

A. Philipp, M. Arlt¹, M. Zimmermann¹,
M. Foltan, M. Gietl, T. Müller², T. Bein¹,
L. Rupprecht, M. Hilker, C. Schmid

Klinik für Herz-, Thorax- und
herznahe Gefäßchirurgie
(Direktor: Prof. Dr. Christof Schmid)

¹Klinik für Anästhesiologie
(Direktor: Prof. Dr. Kai Taeger)

²Klinik für Innere Medizin II
(Direktor: Prof. Dr. Günter Riegger)

Universitätsklinikum Regensburg

Interhospitaltransfer mit extrakorporalen Perfusionssystemen

ZUSAMMENFASSUNG

Die Prognose von Patienten im kardiopulmonalen Kreislaufversagen ist trotz Fortschritten in der Notfall- und Intensivmedizin nach wie vor eingeschränkt. Extrakorporale Herz- und/oder Lungenunterstützungssysteme werden heute zunehmend für die Überbrückung des Zeitraumes einer interventionellen Maßnahme bis hin zu einer möglichen Organerholung bzw. Transplantation respektiv als Rettungsmaßnahme bei kardiopulmonaler Reanimation eingesetzt. Wir sind in der Lage, mit dem von uns neu entwickelten transportablen miniaturisierten extrakorporalen Perfusionssystem Patienten im Kreislaufversagen ortsunabhängig zu stabilisieren und der weiteren diagnostischen und therapeutischen Behandlung zuzuführen, einschließlich eines dazu notwendigen Interhospitaltransports. Dadurch konnten wir eine signifikante Verbesserung der Prognose des jeweiligen Patienten erreichen. Unser miniaturisiertes System einer Herz-Lungen-Maschine ist inzwischen so leicht und kompakt, dass es von einer Person getragen und bedient werden kann und so bei Lufttransporten im Rettungshubschrauber einsetzbar ist.

Erste Erfahrungen am Universitätsklinikum Regensburg belegen, dass dieser Prototyp der „Mini-Herz-Lungen-Maschine“ bei der Versorgung von schwerstkranken Patienten mit isoliertem oder kombiniertem therapierefraktären Herz- und Lungenversagen lebensrettend sein kann. Kliniken, die nicht über diese hochspezialisierte Technologie und entsprechendes Fachpersonal mit speziellen Kenntnissen verfügen, können diese Patienten nur eingeschränkt behandeln. Die von uns entwickelten miniaturisierten extrakorporalen Behandlungsverfahren eröffnen dadurch die Möglichkeit des unterstützten Interhospitaltransfers an Kliniken und Einrichtungen der Maximalversorgung.

SCHLÜSSELWÖRTER

Interhospitaltransport, ECMO, ARDS, MECC, iLA, kardiogener Schock

SUMMARY

Patients with acute circulatory failure still have limited prognosis despite constantly expanding knowledge in the field of intensive care and rescue medicine. Extracorporeal heart and/or lung assist systems are used increasingly for bridging to organ recovery respectively transplantation or even as rescue technique in CPR. With our highly-developed mobile miniaturized extracorporeal perfusion system we have the ability to stabilize patients in circulatory failure or arrest even outside our institution. Once installed, transportation for diagnostic or therapeutic measures in the hospital and interhospital is possible. This brought us a significant improvement in the outcome for these particular patients. Our minimized heart-lung machine can be carried and operated by a single person on the ground and in airborne service without difficulty.

First experiences made in the university hospital Regensburg prove that this prototype of a “mini heart-lung machine” can be life-saving for patients with isolated or combined heart and lung failure. Hospitals lacking in highly skilled staff with this sophisticated technology can offer only limited spectrum of therapeutic possibilities. Our system now gives these critical ill patients a chance to reach a center of maximum medical care.

KEY WORDS

Interhospital transportation, ECMO, ARDS, iLA, cardiogenic shock

EINLEITUNG

Der Transport von Patienten mit schwerem kardialen Pumpversagen (kardiogenem Schock) infolge einer nicht erfolgreichen interventionellen Katheterbehandlung oder eines Myokardinfarkts in Zentren der kardiologischen/kardiologischen Maximalversorgung ist einerseits für das Überleben des Patienten oftmals eine unabdingbare Konsequenz, stellt aber andererseits eine Hochrisikomaßnahme dar [1]. Eine weitere Gruppe sind Patienten mit therapierefraktärem, akutem respiratorischen Versa-

gen (ARDS) aufgrund einer internistischen Grunderkrankung oder Polytraumatisierung [2]. Eine spezielle Gruppe stellen Militäranghörige dar, die infolge von Polytraumatisierung und konsekutivem Lungenversagen in Zentren hoher Versorgungsstufe transferiert werden müssen [3, 4]. Der Transport dieser Patienten zur Weiterbehandlung in entsprechende Zentren ist jedoch nur mit extrakorporalen Unterstützungsverfahren sicher möglich. Zur Risikominimierung in dieser instabilen Transportphase bieten sich extrakorporale Perfusionssysteme an [5]. Der Anschluss erfolgt je nach Indikation (Lungenversagen isoliert bzw. kombiniertes kardiopulmonales Versagen) als veno-venöses, arterio-venöses oder veno-arterielles extrakorporales Bypassverfahren. Ob nun der Transport innerhalb eines weitläufigen Klinikumkomplexes von der einen zur anderen Fachabteilung stattfindet oder in örtlich getrennte Institutionen erfolgt, ist nachrangig. Die logistischen und sicherheitsrelevanten Parameter sind hierbei gleich [6].

