierung der Wadenmuskulatur mithilfe der „near-infrared spectroscopy“ dar (NIRS; z. B. INVOS®, Fa. Covidien Deutschland GmbH, Neustadt; [79]). An der Universität Regensburg wurde hierzu ein interdisziplinäres Überwachungsprotokoll erstellt (■ **Tab. 5**).

Maschinenfluss und Mitteldruck

Der extrakorporale Blutfluss unterstützt das Herzzeitvolumen während der ECMO-Anwendung. Dabei entspricht ein Fluss von 2,2–3,0 l/min/m²KOF am ehesten dem Herzindex eines anesthesierten Patienten [55]. Andere Autoren empfehlen einen initialen Fluss von 100 ml/kgKG/min bei Neonaten, 80 ml/kgKG/min bei Kindern und 60 ml/kgKG/min beim Erwachsenen [3]. Da große individuelle und situative Unterschiede im metabolischen Bedarf der jeweiligen Patienten bestehen, ist eine dem metabolischen Bedarf adaptierte Einstellung zu

Tab. 5 Standard am Uniklinikum Regensburg zur intensivmedizinischen und technischen Überwachung bei Patienten mit venoarterieller extrakorporaler Membranoxygenierung

Basismonitoring	
Invasive Blutdruckmessung (immer rechte obere Extremität bei peripherer Kanülierung)	
Pulsoxymetrisch gemessene Sauerstoffsättigung (S_pO_2 ; immer rechte obere Extremität bei peripherer Kanülierung)	
Elektrokardiographie (EKG)	
Zentraler Venendruck (ZVD)	
Temperatur	
Urinmenge/-bilanz	
Blutgasanalysen (arteriell und zentralvenös, mindestens 4-stündlich)	
Erweitertes Monitoring	
Ggf. Pulmonalkatheter	
„Near-infrared spectroscopy“ (NIRS, zerebral bzw. peripher)	
Empfohlene medizinische Untersuchungen	
Echokardiographie (transthorakal/transösophageal mindestens 1-mal/Tag)	
Extremitätendoppler- bzw. Duplexsonographie (bei peripherer Kanülierung, mindestens 3-mal/Tag)	
Thoraxröntgenaufnahme (einmal/Tag)	
Empfohlene technische Untersuchungen	
Messung der Blutgase [Sauerstoffpartialdruck (pO_2) und Kohlendioxidpartialdruck (pCO_2)] vor und hinter dem Oxygenator	
Rechnerische Bestimmung der Gastransferkapazitäten bzw. der Funktion des Oxygenators	
Druckmessung vor und hinter dem Oxygenator	
Mindestens einmal am Tag gemeinsame Diskussion und Interpretation der Befunde. Festlegung des weiteren Prozedere bzw. Therapieziels und -konzepts	

empfehlen. Zur Orientierung sollten zentralvenösen Sättigung, Laktatkonzentration, CO_2 -Produktion sowie spezifische Organfunktionen (z. B. Diurese, Lebersynthese) regelmäßig bestimmt werden [21]. Ein mittlerer arterieller Druck von 55–75 mmHg ist anzustreben [55, 74].

Kohlenstoffdioxidelimination und Oxygenierung

Der Gasmischer am Oxygenator hat zwei wesentliche Aufgaben: CO_2 -Elimination und Oxygenierung. Die CO_2 -Elimination wird primär über die Höhe des Gasflusses reguliert, die Oxygenie-

Tab. 6 Kenn- bzw. Zielgrößen der Oxygenierung sowie Sauerstoffangebot und -verbrauch unter venoarterieller extrakorporaler Membranoxygenierung. (Modifiziert nach [7])

Parameter	Zielgrößen
Sauerstoffpartialdruck (rechts-radial; mmHg)	80–120
Arteriovenöse Sauerstoffgehaltsdifferenz ($avDO_2$; ml/dl)	<5
Sauerstoffangebot (DO_2 ; ml/min)	>(330) 500
Sauerstoffverbrauch (VO_2 ; ml/min))	<250
Zentralvenöse Sättigung ($S_{zv}O_2$; %)	>65–70
Laktatkonzentration (mmol/l)	<2

rung über den fraktionellen Anteil an O_2 im Gasmisch. Die Überwachung erfolgt mithilfe regelmäßiger Blutgasanalysen nach dem Oxygenator. Folgende Zielwerte sollen erreicht werden: pO_2 von 150–200 mmHg und pCO_2 <20 mmHg [53]. Eine Unterbrechung des Gasflusses kann zu einer lebensbedrohlichen Hypoxie und Hyperkapnie führen; deswegen ist eine Überwachung zwingend erforderlich (■ Tab. 5).

