

MIT PUMPE ODER OHNE

Update "Extrakorporale Lungenunterstützungssysteme"

Quelle: *Pneumologie* 2010; 7(6): 441–447

[Quelldetails öffnen](#) ▾



Bei schwerem akutem Lungenversagen (ARDS), das durch konventionelle Therapie nicht ausreichend beherrscht werden kann, können zur Unterstützung des Gasaustauschs extrakorporale Systeme eingesetzt werden.

Abb. 1: Venovenöse ECMO, PLS-Quadrox-D®-Oxygenator, Rotaflow-Pumpe (Maquet Cardiopulmonary AG)

© Springer Medizin

Die Mortalität des schweren akuten Lungenversagens (ARDS) des Erwachsenen liegt bei etwa 40% [28, 30]. Schwere Verlaufsformen des ARDS mit einem Horowitz-Index <100 mmHg und einem hohen Lung Injury Score (LIS) >3,5 haben mit bis über 80% eine deutlich höhere Sterblichkeit [6, 33]. Eine aggressive mechanische Beatmung, die nötig sein kann, um den lebensnotwendigen Gasaustausch zu gewährleisten, aggraviert einen bereits bestehenden Lungenschaden. Hierdurch kann ein Circulus vitiosus induziert werden, der letztendlich zu einer irreversiblen Destruktion des Lungenparenchyms führen kann.

Extrakorporale Verfahren zur Unterstützung des Gasaustausches können vor diesem Hintergrund eine relevante Rolle spielen, um nicht nur eine akut lebensgefährdende Hypoxämie zu beheben, sondern auch das Ausmaß einer ventilator-assoziierten Lungenschädigung zu mindern. Moderne miniaturisierte Systeme sind mit historischen Systemen der extrakorporalen Membranoxygenierung (ECMO) nicht mehr zu vergleichen, da wesentliche technische Entwicklungen zu einer signifikanten Reduktion mechanischer Komplikationen geführt haben. Daher sind auch die früher zitierten randomisierten, kontrollierten Studien zum Einsatz einer ECMO heute nicht mehr aussagekräftig [21, 35]. Vor Einsatz der extrakorporalen Verfahren müssen immer alle verfügbaren konventionellen Methoden zur Therapie des Lungenversagens bestmöglich eingesetzt worden sein.

Nur wenn entweder der lebensnotwendige Gasaustausch akut nicht zu sichern oder eine protektive Beatmung aufgrund des gravierenden Lungenschadens nicht möglich ist, ist die Indikation für eine extrakorporale Lungenunterstützung zu prüfen.

Extrakorporale Lungenunterstützungsverfahren sind vom Prinzip her zunächst zu unterteilen in pumpengetriebene und pumpenlose Systeme. Außerdem ist zu differenzieren zwischen venovenöser, venoarterieller und arteriovenöser (bei pumpenlosem Verfahren) Kanülierung. Eine venoarterielle Kanülierung ist dann nötig, wenn zusätzlich oder vorrangig eine Unterstützung des Kreislaufs intendiert ist; hierauf wird in diesem Übersichtsartikel nicht eingegangen.

Neben der Art des Unterstützungsverfahrens sollte man sich vor dem Einsatz Gedanken über die notwendige Kanülengröße machen. Hierbei gilt, dass der Kanülenquerschnitt umso größer sein muss, je höher der angestrebte und benötigte extrakorporale Blutfluss sein soll (Hagen-Poiseuille-Gesetz). Bei geeigneten Patienten kann ein pumpenloses System mit arteriovenöser Kanülierung erwogen werden, falls eine respiratorische Azidose gebessert werden soll. Ist eine schwere Hypoxämie führend, muss ein pumpengetriebenes System, meist mit venovenöser Kanülierung, gewählt werden.

Grundsätzlich gilt, dass eine extrakorporale Membranoxygenierung per se keine kausale Therapie darstellt.

Sie ist lediglich eine Methode, den lebensnotwendigen Gasaustausch zu sichern und damit Zeit zu gewinnen, die für Heilungsvorgänge der Lunge benötigt wird. Durch den Einsatz einer ECMO ist eine hoch protektive Beatmung möglich, so dass dadurch potenziell das Ausmaß der ventilatorassoziierten Lungenschädigung begrenzt wird.