EXTRAKORPORALE PERFUSIONSSYSTEME

Grundsätzlich stehen drei Systemoptionen für den extrakorporalen Gasaustausch zur Verfügung. Die zugrunde liegende Erkrankung (Organversagen) definiert das adäquate Perfusionssystem. Integraler Bestandteil dieser Systeme ist ein extrakorporales Gasaustauschmodul (Oxygenator). Nach heutigem Stand der Technik ist dies ein Diffusionsmembranoxygenator mit einer antithrombotischen Beschichtung (Heparinbeschichtung).

I) iLA bzw. PECLA

iLA bzw. PECLA ist ein extrakorporales Gasaustauschverfahren, das von einer interdisziplinären Arbeitsgruppe der Herz-, Thorax- und herznahen Gefäßchirurgie Regensburg 1996 entwickelt wurde [7]. Pumpless Extracorporeal Lung Assist (PECLA) oder auch iLA genannt (interventional lung assist) ist ein arterio-venöses Bypassverfahren, bei dem der Blut-



Abb. 1: Patient mit Varizellensepsis. Externe Implantation einer PECLA mit anschließendem Interhospitaltransport. Femoro-femorale Anschluss einer pumpenlosen extrakorporalen Lungenunterstützung (A. femoralis com. und V. femoralis).

druck (MAP) des Patienten Antrieb für die Blutströmung durch einen Oxygenator ist. Der Anschluss an die Arteria und V. femoralis erfolgt üblicherweise perkutan in Seldinger-Technik (Abb. 1). Für dieses Verfahren eignen sich ausschließlich Patienten mit ausreichendem Blutdruck und suffizientem Herzzeitvolumen (HZV), da für dieses Verfahren das Herz als „Antrieb“ fungiert.

Grundvoraussetzung für die Funktionalität dieses Systems ist ein Gasaustauschmodul mit einem sehr geringen Strömungswiderstand (dpMO), der dem Blutstrom entgegen wirkt. Die A. femoralis muss einen ausreichenden Durchmesser für eine 15- bzw. 17-French-Kanüle bieten, damit nach Einbringen der Kanüle ischämische Komplikationen an der punktierten Extremität ausgeschlossen werden können. Primär kommt dieses Verfahren bei Gasaustauschstörungen, betreffend einer unzureichenden Elimination des CO₂ aus dem Blut, zur Anwendung. Aus physikalischen Gegebenheiten ist die Möglichkeit, Sauerstoff in suffizienter Weise zu transferieren, aufgrund des geringen Blutdurchflusses limitiert [$O_2\text{-Transfer} = (O_2\text{-Content nach MO} - O_2\text{-Content vor MO}) \times \text{Blutdurchfluss}$]. Das Verfahren ist nicht geeignet, eine schwere Hypoxämie zu kompensieren. Jede Veränderung des Blutdurchflusses als Folge von Schwankungen des MAP führt unmittelbar zur Veränderung des O₂-Angebotes und der

CO₂-Elimination. Bevorzugte Indikation der PECLA/iLA ist die therapierefraktäre respiratorische Azidose. Diese kann mit Blutflussraten von 1,0 bis 2,0 L/min durch eine extrakorporale CO₂-Elimination beherrscht werden [8].

II) ECMO

ECMO ist ein veno-venöses extrakorporales Bypassverfahren, das bei einem schweren respiratorischen Versagen zum Einsatz kommt. Die Ursache hierfür kann ein Acute Respiratory Distress Syndrome (ARDS) sein, z. B. basierend auf einer Pneumonie. Die kardiale Pumpfunktion ist dabei nicht wesentlich beeinträchtigt. Mittels extrakorporaler Lungenunterstützung wird der Gasaustausch sichergestellt und somit eine kritische Hypoxämie bzw. Hyperkapnie vermieden. Zudem ist unter extrakorporalem Gasaustausch eine lungenprotektive Beatmungsstrategie möglich. Die ECMO ermöglicht somit eine Beatmung mit niedrigen inspiratorischen Drücken und einer signifikant reduzierten inspiratorischen Sauerstoffkonzentration. Die CO₂-Elimination und die Oxygenation werden dabei größtenteils durch den extrakorporalen Gasaustausch sichergestellt. Die durch eine Zentrifugalpumpe geförderte Blutflussrate liegt im Bereich von 2 bis 4 L/min. Die Kanülierung erfolgt zu meist perkutan in Seldinger-Technik über die V. femoralis (Blutentnahme) und die Rückführung über die V. jugularis interna bzw. V. subclavia.

III) Extracorporeal Life Support (ECLS)

Extracorporeal Life Support (ECLS) ist ein veno-arterielles Bypassverfahren für kardiopulmonale Notfallsituationen. Der Ort für die Systemimplantation kann hier eine Intensivstation, ein Herzkatheterlabor oder die Notaufnahme sein [9]. Die Indikation basiert vorrangig auf einem akuten Kreislaufversagen (Reanimation), einer schweren Kreislaufdepression während oder nach Intervention am Koronarsystem oder einem Postkardiotomie-Syndrom nach herzchirurgischen Eingriffen. Die Kanülierung erfolgt hierbei perkutan in Seldinger-Technik über die V. femoralis (Blutentnahme) und die Blutrückführung über die A. femoralis communis.

