

Erhard Kaiser  
Michael Markant *Hrsg.*

# Herzkatheterlabor für Einsteiger



# Rechtsherzkatheteruntersuchung

9

Kai Oppenländer

## Inhaltsverzeichnis

9.1	Stellenwert und Indikationen zur Durchführung einer Rechtsherzkatheteruntersuchung . .	152
9.2	Kontraindikationen für die Durchführung einer Rechtsherzkatheteruntersuchung . . . . .	153
9.3	Durchführung einer Rechtsherzkatheteruntersuchung . . . . .	154
9.3.1	Vorbereitung . . . . .	154
9.3.2	Überwachung . . . . .	154
9.3.3	Technisch-apparative Voraussetzungen . . . . .	154
9.3.4	Zugangswege . . . . .	155
9.3.5	Einlage des Rechtsherzkatheters . . . . .	157
9.3.6	Anschluss des Katheters an Druckwandler und Nullpunkteinstellung . . . . .	157
9.4	Messungen . . . . .	158
9.4.1	Formanalyse der Druckkurve . . . . .	160
9.4.2	Messung des Herzzeitvolumens (HZV) . . . . .	163
9.4.3	Shuntdiagnostik . . . . .	164
9.5	Fehler- und Einflussfaktoren der Messwerte . . . . .	166
9.6	Komplikationen bei der Durchführung einer Rechtsherzkatheteruntersuchung . . . . .	168
	Literatur . . . . .	169

## Zusammenfassung

Die Rechtsherzkatheteruntersuchung (RHK) stellt eine invasive Untersuchung dar, die Aufschluss über hämodynamische Auswirkungen von Herz- und Lungen-erkrankungen gibt. Durch die Weiterentwicklung nicht-invasiver bildgebender und

K. Oppenländer (✉)  
CardioPraxis Staufen, Göppingen, Deutschland  
E-Mail: [Kai.Oppenlaender@cardiopraxis-staufen.de](mailto:Kai.Oppenlaender@cardiopraxis-staufen.de)

funktioneller Untersuchungsverfahren (Echokardiographie, kardiale Computertomographie, kardiale Magnetresonanztomographie, Spiroergometrie) ist die RHK heute in der Diagnostik etwas in den Hintergrund getreten. Die RHK wird aber nach wie vor für alle Patienten empfohlen, bei denen eine pulmonale Hypertonie vermutet wird und muss spätestens dann durchgeführt werden, wenn eine spezifische medikamentöse Therapie der pulmonal-arteriellen Hypertonie (PAH) erwogen wird. Auch wird die RHK zur prä- und postoperativen Funktionsbeurteilung von Herzklappenfehlern benötigt, wenn nicht-invasive bildgebende Untersuchungsverfahren nicht konklusiv sind. Darüber hinaus ist die RHK zur Diagnostik, Schweregradeinteilung und Verlaufsbeurteilung von angeborenen Herzfehlern nach wie vor unverzichtbar. Das nachfolgende Kapitel stellt die heute nach wie vor gültigen Indikationen für eine RHK dar und weist auf Kontraindikationen und mögliche Komplikationen der invasiven, aber prinzipiell risikoarmen Untersuchung hin. Alle Schritte, beginnend mit der Vorbereitung des Patienten, der notwendigen Materialien und Geräte, der Durchführung der Untersuchung bis zur Befundung und Einordnung der erhobenen Messwerte werden dargestellt, es wird ferner auf Fehlermöglichkeiten und potentielle Einflussfaktoren auf die erhobenen Messergebnisse hingewiesen.

---

## 9.1 Stellenwert und Indikationen zur Durchführung einer Rechtsherzkatheteruntersuchung

Insbesondere durch die Weiterentwicklung echokardiographischer Untersuchungsmethoden in den letzten 10–15 Jahren und durch zunehmende Anwendung weiterer bildgebender und funktioneller Methoden (kardiale Magnetresonanztomographie, kardiale Computertomographie, Spiroergometrie) hat die Rechtsherzkatheteruntersuchung (RHK) als invasives Untersuchungsverfahren bei vielen Krankheitsbildern als diagnostisches Tool an Bedeutung verloren. Und auch das hämodynamische Monitoring kardialer Hochrisikopatienten auf Intensivstationen mittels RHK wird kritisch gesehen, da bis heute ein Nachweis einer Letalitätssenkung durch den routinemäßigen Einsatz der RHK bei diesen Patienten fehlt (Wietasch 2011; Wittkowski et al. 2009).

Trotz dieser Entwicklung gibt es auch heute noch etablierte Indikationen zur Durchführung einer RHK:

- Die Sicherung der Diagnose einer pulmonalen Hypertonie (PH) und die Ermittlung des hämodynamischen Schweregrads sowie insbesondere ihre Klassifikation in präkapilläre (pulmonal-kapillärer Verschlussdruck = PCWP <15 mmHg) oder postkapilläre (PCWP >15 mmHg) PH schließen immer eine invasive Messung der Hämodynamik im kleinen Kreislauf mit ein (Ewert et al. 2009; Grgic und Lange 2017; Humbert et al. 2022; Opitz 2017; Rosenkranz et al. 2016a; Schenk et al. 2005).

- Beurteilung des Ansprechens auf eine medikamentöse Therapie mit Ca-Antagonisten und Therapiesteuerung der pulmonal-arteriellen Hypertonie (PAH), auch weil die RHK bis heute die wesentliche etablierte Methode zur Bestimmung der pulmonalen Gefäßreagibilität ist und weil die in der Echokardiographie gemessenen Werte nicht ausreichend zuverlässig mit den bei der RHK invasiv gemessenen Werten korrelieren (Ewert et al. 2009; Faber et al. 2011; Humbert et al. 2022; Pilarczyk et al. 2019; Rosenkranz et al. 2011, 2016a, b).
- In der Intensivmedizin ist die invasive Bestimmung des Herzzeitvolumens (HZV) bei Patienten mit schwerer Kreislaufinsuffizienz bzw. Schock dann indiziert, wenn sich diese auf eine initial eingeleitete Therapie nicht stabilisieren (Janssens 2017; Schenk et al. 2005).

Die RHK dient hier neben der Differenzierung kardiogener und nichtkardiogener Schockursachen der Therapiesteuerung mittels Volumengabe oder -entzug sowie der Dosierung vasoaktiver und inotroper Medikamente.

Besondere Bedeutung kommt der RHK insbesondere bei Patienten im kardiogenen Schock mit Myokardinfarkt mit rechtsventrikulärer Beteiligung zu (Ewert et al. 2009; Pilarczyk et al. 2019; Schenk et al. 2005).
- Perioperativ bei kardialen oder kardiochirurgischen Hochrisikopatienten (Wietasch 2011; Wittkowski et al. 2009).
- Zur Erfassung des Schweregrads von Aortenklappen- und Mitralklappenvitien, wenn echokardiographische und andere nichtinvasive Bildgebungsmaßnahmen inkonklusiv sind (Schenk et al. 2005).
- Im Rahmen der Diagnostik und Verlaufsbeurteilung von angeborenen Herzfehlern (Kozlik-Feldmann et al. 2016).
- Zur Messung des Lungengefäßwiderstands bei Patienten vor Herztransplantation (Schenk et al. 2005).
- Zur Shuntdiagnostik und -quantifizierung bei Links-rechts-Shunt und in Kombination mit einer Linksherzkatheteruntersuchung bei Rechts-links-Shunt (Kozlik-Feldmann et al. 2016).

---

## 9.2 Kontraindikationen für die Durchführung einer Rechtsherzkatheteruntersuchung

- Eine absolute Kontraindikation zur Durchführung einer RHK sind mechanische Klappenprothesen in Trikuspidalklappen- bzw. Pulmonalklappenposition.
- Als relative Kontraindikationen sind eine floride Rechtsherzklappenendokarditis und Schrittmacher- und Defibrillatorsonden in den ersten 8 Wochen nach Implantation zu nennen, auch wenn in diesem Fall die Durchführung der Untersuchung unter Durchleuchtung das Risiko einer Sondendislokation deutlich reduzieren kann.

