

# Überwachung der Herz-Kreislauf-Funktion

*R. Larsen (unter Mitarbeit von H. Groesdonk)*

- 2.1      Elektrokardiogramm – 29**
- 2.2      Arterielle Druckmessung – 29**
  - 2.2.1      Bestandteile einer Druckmesseinrichtung – 30
  - 2.2.2      Arterielle Kanülierung – 31
  - 2.2.3      Störungen der Druckmessung – 32
- 2.3      Zentraler Venendruck – 33**
  - 2.3.1      Zentrale Venendruckkurve – 33
  - 2.3.2      Aussage des zentralen Venendrucks – 33
  - 2.3.3      Zentrale Venenkatheter – 34
  - 2.3.4      Messung des zentralen Venendrucks – 34
- 2.4      Pulmonalarteriendrucke – 34**
  - 2.4.1      Pulmonaliskatheter – 35
  - 2.4.2      Indikationen – 36
  - 2.4.3      Einführen des Pulmonaliskatheters – 36
  - 2.4.4      Messungen mit dem Pulmonaliskatheter – 38
  - 2.4.5      Komplikationen des Pulmonaliskatheters – 39
- 2.5      HZV-Messung durch arterielle Pulskonturanalyse und andere Verfahren – 40**
  - 2.5.1      Cz-Modell von Wesseling – 40
  - 2.5.2      PICCO-System – 41
  - 2.5.3      LiDCO-System – 44
  - 2.5.4      Transösophageale Ultraschallmessung – 44

- 2.6 Linker Vorhofdruck – 45
- 2.7 Transösophageale Echokardiographie (TEE) – 45
- 2.8 Beurteilung der wissenschaftlichen Evidenz – 46
- Weiterführende Literatur – 46

Wie bei kaum einer anderen Operation steht bei Eingriffen am Herzen die Herz-Kreislauf-Funktion im Mittelpunkt aller Überwachungsmaßnahmen. Zur Überwachung ist ein invasives Vorgehen erforderlich, v. a. weil die Patienten häufig schwer krank sind und zudem bei der Narkoseeinleitung sowie intraoperativ und nach dem Eingriff erhebliche Störungen der Herz-Kreislauf-Funktion auftreten können. In [Tab. 2.1](#) sind die wichtigsten Herz-Kreislauf-Parameter für Herzoperationen zusammengefasst.

## 2.1 Elektrokardiogramm

Bei jeder Herzoperation wird das EKG kontinuierlich überwacht; mit der Überwachung wird sofort nach Ankunft des Patienten im Narkoseeinleitungsraum begonnen. Der EKG-Monitor informiert über:

- Herzfrequenz und Herzrhythmus,
- Störungen von Rhythmus und Frequenz,
- Myokardischämie, Myokardinfarkt,
- Herzblock,
- Wirkungen von Medikamenten,
- Elektrolytstörungen,
- Art des Herzstillstands: Asystolie, Kammerflimmern, pulslose elektrische Aktivität (PEA) bzw. elektromechanische Entkoppelung.

### ■ Elektroden

In der Herzchirurgie werden grundsätzlich Hautelektroden zum Einmalgebrauch mit aufgetragenen Elektrodengel aufgeklebt. Ein gutes Elektrodensystem ist erforderlich, damit der elektrische Impuls störungsfrei auf den Monitor übertragen wird. Die Reinigung der Haut im Bereich der Ableitungsstellen verbessert die Qualität der Ableitungen.

### ■ Ableitungen

Am häufigsten wird intraoperativ die bipolare Standardableitung II angewandt: Sie registriert die Potentialdifferenzen zwischen rechtem Arm und linkem Bein. Die Achse dieser Ableitung verläuft parallel zur Achse zwischen Sinusknoten und AV-Knoten, sodass die P-Welle groß und leicht auffindbar ist. Auf diese Weise können supraventrikuläre Rhythmusstörungen leichter von ventrikulären unterschieden werden.

Im Rahmen herzchirurgischer Eingriffe wird zusätzlich eine modifizierte **V<sub>5</sub>-Ableitung** empfohlen, weil in Ableitung II Ischämien der Vorderwände und der Seitenwand weniger gut entdeckt werden können. Die V<sub>5</sub>-Elektrode wird im 5. ICR in der linken vorderen Axillarlinie angebracht ([Abb. 2.1](#)); sie kann auch bei medianer Sternotomie am Thorax verbleiben.

Um Interferenzen des EKG-Monitors mit dem Elektroauter zu vermindern, sollte die Elektroauterterdungsplatte so nahe wie möglich am Operationsgebiet platziert werden.

## 2.2 Arterielle Druckmessung

Bei allen Herzoperationen wird der Blutdruck kontinuierlich intraarteriell gemessen. Der arterielle Mitteldruck (MAP) hängt vom Herzzeitvolumen (HZV) und vom totalen peripheren Widerstand ab:

$$\text{MAP} = \text{HZV} \times \text{TPR}$$

Aus dieser Formel ergeben sich die Grenzen der arteriellen Druckmessung: Sie ermöglicht keine exakten Aussagen über den **Blutfluss**. So kann der arterielle Blutdruck normal sein, weil der Widerstand angestiegen ist, während gleichzeitig das Herzzeitvolumen abgefallen ist. Der arterielle Mitteldruck kann daher nur als grober Indikator der Organdurchblutung angesehen werden. Er wird elektronisch bestimmt oder nach folgender Formel errechnet:

$$\text{MAP} = \text{diastolischer Druck} + 1/3 (\text{systolischer Druck} - \text{diastolischer Druck})$$

Die direkte arterielle Druckmessung weist folgende Vorteile auf:

- kontinuierliche Schlag-für-Schlag-Registrierung,
- dauerhafte Messgenauigkeit,
- rasches Erkennen hämodynamischer Störungen,
- direkte Beobachtung der hämodynamischen Auswirkungen von Herzrhythmusstörungen,
- Beurteilung der Myokardkontraktilität aus der maximalen Druckerhöhungsgeschwindigkeit der Aortenkurve ( $dp/dt_{\text{max}}$ ),
- Ableitung des Schlagvolumens aus dem systolischen Anteil der Druckkurve,
- Zugang für arterielle Blutproben.

Tab. 2.1 Wichtige Herz-Kreislauf-Parameter und ihre Abkürzungen

Parameter	Abkürzung/Formel	Mittelwert	Bereich	Einheit
Rechtsatrialer Druck	RAP	3	0–6	mm Hg
Rechtsventrikulärer Druck	RVP	25/5 (s/ed)	15–30/0–8	mm Hg
Pulmonalarterieller Druck	PAP	23/9/15 (s/d/m)	15–30/5–15/10–20	mm Hg
Pulmonalarterieller Okklusionsdruck	PAOP = PCWP	10	5–15	mm Hg
Herzminutenvolumen	CO		3,0–7,0	l/min
Herzindex	CI = CO/KOF		2,5–4,5	l/min/m <sup>2</sup>
Schlagvolumen	SV = (CO/HR) × 1000	60–90	ml/Schlag	
Schlagvolumenindex	SI = SV/KOF		40–60	ml/Schlag
Rechtsventrikulärer Schlagarbeitsindex	RVSWI = CI × (PAP–RAP) × 13,6/HR		8–12	g×m/m <sup>2</sup>
Linksventrikulärer Schlagarbeitsindex	LVSWI = CI × (MAP–PCWP) × 13,6/HR		50–60	g×m/m <sup>2</sup>
Systemischer Gefäßwiderstand	SVR = (MAP–RAP)/CO × 80		900–1500	dynexs×cm <sup>–5</sup>
Pulmonaler Gefäßwiderstand	PVR = (PAP–PCWP)/CO × 80		120–250	dyne × s × cm <sup>–5</sup>
Pulmonalarterielle (gemischtvenöse) O <sub>2</sub> -Sättigung	S <sub>v</sub> O <sub>2</sub>		70–80	%
Arterieller O <sub>2</sub> -Gehalt	C <sub>a</sub> O <sub>2</sub> = 1,34 × Hb × S <sub>a</sub> O <sub>2</sub> + 0,0031 × p <sub>a</sub> O <sub>2</sub>		≈19	ml/dl
Gemischtvenöser O <sub>2</sub> -Gehalt	C <sub>v</sub> O <sub>2</sub> = 1,34 × Hb × S <sub>v</sub> O <sub>2</sub> + 0,0031 × S <sub>v</sub> O <sub>2</sub>		≈14	ml/dl
Gesamtkörper-O <sub>2</sub> -Angebot	DO <sub>2</sub> = C <sub>a</sub> O <sub>2</sub> × CI		>550	ml/min/m <sup>2</sup>
Gesamtkörper-O <sub>2</sub> -Verbrauch	VO <sub>2</sub> = (C <sub>a</sub> O <sub>2</sub> –S <sub>v</sub> O <sub>2</sub> ) × CI		>170	ml/min/m <sup>2</sup>

Abkürzungen (überwiegend nach den engl. Bezeichnungen):

d = diastolisch; ed = enddiastolisch; Hb = Hämoglobingehalt; HR = „heart rate“; KOF = Körperoberfläche; m = mittel; MAP = mittlerer arterieller Druck; p<sub>a</sub>O<sub>2</sub> = arterieller O<sub>2</sub>-Partialdruck; p<sub>v</sub>O<sub>2</sub> = gemischtvenöser O<sub>2</sub>-Partialdruck; s = systolisch; S<sub>a</sub>O<sub>2</sub> = arterielle O<sub>2</sub>-Sättigung; S<sub>v</sub>O<sub>2</sub> = gemischtvenöse Sauerstoffsättigung

### 2.2.1 Bestandteile einer Druckmesseinrichtung

Die wichtigsten Bestandteile des Druckmesssystems sind:

- Druckaufnehmer (Transducer),
- Verstärker,
- Anzeige,
- arterielle Kanüle oder Katheter mit Zuleitungen.

