

Boeken · Assmann
Born · Schmid



Mechanische Herz-Kreislauf- Unterstützung

Indikationen, Systeme,
Implantationstechniken

 Springer

Mechanische Herz-Kreislauf-Unterstützung

Udo Boeken
Alexander Assmann
Frank Born
Christof Schmid (Hrsg.)

Mechanische Herz-Kreislauf- Unterstützung

Indikationen, Systeme, Implantationstechniken

Mit 133 Abbildungen und 28 Tabellen



Springer

Herausgeber**Boeken, Udo, Prof. Dr. med.**Universitätsklinikum Düsseldorf, Klinik für
Kardiovaskuläre Chirurgie**Assmann, Alexander, Dr. med.**Universitätsklinikum Düsseldorf, Klinik für
Kardiovaskuläre Chirurgie**Born, Frank, MCT**Leiter Kardiotechnik Herzchirurgische
Klinik und Poliklinik
Klinikum der Universität München --
Großhadern, Herzchirurgische Klinik und
Poliklinik**Schmid, Christof, Prof. Dr. med.**Universitätsklinikum Regensburg
Klinik für Herz-, Thorax- und
herznahe Gefäßchirurgie

ISBN-13 978-3-642-29407-5

DOI 10.1007/978-3-642-29408-2

ISBN 978-3-642-29408-2 (eBook)

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

Springer Medizin

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

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.

Zu widerhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

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.

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 dürfen.

Planung: Dr. Fritz Kraemer, Heidelberg

Projektmanagement: Willi Bischoff, Heidelberg

Lektorat: Monika Liesenhoff, Bonn

Projektkoordination: Michael Barton, Heidelberg

Umschlaggestaltung: deblik Berlin

Fotonachweis Umschlag: © Getty Images, © Medioimages/Photodisc

Satz: medionet Publishing Services Ltd., Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Medizin ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer.com

Geleitwort

Das vergangene Jahrzehnt hat zu enormen Fortschritten in der kardiovaskulären Medizin geführt, die das Tätigkeitsfeld in der Herzchirurgie und auch der Kardiologie entscheidend verändert haben. Dies hat letztendlich zu einer engeren Zusammenarbeit und gemeinsamen politischen Ausrichtung dieser Fachgesellschaften geführt und spiegelt sich in den gemeinsamen erstellten Leitlinien und Konsensuspapieren wider. Diese vermehrte interdisziplinäre Zusammenarbeit hat in einem besonderen Maße auch zwischen der Deutschen Gesellschaft für Thorax-, Herz und Gefäßchirurgie und der Deutschen Gesellschaft für Kardiotechnik stattgefunden und zeigte sich ganz deutlich in der ersten gemeinsamen Fokustagung im Herbst letzten Jahres. Die Berufsbilder »Herzchirurg« und »Kardiotechniker« definieren sich neu, da neue Therapieverfahren und Operationstechniken nur durch ein echtes Zusammenwirken im Team erfolgreich umgesetzt werden können. Ich möchte hier nur einige Beispiele aufzeigen, die ein komplettes Umdenken erforderten: die »Off pump« Bypasschirurgie, minimal invasive Klappenchirurgie, die Entwicklung der TAVI unter ECMO standby.

Zeitgleich zeigt sich eine deutliche Verlagerung des herzchirurgischen Patientenguts in das höhere Lebensalter mit zahlreichen Komorbiditäten und Mehrfachherzerkrankungen, die zur Behandlung anstehen. Mit der erfolgten Anpassung hin zu schonenden und minimalisierten Verfahren der extrakorporalen Zirkulation und differenzierten Operationstechniken wurde diesem Problem begegnet.

Die enormen technischen Fortentwicklungen der extrakorporalen Zirkulation und vor allem der Assistensysteme zur Therapie des akuten oder chronischen Herz- und Lungenversagens finden heute Anwendung weit über den Bereich der Herzchirurgie hinaus, z. B. der ECMO-Einsatz in Herzkatheterlaboren und im Rettungsdienst.

Die Behandlung der terminalen Herzinsuffizienz im höheren Alter stellt nunmehr durch die Fortentwicklung der bisherigen komplexen Unterstützungssysteme zu miniaturisierten LVAD (z. B. Heartmate III, Heartware, Circulite usw.) eine durchaus auf längere Zeit hinaus permanente aussichtsreiche Therapieoption dar. Es ist absehbar, dass hier eine stetige Zunahme der Implantationen stattfinden wird, die natürlich eine Anpassung in der Struktur der Nachsorge erforderlich macht.

Auch die Entwicklung des totalen Herzersatzes (TAH) wird mit Sicherheit in der nahen Zukunft durch hochtechnisierte Neuentwicklungen (z.B: Carmat) wieder eine Alternative für einzelne Patienten darstellen.

Die Arbeitsgruppe »Extrakorporale Zirkulation« hat sich in dieser Buch-Neuaufgabe ausführlichst mit diesem Gesamtthemenkomplex befasst. In den einzelnen Artikeln wird zunächst historisch betrachtet, wie sich die einzelnen Techniken entwickelt haben, aber insbesondere wird die aktuelle Situation exakt definiert und auch die Zukunftstechnologien diskutiert. Dieser Gesamtüberblick erlaubt allen interessierten Lesern einen ausgezeichneten Überblick zur extrakorporalen Zirkulation, Kreislaufassistenz- und Lungenersatzverfahren. Gleichzeitig ist eine Gesamtbetrachtung der Weltliteratur entstanden, welches für alle Beteiligten und Interessierten gleichermaßen in der Herzchirurgie, Anästhesie, Kardiologie und Kardiotechnik als Standardlektüre zu empfehlen ist. Der Arbeitsgruppe »Extrakorporale Zirkulation« und den beteiligten Autoren sind wir daher sehr dankbar und gratulieren zu dieser erfolgreichen Arbeit.

