

# Monitoring

W. Zink

- 2.1 Allgemeine klinische Überwachungsmethoden – 18
- 2.2 Basismonitoring – 18
- 2.3 Postoperatives Standardmonitoring für (kardiochirurgische) Intensivpatienten – 18
- 2.4 EKG-Monitoring – 19
- 2.5 Pulsoxymetrie – 20
- 2.6 Blutdruckmessung – 21
- 2.7 Blutgasanalyse (BGA) – 24
- 2.8 In- und expiratorisches Gasmonitoring – 27
- 2.9 Zentraler Venendruck (ZVD) – zentraler Venenkatheter (ZVK) – 28
- 2.10 Messung des Herzzeitvolumens (HZV; CO) – 34
- 2.11 Echokardiographie – 51
- 2.12 Körpertemperatur – 56
- 2.13 Urinausscheidung (Blasenkatheter) – 57
- 2.14 Überwachung der Leberfunktion – 57
- 2.15 Neuromonitoring – 58
- 2.16 Neuronenspezifische Enolase (NSE) – 62
- Ausgewählte Literatur – 62

## 2.1 Allgemeine klinische Überwachungsmethoden

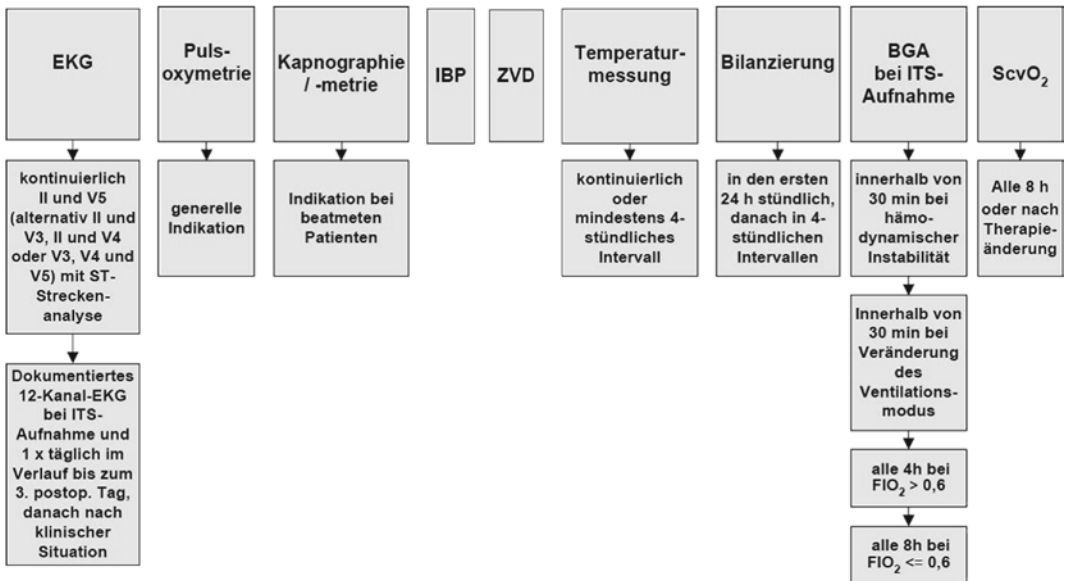
- Inspektion
- Palpation
- Perkussion
- Auskultation
- ggf. Funktionsprüfungen

## 2.2 Basismonitoring

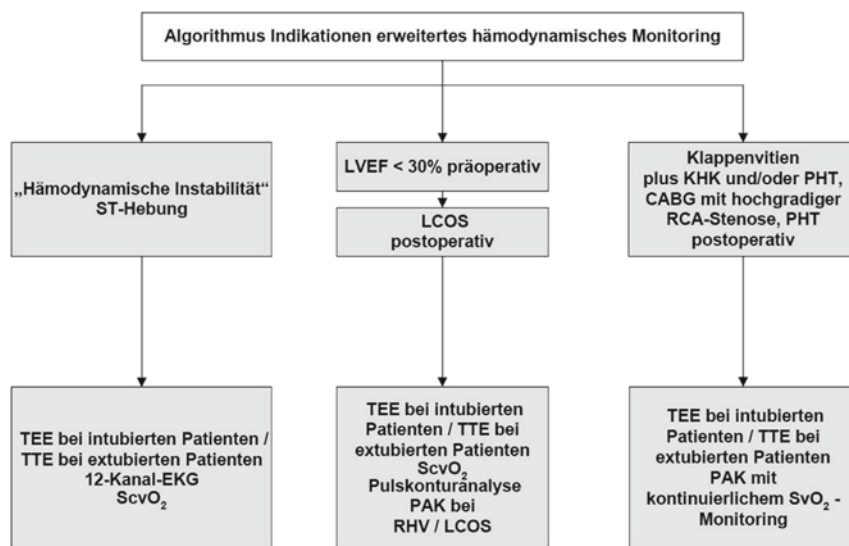
- Herzfrequenz und Herzrhythmus
- Blutdruck
- Periphere Sauerstoffsättigung
- Atemfrequenz
- Urinausscheidung
- Temperatur
- evtl. Messung des Bauchumfangs

## 2.3 Postoperatives Standardmonitoring für (kardiochirurgische) Intensivpatienten

- ■ Abb. 2.1
- EKG (II- und V5-Ableitung mit ST-Streckenanalyse)
- Pulsoxymetrie
- invasive Blutdruckmessung
- zentralvenöser Druck (ZVD)
- Bilanzierung (Drainagenverluste, Ein- und Ausfuhr)
- arterielle und zentralvenöse Blutgasanalyse ( $F_iO_2 > 0,6$  alle 4 h, sonst alle 8 h bzw. bei Veränderung der Beatmungsparameter nach spätestens 30 min)
- Temperaturmessung (mindestens 4-stündlich)
- Monitoring ggf. erweiterbar durch (■ Abb. 2.2):
  - Echokardiographie (transthorakal, transösophageal)
  - transpulmonale Thermodilution und kalibrierte Pulskonturanalyse
  - Pulmonalarterienkatheter



■ Abb. 2.1 Postoperatives Standardmonitoring für (kardiochirurgische) Intensivpatienten (S3-Leitlinie zur intensivmedizinischen Versorgung herzchirurgischer Patienten. (AWMF-Register 001/016: Hämodynamisches Monitoring und Herz-Kreislauf)



■ **Abb. 2.2** Indikationen für ein erweitertes hämodynamisches Monitoring (Algorithmus) (S3-Leitlinie zur intensivmedizinischen Versorgung herzchirurgischer Patienten. (AWMF-Register 001/016: Hämodynamisches Monitoring und Herz-Kreislauf)

## 2.4 EKG-Monitoring

- Bestandteil des Basismonitorings
- Überwachung von Herzfrequenz und Herzrhythmus
- Detektion von Myokardischämien (ST-Streckenanalyse)
- die American Heart Association empfiehlt die Analyse von mindestens 2, bevorzugt aber 3 Ableitungen für die kontinuierliche Überwachung des EKG:
  - Erkennung von P-Wellen
  - Beurteilbarkeit der Herzachse
  - Unterscheidung zwischen ventrikulären und supraventrikulären Rhythmusstörungen oder Extrasystolen
- bessere Charakterisierung von ST-Segment-Veränderungen

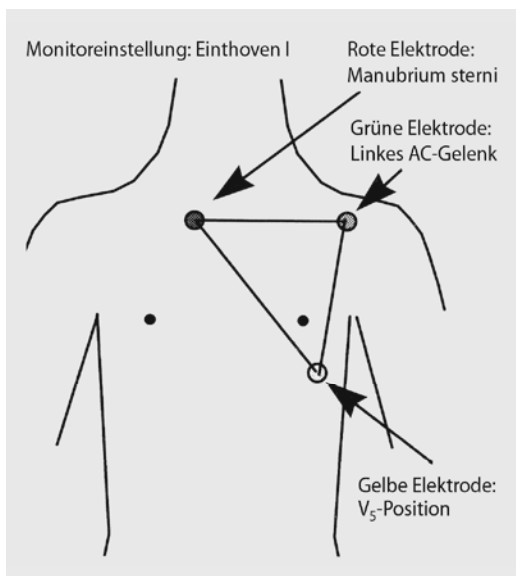
### 2.4.1 Herzfrequenz und Herzrhythmus

- kontinuierliche Überwachung
- bei herzgesunden Patienten Standardableitungen nach Einthoven (I, II, III) mittels 3-Kanal-EKG in der Regel ausreichend

- bei kardial vorgeschädigten Patienten 5-Kanal-EKG

### 2.4.2 Myokardischämien (ischämiebedingte ST-Streckenveränderungen)

- **ST-Strecke:** Beginn nach dem J-Punkt am Ende des QRS-Komplexes; Dauer 60–80 ms
- eine pathologische ST-Senkung liegt vor bei Veränderungen  $>0,05$  mV in Extremitätenableitungen bzw.  $>0,1$  mV in Brustwandableitungen
- häufig automatisierte ST-Streckenanalyse in wählbaren Ableitungen über Multifunktionsmonitor möglich
- präkordiales EKG mit den **Ableitung II bzw. V5** reicht aus, um **transmurale Ischämien im antero-lateralen bzw. inferioren Bereich** zu erkennen (80 % der Myokardischämien), ist aber ungeeignet, um eine subendokardiale Ischämie im Bereich der Hinterwand des linken Ventrikels zu erfassen.
- Überwachung der Hinterwand mittels
  - Ableitungen II, V5 + V4 oder