## 9.3 Durchführung einer Rechtsherzkatheteruntersuchung

### 9.3.1 Vorbereitung

Die Aufklärung des Patienten über Indikation, Durchführung, Nutzen und mögliche Komplikationen der RHK soll, wenn möglich, 24 h vor dem Eingriff erfolgen. Ausnahme hiervon stellen Notfallsituationen mit vitaler Bedrohung im Rahmen der intensivmedizinischen Versorgung der Patienten dar. Verwendet werden können kommerziell verfügbare Aufklärungsbogen (z. B. Perimed-Verlag, Bogen-Code: ImKa013).

Bei planbaren Untersuchungen sollte eine RHK erst nach kompletter kardialer Re-kompensation und bei normotensiven Blutdruckwerten erfolgen, da allein hierdurch in der Regel eine deutliche Veränderung der hämodynamischen Parameter erreicht wird.

Zum Untersuchungszeitpunkt sollten aktuelle Laborparameter, insbesondere Blutbild, Gerinnung einschließlich INR und PTT sowie Elektrolyte vorliegen.

Eine Nahrungskarenz wird ab 4 h vor dem Eingriff empfohlen, eine Flüssigkeitsrestriktion sollte vermieden werden, um durch eine nicht ausreichende Venenfüllung die Punktion nicht unnötig zu erschweren.

Vor Lagerung zur RHK im Katheterlabor sollte die Toilettennutzung ermöglicht werden, da bei Harndrang während der RHK extrem erhöhte Druckwerte registriert werden können.

### 9.3.2 Überwachung

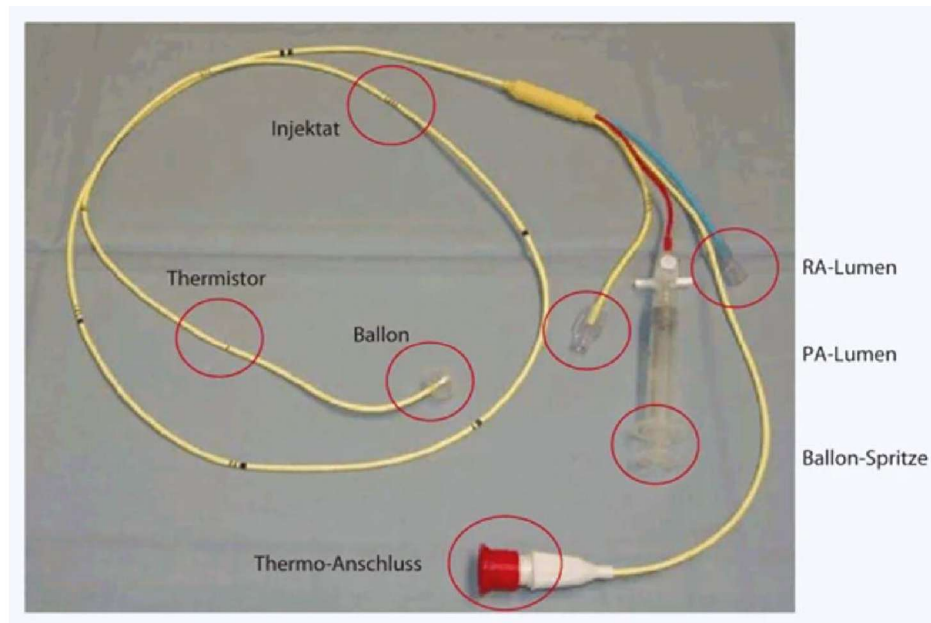
Während der gesamten Untersuchung sollte der Patient klinisch und apparativ mittels EKG-Monitor und Pulsoxymetrie überwacht werden.

Zur simultanen invasiven Messung des arteriellen Blutdrucks und für die Blutentnahme zur Bestimmung der arteriellen Sauerstoffsättigung ( $\text{SaO}_2$ ) und der arteriellen Partialdrucke für Sauerstoff ( $\text{PaO}_2$ ) und Kohlendioxid ( $\text{PaCO}_2$ ) sowie zur Bestimmung des Herzzeitvolumens (HZV) nach der Methode nach Fick empfiehlt sich die Anlage eines arteriellen Zugangs, z. B. über die A. radialis.

Notfallinstrumente (Intubationsbesteck, Absaugsystem, Defibrillator mit Möglichkeit zur externen Stimulation, Sauerstoff- und Druckluftanschluss) sowie Notfallmedikamente in ausreichender Menge sollten direkt verfügbar sein (Schenk et al. [2005](#); Wietasch [2011](#)).

### 9.3.3 Technisch-apparative Voraussetzungen

Für die Untersuchung des Lungenkreislaufs mittels Rechtsherzkatheter stehen einlumige Einschwemmkatheter (z. B. Corodyn-P1-Rechtsherzkatheter, B. Braun, Melsungen AG, Melsungen, Deutschland), bei denen die HZV-Bestimmung nach der Me-



**Abb. 9.1** Zweilumiger Thermodilutionskatheter (aus: Swan-Ganz-Katheter, Ewert R. et al.: Untersuchung mit dem Rechtsherzkatheter bei pulmonaler Hypertonie, Pneumologie 2009, 6: 370–377)

thode nach Fick erfolgt, und zweilumige Thermodilutionskatheter (z. B. Swan-Ganz, 7 F, 110 cm, Edwards Lifesciences Services GmbH, Unterschleißheim, Deutschland) (Abb. 9.1), bei denen die HZV-Bestimmung mittels Thermodilution erfolgt, zur Verfügung. Beide Katheter verfügen an ihrer Spitze über einen aufblasbaren Ballon, der das „Einschwemmen“ des Katheters in die Pulmonalarterie erheblich erleichtern kann.

Vereinzelt kommen auch Multipurpose-Katheter (MP) in 5 und 6 French, insbesondere über den femoralen Zugangsweg, zum Einsatz. Auch hier erfolgt die HZV-Bestimmung nach der Methode nach Fick.

Neben der Indikation zur Durchführung der RHK (kontinuierliche Messung, Notwendigkeit der angiographischen Darstellung des rechten Ventrikels und der Pulmonalarterien) fließen auch eine Reihe von subjektiven Faktoren und Vorlieben des Untersuchers in die Auswahl des Katheters und auch des Zugangswegs ein.

### 9.3.4 Zugangswege

Die Wahl der Punktionsstelle (V. basilica, V. jugularis interna, V. subclavia, V. femoralis) hängt zum einem von der geplanten Untersuchung und Verweildauer des Katheters, aber auch von zahlreichen patientenseitigen Faktoren (Venenverhältnisse, Gerinnungssituation, liegende Port- und Schrittmacher- bzw. Defibrillatorsonden) ab.

Das potenzielle Komplikationsrisiko ist bei Punktion einer zentralen Vene generell höher einzuschätzen als bei Punktion einer peripheren Vene. Bei voraussichtlich längerer



Liegedauer des Katheters im Rahmen einer intensivmedizinischen Behandlung wird eine zentrale Vene, bei kurzer Untersuchungsdauer oder aber bei geplanten Belastungstests eine Vene im Bereich der Ellenbeuge bevorzugt, bei gleichzeitig geplanter Linksherzkatheteruntersuchung über den femoralen Zugangsweg wird häufig die gleichseitige V. femoralis als Zugangsweg gewählt. Eine Übersicht über die verschiedenen Zugangswege und ihre spezifischen Vor- und Nachteile gibt Tab. 9.1:

Die Punktion der Vene nach Lokalanästhesie des geplanten Stichkanals mit einem Lokalanästhetikum (z. B. Lidocain 1 %) und das Einbringen der entsprechenden Schleuse in Seldinger-Technik sowie die Katheteruntersuchung selbst erfolgen unter streng aseptischen Bedingungen nach großflächiger Desinfektion des Punktionsortes und ausreichend langer Einwirkzeit (>2 min) des Desinfektionsmittels.