Leipzig im Oktober 2012

Friedrich Wilhelm Mohr

Präsident der DGTHG

Vorwort

Die Arbeitsgruppe „Extrakorporale Zirkulation und Mechanische Kreislaufunterstützung“ der Deutschen Gesellschaft für Thorax-, Herz- und Gefäßchirurgie wurde 1997 gegründet. Eine vordringliche Aufgabe dieser AG ist die Intensivierung der Zusammenarbeit zwischen Herzchirurgie und Kardio-technik. So entstanden unter der Federführung der Arbeitsgruppe bisher 3 Bücher, die sich alle mit den Schnittmengen zwischen den beiden Berufsgruppen befassen und in enger Zusammenarbeit verfasst wurden. Im Jahr 2001 erschien zunächst der Band „Extrakorporale Zirkulation – wissenschaftlich begründet?“. Es folgte 2003 der nächste Band, der sich erstmals mit dem Gebiet der Kreislaufunterstützung befasste: „Synopsis der biologischen und mechanischen Kreislaufunterstützung“. Aufbauend auf dem Werk von 2001 erschien 2006 der bisher letzte Band unter Federführung der AG. Der Titel „Empfehlungen zum Einsatz und zur Verwendung der Herz-Lungen-Maschine“ zeigt bereits, dass in diesem Werk die Anwendung der EKZ aufbauend auf den Grundlagen in enger Anlehnung an die Richtlinien des European Board of Cardiovascular Perfusion dargestellt wird.

Nach nunmehr 9 Jahren seit Erscheinen des Buches zur mechanischen Kreislaufunterstützung (MKU) sah es die AG als absolut notwendig an, hier ein umfassendes Update in Form eines neuen Buches zu erstellen. Gerade im Bereich der Herzchirurgie hat eine rasante Weiterentwicklung stattgefunden, und seit Publikation der sog. Rematch-Studie im Jahr 2001 kam es zu einem sprunghaften Anstieg der Implantationszahlen im Bereich der ventrikulären Unterstützung. Mittlerweile ist nicht nur die Vielzahl der zur Verfügung stehenden Systeme, sondern auch deren technische Qualität bemerkenswert. Im vorliegenden Werk findet sich nun eine vollständige Übersicht über den aktuellen Stand der mechanischen Kreislaufunterstützung. Es wird hierbei sowohl ein Fokus auf die verschiedenen Systeme als auch auf differenzierte Indikationen gelegt. Die vier Hauptindikationen zur MKU werden neben der kurzfristigen, postoperativen Unterstützung detailliert dargestellt: „Bridge-to-Decision“, „Bridge-to-Recovery“, „Bridge-to-Transplant“ und nicht zuletzt der immer wichtigere Bereich der „Destination-Therapy“.

Da das Buch u. a. auch viele praktische Hinweise für die Nachsorge der einzelnen Systeme enthält, wurde bewusst ein Format gewählt, das die Mitnahme in der Kitteltasche ermöglicht. Somit stellt dieser Band nicht nur einen

Gesamtüberblick dar, er eignet sich durchaus auch als tägliches Nachschlagewerk sowohl für die operative Planung als auch für die ambulante Betreuung der Patienten.

Die vorliegenden Kapitel wurden von den einzelnen Arbeitsgruppen in den deutschen Herzzentren verfasst, wobei stets lokale Schwerpunkte und Kompetenzen berücksichtigt wurden. Dabei wurde auf größtmögliche kooperative Zusammenarbeit zwischen Herzchirurgie und Kardiotechnik geachtet und die Position und Sichtweise des sog. VAD-Koordinators in den einzelnen Kliniken berücksichtigt.

Der Aufbau der einzelnen Kapitel ist zumeist vergleichbar. Grundlegenden Informationen mit historischen Anmerkungen folgen in der Regel eine Beschreibung des Systems und die Darstellung der Implantationstechnik. Die perioperative Betreuung und die ambulante Nachsorge werden letztlich jeweils durch ausgewählte Literaturzitate ergänzt.

Wir bedanken uns bei allen beteiligten Autoren für Ihr großes Engagement. Alle Kapitel wurden trotz des engen Klinikalltages fristgerecht erstellt. Weiterhin gilt unser Dank auch allen anderen, die sich an der Entstehung und Vollendung dieses Buches organisatorisch oder finanziell beteiligt haben. Ein besonderer Dank geht hierbei an den Springer Verlag und Herrn Dr. Fritz Kraemer.

Düsseldorf und Regensburg im September 2012

Udo Boeken

Alexander Assmann

Frank Born

Christof Schmid

Inhaltsverzeichnis

1	Geschichte der mechanischen Kreislaufunterstützung	1
	<i>U. Boeken</i>	
1.1	Grundlegendes	2
1.2	Hintergrund	2
1.3	Historie	3
1.4	Ventrikuläre Unterstützungssysteme (VAD) – Entwicklung und Einteilung	4
1.4.1	Kurzzeit-Unterstützungssysteme	4
1.4.2	VAD – 1. Generation	4
1.4.3	VAD – 2. Generation	5
1.4.4	VAD – 3. Generation	5
1.5	Vollständiges Kunstherz (TAH)	6
1.6	Zusammenfassung und Ausblick	7
2	Indikationen zur mechanischen Kreislaufunterstützung	9
2.1	Therapieziele (BTB, BTT, BTR, DT)	10
	<i>S. Michel, R. Sodian, I. Kaczmarek</i>	
2.1.1	Bridge-to-Bridge (BTB) bzw. Bridge-to-Decision (BTD)	10
2.1.2	Bridge-to-Transplantation (BTT)	10
2.1.3	Bridge-to-Recovery (BTR)	11
2.1.4	Destination-Therapy (DT)	12
2.2	Indikationsstellung	13
	<i>S. Michel, R. Sodian, I. Kaczmarek</i>	
2.3	Kontraindikationen	17
	<i>S. Michel, R. Sodian, I. Kaczmarek</i>	
2.4	Pulmonale Hypertonie und mechanische Kreislaufunterstützung	18
	<i>H. Welp, J. Sindermann, T.D.T. Tjan</i>	
2.4.1	Mechanische Kreislaufunterstützung als Alternative zur Transplantation	20
2.4.2	Pulsatile Unterstützung zur Stabilisierung für eine Transplantation	20
2.4.3	Einfluss der pulsatilen Unterstützung auf neuroendokrine Veränderungen	23
2.4.4	Einfluss der Art der Unterstützung auf die Organfunktion	26