■ Abb. 2.3 Poor man's V5-EKG-Modifikation nach Kaplan

- »Poor man's V5«-EKG-Modifikation nach Kaplan (■ Abb. 2.3; Ableitung I und Elektrode in V<sub>5</sub>-Position und Elektrode am rechten Manubrium oder unter rechtem Schulterblatt); Nachweis von **ca. 96 % der Myokardischämien** anhand ischämischer ST-Streckenveränderungen
- von einigen Autoren wird eine kontinuierliche EKG-Überwachung mit 12 Ableitungen (I, II, III, aVF, aVR, aVL, V1–6) empfohlen, um perioperative Myokardischämien zu entdecken

## 2.5 Pulsoxymetrie

- **Bestandteil des Standardmonitorings**
- 1972 von Takuo Aoyagi entwickelt
- nichtinvasives Messverfahren zur kontinuierlichen Bestimmung der **partiellen Sauerstoffsättigung** (S<sub>p</sub>O<sub>2</sub>)
- Fehlerbreite ca. 2 % bei S<sub>p</sub>O<sub>2</sub>-Werten >70 %
- Kombination von Plethysmographie (Registrierung einer peripheren Pulswelle) und spektrometrischer Oxymetrie
- Pulsoxymeter messen die Absorption von Licht mit **2 Wellenlängen** (Rotlicht: 660 nm und Infrarotlicht: 940 nm)

- gemessen wird die Differenz zwischen Absorption während der Diastole (venöses Blut, Gewebe, Knochen, Pigmente) und dem Spitzenwert während der Systole. Es wird postuliert, dass der Absorptionsanstieg während der Systole nur durch arterielles Blut verursacht wird.
- Einsatz als Transmissions- oder Reflexionspulsoxymeter
- **Messprinzip** beruht darauf, dass
  - desoxygeniertes Hämoglobin (Hb) im Infrarotbereich (≈940 nm) weniger absorbiert wird als oxygeniertes Hb bzw.
  - oxygeniertes Hämoglobin im Rotbereich (≈660 nm) weniger Absorption als desoxygeniertes (= reduziertes) Hb zeigt
- **Oxygeniertes und desoxygeniertes Hämoglobin absorbieren das emittierte Licht bei einer Wellenlänge von 506 nm gleich!**
  - **HbO<sub>2</sub> (Oxyhämoglobin):** Absorptionsmaximum bei 560 und 590 nm
  - **Bilirubin:** Absorptionsmaximum bei 460 nm (350–550 nm)

### 2.5.1 Partielle oder funktionelle Sauerstoffsättigung (SpO<sub>2</sub>)

- Der **prozentuale Anteil des oxygenierten Hämoglobins (HbO<sub>2</sub>)** zur Summe von Oxy- und Desoxyhämoglobin wird als partielle oder funktionelle Sättigung (S<sub>p</sub>O<sub>2</sub>) bezeichnet (■ Tab. 2.1).

$$S_pO_2 = \frac{HbO_2}{Hb + HbO_2}$$

- **Dyshämoglobine und fetales Hb** werden **nicht berücksichtigt** und bei der Berechnung der Sättigung vernachlässigt.
- ■ Tab. 2.1 beschreibt die Korrelation zwischen p<sub>a</sub>O<sub>2</sub> und pulsoxymetrischer Sauerstoffsättigung
- normale Sauerstoffsättigung im arteriellen Blut: 96–98 %
- normale Sauerstoffsättigung im gemischt-venösen Blut: 70–75 %

■ **Tab. 2.1** Korrelation zwischen  $p\text{aO}_2$  und pulsoxymetrischer Sauerstoffsättigung beim Gesunden

|   |    |    |    |    |    |     |
|---|----|----|----|----|----|-----|
| $p\text{aO}_2$ (mmHg) ( $p\text{CO}_2=40$ ; $\text{pH}=7,4$ ; Normothermie) | 26 | 35 | 40 | 60 | 90 | 150 |
| $\text{S}_p\text{O}_2$ (%)  | 50 | 66 | 75 | 90 | 95 | 100 |

■ **Tab. 2.2** Faktoren, die die Messung der pulsoxymetrischen Sauerstoffsättigung beeinflussen

| Keine Beeinflussung der pulsoxymetrischen Sättigungswerte  | Falsch-hohe Werte → tatsächliche Sättigung ( $\text{S}_p\text{O}_2$ ) ist niedriger!  | Falsch niedrige Werte → tatsächliche Sättigung ( $\text{S}_p\text{O}_2$ ) ist höher!  |
|--|---|---|
| Roter und purpurner Nagellack<br>Hautfarbe<br>HbF<br>Erhöhte COHb-Werte bis 14,5 % weder in Hypoxie noch in Normoxie<br>Hyperbilirubinämie (Bilirubinabsorptionsmaximum bei 460 nm) (Bilirubinabsorptionsbereich von 350–550 nm) | Xenon- und Fluoreszenzlicht<br>MetHb bei Hypoxie (bei 5 % MetHb + 1 % COHb → deutliche Überschätzung); unter Hypoxiebedingungen wird eine $\text{O}_2$ -Sättigung von 87,6 % am Gerät angezeigt, obwohl die tatsächliche partielle Sättigung nur 80 % und die mit dem CO-Oxymeter gemessene aktuelle fraktionelle Sättigung* ( $\text{SO}_2$ ) nur 72,5 % beträgt | Farbiger Nagellack (blau, grün, schwarz) und Fingerabdrucktinte<br>Infrarot-Wärmelampen<br>Infundierte Lipidlösungen und erhöhte Chylomikronenkonzentrationen<br>Methylenblau (Absorptionsmaximum bei 660 nm)<br>Indocyaningrün, Indigocarmin (Effekt hält nur wenige Minuten an!)<br>MetHb-Werte (0,4–8,4 %) in Normoxie (geringfügige Unterschätzung)<br>Onychomykose führt zu einem zu niedrig (3–5 %) gemessenen Wert |

\* Fraktionelle Sättigung s. Blutgasanalyse

## 2.5.2 Einflussfaktoren auf die pulsoxymetrische Messung

■ Tab. 2.2 gibt Faktoren wieder, die die Messung der pulsoxymetrischen Sauerstoffsättigung beeinflussen.

Keine Werte messbar:

- unkoordinierter Bewegung (Shivering)
- ausgeprägter Zentralisation (Hypothermie, Hypovolämie,  $\alpha$ -adrenerge Substanzen, ...)

## 2.6 Blutdruckmessung

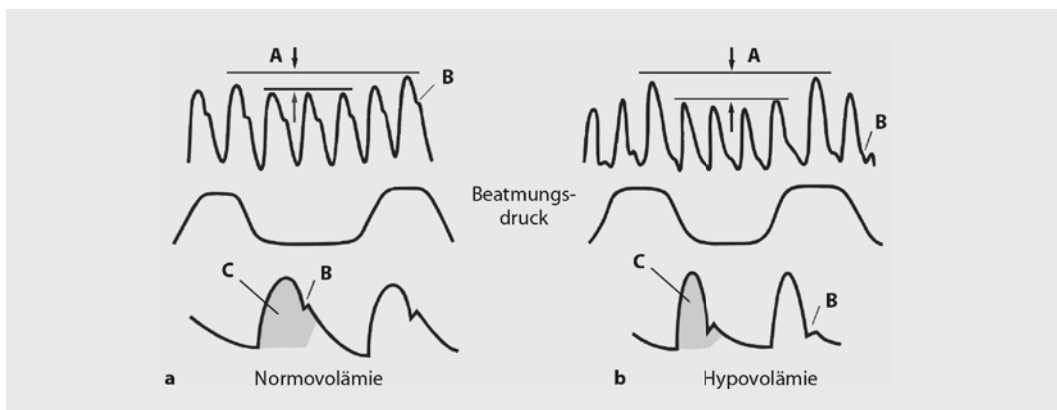
Die Blutdruckmessung stellt das Standardmonitoring zur Überwachung der Kreislauffunktion dar.