Die bei va-ECMO angestrebten Werte für Oxygenierung sowie Sauerstoffangebot und -verbrauch sind in ■ Tab. 6 angegeben. Das Erreichen dieser Zielgrößen setzt sich aus dem synergistisch-additiven Effekt von extrakorporaler Oxygenierung und Beatmung zusammen. Der häufig anzutreffenden Meinung, die lungenabhängige Oxygenierung bzw. Ventilation an ECMO sei von sekundärer Bedeutung, ist vehement zu widersprechen. Im klinischen Alltag vermittelt das Vorhandensein eines Oxygenators den falschen Eindruck grundsätzlicher Sicherheit, der im Extremfall deletär für den Patienten sein kann. Zwar ermöglicht eine stabile ECMO regelhaft, die Lungen gerade in der Initialphase der Inflammationsreaktion „ultraprotektiv“ zu beatmen, jedoch muss die Oxygenierung bzw. Ventilation der nativen Lungenfunktion und v. a. der myokardialen Auswurfleistung angepasst werden [8].

Antikoagulation

Das Auftreten von Blutungen, aber auch von thrombembolischen Ereignissen an extrakorporalen Unterstützungssystemen, stellt weiterhin eine der häufigsten Komplikationen dar, und bestimmt maßgeblich Letalität und Prognose [58]. Ursachen dieser klinischen Phänomene sind der ausgeprägte Kontakt des Bluts mit

den Fremdoberflächen des ECMO-Systems sowie die mechanische Beanspruchung durch verschiedenste auf das Blut einwirkende Kräfte [57].

Häufig wird deswegen unfraktioniertes Heparin (UFH) im Rahmen einer ECMO-Unterstützung verwendet. Bei der Anlage einer va-ECMO wird meist initial ein Bolus von 50–100 IU/kgKG, gefolgt von einer kontinuierlichen Infusion mit ca. 10–20 IU/kgKG/h gegeben. Zielwerte für die ACT sind 160–180 (200) s bzw. ein 1,5- bis 2-fach erhöhter Wert der partiellen Thromboplastinzeit („partial thromboplastin time“, PTT). Beim Vorliegen von Risiken (z. B. linksventrikuläre und -atriale Stase, Minderperfusion der Extremitäten) müssen individuell deutlich höhere Werte angestrebt werden. Ob die zusätzliche Gabe von Thrombozytenaggregationshemmern wie Acetylsalicylsäure vorteilhaft ist oder lediglich das Blutungsrisiko erhöht, ist Bestandteil aktueller Forschung. Für ein kleines Kollektiv von Patienten – allerdings an vv-ECMO – konnte gezeigt werden, dass dadurch die Sauerstofftransferkapazität des Oxygenators stabilisiert wurde, ohne dass sich ein gesteigerter Transfusionsbedarf ergab [9]. Für den sicheren Einsatz von neueren Antikoagulationen liegen derzeit keine ausreichenden Daten vor.

Fazit für die Praxis

- Die Anwendung von extrakorporalen Verfahren gehört zu dem mit am stärksten expandierenden Teil moderner Behandlungsstrategien im Bereich der Notfall- und Intensivmedizin. Im überwiegenden Teil der Fälle handelt es sich um vv-ECMO-Verfahren (ca. zwei Drittel), wenngleich die Anzahl an va-ECMO stetig zunimmt.

- Die Überlebenswahrscheinlichkeit nach pulmonalem Versagen ist höher als nach kardialem. Dieses ist nicht zuletzt dem überbrückenden Charakter dieser Maßnahme und einer unterschiedlichen Erholung der Organfunktion von Lungen und Herz geschuldet.
- Die postinterventionell herrschende Lebensqualität ist zurzeit nur unzureichend untersucht.
- Der (wenig evidenzbasierte) zunehmende Erfolg dieser Unterstützungsverfahren erscheint vielversprechend und ist möglicherweise v. a. auf den technischen Fortschritt, die kontinuierliche Weiterbildung, die Etablierung fester Standards und eine Spezialisierung zurückzuführen.
- Damit kann das va-ECMO-Verfahren bei kardiozirkulatorischem (-pulmonalem) Versagen durchaus als effektiv und zukunftsfruchtig angesehen werden. Es darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass es sich hierbei um ein sehr invasives Verfahren mit potenziell lebensbedrohlichen Komplikationen handelt.