Venovenöse extrakorporale Membranoxygenierung Technik

Die Geschichte der extrakorporalen Lungenunterstützungsverfahren reicht bis in die 1970er Jahre zurück [10, 12, 16, 21, 22, 35]. Während bis vor wenigen Jahren der technische Aufwand bei Einsatz einer extrakorporalen Membranoxygenierung erheblich war, sind moderne ECMO-Systeme vergleichsweise unkompliziert und robust. Im Prinzip sind heute zu- und abführende Kanüle, Pumpe, Oxygenator und Steuereinheit notwendig.

Die Auswahl der Kanülengröße richtet sich erstens nach den individuellen anatomischen Gegebenheiten und zweitens nach dem intendierten extrakorporalen Blutfluss. Nach Ultraschalluntersuchung wird bei konventioneller Kanülierung in der Regel die rechte V. femoralis zur Implantation einer langen (30–40 cm) 21- bis 24-Fr.-Kanüle verwendet, die bis in die V. cava inferior vorgeschoben wird, und über die das venöse Blut zum Oxygenator geführt wird. Als rückführendes Gefäß wählen wir meist die rechte V. jugularis interna; hier wird eine kürzere (15–21 cm) 15- bis 17-Fr.-Kanüle verwendet. Auch die linksseitige V. femoralis und V. jugularis oder die V. subclavia rechts kann verwendet werden, wobei dann von einem etwas höheren Implantationsrisiko ausgegangen werden muss.



Abb. 2: Venovenöse ECMO, Deltastream-III-Pumpe, Hilite-LT®-Oxygenator (Medos)

© Springer Medizin

Der Abstand beider Kanülenenden in der V. cava soll mehr als 15 cm betragen, um eine Rezirkulation bereits oxygenierten Blutes weitgehend zu vermeiden. Alternativ kann anstelle zweier Kanülen eine Doppellumenkanüle (Avalon Laboratories, Los Angeles, USA) verwendet werden. Diese ist für die Implantation in die rechte V. jugularis entwickelt worden und hat den wesentlichen Vorteil, dass wache Patienten mit ECMO-Unterstützung mobilisiert werden können. Nachteilig wirken sich hohe Kosten sowie eine schwierigere Implantation aus. Für Erwachsene stehen Kanülengrößen von 20–31 Fr. zur Verfügung.

Als Pumpeinheit werden heute bei Erwachsenen Zentrifugalpumpen verwendet (z. B. Jostra-Rotaflow®, Maquet Cardiopulmonary AG, Hirrlingen; CentriMag®, Levitronix GmbH, Zürich, Schweiz; Medos-Deltastream III®, Medos Medizintechnik, Stollberg). Die in der Praxis benötigte Pumpleistung von bis zu 4,5 l/min kann von allen Pumpen mühelos erzielt werden. Vergleichende Untersuchungen für die verschiedenen Pumpentypen liegen für die klinische Praxis nicht vor. Ultraschallflusssensor und Luftblasendetektor sind in der Regel integriert. Wünschenswert ist die Option eines Batteriebetriebs unabhängig vom Stromnetz, um den Patienten transportieren zu können. Für den Notfall muss die Möglichkeit eines manuellen Ersatzantriebs vorhanden sein.

Die Gasaustauschmembranen moderner Oxygenatoren sind aus Polymethylpenten gefertigt, so dass heute eine Plasmaleckage nicht mehr auftritt. Als Beispiele sind der PLS-Quadrox-D®-Oxygenator (Maquet Cardiopulmonary AG, Hirrlingen) oder der Medos-Hilite-LT®-Oxygenator (Medos Medizintechnik, Stollberg) anzuführen. Bei einer Austauschoberfläche von 1,8 m² weist der PLS Quadrox D® einen niedrigen Strömungswiderstand auf (dpMO=40 mmHg bei 4 l/min Blutfluss).