## 2.6.1 Nichtinvasive Blutdruckmessung

- Manschettenbreite ca. 40 % des Oberarmumfangs (bei Kindern: breiteste Manschette, die die Platzierung des Stethoskops in der Ellenbeuge noch erlaubt)
- die Blutdruckmanschette sollte 70 % des Oberarms umschließen
- bei Oberarmumfang >40 cm Messung am Unterarm oder am Unterschenkel

## Fehlermöglichkeiten

- zu schmale Manschette/Manschette zu locker angelegt → tendenziell falsch-hohe Werte
- zu breite Manschette → tendenziell falsch-niedrige Werte
- zu schnelles Ablassen des Manschettendrucks (>3 mmHg/s) → falsch-niedrige Werte
- Hypotension, periphere Vasokonstriktion, Schock
- Herzrhythmusstörungen



■ **Abb. 2.4a,b** Druckkurvenverlauf. **a** Normale arterielle Druckkurve. A Geringer Effekt der Beatmung auf die Druckamplitude; B hoher diastolischer Umschlagpunkt; C große Fläche unter der Kurve. **b** Arterielle Druckkurve bei Hypovolämie. A Starker Effekt der Beatmung auf die Druckamplitude (paradox); B niedriger diastolischer Umschlagpunkt; C kleine Fläche unter der Kurve

## Blutdruckmessung nach Riva-Rocci (RR)

- Korotkoff-Geräusche
  - systolischer Wert: beim Hören des Gefäßtones
  - diastolischer Wert: beim Verschwinden oder deutlichem Leiserwerden des Gefäßtones
- Berechnung des mittleren arteriellen Druckes (MAP)
  - $MAP = AP_{dia} + 1/3 (AP_{sys} - AP_{dia})$
  - $AP_{sys}$ : systolischer arterieller Druck
  - $AP_{dia}$ : diastolischer arterieller Druck

## Palpatorische Blutdruckmessung

- Aufpumpen der Manschette, bis Puls nicht mehr tastbar
- systolischer Wert: wenn Puls wieder tastbar, ca. 10–20 mmHg tiefer als bei der Riva-Rocci-Methode
- diastolischer Wert nicht zu messen

## Blutdruckautomaten

- Geräte mit oszillometrischen Messverfahren
- automatische Messung in vorgegebenen Intervallen

- Die nichtinvasive Blutdruckmessung kann bei allen hämodynamisch stabilen Patienten, bei denen nicht mit schweren Störungen der Herz-Kreislauf-Funktion gerechnet werden muss, eingesetzt werden. Bei instabiler Herz-Kreislauf-Funktion jedoch sollte die invasive Messung wegen ihrer größeren Genauigkeit und der kontinuierlichen Erfassung der Blutdruckwerte bevorzugt werden.

## 2.6.2 Invasive (direkte) Blutdruckmessung (»Arterie«)

- **Indikationen**
  - hämodynamische Instabilität mit Notwendigkeit der kontinuierlichen Blutdruckmessung
  - mehrfache arterielle Blutentnahmen notwendig
  - nichtinvasive Blutdruckmessung technisch nicht durchführbar (z. B. bei Adipositas permagna)
- **Kontraindikationen**
  - Gerinnungsstörungen (relativ)
  - Zustand nach Gefäßoperationen an der Punktionsstelle (z. B. Gefäßprothese bei A.-femoralis-Zugang)

- pathologischer Allen-Test für A.-radialis-Zugang (s. unten)
- geplante ipsilaterale Shuntanlage bei terminaler Niereninsuffizienz (relativ!)
- bei vitaler Indikation gibt es nur relative Kontraindikationen!
- **Vorteile**
  - Messung des Blutdrucks von Schlag zu Schlag
  - Druckkurvenverlauf kann zusätzliche Hinweise auf die Volumensituation des Patienten geben (»cardiac cycling« = systolische RR-Schwankungen bei In- und Expiration; ■ Abb. 2.4)
  - Wiederholte arterielle Blutentnahmen möglich

### Allen-Test

- simultane Kompression von A. radialis und A. ulnaris, nach mehrfachem Faustschluss wird die Hand blass → A. radialis weiter komprimieren und A. ulnaris freigeben → nach 5 bis max. 15 s wird die Hand rosig (Reperfusion). Wird die Hand nicht rosig, besteht eine ungenügende Perfusion der Hand über die A. ulnaris
- Aussagekraft umstritten, aus forensischen Gründen jedoch empfehlenswert (Ergebnis dokumentieren!)
- ein pathologischer Allen-Test ist eine relative Kontraindikation für die Radialispunktion

### ■ Allgemeine Komplikationen

- Blutung und Hämatome
- Thrombose
- Gefäßläsionen: Dissektion, Aneurysma, arteriovenöse Fistel
- Verletzung umliegender Strukturen (Nervenschäden)
- Infektion (selten!)
- passagerer Vasospasmus bei Fehlpunktion (sofortige weitere Punktionsversuche oft erfolglos)
- sekundäre Katheterfehllage, -dislokation, -diskonnektion mit Blutung
- versehentliche intraarterielle Injektion mit Gefahr von Nekrosen

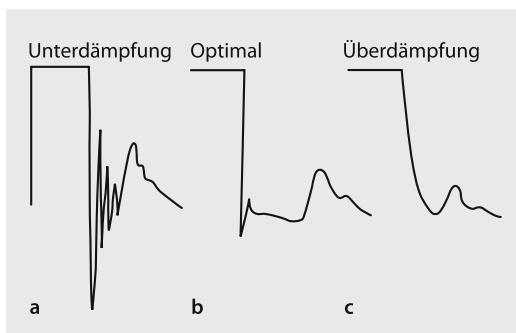
### Probleme und Messfehler

- durch Unter- bzw. Überdämpfung des Systems kommt es zu relevanten Abweichungen der gemessenen Druckwerte
- bei Unterdämpfung des Katheter-Druckaufnehmer-Systems: Überschätzung des systolischen Blutdrucks und Unterschätzung des diastolischen Drucks
- Die Resonanz eines Systems wird erniedrigt bzw. die Dämpfung verstärkt, wenn die Compliance des Schlauchsystems groß oder der Katheter sehr lang ist bzw. einen zu kleinen Innendurchmesser aufweist.
- Der Nachweis von Resonanz und Dämpfung des Systems erfolgt durch den sog. »Fast-flush-Test« zur Überprüfung der dynamischen Eigenschaften eines Kathetersystems: Durch das Spülen des Katheters werden der Fluss und der Druck im System abrupt angehoben und der Druckkurvenverlauf nach abruptem Spülstopp beobachtet. Eine gedämpfte Oszillation mit einem negativen Ausschlag gefolgt von einem einzigen positiven Ausschlag mit einer etwas schwächeren Amplitude zeigt eine optimale Dämpfung des Systems an (■ Abb. 2.5b). Links davon der typische Druckkurvenverlauf bei einer Unterdämpfung (■ Abb. 2.5b), rechts bei einer Überdämpfung des Systems (■ Abb. 2.5c).

- **Wiederholte Überprüfung der Konnektionsstellen des Systems zur Vermeidung eines akzidentellen Blutverlustes!**  
**Deutliche Kennzeichnung des arteriellen Zugangs zur Vermeidung akzidenteller Injektionen!**

### Praktisches Vorgehen

- aseptisches Vorgehen
- je nach Punktionsort spezielle Lagerung (leicht überstreckte Hand bei A. radialis, leichte Unterpolsterung des Beckens bei A. femoralis)
- Kontrolle der intraarteriellen Lage
- evtl. Seldinger-Technik mit Einführen eines Führungsdrahtes
- nach Einlegen der Kanüle Verbindung mit einem Spülsystem (3 ml/h mit 500 ml 0,9 % NaCl) und einem Drucksensor, bei Säuglingen



■ **Abb. 2.5a–c** Dämpfungskurven. (Adaptiert nach Perret et al. 1996)

und Kleinkindern: Perfusor mit 50 ml NaCl (G5 %) mit 1,2 ml/h

## Zugangswege

### A. radialis

- 20-(22) G-Kanüle nach vorheriger Lagerung der Hand (leichte Überstreckung)
- Punktion im Winkel von 30–45°
- Vorteile: einfach zugänglich, kollaterale Blutversorgung über A. ulnaris
- Nachteile: Ischämiegefahr bei mangelnder Kollateralisation

➤ **A. radialis Punktionsort der 1. Wahl, bei Rechtshändern sollte bevorzugt die linke Seite kanüliert werden und umgekehrt.**

### A. brachialis, A. axillaris

- 18-(20-) G-Kanüle mit ausreichender Länge (Seldinger-Set)
- A. brachialis: medial der Bizepssehne in der Ellenbeuge
- A. axillaris: in Achselhöhle, Klick bei Penetration der Gefäß-Nerven-Scheide
- Nachteile: Verletzung des N. medianus bei Punktion der A. brachialis, Plexusläsion bei Hämatom, Ischämie des Arms

### A. femoralis

- 18-(20-)G-Kanüle mit ausreichender Länge notwendig! (Seldinger-Set)
- evtl. leichte Unterpolsterung des Beckens
- unterhalb des Leistenbandes
- **IVAN:** Innen – Vene – Arterie – Nerv

- Vorteile: gut zugänglicher Punktionsort, oft erfolgreicherer Zugang bei Hypotonie und instabiler Hämodynamik
- Nachteile: retro-/intraperitoneale Hämatome oder Darmperforation bei zu hoher Punktion, nicht geeignet bei Patienten mit AVK und nach Gefäßprothese der A. femoralis

## Sonstige Zugangswege (z. B. A. dorsalis pedis, A. temporalis superficialis)

- Einsatz einer 22-(24-)G-Kanüle
- Nachteile: oftmals schwer lokalisierbar (A. dorsalis pedis) bzw. schwer punktierbar (A. temporalis superficialis mit muskelstarker Wand und geschlängeltem Verlauf)

! **Höherer systolischer Blutdruck im Vergleich zum Radialisdruck (MAP ist jedoch gleich!)**

## 2.7 Blutgasanalyse (BGA)

### 2.7.1 Vorgehen

- Blutentnahme in einer mit heparinisierter Spritze
- nach Entnahme luftdicht verschließen und möglichst sofort analysieren. Ist das nicht möglich, auf Eis lagern, um Erythrozytenstoffwechsel und Aufnahme oder Abgabe von Gasen zu minimieren
- jedes °C Körpertemperatur <37°C erhöht den pH um 0,015! Ein pH von 7,40 bei 37°C ergibt bei 27°C einen pH von 7,55 (identische Blutprobe!)
- die Messung erfolgt bei 37°C (Korrektur auf die tatsächliche Patiententemperatur erfolgt bei entsprechender Eingabe automatisch durch das Gerät)

### ■ Indikationen

- Störungen der Ventilation und Oxygenation
- Störungen des Säure-Basen- und Elektrolythaushalts
- Bestimmung von Laktat als Marker für anaeroben Stoffwechsel
- Dyshämoglobine bei Rauchvergiftung, NO-Beatmung
- hohe Volumenumsätze, akute Blutung



- Hb und Blutzucker sind auch durch getrennte Einzelmessverfahren zu bestimmen
- zum HZV-Monitoring (zentralvenöse Sättigung!)

