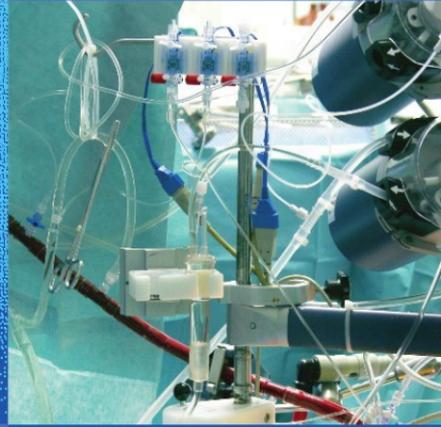


Schmid  
Philipp



# Leitfaden Extrakorporale Zirkulation



Springer

C. Schmid

A. Philipp

(Hrsg.)

**Leitfaden extrakorporale Zirkulation**

C. Schmid  
A. Philipp

# Leitfaden extrakorporale Zirkulation

**Prof. Dr. med. Christof Schmid**  
Direktor  
Klinik und Poliklinik für Herz-,  
Thorax- und herznahe Gefäßchirurgie,  
Universitätsklinikum  
Franz-Josef-Strauß-Allee 11  
93053 Regensburg

**Alois Philipp**  
Leitung Kardiotechnik  
Klinik und Poliklinik für Herz-,  
Thorax- und herznahe Gefäßchirurgie  
Universitätsklinikum  
Franz-Josef-Strauß-Allee 11  
93053 Regensburg

ISBN 978-3-642-17002-7 Springer Medizin Verlag Heidelberg

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen  
Nationalbibliografie;  
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

### **Springer Medizin**

Springer-Verlag GmbH  
Ein Unternehmen von Springer Science+Business Media  
[springer.de](http://springer.de)

© Springer Medizin Verlag Heidelberg 2011

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Produkthaftung: Für Angaben über Dosierungsanweisungen und Applikationsformen kann vom Verlag keine Gewähr übernommen werden. Derartige Angaben müssen vom jeweiligen Anwender im Einzelfall anhand anderer Literaturstellen auf ihre Richtigkeit überprüft werden.

Planung: Dr. Fritz Kraemer, Heidelberg  
Projektmanagement: Barbara Knüchel, Heidelberg  
Copy-Editing: Dr. Astrid Horlacher, Dielheim  
Cover-Design: deblik, Berlin  
Satz, Zeichnungen und Reproduktion der Abbildungen:  
Fotosatz-Service Köhler GmbH – Reinhold Schöberl, Würzburg

Gedruckt auf säurefreiem Papier      2111/106 – 5 4 3 2 1 0

## Vorwort

---

Die extrakorporale Zirkulation war und ist für den Herzchirurgen seit Jahren Segen und Fluch zugleich. Sie ermöglicht ihm den Zugang zum Herzen und letztendlich die gesamte offene Herzchirurgie. Eine Langzeitanwendung war jedoch seit jeher problematisch und führte stets über eine Multiorgandysfunktion bis zum Tod des Patienten. Mit der Entwicklung der »Offpump«-Chirurgie wurde erstmals der Gedanke einer schonenderen Herzchirurgie popularisiert, jedoch fanden sich hier bald operationstechnische Grenzen, sodass der Einsatz der Koronarrevaskularisation ohne Herz-Lungen-Maschine limitiert geblieben ist. Um die Nebenwirkungen und Gefahren der extrakorporalen Zirkulation zu mindern, wurden daher in der Folgezeit kleinere Systeme, sog. miniaturisierte Herz-Lungen-Maschinen entwickelt. Solche Systeme wurden teilweise schon früher beim Postkardiotomieversagen eingesetzt, jedoch nicht zu Routineoperationen oder zur ECMO-Langzeittherapie. Durch die Optimierung der Mini-EKZ können heutzutage koronare Bypassoperationen mit kardioplegischem Herzstillstand mit nur sehr geringer Inflammation und mit niedrigem Blutungsrisiko erfolgen. ECMO-Therapien können über Wochen und Monate durchgeführt werden, ohne dass dem Patienten ein Multiorganversagen droht. Selbst boden- und luftgestützte Patiententransporte primär nicht transportabler Patienten sind mit den Mini-EKZ-Systemen möglich geworden.

Ziel des vorliegenden Buches ist es, das Spektrum der extrakorporalen Zirkulation umfassend und doch kompakt zu vermitteln. Die physiologischen Grundlagen, die Indikationsstellung, die technische Durchführung, die erreichbaren Ergebnisse und die Probleme werden dargestellt und diskutiert. Dabei wird aber kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, da mannigfaltige Variationsmöglichkeiten mit den verschiedenen Systemen bestehen. Für Verbesserungsvorschläge sind wir dennoch stets offen und nehmen konstruktive Kritik gerne entgegen.