Die notfallmäßige perkutane Kanülierung der A. femoralis ist mit einem hohen Risiko einer Ischämie an der kanülierten Extremität behaftet, so dass hier im Einzelfall, nach Stabilisierung der Kreislauffunktion, eine Umkanülierung auf die A. sub-

clavia notwendig wird. Dies erfordert eine chirurgische Intervention. Ein weiterer Grund, der zu einer arteriellen Umkanülierung von der A. femoralis zur A. subclavia zwingt, ist ein hohes Shuntvolumen durch die Lungenstrombahn. Die Ursache hierfür ist eine Inhomogenität des Ventilations-Perfusions-Verhältnisses bei einem schweren Lungenversagen. Damit verbunden ist ein kritisch tiefer PaO₂ in der Aorta ascendens und den hirnersorgenden Arterien. Mitverantwortlich ist eine distale Mischung der antegraden mit der retrograden (extrakorporalen) Blutströmung in der Aorta. Werden in der rechten A. radialis hypoxämische PaO₂-Werte (z. B. < 60 mmHg) gemessen, ist ebenfalls von einer kritischen kardialen und zerebralen Hypoxämie auszugehen. Dies zwingt zu der obengenannten Umkanülierung.

Miniaturisiertes kardiopulmonales Bypass-System

Für die Akuttherapie und den Transport von Patienten mit schwerem, therapierefraktärem kardiopulmonalem Versagen wurde von uns ein mobil einsetzbares extrakorporales Unterstützungssystem entwickelt (Emergency-MECC). Dies basiert auf dem MECC-System von Maquet und ist effektiv und sicher während der Transporte



Abb. 2a: Emergency-MECC-Komponenten: Pumpensteuerung mit Trageeinrichtung, Multifunktionshalter und steriles Schlauchsystem



Abb. 2b: Komponenten des Emergency-MECC-Systems, befestigt an einer Standard-Patiententrage

mit dem Hubschrauber oder dem Intensiv-Transport-Wagen (ITW) einsetzbar. Eine der Komponenten des Systems ist ein Multifunktionshalter (Abb. 2a, 2b), der einen Oxygenator beinhaltet, des Weiteren einen Rotaflow-Pumpenantrieb und eine Zwei-Liter-O₂-Gasflasche mit einem Regelventil FM 41L 0–15 L/min (Dräger, Lübeck) zur Gasversorgung des Oxygenators. Das Gewicht des bestückten Multifunktionshalters liegt bei ca. 11 kg. Die zweite Komponente ist eine Trageplatte mit Gurtaufhängung für die Pumpensteuerung (16 kg). Das komplette System kann von einer Person getragen und sowohl im Hubschrauber als auch im ITW an jeder Standardtrage sicher befestigt werden.

METHODE

Transportteam

Das Transportteam besteht aus einem im Fachgebiet der Herzchirurgie erfahrenen Facharzt für Anästhesiologie, einem Kardiotechniker und bedarfsweise einem Herzchirurgen. Während des luft- oder bodengebundenen Transports ist ein Rettungsassistent mit an Bord. Versicherungsschutz besteht für uns dadurch, dass diese Art der Einsätze am Universitätsklinikum Regensburg zur Dienstaufgabe des Kardiotechnikers gehört. Das Transportteam ist jederzeit nach Anfrage innerhalb von 20 bis 40 Minuten einsatzbereit. Als Transportmittel stehen uns ein Rettungshubschrauber vom Muster Messerschmitt-Bölkow-Blohm BK-117 „Christoph-Regensburg“ des Team-DRF-Luftrettungszentrums Regensburg oder ein Intensiv-Transport-Wagen (ITW) zur Verfügung.

Material

Für den Transport eines Patienten kommen an unserem Zentrum der iLA-Membranventilator (Novalung, Hechingen) und das für den 14-tägigen Einsatz zugelassene „Permanent Life Support Set (PLS)“ (Maquet Cardiopulmonary, Hirrlingen) zum Einsatz. Beide Systeme sind komplett heparinbeschichtet (Bioline Coating, Maquet Cardiopulmonary). Am PLS-Set wurde folgende Modifikation vorgenommen. Nach Abschluss des sog. „Primevorganges“ wurden die beiden Luer-Konnektoren vor der Zentrifugalpumpe (Rotaflowpumpe) entfernt (Abb. 3). Damit kann sichergestellt werden, dass sich im Unterdruckbereich des extrakorporalen Kreislaufs keine potenziellen Lufteintrittspforten befinden. Das Füllvolumen für das iLA-System liegt bei ca. 300 ml und bei dem PLS-Set bei ca. 600 ml. Beim PLS-Set verfügt die Drain-

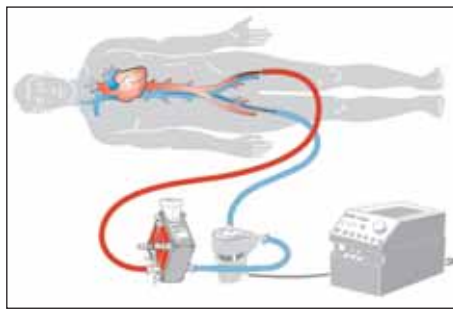


Abb. 3: Das im Emergency-MECC-System verwendete PLS-Set besteht aus den Komponenten Gasaustauscher und Zentrifugalpumpe mit vorkonnectiertem Leitungssystem. Der Unterstützungsmodus ECLS bzw. ECMO definiert sich nur aus dem unterschiedlichen Gefäßzugang. Das Perfusionsset ist dabei identisch.

nagekanüle prinzipiell über keinen Luer-Konnektor. Sämtliches Material für einen externen perkutanen Anschluss einer extrakorporalen Zirkulation, von Abdecktüchern bis zum Kanülierungsset, wird von uns in einer „Zargesbox 60 x 40 x 35“ mitgeführt.