**Tab. 9.1** Vor- und Nachteile der verschiedenen Zugangswege für den Rechtsherzkatheter (angelehnt an Ewert et al. 2009, 2018; Rosenkranz et al. 2011; Wietasch 2011)

Zugangsweg	Vorteil	Risiken
V. jugularis interna	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativ gut auffindbar aufgrund oberflächiger Lage</li> <li>• Sonographisch gut darstellbar</li> <li>• Insbesondere rechtsseitig relativ leichtes „Einschwemmen“ des Katheters in die Pulmonalstrombahn, meist ohne Durchleuchtung möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehlpunktion der A. carotis mit Hämatombildung bei schlechter Komprimierbarkeit und potenzieller Thromboembolie in hirnversorgende Gefäße</li> <li>• Nervenläsion zervikal am N. vagus</li> <li>• Pneumothorax</li> <li>• Bei Punktion der V. <b>j</b>ugularis interna links Risiko der Verletzung des Ductus thoracicus</li> </ul>
V. subclavia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leichte Punktion (auch bei Hypovolämie gut entfaltet)</li> <li>• Insbesondere linksseitig relativ leichtes „Einschwemmen“ des Katheters in die Pulmonalstrombahn, ohne Durchleuchtung möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pneumo- und Hämatothorax</li> <li>• Schlechte Komprimierbarkeit bei Fehlpunktion der A. subclavia</li> </ul>
V. basilica, V. cephalica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leichte Punktion</li> <li>• Gute Komprimierbarkeit bei Blutungen (z. B. bei Patienten unter Antikoagulation)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thrombophlebitis und Thrombose bei längerer Liegedauer</li> <li>• Erschwerte Vorführbarkeit und Platzierbarkeit aufgrund anatomischer Engen im Schulterbereich, insbesondere bei Zugang über V. cephalica</li> </ul>
V. femoralis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leichte Punktion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Infektions- und Thromboserisiko bei längerer Liegedauer</li> <li>• Retroperitoneale Blutung bei zu hoher Punktion</li> <li>• Arteriovenöse Fistelbildung bei Punktion der A. femoralis</li> <li>• Erschwerte Positionierung des Pulmonalkatheters bei Schlaufenbildung im rechten Vorhof</li> </ul>

### 9.3.5 Einlage des Rechtsherzkatheters

Vor Einführen des Katheters müssen alle notwendigen Schleusen, Schläuche, Verlängerungen sowie der Katheter selbst gespült und luftfrei mit steriler Kochsalzlösung gefüllt werden. Bei Verwendung eines Ballon-Einschwemmkatheters muss die Dichtheit des Ballons durch Insufflation der vom Hersteller max. angegebenen Luftmenge mithilfe der im Set befindlichen Spritze überprüft werden.

Wenn immer möglich sollte das Einschwemmen des Katheters unter Durchleuchtungskontrolle erfolgen, wodurch die Positionierung des Katheters wesentlich vereinfacht wird und Knotungen des Katheters nahezu immer vermieden werden können.

Nach Erreichen des Thoraxraums wird der Ballon aufgeblasen, und ein weiteres Vorschieben des Katheters erfolgt nur mit aufgeblasenem Ballon. Sollte ein Zurückziehen des Katheters notwendig sein, muss zuvor der Ballon wieder entlüftet werden, um Verletzungen der Trikuspidal- und Pulmonalklappe zu vermeiden.

Sobald der Katheter den rechten Vorhof erreicht, sollte die Spitze zur rechten lateralen Vorhofwand zeigen. Durch Drehen des Katheters im Uhrzeigersinn wird die Spitze in Richtung der Trikuspidalklappe ausgerichtet, die durch weiteres Vorschieben des Katheters passiert wird. Nun orientiert sich die Katheterspitze in Richtung der rechtsventrikulären Spitze. Ein weiteres Vorschieben sollte nun vermieden werden, da durch Kontakt des Katheters mit dem Endokard im rechtsventrikulären Apex ventrikuläre Tachykardien ausgelöst werden können. Vielmehr sollte man versuchen, durch eine weitere **Drehung des Katheters im Uhrzeigersinn die Spitze in Richtung des rechtsventrikulären Ausflusstraktes** auszurichten. Durch tiefes Einatmen und einer damit einhergehenden Beschleunigung des Blutflusses kann gelegentlich die Passage in die Pulmonalarterie erleichtert werden.

In Pulmonalkapillarverschlussdruckposition (PCWP-Position) angekommen, sollte der Ballon des Einschwemmkatheters nur für kurze Zeit während des Messvorgangs gefüllt sein. Der Ballon sollte in kleinen Pulmonalarterien nur so weit gefüllt werden, dass ein Verschlussdruck erreicht wird. Eine stärkere Füllung kann zur Ruptur der Pulmonalarterie führen.

Gelegentlich kann die Verwendung eines 0.014 inch-Koronardrahtes nötig werden, der über das distale Lumen des Katheters eingeführt werden kann, diesen verstärkt und die Passage durch den rechten Vorhof und rechten Ventrikel erheblich erleichtern kann. Ein Herausragen dieses Drahtes über das distale Ende des Katheters hinaus sollte aufgrund der dann erhöhten Perforationsgefahr nach Möglichkeit vermieden werden.

### 9.3.6 Anschluss des Katheters an Druckwandler und Nullpunkteinstellung

Nach Herstellung aller Verbindungen (Katheter, Druckwandler, Spülsystem, Parameterbox) wird eine Nullpunkteinstellung vorgenommen. Zunächst muss sichergestellt sein,



dass sich der Druckwandler beim liegenden Patienten auf halber Thoraxhöhe bzw. in der Mitte des Thorax befindet, im sogenannten Mid-Thoracic-Level (Schenk et al. 2005). Mit dieser Position wird der linke Vorhof als anatomisches Korrelat des Nullpunkts abgebildet und ermöglicht somit eine exakte Bestimmung des pulmonalkapillären Verschlussdrucks (PCWP-Druck), was zur sicheren Differenzierung zwischen prä- und postkapillärer Hypertonie wichtig ist. Dann stellt man den Dreivegehahn vor dem Druckwandler so ein, dass die Verbindung zwischen Druckleitung und Druckwandler unterbrochen und der Druckwandler zur Atmosphäre hin geöffnet wird. Auf das Druckelement wirkt nun der Luftdruck im Untersuchungsraum ein, auf dem Monitor muss die angezeigte Druckkurve mit der Nulllinie des Monitors übereinstimmen, und die Druckwerte müssen allesamt „0“ anzeigen. Ist dies erfolgt, kann die Verbindung zwischen Druckleitung und Druckwandler wieder freigegeben werden.

---

## 9.4 Messungen

Die eigentliche Messung der Werte erfolgt am Ende der Expiration bei offenem Mund, dabei werden für alle Werte gemittelte Daten dokumentiert, indem über 3–5 Herzaktionen ein Mittelwert erfasst wird. Dies ist insbesondere bei Vorhofflimmern und bei relevanten atemabhängigen Schwankungen von Bedeutung.

Folgende Werte werden routinemäßig dokumentiert:

- RAP: rechtsatrialer Druck
- RVP: rechtsventrikulärer Druck
- PAP: pulmonalarterieller Druck
- PCWP: „pulmonary capillary wedge pressure“ (Druck in Verschlussposition der distalen Pulmonalarterie)
- SAP: systolischer arterieller Blutdruck
- HMV: Herzminutenvolumen

► **Tip** Auch wenn primär keine Shunt Diagnostik geplant ist, sollte bei jedem Rechtsherzkatheter routinemäßig die Sauerstoffsättigung in der V. cava superior und in der Pulmonalarterie (PA-Position) sowie arteriell bestimmt werden.

Ganz allgemein kann gesagt werden, dass eine pulmonalarterielle Sättigung ( $\text{SaO}_{2\text{pa}}$ )  $>75\text{--}80\%$  bzw. eine arteriovenöse Sauerstoffdifferenz ( $\text{avDO}_2$ ) von  $<3,5\text{ ml/dl}$  hochverdächtig auf das Vorliegen eines Links-rechts-Shunts ist. Das Gleiche gilt für einen Sättigungssprung zwischen V. cava superior und A. pulmonalis  $>7\%$ . Liegt ein Sprung von mehr als  $5\text{--}8\%$  bei den Sauerstoffsättigungen zwischen rechtem Vorhof und rechtem Ventrikel vor, so ist dies ein Hinweis auf einen Vorhofseptumdefekt oder aber auf fehl-einmündende Lungenvenen. In all diesen Fällen sollte eine komplette Stufenoxymetrie erfolgen (s. Abschn. 9.4.3).