Moderne ECMO-Systeme zeichnen sich durch Miniaturisierung der Einzelkomponenten und kompaktes Design aus (Abb. 1, 2). Seit 2010 steht das Cardiohelp-System (Maquet Cardiopulmonary AG, Hirrlingen) zur Verfügung (Abb. 3). Durch Integration von Pumpe, Oxygenator und Steuerungskonsole in eine Einheit wurde eine weitere Verkleinerung des Systems mit einer Reduktion des Gewichts auf 13 kg möglich; zusätzlich können Ansaug- und Abstromdrücke, der Hämoglobinwert sowie die venöse Sättigung vor dem Oxygenator online gemessen werden.



Abb. 3: Cardiohelp-System (Maquet Cardiopulmonary AG)

© Springer Medizin

Standard ist heute eine Heparinbeschichtung aller blutführenden Komponenten. In der Regel wird eine systemische Antikoagulation mit intravenös verabreichtem unfraktioniertem Heparin durchgeführt. Die Ziel-aPTT liegt bei etwa 1,5 des Normalen, kann aber bei starker Blutungsneigung auch niedriger sein. Wenn möglich wird additiv Acetylsalicylsäure (100 mg/Tag) zur Hemmung der Thrombozytenaggregation gegeben. Im Einzelfall kann bei aktiv blutendem Patienten die systemische Antikoagulation für Stunden bis Tage ausgesetzt werden. Jedoch ist dann mit einer schnelleren Thrombosierung insbesondere des Oxygenators zu rechnen.

Indikation und klinische Studienlage

Der Einsatz einer venovenösen ECMO soll bei akutem Lungenversagen erwogen werden, wenn trotz optimierter konventioneller Beatmung und kinetischer Therapie die paO₂/FIO₂-Ratio <80 mmHg beträgt. In der Regel bedeutet dies, dass die Patienten mit hohen in- und expiratorischen Drücken sowie einer FIO₂ von 1,0 beatmet werden. Manche Patienten verschlechtern sich rapide, so dass die ECMO als Rescue-Verfahren rasch initiiert werden muss. Bei anderen wird die Indikation semi-elektiv gestellt, wenn die Regeln einer Lungenprotektion nicht

eingehalten werden können, der vitale Gasaustausch nur durch aggressive invasive Ventilation gesichert werden kann, und eine Besserung nach 12–24 Stunden nicht erkennbar ist. Auch eine nicht beherrschbare respiratorische Azidose mit einem pH <7,2 kann eine Indikation für eine extrakorporale Lungenunterstützung darstellen.

Eine absolute Kontraindikation für eine venovenöse ECMO stellt der kardiogene Schock dar, da in diesem Fall eine venoarterielle Kanülierung nötig ist. Früher angegebene Kontraindikationen wie Sepsis, disseminierte Gerinnungsstörung oder Thrombopenie gelten heute als relativ. Eine Altersbegrenzung auf 70 Jahre kann sinnvoll sein, da bei Älteren oft eine langfristige Erholung nicht mehr erreicht wird. Extrakorporale Unterstützungssysteme sollen nur bei Erkrankungen zur Anwendung kommen, die potenziell gebessert werden können.

Während der Benefit der ECMO-Therapie in der pädiatrischen Intensivmedizin weitgehend akzeptiert ist (Übersicht bei [31]), ist die Datenlage in der Intensivmedizin bei Erwachsenen noch nicht eindeutig geklärt. Der CESAR-Trial repräsentiert die erste randomisierte, kontrollierte Studie in der Erwachsenenintensivmedizin [26]; seine Wertigkeit wurde kontrovers diskutiert. Zwischen 2001 und 2006 waren 180 erwachsene Patienten mit schwerem Lungenversagen entweder in eine Kontrollgruppe mit konventioneller Ventilation oder in die ECMO-Gruppe randomisiert worden. Einschlusskriterien waren ein Lung Injury Score >3,0 oder eine unkompenzierte Hyperkapnie mit einem pH <7,2. Ausgeschlossen waren unter anderem Patienten über 65 Jahre oder nach aggressiver mechanischer Ventilation über mehr als 7 Tage.

Der primäre Endpunkt „Tod oder schwere Behinderung nach 6 Monaten“ wurde in der ECMO-Gruppe bei 37%, in der Kontrollgruppe bei 53% (p=0,03) der Patienten festgestellt.