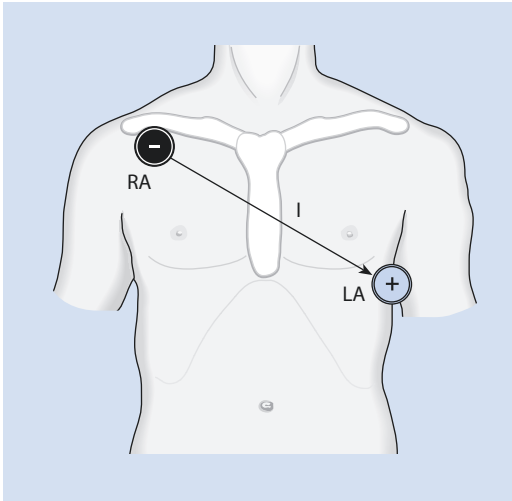
Druckaufnehmer wandeln mechanische in elektrische Energie um: Der in der Arterie durch den Auswurf von Blut aus dem Herzen entstehende Druck wird über die arterielle Kanüle auf die

Membran des Druckaufnehmers übertragen, in ein elektrisches Signal umgewandelt und auf diese Weise zum Verstärker geleitet. Für genaue und reproduzierbare Druckmessungen muss der Druckaufnehmer an einen Referenzpunkt platziert werden:

➤ **Referenzpunkt für arterielle Druckmessungen ist die Thoraxmitte des Patienten.**

### Verstärker (Druckmodul) und Anzeige

Der Verstärker nimmt das schwache elektrische Signal des Transducers auf und verstärkt es. Das verarbeitete Signal wird analog als Kurve auf einem



■ **Abb. 2.1** Modifizierte intraoperative V5-Ableitung. Die positive Elektrode befindet sich in V5-Position, die negative rechts oben, unterhalb der Clavicula (entspricht dem rechten Arm). Am Monitor wird hierfür Ableitung I eingestellt (RA = rechter Vorhof, LA = linker Vorhof)

Bildschirm und/oder Schreiber aufgezeichnet oder digital als Druckwert in Millimeter-Quecksilbersäule (mm Hg) angezeigt. Die meisten Geräte verfügen über beide Anzeigen.

Vor der Druckmessung sind 2 Maßnahmen erforderlich:

- **Nullabgleich:** Um den Nullpunkt festzulegen, wird der Druckaufnehmer zur Atmosphäre (Operationssaal) hin geöffnet, zum Gefäß hin verschlossen. Der nun auf der Transducer-membran lastende Atmosphärendruck wird als Nulldruck bezeichnet. Für den Nullabgleich wird ein entsprechend gekennzeichnete Knopf am Verstärker gedrückt.
- **Kalibrierung:** Bei der Kalibrierung wird festgelegt, welcher Ausschlag des elektrischen Signals (Höhe der Druckkurve) einem bestimmten Blutdruckwert in Millimeter-Quecksilbersäule (mm Hg) entsprechen soll, z. B. 1 cm Amplitude entspricht 10 mm Hg. Für die Kalibrierung wird der Kalibrierungsknopf des Verstärkers gedrückt. Sollen niedrige Drücke gemessen werden (z. B. Pulmonalisdruk oder zentraler Venendruck), wird ein höherer Ausschlag des Kurvensignals gewählt (hierzu Schalter „Verstärkung“ betätigen).

## 2.2.2 Arterielle Kanülierung

Am häufigsten werden beim Erwachsenen 18- oder 20-gg.-Kunststoffkanülen für die arterielle Druckmessung eingesetzt, gelegentlich auch 17-, 18- oder 20-gg.-Katheter.

### A. radialis

Dies ist das Gefäß der 1. Wahl für die arterielle Druckmessung in der Herzchirurgie. Grund: einfach zu kanülieren, guter Kollateralkreislauf, intraoperativ leicht zugänglich. Bevorzugt wird die nichtdominante Hand kanüliert, sofern keine operativen Gesichtspunkte dagegen sprechen. Vor der Kanülierung kann der Allen-Test durchgeführt werden.

### ■ Allen-Test

Der Patient ballt die Hand zur Faust, der Anästhesist drückt nun die A. radialis und die A. ulnaris am Handgelenk ab, bis die Hand blass wird. Danach wird die A. ulnaris freigegeben und die Hautfarbe der geöffneten Hand beobachtet: Bei normalem Kollateralkreislauf wird die Hand innerhalb von 5–10 s wieder rosig. Kehrt die normale Hautfarbe erst später als 10 s zurück, sollte die A. radialis nicht kanüliert werden. Der praktische Wert des Allen-Tests für die *Vorhersage* punktionsbedingter Komplikationen ist gering. Ist der Allen-Test positiv, sollten die Durchblutungsverhältnisse sonographisch abgeklärt werden.

### ■ Kanülierung

Für die Kanülierung wird das Handgelenk überstreckt, z. B. durch Unterlegen eines kleinen zusammengerollten Handtuchs. Nach Desinfektion der Haut und Setzen einer Lokalanästhesiequaddel wird die Kanüle unmittelbar oberhalb des Lig. carpalum in einem Winkel von etwa 30° parallel zur Arterie eingestochen und vorgeschoben. Beim Eintritt der Kanüle in das Gefäß fließt Blut aus der Nadel: Jetzt die Kanüle weiter senken und noch 1–2 mm insgesamt vorschieben, dann die äußere Plastikkanüle weit in das Gefäß vorschieben und die Stahlkanüle entfernen.

Beim Kanülieren sollte die Hinterwand des Gefäßes möglichst nicht durchstochen werden, um Blutungen zu vermeiden. Lässt sich trotz Austritt von Blut aus dem Kanülenende die Plastikkanüle nicht vorschieben, liegt die Kanüle lediglich

mit der Öffnung der **Stahlspitze** im Gefäß; sie muss dann – vorsichtig – insgesamt (flach) weiter vorgeschoben werden. Gelegentlich ist auch ein ausgeprägter Spasmus der Arterie Ursache für Kanülierungsschwierigkeiten.

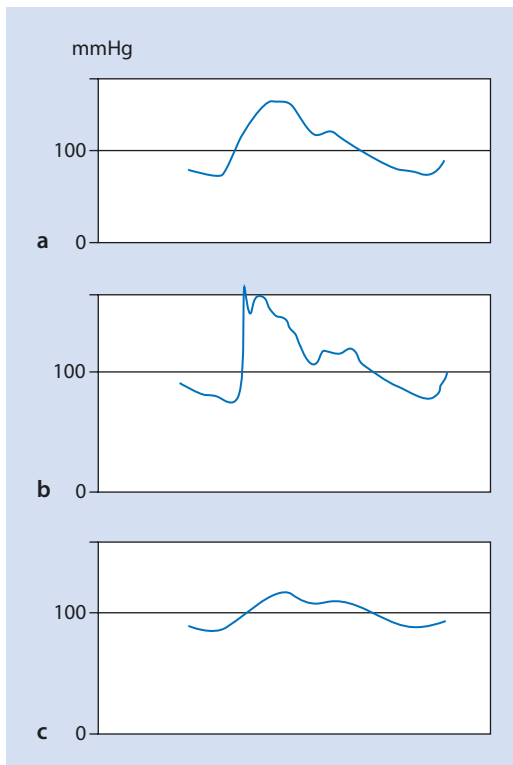
Nach der Kanülierung wird die Überstreckung im Handgelenk sofort aufgehoben, damit der N. medianus nicht beschädigt wird. Die Kanüle wird mit einer kurzen, starren Zuleitung, an deren distalem Ende ein Dreivegehahn befestigt ist, verbunden. Um unnötige Bewegungen der Kanüle mit Schädigungen der Gefäßwand zu vermeiden, sollte kein Dreivegehahn direkt an der Kanüle befestigt werden. Die kurze Zuleitung wird über eine längere Zuleitung mit dem Druckaufnehmer verbunden.

### ■ Komplikationen

Thrombose der A. radialis, Embolien, Hämatome, Fingernekrosen, arteriovenöse Fisteln.

### Andere Arterien

- **A. ulnaris:** Sie wird nur gelegentlich kanüliert, z. B. wenn der Allen-Test für die A. ulnaris nicht ausreichend ist, jedoch bei Freigabe der A. radialis eine normale Durchblutung eintritt. Dann liegt eine dominante A. radialis vor.
- **A. brachialis:** Dieses Gefäß wird ebenfalls nur selten kanüliert oder katheterisiert, z. B. in Seldinger-Technik mit einem 18- oder 20-gg.-Katheter. Die linke Arterie wird bevorzugt, um einer zerebralen Katheterembolie vorzubeugen.
- **A. femoralis:** Diese Arterie ist leicht in Seldinger-Technik mit einem 18-gg.-Katheter zu kanülieren. Der Katheter ist auch für längere Liegezeiten in der postoperativen Intensivbehandlung geeignet. Die Komplikationsrate ist bei sorgfältiger Technik niedrig.
- **A. dorsalis pedis:** Diese Arterie auf dem Fußrücken sollte nur in Ausnahmefällen kanüliert werden. Vor der Kanülierung muss die Funktionsfähigkeit des Kollateralkreislaufs über die A. tibialis posterior überprüft werden. Die Qualität der registrierten Druckkurven entspricht nicht denen der zentralen Arterien; sie sind auseinandergezogen. Bei Patienten mit peripheren Durchblutungsstörungen oder Diabetes mellitus darf die A. dorsalis pedis nicht kanüliert werden.



■ **Abb. 2.2** Störungen der arteriellen Druckmessung. **a** Normaler Kurvenverlauf, **b** Kurve verschleiert, **c** Kurve gedämpft

## 2.2.3 Störungen der Druckmessung

Die wichtigsten Störungen der arteriellen Druckmessung sind:

- **Schleuderzacken** (■ **Abb. 2.2b**). Sie entstehen zumeist, wenn eine überlange Zuleitung mit einer 18-gg.-Kanüle in der A. radialis verbunden wurde. Durch eine kleine Luftblase in der Zuleitung kann eine Dämpfung der Kurve erreicht werden.
- **Gedämpfte Kurve** (■ **Abb. 2.2c**). Ist die Kurve gedämpft, wird der systolische Blutdruck zu niedrig und der diastolische Blutdruck zu hoch gemessen. Häufigste Ursachen sind:
  - Luftblasen im System,
  - Blutgerinnsel in Kanüle oder System.
- **Transducer lässt sich nicht abgleichen.** Ursachen:
  - Druckaufnehmer defekt,
  - Druckaufnehmer falsch angeschlossen,
  - Verstärker defekt.