3	Akuttherapie	33
3.1	Intraaortale Ballongegenpulsation	35
	<i>R. Tandler</i>	
3.1.1	Historie	35
3.1.2	Systembeschreibung und Wirkprinzip	35
3.1.3	Implantationstechnik	38
3.1.4	Alternative Implantationstechniken	39
3.1.5	Indikationen	40
3.1.6	Kontraindikationen	42
3.1.7	Komplikationsmöglichkeiten	42
3.1.8	Management, Weaning und Explantation	43
3.1.9	Sonderfall Kinder	44
3.1.10	Zusammenfassung	44
3.2	Perkutane Systeme	45
	<i>M. Siepe, C. Benk, F. Beyersdorf</i>	
3.2.1	Grundlegendes	45
3.2.2	Indikation	46
3.2.3	Technische Beschreibung der unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Systeme	48
3.2.4	Klinische und experimentelle Ergebnisse	50
3.2.5	Diskussion und Limitierung der Systeme	52
3.2.6	Zusammenfassung	53
3.3	Herz und/oder Lungenunterstützung beim kardiozirkulatorischen Versagen – va-ECMO	53
	<i>M. Hilker, C. Schmid</i>	
3.3.1	Grundlegendes	53
3.3.2	ECMO-Systeme	54
3.3.3	Kanülierungstechniken	58
3.3.4	Indikationen	62
3.3.5	Management an der va-ECMO	64
3.3.6	Studienlage	65
3.4	Transport mit mechanischer Herz-Kreislauf-Unterstützung	66
	<i>F. Born, U. Boeken</i>	
3.4.1	Grundlegendes	66
3.4.2	Logistik und Extra Corporeal Life Support (ECLS)	67
3.4.3	Definition: mechanisches Kreislaufunterstützungssystem ECMO	68

3.4.4	Indikation für mechanische Kreislaufunterstützung	69
3.4.5	Technische Probleme des ECLS-Systems – Kanülierung	69
3.4.6	Gerinnungsmanagement	70
3.4.7	Ziel der Unterstützungstherapie	71
3.4.8	Zusammenfassung	74
4	Langzeitunterstützung	79
4.1	Parakorporale Systeme einschließlich Implantationstechniken	80
4.1.1	Thoratec paracorporeal ventricular Assist Device <i>D. Schibilsky, C. Schlensak</i>	80
4.1.2	Berlin Heart EXCOR VAD <i>A. Rukosujew, A. Hoffmeier, T.D.T. Tjan</i>	85
4.1.3	Medos-VAD <i>A. K. Bigdeli, R.Sodian, I. Kaczmarek</i>	95
4.1.4	Abiomed <i>F. Wagner</i>	101
4.2	Intrakorporale Systeme einschließlich Implantationstechniken	114
4.2.1	Verdrängerpumpen – HeartMate I <i>D. Schibilsky, C. Schlensak</i>	114
4.2.2	Axialer Antrieb <i>T. Drews, T. Krabatsch</i>	116
4.2.3	Zentrifugalpumpen als Linksherzunterstützungssysteme <i>J. D. Schmitto, A. Haverich, M. Strüber</i> HeartWare HVAD Duraheart	128 128 130
4.2.4	Biventrikuläre mechanische Kreislaufunterstützung mit zwei »continuous flow« Pumpen der 3. Generation <i>T.D.T. Tjan, M. Scherer, H. Welp</i>	132
5	Kunstherzen (TAH)	155
5.1	TAH: Cardiowest <i>M. Morshuis, U. Schulz</i>	156
5.1.1	Grundlegendes	156
5.1.2	Entwicklung des Kunstherzens (TAH)	157
5.1.3	AbioCor	160
5.1.4	Cardiowest	162
5.1.5	Psychologische Probleme und ethische Erwägungen	181

5.2	Self-made-TAH aus BiVAD: para- und intrakorporale Optionen	183
	<i>M. Morshuis, U. Schulz</i>	
5.2.1	Chirurgische Technik Thoratec-TAH	183
5.2.2	BiVAD HeartWare	185
5.3	Self-made TAH	187
	<i>H. Welp, A. Rukosujew, T.D.T. Tjan</i>	
5.3.1	Grundlegendes	187
5.3.2	Münsteraner Erfahrungen	188
5.3.3	Technik der Implantation	190
5.3.4	Zusammenfassung	193
6	Dauerhafte mechanische Kreislaufunterstützung bei Kindern und Patienten mit angeborenen Herzfehlern	199
	<i>E. V. Potapov, M. Hübler, O. Miera, V. Alexi-Meskishvili, R. Hetzer</i>	
6.1	Geschichte	200
6.2	Optionen	200
6.3	Systeme für die Langzeitunterstützung bei Neugeborenen und Kleinkindern	201
6.3.1	Beschreibung	201
6.3.2	Indikationen	204
6.3.3	Antikoagulation	204
6.4	Implantierbare Systeme bei Kindern	205
6.5	VAD-Implantation bei angeborenem Herzfehler	206
6.6	Entwöhnung bei myokardialer Erholung	208
6.7	Perspektiven	208
7	Lungenunterstützung bei respiratorischem Versagen	211
7.1	Veno-venöse extrakorporale Membranoxygenierung (vv-ECMO)	212
	<i>D. Camboni, C. Schmid</i>	
7.1.1	Grundlegendes	212
7.1.2	Physiologische Grundlagen	212
7.1.3	Gasaustausch an der ECMO	213
7.1.4	Equipment	213
7.1.5	Indikationen	215
7.1.6	Unterschiede zwischen der veno-venösen und der veno-arteriellen ECMO	216
7.1.7	Management	218

7.1.8	Weaning	219
7.1.9	Studienlage	220
7.1.10	Zusammenfassung	223
7.2	Pumpenlose extrakorporale Lungenunterstützung/ interventioneller Lungenassistent (PECLA/iLA)	223
	<i>T. Pühler, C. Schmid</i>	
7.2.1	Grundlegendes	223
7.2.2	Technische Voraussetzungen der PECLA/iLA-Therapie	224
7.2.3	Implantationstechnik und Management	226
7.2.4	Vorteile und Grenzen der PECLA/iLA-Therapie	227
7.2.5	Indikationen und Studienlage	228
7.2.6	Neue Konzepte und Fazit	230
8	VAD-Nachsorge	235
8.1	Gerinnungsmanagement bei VAD- und TAH-Patienten	236
	<i>M. Morshuis, C. Özpeker, A. Koster, U. Schulz</i>	
8.1.1	Grundlegendes	236
8.1.2	Unfraktioniertes Heparin	237
8.1.3	Coumadin-induzierte Hautnekrose	239
8.1.4	Resistenz gegen aggregationshemmende Therapie	240
8.1.5	Der Einfluss der VAD-Systeme auf die Blutgerinnung	242
8.1.6	Antikoagulation, Blutung und Thrombose bei Patienten mit HeartMate-II-Device	243
8.1.7	Neue Antikoagulantia und Thrombozytenaggregationshemmer	244
8.1.8	Gerinnungsmanagement im Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen	245
8.2	Infektionsprävention	247
	<i>A. Assmann, A. Kraft</i>	
8.2.1	Bedeutung von Infektionen bei VAD-Patienten	247
8.2.2	Infektionsprävention bei VAD-Patienten	247
8.3	Weaning vom VAD	251
	<i>M. Dandel, E. Potapov, T. Krabatsch, R. Hetzer</i>	
8.3.1	Grundlegendes	251
8.3.2	Myokarderholung unter mechanischer Ventrikelentlastung	252
8.3.3	Weaning von ventrikulären Unterstützungssystemen	255
8.3.4	VAD-Explantation	265
8.3.5	Zusammenfassung und Ausblick	266