**Tab. 9.2** Ausgewählte Normwerte bei Gesunden (angelehnt an Ewert et al. 2009, 2018; Wietasch 2014)

	Systolisch	Diastolisch	Enddiastolisch	Mitteldruck
Rechter Vorhof (RAP)	2–7 mmHg	2–7 mmHg		1–5 mmHg
Rechter Ventrikel (RVP)	15–30 mmHg		1–7 mmHg	
Pulmonalarterieller Druck (PAP)	15–30 mmHg		4–12 mmHg	9–20 mmHg
Pulmonalkapillärer Verschlussdruck (PCWP)	3–15 mmHg	3–15 mmHg		4–12 mmHg
Arterieller Blutdruck	90–140 mmHg	60–90 mmHg		70–105 mmHg

**Tab. 9.3** Ausgewählte gemessene und berechnete Werte der Hämodynamik bei Gesunden (angelehnt an Ewert et al. 2009, 2018)

Parameter	Berechnung	Einheit	Normwert
Herzzeitvolumen (HZV)		l/min	4–8
Cardiac Index (CI)	HZV/KOF	l/min/m <sup>2</sup>	2,5–4,2
Transpulmonaler Gradient (TPG)	PAPm-PCWP	mmHg	<12
Diastolischer Druckgradient	PAPd-PCWP	mmHg	<7
Pulmonalvaskulärer Widerstand (PVR)	$(\text{PAPm-PCWP}) \times 80/\text{HZV}$ $(\text{PAPm-PCWP})/\text{HZV}$	dyne $\times$ sec $\times$ cm <sup>-5</sup> Wood-Einheit	150–250 < 1,6
Systemvaskulärer Widerstand (SVR)	$(\text{MAP-RAPm}) \times 80/\text{HZV}$	dyne $\times$ sec $\times$ cm <sup>-5</sup>	900–1400
Pulmonaler Gesamtwiderstand (TPR)	PAPm/HZV $\text{PAPm} \times 80/\text{HZV}$	Wood Unit dyne $\times$ sec $\times$ cm <sup>-5</sup>	<3,8 <300
Arterielle Sättigung (SaO <sub>2</sub> )		%	94–100
Pulmonalarterielle Sättigung (S <sub>PA</sub> O <sub>2</sub> )		%	>70
Arteriovenöse Sauerstoffdifferenz (avDO <sub>2</sub> )		ml/dl	3,5–4,8

*KOF*: Körperoberfläche, *PAPm*: mittlerer pulmonalarterieller Druck, *PAPd*: diastolischer pulmonalarterieller Druck, *PCWP*: pulmonalkapillärer Verschlussdruck, *RAPm*: mittlerer rechts-atrialer Druck, *MAP*: mittlerer arterieller Blutdruck

Aus diesen Werten kann eine Reihe von sekundären Parametern errechnet werden, einen Überblick über Berechnung und Normwerte bei Gesunden geben Tab. 9.2 und 9.3.

Die pulmonale Hypertonie (PH) ist durch den Anstieg des invasiv gemessenen mittleren pulmonalarteriellen Drucks (PAPm) auf >20 mmHg in Ruhe definiert. Hämodynamisch wird mithilfe des pulmonalkapillären Verschlussdrucks (PCWP) zwischen präkapillärer (PCWP <15 mmHg) und postkapillärer (PCWP >15 mmHg) pulmonaler Hypertonie unterschieden. Durch Berücksichtigung des pulmonal-vaskulären Widerstands

**Tab. 9.4** Definition und Charakteristika der pulmonalen Hypertonie (PH) (angelehnt an Humbert et al. 2022)

Definition	Charakteristika
Pulmonale Hypertonie (PH)	PAPm >20 mmHg
Präkapilläre pulmonale Hypertonie	PAPm >20 mm Hg PCWP <15 mmHg PVR >2 Wood Unit
Isoliert postkapilläre pulmonale Hypertonie (IpcPH)	<b>PAPm &gt;20 mmHg</b> <b>PCWP &gt;15 mmHg</b> <b>PVR &lt;2 Wood Unit</b>
Kombiniert postkapilläre und präkapilläre Hypertonie (CpcPH)	PAPm >20 mmHg PCWP >15 mmHg und PVR >2 Wood Unit

*PAPm*: mittlerer pulmonalarterieller Druck, *PCWP*: pulmonalkapillärer Verschlussdruck, *PVR*: pulmonalvaskulärer Widerstand

(PVR) kann bei erhöhtem PCWP zwischen kardialer (isoliert-postkapilläre PH, ipcH) mit einem PVR <2 WU und kombiniert kardial-pulmonal (kombiniert post- und präkapilläre PH, cpcH) bedingter PH mit einem PVR >2 WU differenziert werden (Humbert et al. 2022; Opitz 2017; Rosenkranz et al. 2016a, b). Siehe hierzu auch Tab. 9.4.

### 9.4.1 Formanalyse der Druckkurve

Erfolgt das Vorführen des Katheters nicht unter radiologischer Kontrolle, so wird der Katheter nach dem Einführen über die Schleuse an den Druckwandler angeschlossen. Die charakteristischen Druckkurven in den verschiedenen Gefäß- und Herzabschnitte geben Auskunft über die Katheterposition (siehe hierzu Abb. 9.2).

#### Rechtsatrialer Druck (RA-Druckkurve)

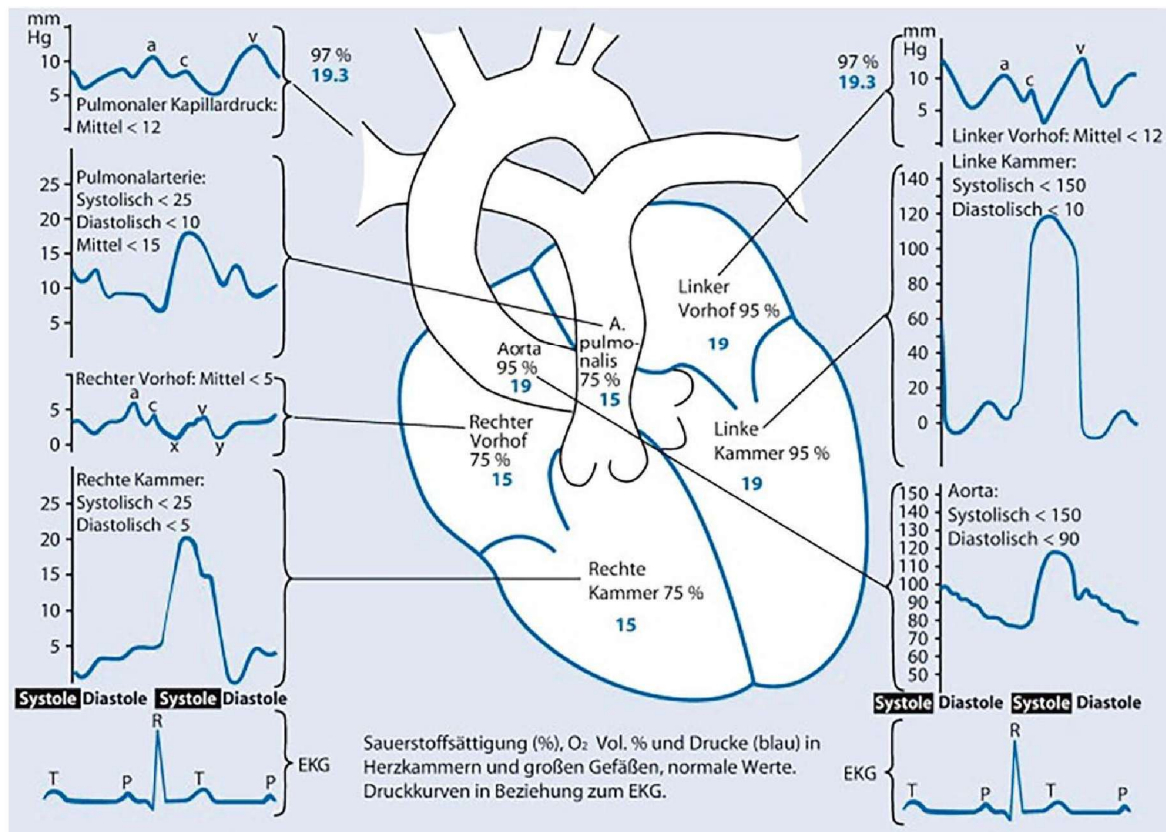
Die Druckkurve im rechten Vorhof weist üblicherweise 3 Wellenberge (a-, c- und v-Welle) und 2 Wellentäler (x- und y-Tal) auf.