## 2.3 · Zentraler Venendruck

- **Druckkurve driftet.** Ursachen:
  - Warmlaufzeit zu kurz,
  - Kabel abgeknickt.
- **Druck wird zu niedrig angezeigt.** Ursachen:
  - Kurve gedämpft, Luftblasen, Thromben, Gefäßspasmus,
  - Druckaufnehmer nicht richtig abgeglichen,
  - Druckaufnehmer nicht in Referenzhöhe platziert.
- **Druck wird zu hoch angezeigt.** Ursachen:
  - Druckaufnehmer zu tief platziert,
  - Druckaufnehmer nicht richtig abgeglichen.
- **Keine Kurve auf dem Monitor.** Ursachen:
  - Druckaufnehmer falsch angeschlossen,
  - Druckaufnehmer defekt,
  - Verstärker defekt.
- **Direkte Druckmessung entspricht nicht dem Manschettendruck.** Die direkte Druckmessung ist gewöhnlich genauer, besonders bei Hypotension, niedrigem Herzzeitvolumen und peripherer Gefäßkonstriktion.

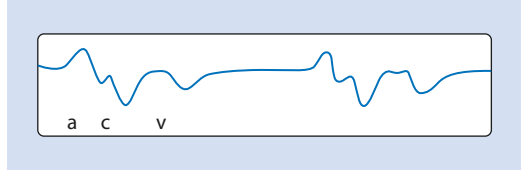
## 2.3 Zentraler Venendruck

Die kontinuierliche elektronische Messung des zentralen Venendrucks (= mittlerer Druck in den großen herznahen Venen) gehört zur Standardüberwachung bei Herzoperationen. Hierzu wird ein Katheter in die obere Hohlvene oberhalb der Hohlvenenkanüle der extrakorporalen Zirkulation vorgeschoben. Der zentrale Venendruck ermöglicht Aussagen über die Funktion des rechten Herzens sowie das Blutvolumen und den Venentonus. Der zentrale Venendruck wird durch Obstruktion zentraler Venen und durch Druckschwankungen im Thorax beeinflusst. Beatmung mit PEEP steigert den zentralen Venendruck.

### 2.3.1 Zentrale Venendruckkurve

In **Abb. 2.3** ist eine zentrale Venendruckkurve dargestellt: Sie besteht aus 3 positiven Wellen (a, c und v) und 2 negativen Wellen (x und y); die Wellen stehen in fester Beziehung zum EKG und haben folgende Bedeutung:

- **a-Welle:** Sie entsteht durch die Kontraktion des rechten Vorhofs; mit Erschlaffung des Vorhofs fällt die Kurve ab, bis die c-Welle beginnt.



**Abb. 2.3** Zentrale Venendruckkurve mit a-, c- und v-Welle

- **c-Welle:** Sie entsteht durch das Vorwölben der Trikuspidalklappe in den rechten Vorhof zu Beginn der Kontraktion des rechten Ventrikels. Die x-Welle wird durch weitere Erschlaffung des Vorhofs und Abwärtsverschiebung von rechtem Ventrikel und Trikuspidalklappe bei der Kammersystole hervorgerufen.
- **v-Welle:** Sie entsteht durch die Füllung des rechten Vorhofs bei geschlossener Trikuspidalklappe, die y-Welle hingegen durch Öffnen der Trikuspidalklappe mit Einstrom von Blut in den rechten Ventrikel.

Folgende **Wellenveränderungen** sind bedeutsam:

- Bei Vorhofflimmern fehlt die a-Welle.
- Hohe a-Wellen treten bei erhöhtem Widerstand gegen die Vorhofentleerung auf, z. B. bei Trikuspidalstenose, Pulmonalstenose, rechtsventrikulärer Hypertrophie, pulmonaler Hypertonie.
- Riesen-a-Wellen sind zu beobachten, wenn der rechte Vorhof sich gegen eine geschlossene Trikuspidalklappe kontrahiert, z. B. bei Knotenrhythmen, ventrikulären Arrhythmien oder Herzblock.
- Hohe v-Wellen bei fehlender x-Welle weisen auf Trikuspidalinsuffizienz hin.

Die Höhe des zentralen Venendrucks entspricht praktisch dem rechten Vorhofdruck (RAP):

➤ **Normalwerte RAP: 1–10 mm Hg, Mittelwert 5 mm Hg.**

### 2.3.2 Aussage des zentralen Venendrucks

Der zentrale Venendruck ist **erhöht**. Mögliche Ursachen:

- Hypervolämie,
- Rechtsherzinsuffizienz,

- Lungenembolie,
- Obstruktion der oberen Hohlvene,
- Herztamponade.

Der zentrale Venendruck ist **erniedrigt**. Mögliche Ursache:

- Hypovolämie.

### 2.3.3 Zentrale Venenkatheter

Katheter für die zentrale Venendruckmessung sollten über eine zentrale Vene eingeführt werden und nicht über eine periphere Armvene, weil die Messgenauigkeit größer und die Wahrscheinlichkeit einer Fehllage des Katheters geringer ist. Mehrlumige Katheter sollten bevorzugt werden.

#### V. jugularis interna

Die Punktion der V. jugularis interna gilt in vielen Herzzentren als Methode der Wahl für die Hohlvenenkatheterisierung. Meist wird die rechte V. jugularis wegen ihres geraden Verlaufs bevorzugt. In der Regel werden Seldinger-Punktionssets verwendet, bei denen unter sterilen Bedingungen punktiert und katheterisiert werden muss. Hauptgefahr der V.-jugularis-interna-Katheterisierung ist die versehentliche Punktion der A. carotis. Wird kein ausreichender Druckverband angelegt, kann eine erhebliche Blutung, evtl. mit Einengung der Atemwege und Recurrenslähmung (Heiserkeit!), auftreten.

Bei Katheterisierung der **linken** V. jugularis interna kann der Ductus thoracicus verletzt werden. Der Pneumothorax ist eine seltene Komplikation der V.-jugularis-Punktion; Schädigungen des Plexus brachialis sind möglich, wenn zu weit lateral am Hals punktiert wird, über Horner-Syndrom ist ebenfalls berichtet worden.

#### V. jugularis externa

Die Punktion der V. jugularis externa wird häufig alternativ eingesetzt, wenn die Punktion der V. jugularis interna erfolglos blieb. Diese Vene enthält Klappen, sodass die Messung gestört werden kann; außerdem ist die Platzierung des Katheters mitunter schwierig; für die Einführung eines Pulmonalkatheters ist die Vene nicht geeignet.

#### V. cephalica und V. basilica

Diese Venen werden katheterisiert, wenn die Punktion der zentralen Venen nicht möglich war. Hauptnachteil der Armvenenkatheterisierung ist die **häufige Fehllage**: So muss bei rund 25 % aller Katheter mit einer nicht-zentralen Lage gerechnet werden. Für eine Katheterisierung des rechten Vorhofs ist die Röntgenkontrolle erforderlich. Meist werden die Armvenenkatheter für die Infusion von kardiovaskulären Medikamenten verwandt.

#### V. subclavia

Diese Vene sollte nicht routinemäßig präoperativ für die zentrale Venendruckmessung katheterisiert werden. Hauptgefahr: Pneumothorax und Verletzung der A. subclavia. Blutungen aus der A. subclavia können so stark sein, dass ein massiver Hämatothorax auftritt, der eine Thorakotomie erfordert.

### 2.3.4 Messung des zentralen Venendrucks

Die Vorbereitungen und Anschlüsse für die elektronische Messung des zentralen Venendrucks entsprechen weitgehend der arteriellen Druckmessung (s. oben):

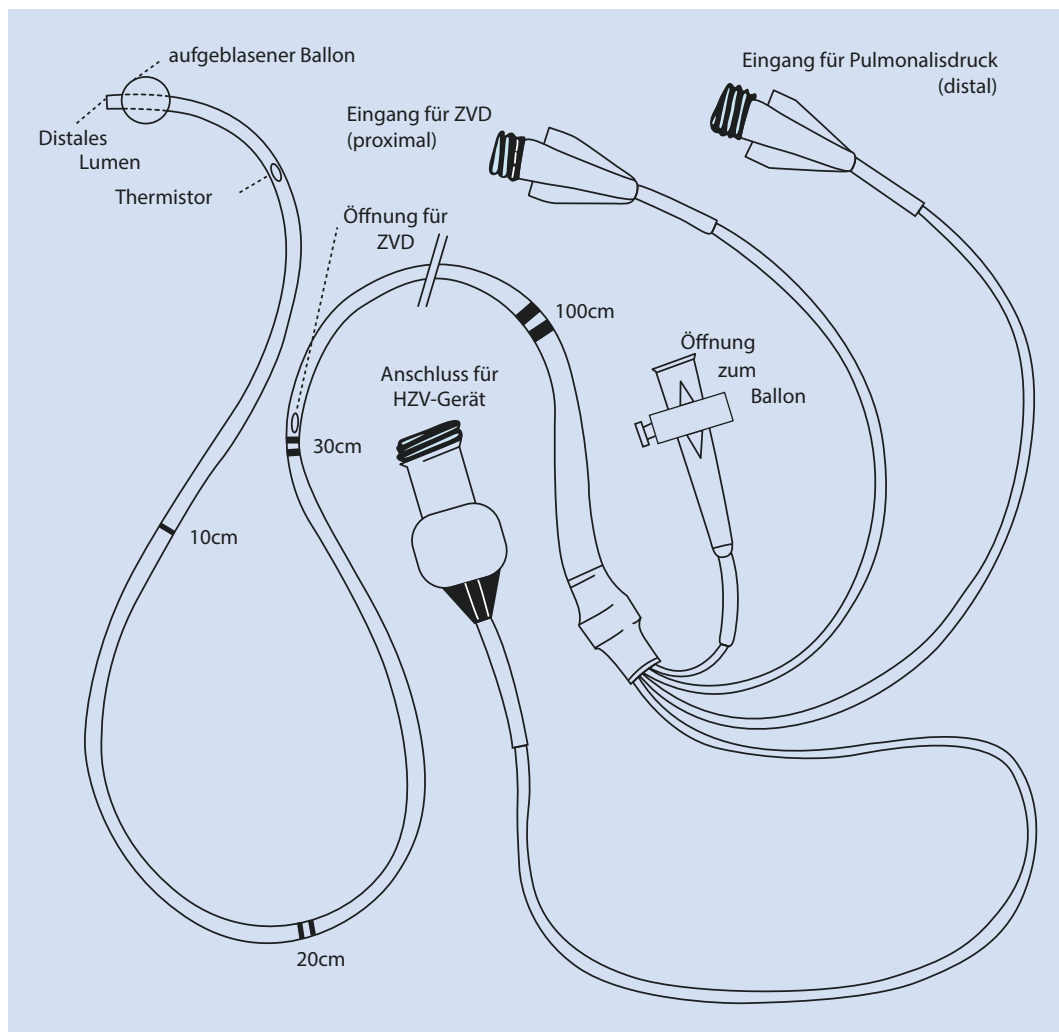
- Referenzpunkt für den Druckaufnehmer ist die Thoraxmitte,
- für die Messung wird der Patient flach auf den Rücken gelagert,
- während der Messung kann die Beatmung unterbrochen werden,
- die Digitalanzeige des Verstärkers gibt den Mitteldruck an, wenn der 30er-Druckbereich eingestellt ist.