### 2.7.2 Messwerte

- Partialdrücke ( $p_{O_2}$ ,  $p_{CO_2}$ )
- partielle Sauerstoffsättigung
- Hb, HbO<sub>2</sub>
- pH-Wert
- Basenexzess (BE) und Bikarbonat ( $HCO_3^-$ )
- Elektrolyte (mit ionenselektiven Elektroden)
- evtl. BZ- und Laktatmessung
- Dyshämoglobine (COHb, MetHb, SulfHb)
- fraktionelle Sauerstoffsättigung

### 2.7.3 Arterieller O<sub>2</sub>-Partialdruck ( $p_aO_2$ )

- der arterielle O<sub>2</sub>-Partialdruck ( $p_aO_2$ ) bestimmt über die sog. **O<sub>2</sub>-Bindungskurve** die zugehörige Sättigung des Hämoglobins ( $S_aO_2$  in %):
  - $p_aO_2 = 70\text{--}95\text{ mmHg}$  (bei  $FiO_2\ 0,21$ )
  - $p_aO_2 = 640\text{ mmHg}$  (bei  $FiO_2\ 1,0$ )
- die Messung erfolgt elektrochemisch mit Hilfe der sog. **Clark-Elektrode**

➤ Ist eine arterielle Punktion bzw. Blutentnahme technisch nicht möglich, kann aus gut perfundierten Arealen (Ohrläppchen, Finger, Zehe) Kapillarblut entnommen werden → enge Korrelation zu den arteriellen Blutgasen. Der peripher-venöse O<sub>2</sub>-Partialdruck ( $p_vO_2$  in mmHg) liefert keine Information über die Qualität des pulmonalen Gasaustausches.

### 2.7.4 Arterieller CO<sub>2</sub>-Partialdruck ( $p_aCO_2$ )

- Kohlendioxid CO<sub>2</sub>: Entstehung in den Mitochondrien als Endprodukt des aeroben Stoffwechsels (pro 10 verbrauchten O<sub>2</sub>-Molekülen entstehen 8 CO<sub>2</sub>-Moleküle)
- Diffusion im Gewebe entlang des Konzentrationsgefälles von intrazellulär nach

kapillär(venös) und in der Lunge von gemischtvenös nach alveolär (46 → 40 mmHg)

- Produktion: ca. 200 ml/min in Ruhe
- Transport im Blut größtenteils in chemisch gebundener Form:
  - Bikarbonat: ≈50 % in den Erythrozyten (hohe Carboanhydraseaktivität; das intraerythrozytär entstandene  $HCO_3^-$  wird gegen extrazelluläres  $Cl^-$  ausgetauscht [Hamburger-Shift]) und ≈27 % im Plasma
  - Carbamat (Carbaminohämoglobin): ≈11 % ( $Hb\cdot NH_2 + CO_2 \leftrightarrow Hb\cdot NHCOO^- + H^+$ )
- Transport in physikalisch gelöster Form zu nur ≈12 %

### Haldane-Effekt

Der Haldane-Effekt beschreibt die Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Bindung vom Oxygenierungsgrad des Hämoglobins → **desoxygeniertes** Hämoglobin vermag mehr CO<sub>2</sub> zu binden als oxygeniertes Hämoglobin.

### Transkutane pCO<sub>2</sub>-Messung ( $p_{tc}CO_2$ )

- modifizierte CO<sub>2</sub>-Elektrode nach Severinghaus mit dünner, nur für CO<sub>2</sub>-durchlässigen Teflonmembran, hinter der sich eine dünne Flüssigkeitsschicht mit Bikarbonat befindet
- dort Reaktion von H<sub>2</sub>O und CO<sub>2</sub> zu H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> bzw.  $HCO_3^- + H^+$  ( $H^+$ -Ionenkonzentration proportional zu CO<sub>2</sub>-Konzentration)
- Erwärmung des Hautbezirks unter der Elektrode auf 44°C → bessere arterielle CO<sub>2</sub>-Diffusion, aber  $p_{tc}CO_2 > p_aCO_2$  aufgrund gesteigerter regionaler CO<sub>2</sub>-Produktion

### 2.7.5 Gemischtvenöse Sättigung ( $S_vO_2$ )

$$S_vO_2 = S_aO_2 - \frac{\text{globaler Sauerstoffverbrauch}}{(\text{Herzzeitvolumen} \times 1,34 \times Hb)}$$

- wird aus dem **pulmonalarteriellen Blut** bestimmt (distaler Schenkel des Pulmonalkatheters)
- diskontinuierliche (Blutgasanalyse) bzw. kontinuierliche Messung (z. B. fiberoptisch mittels Vigilance-Monitor, Fa. Edwards) möglich

- repräsentiert die  $O_2$ -Sättigung des venösen Blutes des gesamten Organismus (venöses Mischblut aus V. cava superior, V. cava inferior und Sinus coronarius) → globaler  $O_2$ -Metabolismus → Abschätzung des globalen  $O_2$ -Verbrauchs ( $VO_2$ )
- Abfall der  $S_vO_2$  → unausgeglichene  $O_2$ -Bilanz → Warnzeichen einer drohenden Gewebshypoxie
- $S_vO_2$  abhängig von  $S_aO_2$ ,  $VO_2$ , HZV, Hb-Konzentration
- Normwert: ca. 70 %

### 2.7.6 Zentralvenöse Sättigung ( $S_vO_2$ )

- wird aus dem über den ZVK entnommenen Blut bestimmt
- diskontinuierliche (Blutgasanalyse) bzw. kontinuierliche Messung (z. B. mittels CeVOX-Messgerät, Fa. Pulsion, ■ Abb. 2.6)
- repräsentiert die  $O_2$ -Sättigung des Blutes aus der V. cava superior und damit der oberen Körperhälfte → Abschätzung des globalen  $O_2$ -Verbrauchs ( $VO_2$ )
- Normwert: ca. 70–75 %

### 2.7.7 pH-Wert

- Messung mittels Glaselektrode aus Spezialglas, welche für  $H^+$ -Ionen durchlässig ist, und einer Ag/AgCl-Referenzelektrode; dazwischen KCl-Lösung und von außen eine angelegte Spannung, die durch die eindringenden  $H^+$ -Ionen verändert wird.
- Alternativ Messung mittels  $CO_2$ -Elektrode mit dünner, nur für  $CO_2$  durchlässiger Teflonmembran, hinter der sich eine dünne Flüssigkeitsschicht mit Bikarbonat befindet, welche mit  $CO_2$  zu  $H_2CO_3$  bzw.  $HCO_3^- + H^+$  reagiert. Die  $H^+$ -Ionenkonzentration ist proportional der  $CO_2$ -Konzentration.
- Die Messung erfolgt bei 37°C (Korrektur auf die tatsächliche Patiententemperatur erfolgt bei entsprechender Eingabe automatisch durch das Gerät)
- Jedes °C Körpertemperatur <37°C erhöht den pH um 0,015! Ein pH von 7,40 bei 37°C ergibt



■ Abb. 2.6 CeVOX-Messgerät (Fa. Pulsion)

also bei 27°C einen pH von 7,55 (identische Blutprobe!)