Der erste Ausschlag der Druckkurve, die a-Welle, resultiert aus der Vorhofkontraktion und folgt der P-Welle im EKG (aktive Vorhoffüllung).

Die kleine c-Welle im abfallenden Schenkel der a-Welle entsteht durch den Schluss der Trikuspidalklappe.

Das sich anschließende x-Tal wird durch die Vorhoferschaffung und das Tiefertreten der Klappenebene verursacht.

Die darauffolgende v-Welle entsteht in der Ventrikelsystole, wenn bei geschlossener Trikuspidalklappe das venöse Blut in den rechten Vorhof einströmt (passive Vorhoffüllung). Die v-Welle findet sich am Ende der T-Welle im EKG.



**Abb. 9.2** Druckmessungen im rechten Herz (aus: Buheitel 2019)

Das y-Tal kennzeichnet das frühdiastolische Minimum in der Vorhofdruckkurve, bedingt durch den raschen passiven Einstrom von Blut in den Ventrikel kurz nach der Öffnung der Trikuspidalklappe.

Beim Herzgesunden entspricht der mittlere Vorhofdruck (RAPm) dem enddiastolischen Druck im rechten Ventrikel (RVEDP) und liegt zwischen 2–7 mmHg.

Ein verringerter RAPm findet sich bei Hypovolämie, ein erhöhter Wert bei Hypervolämie und Trikuspidalklappeninsuffizienz.

Die a-Welle ist bei Vorhofflimmern nicht nachweisbar, im Sinusrhythmus ist sie bei Vorliegen einer Trikuspidalklappenstenose erhöht.

Die v-Welle zeigt sich besonders ausgeprägt bei erhöhtem Volumenangebot, wie z. B. bei einer Trikuspidalklappeninsuffizienz oder einem Vorhofseptumdefekt.

Ein tiefes y-Tal findet sich bei Perikarditis constrictiva und beim rechtsventrikulären Infarkt.

### Ventrikeldruckkurve (RV-Druckkurve)

Gemessen wird der systolische Druck als der maximale und der frühdiastolische Druck als der minimale Ausschlag und der enddiastolische Druck am Ende der Ventrikeldiastole auf Höhe der R-Zacke im EKG.

Der systolische Druck des RV entspricht normalerweise dem systolischen Pulmonalarteriendruck, bei einem Druckgradienten von über 20 mmHg ist eine Pulmonalklappenstenose anzunehmen.

Der frühdiastolische Ventrikeldruck liegt bei 0 mmHg, bei Perikarderkrankungen kann er deutlich negativ werden. Bei Störungen der Compliance, z. B. bei Kardiomyopathien, finden sich Werte deutlich über null.

Der rechtsventrikuläre enddiastolische Ventrikeldruck (RVEDP) entspricht wie bereits erwähnt dem mittleren rechtsatrialen Druck und somit dem ZVD. Liegt der rechte Vorhofdruck deutlich höher als der enddiastolische rechtsventrikuläre Druck, ist eine Trikuspidalklappenstenose anzunehmen.

Ein erhöhter systolischer rechtsventrikulärer Druck (RVSP) findet sich neben einer Pulmonalklappenstenose auch bei einer pulmonalen Hypertonie oder einem Ventrikelseptumdefekt.

Ein erniedrigter RVSP findet sich bei Hypovolämie, bei Herzbeuteltamponade und bei Vorliegen einer Konstriktion.

Ein erhöhter rechtsventrikulärer enddiastolischer Druck (RVEDP) ist bei Pulmonalklappeninsuffizienz oder bei großem Ventrikelseptumdefekt mit Rechts-links-Shunt, aber auch bei Tamponade und Konstriktion nachweisbar.

### **Pulmonalarteriendruckkurve (PA-Druckkurve)**

Die Pulmonalarteriendruckkurve ist typisch für die Druckkurve einer Arterie mit einem **maximalen und minimalen Druckausschlag und einer dikroten Welle**.

Bei Gesunden entspricht der systolische PA-Druck dem systolischen RV-Druck.

Ein erhöhter systolischer Pulmonalarteriendruck findet sich bei prä- und postkapillärer pulmonaler Hypertonie, bei Links-rechts-Shunt, bei Lungenembolie und Linksherzerkrankungen.

### **Pulmonalkapillardruckkurve (PCWP-Kurve)**

Der Pulmonalkapillardruck (PCWP) entspricht bei Gesunden dem Druck im linken Vorhof, formalanalytisch entspricht die Kurve der des rechten Vorhofs, aufgrund des langen Laufwegs über Lungenvenen und Kapillaren sind meist aber nur die a- und die v-Welle zu erkennen.

Normalerweise sind a- und v-Welle gleich groß, jedoch ist die a-Welle im Sinusrhythmus bei einer Mitralklappenstenose deutlich höher als die v-Welle, während bei einer Mitralklappeninsuffizienz die v-Welle deutlich höher als die a-Welle imponiert und einer Ventrikeldruckkurve gleichen kann. Die a-Welle entspricht dem LVEDP, und die Werte liegen höher als der mittlere PC-Druck.

- **Tipp** Wie bereits oben erwähnt wird mittlerweile durchgehend empfohlen, eine endexpiratorische Bestimmung des PC-Drucks vorzunehmen und keine speziellen Atemmanöver mehr durchzuführen. Schwierig wird die Bestimmung bei Rhythmusstörungen (z. B. Vorhofflimmern) oder instabiler Atmung. Hier erscheint eine Mittelwertbildung über 3–5 Herzaktionen sinnvoll.



- **Wichtig** Das Vorliegen einer prominenten v-Welle kann die computergestützte Messung beeinflussen. Hier ist zwingend eine visuelle Kontrolle erforderlich. Die Druckangaben zur v-Welle sollten im Befund mit angegeben werden.

Üblicherweise liegt der mittlere PC-Druck etwas niedriger als der diastolische PA-Druck bzw. maximal gleich hoch. Allerdings ist aus der Literatur bekannt, dass die PC-Druck-Messung zahlreichen Fehlermöglichkeiten unterliegt. Abweichungen zum links-ventrikulären enddiastolischen Druck (LVEDP) von mehr als 5 mmHg sind nicht selten.

#### 9.4.2 Messung des Herzzeitvolumens (HZV)

Die Bestimmung des HZV, das beim Gesunden zwischen 6–8 l/min beträgt, kann entweder mittels Einschwemmkatheter über die Thermodilutionsmethode oder aber über die Berechnung nach der Methode nach Fick erfolgen, wobei in der Literatur allgemein die Thermodilutionsmethode bevorzugt wird.

Bei der Thermodilutionsmethode wird als Indikator in der Regel eine definierte Menge (10 ml) 4 °Celsius kalter NaCl-Lösung verwendet, die über das proximale Lumen des Thermodilutionskatheters mit gleichmäßiger, konstanter Injektionsgeschwindigkeit (über 4 s) in den rechten Vorhof injiziert wird (1. Messpunkt). Bei der Durchmischung des NaCl mit dem Blut im rechten Vorhof und rechten Ventrikel kommt es zu einer **geringen Abkühlung der Bluttemperatur, die am distalen Ende des Katheters in der A. pulmonalis** (2. Messpunkt) mithilfe einer Thermistorelektrode gemessen werden kann. Die Abkühlung des Bluts zwischen rechtem Vorhof und A. pulmonalis ist umgekehrt proportional zum Herzzeitvolumen, d. h., je größer die Blutmenge ist, die pro Zeiteinheit durch den rechten Ventrikel fließt, desto weniger wird die Bluttemperatur durch die gekühlte NaCl-Lösung erniedrigt. Aus dieser gemessenen Temperaturdifferenz kann dann rechnergestützt das Herzzeitvolumen (streng genommen des rechten Ventrikels) nach der sogenannten Stewart-Hamilton-Formel berechnet werden.

