

Z Herz- Thorax- Gefäßchir 2013 · 27:37–48  
 DOI 10.1007/s00398-012-0984-9  
 Eingegangen: 20. November 2012  
 Überarbeitet: 27. November 2012  
 Angenommen: 27. November 2012  
 Online publiziert: 16. Januar 2013  
 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

K. Pilarczyk<sup>1</sup> · G. Trummer<sup>2</sup> · H.-G. Jakob<sup>1</sup> · F. Dusse<sup>1</sup> · G. Marggraf<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Klinik für Thorax- und Kardiovaskuläre Chirurgie, Westdeutsches Herzzentrum Essen, Uniklinik Essen

<sup>2</sup> Klinik für Herz- und Gefäßchirurgie, Universitäts-Herzzentrum Freiburg Bad Krozingen

# Extrakorporale Herz- und Lungenersatzverfahren

„Extracorporeal membrane oxygenation“,  
 „extracorporeal life support“ und  
 „pumpless extracorporeal lung assist“

## Begriffsbestimmungen

Da es viele verschiedene Begriffe rund um das Thema temporäre Lungen- und Herz-Kreislauf-Ersatzverfahren gibt und diese häufig irreführend sowie uneinheitlich sind, hat die Deutsche Interdisziplinäre Vereinigung für Intensivmedizin (DIVI) sich auf die im Folgenden ausgeführten Empfehlungen geeinigt ([1]; **Abb. 1**):

Als „extracorporeal membrane oxygenation“ (ECMO) wird die venovenös angeschlossene, pumpenbetriebene Lungenunterstützungstherapie mit Oxygenator bezeichnet. Sie zeichnet sich durch Oxygenierung sowie Decarboxylierung aus dem venösen Blut aus und wird zur Therapie von konservativ nichtbeherrschbarem, hypoxämischem Lungenversagen eingesetzt. Eine Herz-Kreislauf-Unterstützung ist mit diesem Verfahren aufgrund der Kanülierung nicht möglich.

Abzugrenzen davon ist die „pumpless extracorporeal lung assist“ (pECLA), ein arteriovenös angeschlossenes, nichtpumpenbetriebenes Lungenunterstützungssystem mit einem „Low-resistance“-Oxygenator, das aufgrund der arteriovenösen Blutdruckdifferenz und damit abhängig vom Herzzeitvolumen (HZV) des Patienten eine suffiziente Decarboxylierung, jedoch keine ausreichende Oxygenierung gewährleistet. Somit wird dieses System nahezu ausschließlich beim primär hyperkapnischen Lungenversagen eingesetzt.

Als „extracorporeal life support“ (ECLS) – früher u. a. als venoarterielle ECMO bezeichnet – wird ein venoarteriell angeschlossenes pumpenbetriebenes Herz-Kreislauf-Unterstützungssystem bezeichnet, das nicht nur den Gasaustausch gewährleistet, sondern nahezu das gesamte HZV des Patienten übernehmen kann.

## „Extracorporeal membrane oxygenation“

### Aufbau

Prinzipiell besteht ein ECMO-System aus folgenden Komponenten (**Abb. 2**):

- extrakorporaler Blutkreislauf mit Entnahme- und Rückgabekanülen und einem in der Regel heparinbeschichteten Schlauchsystem,
- Pumpe (in der Regel Zentrifugalpumpe) mit Steuereinheit sowie
- Oxygenator mit Wärmetauscher.

Zur Unterstützung oder auch kompletten Übernahme der Lungenfunktion wird venöses Blut über eine möglichst großlumige Kanüle mithilfe einer aktiven Pumpe aus der V. cava gesaugt und dem Oxygenator zugeführt. Der Oxygenator besteht aus einem gasführenden Hohlfasersystem, das die Diffusion von Sauerstoff (O<sub>2</sub>) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in bzw. aus dem Blut erlaubt. Das oxygenierte und decarboxylierte Blut wird dem Patienten über

die Rückgabekanüle möglichst in die Nähe des rechten Vorhofs zurückgeführt.

Die derzeit auf dem Markt zur Verfügung stehenden Komplettsysteme (z. B. Maquet Cardiohelp-System, Medos delatstream DP3 ECMO System oder das SORIN SCPC-System) sind sämtlich für den Einsatz von einigen Tagen bis hin zu 2 Wochen zugelassen. Die Systeme verfügen über eine Zentrifugalpumpe, in der durch Rotation von Impellern oder Könen das axial eintretende Blut eine Zentrifugalbeschleunigung erfährt und am Rand des Gehäuses wieder austritt.

Zentrifugalpumpen arbeiten nichtokklusiv. Daher kann es bei stehender Pumpe oder einer zu geringen Drehzahl beim ECLS-System zum Rückfluss vom arteriellen in den venösen Schenkel kommen. Aus diesem Grund müssen die Schläuche bei stehender Pumpe immer abgeklemmt werden. Der Vorteil der Zentrifugalpumpe liegt in der geringeren Blut-schädigung. In der Regel werden ECMO-Systeme nichtpulsatil betrieben, Zentrifugalpumpen mit Impellern können jedoch auch pulsatil betrieben werden. Die verfügbaren Systeme sind alle kompakt und mit einem Akku ausgestattet, sodass sie für Transporte geeignet, aber noch nicht alle für alle Arten des Transports zugelassen sind. Die Unterschiede der einzelnen Systeme betreffen insbesondere ihre Beschichtungen: Während einige Systeme bioaktive Heparinbeschichtungen besit-

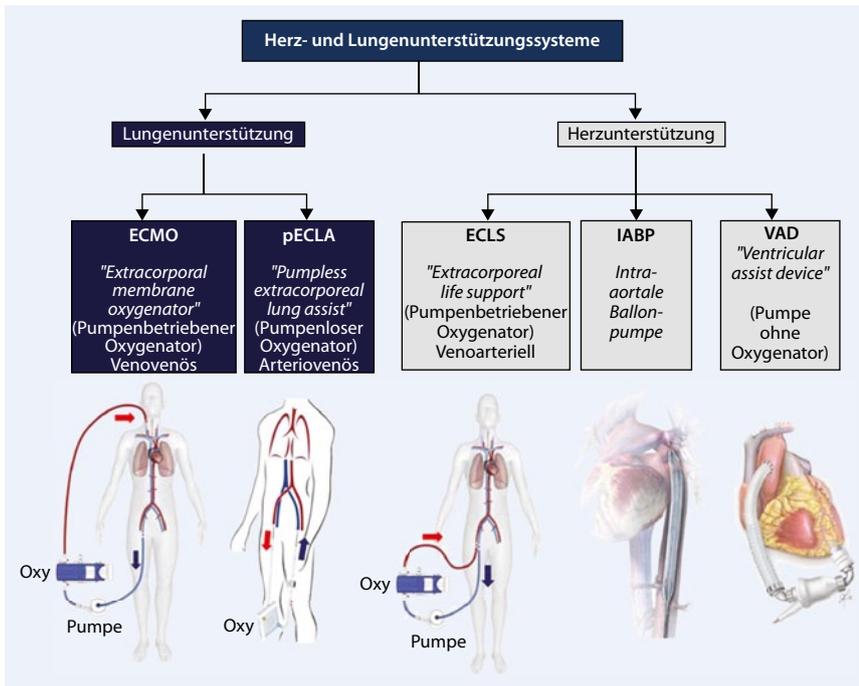


Abb. 1 ▲ Übersicht über Herz-und Lungenunterstützungssysteme

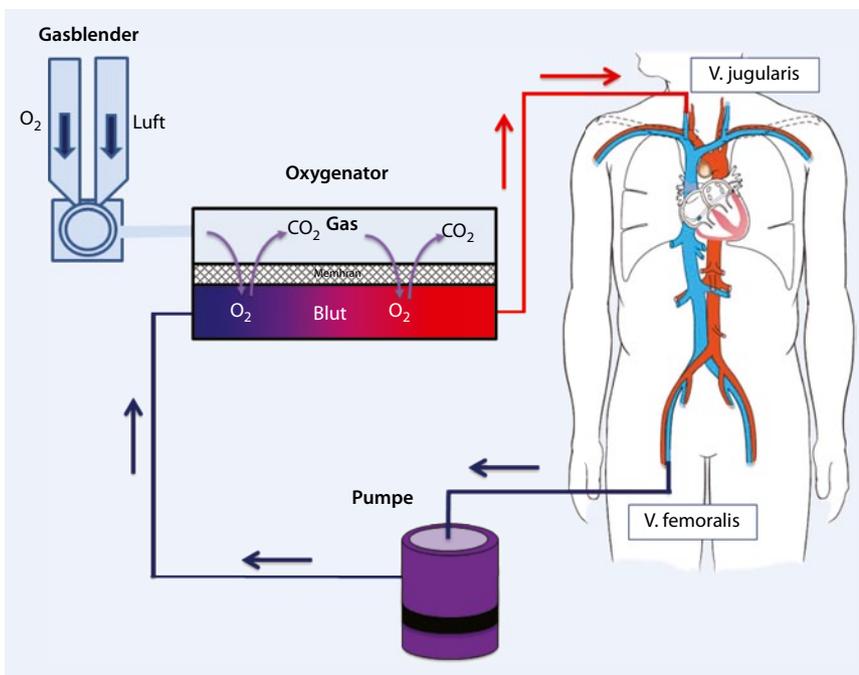


Abb. 2 ▲ Komponenten des „Extracorporeal-membrane-oxygenation“-Systems

zen, sind andere biopassiv mit einer „Phy-sio“ (Phosphorylcholin) beschichtet.