Kanülierung

Die Kanülierung beim iLA-Verfahren erfolgt mit 15- oder 17-French-Kanülen (NovaPort, Novalung, Hechingen) in der A. femoralis und mit 17 bzw. 19 French in der V. femoralis. Bei den Patienten mit einer ECMO (veno-venöse Kanülierung) bzw. einem ECLS-System (veno-arterielle Kanülierung) wurde zur venösen Drainage eine 23-French-Kanüle (femoral cannulae polyurethane BFV 900-312, Sorin Group, München) eingebracht. Bei den ECMO-Patienten wird das Blut über eine 17- oder 19-French-NovaPort-Kanüle in die V. jugularis interna bzw. V. subclavia rechts zurückgeführt. Bei Patienten mit einem ECLS erfolgt die Blutrückführung ausnahmslos in die A. femoralis communis mit einer 17- bzw. 19-French-NovaPort-Kanüle. Die perkutane Kanülierung erfolgt in Seldinger-Technik. Nach Platzierung des Führungsdrahtes wird mittels abgestufter Dilatoren eine an den Durchmesser der verwendeten Kanüle angepasste Aufdehnung des Gefäßzugangs geschaffen (Spezial-Dilatatorensatz, Joline, Hechingen) (Tab. 1).

Patienten

In 41 Fällen wurde parallel zum Interhospitaltransport die Klinik für Herz-, Thorax-

undherznaheGefäßchirurgiefürdenEinsatz eines extrakorporalen Unterstützungssystems von externen Kliniken angefordert. Bei vier Patienten wurde vor Ort durch das Transportteam entschieden, dass sie ohne extrakorporales Unterstützungssystem transportfähig waren. Bei 6 Patienten wurde ein iLA-System vor Ort implantiert und diese Patienten im anfordernden Krankenhaus belassen. In einem Fall wurde auf die Implantation eines extrakorporalen Unterstützungssystems wegen infauster Prognose verzichtet.

Eine Patientin wurde bei Eintreffen des Transportteams bereits ca. 45 Minuten reanimiert, sodass bei unklarer zerebraler Prognose keine Indikation für ein extrakorporales Unterstützungssystem vorlag. Ein Patient (Polytrauma) konnte unter laufender Reanimation problemlos perkutan kanüliert werden. Bei Aufnahme der extrakorporalen Zirkulation kam es zu einem massiven Blutverlust über den Tubus, sodass es nicht möglich war, einen adäquaten Kreislauf zu etablieren. Der Patient verstarb im therapierefraktären hämorrhagischen Schock. Bei einem weiteren Patienten war es technisch nicht möglich, eine perkutane arterio-femorale Kanülierung vorzunehmen. Dieser wurde ohne System transportiert und bei Ankunft unverzüglich, durch chirurgisches Freilegen der Gefäße, an ein ECLS-System (V. femoralis > A. subclavia) angeschlossen.

Bei insgesamt 35 Patienten wurde im externen Krankenhaus ein extrakorporales Unterstützungssystem angeschlossen und bei 28 Patienten ein nachfolgender Interhospitaltransfer durchgeführt.

Patientenmanagement und Transport

Im Verlauf wurde mit dem Krankenhaus, in dem sich der Patient befand, ein telefonisches Arzt-Arzt-Gespräch zur Evaluierung geführt. Dieses erfolgte nach einer vorgegebenen Checkliste. Im Anschluss daran erfolgten durch die behandelnden Kollegen bestimmte Maßnahmen wie z. B. die Bereitstellung von zwei Blutkonserven und die sonographische Bestimmung des Femoralgefäßquerschnittes. Nach Eintreffen des Transportteams wurde ein Assessment durchgeführt und festgelegt, welches Assist-Device (ECMO, ECLS oder iLA)

	iLA/PECLA	ECLS	ECMO
Anschlussgefäße	A. femoralis V. femoralis	A. femoralis V. femoralis	V. femoralis V. jugularis
Blutströmung	A. fem. → V. fem.	V. fem. → A. fem.	V. fem. → V. jug.

Tab. 1: Die zu kanülierenden Gefäße für das jeweils gewählte Unterstützungsverfahren, Richtung der Blutströmung

Diagnosen	iLA/PECLA	ECLS	ECMO
ARDS post Trauma	8		
ARDS	3		1
Pneumonie	5		
Prä Lungentransplantation	2		2
Kardiogener Schock		5	
Septischer Schock		2	

Tab. 2: Anzahl der Patienten mit Interhospitaltransfer, Diagnose bei Systemimplantation, extrakorporales Unterstützungsverfahren iLA/PECLA, ECLS und ECMO

für den Patienten am besten geeignet ist (Tab. 2). Die Indikation zur extrakorporalen Lungen- bzw. Herz- und Lungenunterstützung ergab sich einerseits aus einem insuffizienten pulmonalen Gasaustausch (Hypoxämie/Hyperkapnie) unter forcierter maschineller Beatmung und andererseits aus einem therapierefraktären, schweren kardialen Pumpversagen.