➤ **Normalwerte des zentralen Venendrucks:**  
1–10 mm Hg.

### 2.4 Pulmonalarteriendrucke

Mit dem mehrlumigen Pulmonalarterienkatheter (Swan-Ganz-Katheter, Einschwemmkatheter) können die Pulmonalarteriendrucke und indirekt die Füllungsdrücke des linken Herzens, der zentrale





■ Abb. 2.4 Vierlumiger Pulmonalarterienkatheter

Venendruck sowie das Herzzeitvolumen gemessen und außerdem gemischt-venöses Blut (Blut der Pulmonalarterie) für Blutproben entnommen werden.

### 2.4.1 Pulmonaliskatheter

#### ■ Vierlumiger Pulmonaliskatheter

In ■ Abb. 2.4 ist ein vierlumiger Pulmonaliskatheter dargestellt.

**Anschlüsse** Dieser Katheter besitzt 4 Anschlüsse:

- **Distal:** Dieser Anschluss verbindet den Druckaufnehmer mit der distalen Öffnung in der

Katheterspitze. Hierüber werden die Pulmonalarteriendrucke gemessen.

- **Proximal:** Dieser Anschluss verbindet einen zweiten Druckaufnehmer mit der Öffnung für den rechten Vorhof. Die Öffnung dient zur Messung des rechten Vorhofdrucks und zur Injektion eiskalter Lösung bei der Messung des Herzzeitvolumens.
- **Ballonzuleitung:** Über diese Öffnung wird Luft in den Ballon an der Katheterspitze injiziert. Bei geblocktem Ballon und richtiger Lage in einer peripheren Pulmonalarterie wird über das distale Lumen der Lungenkapillarenverschlussdruck (Wedgedruck) gemessen.

- **Thermistorverbindung:** Dieser Anschluss führt zum Thermistor im distalen Bereich des Pulmonalkatheters; er wird mit dem Herzzeitvolumencomputer verbunden.

**Messgrößen** Mit dem vierlumigen Pulmonalkatheter erfassbare Messgrößen:

- rechter Vorhofdruck bzw. zentraler Venendruck,
- Pulmonalarteriendruck: systolisch, diastolisch, Mitteldruck,
- Lungenkapillarenverschlussdruck (Wedgedruck),
- Herzzeitvolumen.

#### ■ Andere Pulmonalkatheter

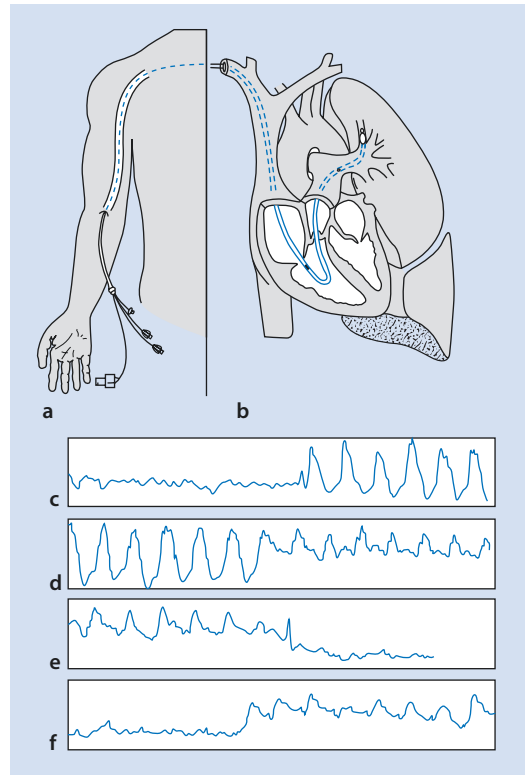
Neben dem vierlumigen Pulmonalkatheter sind auch doppel-, tripel- oder fünflumige Katheter im Gebrauch.

### 2.4.2 Indikationen

Der Pulmonalkatheter wird v. a. zur perioperativen Überwachung schwer herzkranker Patienten eingesetzt. Die erhaltenen Messgrößen dienen häufig als Grundlage für die Behandlung mit kardiovaskulären Medikamenten und die Volumenzufuhr. Da der Lungenkapillarenverschlussdruck oder auch der diastolische Pulmonalarteriendruck gut mit dem linken Vorhofdruck übereinstimmt und der linke Vorhofdruck wiederum das linksventrikuläre Preload bestimmt, kann mit Hilfe des Pulmonalkatheters die Funktion des linken Ventrikels eingeschätzt und, wenn erforderlich, therapeutisch beeinflusst werden.

- **Der Routineeinsatz des Pulmonalkatheters bei Herzoperationen ist nicht gerechtfertigt, da die meisten hämodynamischen Daten – weniger invasiv – mit der Echokardiographie ermittelt werden können.**

Weitere Einzelheiten zur Indikation s. die entsprechenden Krankheitsbilder.



■ **Abb. 2.5** Einführen des Pulmonalarterienkatheters. a, b Weg des Pulmonalarterienkatheters; Katheterspitze geblockt in Wedgeposition. In c–f die beim Einführen des Katheters jeweils auf dem Monitor sichtbaren Druckkurven: c rechter Vorhof in den rechten Ventrikel, d rechter Ventrikel in die A. pulmonalis, e A. pulmonalis in die Wedgeposition durch Blocken des Ballons, f durch Entblocken des Ballons der Katheter aus der Wedgeposition in die Pulmonalarterienposition zurück

### 2.4.3 Einführen des Pulmonalkatheters

Am häufigsten wird der Pulmonalkatheter mit Hilfe der Seldinger-Technik über eine Schleuse in der **rechten** V. jugularis interna in eine Pulmonalarterie eingeführt, gelegentlich auch über eine Vene von der Ellenbeuge aus. Der Pulmonalkatheter wird durch die Schleuse, unter kontinuierlicher Druckkontrolle auf dem Monitor, vorgeschoben. Aufgrund der Druckkurven kann die jeweilige Lage der Katheterspitze genau bestimmt werden (■ Abb. 2.5). Das Einführen des Katheters unter

Röntgenbildschirmkontrolle ist meist nicht erforderlich, jedoch von Vorteil, um Fehllagen und Schlingenbildung rasch zu erkennen. Die verwendeten Kathetergrößen sind 5 F oder 7 F, die der zugehörigen Schleusen ebenfalls 5 oder 7 F.

### Praktisches Vorgehen

- Anschluss des Patienten an den EKG-Monitor und Bereitstellen eines Defibrillators. Desinfektion der Punktionsstelle, steriles Abdecken, Punktion der Vene nach der Seldinger-Technik und Einführen der Katheterschleuse. Vor Einführen der Schleuse muss die Punktionsstelle mit dem Skalpell durch einen kleinen Schnitt erweitert werden.
- Anschluss „distal“ des Katheters mit einem Druckaufnehmer verbinden, Katheterlumina mit 0,9%iger NaCl-Lösung füllen. Dann den Katheter langsam, unter ständiger Druckkontrolle auf dem Monitor, vorschieben.
- Bei Eintritt des Katheters in die V. cava superior etwa 1–1,5 ml Luft in den Ballon des Katheters injizieren, damit der Katheter beim weiteren behutsamen Vorschieben über den rechten Vorhof durch die Trikuspidalklappe in den rechten Ventrikel und von dort durch die Pulmonalklappe in eine Lungenarterie eingeschwenkt werden kann. Der Ballon dient außerdem zum Schutz des Herzens vor der harten Katheterspitze. Sobald die Wedge-Kurve auftritt, wird der Ballon entblockt. Bei richtiger Lage der Katheterspitze muss jetzt die Pulmonalarteriendruckkurve sichtbar sein. Die meisten Katheter gelangen in den *rechten* Mittel- oder Unterlappen.
- Beim Einschwemmen in den rechten Ventrikel können salvenartige Extrasystolen oder eine ventrikuläre

Tachykardie auftreten. Behandlung: Lidocain, evtl. Katheter zurückziehen.

Ein Defibrillator sollte in Funktionsbereitschaft stehen. Ist der Katheter nach etwa 60 cm (beim Zugang über die rechte V. jugularis interna) noch nicht in die Pulmonalarterie gelangt, sollte er *entblockt* zurückgezogen und erneut (geblockt) vorgeschoben werden, um eine Knotenbildung zu vermeiden. Schwierigkeiten beim Vorschieben des Katheters vom rechten Ventrikel in die Pulmonalarterie können bei erheblicher pulmonaler Hypertonie, Dilatation des rechten Ventrikels und bei Trikuspidalinsuffizienz auftreten.