Kritisiert wurde an der Studie, dass 22/90 Patienten zwar der ECMO-Gruppe zugeteilt wurden, letztendlich jedoch aufgrund rascher Besserung oder Tod keine ECMO erhielten. Zudem wurden die Patienten der Kontrollgruppe unstandardisiert in den teilnehmenden Kliniken behandelt, alle ECMO-Patienten aber nach Leicester verlegt, so dass ein Bias durch den Transfer in ein spezialisiertes Zentrum nicht auszuschließen ist.

Im Jahr 2009 wurden außerdem retrospektiv die Ergebnisse des ELSORegisters (Extracorporeal Life Support Organization) von 1986 bis 2006 publiziert [5]. Von 1473 Patienten mit akutem Lungenversagen, mittleres Alter 34 Jahre, überlebten 50% bis zur Entlassung. Weitere Fallserien aus spezialisierten Zentren zum Einsatz der ECMO bei schwerem ARDS finden sich in der Literatur [2, 11, 17, 20, 25].

Über klinische Resultate mit den neueren, miniaturisierten Systemen wurde bisher nicht in größerem Umfang berichtet. Kleinere klinische Studien zum Einsatz des PLS-Systems (Maquet Cardiopulmonary AG) finden sich in der Pädiatrie [13], als Bridging-Verfahren zur Lungentransplantation [14], im Einsatz bei kardiogenem Schock [7], bei akutem Lungenversagen [24] und als Transportsystem für Interhospitalverlegung [1].

Praktische Anwendung und Effektivität

Nach Implantation der Kanülen und Anschluss des Systems wird die extrakorporale Unterstützung langsam gestartet (z. B. initialer Blutfluss 1,5 l/min, Gasfluss 3 l/min). Je nach angestrebter Oxygenierung wird der Blutfluss gesteigert; eine vermehrte Kohlendioxidelimination kann durch Steigerung des Gasflusses in Grenzen erreicht werden. Nach Beginn der extrakorporalen Lungenunterstützung sind engmaschige Blutgasanalysen wichtig, da infolge der raschen Kohlendioxidelimination eine hypokapnische Alkalose auftreten kann. Eine rasche Absenkung des Atemminutenvolumens auf 50% des Ausgangswerts ist oft möglich und notwendig. In der Regel ist ein Blutfluss von mehr als 4,5 l/min nicht zu erzielen; der Gasfluss am Oxygenator wird auf maximal 12 l/min gestellt.

Der Sauerstofftransfer über das System hängt vom Blutfluss, der venösen Sauerstoffsättigung und der Hämoglobin (Hb)-Konzentration ab. Eigene



Messungen unter Verwendung des PLS-Systems ergaben einen Sauerstofftransfer über den Oxygenator zwischen 150 und 200 ml O₂ pro Minute [24]. Die Kohlendioxideliminationskapazität einer vv-ECMO kann mehr als zwei Drittel der endogenen Produktion betragen. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch das venovenöse extrakorporale System 50–80% des benötigten Gastransfers geleistet werden kann. Ein kompletter Lungenersatz ist durch eine venovenöse ECMO nicht möglich.

Abb. 4: Frühmobilisation mit ECMO, Doppellumenkanüle in V. jugularis interna

© Springer Medizin

Die Invasivität der mechanischen Beatmung ist nach Beginn der extrakorporalen Unterstützung rasch zu reduzieren. Eine retrospektive Auswertung der eigenen Patienten (n=140) ergab, dass im Median einen Tag nach ECMO-Beginn die FIO₂ von 1,0 auf 0,6, das Atemminutenvolumen von 12,0 l/min auf 5,3 l/min und das Tidalvolumen pro kg berechnetem Idealkörpergewicht („predicted body weight“) von 7,1 ml/kg auf 4,3 ml/kg reduziert worden war.