8.4	Patientenmanagement (»VAD-Koordination«) und Rehabilitation . . .	268
	<i>M. Dandel, E. Potapov, T. Krabatsch, R. Hetzer</i>	
8.4.1	Prä- und intraoperative Betreuung	269
8.4.2	Patientenschulung, Medikation und Device-Management	270
8.4.3	Überwachung und Vermeidung von Komplikationen	270
8.4.4	Zusammenfassung	274
9	Komplikationsmanagement	283
9.1	Rechtsventrikuläre Funktion vor, während und nach Implantation eines linksventrikulären Unterstützungssystems	284
	<i>E. V. Potapov, T. Krabatsch, A. Stepanenko, T. Gromann, R. Hetzer</i>	
9.1.1	Präoperative Vorhersage des rechtsventrikulären Versagens	285
9.1.2	Intraoperatives rechtsventrikuläres Versagen	291
9.1.3	Postoperative Therapie der rechtsventrikulären Dysfunktion	293
9.1.4	Spätdysfunktion des rechten Ventrikels	300
9.2	Thromboembolische Komplikationen am VAD	301
	<i>J. R. Sindermann, M. Scherer, A. Hoffmeier</i>	
9.3	Blutung am Herzunterstützungssystem	305
	<i>A. Hoffmeier, J.R. Sindermann</i>	
9.3.1	Perioperative Blutungen	306
9.3.2	Blutungen im Langzeitverlauf	307
9.3.3	Zusammenfassung	311
9.4	Infektionen	312
	<i>J. Litmathe</i>	
9.4.1	Grundsätzliche Betrachtungen	312
9.4.2	Ursachen nosokomialer Infektionen	312
9.4.3	Besonderheiten beim VAD-Patienten	314
9.4.4	Differenzialtherapeutisches Vorgehen	315
9.4.5	Ausblick	317
9.5	Herzrhythmusstörungen	318
	<i>J. Litmathe</i>	
9.5.1	Grundsätzliches	318
9.5.2	Einteilung von Arrhythmien	318
9.5.3	Ursachen	320
9.5.4	Diagnostik/Therapie	322
9.5.5	Reanimation bei Kunstherzpatienten	324

10	Ausblick	333
10.1	Transkutanes Energietransmissionssystem	334
	<i>A. Mehdiani</i>	
10.1.1	Grundlegendes	334
10.1.2	Funktionsweise des transkutanen Energietransmissionssystems	334
10.1.3	Ansätze in der Vergangenheit	335
10.1.4	LionHeart 2000 LVAS	336
10.1.5	AbioCorTM IRH/AbioCor Total Artificial Heart	336
10.1.6	Aussichten	337
10.2	Partielle Linksherzunterstützung mit CircuLite Synergy VAD (Update der CE-Zulassungsstudie)	339
	<i>S. Klotz</i>	
10.2.1	Grundlegendes	339
10.2.2	Aufbau des CircuLite Synergy VAD	340
10.2.3	Implantation des CircuLite Synergy VAD	341
10.2.4	Europäische CircuLite Synergy CE-Zulassungsstudie	342
10.2.5	Patientenauswahl für CircuLite Synergy VAD	344
10.2.6	Diskussion und Zukunftsaussichten	345
10.3	Neueste Entwicklungen in den Bereichen Herzunterstützungssysteme und Kunstherzen	346
	<i>D. Saeed, P. Ortman</i>	
10.3.1	Herzunterstützungssysteme	347
10.3.2	Kunstherzen (Total artificial heart)	352
10.4	Biotechnologie	354
	<i>A. Assmann, A. Lichtenberg, P. Akhyari</i>	
10.4.1	Modifikation des Biointerface mechanischer VAD-Systeme	354
10.4.2	Anatomische Verlagerung des kritischen Biointerface mechanischer VAD-Systeme	357
10.4.3	Vermeidung eines Biointerface zwischen mechanischem VAD-System und der systemischen Blutzirkulation	358
	Stichwortverzeichnis	365

Autorenverzeichnis

Akhyari, Payam, Dr. med.

Universitätsklinikum Düsseldorf
Klinik für Kardiovaskuläre Chirurgie
Moorenstraße 5
40225 Düsseldorf

Alexi-Meskishvili, Vladimir, Prof. Dr. med.

Universitätsklinikum Düsseldorf
Klinik für Kardiovaskuläre Chirurgie
Moorenstraße 5
40225 Düsseldorf

Assmann, Alexander, Dr. med.

Universitätsklinikum Düsseldorf
Klinik für Kardiovaskuläre Chirurgie
Moorenstraße 5
40225 Düsseldorf

Benk, Christoph, Dipl.-Ing.

Chirurgisches Universitätsklinikum Freiburg
Abteilung Herz- und Gefäßchirurgie
Hugstetterstr. 55
79106 Freiburg im Breisgau

Bigdeli, Amir-Khosrow, Dr. med.

Klinikum der Universität München – Großhadern
Herzchirurgische Klinik und Poliklinik
Marchioninistraße 15
81377 München

Beyersdorf, Friedhelm, Prof. Dr. Dr. h.c.

Universitätsklinikum Freiburg
Chirurgische Klinik, Abt. für Herz- und Gefäßchirurgie
Hugstetterstr. 55
79106 Freiburg

Boeken, Udo, Prof. Dr. med.