- Bei richtiger Lage wird der Katheter so fixiert, dass ein kleiner Abschnitt steril bleibt, damit die Lage, wenn erforderlich, korrigiert werden kann. Denn nicht selten verändert der Pulmonalkatheter nach einer gewissen Liegezeit, bedingt durch die Hämodynamik, seine Position. Auch sollte die Katheterlage so früh wie möglich röntgenologisch kontrolliert werden.
- Danach wird der Anschluss „proximal“ des Katheters ebenfalls mit einem Druckaufnehmer verbunden, sodass rechter Vorhofdruck oder zentraler Venendruck kontinuierlich registriert werden können.
- Die Lage des Katheters muss ständig anhand der Druckkurven überwacht werden. So darf die Wedgeposition nur für den Messvorgang beibehalten werden, um eine Infarzierung des Gebiets jenseits des blockierten Pulmonalarterienastes zu vermeiden.
- Die Atemwegsdrücke und die transpulmonalen Drücke beeinflussen die Messergebnisse des Pulmonalkatheters. Darum sollten nur am Ende der Expiration gemessene Pulmonalarterien- und Wedgedrucke berücksichtigt werden.

## 2.4.4 Messungen mit dem Pulmonalkatheter

### Pulmonalarteriendruck

Zur Messung des Pulmonalarteriendrucks wird ein Druckaufnehmer angeschlossen. Nach Nullabgleich und Kalibrierung kann der Pulmonalarteriendruck, bei **entblocktem** Ballon, kontinuierlich gemessen und auf einem Schreiber registriert werden.

#### Normalwerte des Pulmonalarteriendrucks (PAP)

- systolisch: 15–28 mm Hg, Mittel 24 mm Hg,
- diastolisch: 5–16 mm Hg, Mittel 10 mm Hg,
- Mitteldruck (PAP): 10–11 mm Hg, Mittel 16 mm Hg.

Die Kurvenverläufe sind in **Abb. 2.5** dargestellt.

Lungenkapillarenverschlussdruck (Wedgedruck, PCWP = “pulmonary capillary wedge pressure“). Wird der Ballon an der Katheterspitze mit etwa 1 ml Luft aufgeblasen, schwimmt sich der Katheter nach einigen Herzaktionen mit dem Blutstrom in die Wedgeposition: Er klemmt sich gewissermaßen in den Pulmonalarterienast ein, sodass kein Blut mehr von proximal durch dieses Gefäß strömen kann, solange der Ballon aufgeblasen ist. Der in dieser Katheterposition an der Spitze gemessene Druck wird deshalb als „**Verschlussdruck**“ bezeichnet. Er entspricht bei gesundem Herzen dem Druck im linken Vorhof (LAP). Der Wedgedruck schwankt mit dem Atemzyklus: Abfall bei Inspiration, Anstieg bei Expiration. Unter maschineller Beatmung kehren sich diese Beziehungen um. Bei Mitralinsuffizienz können hohe v-Wellen auftreten, die nicht mit der Pulmonalarteriendruckkurve verwechselt werden dürfen. Lässt sich der Katheter nicht in die Wedgeposition bringen, kann auch der **diastolische** Pulmonalarteriendruck mit hinreichender Genauigkeit als Näherungswert für den linken Vorhofdruck verwendet werden.

#### Normalwert Wedgedruck

- 5–16 mm Hg, Mittel 9 mm Hg.

Der Wert der Wedgedruckmessung wird unter klinischen Bedingungen durch zahlreiche Faktoren eingeschränkt oder gar in Frage gestellt. Grundsätzlich besteht bei hohen Drücken im linken Vorhof (>25 mm Hg) keine enge Korrelation mehr mit dem Wedgedruck; dies gilt in gleicher Weise für die Anwendung eines PEEP von mehr als 10 cm H<sub>2</sub>O unter der Beatmung.

Daneben bestehen folgende Fehlermöglichkeiten:

- Wedgedruck höher als LAP (LVEDP): Mitralstenose; hoher Atemwegsdruck (PEEP!); Tumor im linken Vorhof.
- Wedgedruck niedriger als LAP (LVEDP): hoher LVEDP (>25 mm Hg); steifer linker Ventrikel; vorzeitiger Schluss der Mitralklappe (bei Aorteninsuffizienz).
- Schlechte Korrelation zwischen Wedgedruck und LVEDP vor und nach dem Bypass bei eröffnetem Perikard; weiterhin bei Tachykardie sowie bei erhöhtem Pulmonalgefäßwiderstand.
- Normaler Wedgedruck trotz erheblicher Schwankungen des linksventrikulären enddiastolischen Volumens.

### Herzzeitvolumen

Die Messung des Herzzeitvolumens mit dem Pulmonalkatheter erfolgt mit Thermodilution, einer Modifikation der Farbstoffverdünnungsmethode, bei der die Kälte als Indikator dient. Durch Injektion einiger Milliliter kalter Kochsalz- oder Glukoselösung wird das Blut kurzzeitig abgekühlt. Der Wechsel der Bluttemperatur wird in seinem zeitlichen Verlauf vom Thermistor an der Spitze des Katheters gemessen und an den Computer weitergeleitet. Dort wird der Blutfluss aus der Fläche unter der Temperaturkurve (die bei einigen Geräten aufgezichnet werden kann) nach der Stewart-Hamilton-Gleichung integriert:

$$HZV = \frac{V_I (T_b - T_I) K_1 \times K_2}{T_B(t) dt}$$

$V_I$  = Injektatvolumen;  $T_B$  = Bluttemperatur;  $T_I$  = Injektattemperatur;  $K_1$  = Dichtefaktor (Injektat/Blut);  $K_2$  = Berechnungskonstante;  $T_B(t) dt$  = Wechsel der Bluttemperatur als Funktion der Zeit.

### Praktisches Vorgehen

- Bereitstellen einer ausreichenden Zahl von Spritzen, die mit dem Injektat bekannter Temperatur (z. B. 1°C) gefüllt sind, z. B. jeweils genau 10 ml Glukose 5 %.
- Anschluss des Thermistors am Pulmonalkatheter an den Herzzeitvolumencomputer.
- Einstellen des Injektatvolumens und der Temperaturdifferenz zwischen Blut und Injektat.
- Injektion der kalten Lösung innerhalb von maximal 4 s in den proximalen Anschluss des Katheters. Jede Erwärmung des Injektats in den Händen des Untersuchers vermeiden. Die Injektion sollte immer zum gleichen Zeitpunkt des Atemzyklus erfolgen, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, z. B. am Ende der Expiration. Der injizierte Kältebolus kann bei einigen Patienten eine kurzzeitige Bradykardie auslösen. Vorhofflimmern ist ebenfalls beschrieben worden.
- Registrierung der Temperaturkurve und Ablesen des vom Computer errechneten Wertes.
- Das durchschnittliche Herzzeitvolumen wird aus 3 unmittelbar hintereinander gemessenen Werten, die jeweils eng beieinander liegen müssen, ermittelt.
- Division des Herzzeitvolumens durch die Körperoberfläche ergibt den Herzindex ( $\text{l/min/m}^2$ ).

Das Herzzeitvolumen ist umgekehrt proportional der Fläche unter der Temperaturkurve ( $T_B [t] \text{ dt}$ ), d. h. je kleiner die Fläche, desto größer das Herzzeitvolumen, und umgekehrt. Störungen des Messvorganges können erkannt werden, wenn die Temperaturkurve mit einem Schreiber aufgezeichnet wird. Zu niedrige Kurven (=falsch-hohes HZV) entstehen durch zu geringes Injektatvolumen oder zu geringe Temperaturdifferenz zwischen Injektat und Blut. Unregelmäßige Kurven treten auf bei schlechter Durchmischung des Kältebolus, Schwankungen des Blutdrucks oder der Herzfrequenz während der

Injektion oder durch Kontakt des Thermistors mit der Gefäßwand.

- **Neben der beschriebenen diskontinuierlichen Herzzeitvolumenbestimmung mit Kältebolusapplikation ist mit entsprechenden Monitoring-Systemen auch eine kontinuierliche Bestimmung des HZV möglich. Bei dieser Methode wird das Blut durch einen Wärmeimpuls kurzzeitig erwärmt und das HZV anhand der Abkühlung ermittelt.**

### 2.4.5 Komplikationen des Pulmonalkatheters

#### ■ Supraventrikuläre und ventrikuläre Arrhythmien

Sie können beim Einführen des Katheters auftreten; ventrikuläre Tachykardie und Kammerflimmern sind ebenfalls beobachtet worden.

#### Ballonruptur

Sie kann nach einigen Tagen spontan auftreten oder wenn der Ballon zu stark geblockt worden ist. Bei Ballonruptur gelangt die Luft aus dem Ballon in das Blut. Die Komplikation ist harmlos, wenn kein Rechts-links-Shunt besteht; bei Rechts-links-Shunt sollte der Ballon mit  $\text{CO}_2$  gefüllt werden.

#### Lungeninfarkt

Ein Lungeninfarkt entsteht, wenn der Katheter zu lange in der Wedgeposition bleibt. Um diese Komplikation zu vermeiden, muss die Druckkurve auf dem Monitor sorgfältig überwacht werden. Manchmal keilt sich der Katheter in der Wedgeposition trotz entblocktem Ballon ein; dann muss der Katheter ein Stück zurückgezogen werden.

#### Gefäßruptur

Wird der Ballon zu stark geblockt, kann eine Ruptur des Pulmonalarterienastes auftreten. Als besonders gefährdet gelten ältere Patienten mit pulmonaler Hypertonie. Die Komplikation ist in der Regel

vermeidbar, wenn der Ballon langsam und mit minimalem Volumen aufgefüllt wird (etwa 1–1,5 ml). Das Blocken des Ballons darf nur dann erfolgen, wenn eindeutig eine Pulmonalarteriendruckkurve auf dem Monitor erkennbar ist. Vorsicht: Hohe a- oder cv-Wellen eines bereits in Wedgeposition befindlichen Katheters werden vom Unerfahrenen leicht als Pulmonalarteriendruck fehlgedeutet! Blocken sofort unterbrechen, wenn ein starker Widerstand zu verspüren ist.