Eine extrakorporale Lungenunterstützung kann prinzipiell mit anderen Therapieverfahren wie Bauchlage, Stickstoffmonoxidinhalation und Hochfrequenz-Oszillationsventilation kombiniert werden. Nach Stabilisierung des Krankheitsbildes im Verlauf ist frühzeitig eine druckunterstützte Spontanatmung mit geringer Sedierung anzustreben. Möglicherweise bietet hier das NAVA-Verfahren („neurally adjusted ventilatory assist“) eine Option, um extrakorporale Perfusion und mechanische Ventilation zu verknüpfen [15]. Auch Patienten mit extrakorporaler Unterstützung sollten baldmöglichst mobilisiert werden, um der Entwicklung einer „Critical-illness“-Polyneuropathie vorzubeugen [32]. Dies wird durch die Verwendung einer Doppellumenkanüle in der V. jugularis interna wesentlich erleichtert (**Abb. 4**).

Mögliche Komplikationen durch extrakorporale Systeme sind vielfältig und potenziell lebensbedrohlich. Grundsätzlich kann man eine Einteilung nach mechanischen Problemen und nach patientenbezogenen Komplikationen, lokal oder systemisch, vornehmen (**Tab. 1**).

Tab. 1 Komplikationen extrakorporaler Lungenunterstützungssysteme	
Ursache	Komplikation
Vaskulär	<ul style="list-style-type: none"> - Blutung - Gefäßverletzung - Thrombose, Lungenembolie (venöse Kanülierung) - Ischämie, Kompartmentsyndrom (arterielle Kanülierung) - Infektion
Systemisch	<ul style="list-style-type: none"> - Hämolyse - Mikroembolisation - Thrombozytopenie - Vermehrte Blutungsneigung
Mechanisch	<ul style="list-style-type: none"> - Thromben im System - Luft im System - Diskonnektion - Kanülendislokation
Unklar	<ul style="list-style-type: none"> - Infektion des Oxygenators - Aktivierung der Gerinnungskaskade - Aktivierung der Inflammationskaskade - Vermehrtes Auftreten einer HIT-II (heparininduzierte Thrombozytopenie)

„Interventional Lung Assist“

Technik

Das „interventional lung assist“ (iLA, Novalung GmbH, Talheim, Deutschland), früher als pECLA („percutaneous extracorporeal lung assist“) bezeichnet, eignet sich vor allem zur Elimination von Kohlendioxid. Da das System ohne Pumpe arbeitet, stellt der arterielle Mitteldruck (MAP) die treibende Kraft für den Blutfluss durch das System dar. Das iLA stellt vom Prinzip her einen artifiziellen arteriovenösen Shunt mit zwischengeschaltetem Membranoxygenator dar (**Abb. 5**).

Meist werden als zuführendes Gefäß die A. femoralis und als abführendes Gefäß die V. femoralis gewählt. Die Größe der Kanülen ist so zu wählen, dass nach sonographischer Vermessung ein ausreichendes Restlumen für die Perfusion des Beines erhalten bleibt. Heute werden arteriell überwiegend 15-Fr.-, gelegentlich auch 13-Fr.- oder 17-Fr.-Kanülen verwendet, da sich gezeigt hat, dass mit dieser Kanülengröße ein ausreichender Blutfluss erzielt wird und die Komplikationsrate deutlich gesenkt werden kann. Die venöse Kanüle, die 2 Fr. größer ist, wird meist kontralateral implantiert.

Der Oxygenator weist eine Gasaustauschoberfläche von 1,3 m² auf und zeichnet sich durch einen sehr geringen Strömungswiderstand aus. Die Gasaustauschmembran ist ebenfalls aus Polymethylpenten gefertigt. Bei verhältnismäßig kleiner Gesamtfremdoberfläche und Beschichtung des gesamten Systems mit unfraktioniertem Heparin (Bioline Coating®, Novalung GmbH) ist eine systemische Antikoagulation mit einer Ziel-aPTT von 50 bis 60 Sekunden ausreichend. Als Austauschgas wird Sauerstoff mit einer Flussrate bis 12 l/min verwendet.

Voraussetzung für den Einsatz des iLA ist eine normale linksventrikuläre Pumpfunktion mit einem MAP von mindestens 70 mmHg. Bei Vorliegen einer Herzinsuffizienz, einer fortgeschrittenen PAVK, einer schweren Hypoxämie oder einer HIT-II ist die Anwendung des iLA kontraindiziert.