Universitätsklinikum Düsseldorf
Klinik für Kardiovaskuläre Chirurgie
Moorenstraße 5
40225 Düsseldorf

Born, Frank, MCT

Klinikum der Universität München – Großhadern
Herzchirurgische Klinik und Poliklinik
Marchioninistraße 15
81377 München f.born@web.de

Camboni, Daniele, PD Dr. med.

Universitätsklinikum Regensburg
Klinik für Herz-, Thorax- und herznahe Gefäßchirurgie
Franz-Josef-Strauß-Allee 11
93053 Regensburg

Dandel, Michael, Prof. asoc. Dr. med. habil.

Deutsches Herzzentrum Berlin
Transplantationsbereich und PH Spezialambulanz
Augustenburger Platz 1
13353 Berlin

Drews, Thorsten, Dr. med.

Deutsches Herzzentrum Berlin
Klinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie
Augustenburger Platz 1
13353 Berlin

Gromann, Tom Wolfgang, Dr. med.

Deutsches Herzzentrum Berlin
Klinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie
Augustenburger Platz 1
13353 Berlin

Haverich, Axel, Prof. Dr. med. Dr. h.c.

Medizinische Hochschule Hannover
Klinik für Herz-, Transplantations- und Gefäßchirurgie
Carl-Neuberg-Str. 1
30625 Hannover

Hetzer, Roland, Prof. Dr. med. Dr. h.c.mult.

Deutsches Herzzentrum Berlin
Klinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie
Augustenburger Platz 1
13353 Berlin

Hilker, Michael, Prof. Dr. med.

Universitätsklinikum Regensburg
Klinik für Herz-, Thorax- und herznahe Gefäßchirurgie
Franz-Josef-Strauß-Allee 11
93053 Regensburg

Hoffmeier, Andreas, Prof. Dr. med.

Universitätsklinikum Münster
Klinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie
Albert-Schweitzer-Campus 1
48149 Münster

Hübler, Michael, Dr. med.

Deutsches Herzzentrum Berlin
Klinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie
Augustenburger Platz 1
13353 Berlin

Kaczmarek, Ingo, PD Dr. med.

Klinikum der Universität München – Großhadern
Herzchirurgische Klinik und Poliklinik
Marchioninistraße 15
81377 München

Klotz, Stefan, Prof. Dr. med.

Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Lübeck
Klinik für Herz- und thorakale Gefäßchirurgie
Ratzeburger Allee 160
23538 Lübeck

Koster, Andreas, PD Dr. med.

Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen
Klinik für Thorax- und Kardiovaskularchirurgie
Georgstraße 11
32545 Bad Oeynhausen

Krabatsch, Thomas, Prof. Dr. med.

Deutsches Herzzentrum Berlin
Klinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie
Augustenburger Platz 1
13353 Berlin

Kraft, Alexander

Universitätsklinikum Düsseldorf
Klinik für Kardiovaskuläre Chirurgie
Moorenstraße 5
40225 Düsseldorf

Lichtenberg, Artur, Prof. Dr. med.

Universitätsklinikum Düsseldorf
Klinik für Kardiovaskuläre Chirurgie
Moorenstraße 5
40225 Düsseldorf

Litmathe, Jens, PD Dr. med.

Universitätsklinikum Aachen
Neurologische Klinik
Pauwelsstraße 30
52074 Aachen

Mehdiani, Arash

Universitätsklinikum Düsseldorf
Klinik für Kardiovaskuläre Chirurgie
Moorenstraße 5
40225 Düsseldorf

Michel, Sebastian, Dr. med.

Klinikum der Universität München – Großhadern
Herzchirurgische Klinik und Poliklinik
Marchioninistraße 15
81377 München

Mira, Oliver, Dr. med.

Deutsches Herzzentrum Berlin
Klinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie
Augustenburger Platz 1
13353 Berlin

Morshuis, Michiel, Dr. med.

Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen
Klinik für Thorax- und Kardiovaskularchirurgie
Georgstraße 11
32545 Bad Oeynhausen

Ortmann, Philipp

Universitätsklinikum Düsseldorf
Klinik für Kardiovaskuläre Chirurgie
Moorenstraße 5
40225 Düsseldorf

Özpeker, Cenk, Dr. med.

Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen
Klinik für Thorax- und Kardiovaskularchirurgie
Georgstraße 11
32545 Bad Oeynhausen

Potapov, Evgenij, PD Dr. med.

Deutsches Herzzentrum Berlin
Klinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie
Augustenburger Platz 1
13353 Berlin

Röfe, Daniela

Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen
Klinik für Thorax- und Kardiovaskularchirurgie
Georgstraße 11
32545 Bad Oeynhausen

Rukosujew, Andreas, PD Dr. med.

Universitätsklinikum Münster
Klinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie
Albert-Schweitzer-Campus 1
48149 Münster

Saeed, Diyar, PD Dr. med.

Universitätsklinikum Düsseldorf
Klinik für Kardiovaskuläre Chirurgie
Moorenstraße 5
40225 Düsseldorf

Schibilsky, David, Dr. med.

Thorax- Herz- und Gefäßchirurgie
Universitätsklinikum Tübingen
Hoppe-Seyler-Straße 3
72076 Tübingen

Schlensak, Christian, Prof. Dr. med.

Thorax- Herz- und Gefäßchirurgie
Universitätsklinikum Tübingen
Hoppe-Seyler-Straße 3
72076 Tübingen

Schmid, Christof, Prof. Dr. med.

Universitätsklinikum Regensburg
Klinik für Herz-, Thorax- und herznahe Gefäßchirurgie
Franz-Josef-Strauß-Allee 11
93053 Regensburg

Schmitto, Jan D., PD Dr. med.

Medizinische Hochschule Hannover
Klinik für Herz-, Transplantations- und Gefäßchirurgie
Carl-Neuberg-Str. 1
30625 Hannover

Schulz, Uwe

Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen
Klinik für Thorax- und Kardiovaskularchirurgie
Georgstraße 11
32545 Bad Oeynhausen

Siepe, Matthias, Prof. Dr. med.

Chirurgisches Universitätsklinikum Freiburg
Abteilung Herz- und Gefäßchirurgie
Hugstetterstr. 55
79106 Freiburg im Breisgau

Sodian, Ralf, Prof. Dr. med.