- intramukosaler pH-Wert (pHi): ► Kap. 19

### 2.7.8 Mehrwellenlängenoxymeter

- Messung der fraktionellen Sauerstoffsättigung ( $SO_2$ )
- Messgeräte z. B.
  - CO-Oxymeter 2500 (Firma Ciba-Corning) mit spektrometrischer Messung der Hämoglobinderivate bei 7 spezifischen Wellenlängen
  - Häm-Oxymeter OSM3 (Firma Radiometer) 6 verschiedene Wellenlängen

### 2.7.9 Fraktionelle Sättigung ( $SO_2$ )

- die fraktionelle Sättigung ( $SO_2$ ) gibt den Anteil des oxygenierten Hämoglobins ( $HbO_2$ ) am Gesamthämoglobin an
- bei normaler Bindung von  $O_2$  an das Hb erreicht sie im arteriellen Blut ca. 96–97 %
- bei vermindertem  $O_2$ -Bindungsvermögen, d. h. in Anwesenheit von **Dyshämoglobinen** (MetHb, COHb, SulfHb) und **fetalem Hb**, werden entsprechend kleinere Werte erreicht

$$SO_2 = \frac{HbO_2}{Hb + HbO_2 + \underbrace{COHb + MetHb + SulfHb}_{\text{Dyshämoglobine}}}$$

- normale Konzentrationen von Dyshämoglobinen
  - COHb: 0,5–1,5 %; bei Rauchern: 5 % (bis max. 10 %)
  - MetHb: 0,2–1,5 %

- Beeinflussung der fraktionellen Sättigung
  - bei **erhöhten Bilirubinwerten** Messung falsch-niedriger  $SO_2$ -Werte → mit beiden oben genannten Geräten werden erhöhte COHb-Werte registriert, welche auf einem falschen COHb-Anstieg auf den Boden eines Spektralfehlers und einem echten COHb-Anstieg infolge einer CO-Entstehung beim Abbau von Hämoglobin zu Bilirubin beruhen!
- Früh- und Neugeborene besitzen in den ersten Lebensmonaten noch große Mengen an fetalem Hämoglobin (HbF), das andere Absorptionsspektren als das Hämoglobin des Erwachsenen aufweist → notwendige Korrektur der  $SO_2$ -Werte bei kooxymetrischer Bestimmung der fraktionellen Sauerstoffsättigung!

## 2.8 In- und expiratorisches Gasmonitoring

### 2.8.1 Messung der inspiratorischen $O_2$ -Konzentration ( $F_{I,O_2}$ )

#### Messprinzipien

- **elektrochemisch:**
  - galvanische Zelle (Bleianode und Goldkathode in basischer Elektrolytlösung)
    - Brennstoffzelle:  $O_2 + 4e^- + 2 H_2O \rightarrow 4 OH^-$
    - $Pb + 2 OH^- \rightarrow PbO + H_2O + 2e^-$
  - polarographischer Sensor (Clark-Zelle: Platin- und Silber(chlorid)-Elektroden), umhüllt mit einer  $O_2$ -durchlässigen Membran; die angelegte äußere Spannung erfährt abhängig von der  $O_2$ -Konzentration eine Veränderung
- **paramagnetisch:** in einem inhomogenen Magnetfeld befindet sich eine Hantel mit Spiegel, welche beim Umströmen mit Sauerstoff ausgelenkt wird (gelegentliche Überschätzung der inspiratorischen Sauerstoffkonzentration bis zu 15 %)
- **Indikationen**
  - Detektion eines ungenügenden  $O_2$ -Anteils im Intubationsschenkel

- unverzichtbares Monitoring bei Niedrigflussnarkosen (»low-flow«, »minimal-flow«)

**!** Die Messung der inspiratorischen  $O_2$ -Konzentration gewährleistet, dass dem Patienten keine hypoxische  $O_2$ -Konzentration zugeführt wird, garantiert jedoch keine ausreichende arterielle Oxygenierung!

### 2.8.2 Kapnometrie ( $etCO_2$ , $p_{et}CO_2$ )

#### Messprinzipien

- Messung als Partialdruckeinheit  $p_{et}CO_2$  (mmHg) oder in Konzentrationseinheiten  $etCO_2$  (Vol.-%)
- kontinuierliche Messung der **endexpiratorischen  $CO_2$ -Konzentration** ( $etCO_2$ ,  $p_{et}CO_2$ )
- Messung der inspiratorischen  $CO_2$ -Konzentration ( $itCO_2$ )
- Messung der endexpiratorischen  $CO_2$ -Konzentration auf der Basis der  $CO_2$ -abhängigen Absorption von Infrarotlicht (lineare Abhängigkeit von der Anzahl der  $CO_2$ -Moleküle)
- Massenspektrometrie
- Raman-Spektrometrie
- Messung im Hauptstrom (Sensorkopf wird auf  $39^\circ C$  zur Vermeidung von Wasserdampfbildung aufgeheizt) bzw. im Nebenstrom (Absaugen einer tubusnahen Gasprobe von 60 oder 200 ml/min, Anwendung frühestens bei Säuglingen >5 kg)
- Messgenauigkeit:  $\pm 2$  mmHg im Bereich von 40–60 mmHg
- Normwerte
  - $p_{et}CO_2 = 35\text{--}45$  mmHg oder  $etCO_2 = 4,5\text{--}6$  Vol.-%
  - $AaDCO_2 =$  alveoloarterielle  $CO_2$ -Differenz 2–5 mmHg
- **Indikationen**
  - die Kapnometrie/-graphie ist ein wünschenswertes Beatmungsmonitoring auf der Intensivstation, insbesondere bei Patienten mit Hirndruck und pulmonalem Hypertonus
  - zur Tubuslagekontrolle nach schwieriger Intubation
  - bei Patienten mit (maligner) Hyperthermie
  - Innerhospitaltransport

■ Tab. 2.3 Ursachen von  $p_{et}CO_2$ -Veränderungen

|                                     | Erhöhtes $p_{et}CO_2$  | Erniedrigtes $p_{et}CO_2$  |
|-------------------------------------|--|--|
| Metabolisch                         | Inadäquate Analgosedierung, Hyperthermie, Sepsis, postoperatives Shivering, <b>Na-Bic-Gabe</b> , maligne Hyperthermie                                  | Tiefe Analgosedierung, (Schmerzen, Stress etc. bei nachfolgender Hyperventilation unter Spontanatmung), Hypothermie  |
| Respiratorisch                      | Hypoventilation (z. B. Leckage, Atemdepression, respiratorische Insuffizienz), obstruktive Lungenerkrankung, Bronchospasmus, Tubusknick                | Hyperventilation, Bronchospasmus, Sekret, Schleimpfropf, <b>Fehlintubation</b> (primär, sekundär) <b>Tubusverlegung</b> (Tubusknick, Cuff-Hernie), PEEP-Beatmung |
| Zirkulatorisch                      | Erhöhtes HZV, Sepsis, erhöhte $CO_2$ -Aufnahme peripher (z. B. bei Laparoskopie)   | <b>Erniedrigtes HZV</b> (akute Hypotension, Hypovolämie) <b>Lungenembolie, Herzstillstand</b>  |
| Gerätebedingt                       | Rückatmung (z. B. verbrauchter $CO_2$ -Adsorber, defektes Expirationsventil), Fehlmessung ( $N_2O$ -Kompensation), Patient presst gegen Beatmungsgerät | <b>Leckage, Diskonnektion, Ausfall des Beatmungsgeräts</b> , Fehlmessung ( $O_2$ -Kompensation)  |
| Fettdruck; plötzliche Veränderungen |  |  |

■ Ursachen von  $p_{et}CO_2$ -Veränderungen

- metabolisch (erhöhte bzw. erniedrigte  $CO_2$ -Produktion, z. B.  $\uparrow O_2$ -Verbrauch  $\rightarrow \uparrow CO_2$ -Produktion)
- respiratorisch (verminderte bzw. erhöhte  $CO_2$ -Abatmung)
- zirkulatorisch (pulmonale Hypo- bzw. Hyperperfusion)
- gerätebedingt
- Kombination von verschiedenen Ursachen

❗  $p_{et}CO_2$ -Veränderungen können plötzlich oder allmählich auftreten, aber auch permanent vorhanden sein.

In ■ Tab. 2.3 sind Ursachen für ein erhöhtes oder erniedrigtes endexpiratorisches  $CO_2$  aufgeführt.