Nachdem der Primevorgang des Systems abgeschlossen und das Unterstützungssystem somit einsatzbereit war, wurde vom Transportarzt und dem Kardiotechniker die perkutane Kanülierung vorgenommen. Unmittelbar vor perkutaner Kanülierung fand üblicherweise eine Applizierung von 5.000 IE Heparin statt. Bei Patienten mit bestehender Gerinnungsstörung wurde auf diese Bolusgabe von Heparin verzichtet. Nach Anschluss des extrakorporalen Gasaustauschsystems verbesserten sich die Hämodynamik und der Blutgasstatus zusehends. Die Invasivität der maschinellen Beatmung sowie die Dosierung der Katecholamine (Adrenalin und Noradrenalin) konnten zügig reduziert werden. Nach einer kurzen Stabilisierungsphase wurde der Patient auf eine Standard-Patienten-trage umgelagert und boden- bzw. luftgebunden der Interhospitaltransport durchgeführt. Das Patientenmonitoring entsprach dem Standard eines Intensivtransports. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die kontinuierliche Pulsoxymetrie zu richten. Während des Transports wurde die Gasversorgung des Membranoxygenators aus der Bordversorgung des ITW bzw. Helikopters sichergestellt (Tab. 3).

Gruppe	N	Alter [Jahre]	Geschlecht m/w	KOF	Transportdistanz [km]	Transport Helikopter / ITW
iLA/PECLA	18	36 ± 15	15/3	1,8 ± 0,2	201 ± 166	13/5
ECLS	7 (8*)	53 ± 11	6/1	2,1 ± 0,3	81 ± 23	6/1
ECMO	3	31 ± 8	1/2	1,7 ± 0,4	294 ± 170	2/1

Tab. 3: Patientenanzahl (n) (ein Patient* verstarb unmittelbar nach Systemanschluss), Alter, Geschlecht, Körperoberfläche, mittlere Transportdistanz zwischen abgebendem und aufnehmendem Krankenhaus, 21 Patienten wurden mit dem Helikopter und 7 Patienten mit dem ITW transportiert.

Bei fünf Patienten wurden unmittelbar nach der Ankunft im Zielkrankenhaus diagnostische Maßnahmen wie ein CT oder ein Herzkatheter vorgenommen. Bei zwei wurde eine sofortige Koronarrevaskularisierung durchgeführt. Dabei wurde das transportable EKZ-System zur Durchführung der Bypassoperation belassen. Die Mehrzahl der Patienten (21 Patienten) wurden zur kardiopulmonalen Stabilisierung auf die entsprechende Intensivstation verlegt (Innere Medizin, Anästhesiologie oder Herz-, Thoraxchirurgie). Patienten mit extrakorporalem Gasaustauschverfahren können im Klinikum der Universität Regensburg auf allen Intensivstationen behandelt werden, da eine interdisziplinäre Arbeitsgruppe „Extrakorporale Perfusion“ die Patienten mit betreut.

Antikoagulation

Bei Patienten mit besonderen Blutungsrisiken (SHT, schweres Polytrauma, postoperativ) wurde im Einzelfall in der Anfangsphase der extrakorporalen Unterstützung, bis ca. 24 Stunden, auf jegliche Antikoagulation verzichtet. Die systemische Antikoagulation erfolgte mittels Heparinperfusor. Die Heparinwirkung wurde ausschließlich über die aktivierte partielle Thromboplastinzeit (PTT) gemessen [10]. Unabhängig vom eingesetzten Unterstützungssystem wurde als Zielwert für die PTT eine Verlängerung um das 1,5- bis 2fache des Normalwertes angestrebt. Additiv wurde bei den Patienten ohne besonderes Blutungsrisiko jeden zweiten Behandlungstag 50 bis 100 mg Acetylsalicylsäure (Aspirin) i. v. appliziert mit dem Ziel,

die Gasaustauschleistung des Membranoxygenators durch Thrombozytenaggregationshemmung über die Zeit zu gewährleisten. Die Thrombozytenaggregationshemmung wurde mittels Aggregometrie kontrolliert [11]. Einmal täglich erfolgte eine komplette Gerinnungsanalyse mit Bestimmung von Quick, PTT, Thrombinzeit, Fibrinogen, D-Dimer und Antithrombin. Die PTT wurde routinemäßig dreimal täglich bestimmt.

Weaning vom extrakorporalen Unterstützungssystem

Es bestehen standardisierte Weaning-Prozeduren für die iLA/PECLA, ECMO und die ECLS.

iLA/PECLA: Diese Patientengruppe musste über 24 Stunden stabile Verhältnisse im Gasaustausch aufweisen, d. h. $FiO_2 < 0,45$ bei einem $PaO_2 > 80$ mmHg und einem $PaCO_2 < 40$ mmHg. Dabei ist der Gasflow zum Membranventilator auf 1,0 bis 2,0 L/min zu reduzieren.

ECMO: Für diese Patienten gelten dieselben Kriterien der Respiratoreinstellung und des BGA-Status wie für die iLA/PECLA-Gruppe. Der extrakorporale Pumpenfluss ist jedoch auf 1,0 bis 1,5 L/min zu reduzieren.