- **Tipp** Bei der Bestimmung des HZV nach der Thermodilutionsmethode sollten mindestens 3 Messungen innerhalb von 90 s durchgeführt werden, deren Ergebnisse weniger als 10 % voneinander abweichen sollten. Aus der Errechnung des Mittelwerts wird dann das Herzzeitvolumen bestimmt.

Bei der Methode nach Fick zur Bestimmung des HZV wird als Indikator Sauerstoff verwendet. Berechnet wird das HZV aus der absoluten Menge des in der Lunge aufgenommenen Sauerstoffs ( $\text{VO}_2$ ) und aus der Konzentrationsdifferenz zwischen der Sauerstoffsättigung im arteriellen und im pulmonalarteriellen Blut, der arteriovenösen Sauerstoffdifferenz ( $\text{avDO}_2$ ). Die  $\text{VO}_2$  kann zuverlässig nur spirometrisch aus der Differenz zwischen dem Sauerstoffgehalt der inspirierten und expirierten Luft berechnet werden (direktes Fick'sches-HZV). Da dies im Katheterlabor sehr aufwendig ist, berechnet man



in der Regel die  $\text{VO}_2$  nach empirisch ermittelten Formeln aus Körperoberfläche (KO), Alter und Geschlecht wie folgt (indirektes Fick'sches-HZV):

$$\text{VO}_2 \text{ (ml/min) (Männer): } \text{KO} \times (161 - \text{Alter} \times 0,54)$$

$$\text{VO}_2 \text{ (ml/min) (Frauen): } \text{KO} \times (147,5 - \text{Alter} \times 0,47)$$

Durch Blutentnahme aus der Pulmonalarterie und einer Arterie (z. B. A. radialis) erhält man die Sauerstoffsättigung ( $\text{SaO}_2$ ) im pulmonalarteriellen ( $\text{SaO}_{2\text{pa}}$ ) und arteriellen ( $\text{SaO}_{2\text{art}}$ ) Blut. Aus der  $\text{SaO}_2$  und dem Hämoglobinwert (Hb) kann der Sauerstoffgehalt ( $\text{CO}_2$ ) beider Blutproben nach der folgenden Formel berechnet werden:

$$\text{CO}_2 = \text{SaO}_2 \times \text{Hb} \times 1,34 \text{ (Hüfner-Zahl, Bindungskapazität für O}_2\text{)}$$

Für den Sauerstoffgehalt der Pulmonalarterie ( $\text{CO}_{2\text{pa}}$ ) ergibt sich:

$$\text{CO}_{2\text{pa}} \text{ (ml O}_2\text{/dl)} = \text{Hb (g/dl)} \times 1,34 \times \text{SaO}_{2\text{pa}}/100$$

Für den Sauerstoffgehalt der arteriellen Blutprobe ergibt sich:

$$\text{CO}_{2\text{art}} \text{ (ml O}_2\text{/dl)} = \text{Hb (g/dl)} \times 1,34 \times \text{SaO}_{2\text{art}}/100$$

Die arteriovenöse Sauerstoffdifferenz ( $\text{avDO}_2$ ) zwischen dem  $\text{O}_2$ -Gehalt der Arterie ( $\text{CO}_{2\text{art}}$ ) und der Pulmonalarterie ( $\text{CO}_{2\text{pa}}$ ) errechnet sich aus:

$$\text{avDO}_2 \text{ (ml O}_2\text{/dl)} = \text{CO}_{2\text{art}} - \text{CO}_{2\text{pa}}$$

Zusammen mit der empirisch ermittelten Sauerstoffaufnahme ( $\text{VO}_2$ ) errechnet sich das Herzzeitvolumen (HZV) dann aus:

$$\text{HZV (l/min)} = \text{VO}_2/\text{avDO}_2 \times 10$$

- **Wichtig** Da das HZV in l/min angegeben wird, die  $\text{avDO}_2$  jedoch in ml/dl, muss die  $\text{avDO}_2$  mit dem Faktor 10 multipliziert werden.

### 9.4.3 Shuntdiagnostik

Die Sauerstoffmethode nach Fick mit Stufenoxymetrie hat sich zur invasiven Shunt-diagnostik durchgesetzt. Bei Verdacht auf das Vorliegen eines intrakardialen Shunts erfolgt eine sogenannte Stufenoxymetrie mit systematischer lokaler Bestimmung der Sauerstoffsättigung ( $\text{SaO}_2$ ) an folgenden Orten:

- Pulmonalarterie
- Rechter Ventrikel
- Rechter Vorhof
- Kraniale V. cava superior
- Kaudale V. cava superior (direkt oberhalb des rechten Vorhofs)
- Kraniale V. cava inferior (direkt unterhalb des rechten Vorhofs mit von den Leber-venen abgewandter Katheterspitze)
- Kaudale V. cava inferior mit weiterem Rückzug des Katheters um 10–15 cm
- Linker Ventrikel
- Aorta

- **Tipp** Vor der Blutentnahme müssen jeweils 5 ml Blut aspiriert werden, die verworfen werden. Die Stufenoxymetrie sollte zügig und ohne Unterbrechungen erfolgen und die oxymetrischen Analysen sollten unmittelbar nach Probenentnahme erfolgen. Um messtechnische Ungenauigkeiten zu umgehen, sollte an jedem Entnahmeort eine Doppelbestimmung erfolgen. Die Shuntlokalisation ist dort anzunehmen, wo eine Sättigungsdifferenz zwischen 2 Entnahmeorten besteht. Aufgrund der messtechnischen Ungenauigkeiten ist eine Sättigungsdifferenz nur dann als relevant zu beurteilen, wenn sie mindestens 5–7 % beträgt.

Die Berechnung des Shunts erfolgt durch getrennte Berechnung des systemischen (QS) und des pulmonalen Herzzeitvolumens (QP):

$$QS \text{ (l/min)} = VO_2 / (CO_{2art} - CO_{2zv}) \times 10$$

$$QP \text{ (l/min)} = VO_2 / (CO_{2pv} - CO_{2pa}) \times 10$$

$CO_{2pv}$  (ml/dl): Sauerstoffgehalt in der Pulmonalvene; bei fehlender direkter Messung wird hier vereinbarungsgemäß der arterielle Sauerstoffgehalt ( $CO_{2art}$ ) mit dem pulmonalvenösen Sauerstoffgehalt gleichgesetzt.

$CO_{2pa}$  (ml/dl): Sauerstoffgehalt in der Pulmonalarterie ( $CO_{2pa} = Hb \text{ (g/dl)} \times 1,34 \times SaO_{2PA}/100$ ).

$CO_{2art}$  (ml/dl): Sauerstoffgehalt in einer peripheren Arterie ( $CO_{2art} = Hb \text{ (g/dl)} \times 1,34 \times SaO_{2art}/100$ ).

$CO_{2zv}$  (ml/dl): Sauerstoffgehalt zentralvenös ( $CO_{2zv} = Hb \text{ (g/dl)} \times 1,34 \times SO_{2zv}/100$ ).

- **Wichtig** Die zur Bestimmung des HZV nach der Methode nach Fick sonst übliche Bestimmung des  $O_2$ -Gehalts in der Pulmonalarterie ( $CO_{2pa}$ ) ist für Shuntberechnungen nicht sinnvoll, da sich die Pulmonalarterie bereits im Shuntkreislauf befindet.