Klinikum der Universität München – Großhadern
Herzchirurgische Klinik und Poliklinik
Marchioninstraße 15
81377 München

Stepanenko, Alexander, MD

Deutsches Herzzentrum Berlin
Klinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie
Augustenburger Platz 1
13353 Berlin

Strüber, Martin, Prof. Dr. med.

Universitätsklinikum Leipzig
Herzzentrum Leipzig GmbH
Strümpellstraße 39
04289 Leipzig

Tandler, René, Dr. med.

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Herzchirurgische Klinik
Krankenhausstraße 12
91054 Erlangen

Tjan, Tonny Djie-Tiong, Prof. Dr. med.

Universitätsklinikum Münster
Klinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie
Albert-Schweitzer-Campus 1
48149 Münster

Wagner, Florian Mathias, PD Dr. med.

Herz- und Gefäßchirurgie Universitäres Herzzentrum Hamburg
Martinistr. 52
20246 Hamburg

Welp, Hendryk, Dr. med.

Universitätsklinikum Münster
Klinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie
Albert-Schweitzer-Campus 1
48149 Münster

Geschichte der mechanischen Kreislaufunterstützung

U. Boeken

- 1.1 Grundlegendes – 2**
- 1.2 Hintergrund – 2**
- 1.3 Historie – 3**
- 1.4 Ventrikuläre Unterstützungssysteme (VAD) –
Entwicklung und Einteilung – 4**
 - 1.4.1 Kurzzeit-Unterstützungssysteme – 4
 - 1.4.2 VAD – 1.Generation – 4
 - 1.4.3 VAD – 2. Generation – 5
 - 1.4.4 VAD – 3. Generation – 5
- 1.5 Vollständiges Kunstherz (TAH) – 6**
- 1.6 Zusammenfassung und Ausblick – 7**

1.1 Grundlegendes

Die aktuellsten Daten zeigen, dass weltweit etwa 30 Mio. Menschen an einer fortgeschrittenen, terminalen Herzinsuffizienz leiden. Jährlich gibt es etwa 2 Mio. Neuerkrankungen mit ischämischer, viraler oder idiopathischer Ätiologie. Die Behandlung einer fortgeschrittenen Herzinsuffizienz besteht aus 3 Säulen: konservativ-medikamentöse, operativ-kausale Therapie der Ursache und als letzte Option Transplantation oder Kreislaufunterstützung. Wenn die konventionelle, medikamentöse Therapie ebenso wie operative Maßnahmen keine Besserung herbeiführen können, stellt die Transplantation oder mechanische Kreislaufunterstützung (MKU) mittels ventrikulärem Unterstützungssystem (*ventricular assist device, VAD*) oder gar mittels vollständigem Kunstherz (*total artificial heart, TAH*) die letzte Option für den Patienten dar (Gregory et al. 2011; Thunberg et al. 2010; Arusoglu et al. 2010).

1.2 Hintergrund

Die erstmalige Anwendung einer Herz-Lungenmaschine (HLM) in der Klinik durch J. Gibbon 1953 stellt sicherlich einen Meilenstein für den gesamten Bereich der MKU dar. Die ersten Ergebnisse waren damals allerdings so ernüchternd, dass erst 1955 nach diversen Weiterentwicklungen durch J. Kirklin an der Mayo-Klinik die »Mayo-Gibbon-HLM« wieder zur Anwendung kam und die Weiterentwicklung der offenen Herzchirurgie ermöglichte. Erst 1960 waren die HLM und auch die angewendeten Techniken durch Kirklin und Lillehei so weit entwickelt, dass Herzchirurgie routinemäßig möglich war (Potapov et al. 2011; Kozik u. Plunkett 2011).

Mit zunehmender Häufigkeit herzchirurgischer Eingriffe wuchs auch der Bedarf an einer Unterstützung für Patienten mit einem sog. Postkardiotomie-Syndrom. Die intraaortale Ballonpumpe war hier das erste eingesetzte »Device«, welches auch heute noch weltweit am häufigsten zum Einsatz kommt. Die konsequente Weiterverfolgung der »post-HLM«-Unterstützungssysteme hat heute zur Entwicklung diverser einsetzbarer VAD, zum einen zur Überbrückung bis zur Transplantation, aber auch als »Destination-Therapie« (MKU als definitive Therapie), geführt. Obwohl bereits sehr zuverlässige Systeme zum Einsatz kommen, stellt die Entwicklung eines vollständig implantierbaren TAH auch heute noch einen der vordringlichen Forschungsschwerpunkte auf diesem Gebiet dar, wie in weiteren Kapiteln ausführlich dargestellt wird.

1.3 Historie

Die Vorarbeiten von N. Shumway und seinen Mitarbeitern in den frühen 60ern führten zur ersten Herztransplantation durch C. Barnard 1967. Diese neue Option der Therapie für Patienten mit terminaler Herzinsuffizienz ist weit bekannter als die Tatsache, dass bereits 4 Jahre zuvor durch M. DeBakey das erste VAD bei einem Patienten mit Postkardiotomie-Syndrom nach einem Aortenklappenersatz eingesetzt wurde. 1969 wurde durch Cooley das erste TAH implantiert (Krabatsch et al. 2011b; 2011c).

Die Entwicklung der ersten VAD für den klinischen Einsatz Ende der 1980er-Jahre war der nächste Meilenstein im Bereich der MKU. Diese Geräte der ersten Generation erzeugten einen pulsatilen Fluss, waren sehr groß und auch störungsanfällig. Der zunehmende Mangel an Spenderorganen förderte die Weiterentwicklung auf diesem Gebiet, so dass die Geräte immer kleiner wurden und bei geringerer Thrombogenität eine längere Haltbarkeit aufwiesen. In den 90er-Jahren kam es dann nach Entwicklung von VAD mit einem kontinuierlichen Blutfluss zum Einsatz der ersten axialen Flusspumpe in Deutschland. Es kam zu einem deutlichen Anstieg der Implantationszahlen, da die Geräte kleiner und leichter zu implantieren waren. Geringere Komplikationsraten und die zunehmende Zahl von Hinweisen darauf, dass ein eigentlich unphysiologischer, kontinuierlicher Blutfluss ohne wesentliche Nachteile ist, trugen außerdem zum Anstieg der Implantationszahlen bei.