### Kanülen und Kanülierung

Die Anlage der zu- und abführenden Kanülen in das venöse Gefäßsystem erfolgt perkutan in Seldinger-Technik, ggf. ultraschallgesteuert. Die Lagekontrolle der

ECMO-Kanülen nach ECMO-Anschluss mithilfe der transösophagealen Echokardiographie (TEE) oder radiologisch ist obligat. Bei Verwendung einer Doppellumenkanüle erfolgt die Anlage unter TEE-Kontrolle. Punktionsorte sind bei erwachsenen Patienten mit „acute respiratory distress syndrome“ (ARDS) v. a. die Vv. femoralis und jugularis.

Prinzipiell stehen folgende 3 ECMO-Konfigurationen zur Verfügung:

1. Das Blut wird über die Kanüle in der V. femoralis entnommen und nach Oxygenierung sowie Decarboxylierung dem Körper über die V. jugularis zugeführt.

2. Das Blut wird über eine kurze Kanüle in der V. femoralis entnommen und über eine lange, kontralateral eingebrachte Femoralkanüle zurückgegeben.

Zur Entnahme des Bluts wird in beiden Fällen eine großlumige Kanüle (z. B. 21–23 F) eingesetzt. Die Rückgabe des arterialisierten Bluts erfolgt über eine kleinere Kanüle (z. B. 17–23 F), möglichst zentral in die Nähe des rechten Vorhofs.

3. Seit einiger Zeit existieren auf dem Markt auch „Two-stage“- oder „Multi-stage“-Kanülen (z. B. Avalon Elite Bi-Caval DLC, 13–31 F), die in die V. jugularis interna dextra implantiert werden. Hierbei wird über getrennte Lumina simultan Blut aus den Vv. cava inferior und superior drainiert und direkt in Richtung Trikuspidalklappe zurückgegeben. Die echokardiographische oder angiographische Lagekontrolle der Two-stage-Kanüle ist obligat. Große Vorteile dieser Kanülen liegen neben der geringeren Rezirkulation in der potenziellen Reduktion katheterassoziierter Infektionen sowie der gesteigerten Mobilität des Patienten, da die Punktion der V. femoralis vermieden wird. Insbesondere Patienten mit absehbarer Langzeit-ECMO-Therapie, wie bei chronischen Lungenerkrankungen oder vor Lungentransplantation, können davon profitieren [2].

Ein wesentliches Problem des ECMO-Kreislaufs (Abb. 2) ist das Phänomen der Rezirkulation oder des „shunting“: Liegen die ab- und zuführende Kanülen zu eng beinander, wird ein Teil des zugeführten oxygenierten Blutes unmittelbar wieder abgesaugt. Dies ist insbesondere bei hohen Pumpenflüssen zu beobachten. Dabei scheint eine Rückgabe des Bluts über die V. cava superior gegenüber der V. cava inferior aufgrund der geringeren Rezirkulation (Ansaugen von oxygeniertem Blut) von Vorteil zu sein. Auch bei korrekter Kanülenlage liegt das Shunt-Volumen zwischen 20 und 50%. Eine Bestimmung des Shunt-Volumens ist über die Thermodilution möglich, jedoch in der klinischen Routine nicht etabliert. Da-

her kommt der Lagekontrolle der Kanülen (Abstand >15 cm) eine entscheidende Rolle zu. Beträgt der Sauerstoffpartialdruck vor dem Oxygenator <10% des Sauerstoffpartialdrucks in der arteriellen Kanüle – also hinter dem Oxygenator – ist ebenfalls nicht mit einem erhöhtem Shunt-Volumen zu rechnen [3].

### Blut-, Frischgas- und Sauerstofffluss

Der ECMO-Blutfluss ist die hauptsächliche Determinante zur Steuerung der Oxygenierung. Ein ECMO-Blutfluss >50% des HZV (50–60 ml/kgKG/min) ist notwendig, um einen signifikanten Effekt auf die Oxygenierung des Patienten zu haben. Blutflussraten <50% des HZV haben keinen wesentlichen Einfluss auf die Oxygenierung, sondern ermöglichen lediglich die Decarboxylierung des Bluts (s. auch Abschn. „Pumpless extracorporeal lung assist“). Bei hyperdynamischer Kreislaufsituation ist ggf. auch ein Wert >80–90 ml/kgKG/min für eine suffiziente Oxygenierung nötig.

Die Gasflusssteuerung unterliegt im Wesentlichen den gleichen Regeln, die auch für eine maschinelle Beatmung gelten. Die Steuerung der CO<sub>2</sub>-Elimination erfolgt hierbei vorwiegend über den Frischgasfluss (1–10 l/min), der über den Membranoxygenator geleitet wird. Je höher der Gasfluss, desto mehr CO<sub>2</sub> wird eliminiert. Zur Steuerung des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks (p<sub>a</sub>O<sub>2</sub>) wird die inspiratorische Sauerstofffraktion (F<sub>i</sub>O<sub>2</sub>) analog zur Beatmung von 0,21–1,0 eingestellt. Je höher die O<sub>2</sub>-Konzentration im Frischgaszufluss des Oxygenators eingestellt ist, desto mehr Sauerstoff diffundiert über die Membran des Oxygenators in das Patientenblut.

### Ziele und Indikationsbereiche

Aktuell liegt kein allgemeiner Konsensus, sondern lediglich Empfehlungen zum Einsatz der venovenösen ECMO vor. Grundsätzlich liegt das Ziel der ECMO-Behandlung darin, bei Versagen konventioneller Strategien den Gasaustausch zu sichern und/oder einer weiteren ventilatorassoziierten Schädigung der Lungen durch invasive Beatmung mit hohen Beatmungsdrücken und/oder Tidalvolu-

Z Herz-Thorax-Gefäßchir 2013 · 27:37–48 DOI 10.1007/s00398-012-0984-9  
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

K. Pilarczyk · G. Trummer · H.-G. Jakob · F. Dusse · G. Marggraf

## Extrakorporale Herz- und Lungenersatzverfahren. „Extracorporeal membrane oxygenation“, „extracorporeal life support“ und „pumpless extracorporeal lung assist“

### Zusammenfassung

Die Verwendung eines extrakorporalen Unterstützungssystems stellt bei kardialen und/oder pulmonalem Versagen eine etablierte Therapieoption dar. Auch wenn die wissenschaftliche Evidenz quantitativ noch nicht ausreichend gesichert ist, gibt es zunehmend Hinweise aus einzelnen Studien [z. B. Conventional Ventilation or ECMO for Severe Adult Respiratory Failure (CESAR) Trial], dass die „extracorporeal membrane oxygenation“ (ECMO) als pumpenbetriebenes venovenöses Verfahren beim schweren Lungenversagen eine lebensrettende Maßnahme ist. Initial als „rescue option“ beim kardialen Versagen nach Kardiotomie etabliert, erfährt der „extracorporeal life support“ (ECLS) zunehmende Verbreitung als pumpenbetriebenes venoarterielles Herz-Kreislauf-Unterstützungssystem im kardiogenen Schock bei Myokardinfarkt, als „Bridging“-Maßnahme zur Transplantation und im Rahmen einer erweiterten Reanimation. Der „pumpless extracorporeal lung assist“ (pECLA) als pumpenloses arteriovenöses Verfahren ist technisch einfacher zu

handhaben, garantiert jedoch nur eine suffiziente Decarboxylierung ohne ausreichende Oxygenierung. Daher wird dieses Verfahren insbesondere im Rahmen eines primär hyperkapnischen Lungenversagens mit respiratorischer Acidose angewendet, um eine lungenprotektive Beatmung zu ermöglichen. Enorme technische Entwicklungen und v. a. die extreme Miniaturisierung der extrakorporalen Unterstützungssysteme dürfen jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass es sich um eine invasive Therapie mit einer hohen Inzidenz von schwerwiegenden Komplikationen handelt. Vor diesem Hintergrund müssen die weite Verbreitung dieser Technologie kritisch hinterfragt und vielmehr die Konzentrierung auf Zentren mit hoher Expertise gefordert werden.