2.8.3 Kapnographie

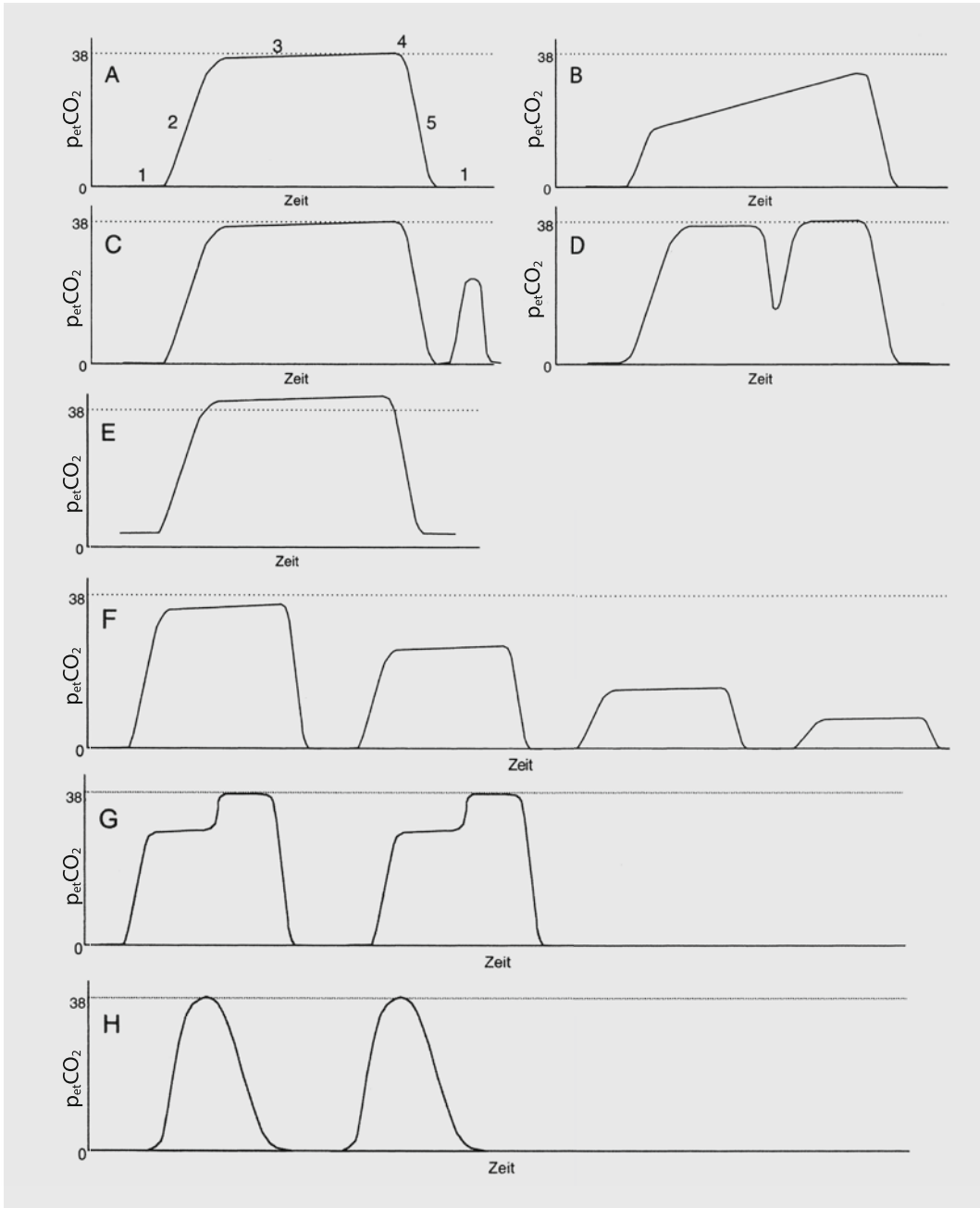
■ Abb. 2.7 stellt die graphische Darstellung der gemessenen Werte über dem Atemzyklus dar.

2.9 Zentraler Venendruck (ZVD) – zentraler Venenkatheter (ZVK)

- zentraler Venendruck (ZVD) = Druck im klap penlosen oberen/unteren Hohlvenensystem
- Positionierung der ZVK-Spitze in der V. cava superior (z. B. Jugulariskatheter) bzw. in der V. cava inferior (z. B. Femoraliskatheter)
- der ZVD entspricht dem rechten Vorhofdruck (RAP) bzw. – bei suffizienter Trikuspidalklap penfunktion – rechtsventrikularen enddiastoli schen Druck (RVEDP)
- Mehrlumenkatheter (2-Lumen, 3-Lumen, 4-Lumen, ...) zur kontinuierlichen ZVD-Messung

■ Indikationen für die ZVK-Anlage

- zentralvenöse Applikation von Medikamenten (Katecholamine etc.)
- Gabe hyperosmolarer Lösungen ( $>800$  mosmol/kg)
- parallele Applikation von untereinander nicht verträglichen Medikamenten
- Notfallzugang, wenn peripher kein Zugang möglich ist
- großlumiger ZVK (»Schockkatheter«) bei großem Blutverlust



■ **Abb. 2.7** Kapnographiekurven. **A** Normale Kapnographiekurve: 1 Inspirationsphase, 2 beginnende Expiration, 3 Plateau während der Expiration, 4 endexpiratorisches  $CO_2$  ( $p_{et}CO_2$ ), 5 beginnende Inspiration. **B** Atemwegsobstruktion. **C** Patient presst gegen Beatmungsgerät. **D** Patient atmet während Expiration ein. **E** Rückatmung von  $CO_2$ . **F** Magenbeatmung ( $p_{et}CO_2$ -Abfall bis auf 0) bei intragastralem  $CO_2$  (z. B. nach Cola-Trinken). **G** Leckage oder partielle Diskonnektion. **H** Zu geringes Ansaugvolumen (Kindereinstellung) beim Erwachsenen eingestellt (60 ml anstatt 200 ml/min)

- Shaldon-Katheter (großlumige Dialysekatheter) bei Dialysepflichtigkeit auf der Intensivstation

**! Die Messung des zentralen Venendrucks ist zur Beurteilung des intravasalen Volumenstatus ungeeignet!**

#### ■ Kontraindikationen für die ZVK-Anlage

- relativ (abhängig von Zugangsweg)
  - erhöhte Blutungsneigung
  - ausgeprägte Hyperkoagulabilität
- absolut
  - keine

#### ■ Allgemeine Komplikationen

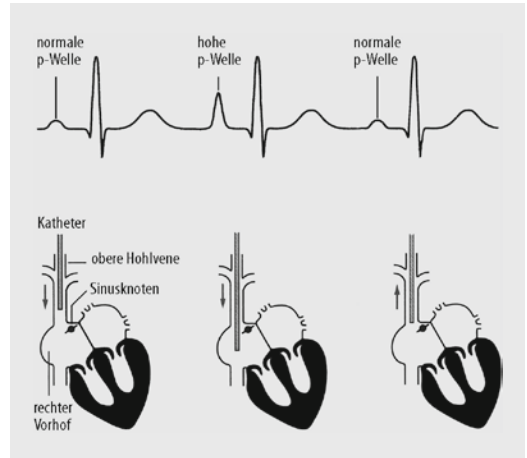
- Blutung und Hämatome
- arterielle Punktion (Hämatom, Gefäßläsionen: Dissektion, Aneurysma, arteriovenöse Fistel)
- Luftembolie, Führungsdrahtembolie
- Verletzung umliegender Strukturen (Nervenschäden)
- Perforation der Vene, besonders V. subclavia, oder des rechten Ventrikels
- Pneumo-, Hämato-, Infusionsthorax
- Chylothorax bei Punktion der V. subclavia links mit Verletzung des Ductus thoracicus
- katheterassoziierte Infektion
- Venenthrombose
- Katheterfehlage
- Herzrhythmusstörungen

### 2.9.1 Praktisches Vorgehen

- Kopftieflage bei Punktion der zentralen Venen
- steriles Vorgehen – wenn möglich Verwendung von Ultraschall zur Lokalisation der zu punktierenden Vene
- Kontrolle der intravasalen (intravenösen) Lage
- Einführen eines Führungsdrahtes nach der Seldinger-Technik

#### Kontrolle der intravasalen Lage

- unsichere Methoden
  - Blutfarbe
  - Druck/Fluss an der Punktionskanüle
  - Farbvergleich: arteriell-venös
  - Blutgaskontrolle



**■ Abb. 2.8** Kontrolle der korrekten Lage des Katheters mit Hilfe des Alphacard-Systems (Fa. Braun)

- sichere Methoden
  - Druckmessung über Kanüle mit Druckkurve! (bes. bei Shunt-Kindern)

**! Je großlumiger der einzuführende Katheter (z. B. »Schockkatheter«), desto wichtiger die sichere intravenöse Lage!**

#### Kontrolle der Katheterlage

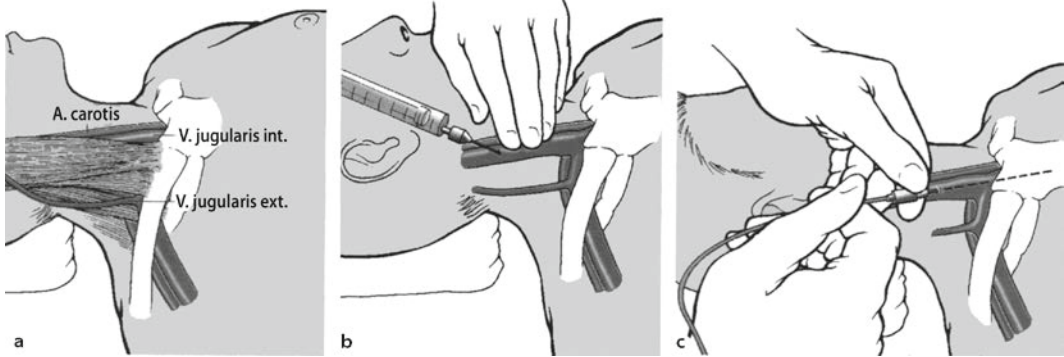
- wichtig ist die richtige Lage in der V. cava superior (1–2 cm vor rechtem Vorhof)
- intrakardiale Elektrokardiographie (Alphacard-System) (■ Abb. 2.8): EKG-Kurvenverlauf beim Vorschieben → normale p-Welle bei Lage in V. cava superior → hohe p-Welle bei Lage in Vorhof, danach wieder ≈ 2 cm zurückziehen bis normale p-Welle im EKG
- Thoraxröntgen (Lagekontrolle, Ausschluss von Komplikationen)

**! Bis zur Bestätigung der korrekten Lage ausschließlich isotone Lösungen infundieren!**

### 2.9.2 Zugangswege

#### V. jugularis interna

- Vorpunktion mit kleiner Kanüle (22 G) empfehlenswert (■ Abb. 2.9)
- mittlerer Zugang:** Punktion in Höhe des Schildknorpels, lateral der A. carotis;