Klinische Anwendung

Erste Berichte über die klinische Anwendung des iLA wurden vor 10 Jahren publiziert [18, 27, 29]. Kasuistiken und kleinere Fallserien beschreiben die Anwendung des iLA bei Schädel-Hirn-Trauma [3], Status asthmaticus [8], als Bridging zur Lungentransplantation [9], im Weaning [34] und in Kombination mit Hochfrequenz-Oszillationsventilation bei schwerem ARDS [19]. Die größte retrospektive Fallserie zur Anwendung des iLA bei schwerem Lungenversagen wurde von Bein et al. publiziert [4]. Dabei wurden 90 Patienten ausgewertet. Bei schwerem ARDS (paO₂/FIO₂ 58 mmHg, paCO₂ 60 mmHg) und einem durchschnittlichen SOFA-Score von 11 Punkten überlebten 41,2% der Patienten. Durchschnittlich 50% des produzierten CO₂ wurden extrakorporal durch das iLA eliminiert, wodurch es zu einer hoch signifikanten Verminderung des paCO₂ und zu einer raschen Normalisierung des pH kam. Parallel konnte eine leichte Verbesserung des paO₂ gezeigt werden. Unter iLA war eine

signifikant protektivere Beatmung möglich.

In Konsequenz dieser Arbeit wurde eine multizentrische, randomisierte Studie (XtraVent-Studie) initiiert, in der iLA kombiniert mit einer ultraprotektiven Beatmung (Tidalvolumen 3 ml/kg berechnetes Idealkörpergewicht) verglichen wird mit einer konventionellen protektiven Beatmung (Tidalvolumen 6 ml/kg). Diese Ergebnisse müssen abgewartet werden, bevor eine definitive Bewertung des iLA-Systems möglich sein wird.



Abb. 5: Interventional Lung Assist (Novalung GmbH, Talheim)

© Springer Medizin

Effektivität und Bewertung

Die Indikation für den Einsatz des iLA besteht in der Therapie der respiratorischen Azidose, die durch herkömmliche Therapieverfahren nicht ausreichend beherrscht werden kann. In Abhängigkeit von Blutfluss und Gasfluss über das System sowie dem arteriellen paCO_2 werden bis zu 50% des produzierten Kohlendioxids entfernt [23]. Die Fähigkeit, Sauerstoff zu transferieren, ist begrenzt und erreicht allenfalls 10–15% des Sauerstoffgesamtverbrauchs. Damit stellt die schwere, lebensbedrohliche Hypoxämie eine Kontraindikation für den Einsatz des iLA dar; in diesem Fall ist eine ECMO indiziert. Der Anstieg des paO_2 , der oft nach Initiierung des iLA zu beobachten ist, bedeutet nicht notwendigerweise einen Anstieg des Sauerstofftransports zur Peripherie. Es darf hierbei nicht übersehen werden, dass ein Teil des Blutes durch das iLA geshuntet wird, und damit dem Organismus nicht zur Verfügung steht.

Infolge der extrakorporalen CO_2 -Elimination ist eine protektivere Beatmung möglich; ob hierdurch das Überleben verbessert wird, bleibt abzuwarten.

Der relevante Vorteil des Systems ist in seiner geringen Fremdoberfläche und der Transparenz eines Intensivpatienten unkompliziert möglich ist [37]. Als wesentlicher Nachteil ist eine potenzielle Verletzung der A. femoralis bei der Implantation zu nennen. Unter Beachtung der Kontraindikationen und bei Verwendung von 15-Fr.-Kanülen sind arterielle Komplikationen deutlich zurückgegangen und liegen nun unter 5% [36]. Nach Implantation ist die periphere Beinperfusion engmaschig zu überwachen, z. B. durch Dokumentation der Fußpulse und Pulsosymetrie.

Ausblick

Zukünftig werden Oxygenatoren und Pumpen weiter technisch optimiert und miniaturisiert werden. Es ist zu erwarten, dass je nach Indikation verschieden große Systeme zur Auswahl stehen werden. Nach weiterer Optimierung der Biokompatibilität werden extrakorporale Lungenunterstützungssysteme auch bei weniger schweren Formen des Lungenversagens wie „acute lung injury“ (ALI) oder exazerbierter COPD mit dem Ziel, einen ventilatorinduzierten Lungenschaden zu reduzieren, eingesetzt werden.