### Schlüsselwörter

„Acute respiratory distress syndrome“ · „Acute lung injury“ · Oxygenierung · Decarboxylierung · Kardiopulmonale Reanimation

## Extracorporeal heart and lung replacement procedures. Extracorporeal membrane oxygenation, extracorporeal life support and pumpless extracorporeal lung assist

### Abstract

The use of extracorporeal support systems in cardiac and/or pulmonary failure is an established treatment option. Although scientific evidence is limited there is an increasing amount of data from individual studies, e.g. Conventional Ventilation or ECMO for Severe Adult Respiratory Failure (CESAR) trial 2010, suggesting that extracorporeal membrane oxygenation (ECMO) as a veno-venous pump-driven system is a life-saving procedure in severe respiratory failure. Initially established as a rescue option for postcardiotomy cardiac failure extracorporeal life support (ECLS) as a pump-driven veno-arterial cardiovascular support system is increasingly being used in cardiogenic shock after myocardial infarction, as bridging to transplantation or as part of extended cardiopulmonary resuscitation. The pumpless extracorporeal lung assist (pECLA) as an arterio-venous pumpless

system is technically easier to handle but only ensures sufficient decarboxylation and not oxygenation. Therefore, this method is mainly applied in primarily hypercapnic respiratory failure to allow lung protective ventilation. Enormous technical improvements, e.g. extreme miniaturization of the extracorporeal assist devices must not obscure the fact that this therapeutic option represents an invasive procedure frequently associated with major complications. With this in mind a widespread use of this technology cannot be recommended and the use of extracorporeal systems should be restricted to centers with high levels of expertise and experience.

### Keywords

Acute respiratory distress syndrome · Acute lung injury · Oxygenation · Decarboxylation · Cardiopulmonary resuscitation

mina vorzubeugen. Somit ist die ECMO-Therapie indiziert bei schwerer Hypoxämie [z. B.  $p_aO_2$ - $F_I O_2$ -Ratio (Horowitz-Index)  $<80$  mmHg] trotz erhöhtem positiv-endexpiratorischen Druck [“positive end-expiratory pressure“ (PEEP)  $>15$  cm  $H_2O$ ] bzw. Notwendigkeit exzessiv hoher endinspiratorischer Beatmungsdrücke [z. B. „peak inspiratory pressure“ (PIP)  $>35$ – $45$  cm  $H_2O$ ] zur Sicherstellung einer ausreichenden Oxygenierung.

Um eine weitere irreversible iatrogene Lungenschädigung zu vermeiden, wird aufgrund der bisherigen Datenlage der frühe Einsatz von extrakorporalen Verfahren – d. h. in den ersten Tagen nach Lungenschädigung – propagiert. Dementsprechend ist die Beatmungsdauer vor ECMO-Implantation einer der stärksten unabhängigen Prädiktoren für Mortalität bei Patienten mit schwerem ARDS [4].

### „Acute respiratory distress syndrome“

#### Aktuelle Datenlage zum ECMO-Einsatz

Zur ECMO-Therapie bei schwerem ARDS liegen insgesamt 3 prospektive randomisierte Studien vor: Die erste Studie (NIH Adult ECMO Trial) wurde 1974–1977 von Zapol et al. [5] an 90 Patienten mit ARDS aus 9 US-Zentren durchgeführt. Die Mortalität betrug in beiden Studiengruppen ca. 90%. Die zweite monozentrisch angelegte Studie an 40 Patienten mit schwerem ARDS ( $p_aO_2/F_I O_2$  63 mmHg) verglich Patienten mit ECMO-Behandlung ( $n=21$ ) und Patienten mit konventioneller Beatmung ( $n=19$ ): Das Überleben war in beiden Gruppen vergleichbar (33% vs. 42%,  $p=0,08$ ; [6]). Neben der Tatsache, dass es sich bei beiden Studien um historische Daten handelt, verbietet eine Vielzahl von Kritikpunkten [ECMO-Modus (venoarteriell), strenge Antikoagulation mit hoher Inzidenz an Blutungskomplikationen (Transfusionsbedarf 1000–2500 ml/Tag, Blutverlust 1,7 l/Tag), Fehlen einer lungenprotektiven Beatmung auch während ECMO-Therapie (Peak ca. 40 mbar), fehlende Erfahrung in einigen Zentren und lange mittlere Beatmungsdauer vor ECMO-Therapie von 9 Tagen] die Übertragbarkeit der Daten auf die moderne Ära der ECMO-Therapie.

Im Jahr 2009 wurde von Peek et al. [7] die bis dato größte und mit Spannung erwartete ECMO-Studie publiziert, die Conventional Ventilation or ECMO for Severe Adult Respiratory Failure (CESAR) Trial. An dieser prospektiv randomisierten Studie nahmen in den Jahren von 2001 bis 2006 insgesamt 180 ARDS-Patienten teil (Lung Injury Score  $>3$  oder Hyperkapnie mit dekompensierter respiratorischer Acidose,  $pH <7,2$ ). Sie wurden entweder einer konventionellen Beatmungsgruppe in kleineren, nichtspezialisierten Zentren oder einer ECMO-Gruppe im ARDS/ECMO-Zentrum zugeordnet. In der ECMO-Gruppe konnte eine signifikante Verbesserung der Überlebensrate ohne schwere Behinderung nach 6 Monaten nachgewiesen werden. Mehrkosten der ECMO-basierten Behandlung wurden unter Berücksichtigung des besseren Outcome als akzeptabel bewertet. Die Kritikpunkte an der Studie sind vielfältig und lassen sich, wie folgt, zusammenfassen:

- „Intention-to-treat“-Analyse: Nicht alle „ECMO-Patienten“ erhielten auch eine ECMO. Eine ECMO wurde im Studienzentrum dann angelegt, wenn nach Optimierung der Beatmung noch eine kritische Einschränkung der Oxygenierung bestand. Dies war bei 68 von 90 Patienten der Untersuchungsgruppe (76%) der Fall, 24% der Patienten der ECMO-Gruppe wurden nach Optimierung der Behandlung durch Spezialisten wegen erheblicher Besserung des pulmonalen Gasaustauschs nicht mit ECMO versorgt, aber in die Datenanalyse einbezogen.
- Behandlung sämtlicher Patienten der Untersuchungsgruppe in einem spezialisierten ARDS-Zentrum, Behandlung der Kontrollgruppe in vielen verschiedenen kleinen Krankenhäusern.
- Erreichen der statistischen Signifikanz durch „aufgeweichte“ Outcome-Parameter: „Tod oder schwere Beeinträchtigung“. Die statistische Signifikanz des Überlebensvorteils der ECMO-Gruppe wurde nur erreicht, indem zur Variable „Tod“ die Variable „schwere Einschränkung“ hinzugerechnet wurde.
- Unklare, hohe Inzidenz von Leberfunktionsstörungen in der „ECMO-Gruppe“ [15 Patienten mit extrakorporalen Leberersatzverfahren („mole-

cular adsorbents recirculating system“, MARS)].

- Ungenügende (lungenprotektive) Beatmungsstrategie in der Kontrollgruppe. [Nur 70% der Patienten der Kontrollgruppe im Vergleich zu 93% der ECMO-Gruppe erhielten eine konsequente lungenprotektive Beatmung (niedriges Tidalvolumen, adäquat hoher PEEP)]. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse des ARDS-Network könnte ohne Mühe argumentiert werden, dass der Unterschied in der Letalität durch die unterschiedliche Beatmungsstrategie und nicht durch die Anwendung der ECMO bedingt ist.
- Keine Angabe über Komplikationen durch das ECMO-Verfahren.

Somit belegt die CESAR Trial zwar, dass die Therapie von ARDS-Patienten in spezialisierten Zentren die Überlebensrate zu erhöhen scheint. Gesicherte Aussagen darüber, ob und in welchem Ausmaß die ECMO an dieser Ergebnisverbesserung beteiligt war, sind jedoch noch nicht möglich. Auch wenn die Frage einer Outcome-Verbesserung aktuell nicht abschließend beantwortet werden kann, sind nicht zuletzt vor dem Hintergrund der positiven Ergebnisse während der Influenza-A-Virus-H1N1-Pandemie die schwere Hypoxämie und/oder die schwere Hyperkapnie sowie die Sicherstellung einer lungenprotektiven Beatmungsstrategie Indikationen für die ECMO-Therapie im Sinne eines Heilversuchs [8].

#### Definitionen

Das invasive ECMO-Verfahren ist Patienten vorbehalten, die unter einem schweren Lungenversagen leiden. Vor diesem Hintergrund erscheint es notwendig, sich mit der Definition des akuten Atemnotsyndroms (ARDS) auseinanderzusetzen.