ECLS: Patienten, die mit einem ECLS-System unterstützt wurden, hatten primär eine schwerst eingeschränkte myokardiale Pumpfunktion und weniger eine pulmonale Gasaustauschstörung. Daraus resultiert die Tatsache, dass ein Weaning erst sinnvoll wurde, nachdem die Patienten nahezu katecholaminfrei waren. Ein weiterer Marker für ein erfolgreiches Weaning war eine echokardiographische Verlaufskontrolle, in der eine suffiziente biventrikuläre Pumpfunktion des Herzens nachweisbar war. Zu Beginn des Entwöhnungsversuchs sollten die Laborparameter Laktat, LDH, GOT, CK und die Herzenzyme (Tropoin I, CK-MB) im Normbereich liegen. Die Reduktion des Pumpenflusses von z. B. 4,0 L/min auf 1,0 L/min kann sich dabei durchaus über einen Zeitraum von 24 bis 48 Stunden erstrecken.

Nach erfolgreichem Weaning gilt für den Systemausbau in allen drei Patientengruppen, dass die perkutan eingebrachten Kanülen gezogen und die Punktionsstelle nach einer ca. 10-minütigen manuellen Kompression mittels Safeguard Pressure Assist Dressing (Datascope, Bensheim) versorgt werden.

Komplikationen

Während des Transportes kam es zu keiner Funktionsstörung des eingesetzten extra-

korporalen Perfusionssystem, obwohl die mechanischen Beanspruchungen (Vibration) in der Start- und Landephase beträchtlich waren. Bei einem Interhospitaltransfer über die Distanz von 350 km musste akut auf einem Flugplatz der Heeresflieger zwischengelandet werden, da der mitgeführte O₂-Vorrat unzureichend war. Beim Entladen eines Patienten mit einem iLA/PECLA-System knickte die rückführende Schlauchleitung zur V. femoralis kurzzeitig, sodass eine partielle Thrombosierung des Membranoxygenators die Folge war. Das Gasaustauschmodul musste ersetzt werden, da sich der Blutdurchfluss auf ca. 0,5 L/min reduzierte und das System dadurch insuffizient wurde. Während eines luftgebundenen Interhospitaltransfers kam es bei dem eingesetzten Beatmungsgerät zu einem Autostart, sodass die mechanische Ventilation kurzzeitig unterbrochen war. Dank des suffizienten extrakorporalen Gasaustauschs über das eingesetzte System war diese Komplikation für den Patienten folgenlos.

Zwei Patienten der ECLS-Patientengruppe mit femoro-femorale Kanülierung entwickelten im frühen Verlauf an abhängigen Partien der kanülierten Extremität ein Kompartment-Syndrom, sodass eine Umkanülierung von der A. femoralis zur A. subclavia rechts vorgenommen werden musste. Bei einem weiteren Patienten wurde bei nicht eindeutig tastbarem Puls (A. dorsalis pedis) 6 Stunden nach Kanülienanlage prophylaktisch von der A. femoralis in die A. subclavia umkanüliert.

Eine Patientin mit ECMO entwickelte am sechsten Unterstützungstag eine heparininduzierte Thrombozytopenie Typ II (HIT-II) mit thrombotischen Auflagerungen im Pumpenkopf des verwendeten Systems. Dieser Pumpenkopf wurde ausgetauscht und die Antikoagulation auf Argatroban (Argatra, Mitsubishi Pharma Europe, London) umgestellt. Die Gasaustauschleistung des Oxygenators war währenddessen nicht beeinträchtigt, sodass auf dessen Austausch verzichtet wurde.

ERGEBNISSE

Im Zeitraum Juli 2001 bis August 2007 wurden 35 Patienten in externen Kliniken durch das für den Interhospitaltransfer eingesetzte Transportteam an ein extrakorporales Gasaustauschsystem angeschlossen. Nach der Evaluierung vor Ort wurden 18 Patienten mit einer iLA/PECLA, acht mit einem ECLS-System und vier mit einer ECMO versorgt. Sieben Patienten wurden nach Systemimplantation nicht verlegt

(6 mit PECLA und ein ECMO-Patient), sie wurden im anfordernden Krankenhaus am System weiterbehandelt. Ein Patient verstarb trotz Systemanlage unmittelbar. Bei 28 Patienten wurde anschließend der Interhospitaltransport durchgeführt. Von diesen wurden 20 Patienten (71,4 %) vom extrakorporalen Gasaustauschsystem erfolgreich entwöhnt. Im weiteren stationären Verlauf verstarben vier Patienten. Aus dem Krankenhaus konnten 16 Patienten (57 %) entlassen werden (Tab. 4).

Gruppe	N	Unterstützungszeit [Tage]	Entwöhnt [N]	Aus KH entlassen [N]
iLA/PECLA	18	5,1 ± 3,0	12	9
ECLS	7	3,5 ± 2,9	5	4
ECMO	3	8,2 ± 4,1	3	3

Tab. 4: Eingesetzte Unterstützungssysteme, Anzahl der transportierten Patienten, Unterstützungsdauer, vom System entwöhnt, aus dem Krankenhaus (KH) entlassen

iLA/PECLA-Gruppe

In der iLA/PECLA-Gruppe wurde vor Implantation eine PaO₂/FiO₂-Ratio von 55 ± 5 und ein PaCO₂ von 70 ± 10 mmHg errechnet. Nach einer mittleren Unterstützungsdauer von fünf Tagen (0–12) konnten 12 von 18 Patienten erfolgreich entwöhnt werden. Sechs Patienten verstarben am System. Neun von 18 Patienten wurden ohne pulmonale Einschränkung aus dem Krankenhaus entlassen (50 %).