Fazit für die Praxis

Extrakorporale Lungenunterstützungssysteme sind beim Erwachsenen bei den schweren Formen eines akuten Lungenversagens indiziert, wenn der lebensnotwendige Gasaustausch nicht mehr oder nur durch aggressive Ventilation gewährleistet werden kann. Das pumpenlose iLA-System ist zur adjuvanten CO_2 -Elimination geeignet, während für eine relevante Unterstützung der Oxygenierung pumpengetriebene Systeme, bevorzugt im venovenösen Modus, angewendet werden.

Ein Interhospitaltransport ist ohne zusätzliche Gefährdung des Patienten möglich: Die Implantation der kompakten Systeme ist im externen Krankenhaus durch spezialisierte Teams möglich, falls ein Patient ohne extrakorporale Unterstützung nicht mehr transportfähig ist. Durch die Einführung von Doppellumenkanülen, die jugulär implantiert werden, können Patienten an ECMO frühzeitig mobilisiert werden.

Da durch extrakorporale Systeme potenziell lebensbedrohliche Komplikationen auftreten können, müssen alle konservativen Möglichkeiten in der Behandlung des ARDS optimal ausgeschöpft worden sein. Die Wahrscheinlichkeit des Überlebens wird nur dann steigen, wenn parallel die Aggressivität der mechanischen Ventilation reduziert und damit das Ausmaß der ventilatorinduzierten Lungenschädigung vermindert wird. In Einzelfällen werden extrakorporale Lungenunterstützungsverfahren bereits eingesetzt, um eine Intubation zu vermeiden.

Abkürzungen	
ALI	Acute lung injury
aPTT	Activated partial thromboplastin time
ARDS	Acute respiratory distress syndrome
CESAR	Conventional ventilation or ECMO for severe adult respiratory failure
COPD	Chronic obstructive pulmonary disease
ECMO	Extracorporeal membrane oxygenation
ELSO	Extracorporeal Life Support Organization
FIO ₂	Fraction of inspired oxygen
HFOV	Hochfrequenz-Oszillationsventilation
HIT II	Heparininduzierte Thrombozytopenie Typ II
iLA	Interventional Lung Assist
LIS	Lung injury score
MAP	Mean arterial pressure

NAVA	Neurally adjusted ventilatory assist
PAVK	Periphere arterielle Verschlusskrankheit
pECLA	Pumpless extracorporeal lung assist
PEEP	Positive end-expiratory pressure
PLS	Permanent life support
va	Venoarteriell
VILI	Ventilator-induced lung injury
w	Venovenös

Interessenkonflikt. Der korrespondierende Autor weist auf folgende Beziehungen hin: TM erhielt Vortragshonorare von der Firma Maquet Cardiopulmonary AG.