Die europäisch-amerikanische Konsensuskonferenz (American-European Consensus Conference, AECC) von 1994 definierte ein ARDS als akut aufgetretene, schwere Oxygenierungsstörung (sog. Oxygenationsindex  $p_aO_2/F_I O_2 <200$  mmHg) mit bilateralen Lungeninfiltraten ohne Hinweise auf ein kardial bedingtes Lungenödem [9]. Die „acute lung injury“ (ALI) grenzte sich hierbei einzig durch eine leichtergradige Oxygenie-

**Tab. 1** Vergleich der American-European-Consensus-Conference- und Berlin-Definitionen des „acute respiratory distress syndrome“ (ARDS)

	Definition der American-European Consensus Conference [9]	Berlin-Definition [10]
Zeitlicher Verlauf	Akuter Beginn	Beginn innerhalb 1 Woche bei bekannter Ursache oder neuer oder verschlimmelter Symptome
Thoraxröntgen	Bilaterale Infiltrate	Bilaterale Infiltrate, die sich nicht vollständig durch Pleuraergüsse, Atelektasen oder Rundherde erklären lassen
Ursache des Lungenödems	PAWP <18 mmHg oder alternatives Verfahren zum Ausschluss einer Linksherzinsuffizienz	Respiratorisches Versagen nicht ausschließlich über Herzversagen oder Volumenüberschuss erklärbar. Notwendigkeit weiterer Untersuchungen zum Ausschluss eines hydrostatischen Ödems, falls kein Risikofaktor vorhanden
Oxygenierung	ALI: $p_aO_2/F_iO_2 < 300$ mmHg ARDS: $p_aO_2/F_iO_2 < 200$ mmHg	Mildes ARDS: $200 \text{ mmHg} < p_aO_2/F_iO_2 \leq 300$ mmHg mit PEEP oder CPAP $\geq 5$ cm H <sub>2</sub> O Moderates ARDS: $100 \text{ mmHg} < p_aO_2/F_iO_2 \leq 200$ mmHg mit PEEP $\geq 5$ cm H <sub>2</sub> O Schweres ARDS: $p_aO_2/F_iO_2 \leq 100$ mmHg mit PEEP $\geq 5$ cm H <sub>2</sub> O

ALI „acute lung injury“, CPAP „continuous positive airway pressure“, PAWP „pulmonary capillary wedge pressure“, PEEP „positive end-expiratory pressure“,  $p_aO_2/F_iO_2$  Horowitz-Index.

**Tab. 2** Indikationen zur ECMO-Therapie im ELSO-Register.(Adaptiert nach <http://www.eslonet.com>)

Erkrankung	ECMO-Implantationen		Überleben (%)
	Anzahl (n)	Anteil (%)	
Virale Pneumonie	107	4,4	65
Bakterielle Pneumonie	423	17,6	59
Aspirationspneumonie	61	2,5	61
<b>„Acute respiratory distress syndrome“ (ARDS)</b>			
Postoperativ/traumatisch	203	8,4	52
Nichtpostoperativ/-traumatisch	349	14,5	48
Akute Lungenschädigung, nicht ARDS	121	5,0	55
Andere	1142	47,5	52
<b>Gesamt</b>	<b>2406</b>		<b>56</b>

ECMO „extracorporeal membrane oxygenation“, ELSO Extracorporeal Life Support Organization.

rungsstörung ( $p_aO_2/F_iO_2 < 300$  mmHg) vom ARDS ab. Diese Definition beinhaltet eine Vielzahl von Limitationen: Der zeitliche Verlauf des Auftretens ist nicht definiert; die Respiratoreinstellung, v. a. das eingestellte PEEP-Niveau und die  $F_iO_2$ , werden nicht berücksichtigt. Ein kardiales Lungenödem sollte mithilfe des Pulmonalkatheters ausgeschlossen werden, allerdings weisen 30% aller Patienten mit ARDS einen Wedge-Druck („pulmonary capillary wedge pressure“, PCWP)  $> 18$  mmHg auf.

Vor diesem Hintergrund wurde 2011 in Berlin eine neue ARDS-Definition unter Federführung der European Society of Intensive Care Medicine, der American Thoracic Society und der Society of Critical Care Medicine verabschiedet [10]. Diese unterscheidet nicht mehr 2, sondern 3 Schweregrade des ARDS, in Abhängigkeit von der Schwere der Hypoxämie und unter Berücksichtigung der Respiratoreinstellung:

- **schweres ARDS:**  $p_aO_2/F_iO_2 \leq 100$  mmHg, bei PEEP  $\geq 5$  cm H<sub>2</sub>O,

- **moderates ARDS:**  $p_aO_2/F_iO_2 = 101 - 200$  mmHg, bei PEEP  $\geq 5$  cm H<sub>2</sub>O und
- **mildes ARDS:**  $p_aO_2/F_iO_2 = 201 - 300$  mmHg, bei PEEP  $\geq 5$  cm H<sub>2</sub>O.

Die Bezeichnung „akute Lungenschädigung“ (ALI) für die mildere Verlaufsform entfällt in der neuen Definition. Darüber hinaus wurde der zeitliche Verlauf genauer definiert. Als bildgebende Verfahren neben dem Thoraxröntgen werden insbesondere die Computertomographie betont und die Echokardiographie als Verfahren der ersten Wahl zum Ausschluss eines kardialen Lungenversagens hervorgehoben. Des Weiteren werden für die Definition des schweren ARDS die Lungen-Compliance sowie -Resistance herangezogen (■ **Tab. 1**).

In einer Metaanalyse von ARDS-Studien mit mehr als 4000 Patienten wurde die Praktikabilität der 3 neuen Kategorien bereits an den signifikant unterschiedlichen Mortalitätsraten (27, 32 und 42%) und Beatmungszeiten (5, 7 und 9 Tage) nachgewiesen.

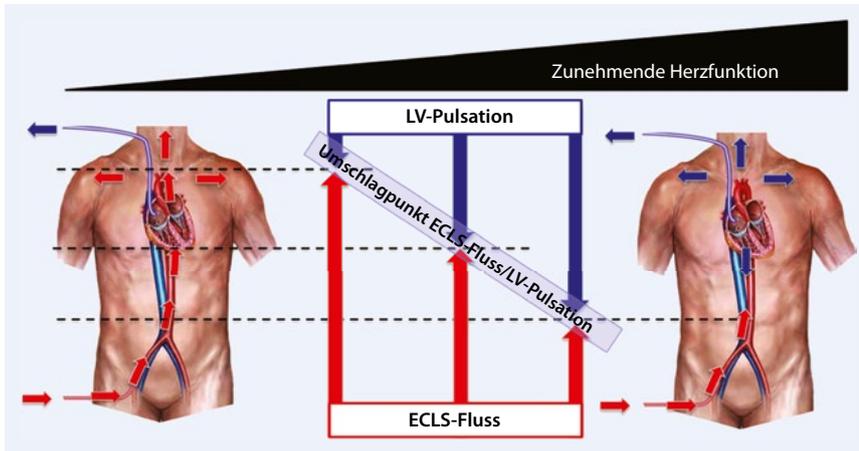
Benötigen nun alle Patienten mit schwerem ARDS – definiert als Horowitz-Index  $\leq 100$  mmHg, bei einem PEEP  $\geq 5$  cm H<sub>2</sub>O – eine ECMO? Diese Frage muss eindeutig verneint werden.

Neben der Sicherstellung der arteriellen Oxygenierung und Decarboxylierung steht die kausale Therapie der zugrunde liegenden Erkrankung im Vordergrund der ARDS-Therapie. In der Regel handelt es sich dabei um die Sanierung eines infektiösen Fokus durch adäquate antibiotische Therapie oder durch chirurgische Maßnahmen. Die Extracorporeal Life Support Organization (ELSO) sieht die Indikation für eine ECMO-Therapie als gegeben, wenn die zu erwartende Mortalität ohne ECMO-Therapie 80% übersteigt, z. B. bei einer  $p_aO_2-F_iO_2$ -Ratio  $< 80$  mmHg bei einer  $F_iO_2 > 0,9$  und einem Lung Injury Score (Murray Score) von 3–4.

Neben der kausalen Therapie, wie etwa der antimikrobiellen Therapie im Fall einer Pneumonie, steht eine Reihe von begleitenden Therapieoptionen zur Verfügung, wie etwa lungenprotektive Beatmung, dorsoventrale Wechsellagerung, Flüssigkeitsmanagement oder inhalative Stickstoffmonoxidtherapie [11, 12]. Somit ergeben sich folgende Eckpunkte bei der Indikationsstellung zur ECMO-Therapie:

- potenziell reversible Ursache des ARDS,
- Identifikation von Patienten mit hoher Mortalität,
- Murray Score  $> 3$ ,
  - $p_aO_2-F_iO_2$ -Ratio  $< 100$  mmHg,
  - PEEP  $> 15$  cm H<sub>2</sub>O und
  - bilaterale Infiltrate,

trotz



**Abb. 3** ▲ Hämodynamische Bedingungen bei zunehmender kardialer Pumpfunktion unter „Extracorporeal-life-support“ (ECLS)-Therapie bei femorofemoraler Kanülierung. LV linksventrikulär

- protektiver Beatmung, permissiver Hyperkapnie,
- Bauchlage,
- Optimierung des Volumenstatus (Diuretika, Nierenersatzverfahren) und
- inhalativer Stickstoffmonoxidgabe.

Nach den Daten der ELSO aus 2011 wurden die registrierten ECMO-Implantationen v. a. bei bakterieller Pneumonie sowie postoperativem oder traumatischem ARDS durchgeführt (■ Tab. 2). Die durchschnittliche Therapiedauer lag je nach Indikation zwischen 194 und 293 h; die längste Therapiedauer betrug 209 Tage.