Daher werden zur Berechnung des venösen Sauerstoffgehalts ( $CO_{2zv}$ ) die Werte der V. cava superior zu zwei Dritteln und der V. cava inferior zu einem Drittel in die Berechnung übernommen:

$$CO_{2zv} = (CO_{2Vcava\ sup.} \times 2 + CO_{2Vcava\ inf.})/3$$

$CO_{2Vcava\ sup.}$  = Sauerstoffgehalt in der V. cava superior ( $CO_{2Vcava\ sup.} = Hb \text{ (g/dl)} \times 1,34 \times SaO_{2Vcava\ sup.}/100$ )

$CO_{2Vcava\ inf.}$  = Sauerstoffgehalt in der V. cava inferior ( $CO_{2Vcava\ inf.} = Hb \text{ (g/dl)} \times 1,34 \times SaO_{2Vcava\ inf.}/100$ )

Die Shuntvolumenberechnung erfolgt dann wie folgt:

Für den Links-rechts-Shunt gilt:  $QP > QS = Q \text{ (LR) in l/min} = QP - QS$

Für den Rechts-links-Shunt gilt:  $QS > QP = Q \text{ (RL) in l/min} = QS - QP$

- **Tipp** Für praktische Belange und die schnelle Beurteilung von Shuntgrößen im Katheterlabor lässt sich die Größe eines Shunts allein aus der Sauerstoff-

sättigung ( $\text{SaO}_2$ ) und damit ohne Berechnung des Sauerstoffgehalts ( $\text{CO}_2$ ) und des Sauerstoffverbrauchs ( $\text{VO}_2$ ) relativ genau ermitteln:

$$\text{Links-rechts-Shunt (\%)}: (\text{SaO}_{2\text{pa}} - \text{SaO}_{2\text{zv}} / \text{SaO}_{2\text{art}} - \text{SaO}_{2\text{zv}}) \times 100$$

$$\text{Rechts-links-Shunt (\%)}: (\text{SaO}_{2\text{pv}} - \text{SaO}_{2\text{art}} / \text{SaO}_{2\text{pv}} - \text{SaO}_{2\text{zv}}) \times 100$$

$\text{SaO}_{2\text{PA}}$  = Sauerstoffsättigung in der Pulmonalarterie

$\text{SaO}_{2\text{zv}}$  = Sauerstoffsättigung im zentralvenösen Blut

$\text{SaO}_{2\text{pv}}$  = Sauerstoffsättigung in der Pulmonalvene

$\text{SaO}_{2\text{art}}$  = Sauerstoffsättigung in einer peripheren Arterie

## 9.5 Fehler- und Einflussfaktoren der Messwerte

Grundsätzlich gilt für die Erhebung aller hämodynamischen Werte, dass die Positionierung des Druckwandlers und somit die Bestimmung des Nullpunkts von besonderer Bedeutung ist. Ganz allgemein gilt, dass jeder Zentimeter Unterschied bei der Positionierung des Druckwandlers beim „Nullabgleich“ eine Druckabweichung von 0,78 mmHg ergibt (Ewert et al. 2018). Eine falsche Nullpunkteinstellung ist immer dann anzunehmen, wenn der frühdiastolische Druck im rechten Ventrikel nicht bei 0, sondern deutlich höher (Nullpunkt zu tief) oder deutlich tiefer (Nullpunkt zu hoch) aufgezeichnet wird (Buchwalsky 1996).

- **Wichtig** Die korrekte Messung setzt eine durchgehende Flüssigkeitssäule einer Spüllösung (z. B. NaCl 0,9 % nicht heparinisiert) im gesamten Messsystem voraus. Wenn diese nicht gegeben ist, z. B. durch Luftblasen, resultieren gedämpfte Kurven und somit fehlerhafte Werte. Daher ist sowohl zu Beginn der Messungen als auch nach jeder Blutentnahme auf ein gründliches Spülen des gesamten Messsystems mit Spüllösung zu achten. Ferner gilt, dass Druckkurven umso dämpfungsfreier übertragen werden, je kürzer und steifer Katheter und Druckschläuche sind.

Eine weitere Fehlerquelle bei der rein computergestützten Auswertung können sogenannte Schleuderartefakte sein; die Flüssigkeitssäule im Katheter kann durch vermehrte Bewegung (z. B. Bewegung des Katheters im rechten Ventrikel oder an Herzklappen) in Schwingungen versetzt werden und eine zusätzliche Beschleunigung erfahren, die zu vermeintlichen Druckerhöhungen von 10–20 mmHg führen können. Erkennbar sind solche Veränderungen an zusätzlich auftretenden „Zacken“ der Druckkurven. Hier können technische Anpassungen der Messapparatur (z. B. ausreichende elektronische Dämpfung) dazu beitragen, die Amplitudentreue zu erhalten.

Liegt die Katheterspitze nicht frei im Gefäßlumen, sondern an der Gefäßwand an, werden falsch hohe oder niedrige Druckwerte gemessen. Dies gilt insbesondere beim sogenannten Overwedging, bei dem die Katheterspitze zu weit in die Peripherie der Pulmonalarterie vorgeschoben wurde. In diesem Fall muss der Katheter nochmals leicht

zurückgezogen werden und in einer größeren Lungenarterienaufzweigung platziert werden. Bei korrekter Lage lässt sich dann eine charakteristische Pulmonalkapillardruckkurve aufzeichnen. Verschließt aber der Ballonkatheter die Pulmonalarterie inkomplett, kommt es zum sogenannten Underwedging, bei dem falsch zu hohe Pulmonalkapillardruckwerte gemessen werden (Spieker et al. 2019).

Wegen der unterschiedlichen pulmonalen Perfusionsverhältnisse ist es von Bedeutung, in welchem Lungenabschnitt die Einschwemmkatheterspitze liegt. Der pulmonalkapilläre Verschlussdruck (PCWP) repräsentiert nur dann den linksatrialen Druck, wenn die Spitze des Pulmonalarterienkatheters in einem Lungenabschnitt unterhalb des linken Vorhofs, der sogenannten Zone 3 nach West, zu liegen kommt. Hier gilt, dass  $P_{\text{Pulmonalarterie}} > P_{\text{Pulmonalvene}} > P_{\text{Alveole}}$  ist, und nur dann ist ein ununterbrochener Fluss zwischen der Spitze des Pulmonalarterienkatheters und dem linken Vorhof gewährleistet. Anzeichen dafür, dass die Katheterspitze nicht in Zone 3 liegt, sind starke inspiratorische Schwankungen des PCWP-Drucks und ein mittlerer PCWP, der deutlich höher liegt als der diastolische Pulmonalarteriendruck (Buchwalsky 1996; Schenk et al. 2005; Wietasch 2011).

Intrathorakal sollte der extravasale Druck am Ende der Expiration nahe 0 liegen, daher wird empfohlen, den intravasalen Druck am Ende der Expiration zu messen. Für das Setting der Intensivmedizin bedeutet dies, dass bei mit positiv endexpiratorischem Druck (PEEP) beatmeten Patienten entweder für die Druckmessung der PEEP auf 0 reduziert wird oder aber als vereinfachte Korrektur die Hälfte des PEEP-Niveaus vom Messwert abgezogen wird (Schenk et al. 2005).

Fehlerquellen der HZV-Bestimmung mittels Thermodilutionsmethode können messtechnischer oder aber physiologischer Natur sein. Eine ungleichmäßige oder zu lange Injektion ( $>4$  s) führt zu einer unzureichenden Durchmischung des Injektats im rechten Ventrikel und somit zu falsch hohen HZV-Werten. Eine inkorrekte Position des Thermodilutionskatheters mit zu distaler Lage der proximalen Austrittsöffnung für die NaCl-Lösung führt zu einer unzureichenden Durchmischung des Injektats mit dem Blut und ebenfalls zu falsch hohen HZV-Werten. Auch muss bedacht werden, dass das HZV während eines Atemzyklus erheblich schwanken kann, sodass idealerweise die Messung immer endexpiratorisch erfolgen sollte. Prinzipiell sollten mindestens 3 Messungen durchgeführt werden, die Unterschiede zwischen den Messergebnissen sollten weniger als 10 % betragen. Serielle Messungen, die sich um  $>10$  % unterscheiden, gelten als unzuverlässig.

Intrakardiale Shunts führen zu falsch hohen HZV-Werten. Beim Rechts-links-Shunt strömt ein Teil der kalten Indikatorlösung durch den Shunt, was zu einer verminderten Abkühlung des Bluts an der distalen Messstelle des Katheters führt, beim Links-rechts-Shunt erhöht das Shuntvolumen das Blutvolumen in der rechten Herzkammer und verdünnt somit die injizierte Indikatorlösung. Daher sollte bei intrakardialen Shunts die HZV-Bestimmung mit der Methode nach Fick erfolgen (Schenk et al. 2005, Spieker et al. 2019).