Die Ruptur einer Pulmonalarterie ist zumeist ein akut lebensbedrohliches Ereignis, das schlagartig zu einer Blutung in die Atemwege führt. Hierdurch können sich sehr rasch eine Hypoxämie und ein hypovolämischer Schock entwickeln. Seltener blutet es in das Lungenparenchym; dann wird die Ruptur oft erst auf dem Röntgenbild erkannt.

### Praktisches Vorgehen bei Pulmonalarterienruptur

- Entblocken des Ballons und Zurückziehen des Katheters um etwa 1–2 cm, dann erneutes Blocken, um die Durchblutung des rupturierten Gefäßes zu unterbrechen.
- Zufuhr von 100 % Sauerstoff; endotracheale Intubation, bei Blutung in die Bronchien möglichst Intubation des Hauptbronchus der betroffenen Lungenseite und Blocken der Manschette, um das Eindringen von Blut in die nicht betroffene Lunge zu verhindern.
- Dann Notfall-Lobektomie.

**Schädigungen des Herzklappendokards** treten relativ häufig und oft bereits nach wenigen Stunden auf. Darum sollte die Liegezeit des Katheters so kurz wie möglich gehalten werden.

Eine **Knotenbildung** tritt sehr leicht auf, wenn der Katheter zu weit in den rechten Ventrikel vorgeschoben wird, ohne in die Pulmonalarterie zu gelangen.

Neben diesen spezifischen Komplikationen können mit dem Pulmonalkatheter zusätzlich die bei anderen zentralen Venenkathetern zu beobachtenden Komplikationen auftreten.

## 2.5 HZV-Messung durch arterielle Pulskonturanalyse und andere Verfahren

Dieses indirekte Verfahren der HZV-Messung beruht auf Erkenntnissen des deutschen Physiologen Otto Frank, denen zufolge eine direkte Beziehung zwischen dem zeitlichen Verlauf der arteriellen Blutdruckkurve und dem gleichzeitig erfolgenden arteriellen Blutfluss besteht. Bei der von Frank aufgestellten Windkesseltheorie werden Aorta und die proximalen Arterien als eine Kammer (Windkessel) angesehen, die während der Systole des Herzens mit dem Schlagvolumen angefüllt und während der Systole und Diastole wieder entleert wird.

Auf der Basis dieses Modells und in Anlehnung an das Ohm'sche Gesetz beschreiben die Pulsconturverfahren eine Beziehung zwischen dem arteriellen Druck und einem arteriellen Fluss, der vom Gesamtwiderstand bestimmt wird. Im ursprünglichen, für den Kreislauf des Menschen allerdings unzureichenden Modell wurde das Schlagvolumen aus dem Druck als treibender Kraft für den Blutfluss während der Austreibungsphase (Fläche unter dem systolischen Anteil der Druckkurve) und der Impedanz bzw. dem Widerstand der Aorta bestimmt:

$$SV = A_{\text{sys}} / Z_{\text{Ao}}$$

SV = Schlagvolumen;  $A_{\text{sys}}$  = Fläche unter dem systolischen Anteil der Druckkurve;  $Z_{\text{Ao}}$  = Impedanz der Aorta.

### 2.5.1 Cz-Modell von Wesseling

In diesem erweiterten Modell wurden der mittlere arterielle Druck und das Alter berücksichtigt, um druckabhängige nichtlineare Veränderungen des Aortendurchmessers zu korrigieren, außerdem die (altersabhängige) Herzfrequenz, um Reflektionen aus der Peripherie auszugleichen. Das Herzzeitvolumen ergibt sich dabei aus folgender Formel:

$$HZV_{\text{PC}} = HF \times A_{\text{sys}} / Z_{\text{Ao}}$$

$$Z_{\text{Ao}} = a / (b + (c \times \text{MAP}) + (d \times \text{HF}))$$

$HZV_{\text{PC}}$  = Pulscontur-HZV, HF = Herzfrequenz, MAP = mittlerer arterieller Druck; a, b, c und d = altersabhängige Faktoren.

Aufgrund der verschiedenen Korrekturfaktoren kann anstelle des Aortendrucks auch der Druck in einer peripheren Arterie verwendet werden. Da sich Größe und Impedanz der Aorta und der peripheren Arterien individuell unterscheiden, musste das absolute Herzzeitvolumen initial für jeden einzelnen Patienten mit einer Referenzmethode ermittelt werden. Dies war in der Vergangenheit in der Regel die Thermodilutionsmethode über einen Pulmonalkatheter. Dabei ergab sich für die individuelle Aortenimpedanz folgende Formel:

$$Z_{Ao} = \text{HZV}_{PC} / \text{HZV}_{\text{Ref}} \times Z_{Ao\text{Ref}}$$

$\text{HZV}_{\text{Ref}}$  = Referenz-HZV,  $Z_{Ao\text{Ref}}$  = Referenzaortenimpedanz.

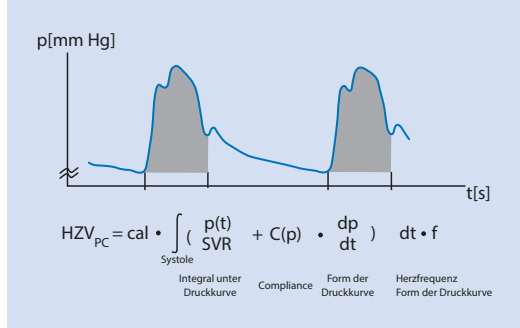
Zwischen Pulskontur-HZV und Thermodilutions-HZV ergab sich bei den meisten Messungen und in verschiedenen klinischen Situationen eine sehr gute Übereinstimmung.

### 2.5.2 PICCO-System

Dieses System kombiniert die arterielle Pulskonturanalyse mit der transkardiopulmonalen Thermodilution. Das Schlagvolumen wird fortlaufend, unter Berücksichtigung der individuellen aortalen Compliance, über einen Algorithmus aus der Pulskontur berechnet; das HZV kann kontinuierlich durch arterielle Pulskonturanalyse oder diskontinuierlich durch transkardiopulmonale Thermodilution gemessen werden (■ Abb. 2.6).

Anstelle des Pulmonalkatheters wird ein Katheter in eine große Arterie, bevorzugt die A. femoralis, alternativ und gleichwertig in die A. radialis, eingeführt. Der Katheter enthält ein Lumen für die arterielle Druckmessung, außerdem einen in der Spitze befindlichen Thermistor für die Thermodilutionsmessung.

Für die Kalibrierung des Gerätes wird initial das HZV mit der transkardiopulmonalen Thermodilution gemessen. Hierfür wird kalte Kochsalzlösung als Bolus in einen zentralen Venenkatheter injiziert und die sich ergebende Temperaturverlaufskurve vom Thermistor des arteriellen Katheters registriert. Aus dem Temperaturverlauf errechnet das Gerät nach der Stewart-Hamilton-Gleichung das Referenz-HZV.



■ **Abb. 2.6** Prinzip der arteriellen Pulskonturanalyse. Das Pulskontur-HZV ( $\text{HZV}_{PC}$ ) wird aus der Fläche unter dem systolischen Anteil der arteriellen Druckkurve (grau), der Herzfrequenz, dem Kalibrationsfaktor der transkardiopulmonalen Thermodilution (cal) und einer differenzierten Analyse der Form der Druckkurve berechnet

Die Messung erfolgt unabhängig vom Atemzyklus. Zusätzlich berechnet das Gerät aus der transpulmonalen Thermodilutionskurve das kardiale Preload, das intrathorakale Blutvolumen und das extravasale Lungenwasser (■ Tab. 2.2). Für die kontinuierliche Berechnung des  $\text{HZV}_{PC}$  wird ein Kalibrationsfaktor aus dem transpulmonal gemessenen HZV verwendet, außerdem die Herzfrequenz, die integrierte Fläche unter dem systolischen Anteil der arteriellen Druckkurve, die Compliance der Aorta und die Form der Druckkurve bzw. die Druckänderung im zeitlichen Verlauf ( $dp/dt$ ). Störungen der Thermodilutionsmessungen können bei Aortenaneurysmen, intrakardialen Shunts, Pneumektomien und während der extrakorporalen Zirkulation auftreten. Signifikante Aorteninsuffizienz und periphere arterielle Verschlusskrankheit schränken das Verfahren ein.

**HZVPC** Das Pulskontur-HZV wird als Mittelwert der letzten 12 s angezeigt.

**Schlagvolumenvariation (SVV)** Sie gibt an, um wie viel Prozent das Schlagvolumen um den über einen Zeitraum von 30 s bestimmten Mittelwert variiert. Bei beatmeten Patienten hängt die Variabilität im Wesentlichen vom intravasalen Volumenstatus ab: Starke Schwankungen unter Beatmung weisen auf Hypovolämie hin; quantitative Aussagen sind jedoch nicht möglich.



■ Tab. 2.2 Parameter der Pulskonturanalyse (PiCCO Fa. Pulsion)

Parameter	Normalbereich
HZV <sub>PC</sub>	3,0–5,0 l/min
Systolischer arterieller Blutdruck [mm Hg]	
Diastolischer arterieller Blutdruck [mm Hg]	
Mittlerer arterieller Blutdruck, MAP	70–90 mm Hg
Herzfrequenz (1/min)	60–90/min
Schlagvolumenindex, SVI	40–60 ml/m2
Schlagvolumenvariation	<10 %
Pulsdruckvariation (%)	<10 %
Systemischer Gefäßwiderstandindex SVRI	1700–2400 dyn×s×cm <sup>-5</sup> ×m <sup>2</sup>
Linksventrikulärer Kontraktilitätsindex: maximale Druckerhöhungsgeschwindigkeit [dp/dt <sub>max</sub> , mm Hg/s]	1200–2000

**Pulsdruckvariation (PPV)** Dieser Parameter gibt an, um wie viel Prozent der systolische Pulsdruck um den über einen Zeitraum von 30 s bestimmten Mittelwert schwankt (PPV = maximaler Pulsdruck – minimaler Pulsdruck/mittlerer Pulsdruck). Stärkere Schwankungen bei beatmeten Patienten weisen ebenfalls auf einen intravasalen Volumenmangel hin.