### Beatmung

Primärziel der Beatmung unter ECMO-Therapie ist die Vermeidung einer weiteren „ventilatorassoziierten Lungenschädigung“ („ventilator-associated lung injury“, VALI). Daher sollte eine maximal-lungenprotektive Beatmung durchgeführt werden. Zugleich sollte eine zeitnahe Spontaneisierung ggf. mit frühzeitiger Tracheotomie des Patienten erfolgen, um unerwünschte Effekte einer prolongierten invasiven Beatmung [ventilatorassoziierte Pneumonie (VAP), Hypotrophie der Atemhilfsmuskulatur etc.] zu reduzieren.

### Komplikationen

Auch wenn in den letzten Jahren auf dem Gebiet der extrakorporalen Systeme ei-

ne rasante technische Entwicklung stattgefunden hat, sind Komplikationen während der ECMO-Therapie nicht selten. Eine Übersicht über Art und Häufigkeit von Komplikationen unter ECMO-Therapie gibt ■ Tab. 3 (<http://www.eslonet.com>).

### „Extracorporeal life support“

#### Aufbau und Kanülierungsformen

Der Aufbau eines „extracorporeal life support“ (ECLS) entspricht prinzipiell dem der ECMO; lediglich die Kanülierung unterscheidet sich: Bei einer ECLS als Herz- oder Herz-Lungen-Ersatz wird venöses Blut aus der V. cava inferior entnommen und arteriell zurückgeführt.

Die ECLS kann sowohl zentral, d. h. im Bereich der thorakalen Aorta und des rechten Vorhofs, als auch peripher im Bereich der A. femoralis oder A. subclavia angeschlossen werden. Insgesamt existieren 3 Kanülierungskonfigurationen, die durch spezifische hämodynamische Verhältnisse und Komplikationen charakterisiert sind. So kann es je nach Art der Kanülierung zu einer mehr oder weniger stark ausgeprägten Mischung von sauerstoffreichem und -armem Blut in der oberen Körperhälfte kommen.

**Venöser Abfluss über die V. femoralis, arterieller Zufluss peripher über die A. femoralis.** Das Einbringen einer großlumigen Kanüle in das periphere arterielle Gefäßsystem kann zu Perfusionsstörungen distal der Kanüle führen. Zur Prophylaxe

kannte distal der arteriellen ECLS-Kanüle eine Beinperfusionskanüle (10–12 F) in Seldinger-Technik eingebracht werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, den peripheren arteriellen Gefäßzugang chirurgisch mithilfe der Aufnahme einer Gefäßprothese (meist 8 mm) herzustellen.

Das linke Herz sollte unter ECLS-Therapie zwar weitgehend entlastet werden, dennoch leicht auswerfen, um Thrombenbildungen an der ansonsten verschlossenen Aortenklappe zu vermeiden und um den linken Ventrikel zu entleeren. Je nach Ausmaß der linksventrikulären Auswurfleistung resultiert somit eine unterschiedlich stark ausgeprägte Mischperfusion der Körpers (■ Abb. 3): Auch bei deutlich eingeschränkter eigener kardialer Auswurfleistung findet unter ECLS-Therapie die Koronardurchblutung hauptsächlich über das linksventrikulär ausgeworfene Blut statt. Bei zunehmender Auswurfleistung werden die gesamte obere Körperhälfte über das ausgeworfene Blut, die untere Körperhälfte über das retrograd von der ECLS zurückgeführte Blut perfundiert.

Im Fall eines begleitenden Lungenversagens ist das vom Herzen ausgeworfene Blut schlecht oxygeniert, sodass sowohl die Koronargefäße – mit konsekutiver myokardialer Hypoxie – als auch ggf. die oberen Extremitäten und der Kopf des Patienten einer Sauerstoffunterversorgung unterliegen („Harlekin-Phänomen“). Dies kann dazu führen, dass zwischen rechtem und linkem Arm sowie den unteren Extremitäten die arteriellen Sauerstoff- und Kohlendioxidpartialdrücke und auch die arterielle Sauerstoffsättigung stark differieren können. Da der Ort des höchsten Mischblutanteils aufgrund der anatomischen Situation der rechte Arm ist, sollten sowohl das Monitoring der Sauerstoffsättigung als auch die Blutgasentnahme an dieser Stelle erfolgen, um eine lokale Hypoxämie frühzeitig detektieren zu können.

Des Weiteren kann es – insbesondere bei einer Insuffizienz der Aortenklappe – zu einer massiven Volumenbelastung des linken Ventrikels mit linksventrikulärer Distension kommen. In diesem Fall muss ein „vent“ im linken Ventrikel für Entlastung sorgen, der das System allerdings verkompliziert und es anfälliger für

**Tab. 3** Art und Häufigkeit von Komplikationen unter „Extracorporeal-membrane-oxygenation“ (ECMO)-Therapie. (Adaptiert nach <http://www.eslonet.com>)

Komplikationen	Häufigkeit (%)
<b>Direkt</b>	
Gerinnselbildung im ECMO-System	17,8
Versagen des Membranoxygenators	17,5
Kanülenprobleme (Dislokation etc.)	8,4
Sonstige	7,9
<b>Indirekt</b>	
Nachblutungen	19
Blutungen im Bereich der Kanülierungsstelle(n)	17,1
Pulmonale Blutung	8,1
Gastrointestinale Blutung	5,1
Intrakranielle Blutung	3,8
Hämolyse	6,9
Disseminierte intravasale Gerinnungsstörung	3,7

**Tab. 4** Indikationen zur ECLS-Therapie im ELSO-Register. (Adaptiert nach <http://www.eslonet.com>)

Erkrankung	Anzahl (n) der ECLS-Implantationen	Überleben (%)
Kongenitales Herzvitium	144	36
Herz-Kreislauf-Stillstand	84	27
Kardiogener Schock	196	39
Kardiomyopathie	223	45
Myokarditis	64	69
Andere	1015	37

ECLS „extracorporeal life support“, ELSO Extracorporeal Life Support Organization.

Luftembolien macht. Alternativ kann eine Vorhofseptostomie erfolgen [13].

**Venöser Abfluss über eine Zwei- (40/32 F) oder Dreistufenkanüle (29 F) im rechten Vorhofrohr, arterieller Zufluss über direkte Kanülierung der Aorta ascendens (18–24 F).** Voraussetzung für dieses Vorgehen ist ein offener Thorax. Es bestehen keine Probleme bezüglich der peripheren Perfusion. Aufgrund der antegraden Flussrichtung des ECLS-Systems bei zentraler Kanülierung kommt es nicht zu einem entgegengesetzten kardialen Blutfluss. Daher kann die Blutentnahme an beiden Armen sowie an den Femoralgefäßen des Patienten erfolgen.

**Venöser Abfluss über die V. femoralis, arterieller Zufluss peripher über die A. subclavia.** Die Kanülierung der A. subclavia erfolgt entweder in Seldinger-Technik mit zusätzlicher Armperfusionkanüle, häufiger jedoch chirurgisch. Venös wird die V. femoralis punktiert. Bei diesem Zugang fließt das Blut durch den Truncus brachiocephalicus direkt in

den Aortenbogen und generiert somit einen fast physiologischen Fluss. Der rechte Arm des Patienten wird direkt über das ECLS-System versorgt. Zur Blutgasanalyse bieten sich bei dieser Versorgung also Blutentnahme aus dem linken Arm sowie aus den Femoralgefäßen an.

### Indikationen

Im Gegensatz zur ECMO hat sich das Verfahren der ECLS außerhalb der Herzchirurgie im Rahmen eines Postkardiotomie-low-output-Syndroms erst in den letzten Jahren etabliert. Daher existieren bisher kaum Empfehlungen zum Einsatz der ECLS [14]. Im Allgemeinen ist die ECLS-Implantation bei Patienten mit therapieresistiblem kardiogenem Schock zu erwägen, wenn diese trotz maximaler konservativer Therapie einschließlich Volumen-, Vasopressor-, Inotropikagabe sowie Intraaortaler-Ballonpumpen (IABP)-Implantation keine ausreichende systemische Perfusion aufbauen [14]. Des Weiteren ist die ECLS unter gewissen Umständen im Rahmen einer erweiterten kardio-

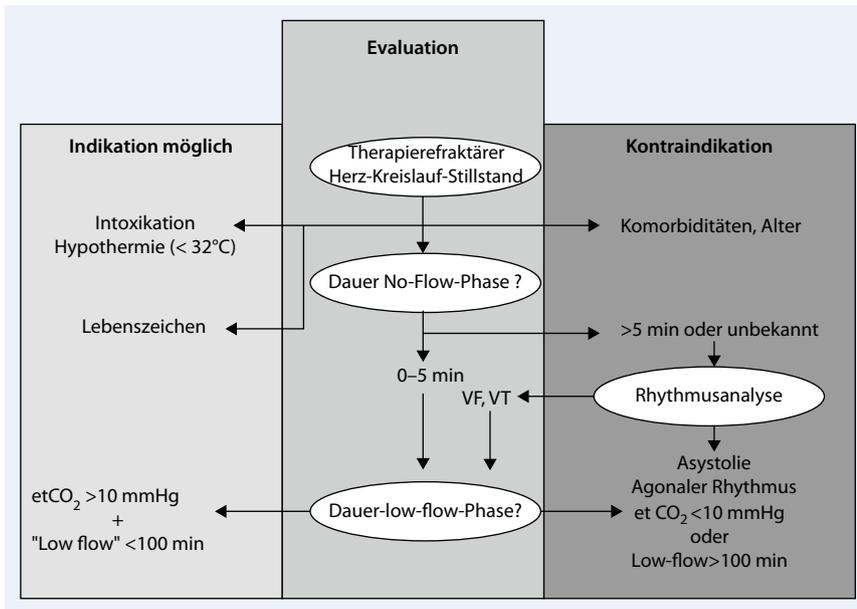
pulmonalen Reanimation („cardiopulmonary resuscitation“, CPR) zu erwägen.