Die sog. REMATCH-Studie, die 2001 publiziert wurde, zeigte, dass bei Patienten mit terminaler Herzinsuffizienz ohne Transplantations-Option durch die Implantation eines linksventrikulären VAD ein deutlicher Überlebensvorteil im Vergleich zur medikamentös-konservativen Therapie erzielt werden konnte. Dies führte zu einem nochmaligen Anstieg der Implantationszahlen.

Die oben beschriebenen Geräte der zweiten und nunmehr dritten Generation sind heute erste Wahl, sowohl für die »Bridging-Therapie« bis zum Vorliegen eines Spenderorgans, als auch für die permanente (Destination-)Therapie bei Vorliegen von Kontraindikationen für eine Transplantation.

1.4 Ventrikuläre Unterstützungssysteme (VAD) – Entwicklung und Einteilung

Entsprechend ihrer Funktionsweise lassen sich eigentlich fast alle Pumpen in folgende Klassen einteilen

- Gegenpulsation (IABP),
- Zentrifugalpumpen,
- Volumen-Verdrängungspumpen,
- axiale Flusspumpen.

In den aktuell eingesetzten VAD-Systemen finden sich kontinuierliche Flusspumpen (zentrifugal oder axial). Der entscheidende Vorteil zu pulsatilem Systemen besteht hier sicherlich in der längeren Haltbarkeit. Der kontinuierliche Fluss ist, wie oben schon beschrieben, nicht nachteilig für den Patienten.

Ebenso lassen sich die Geräte aber auch nach der Einsatzdauer einteilen, die natürlich von der angewandten Technik abhängig ist. Im Folgenden sollen nur exemplarisch einige Vertreter jeder Gruppe genannt werden, ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

1.4.1 Kurzzeit-Unterstützungssysteme

- Intraaortale Ballon-Gegenpulsation (IABP)
- Zentrifugalpumpen, »1. Generation« (Biomedicus, Sarns)
- Zentrifugalpumpen, »2. Generation« (CentriMag, Rotaflow)
- weitere: TandemHeart, Abiomed BVS 5000i, Impella

1.4.2 VAD – 1.Generation

Diese Systeme zeichnen sich durch einen pulsatilem Fluss aus, es sind in der Regel »Verdrängerpumpen«

- HeartMate XVE (LVAD),
- Thoratec IVAD, PVAD (intra-, parakorporal),
- Medos VAD (parakorporal, L-, R-, BiVAD),
- Novacor LVAS,
- Arrow LionHeart LVAD 2000 (komplett implantierbar, eingestellt 2005),
- Berlin Heart Excor VAD parakorporales L-, R-, BiVAD-System ▶ Abschn. 4.1.2.

1.4 · Ventrikuläre Unterstützungssysteme (VAD)

Das parakorporale Herzunterstützungssystem wurde in Deutschland in den 60er-Jahren durch E.S. Bücherl im Klinikum Charlottenburg in Berlin erstmals angewendet und von dessen Nachfolger R. Hetzer in der Entwicklung weitergeführt. Die erste klinische Anwendung des Berlin Heart Excor VAD zur linksventrikulären Unterstützung wurde im Jahr 1987 vorgenommen. Das System wurde in der Folge technisch kontinuierlich verbessert. Weltweit wurden bis zum Februar 2012 über 2.100 Excor Adults und etwa 1.000 Excor Pediatric Systeme implantiert ▶ Abschn. 4.1.2 (Welp et al. 2010; Sindermann et al. 2009).

1.4.3 VAD – 2. Generation

Diese Systeme zeichnen sich durch einen kontinuierlichen oder deutlich reduzierten pulsatilen Fluss aus, es sind in der Regel axiale Flusspumpen

- Micromed DeBakey VAD,
- Jarvik 2000,
- HeartMate II: FDA-Zulassung zur Destination-Therapie, über 4.000 Einsätze, damit meist eingesetztes LVAD.

1.4.4 VAD – 3. Generation

Diese Systeme sind u. a. aufgrund der magnetischen Lagerung des Antriebs für eine längere Haltbarkeit konzipiert. Sie sind kleiner als die Geräte der 2. Generation, weniger invasiv zu implantieren und in Zukunft für eine vollständige Implantation aufgrund des transkutanen Energietransfers entwickelt

- Incor LVAD,
- VentrAssist,
- WorldHeart,
- DuraHeart,
- CorAide,
- HeartWare HVAD: Dieses System hat sicherlich aktuell die größte klinische Relevanz aufgrund weiter vereinfachter Implantierbarkeit und sehr geringer Größe.

Es werden aktuell einige Weiterentwicklungen in diesem Bereich präklinisch getestet, besonders erwähnenswert erscheinen hier

- HeartMate III,

- HeartMate X,
- HeartWare MVAD.

Alle 3 Systeme werden im ► Abschn. 10.3 detailliert beschrieben.

1.5 Vollständiges Kunstherz (TAH)

Im Jahr 1958 wurde durch Kolff und Akutsu erstmals die Implantation eines Kunstherzens bei einem Hund beschrieben. Das pneumatische System konnte den Kreislauf für 90 min aufrechterhalten, wurde jedoch nie klinisch eingesetzt (► Abschn. 5.1).

1969 wurde der erste Patient mit einem totalen Kunstherzen versorgt. Es handelte sich hierbei um eine pneumatisch betriebene biventrikuläre Pumpe. Liotta, Cooley et al. erreichten eine Unterstützungszeit von 64 h bis zur Transplantation, die der Patient allerdings nur 32 h überlebte, aufgrund einer fulminanten Pneumonie.

Erst 12 Jahre später kam es zum nächsten Einsatz eines TAH durch Kolff und Akutsu.

Das 1981 eingesetzte System »Akutsu Model III« machte die zweite Überbrückung zur Transplantation möglich; es handelte sich bereits um ein System, welches zwei doppelkammerige Pumpenteile zu einem Kunstherzen vereinte (► Abschn. 5.1).

1982 implantierten Joyce, deVries et al. ein Jarvik-7-TAH als permanente Unterstützung. Der erste Patient überlebte 112 Tage am System. Es wurden hiernach noch 4 weitere Implantationen mit unterschiedlich langen Unterstützungszeiten durchgeführt. Erst zwischen 1985 und 1992 wurden fast 200 Patienten mit Jarvik-7 und Jarvik-7-70 Pumpen behandelt.