### Intrathorakale Volumina

Mit dem PiCCO-System können – ohne Pulmonalarterienkatheter und ohne Injektion von Farbstoffindikatoren – verschiedene intrathorakale Volumina gemessen oder berechnet werden, die für die kardiale Vorlast, die Funktion des Herzens und die Flüssigkeitstherapie von wesentlicher Bedeutung sind (■ Tab. 2.3). Im Gegensatz zu den Doppelindikatorentechniken ist hierfür lediglich die zentralvenöse Injektion eines Kältebolus und dessen Messung in einer zentralen Arterie, d. h. die transkardiopulmonale Thermodilution erforderlich. Dieses Verfahren ist weniger aufwendig, risikoärmer und kostengünstiger als die Injektion von Farbstoffindikatoren über einen Pulmonalkatheter. Die Fehlerbreite beträgt maximal 10 %. Eine umfassende Kosten-Nutzen-Analyse dieser minimal-invasiven hämodynamischen Verfahren wurde 2005 von Malbrain et al. vorgelegt.

### Intrathorakales thermales Volumen (ITTV)

ITTV ist der intrathorakale Verteilungsraum für den Kältebolus; er umfasst somit das intravasale und das extravasale thorakale Volumen:

$$\text{ITTV} = \text{HZV}_{\text{therm}} \times \text{MTT}_{\text{therm}}$$

HZV<sub>therm</sub> = Thermodilutions-HZV; MTT<sub>therm</sub> = mittlere Transitzeit des Kältebolus vom Injektionsort zum Messort.

### Globales enddiastolisches Volumen (GEDV)

Dieser Parameter ergibt sich – angenähert – aus der Differenz zwischen ITTV und pulmonalem thermalem Volumen (PTV) und entspricht primär den Blutvolumina in den Herzkammern. Da diese Volumina am Ende der Diastole am größten sind, wird die Summe der enddiastolischen Volumina beider Vorhöfe und Ventrikel als globales enddiastolisches Volumen bezeichnet. Es entspricht dem Vorlastvolumen des gesamten Herzens.

$$\text{GEDV} = \text{ITTV} - \text{PTV}$$

$$\text{GEDV} = \text{HZV} \times (\text{MTT}_{\text{therm}} - \text{DST}_{\text{therm}})$$

DSt<sub>therm</sub>: exponentielle Abfallzeit der transpulmonalen Thermodilutionskurve.



■ **Tab. 2.3** Mit dem PiCCO-System erfasste intrathorakale Volumina (Angaben Fa. Pulsion)

Parameter	Normalwerte
GEDVI	680–800 ml/m <sup>2</sup>
ITBVI	850–1000 ml/m <sup>2</sup>
EVLW	3–7 ml/kg KG

GEDVI = globaler enddiastolischer Volumenindex,  
ITBVI = intrathorakaler Blutvolumenindex EVLW =  
extravaskuläres Lungenwasser

GEDV (und ITBV) können nützlich sein, um die Reaktion des Herzens auf Volumenzufuhr zu testen. Zuverlässig scheinen beide als Vorlastparameter aber nur bei normaler Herzfunktion oder bei globalen Ventrikelfunktionsstörungen zu sein. Bei beatmeten Patienten mit rechtventrikulären Funktionsstörungen wird die linksventrikuläre Funktion u. U. falsch eingeschätzt, weil GEDV nicht die Vorlast des rechten Herzens allein widerspiegelt.

### Intrathorakales Blutvolumen (ITBV)

Das intrathorakale Blutvolumen lässt sich mit hinreichender Genauigkeit aus dem Thermodilutions-HZV und der mittleren Transitzeit des Kältebolus berechnen:

$$\text{ITBV} = \text{HZV}_{\text{therm}} \times \text{MTT}_{\text{therm}}$$

Die Einzelinjektionthermodilutionstechnik geht von einer konstanten Beziehung zwischen dem gemessenen globalen enddiastolischen Volumenindex (GEDVI) und dem intrathorakalen Blutvolumenindex aus. Danach gilt vereinfacht:

$$\text{ITBVI} = 1,25 \times \text{GEDVI}$$

### Pulmonales thermales Blutvolumen (PTV)

Das pulmonale Blutvolumen ergibt sich aus der Differenz zwischen intrathorakalem Blutvolumen und globalem enddiastolischem Volumen

$$\text{PTV} = \text{DST}_{\text{therm}} \times \text{HZV}_{\text{therm}}$$

oder

$$\text{PTV} = \text{ITBV} - \text{GEDV}$$

### Extravaskuläres Lungenwasser (EVLW)

Das extravaskuläre Lungenwasser ist die Differenz zwischen intrathorakalem Thermovolumen und intrathorakalem Blutvolumen. Referenzmethode für die Bestimmung des EVLW ist die Gravimetrie; es kann jedoch auch, ebenfalls mit klinisch hinreichender Genauigkeit, durch reine Thermodilution ermittelt werden:

$$\text{EVLW}_{\text{th}} = \text{ITTV} - \text{ITBV}_{\text{th}} = \text{ITTV} - (1,25 \times \text{GEDV})$$

Mit der transpulmonalen thermalen Indikatortechnik können bereits Anstiege des extravaskulären Lungenwassers von 10–20 % erfasst werden. Obstruktionen der Lungengefäße, fokale Lungenschäden und Lungenresektionen führen allerdings mit dieser Methode zu falsch-niedrigen Werten. Andere Faktoren wie Höhe des EVWL,  $p_a\text{O}_2/\text{F}_i\text{O}_2$ , Atemzugvolumen und Höhe des PEEP können bei chirurgischen Intensivpatienten ebenfalls die Messung signifikant beeinflussen, jedoch sollen die Veränderungen selbst bei schweren Lungenerkrankungen klinisch nicht relevant sein.

#### ■ Klinische Bedeutung des EVLW

Sind die normalen pulmonalen Barrieren gestört, kann das EVLW zunehmen. Pathogenetisch führen 2 unterschiedliche Mechanismen zur Akkumulation von Flüssigkeit im Interstitium des Lungengewebes (Lungenödem): ein Anstieg des hydrostatischen Drucks (des Filtrationsdrucks) in den Lungenkapillaren und/oder eine Zunahme der pulmonalen Kapillarpermeabilität. Anstiege des hydrostatischen Drucks treten typischerweise bei Linksherzinsuffizienz und Überwässerung auf, Störungen der Gefäßpermeabilität bei Pneumonie, ALI/ARDS, Sepsis und bestimmten Intoxikationen.

Während eine durch hydrostatischen Druckanstieg bedingte Zunahme des EVLW am Anstieg des Wedge-Drucks erkennbar ist, verändert sich der PCWP bei einer permeabilitätsbedingten Zunahme des EVWL nach Untersuchungen von

Sakka et al. (2002) nicht. Mit der transpulmonalen Thermodilution kann das EVLW somit vermutlich genauer eingeschätzt werden als mit der Messung des PCWP. Möglicherweise kann hierdurch beim schwer kranken Intensivpatienten die Volumenzufuhr besser gesteuert und die Gefahr einer Überwässerung vermindert werden.

**EVLW als diagnostischer Faktor** Zwischen Routinenröntgenaufnahmen des Thorax und dem EVLW besteht meist eine schlechte Korrelation, besonders bei beatmeten Patienten. Demgegenüber können mit der transpulmonalen Thermodilution oft bereits frühzeitig Anstiege des EVWL festgestellt werden.

**EVLW als prognostischer Faktor** Bereits in frühen Untersuchungen an Intensivpatienten wurde ein Zusammenhang zwischen EVLW und Letalität gefunden. In einer retrospektiven Untersuchung von Sakka et al. (2007) erwies sich ein erhöhtes EVLW als unabhängiger Prädiktor für eine schlechtere Prognose bei Intensivpatienten: Während Patienten mit einem EVWL von  $<10$  ml/kg KG eine Letalität von 33 % aufwiesen, war ein EVWL von  $>15$  ml/kg KG mit einer Letalität von 67 % assoziiert. Sato et al. (2007) fanden in einer Untersuchung an 23 Patienten nach Ösophagektomie eine positive Korrelation zwischen einem Anstieg des  $EVLW_{th}$  und einer Verschlechterung des respiratorischen Index bzw. pulmonalen Komplikationen.

#### ■ Klinische Bewertung der EVLW-Messung

Mit der thermalen transkardiopulmonalen Dilutionstechnik kann bei den meisten schwer kranken Intensivpatienten das EVLW auf einfache Weise und mit brauchbaren klinischen Ergebnissen bestimmt werden.

### Intraoperative Optimierung mit Hilfe des PICCO-Systems

Goepfert et al. (2013) konnten zeigen, dass sich die postoperative Komplikationsrate sowie die Dauer des intensivstationären Aufenthaltes nach einer individualisierten hämodynamischen Optimierungstherapie verringerten. Die optimierten Zielvariablen waren hierbei:

- Herzindex,
- Schlagvolumenvariation (Index),
- global-end-diastolisches Volumen.

### 2.5.3 LiDCO-System

Beim Lithium-Dilution-Cardiac-Output-Measurement-System wird anstelle eines Kältebolus isotone Lithiumchloridlösung in eine periphere oder zentrale Vene injiziert und anschließend in einer Arterie die Lithiumkonzentration mit einer lithiumionen-selektiven Elektrode gemessen. Das aus der Analyse der transpulmonalen Dilutionskurve ermittelte initiale Herzzeitvolumen dient der Kalibrierung für die arterielle Pulskonturanalyse.

Beim LiDCO-System wird die gesamte arterielle Druckkurve in eine Volumenkurve transformiert und hieraus ein Schlagvolumen kalkuliert. Dieses Schlagvolumen wird mit Hilfe des initial ermittelten Lithiumdilutions-HZV in das absolute Schlagvolumen oder HZV umgewandelt. Wegen der Lithiumakkumulation ist die Anzahl der Kalibrierungen auf derzeit 10/24 h beschränkt.

Bei Patienten, die Lithium zur Depressionsbehandlung erhalten, darf das Verfahren nicht angewandt werden, ebenso wenig bei Schwangeren im 1. Trimenon und während der Stillzeit sowie bei Patienten mit einem Körpergewicht von  $<40$  kg.