Die Entscheidung zur ECLS-Implantation muss immer im Team und individuell von Fall zu Fall getroffen werden. Dabei müssen v. a. Patientenalter, Prognose des Patienten, Begleiterkrankungen, Ziel der ECLS-Therapie, neurologischer Status und bereits vorliegende Endorganschäden (Multiorganversagen?) berücksichtigt werden. Folgende Erkrankungen gelten als Grundlage der ECLS-Implantation:

- „post-perfusion low-cardiac output“ bzw. „Weaning“-Versagen nach extrakorporaler Zirkulation,
- akute Exazerbation einer chronischen Herzinsuffizienz,
- akute massive Lungenemboli,
- akutes kardiales Versagen nach Intoxikation,
- Kühlung von Patienten nach Herz-Kreislauf-Stillstand,
- kardiogener Schock bei akutem Myokardinfarkt und
- akute Transplantatabstoßung.

Da es sich bei der ECLS nicht um eine dauerhafte Therapieoption, sondern um eine Überbrückungsmaßnahme handelt, kann die ECLS-Therapie aufgrund ihrer Zielsetzung, wie folgt, klassifiziert werden:

- „Bridge to recovery“: Überbrückung bis zur Erholung der myokardialen Funktion, v. a. bei Myokarditispatienten.
- „Bridge to decision“: In der Akutsituation ist die Entscheidung für eine weiterführende, eskalierende Therapie oft schwierig, z. B. bei unklarer neurologischer Situation nach Reanimation. Die ECLS bietet die Möglichkeit der Stabilisierung in der Akutphase, um Zeit für die weitere Therapieplanung [z. B. „Left-ventricle-assistent-device“ (LVAD)-Implantation] zu gewinnen.
- „Bridge to bridge“: Die Überbrückung zur Implantation eines kardialen Assist device [LVAD, RCAD, BVAD], um dann eine Herztransplantation anzustreben.
- „Bridge to transplantation“: Überbrückung zur Herztransplantation.



**Abb. 4** Algorithmus zur Evaluation einer „Extracorporeal-life-support“ (ECLS)-Implantation unter kardiopulmonaler Reanimation.  $etCO_2$ , endtidales  $CO_2$ : endexpiratorische Kohlendioxidkonzentration, VF „ventricular fibrillation“ (Kammerflimmern), VT ventrikuläre Tachykardie. (Adaptiert nach [18])

Des Weiteren wird in letzter Zeit bei der Versorgung von Patienten mit kardiogenem Schock auf dem Boden eines akuten Koronarsyndroms häufig von „bridge to intervention“ gesprochen. Nach den Daten der ELSO aus 2011 wurden die registrierten ECLS-Implantationen bei über 16-jährigen Patienten v. a. im kardiogenen Schock sowie bei bekannter Kardiomyopathie mit akuter Exazerbation durchgeführt (Tab. 4; <http://www.eslonet.com>).

Die durchschnittliche Therapiedauer lag je nach Indikation zwischen 73 und 163 h; die längste Therapiedauer betrug 88 Tage.

### Kardiopulmonale Reanimation

In den aktuellen nationalen und internationalen Leitlinien zur CPR wird die ECLS als bevorzugte Methode zur aktiven internen Wiedererwärmung bei hypothermen Patienten mit Atem- und Herz-Kreislauf-Stillstand sowie Patienten nach Intoxikation mit kardiodepressiven Substanzen und konsekutivem Herz-Kreislauf-Versagen empfohlen [15]. Zahlreiche Studien belegen jedoch, dass der Einsatz eines ECLS-Systems unter CPR prinzipiell bei jeder potenziell kurativ behandelbaren Grundkrankheit zu überlegen ist. Anhand kleiner Fallzahlen ist eine Überlebensrate

nach Herz-Kreislauf-Stillstand und CPR durch den ECLS-Einsatz von 27% beschrieben, bei Patienten, die sonst keine Therapiemöglichkeit mehr gehabt hätten [16]. Andere Untersuchungen berichten von einer Krankenhausüberlebensrate nach Einsatz eines ECLS-Systems bei CPR von 40–50% [17]. Eine prospektive, randomisierte Studie zum ECLS bei „out-of-hospital cardiac arrest“ ist in Planung (Prague OHCA Study).

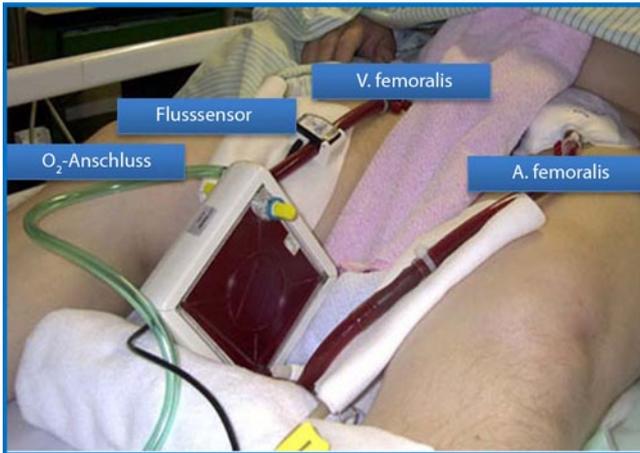
Möglichkeit und Sinnhaftigkeit der ECLS-Implantation während der CPR bleiben individuell im Einzelfall abzuwägen und hängen von der Prognose des Patienten sowie Dauer, Art und Grund der CPR ab. Die ECLS-Implantation erfordert einen hohen logistischen Aufwand sowie ein ECLS-Team im „standby“ (24/7). Ein möglicher Algorithmus zur Evaluation von Patienten unter CPR hinsichtlich der Indikation zur ECLS-Implantation ist in Abb. 4 zu sehen. Ein Ausschlusskriterium ist der hypoxische Herz-Kreislauf-Stillstand.

### Erforderliche personelle und technische Voraussetzungen

Moderne ECMO-/ECLS-Systeme sind leicht zu implantieren, hoch effektiv und transportabel. Dennoch dürfen rasante

technische Entwicklungen auf dem Gebiet der extrakorporalen Systeme nicht darüber hinwegtäuschen, dass es sich um ein invasives Verfahren handelt, das viel Expertise und Erfahrung erfordert. Des Weiteren sind Komplikationen während der ECMO-/ECLS-Therapie nicht selten: In einer retrospektiven Analyse der ELSO-Datenbank traten in bis zu 17,5% der Fälle technische Probleme wie z. B. eine Oxygenatordysfunktion auf. Außerdem kommt es unter der Therapie gehäuft zu Blutungskomplikationen (19%) und lebensbedrohenden peripheren sowie auch zentralen Gefäßkomplikationen. Vor diesem Hintergrund muss kritisch beleuchtet werden, dass in jüngster Vergangenheit zunehmend niedergelassene Kardiologen Interesse an ECLS-Systemen gefunden haben, um Patienten bei „perkutaner transluminaler koronarer Hochrisikoangioplastie“ im Notfall unterstützen zu können. Um diesen Entwicklungen gegenzusteuern, haben die Arbeitsgruppe Extracorporeale Zirkulation (EKZ) der Deutschen Gesellschaft für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie (DGTHG) sowie die Deutsche Gesellschaft für Kardiotechnik (DGfK) ein Positionspapier zur ECLS-Therapie verfasst und empfehlen den Einsatz dieser Systeme nur in Zentren, die über die entsprechende Expertise verfügen, um die Kanüle sicher in Seldinger- und/oder chirurgischer Technik platzieren, Gefäßkomplikationen katheter-technisch und/oder chirurgisch beheben sowie eine Notfallthorakotomie und den Einsatz der EKZ durchführen zu können. Folgende Mindestanforderungen wurden von den genannten Fachgesellschaften formuliert [10]:

- Verfügbarkeit eines Facharzts für Herzchirurgie (bzw. Herzchirurgen mit Facharzt-niveau) mit hinreichender Erfahrung in der transkutanen und konventionell chirurgischen Implantation von arteriellen und venösen Kanülen unter Notfallbedingungen,
- Verfügbarkeit eines European Board of Cardiovascular Perfusion (EBCP) zertifizierten Kardiotechnikers mit hinreichender klinischer Erfahrung (bzw. mehr als 500 selbstständig durchgeführten extrakorporalen Zirkulationen),



**Abb. 5** ◀ Übersicht zum „pumpless extracorporeal lung assist“

- Verfügbarkeit einer kompletten apparativen Ausstattung [mobile Herz-Kreislauf-Unterstützungssysteme mit redundantem Back-up-System, diverse arterielle und venöse Kanülen, Operationstisch, Geräte für die Bestimmung von „activated clotting time“ (ACT) und die Blutgasanalyse (BGA) etc.].