Regensburg, im Frühjahr 2011  
Christof Schmid und Alois Philipp

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Historie</b> . . . . .	1
1.1	Entwicklung der EKZ in der Bundesrepublik Deutschland	7
1.2	Entwicklung der EKZ in der ehemaligen DDR . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Physiologie der EKZ</b> . . . . .	13
2.1	Hämodynamik . . . . .	14
2.1.1	Pulsatilität . . . . .	15
2.2	Gasaustausch . . . . .	16
2.2.1	Sauerstoffverbrauch . . . . .	16
2.2.2	Gastausch an der EKZ . . . . .	18
2.2.3	pH-Management . . . . .	21
2.3	Hämostase . . . . .	22
2.3.1	Antikoagulation . . . . .	22
2.3.2	Heparin . . . . .	23
2.3.3	HIT und Heparinanaloga . . . . .	24
2.3.4	Thrombozytenaggregationshemmer . . . . .	28
2.3.5	Oberflächenbeschichtung . . . . .	29
2.4	Myokardprotektion . . . . .	30
2.5	Nebenwirkungen der EKZ . . . . .	36
2.5.1	Respiratorisches System . . . . .	36
2.5.2	Renales System . . . . .	37
2.5.3	Gastrointestinales System . . . . .	38
2.5.4	Endokrines System . . . . .	39
<b>3</b>	<b>Herz-Lungen-Maschine</b> . . . . .	41
3.1	Pumpen . . . . .	44
3.1.1	Rollerpumpen . . . . .	44
3.1.2	Zentrifugalpumpen . . . . .	45
3.1.3	Diagonalpumpen . . . . .	47
3.2	Oxygenatoren . . . . .	48
3.2.1	Bubbleoxygenator . . . . .	48
3.2.2	Membranoxygenator . . . . .	49
3.3	Venöse Reservoirs . . . . .	51
3.4	Blasenfallen und arterielle Filter . . . . .	53

<b>3.5 Mischer (Blender)</b> . . . . .	53
<b>3.6 Kanülen und Schlauchsystem</b> . . . . .	54
3.6.1 Zentrale Kanülierung . . . . .	55
3.6.2 Periphere Kanülierung . . . . .	60
3.6.3 Kardioplegiegabe . . . . .	61
3.6.4 Venteinlage . . . . .	62
3.6.5 Schlauchsystem . . . . .	63
<b>3.7 Offenes/geschlossenes System</b> . . . . .	64
<b>3.8 Anwendung der EKZ</b> . . . . .	65
3.8.1 Vorbereitung der EKZ . . . . .	65
3.8.2 Monitoring der EKZ . . . . .	66
3.8.3 Beendigung der EKZ . . . . .	66
3.8.4 Narkose über die EKZ . . . . .	68
3.8.5 Hämofiltration an der EKZ . . . . .	68
<b>3.9 Probleme und Komplikationen</b> . . . . .	69
<b>4 Miniaturisierte Herz-Lungen-Maschine</b> . . . . .	73
4.1 MECC-System (Fa. Maquet) . . . . .	75
4.2 Resting-Heart-System (Fa. Medtronic) . . . . .	77
4.3 Synergy-Mini-Bypass-System (Fa. Sorin) . . . . .	78
4.4 ROC-Safe-System (Fa. Terumo) . . . . .	79
4.5 Modifikation für die Aortenklappenoperation . . . . .	79
4.6 Funktionelle Unterschiede zwischen Mini-EKZ und Standard-EKZ . . . . .	81
4.7 Ergebnisse . . . . .	82
<b>5 Extrakorporale Membranoxygenierung</b> . . . . .	83
<b>5.1 Aufbau</b> . . . . .	84
5.1.1 ECMO-Parametereinstellungen . . . . .	87
5.1.2 Venoarterielle ECMO . . . . .	87
5.1.3 Venovenöse ECMO . . . . .	88
<b>5.2 Indikation</b> . . . . .	89
<b>5.3 Physiologische Konsequenzen und Probleme</b> . . . . .	92
<b>5.4 Ergebnisse</b> . . . . .	93

<b>6</b>	<b>Pumpless Extracorporeal Lung Assist (PECLA)</b> . . . .	97
6.1	Aufbau und Funktion . . . . .	98
6.2	Indikation . . . . .	99
6.3	Ergebnisse . . . . .	100
<b>7</b>	<b>Weitere Entwicklungen</b> . . . . .	103
<b>8</b>	<b>Literatur</b> . . . . .	107
<b>9</b>	<b>Anhang</b> . . . . .	115
	<b>Stichwortverzeichnis</b> . . . . .	119