■ **Abb. 2.9a–c** Katheterisierung der V. jugularis interna. **a** Verlauf der V. jugularis interna, **b** Punktion der Vene mit der Kanüle, **c** Vorschieben des Katheters durch die Kunststoffkanüle in die obere Hohlvene

Kanüle parallel der A. carotis nach kaudal vorschieben

■ **spezifische Vorteile:**

- hohe Erfolgsrate

■ **spezifische Nachteile:**

- Punktion der A. carotis: Gefäßläsion (Hämatom mit Gefahr der Kompression der Atemwege), Ablösen von Plaques mit konsekutiven zerebralen Durchblutungsstörungen
- Verletzung des Plexus brachialis
- zervikale Nervenschäden (Horner-Syndrom, Phrenikusparese)
- Vagusläsion
- Pleurakuppenverletzung mit Pneumothorax
- nicht bei Verdacht auf erhöhten Hirndruck (Abflussstörung?)
- keine beidseitigen Punktionsversuche ohne Thoraxröntgenkontrolle
- bei **linksseitiger** Punktion zusätzlich
  - schwierigere Katheterplatzierung und erhöhte Gefahr der Gefäßverletzung durch Introducer wegen rechtwinkliger Einmündung der V. subclavia
  - Verletzung des Ductus thoracicus

➤ Die rechte V. jugularis interna sollte im Rahmen einer Herztransplantation zur post-transplantationsären Myokardbiopsie geschont werden!

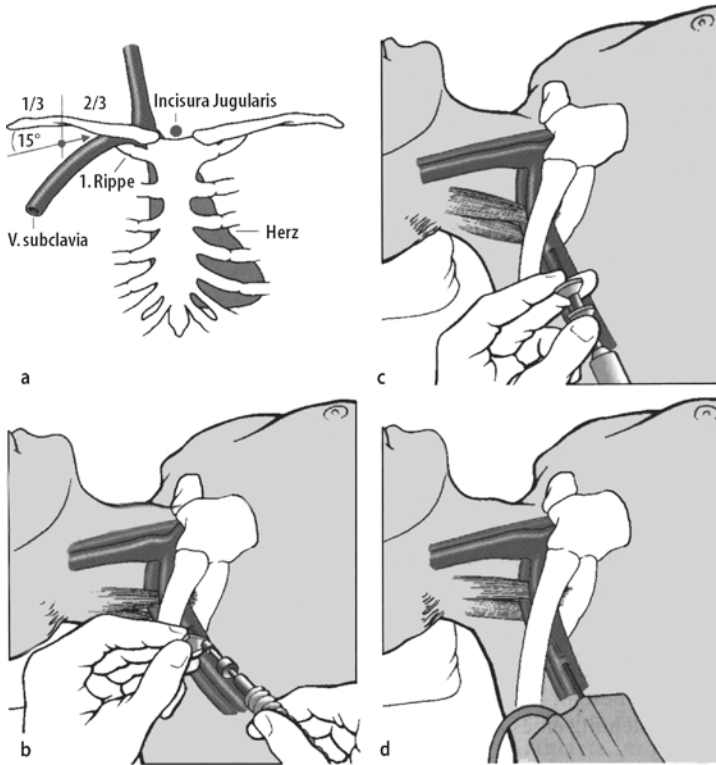
## V. anonyma

- **lateral Zugang:** Punktion  $\approx 2$  cm oberhalb der Clavicula und  $\approx 2$  cm lateral des medialen Ansatzes des M. sternocleidomastoideus (durch lateralen Anteil) und lateral der V. jugularis externa). Kanüle in Richtung Jugulum vorschieben. Nach 1,5 bis max. 4 cm Punktion der V. anonyma, danach zum Einbringen des Führungsdrahtes Kanüle evtl. in einen steileren Winkel bringen
- **zentraler Zugang** (Notfallzugang für Erfahrene): Punktion  $\approx 1$  cm oberhalb des Sterno-klavikulargelenkes. Kanüle in  $45^\circ$ -Winkel nach medial und kaudal vorschieben. Punktion der V. anonyma nach 1,5 bis max. 4 cm
- **spezifische Vorteile:**
  - Zugang auch ohne spezielle Lagerung möglich
  - Punktion auch im hypovolämischen Schock möglich
- **spezifische Nachteile:**
  - Katheterplatzierung oft schwieriger

## V. subclavia

- **infraklavikulärer Zugang:** Punktion  $\approx 1$ –2 cm unterhalb der Clavicula am Übergang laterales Drittel zu medialem Drittel oder Medioklavikularlinie. Kanüle direkt unter Clavicula (Knochenkontakt) in Richtung Jugulum vorschieben (■ Abb. 2.10)





■ **Abb. 2.10a–d** Katheterisierung der V. subclavia. **a** Anatomische Fixpunkte zur Punktion der V. subclavia, **b** Punktion der V. subclavia mit der Kunststoffkanüle, **c** Vorschieben des Katheters durch die Kunststoffkanüle in die obere Hohlvene, **d** Fixierung des Katheters auf der Haut

#### — spezifische Vorteile:

- Punktion ist auch im hypovolämischen Schock möglich

#### — spezifische Nachteile:

- Punktion der A. subclavia
- Pneumo-, Hämato-, Infusionsthorax
- keine beidseitigen Punktionsversuche ohne Thoraxröntgenkontrolle
- bei ausgeprägtem Emphysemthorax nur als Ultima ratio
- bei Thoraxtrauma/Thoraxeingriff ipsilaterale Punktion
- links zusätzlich: Verletzung des Ductus thoracicus mit Chylothorax

### V. jugularis externa

#### — spezifische Vorteile:

- leichte und komplikationsarme Punktion (wenn gut gefüllt)

#### — spezifische Nachteile:

- oft schwierigere Katheterplatzierung über Einmündung in V. subclavia und erhöhte Gefahr der Gefäßverletzung durch Introducer
- häufig Fehllagen (→ ipsilateraler Arm)

### V. basilica, V. cephalica

#### — spezifische Vorteile:

- Punktion ist technisch einfach und komplikationsarm

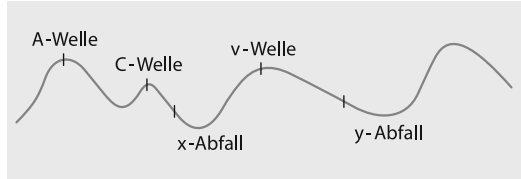
#### — spezifische Nachteile:

- höhere Infektions-, Thrombosegefahr (Thrombophlebitis)
- starke Beweglichkeit
- V. cephalica zusätzlich hohe Versagerquote wegen rechtwinkliger Einmündung in V. axillaris



## V. femoralis

- evtl. leichte Unterpolsterung des Beckens
- Punktion unterhalb des Leistenbandes
- **IVAN:** Innen – Vene – Arterie – Nerv
- **spezifische Vorteile:**
  - technisch einfache Punktion
  - hohe Erfolgsrate
- **spezifische Nachteile:**
  - hohe Thromboserate
  - Infektionsgefahr
  - arterielle Fehlpunktion
  - retro-, intraperitoneale Hämatome oder Darmperforation, wenn zu hohe Punktion



■ **Abb. 2.11** Zentrale Venendruckkurve mit a-, c-, v- und x-, y-Wellen

### 2.9.3 ZVD-Messung

- bezogen auf das **Niveau des rechten Vorhofs**, der sich in Höhe des Schnittpunktes von vorderer Axillarlinie (3/5 des anterior-posterioren Thoraxdurchmessers) und der Senkrechten durch die Mammille befindet

➤ **Es wird empfohlen, bei ZVD-Messung über einen Druckdom diesen ca. 5 cm unter der Höhe des linken Sternumrands zu platzieren!**

- Normwerte: 5 (0–10) mmHg (1 mmHg = 1,36 cmH<sub>2</sub>O)
- ungeeignet zur absoluten Beurteilung des intravasalen Volumenstatus; wichtiger als die Messung von Absolutwerten ist die Verlaufskontrolle
- alternativ: intrathorakales Blutvolumen, Schlagvolumenvariation, Pulsdruckvariation
- Beurteilung der rechtsventrikulären Funktion, v. a. als Verlaufssparameter (nur bei guter LVF mit EF >40 %)

### ZVD-Kurve

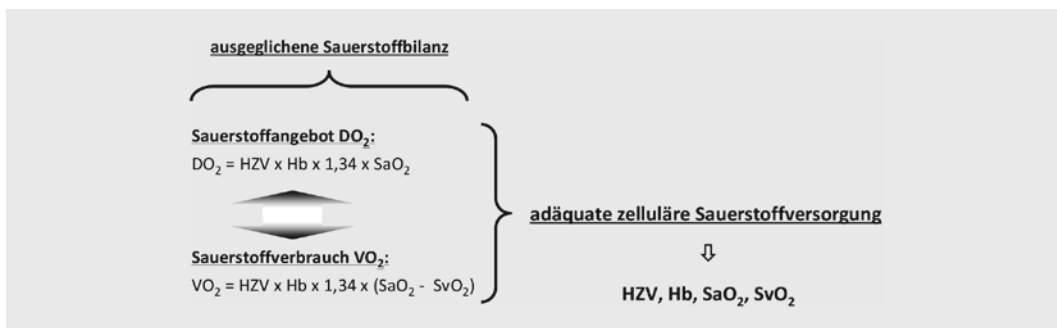
ZVD-Kurve mit 3 Druckmaxima (a, c, v) und 2 Druckminima (x, y) (■ Abb. 2.11):