ECLS-Gruppe

In der ECLS-Gruppe wurde bei fünf Patienten ein Myokardinfarkt mit kardiogenem Schock diagnostiziert. Eine Patientin entwickelte nach einem neurochirurgischen Eingriff ein schweres ARDS mit myokardialem Pumpversagen. Ein Patient entwickelte aufgrund einer Gallenblasenperforation trotz chirurgischer Versorgung ein septisches Kreislaufversagen.

Vor Implantation des veno-arteriellen Bypasses war zur Kreislaufstabilisierung eine Noradrenalin-Dosierung von 7,6 ± 4,7 mg/h erforderlich. Zwei Stunden nach Systemimplantation konnte die Dosierung auf 1,9 ± 1,1 mg/h reduziert werden. Der mittlere Pumpenfluss während des Transportes lag bei 3,0 ± 0,5 L/min.

Bei zwei Patienten wurde unmittelbar nach Verlegung in die Zielklinik eine Koronarrevaskularisierung durchgeführt. In der mit dem ECLS-Verfahren unterstützten Patientengruppe verstarben drei Patienten. Aus der Myokardinfarktgruppe verstarben zwei Patienten am System. Der Patient mit der Diagnose des septischen Kreislaufversagens verstarb 8 Tage nach Weaning vom

ECLS-System an den Folgen seiner chirurgisch nicht sanierbaren Vier-Quadranten-Peritonitis. Vier Patienten konnten nach veno-arterieller Unterstützung aus dem Krankenhaus entlassen werden.

ECMO-Gruppe

In der ECMO-Gruppe wurde bei zwei Patienten ein terminales Lungenversagen diagnostiziert, und die Indikation zum Systemeinbau war somit „bridge to transplant“. Ein weiterer Patient hatte ein schweres

ARDS unklarer Genese. Die Patienten mit terminalem Lungenversagen wurden in der Zielklinik am System einer erfolgreichen Lungentransplantation zugeführt. Der Patient mit schwerem ARDS konnte in der Zielklinik von der ECMO entwöhnt werden und wurde drei Tage nach Weaning extubiert. Ein Patient mit schwerstem Polytrauma verstarb in der abgehenden Klinik im Multiorganversagen an der ECMO.

DISKUSSION

Der Interhospitaltransfer von Patienten unter Einsatz von extrakorporalen Perfusionssystemen ist kein neues Verfahren. In den zurückliegenden Jahren wurden einzelne Fallberichte in den einschlägigen Journalen beschrieben [13, 14]. Eine Arbeitsgruppe um David S. Foley und H. Bartlett berichtet im ASAIO Journal 2002 über 100 Patienten „Transported on Extracorporeal Life Support“. Ein generelles Problem ist in vielen Publikationen der erhebliche logistische, apparative und personelle Aufwand. Von herausragender Bedeutung für einen erfolgreichen Interhospitaltransfer mit extrakorporalem Equipment ist die komplikationsfreie Anlage und Führung der eingesetzten extrakorporalen Zirkulation. Im Beitrag von Foley wird über eine systemassoziierte Komplikationsrate von 17 % berichtet. Die perkutane arterielle Kanülierung ist in einem Krankenhaus ohne chirurgisches Stand-by mit einem nicht zu vernachlässigenden Risiko behaftet. Die veno-venöse Kanülierung beim ECMO-Verfahren ist möglicherweise risikoärmer als die veno-arterielle Kanülierung beim ECLS-Verfahren.

Unser Entwicklungsansatz für ein transportables extrakorporales Perfusionssystem bestand darin, dass wir uns auf das Wesentliche konzentrierten. Dies hat zur Folge, primär nur ein Gasaustauschmodul und eine Blutpumpe einzusetzen. Wir entwickelten – in Anlehnung an das bei uns routinemäßig eingesetzte MECC-System und die daraus gewonnenen Erfahrungen [15] bei in- zwischen mehr als 1.600 aortokoronaren Bypassoperationen – ein effektives und für uns sicher einsetzbares transportables Perfusionssystem. Die Qualifikation und Erfahrung des eingespielten Transportteams spielt neben dem technischen Equipment eine herausragende Rolle. Es ist nicht nur Erfahrung in der perkutanen Kanülierungstechnik erforderlich, sondern für die erfolgreiche Einsatzdurchführung ist auch ein sicherer Umgang mit miniaturisierten Perfusionssystemen zwingend erforderlich.

Der Einsatz von extrakorporalen Gasaustauschsystemen findet normalerweise innerhalb stationärer Einrichtungen statt, d. h., die Patienten befinden sich entweder im OP oder auf der Intensivstation. Hierbei ist der innerklinische Transport von Patienten mit extrakorporalen Gasaustauschsystemen für diagnostische Maßnahmen wie z. B. CT oder Herzkatheterlabor bisher die Ausnahme. Der Interhospitaltransfer an den komplexen konventionellen extrakorporalen Perfusionssystemen ist aufgrund der Größe und des Gewichts der verfügbaren Systeme nur eingeschränkt und mit erheblichem Risiko sowie technischem und personellem Aufwand möglich [16].