Literatur

1. Arlt M, Philipp A, Zimmermann M et al (2008) First experience with a new miniaturized life support system for mobile percutaneous cardiopulmonary bypass. *Resuscitation* 77:345–350
2. Beiderlinden M, Eikermann M, Boes T et al (2006) Treatment of severe acute respiratory distress syndrome: role of extracorporeal gas exchange. *Intensive Care Med* 32:1627–1631
3. Bein T, Scherer MN, Philipp A et al (2005) Pumpless extracorporeal lung assist (pECLA) in patients with acute respiratory distress syndrome and severe brain injury. *J Trauma* 58:1294–1297
4. 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
5. 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
6. Brun-Buisson C, Minelli C, Bertolini G et al (2004) Epidemiology and outcome of acute lung injury in European intensive care units. *Intensive Care Med* 30:51–61
7. Combes A, Leprince P, Luyt CE et al (2008) Outcomes and long-term quality-of-life of patients supported by extracorporeal membrane oxygenation for refractory cardiogenic shock. *Crit Care Med* 36:1404–1411
8. Elliot SC, Paramasivam K, Oram J et al (2007) Pumpless extracorporeal carbon dioxide removal for life-threatening asthma. *Crit Care Med* 35:945–948
9. Fischer F, Simon AR, Welte T et al (2006) Bridge to lung transplantation with the novel pumpless interventional lung assist device NovaLung. *J Thorac Cardiovasc Surg* 131:719–723
10. Gattinoni L, Pesenti A, Mascheroni D et al (1986) Low-frequency positive-pressure ventilation with extracorporeal CO₂ removal in severe acute respiratory failure. *JAMA* 256:881–886
11. Hemmila MR, Rowe SA, Boules TN et al (2004) Extracorporeal life support for severe acute respiratory distress syndrome in adults. *Ann Surg* 240:595–607
12. Hill JD, O'Brien TG, Murray JJ et al (1972) Prolonged extracorporeal oxygenation for acute post-traumatic respiratory failure (shock-lung syndrome). Use of the Bramson membrane lung. *N Engl J Med* 286:629–634
13. Horton S, Thuys C, Bennett M et al (2004) Experience with the Jostra Rotaflo and Quadrox D oxygenator for ECMO. *Perfusion* 19:17–23
14. Jackson A, Cropper J, Pye R et al (2008) Use of extracorporeal membrane oxygenation as a bridge to primary lung transplant: 3 consecutive, successful cases and a review of the literature. *J Heart Lung Transplant* 27:348–352
15. Karagiannidis C, Lubnow M, Philipp A et al (2010) Autoregulation of ventilation with neurally adjusted ventilatory assist on extracorporeal lung assist. *Intensive Care Med*, Aug 6, [epub ahead of print]
16. Kolla S, Awad SS, Rich BP et al (1997) Extracorporeal life support for 100 adult patients with severe respiratory failure. *Ann Surg* 226:544–566
17. Lewandowski K, Roissaint R, Pappert D et al (1997) High survival rate in 122 ARDS patients managed according to a clinical algorithm including extracorporeal membrane oxygenation. *Intensive Care Med* 23:819–835
18. Liebold A, Reng CM, Philipp A et al (2000) Pumpless extracorporeal lung assist – experience with the first 20 cases. *Eur J Cardiothorac Surg* 17:608–613
19. Lubnow M, Luchner A, Philipp A et al (2010) Combination of high frequency oscillatory ventilation and interventional lung assist in severe acute respiratory distress syndrome. *J Crit Care*, Jan 13 [epub ahead of print]
20. Mols G, Loop T, Geiger K et al (2000) Extracorporeal membrane oxygenation: a ten-year experience. *Am J Surg* 180:144–154
21. Morris AH, Fallace 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
22. Mortensen JD (1987) An intravenacaval blood gas exchange (IVCB-GE) device: a preliminary report. *Trans Am Soc Artif Intern Organs* 33:570–573
23. Müller T, Lubnow M, Philipp A et al (2009) Extracorporeal pumpless interventional lung assist in clinical practice: determinants of efficacy. *Eur Respir J* 33:551–558
24. Müller T, Philipp A, Luchner A et al (2009) A new miniaturized system for extracorporeal membrane oxygenation in adult respiratory failure. *Crit Care* 13:R205
25. Peek GJ, Moore HM, Moore N et al (1997) Extracorporeal membrane oxygenation for adult respiratory failure. *Chest* 112:759–764
26. 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
27. Philipp A, Behr R, Reng M et al (1998) Pumpless extracorporeal lung assist. *J Extra Corpor Technol* 30:38–41
28. Phua J, Badia JR, Adhikari NKJ et al (2009) Has mortality from acute respiratory distress syndrome decreased over time? A systematic review. *Am J Respir Crit Care Med* 179:220–227
29. Reng M, Philipp A, Kaiser M et al (2000) Pumpless extracorporeal lung assist and adult respiratory distress syndrome. *Lancet* 356:219–220
30. Rubenfeld GD, Caldwell E, Peabody E et al (2005) Incidence and outcomes of acute lung injury. *N Engl J Med* 353:1685–1693
31. Schuerer DJ, Kolovos NS, Boyd KV, Coopersmith CM (2008) Extracorporeal membrane oxygenation: current clinical practice, coding and reimbursement. *Chest* 134:179–184
32. Schweikert WD, Pohlmann MC, Pohlmann AS et al (2009) Early physical and occupational therapy in mechanically