## Abkürzungsliste

---

ACT	activated clotting time
ADH	antidiuretisches Hormon
aPTT	aktivierte partielle Thromboplastinzeit
ARDS	adult respiratory distress syndrome
AT	Antithrombin
AVCO <sub>2</sub> R	arteriovenous CO <sub>2</sub> removal
AVDO <sub>2</sub>	arteriovenöse Differenz des O <sub>2</sub> -Gehalts
C <sub>a</sub> O <sub>2</sub>	arterielle Sauerstoffsättigung
CT	Computertomografie
DO <sub>2</sub>	systemisches O <sub>2</sub> -Angebot
ECCO <sub>2</sub> R	extracorporeal CO <sub>2</sub> removal
ECLS	extracorporeal life support
ECMO	extrakorporale Membranoxygenierung (extracorporeal membrane oxygenation)
EKG	Elektrokardiogramm
EKZ	extrakorporale Zirkulation
ELS	emergency life support system
ELSO	Extracorporeal Life Support Organization
ESS	Euthyroid-sick-Syndrom
FiO <sub>2</sub>	inspiratorische O <sub>2</sub> -Konzentration
Hb	Hämoglobingehalt
HIT I	Heparin-induzierte Thrombozytopenie Typ I
HIT II	Heparin-induzierte Thrombozytopenie Typ II
Hkt	Hämatokritwert
H-PF 4	Heparin-Plättchenfaktor 4
HZV	Herzzeitvolumen
IABP	intraaortale Ballonpumpe
ILA	interventional lung assist
ITW	Intensivtransportwagen
NMH	niedermolekulares, fraktioniertes Heparin
NOMI	non-okklusive Mesenterialischämie
OPCAB	offpump coronary artery bypass
P <sub>a</sub> CO <sub>2</sub>	arterieller Kohlendioxidpartialdruck
P <sub>a</sub> O <sub>2</sub>	arterieller Sauerstoffpartialdruck

pAVK	periphere arterielle Verschlusskrankheit
pCO <sub>2</sub>	Kohlendioxidpartialdruck
PECLA	pumpless extracorporeal lung assist
PEEP	positiv-endexpiratorischer Druck (positive endexpiratory pressure)
pO <sub>2</sub>	Sauerstoffpartialdruck
PTCA	perkutane transluminale koronare Angioplastie
PTH	Parathormon
RIS	Rapid-Infusion-System
RQ	respiratorischer Quotient
rtPA	tissue plasminogen activator
SIRS	Systemisches inflammatorisches Response-Syndrom (systemic inflammatory response syndrome)
T <sub>3</sub>	Triiodthyronin
T <sub>4</sub>	Thyroxin
TEE	transösophageale Echokardiografie
TIA	transitorisch ischämische Attacke
TSH	Thyreotropin
UFH	unfraktioniertes Heparin
va-ECMO	venoarterielle extrakorporale Membranoxygenierung
VARD	Affinity Venous Air Removal Device
VCO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> -Abgabe
VO <sub>2</sub>	Sauerstoffverbrauch
vv-ECMO	venovenöse extrakorporale Membranoxygenierung
ZVD	zentraler Venendruck

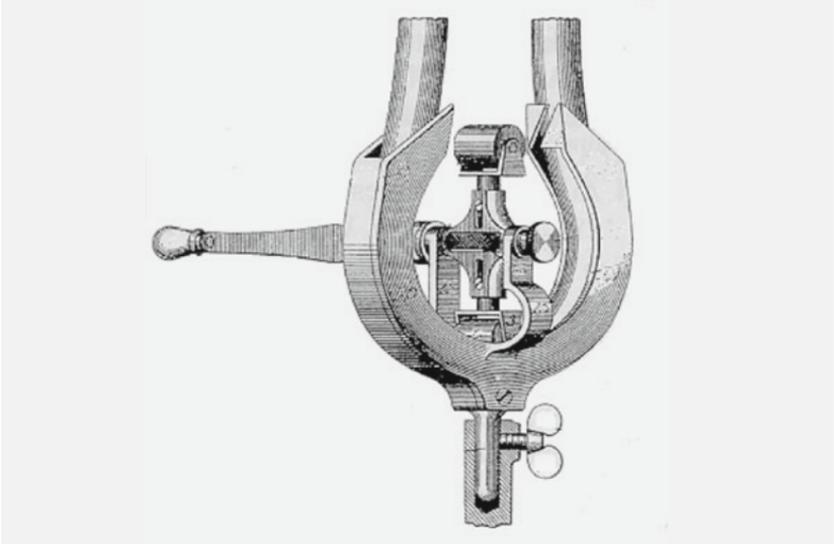
# Historie

- 1.1 Entwicklung der EKZ in der Bundesrepublik Deutschland – 7
- 1.2 Entwicklung der EKZ in der ehemaligen DDR – 9