### „Pumpless extracorporeal lung assist“

Am Klinikum der Universität Regensburg wurde von einer interdisziplinären Arbeitsgruppe ein neues arteriovenöses Lungenunterstützungssystem entwickelt [19]: Der iLA-Membranventilator® wird arteriovenös über die femoralen Gefäße angeschlossen und bewirkt ohne Notwendigkeit einer Blutpumpe eine extrakorporale CO<sub>2</sub>-Elimination und geringe Oxygenierung des Bluts (◻ **Abb. 5**).

Der Blutfluss wird durch den Druckgradienten zwischen A. und V. femoralis erzeugt (durchschnittliche treibende Druckdifferenz von 60–80 mmHg). Damit wird ein vom HZV-abhängiger Blutfluss von maximal 4,5 l/min generiert; die direkte Einstellung des Blutflusses ist nicht möglich. Es werden ca. 20% des HZV über die Membran geleitet. Für die optimale Funktion der Membran ist ein Blutfluss von ca. 1,0–1,5 l/min erforderlich. Somit ist die Limitation der Methode aus zirkulatorischer Sicht bei einem arteriellen Mitteldruck <60 mmHg anzusiedeln; ein kardiogener Schock stellt eine Kontraindikation für den Einsatz der pECLA dar. Häufig sind jedoch nach pECLA-Implantation ein Anstieg des HZV und eine

Reduktion der Vasopressortherapie aufgrund der Normalisierung des pH-Werts zu beobachten.

Die pECLA zeichnet sich durch eine sehr gute Decarboxylierungsleistung (abhängig von pCO<sub>2</sub>, Gasfluss, Blutfluss), jedoch nur eine eingeschränkte Oxygenierungsleistung (da arterielles Blut nahezu komplett gesättigt ist, wesentlicher Effekt ist die Reduktion des alveolären pCO<sub>2</sub>) aus. Deshalb sollte die Methode als unterstützendes Verfahren zur Lungenprotektion, nicht aber als Lungenersatztherapie bei primärem Oxygenierungsversagen eingesetzt werden. Dennoch stellt dieses Verfahren keine Behelfsvariante der ECMO, sondern einen eigenen Therapieansatz dar, der auf CO<sub>2</sub>-Elimination abzielt und dadurch die Lungenprotektion in der Beatmungsstrategie ermöglicht. Die Hauptindikation zur pECLA-Therapie liegt in der primär hyperkapnischen (respiratorischen) Acidose mit einem pH-Wert <7,25, die nicht oder nur durch eine lungenschädigende Beatmung (Tidalvolumen >8 ml/kg Ideal-KG, Spitzendruck >35 cm H<sub>2</sub>O, F<sub>I</sub>O<sub>2</sub> >0,6) zu beseitigen ist.

Auf die Integration eines Wärmetauschers kann wegen zu vernachlässigender Temperaturverluste durch Konvektion verzichtet werden. Das Füllvolumen des gesamten extrakorporalen Systems, einschließlich der Anschlussleitung an die Kanülen, beträgt maximal 250 ml; es kommt zu einer verhältnismäßig geringen Schädigung der korpuskulären Blutbestandteile. Weitere Vorteile liegen in der wesentlich leichteren Anlage und Handhabbarkeit ohne Notwendigkeit eines Kardiotechnikers und der wesentlich ge-

ringeren Größe, die sich v. a. bei Transport und Mobilisation des Patienten bemerkbar macht.

Als kritischer Punkt ist jedoch die Kanülierung der A. femoralis anzusehen. Hier ist besondere Sorgfalt darauf zu verwenden, dass es nicht zur unzureichenden Perfusion im Abstromgebiet des arteriell punktierten Gefäßes kommt (◻ **Tab. 5**).

Einen Überblick über die Kontraindikationen zur pECLA-Therapie gibt ◻ **Tab. 6**.

Entscheidend für den Erfolg der pECLA-Therapie scheint, ähnlich wie bei der ECMO-Therapie, der frühzeitige Einsatz zu sein, um der Lungenschädigung durch eine aggressive Beatmung vorzubeugen: So ist dem „ILA-Registry“ zufolge die Überlebensrate bei Patienten mit „chronic obstructive pulmonary disease“ (COPD) im Fall einer frühzeitigen pECLA-Implantation (<48 h nach respiratorischer Acidose, pH <7,25) mit 75% signifikant besser als bei Patienten mit verspäteter ILA-Therapie (<http://www.novalung.com>). Prospektiv-randomisierte Studien zum Einsatz der pECLA existieren nicht. Die Mortalität lag in den bisher publizierten Fallserien mit 57% (263 von 462 Patienten) unter der erwarteten Sterblichkeit. In allen Studien konnte die suffiziente Decarboxylierung mit konsekutiver Deeskalation der mechanischen Beatmung erreicht werden. Die Inzidenz von lokalen Komplikationen an der arteriellen Kanülierungsstelle konnte im Zeitraum von 2006 bis 2009 von 24,4 auf 11,9% gesenkt werden; es traten keine pECLA-assoziierten Todesfälle auf [20].

### Ausblick

Aufgrund ständiger technischer Weiterentwicklung, insbesondere im Bereich der Systemminiaturisierung, sind die weitere Zunahme der Implantationszahlen und auch die Ausweitung auf weitere Indikationsgebiete im Bereich der kurz- und längerfristigen Herz-/Lungenunterstützungssysteme zu erwarten.

Im Bereich der ECLS-Therapie hat der bereits stattgefunden Wandel der LVAD-Therapie weg vom „bridging to transplant“ hin zur „Destination“-Therapie zu einer breiteren Anwendung an Patienten, die keine Transplantationskandidaten sind,

**Tab. 5** Charakteristika der „extracorporeal membrane oxygenation“ und des „pumpless extracorporeal lung assist“

	„Extracorporeal membrane oxygenation“	„Pumpless extracorporeal lung assist“
Effekt auf den Gasaustausch	Oxygenierung ↑↑ Decarboxylierung ↑↑	Oxygenierung ↑ Decarboxylierung ↑↑
Kanülierung	Venovenös	Arteriovenös
Extrakorporaler Blutfluss (l/min)	Zirka 4	1,5–2
Antikoagulation	Heparinisierung	„Low-dose“-Heparin
Komplikation	Blutung, Membranleckage, Hämolyse, Rezirkulation	„Low cardiac output“, heparininduzierte Thrombozytopenie Typ II
Personeller und technischer Aufwand	Hoch	Gering

**Tab. 6** Kontraindikationen zur „Pumpless-extracorporeal-lung-assist“-Therapie

Kontraindikationen
Eingeschränkte kardiale Pumpfunktion (Herzminutenvolumen <2,5 ml/min)
Therapierefraktäre Hypoxämie
Periphere arterielle Verschlusskrankheit
Arterieller Gefäßdurchmesser <5 mm
Schwere disseminierte intravasale Gerinnungsstörung
Heparininduzierte Thrombozytopenie Typ II

geführt. Darüber hinaus gibt es zunehmend Bemühungen zur Etablierung von Netzwerken, um Patienten im schwersten kardiogenen Schock oder sogar im Rahmen einer CPR auch jenseits des herzchirurgischen Settings mit einer ECLS zu versorgen und anschließend in ein Zentrum der Maximalversorgung mit herzchirurgischer Expertise zu verlegen. Des Weiteren gibt es erste positive Berichte über den Einsatz eines ECLS in der Therapie des septischen Schocks; eine asiatische retrospektive Observationsstudie wird voraussichtlich Ende 2013 vorgestellt.

Die pECLA hat sich in den letzten Jahren weg vom Rescue-Verfahren beim schwersten hyperkapnischen Lungenversagen hin zum Tool zur Vermeidung einer lungenschädigenden Beatmung entwickelt. So wird dieses Verfahren zunehmend beim wachen ansprechbaren Patienten angewendet, um die endotracheale Intubation mit all ihren negativen Effekten zu vermeiden. Ähnliches lässt sich von der ECMO-Therapie berichten: Aufgrund des Wissens um dies lungenschädigenden Effekte einer aggressiven Beatmung wird die Indikation zur ECMO-Therapie immer früher gestellt. Eine prospektive randomisierte Studie zum frühen Einsatz der ECMO – 3–6 h nach Diagnose eines schweren ARDS – befindet sich

in der Rekrutierungsphase (Extracorporeal Membrane Oxygenation for Severe Acute Respiratory Distress Syndrome, EOLIA).