Korrespondenzadresse

PD Dr. YA. Zausig

Klinik für Anaesthesiologie,
Universitätsklinik Regensburg
Franz-Josef-Strauß-Allee 11,
93053 Regensburg
york.zausig@ukr.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. M. Dolch und YA. Zausig geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht. F. Born hat ein Honorar für Vortragstätigkeit der Fa. Sorin® erhalten. D. Lunn und A. Philipp haben Honorare für Vortragstätigkeiten der Fa. Maquet® erhalten und eine Unterstützung für Forschungstätigkeiten von der Fa. Sorin®.

Der Beitrag enthält keine Studien an Menschen oder Tieren.

Literatur

1. Andreaka P, Frenneaux MP (2006) Haemodynamics of cardiac arrest and resuscitation. *Curr Opin Crit Care* 12:198–203
2. Anonymous Extracorporeal Life Support Organization (ELSO): guidelines. <http://www.elsonet.org/index.php/resources/guidelines.html>

3. Arit M, Philipp A, Voelkel S et al (2011) Hand-held minimised extracorporeal membrane oxygenation: a new bridge to recovery in patients with out-of-centre cardiogenic shock. *Eur J Cardiothorac Surg* 40:689–694
4. Arit M, Philipp A, Voelkel S et al (2011) Out-of-hospital extracorporeal life support for cardiac arrest – a case report. *Resuscitation* 82:1243–1245
5. Bahrami KR, Van Meurs KP (2005) ECMO for neonatal respiratory failure. *Semin Perinatol* 29:15–23
6. Barrou B, Billault C, Nicolas-Robin A (2013) The use of extracorporeal membranous oxygenation in donors after cardiac death. *Curr Opin Organ Transplant* 18:148–153
7. Beckmann A, Benk C, Beyersdorf F et al (2011) Position article for the use of extracorporeal life support in adult patients. *Eur J Cardiothorac Surg* 40:676–680
8. Bein T, Weber-Carstens S, Goldmann A et al (2013) Lower tidal volume strategy (≈3 ml/kg) combined with extracorporeal CO₂ removal versus conventional protective ventilation (6 ml/kg) in severe ARDS: the prospective randomized Xtravent-study. *Intensive Care Med* 39:847–856
9. Bein T, Zimmermann M, Philipp A et al (2011) Addition of acetylsalicylic acid to heparin for anticoagulation management during pumpless extracorporeal lung assist. *ASAIO J* 57:164–168
10. Beurtheret S, Mordant P, Paoletti X et al (2013) Emergency circulatory support in refractory cardiogenic shock patients in remote institutions: a pilot study (the cardiac-RESCUE program). *Eur Heart J* 34:112–120
11. Bisdas T, Beutel G, Warnecke G et al (2011) Vascular complications in patients undergoing femoral cannulation for extracorporeal membrane oxygenation support. *Ann Thorac Surg* 92:626–631
12. Born F, Albrecht R, Boeken U et al (2011) Extra Corporeal Life Support: Technische Anforderungen und neuste Entwicklungen. *Z Herz Thorax Gefasschir* 25:370–378
13. Brierley J, Carcillo JA, Choong K et al (2009) Clinical practice parameters for hemodynamic support of pediatric and neonatal septic shock: 2007 update from the American College of Critical Care Medicine. *Crit Care Med* 37:666–688
14. Cardarelli MG, Young AJ, Griffith B (2009) Use of extracorporeal membrane oxygenation for adults in cardiac arrest (E-CPR): a meta-analysis of observational studies. *ASAIO J* 55:581–586
15. Carl M, Alms A, Braun J et al (2010) S3 Leitlinie – Intensivmedizinische Versorgung herzchirurgischer Patienten – Häodynamisches Monitoring und Herz-Kreislauf-Therapie. AWMF Leitlinie. <http://www.awmf.org/leitlinien/detail/II/001-016.html>
16. Cave DM, Gazmuri RJ, Otto CW et al (2010) Part 7: CPR techniques and devices: 2010 American Heart Association guidelines for cardiopulmonary resuscitation and emergency cardiovascular care. *Circulation* 122:S720–S728