Die Geschichte der extrakorporalen Zirkulation (EKZ) ist wie auch die Herzchirurgie selbst relativ jung. Die historischen Wurzeln aber reichen weit in die Vergangenheit zurück, denn schon 1812 dachte der französische Physiologe LeGallois über einen Ersatz des Herzens nach (LeGallois 1812). Erste tierexperimentelle Organperfusionsstudien mit einer »Herz-Lungen-Maschine« über einen geschlossenen Kreislauf wurden 1885 durch von Frey und Gruber beschrieben (von Frey u. Gruber 1885). Die weitere Forschung an Blutpumpen konzentrierte sich zunächst auf pulsatile Systeme, bei denen ein Gummiballon rhythmisch komprimiert wurde (Jacobj 1890). Dale und Schuster führten 1928 in Hampstead die erste pulsatile Membranpumpe ein, die über Ventile einen gerichteten Blutfluss gewährleistete (Dale u. Schuster 1928). Einen fundamentalen Fortschritt bedeutete die Entwicklung der Rollerpumpe, die auch ohne Ventile einen gerichteten Blutfluss generierte. Das Grundprinzip wurde bereits 1855 durch Porter und Bradley patentiert und war u. a. für den Einsatz bei Feuerlöschern und zur Vereinfachung der Sirupproduktion gedacht. In einer kleineren Version sollte sie auch das Magenauspumpen erleichtern. Allen ließ sich 1887 die erste Rollerpumpe zur Bluttransfusion patentieren. Sein Pumpengehäuse wies ein Reservoir für heißes Wasser auf, das ein Auskühlen des Blutes während der Übertragung verhindern sollte (Allen 1888; Herdman 1887). Truax entwickelte die Pumpe weiter und konzipierte die erste Doppelrollerpumpe 1891 (Truax 1899, ■ Abb. 1.1). Eine entscheidende Modifikation erfolgte durch DeBakey 1934, der den Schlauch so in der Pumpe fixierte, dass er sich nicht mehr weiter bewegen konnte – ein bis dahin ungelöstes Problem. Außerdem war ein Blutfluss nur in eine Richtung möglich und ein Rotationszähler erlaubte eine Quantifizierung der Pumpleistung. Aufgrund ihrer Effizienz wird dieses Prinzip der Rollerpumpe noch heute vielfach bei Herz-Lungen-Maschinen angewandt (DeBakey 1934; Cooley 1987).

Auch in Deutschland wurde an Blutpumpen geforscht. Beck aus Kiel entwickelte 1924 eine Rollerpumpe mit einer Rolle zu Transfusionszwecken, die er im Folgejahr zu einem 3-Rollen-Modell modifizierte. Letztere wurde als Beck'sche Mühle bekannt (Beck 1924, 1925).

Schon früh konnte durch Versuche von Brown-Sequard nachgewiesen werden, dass neben der Perfusion auch eine Oxygenierung notwendig ist (Brown-Sequard 1858). Daher wurde parallel zur Entwicklung der Blutpumpen auch nach Möglichkeiten gesucht, eine Oxygenierung des Blutes zu erreichen. 1882 leitete von Schröder Luft direkt ins Blut, was aber aufgrund der Schaumbildung eine unbefriedigende Lösung war (von Schröder 1882). Von



■ **Abb. 1.1** Erste Doppelrollerpumpe von Charles Truax (1891). (Aus Truax 1899)

Frey und Gruber benutzten in Leipzig 1885 bereits einen Filmoxygenator, der aus einem rotierenden Glaszylinder bestand und dessen Prinzip lange als führend galt.

Jenseits des eisernen Vorhangs entwickelte Bryukhonenko in den 1930er-Jahren eine Herz-Lungen-Maschine, die aus zwei Membranpumpen und erstmals auch einem Blasen (»Bubble«)-Oxygenator bestand (■ Abb. 1.2). Bryukhonenko, wie auch später Demikhov, führten dazu zahlreiche Experimente an Hunden durch. Berühmt wurden nicht nur ihre Versuche mit Herzen und Lungen, sondern vor allem die Experimente mit den Hundeköpfen, die Bryukhonenko isoliert perfundierte und Demikhov transplantierte (»Hund mit zwei Köpfen!«) (Lokshin et al. 1998; Demikhov 1969, 1989).

In den 1950er-Jahren folgten erste klinische Anwendungsversuche der EKZ beim Menschen. Dennis führte am 5. April 1951 bei der 6-jährigen Patricia Lee Anderson den ersten totalen Bypass durch. Statt des präoperativ diagnostizierten Vorhofseptumdefekts fand sich intraoperativ jedoch ein AV-Kanal, der zu dieser Zeit noch nicht korrigierbar war (Dennis 1985; Dennis et al. 1951). Im Mai 1951 wurde mithilfe der Herz-Lungen-Maschine bei der 2-jährigen Sheryl L. Judge ein Vorhofseptumdefekt verschlossen. Ein leeres Re-