Bei der HZV-Bestimmung nach dem modifizierten Fick'schen Prinzip (indirektes Fick-HZV) muss bedacht werden, dass dieses Verfahren bei Patienten mit schweren pul-

monal-parenchymalen Erkrankungen nicht angewendet werden kann, da die Verwendung empirisch ermittelter Werte der Sauerstoffaufnahme ( $\text{VO}_2$ ) dann grundsätzlich ungeeignet erscheint. In diesen Fällen muss die Sauerstoffaufnahme aus der Differenz zwischen dem Sauerstoffgehalt der inspirierten und dem der expirierten Luft spirometrisch bestimmt werden (direktes Fick-HZV).

---

## 9.6 Komplikationen bei der Durchführung einer Rechtsherzkatheteruntersuchung

Die Durchführung einer RHK stellt eine invasive, jedoch risikoarme Untersuchung dar. In einer multizentrischen internationalen Analyse erfahrener PH-Zentren wird bei über 7000 RHK eine Gesamtkomplikationsrate von 1,1 % angegeben, die Rate tödlicher Komplikationen lag bei 0,05 % (Hoeper et al. 2006).

Die Komplikationen können unterteilt werden in (Schenk et al. 2005; Wietasch 2011):

1. Komplikationen, verursacht durch das Einführen der Schleuse über eine zentrale oder periphere Vene:
  - Pneumothorax,
  - Hämatombildung,
  - Blutungen inklusive Hämatothorax,
  - **arterielle Fehlpunktionen und Ausbildung arteriovenöser Fisteln, insbesondere bei Punktionen im Leistenbereich,**
  - Luftembolie,
  - Verletzung des Ductus thoracicus.
2. Komplikationen beim Einführen des Pulmonalarterienkatheters und bei der Durchführung der hämodynamischen Messungen:
  - Supraventrikuläre und ventrikuläre Arrhythmien treten häufig bei der Passage des rechten Vorhofs und rechten Ventrikels auf und sind zumeist selbstlimitierend. Anhaltende ventrikuläre Tachykardien treten in 3 % der Fälle auf und werden vermehrt beobachtet bei akuten Myokardischämien, Kardiomyopathien, Elektrolytstörungen (v. a. Hypokaliämie), Hypoxie und Azidose.
  - Bei vorbestehendem Linksschenkelblock kann durch einen intermittierenden Rechtsschenkelblock ein kompletter AV-Block auftreten.
  - Knotenbildung des Katheters: Prädisponierend hierfür sind ein dilatierter rechter Ventrikel, ein niedriges Herzzeitvolumen (HZV) und eine pulmonale Hypertonie. Weitgehend vermieden werden kann diese Komplikation durch Vorführen und Platzierung des Katheters unter Durchleuchtung.
  - Pulmonalarterienruptur: Diese Komplikation kann unmittelbar beim Einschwenken des Katheters oder aber nach längerer Liegedauer beim Aufblasen des Ballons eines zu weit nach distal gewanderten Katheters auftreten. Risikofaktoren sind eine pulmonale Hypertonie, höheres Lebensalter und chronische entzündliche

Erkrankungen mit längerer Cortisontherapie. Klinisch sind insbesondere neu aufgetretene Hämoptysen auf diese Komplikation hinweisend; neben einer Optimierung der Gerinnung ist immer eine intensivmedizinische Überwachung für 24–48 h indiziert.

3. Komplikationen während der hämodynamischen Überwachung (vorwiegend bei Einsatz in der Intensivmedizin bei längerer Liegedauer):

- Thrombophlebitis und Venenthrombosen.
- Infektionen: Das Risiko einer Kathetersepsis steigt mit der Liegedauer, nach 3 Tagen betrug die Rate katheterassoziierter Infektionen 2–3 % (Puri et al. 1980). Im Rahmen der intensivmedizinischen Überwachung sollte die Liegezeit aus diesem Grund auf max. 5–7 Tage begrenzt werden (Wietasch 2011).
- Endokarditis der Pulmonalklappe (<2 %).
- Lungeninfarkt: Insgesamt sehr selten, entsteht durch Thromben, die sich im oder um den Katheter herum bilden, oder aber durch Verschluss eines Lungenarterienastes bei zu langer Ballonokklusion in der sogenannten Wedge-Position beim Einsatz im Rahmen des intensivmedizinischen Monitorings.

---

## Literatur

**Buchwalsky R (1996) Einschwemmkatheter: Technik, Auswertung und praktische Konsequenzen.**

4. Ergänzte und aktualisierte Aufl. Perimed-Spitta Medizinische Verlagsgesellschaft

Buheitel G (2019) Herz- und Gefäßkrankheiten bei Kindern und Jugendlichen. In: Hoffmann G: Pädiatrie Springer Verlag

Ewert R, Opitz C, Heine A (2018) Klinische Anwendung des Rechtsherzkatheters. Ligatur Verlag

Ewert R, Opitz CF, Schäper C, Gläser S (2009) Untersuchung mit dem Rechtsherzkatheter bei pulmonaler Hypertonie. *Pneumologie* 6:370–377

Faber HW et al (2011) REVEAL Registry: correlation of right heart catheterization and echocardiography in patients with pulmonary arterial hypertension. *Congest Heart Fail.* 17:56–63

Grgic A, Lange TJ (2017) Rechtes Herz und Lungenkreislauf in der modernen Bildgebung. *Pneumologie* 14:198–208

Hoepfer MM, Lee SH, Voswinckel R et al (2006) Complications of right heart catheterization procedures in patients with pulmonary hypertension in experienced centers. *J Am Cardiol* 48:2546–2552

Humbert M, Kovacs G, Hoepfer MM et al (2022) 2022 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension. *Eur Heart J* 43:3618–3731

Janssens U (2017) Hämodynamisches Monitoring. *Aktuel Kardiologie* 6:59–65

**Kozlik-Feldmann R, Hansmann G, Bonnet D, Schranz D, Apic C, Michel-Behnke I (2016) Pulmonary hypertension in children with congenital heart disease (PAH-CHD, PPHVD-CHD). Expert consensus statement on the diagnosis and treatment of paediatric pulmonary hypertension. The European Paediatric Pulmonary Vascular Disease Network, endorsed by ISHLT and DGPK. *Heart* 102 (Suppl. 2):ii 42–48**

Opitz C (2017) Pulmonale Hypertonie – Was ist neu? *Dtsch Arztebl* 114(13):4–9

Pilarczyk K, Renner J, Haake N (2019) Akutes Rechtsherzversagen auf der Intensivstation. *Med Klein Intensivmed Notfmed* 114:567–588



- Puri VK, Carlson RW, Bander JJ, Weil MH (1980) Complication of Vascular catheterization in the critically ill. A prospective study. *Crit Care Med* 8:495–499
- Rosenkranz S, Baldus S, Grüning E, Klose H, Opitz C, Hoeper MM (2016a) Kommentar zu den 2015 ESC/ERS Leitlinien zur Diagnostik und Therapie der pulmonalen Hypertonie. *Kardiologie* 10:211–221
- Rosenkranz S, Behr J, Ewert R et al (2011) Rechtsherzkatheteruntersuchung bei pulmonaler Hypertonie. *Dtsch Med Wochenschr* 136:2601–2625
- Rosenkranz S, Lang IM, Blindt R et al (2016b) Pulmonary hypertension associated with left heart disease: recommendations of the Cologne Consensus Conference 2016. *Dtsch Med Wochenschr* 141:S26–32
- Schenk P, Stiebellehner L, Burghuber O, Kneussl M, Lang I (2005) Untersuchung des Lungenkreislaufs mittels Rechtsherzkatheter. Positionspapier des Kardiopulmonalen Arbeitskreises der Österreichischen Gesellschaft für Pneumologie und der Österreichischen Gesellschaft für Kardiologie. *Wien Klin Wochenschr* 117/18:651–662
- Spieker M, Horn P, Wetenfeld R (2019) Funktionelle Diagnostik des rechten Herzens (einschließlich dynamischer Tests) *Aktuel Kardiolog* 8:111–116
- Wittkowski U, Spies C, Erb J, Feldheiser A, von Heymann C (2009) Hämodynamisches Monitoring in der perioperativen Phase. *Anästhesist* 58:764–786
- Wietasch G (2011) Erweitertes hämodynamisches Monitoring in: Wilhelm W: *Praxis der Intensivmedizin*. Springer Verlag