17. Chen YS, Lin JW, Yu HY et al (2008) Cardiopulmonary resuscitation with assisted extracorporeal life-support versus conventional cardiopulmonary resuscitation in adults with in-hospital cardiac arrest: an observational study and propensity analysis. *Lancet* 372:554–561
18. Chen YS, Yu HY, Huang SC et al (2008) Extracorporeal membrane oxygenation support can extend the duration of cardiopulmonary resuscitation. *Crit Care Med* 36:2529–2535
19. Cheng R, Hachamovitch R, Kittleson M et al (2014) Complications of extracorporeal membrane oxygenation for treatment of cardiogenic shock and cardiac arrest: a meta-analysis of 1,866 adult patients. *Ann Thorac Surg* 97:610–616
20. Cowie MR, Mosterd A, Wood DA et al (1997) The epidemiology of heart failure. *Eur Heart J* 18:208–225
21. De Somer F (2007) What is optimal flow and how to validate this. *J Extra Corpor Technol* 39:278–280
22. Dellinger RP, Levy MM, Rhodes A et al (2013) Surviving Sepsis Campaign: international guidelines for management of severe sepsis and septic shock, 2012. *Intensive Care Med* 39:165–228
23. Eisenberg MS, Mengert TJ (2001) Cardiac resuscitation. *N Engl J Med* 344:1304–1313
24. Elsharkawy HA, Li L, Esa WA, Sessler DI et al (2010) Outcome in patients who require venoarterial extracorporeal membrane oxygenation support after cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 24:946–951
25. Foley DS, Prankoff T, Younger JG et al (2002) A review of 100 patients transported on extracorporeal life support. *ASAIO J* 48:612–619
26. Ganslmeier P, Philipp A, Rupprecht L et al (2011) Percutaneous cannulation for extracorporeal life support. *Thorac Cardiovasc Surg* 59:103–107
27. Gariboldi V, Grisoli D, Tarmiz A et al (2010) Mobile extracorporeal membrane oxygenation unit expands cardiac assist surgical programs. *Ann Thorac Surg* 90:1548–1552
28. Haneya A, Philipp A, Diez C et al (2009) Comparison of two different minimized extracorporeal circulation systems: hematological effects after coronary surgery. *ASAIO J* 55:592–597
29. Haneya A, Philipp A, Diez C et al (2012) A 5-year experience with cardiopulmonary resuscitation using extracorporeal life support in non-postcardiotomy patients with cardiac arrest. *Resuscitation* 83:1331–1337
30. Haneya A, Philipp A, Foltan M et al (2009) Extracorporeal circulatory systems in the interhospital transfer of critically ill patients: experience of a single institution. *Ann Saudi Med* 29:110–114
31. Hirshberg E, Miller RR III, Morris AH (2013) Extracorporeal membrane oxygenation in adults with acute respiratory distress syndrome. *Curr Opin Crit Care* 19:38–43
32. Hollenberg J, Svensson L, Rosenqvist M (2013) Out-of-hospital cardiac arrest: 10 years of progress in research and treatment. *J Intern Med* 273:572–583
33. Huang CT, Tsai YJ, Tsai PR, Ko WJ (2012) Extracorporeal membrane oxygenation resuscitation in adult patients with refractory septic shock. *J Thorac Cardiovasc Surg* 46:1041–1046
34. Jaski BE, Ortiz B, Alla KR et al (2010) A 20-year experience with urgent percutaneous cardiopulmonary bypass for salvage of potential survivors of refractory cardiovascular collapse. *J Thorac Cardiovasc Surg* 139:753–757e1–2
35. Kerscher C, Wittmann S, Schopka S et al (2014) Spezielle Aspekte der intensivmedizinischen Therapie nach herzchirurgischen Eingriffen. *Intensivmed Up2date* 10:73–92
36. Kjaergaard B, Frost A, Rasmussen BS et al (2011) Extracorporeal life support makes advanced radiologic examinations and cardiac interventions possible in patients with cardiac arrest. *Resuscitation* 82:623–626
37. Klotz S, Scheld HH (2008) Mechanische Assist-Systeme zur Herzunterstützung. *Intensivmed Up2date* 145–164
38. Kootstra G, Daemen JH, Oomen AP (1995) Categories of non-heart-beating donors. *Transplant Proc* 27:2893–2894