Insbesondere die Anwendung einer Doppellumenkanüle ermöglicht den Langzeiteinsatz in wachen und mobilen Patienten, z. B. als Bridging zur Lungentransplantation. Die Ergebnisse einer prospektiven Studie zur ECMO-Therapie in wachen Patienten vor Lungentransplantation werden 2014 erwartet. Zusammengefasst handelt es sich daher bei der extrakorporalen Herz- und/oder Lungenunterstützung um ein Gebiet mit großem Entwicklungspotenzial, das nicht nur zahlenmäßig immer mehr in den Fokus der Herzchirurgen und der Intensivmedizin tritt.

### Fazit für die Praxis

**Trotz ihres invasiven Charakters finden Herz- und/oder Lungenersatzverfahren aufgrund technischer Fortschritte sowie auch positiver Studienergebnisse und klinischer Erfahrung zunehmend Anwendung. Es ist jedoch eine hohe Inzidenz an Komplikationen unter ECMO-/ECLS-Therapie zu beobachten; Indikationsstellung und v. a. Timing erfordern große Exper-**

**tise. Vor diesem Hintergrund ist eine Begrenzung dieser Therapieoptionen auf große Zentren mit herzchirurgischer Anbindung zu fordern.**

### Korrespondenzadresse



**K. Pilarczyk**  
Klinik für Thorax- und  
Kardiovaskuläre Chirurgie,  
Westdeutsches Herzzentrum  
Essen, Uniklinik Essen  
Hufelandstr. 55, 45122 Essen  
Kevin.Pilarczyk@uk-essen.de

Kevin Pilarczyk studierte von 2000 bis 2007 Humanmedizin in Gießen, Essen, Rochester (USA) sowie Houston (USA) und ist seit 2007 Assistenzarzt an der Klinik für Thorax- und Kardiovaskuläre Chirurgie des Westdeutschen Herzzentrums Essen. Sein klinischer und wissenschaftlicher Schwerpunkt ist die herzchirurgische Intensivmedizin.

**Interessenkonflikt.** Der korrespondierende Autor gibt für sich und seine Koautoren an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

### Literatur

- Trummer G, Bein B, Buerke M et al (2013) Einteilung mechanischer Herz-, Lungen und/oder Kreislaufunterstützungssysteme: Eine Empfehlung der Sektion Herz-Kreislauf der Deutschen Interdisziplinären Vereinigung für Intensiv- und Notfallmedizin (DIVI) (im Druck)
- Garcia JP, Kon ZN, Evans C et al (2011) Ambulatory veno-venous extracorporeal membrane oxygenation: innovation and pitfalls. *J Thorac Cardiovasc Surg* 142:755–761
- Locker GJ, Losert H, Schellongowski P et al (2003) Bedside exclusion of clinically significant recirculation volume during venovenous ECMO using conventional blood gas analyses. *J Clin Anesth* 15:441–445
- Brogan TV, Thiagarajan RR, Rycus PT et al (2009) Extracorporeal membrane oxygenation in adults with severe respiratory failure: a multi-center database. *Intensive Care Med* 35:2105–2114
- Zapol WM, Snider MT, Hill JD et al (1979) Extracorporeal membrane oxygenation in severe acute respiratory failure. A randomized prospective study. *JAMA* 242:2193–2196
- Morris AH, Wallace CJ, Menlove RL et al (1994) Randomized clinical trial of pressure-controlled inverse ratio ventilation and extracorporeal CO2 removal for adult respiratory distress syndrome. *Am J Respir Crit Care Med* 149:295–305
- 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
- Pham T, Combes A, Rozé H et al (2012) Extracorporeal membrane oxygenation for pandemic influenza A(H1N1) induced acute respiratory distress syndrome. A cohort study and propensity-matched analysis. *Am J Respir Crit Care Med*. DOI 10.1164/rccm.201205-0815OC

9. Bernard GR, Artigas A, Brigham KL et al (1994) The American-European Consensus Conference on ARDS. Definitions, mechanisms, relevant outcomes, and clinical trial coordination. *Am J Respir Crit Care Med* 149:818–824
10. ARDS Definition Task Force, Ranieri VM, Rubenfeld GD et al (2012) Acute respiratory distress syndrome: the Berlin definition. *JAMA* 307:2526–2533
11. Kluge S, Müller T, Pfeifer M (2011) Current approaches to the treatment of severe hypoxic respiratory insufficiency (acute lung injury; acute respiratory distress syndrome). *Dtsch Med Wochenschr* 136:186–189
12. Deja M, Hommel M, Weber-Carstens S et al (2008) Evidence-based therapy of severe acute respiratory distress syndrome: an algorithm-guided approach. *J Int Med Res* 36:211–221
13. Avalli L, Maggioni E, Sangalli F et al (2011) Percutaneous left-heart decompression during extracorporeal membrane oxygenation: an alternative to surgical and transeptal venting in adult patients. *ASAIO J* 57:38–40
14. 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
15. Hazinski MF, Nolan JP, Billi JE et al (2010) Part 1: Executive summary: 2010 International consensus on cardiopulmonary resuscitation and emergency cardiovascular care science with treatment recommendations. *Circulation* 122(16 Suppl 2):250–275
16. 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
17. Kagawa E, Inoue I, Kawagoe T et al (2010) Assessment of outcomes and differences between in- and out-of-hospital cardiac arrest patients treated with cardiopulmonary resuscitation using extracorporeal life support. *Resuscitation* 81:968–973
18. Conseil français de réanimation cardiopulmonaire, Société française d'anesthésie et de réanimation, Société française de cardiologie, et al (2009) Guidelines for indications for the use of extracorporeal life support in refractory cardiac arrest. French Ministry of Health. *Ann Fr Anesth Reanim* 28:182–190
19. Bein T, Weber F, Philipp A et al (2006) A new pumpless extracorporeal interventional lung assist in critical hypoxemia/hypercapnia. *Crit Care Med* 34:1372–1377
20. Zimmermann M, Bein T, Arlt M et al (2009) Pumpless extracorporeal interventional lung assist in patients with acute respiratory distress syndrome: a prospective pilot study. *Crit Care* 13:R10 (Epub 2009 Jan 30)

**R. Erbel, B. Plicht, P. Kahlert, T. Konorza (Hrsg.)**

**Herzkatheter-Manual**

Diagnostik und interventionelle Therapie

Köln: Deutscher Ärzte-Verlag 2012, 974 S., 592 Abb., (ISBN 978-3-7691-1274-0), 149.00 EUR

Mit dem Herzkatheter-Manual von Raimund Erbel, Björn Plicht, Philipp Kahlert und Thomas Konorza aus Essen wurde ein Buch aufgelegt, welches sich nach 10-jähriger Entwicklungs- und Reifungsphase ohne weiteres in die Reihe der großen Lehrbücher der invasiven Kardiologie einfügt.

Das Buch beginnt mit einer Aufarbeitung der durchaus nicht immer geradlinigen Geschichte der interventionellen Kardiologie, welche durch das Geleitwort von Professor Jürgen Meyer, einem der Pioniere der PTCA, eingeraht wird. Schon beim Durchblättern des 970 Seiten starken Lehrbuchs erkennt man die Reize dieses Werks. Die Autoren haben auf Basis einer langen beruflichen und praktischen Erfahrung die zentralen Aspekte der invasiven Kardiologie im Herzkatheterlabor herausgearbeitet und didaktisch hervorragend aufbereitet. Mit einer beeindruckenden Anzahl an Grafiken, Bildern und Diagrammen wird einem das komplette Spektrum der diagnostischen und therapeutischen Verfahren der interventionellen Kardiologie veranschaulicht.

Angefangen bei den zugrunde liegenden Pathologien werden Krankheitsbilder, Diagnostik und die hoch technisierten, tagesaktuellen Therapieverfahren erläutert. Von der instabilen Angina pectoris über den Infarkt und die Aortendissektion bis hin zu neuesten interventionellen Verfahren, wie der transfemorale und transapikale Aortenklappenimplantation, sind alle Bereiche vertreten, mit denen man sich als interventionell tätiger Kardiologe konfrontiert sehen könnte. Zusätzlich bekommt man praxisbezogene Tipps und Tricks an die Hand, sowie einleuchtende Handlungsleitfäden, die für das eigene Katheterlabor technisch und organisatorisch umgesetzt werden können. Auf dem Weg zum interventionellen Kardiologen kann das Buch ein wertvoller Begleiter sein.

Allen aktuellen Leitlinien, Studienprotokollen und „Standard Operating Procedures“ zum

Trotz schaffen es die Autoren dank des lebendigen Schreibstils, die Neugier des Lesers immer wieder neu zu entfachen.

Einzig die beigefügte CD mag ein wenig enttäuschen, wenn man das ein oder andere Video einer Intervention erwartet hat. Der Datenträger liefert „lediglich“ das im Herzinfarktverbund Essen verwendete Material zur Patienteninformation über das akute Koronarsyndrom, seiner Diagnose und der Therapieverfahren sowie das Handbuch mit den „standing orders“ der Essener Katheterlabore.

Am Ende stehen zwei Dinge fest: Es war eine Freude, dieses Werk rezensieren zu dürfen, und wer invasiv kardiologisch tätig sein möchte, dem sei dieses Lehrbuch herzlich empfohlen.

*P. Gaudron/G. Ertl (Würzburg)*

Hier steht eine Anzeige.