Es entspricht einer physikalischen Gegebenheit, dass die Gasaustauschleistung von Oxygenatoren mit dem Abfall des atmosphärischen Druckes abnimmt, d. h., der Betrieb in großer Höhe ist mit einer reduzierten O₂-Transferrate verbunden. Bei den von uns versorgten Patienten war die Effizienz der verwendeten Diffusionsmembranoxxygenatoren (iLA-Membranventilator und PLS) während des Fluges nur marginal reduziert. Unsere Flugbewegungen lagen durchweg unter 5.000 Feet (1.524 Meter), somit hatte der geringere atmosphärische Druck kaum Auswirkungen auf den Wirkungsgrad des O₂-Transfers [17]. Bei einer Flughöhe von z. B. 2.300 Meter (6.900 Feet) hat der eingesetzte Oxygenator (ventiliert mit FiO₂ 1,0) die gleiche Leistung wie auf Meereshöhe bei einem FiO₂ von 0,8. Wir beobachteten während des Fluges einen Sättigungsabfall des Pulsometers um 3 bis 4 %.

Im luftgebundenen Interhospitaltransfer wirken Beschleunigungs- und Verzö-

gerungskräfte sowohl auf den Patienten als auch auf das eingesetzte extrakorporale Perfusionssystem. Dadurch ausgelöste Blutvolumenverschiebungen im Patienten bzw. im Perfusionssystem und damit verbundene Probleme mit dem venösen Rückfluss während Start- und Landungsphasen wurden nicht beobachtet. Dies lässt sich damit erklären, dass beim Helikopter die Flugmanöver in der Start- und Landephase typischerweise horizontal statt vertikal ablaufen.

LITERATUR

- [1] Mair P, Hoermann C, Moertl M, Bonatti J, Falbesoner C, Balogh D: Percutaneous venoarterial extracorporeal membrane oxygenation for emergency mechanical circulatory support. *Resuscitation* 1996; 33: 29–34
- [2] Roissant R, Pappert D, Gerlach H, Lewandowski K, Keh D, Falke K: Extracorporeal membrane oxygenation for transport of hypoxaemic patients with severe ARDS. *Br J Anaesth* 1997; 78: 241–46
- [3] Midla GS, Cpt.: Extracorporeal circulatory systems and their role in military medicine: A clinical review. *Military Med* 2007; 172, 5: 523
- [4] Zimmermann M, Philipp A, Schmid FX, Dorlac W, Arlt M, Bein T: From Baghdad to Germany: use of a new pumpless extracorporeal lung assist system in two severely injured US soldiers. *ASAIO J* 2007; 53(3): e4–6
- [5] Arlt M, Philipp A, Zimmermann M, Taeger K, Schmid FX: Emergency medical evacuation of patients with severe lung failure using miniaturized extracorporeal assistance devices. *15th World Congress on Disaster and Emergency Medicine, Amsterdam, Netherlands* 13.–16. 05. 2007
- [6] Bennett JB, Hill J, Long W: Considerations for inter-hospital extracorporeal cardiopulmonary support resuscitation and transport. *J Extra-Corpor Technol* 1994; 26 (2): 79–86
- [7] Philipp A, Behr R, Reng M, Kaiser M, Birnbaum D: Pumpless extracorporeal lung assist. *J Extra-Corpor Tech* 1998; 1 (30): 38–41
- [8] Bein T, Weber F, Philipp A et al: A new pumpless extracorporeal interventional lung assist in critical hypoxemia/hypercapnia. *Crit Care Med* 2006; (34) 5: 1372–1377
- [9] Dembitsky WP, Moreno-Cabral RJ, Adamson RM et al: Emergency resuscitation using portable extracorporeal membrane oxygenation. *Ann Thorac Surg* 1993; 55: 304–309
- [10] Waele JJ, Cauwenbergh S, Hoste E, Benoit D, Colardyn F: The use of the activated clotting time for monitoring heparin therapy in critically ill patients. *Intens Care Med* 2003; 29: 325–328
- [11] Philipp A, Müller T, Bein T, Foltan M, Schmid FX, Birnbaum D, Schmid C: Inhibition of thrombocyte aggregation during extracorporeal lung assist. *Perfusion* 2007; 22: 293–297
- [12] Zimmermann M, Bein T, Philipp A, Itner K, Foltan M, Drescher J, Weber F, Schmid FX: Interhospital transportation of patients with severe lung failure on pumpless extracorporeal lung assist. *Br J Anaesth* 2006; 96(1): 63–66. *Epub* 2005 Nov 18

[13] Bennet JB, Hill JG, Long WB et al: Interhospital transport of the patient on extracorporeal cardiopulmonary support. *Ann Thorac Surg* 1994; 57: 107–111

[14] Van Meurs K, Lally KP, Peek G, Zwischenberger JB: *ECMO Extracorporeal cardiopulmonary support in critical care*. 3rd Edition Ann Arbor/Michigan 2005

[15] Wiesenack C, Liebold A, Philipp A et al: Four years' experience with a miniaturized extracorporeal circulation system and its influence on clinical outcome. *Artif Organs* 2004; 28 (12): 1082–1088

[16] Kjaergaard B et al: Aero-medical evacuation with interventional lung assist in lung failure patients. *Resuscit* 2007; 72 (2): 280 ff

[17] [Http://de.wikipedia.org/wiki/Barometrische_Höhenformel](http://de.wikipedia.org/wiki/Barometrische_Höhenformel)

Alois Philipp
Klinik für Herz-, Thorax- und herznahe
Gefäßchirurgie
Universitätsklinikum Regensburg
Franz-Josef-Strauß-Allee 11
93042 Regensburg
Alois.Phillipp@klinik.Uni-Regensburg.de