39. Koyama I, Hoshino T, Nagashima N et al (1989) A new approach to kidney procurement from non-heart-beating donors: core cooling on cardiopulmonary bypass. *Transplant Proc* 21:1203–1205
40. Kumar TKS, Zurakowski D, Dalton H et al (2010) Extracorporeal membrane oxygenation in post-cardiotomy patients: factors influencing outcome. *J Thorac Cardiovasc Surg* 140:330–336.e2
41. Lamarche Y, Chow B, Bedard A et al (2010) Thromboembolic events in patients on extracorporeal membrane oxygenation without anticoagulation. *Innovations* 5:424–429
42. Lamb KM, Hirose H, Cavarocchi NC (2013) Preparation and technical considerations for percutaneous cannulation for veno-arterial extracorporeal membrane oxygenation. *J Card Surg* 28:190–192
43. Lance JW, Drummond PD, Gandevia SC et al (1988) Harlequin syndrome: the sudden onset of unilateral flushing and sweating. *J Neurol Neurosurg Psych* 51:635–642
44. Lawson DS, Ing R, Cheifetz IM et al (2005) Hemolytic characteristics of three commercially available centrifugal blood pumps. *Pediatr Crit Care Med* 6:573–577
45. Lin JW, Wang MJ, Yu HY et al (2010) Comparing the survival between extracorporeal rescue and conventional resuscitation in adult in-hospital cardiac arrests: propensity analysis of three-year data. *Resuscitation* 81:796–803
46. Maclaren G, Butt W, Best D et al (2007) Extracorporeal membrane oxygenation for refractory septic shock in children: one institution's experience. *Pediatr Crit Care Med* 8:447–451
47. Madershahian N, Nagib R, Wippermann J et al (2006) A simple technique of distal limb perfusion during prolonged femoro-femoral cannulation. *J Card Surg* 21:168–169
48. Malagon I, Greenhalgh D (2013) Extracorporeal membrane oxygenation as an alternative to ventilation. *Curr Opin Anaesthesiol* 26:47–52
49. Meaney PA, Nadkarni VM, Kern KB et al (2010) Rhythms and outcomes of adult in-hospital cardiac arrest. *Crit Care Med* 38:101–108
50. Mendiratta P, Wei JY, Gomez A et al (2013) Cardiopulmonary resuscitation requiring extracorporeal membrane oxygenation in the elderly: a review of the Extracorporeal Life Support Organization registry. *ASAIO J* 59:211–215
51. Merx MW, Weber C (2007) Sepsis and the heart. *Circulation* 116:793–802
52. Meyer AD, Wiles AA, Rivera O et al (2012) Hemolytic and thrombocytopathic characteristics of extracorporeal membrane oxygenation systems at simulated flow rate for neonates. *Pediatr Crit Care Med* 13:e255–e261
53. Muellenbach R, Kilgenstein C, Kranke P et al (2013) Effects of venovenous extracorporeal membrane oxygenation on cerebral oxygenation in hypercapnic ARDS. *Perfusion* 29:139–141
54. Muller T, Bein T, Philipp A et al (2013) Extracorporeal pulmonary support in severe pulmonary failure in adults: a treatment rediscovered. *Dtsch Arztebl Int* 110:159–166
55. Murphy GS, Hessel EA II, Groom RC (2009) Optimal perfusion during cardiopulmonary bypass: an evidence-based approach. *Anesth Analg* 108:1394–1417
56. Nishimura M, Nishimura T, Ishikawa M et al (2006) Importance of luxury flow for critically ill patients receiving a left ventricular assist system. *J Artif Organs* 9:209–213
57. Oliver WC (2009) Anticoagulation and coagulation management for ECMO. *Semin Cardiothorac Vasc Anesth* 13:154–175
58. Paden ML, Conrad SA, Rycus PT et al (2013) Extracorporeal Life Support Organization Registry Report 2012. *ASAIO J* 59:202–210
59. Peek GJ, Mugford M, Tiruvoipati R et al (2009) Efficacy and economic assessment of conventional ventilatory support versus extracorporeal membrane oxygenation for severe adult respiratory failure (CESAR): a multicentre randomised controlled trial. *Lancet* 374:1351–1363
60. Rasche S, Georgi C (2012) Cardiogenic shock. *Anaesthesist* 61:259–272