### 2.5.4 Transösophageale Ultraschallmessung

Bei diesem minimal-invasiven Verfahren wird die relative Strömungsgeschwindigkeit des Blutes aufgrund der Frequenzverschiebung einer an den Erythrozyten reflektierten Ultraschallwelle berechnet. Um die Blutflussgeschwindigkeit und damit auch das Schlagvolumen zu erfassen, wird das Integral des Blutflusses während der Systole, das Geschwindigkeits-Zeit-Integral VTI, berechnet. Hierbei muss der Querschnitt des Blutgefäßes bekannt sein. Für die Aorta werden entweder Werte aus Nomogrammen verwendet oder der tatsächliche Querschnitt sonographisch bestimmt. Es gilt:

$$\begin{aligned} &\text{Schlagvolumen, SV} \\ &= \text{VTI} \times \text{Aortendurchmesser} \end{aligned}$$

$\text{VTI} = \text{Blutfluss-Zeit-Integral.}$

Die transösophageale Ultraschallmessung kann intraoperativ und auch beim Intensivpatienten

angewandt werden. Gemessen wird zumeist der Blutfluss in der Aorta descendens. Die dünne Ultraschallsonde wird so weit in den Ösophagus vorgeschoben, bis ein maximales Flusssignal über der Aorta descendens zu registrieren ist. Allerdings ist es schwierig, die Sonde optimal zu positionieren und die optimale Position über einen längeren Zeitraum aufrechtzuhalten. Hieraus ergeben sich technisch bedingte Messungenauigkeiten. Um zuverlässige Werte für das Schlagvolumen zu erhalten, muss außerdem der korrekte Wert für den Aortendurchmesser ermittelt werden.

### ■ Klinische Bewertung der transösophagealen Ultraschallmessung

Bisherige Vergleichsuntersuchungen mit den Referenzmethoden zeigen teils Übereinstimmung, teils erhebliche Abweichungen der Messwerte, außerdem eine nicht unerhebliche Abhängigkeit vom jeweiligen Untersucher. Aus diesem Grund können mit diesem Verfahren die kardiovaskuläre Therapie und die Flüssigkeitszufuhr bei kardiochirurgischen Patienten nicht optimiert werden.

## 2.6 Linker Vorhofdruck

Der linke Vorhofdruck (LAP) entspricht dem Füllungsdruck des linken Herzens und ermöglicht Aussagen über die Funktion des linken Ventrikels bei bestimmten Erkrankungen. Hierzu gehören z. B. Erkrankungen der Aorten- oder Mitralklappen sowie die koronare Herzkrankheit mit schwerer Funktionsstörung des linken Ventrikels und bestimmte kongenitale Herzfehler.

### ➤ Normalwert des LAP: 4–12, Mittelwert 8 mm Hg.

Die **Messung** des Drucks erfolgt über einen intraoperativ vom Chirurgen in den linken Vorhof eingeführten Katheter, der durch die Haut nach außen geleitet wird und für die postoperative Phase belassen werden kann. Der Katheter wird ohne erneute Öffnung des Thorax wieder entfernt.

**Risiken** Die wichtigsten Risiken des linken Vorhofkatheters sind:

- Luftembolie der Koronarien und Hirnarterien,

- Gerinnselbildung mit Embolisierung (daher kontinuierliche Spülung mit Heparininfusion!),
- Blutungen nach Entfernen des Katheters.

### ➤ Wegen seiner spezifischen Risiken bedarf der linke Vorhofkatheter einer strengen Indikationsstellung.

Beim Erwachsenen wird häufig der Wedgedruck über einen Pulmonalkatheter anstelle des linken Vorhofdrucks bestimmt.

## 2.7 Transösophageale Echokardiographie (TEE)

Die transösophageale Echokardiographie gehört zu den perioperativen Standardverfahren in der Herzchirurgie. Für den **intraoperativen** Einsatz bestehen v. a. folgende Indikationen:

- Kontrolle von Herzklappenrekonstruktionen, v. a. der Mitralklappe,
- Funktionskontrolle nach Herzklappenersatz, Suche nach paravalvulären Lecks,
- Kontrolle nach Korrekturoperationen kongenitaler Herzfehler,
- Beurteilung der Aortenklappe bei Typ-A-Dissektion,
- obligat bei allen minimal-invasiven Eingriffen ohne direkte Sicht des Herzens,
- Überwachung der globalen und regionalen Myokardfunktion.

Die Mitralklappen- und Trikuspidalklappen können mit dem „Vierkammerblick“ im mittleren Ösophagus beurteilt werden, die linksventrikuläre Funktion aus dem Magenfundus.

**Frühe postoperative** Indikationen sind z. B.:

- Diagnose eines Perikardergusses und einer Herztamponade,
- Beurteilung der Myokard- und der Klappenfunktion,
- Diagnose einer Lungenembolie; Lokalisation kardialer Emboliequellen.

### ➤ Die intraoperative Untersuchung sollte systematisch sein und einem klinikinternen Untersuchungsgang samt Dokumentation folgen, der sich an den Empfehlungen von

Fachgesellschaften orientiert, z. B. der American Society of Echocardiography.

## 2.8 Beurteilung der wissenschaftlichen Evidenz

Trotz zahlreicher Studien und Versuche, die Überlegenheit eines bestimmten Monitoring-Systems nachzuweisen, ist die wissenschaftliche Evidenz bis heute so gering, dass keines der speziellen Verfahren generell empfohlen werden kann. Vielmehr sollten die einzelnen Verfahren immer in den Kontext der Erkrankung des Patienten und der möglichen Komplikationen gesetzt werden.

➤ **Monitoring allein wird niemals zu einem verbesserten Patienten-Outcome führen, sondern immer nur eine individualisierte Therapie auf der Basis der erhobenen Patientenvariablen.**

### Weiterführende Literatur

- Belloni L, Pisano A, Natale A et al (2008) Assessment of fluid responsiveness parameters for off-pump coronary artery bypass surgery: a comparison among LiDCO transesophageal echocardiography, and pulmonary artery catheter. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 22(2):243–248
- Broch O, Renner J, Höcker J et al (2010) Uncalibrated pulse power analysis fails to reliably measure cardiac output in patients undergoing coronary artery bypass surgery. *Crit Care* 15(1):R76
- Chiang Y, Hosseini L, Rhee A, Itagaki S, Cavallaro P, Chikwe J (2015) Questionable benefit of the pulmonary artery catheter after cardiac surgery in high-risk patients. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 29(1):76–81
- Cowie BS (2011) Does the pulmonary artery catheter still have a role in the perioperative period? *Anaesth Intens Care* 39(3):345–355
- Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin (DGAI) und Deutsche Gesellschaft für Thorax-, Herz- und Gefäßchirurgie (2007) S-3-Leitlinie: Intensivmedizinische Versorgung herzchirurgischer Patienten. Hämodynamisches Monitoring und Herz-Kreislauf-Therapie. [www.awmf-leitlinien.de](http://www.awmf-leitlinien.de) oder Suppl Anästh Intensivmed 48: S1–S24
- Felbinger W, Goepfert MS, Goresch T et al (2005) Arterielle Pulskonturanalyse zur Messung des Herzindex unter Veränderungen der Vorlast und der aortalen Impedanz. *Anaesthesist* 54:755–762
- Fernandez-Mondejar E, Castano-Perez J, GarcoaDelgado M et al (2005) Small increases in extravascular lung water are accurately detected by transpulmonary thermodilution. *J Trauma* 59:1420–1424
- Goepfert M, Richter HP, Zu Eulenberg C et al (2013) Individually optimized hemodynamic therapy reduces complications and length of stay in the intensive care unit: a prospective, randomized controlled trial. *Anesthesiology* 119(4):824–936
- Hadian M, Kim HK, Severy DA, Pinsky MR (2010) Cross-Comparison of cardiac output trending accuracy of LiDCO, PiCCO, FloTrac and pulmonary artery catheters. *Crit Care* 14(6):R212
- Halvorsen PS, Sokolov A, Cvancarova M et al (2007) Continuous cardiac output during off-pump coronary artery bypass surgery: pulse-contour analyses vs pulmonary artery thermodilution. *Br J Anaesth* 99(4):484–492
- Hofer CK, Button D, Weibel L et al (2010) Uncalibrated radial and femoral arterial pressure waveform analysis for continuous cardiac output measurement: an evaluation in cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 24(2):257–264
- Isakow W, Schuster P (2006) Extravascular lung water measurements and hemodynamic monitoring in the critically ill: bedside alternatives to the pulmonary artery catheter. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol* 291:L1118–L1131
- Judge O, Ji F, Fleming N, Liu H (2015) Current use of the pulmonary artery catheter in cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 29(1):69–75
- Malbrain M, De Potter T, Deeren D (2005) Cost-effectiveness of minimally invasive hemodynamic monitoring. In: Vincent J (ed) Yearbook of intensive care and emergency medicine. Springer, Berlin, pp 603–632
- Paarmann H, Groesdonk HV, Sedemund-Adib B et al (2011) Lack of agreement between pulmonary arterial thermodilution cardiac output and the pressure recording analytical method in postoperative cardiac surgery patients. *Br J Anaesth* 106(3):298–304
- Sakka SG, Klein M, Reinhart K, Meier-Hellmann A (2002) Prognostic value of extravascular lung water in critically ill patients. *Chest* 122(6):1376–1378
- Sakka SG, Kozieras J, Thuemer O, van Hout N (2007) Measurement of cardiac output: a comparison between ttranspulmonary thermodilution and uncalibrated pulse contour analysis. *Br J Anaesth* 99(3):337–342
- Sato Y, Motoyama K, Maruyama K, Okuyama M, Hayashi K, Nakae H, Tajimi K, Ogawa J (2007) Extravascular lung water measured using single transpulmonary thermodilution reflects perioperative edema induced by esophagectomy. *Eur Surg Res* 39:7–13

Anästhesie und Intensivmedizin in der Herz-, Thorax-  
und Gefäßchirurgie

Larsen, R.

2017, X, 457 S. 82 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-662-52986-7