Weitere 8, ebenfalls pneumatisch betriebene TAH-Arten wurden in dieser Zeit in geringer Zahl weltweit implantiert. Lediglich das CardioWest System als Weiterentwicklung des Jarvik-7-TAH wurde zunehmend als »Bridge-to-Transplant«(BTT)-Option eingesetzt. Es wird seit 2002 durch die Firma Syncardia vertrieben.

2006 konnte durch Verwendung des ursprünglichen Berlin Heart Excor Mobile Drivers – nach entsprechender Modifikation – eine bessere Mobilisation des Patienten erreicht werden, mit der Möglichkeit der ambulanten Führung. Mittlerweile sind verschiedene, immer kleinere Driver für das System verfügbar.

2012 wurde weltweit die tausendste Implantation eines CardioWest Systems durchgeführt (El-Banayosy et al. 2005; Morshuis et al. 2007).

Demgegenüber steht das AbioCor-System, das ein hydraulisches Pumpensystem verwendet. Die Besonderheit des AbioCor-TAH besteht darin, dass die vollständige

ge Implantation des Systems aufgrund des »Transkutanen Energie Transfers« (TET) möglich ist. Eine Driveline, die den Körper verlässt, ist von daher nicht mehr erforderlich, das System ist komplett implantierbar. Nachdem insgesamt 14 Patienten mit einem AbioCor versorgt worden waren, wurde aufgrund diverser Probleme 2004 die Implantation gestoppt. Erst 2006 wurde durch die FDA wieder eine eingeschränkte Zulassung im Sinne einer »Humanitarian device exemption (HDE)« erteilt. Aktuell ist das Device in Deutschland nicht im klinischen Einsatz.

Eine aktuelle Entwicklung in Deutschland (Aachen) auf dem Gebiet der TAH ist das »ReinHeart«. Das Kunstherz wiegt weniger als 1.000 g. Derzeit wird ein vorklinischer Prototyp sowie eine chirurgische Prozedur für den Einsatz des Kunstherzens realisiert. ReinHeart soll wie AbioCor vollständig implantierbar sein.

1.6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Verbesserungen im Bereich der MKU waren in den letzten Jahrzehnten immens und nachhaltig. Der primäre Fortschritt durch die Weiterentwicklung der Herz-Lungen-Maschine ermöglichte erst die routinemäßige Durchführung von Herzchirurgie. Hier wurden die Grundlagen für die Entwicklung ventrikulärer Unterstützungssysteme und vollständiger Kunstherzen gelegt. Die Überlebensdauer aber auch die Lebensqualität, von Patienten mit terminaler Herzinsuffizienz hat sich weltweit durch die Weiterentwicklung der Unterstützungssysteme signifikant verbessert. Die Verbesserungen betrafen zunächst die Bereiche der Überbrückung bis zur Transplantation oder bis zur myokardialen Erholung, aktuell wirken sie sich profund auf den Bereich der Destination-Therapie aus. Die Verkleinerung der Pumpen verspricht in Zukunft auch eine effektive Behandlung der Herzinsuffizienz im pädiatrischen Bereich.

- **Zukünftig werden bei der Entwicklung neuer Devices sicherlich folgende Aspekte eine entscheidende Rolle spielen:**
- weitere Verkleinerung der Pumpen für eine einfachere Implantation und für biventrikuläre Unterstützung (Krabatsch et al. 2011a),
 - Verwendung weniger thrombogener Materialien zur Reduktion des Antikoagulationsbedarfs,
 - verlängerte Haltbarkeit der Pumpen durch Optimierung des Designs und der Materialien und die Verwendung neuer Technologien,
 - zunehmende Verwendung des transkutanen Energietransfers zur Vermeidung von Drivelines,

- **Verwendung von verkleinerten und verbesserten Energiequellen mit deutlich längerer Energiebereitstellung und zuletzt**
- **die Entwicklung zuverlässiger, vollständig implantierbarer Systeme für eine effektive Langzeit-Unterstützung der Patienten.**

Literatur

- Arusoglu L, Reiss N, Morshuis M et al (2010) The Thoratec system implanted as a modified total artificial heart: the Bad Oeynhausen technique. *Heart Surg Forum* 13(6): E391-E393
- El-Banayosa A, Arusoglu L, Morshuis M et al (2005) CardioWest total artificial heart: Bad Oeynhausen experience. *Ann Thorac Surg* 80(2): 548-552
- Gregory SD, Timms D, Gaddum N et al (2011) Biventricular assist devices: a technical review. *Ann Biomed Eng* 39(9): 2313-28
- Kozik DJ, Plunkett MD (2011) Mechanical circulatory support. *Organogenesis* 7 (1): 50-63
- Krabatsch T, Potapov E, Stepanenko A et al (2011a) Biventricular circulatory support with two miniaturized implantable assist devices. *Circulation* 13;124(11 Suppl): 179-186
- Krabatsch T, Schweiger M, Stepanenko A et al (2011b) Technical possibilities and limitations of mechanical circulatory support. *Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther* 46(6):414-21
- Krabatsch T, Schweiger M, Stepanenko A et al. (2011c) Fortschritte bei implantierbaren mechanischen Kreislaufunterstützungssystemen. *Herz* 36 (7): 622-629
- Morshuis M, Reiss N, Arusoglu L et al (2007) Implantation of CardioWest total artificial heart for irreversible acute myocardial infarction shock. *Heart Surg Forum* 10(4): E251-E256
- Potapov EV, Krabatsch T, Ventura HO et al (2011) Advances in mechanical circulatory support: year in review. *J Heart Lung Transplant* 30(5):487-93
- Sindermann JR, Hoffmeier A, Tjan TD, Scheld HH (2009) Switch from assist device to total artificial heart to improve cardiac output. *Thorac Cardiovasc Surg* 57(1): 52-53. Epub 2009 Jan. 23
- Tenderich G, Zittermann A, Schulz U et al (2008) Heart transplantation at the Heart Center North Rhine-Westfalia. *Clin Transpl* 151-161
- Thunberg CA, Gaitan BD, Arabia FA et al (2010) Ventricular assist devices today and tomorrow. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 24(4): 656-80
- Welp H, Rukosujew A, Tjan TD, Hoffmeier A et al (2010) Effect of pulsatile and non-pulsatile left ventricular assist devices on the renin-angiotensin system in patients with end-stage heart failure. *Thorac Cardiovasc Surg* 58 Suppl 2: S185-S188