61. Rastan AJ, Dege A, Mohr M et al (2010) Early and late outcomes of 517 consecutive adult patients treated with extracorporeal membrane oxygenation for refractory postcardiotomy cardiogenic shock. *J Thorac Cardiovasc Surg* 139:302–311, 311.e1
62. Rother RP, Bell L, Hillmen P et al (2005) The clinical sequelae of intravascular hemolysis and extracellular plasma hemoglobin: a novel mechanism of human disease. *JAMA* 293:1653–1662
63. Safar P, Abramson NS, Angelos M et al (1990) Emergency cardiopulmonary bypass for resuscitation from prolonged cardiac arrest. *Am J Emerg Med* 8:55–67
64. Saito S, Nakatani T, Kobayashi J et al (2007) Is extracorporeal life support contraindicated in elderly patients? *Ann Thorac Surg* 83:140–145
65. Sasson C, Rogers MA, Dahl J et al (2010) Predictors of survival from out-of-hospital cardiac arrest: a systematic review and meta-analysis. *Circ Cardiovasc Qual Outcomes* 3:63–81
66. Schmid C, Philipp A, Mueller T et al (2009) Extracorporeal life support – systems, indications, and limitations. *Thorac Cardiovasc Surg* 57:449–454
67. Slottosch I, Liakopoulos O, Kuhn E et al (2013) Outcomes after peripheral extracorporeal membrane oxygenation therapy for postcardiotomy cardiogenic shock: a single-center experience. *J Surg Res* 181:e47–e55
68. Steinhorn RH, Isham-Schopf B, Smith C et al (1989) Hemolysis during long-term extracorporeal membrane oxygenation. *J Pediatr* 115:625–630
69. Thiagarajan RR, Brogan TV, Scheurer MA et al (2009) Extracorporeal membrane oxygenation to support cardiopulmonary resuscitation in adults. *Ann Thorac Surg* 87:778–785
70. Von Segesser LK, Tozzi P, Mallbiabrena I et al (2003) Miniaturization in cardiopulmonary bypass. *Perfusion* 18:219–224
71. Vretenar DF, Urschel JD, Parrott JC et al (1994) Cardiopulmonary bypass resuscitation for accidental hypothermia. *Ann Thorac Surg* 58:895–898
72. Wallmuller C, Sterz F, Testori C et al (2013) Emergency cardio-pulmonary bypass in cardiac arrest: seventeen years of experience. *Resuscitation* 84:326–330
73. Walpoth BH, Walpoth-Aslan BN, Mattle HP et al (1997) Outcome of survivors of accidental deep hypothermia and circulatory arrest treated with extracorporeal blood warming. *N Engl J Med* 337:1500–1505
74. Walsh M, Devereaux PJ, Garg AX et al (2013) Relationship between intraoperative mean arterial pressure and clinical outcomes after noncardiac surgery: toward an empirical definition of hypotension. *Anesthesiology* 119:507–515
75. Wang CH, Chen YS, Ma MH (2013) Extracorporeal life support. *Curr Opin Crit Care* 19:202–207
76. Webb P (1986) Afterdrop of body temperature during rewarming: an alternative explanation. *J Appl Physiol* 60:385–390
77. Whitson BA, Tripathi RS, Papadimos TJ (2013) Who truly benefits from extracorporeal membrane oxygenation: a call to develop predictive models. *ASAIO J* 59:200–201
78. Wollenek G, Honarwar N, Golej J et al (2002) Cold water submersion and cardiac arrest in treatment of severe hypothermia with cardiopulmonary bypass. *Resuscitation* 52:255–263
79. Wong JK, Smith TN, Pitcher HT et al (2012) Cerebral and lower limb near-infrared spectroscopy in adults on extracorporeal membrane oxygenation. *Artif Organs* 36:659–667
80. Zangrillo A, Biondi-Zoccai G, Landoni G et al (2013) Extracorporeal membrane oxygenation (ECMO) in patients with H1N1 influenza infection: a systematic review and meta-analysis including 8 studies and 266 patients receiving ECMO. *Crit Care* 17:R30
81. Zangrillo A, Landoni G, Biondi-Zoccai G et al (2013) A meta-analysis of complications and mortality of extracorporeal membrane oxygenation. *Crit Care Resusc* 15:172–178
82. Zwischenberger JB, Bartlett RH (1995) An introduction to extracorporeal life support. In: *ECMO. Extracorporeal cardiopulmonary support in critical care*. Extracorporeal Life Support Organisation, Ann Arbor, S 11–13