- **a-Welle:** rechtsatriale Kontraktion (Verlust der a-Welle und Prominenz der c-Welle bei Vorhofflimmern)
  - **hohe a-Welle** bei pulmonalem Hypertonus, Trikuspidalklappenstenose, Pulmonalklappenstenose, rechtsventrikuläre Compliance

- ↓ und AV-Block Grad III → Fusion von a- und c-Welle bei verkürzter PQ-Zeit
- **»Kanonen-a-Welle«** bei AV-Dissoziation oder junctionalem Rhythmus
- **c-Welle:** durch Kontraktion der rechten Kammer kommt es zur Trikuspidalklappenvorwölbung und zum kurzfristigen Druckanstieg
- **x-Welle:** Vorhofdiastole (-erschaffung) und Abwärtsbewegung der Klappenebene
- **v-Welle:** rechtsatriale Füllung über die Hohlvenen und ventrikuläre Systole
  - **hohe v-Welle** bei Trikuspidalklappeninsuffizienz, Rechtsherzversagen, Pericarditis constrictiva, Herzbeutel tamponade
  - **v-Maximum** nach dem II. Herzton (Schluss der Aorten- und Pulmonalklappe)
- **y-Welle:** Öffnung der Trikuspidalklappe, Relaxation des rechten Ventrikels und Ansaugen des Blutes aus den Vorhöfen mit konsekutivem Abfall des Vorhofdruckes
- **W- oder M-Form der ZVD-Kurve (a-v: neuer Plateaupunkt) bei Pericarditis constrictiva!**

### Einflussfaktoren für den ZVD

- zentrales Venenblutvolumen bzw. totales Blutvolumen
- (rechts-)kardiale Compliancestörungen, z. B. Perikard tamponade
- Trikuspidalklappenvitium
- Arrhythmien
- Beeinflussung des intrathorakalen Drucks (z. B. PPV, PEEP)
- Beeinflussung des extrathorakalen Drucks (z. B. Aszites)
- **ZVD erhöht**, z. B. bei
  - Hypervolämie
  - Rechtsherzversagen



■ **Abb. 2.12** Beziehung zwischen Herzzeitvolumen und globaler Sauerstoffversorgung. Das Herzzeitvolumen stellt eine wichtige Determinante einer adäquaten zellulären Sauerstoffversorgung des Organismus dar

- Globalherzversagen mit erniedrigtem HZV
- Perikarderguss
- Spannungspneumothorax
- PEEP

➤ Bei Beatmung mit hohen PEEP-Werten (> 10 mmHg) muss der gemessene ZVD-Wert um ca. ein Drittel des PEEP-Wertes nach unten korrigiert werden; bei PEEP-Werten < 10 mmHg ist dagegen in der klinischen Praxis eine Korrektur nur selten erforderlich.

- **ZVD erniedrigt**, z. B. bei
  - Hypovolämie
  - Schock
  - hohes HZV

## 2.10 Messung des Herzzeitvolumens (HZV; CO)

### 2.10.1 Physiologische Grundlagen

- Herzzeitvolumen als wichtige Determinante einer adäquaten zellulären Sauerstoffversorgung des Organismus
- adäquates Sauerstoffangebot (■ Abb. 2.12)
- inadäquates Sauerstoffangebot und daraus resultierende Sauerstoffschuld → eine der Hauptursachen für erhöhte Morbidität und Mortalität bei Intensivpatienten
- relevante Gewebshypoperfusion auch bei adäquatem mittlerem Blutdruck möglich → Monitoring des HZV zur Abschätzung des globalen Sauerstoffangebots

- PAK wird nach wie vor weltweit am häufigsten zur Bestimmung des HZV eingesetzt, dennoch zunehmende Verbreitung weniger invasiver Methoden zur HVZ-Bestimmung (■ Tab. 2.4)

### 2.10.2 Nichtkalibrierte Pulskonturanalyse

- z. B. FloTrac-Sensor und Vigileo-Monitor (Fa. Edwards Lifesciences)
- Pulskonturanalysesystem ohne externe Kalibration

#### Messprinzip

- Berechnung des Schlagvolumens aus dem Pulsdruck (Differenz zwischen systolischem und diastolischem Blutdruck) und einer mathematischen Analyse der arteriellen Druckkurve (zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der arteriellen Gefäße):

$$\text{HZV} = \text{HF} \times \sigma \text{AP} \times \chi$$

- HF: Herzfrequenz
- $\sigma \text{AP}$ : Standardabweichung des arteriellen Blutdrucks, gemessen mit 100 Hz über 20 s
- $\chi$ : Konstante zur Quantifizierung von arteriellem Widerstand und Compliance
- in Konstante  $\chi$  fließen Patienteninformationen (Alter, Geschlecht, Größe, Gewicht) und arterielle Kurvencharakteristika ein (mathematische Analyse u. a. von Schiefe und Wölbung)

■ Tab. 2.4 Übersicht über aktuelle minimalinvasive Techniken zur HZV-Messung. (Adaptiert nach Hofer et al. 2012)

| Technik                                   | Geräte<br>(Beispiele)                    | Annahmen<br>Algorithmus   | Kontinuierliche<br>Messung                | Material  |
|---|--|---|---|---|
| <b>Pulswellenanalyse</b>                  |  |   |   |   |
| Kalibriert                                | PiCCOplus                                | SC = Fläche unter der systo-<br>lischen arteriellen Druck-<br>kurve (Wesseling) | 3-Sekunden-Intervall                      | Femoralarterienkatheter<br>mit Thermistor + ZVK     |
|   | EV1000/<br>VolumeVIEW                    | SV ≈ FloTrac + Wesseling  | 20-Sekunden-Intervall                     | Femoralarterienkatheter<br>mit Thermistor + ZVK     |
|   | LiDCOplus                                | SV ≈ Netto-Energie<br>(Energieerhaltung)  | Beat-to-beat                              | Lithiuminjektion/<br>Detektionsset                  |
| Nicht<br>kalibriert                       | PulsioFlex                               | SV ≈ nach Wesseling?  | 3-Sekunden-Intervall?                     | Spezieller Drucksensor                              |
|   | FloTrac/<br>Vigileo Spez.<br>Drucksensor | SV ≈ Pulsdruck/Zeit ×<br>Kalibrationsfaktor (Patient-<br>und Wellenanalyse)     | 20-Sekunden-Intervall                     | Spezieller Drucksensor                              |
| Nichtinvasiv                              | Nexfin                                   | SV ≈ arterieller Druck/Zeit<br>(3-Element-Impedanz-<br>Modell = Modellflow)     | Beat-to-beat                              | Zeit-Chip-Karte                                     |
| <b>Doppler</b>                            |  |   |   |   |
| Ösophageal                                | Deltex<br>CardioQ                        | SV ≈ aortaler Blutfluss ×<br>aortale Querschnittsfläche                         | Eingeschränkt (Platzie-<br>rungsprobleme) | Spezielle Doppler-<br>sonden                        |
| Transthorakal                             | USCOM                                    | SV ≈ Fluss über Aorten/<br>Pulmonalklappe × Klap-<br>penöffnungsfläche          | Möglich                                   | Spezielle Sonden                                    |
| <b>Bioimpedanz und Bioreaktanz</b>        |  |   |   |   |
| Bioimpedanz                               | BioZ                                     | SV ≈ thorakale Impedanz-<br>änderung  | Kontinuierlich                            | Thorakale Elektroden                                |
| Bioreaktanz                               | NICOM                                    | SV ≈ Frequenz der<br>Impedanzänderung   | Kontinuierlich                            | Thorakale Elektroden                                |
| <b>Anwendung Fick-Prinzip</b>             |  |   |   |   |
| Partielle CO <sub>2</sub> -<br>Rückatmung | NICO                                     | SV ≈ Fick-Prinzip auf CO <sub>2</sub><br>angewendet                             | 3-Minuten-Zyklus                          | Rückatmungsschleife<br>CO <sub>2</sub> + Flussensor |

- nach Überarbeitung der zugrunde liegenden Software- Algorithmen mittlerweile gute Genauigkeit in der CO-Bestimmung
- ■ Tab. 2.5 zeigt eine Übersicht der Normalwerte

#### ■ Vorteile

- geringe Invasivität; nur arterieller Zugang und kein ZVK notwendig
- keine externe Kalibrierung notwendig (minütliche mathematische Autokalibration)

- FloTrac-Sensor kann an jeden beliebigen arteriellen Zugang konnektiert werden
- kein ZVK notwendig

#### ■ Nachteile

- Artefakte in der Pulskurve beeinflussen Messung
- eingeschränkte Interpretierbarkeit bei Arrhythmien
- frühe Softwareversionen ungeeignet zur Mes-  
sung niedriger CO-Werte bei niedrigem SVR

■ Tab. 2.5 Normalwerte der Vigileo-Messung

| Herzfrequenz HF                        | 60–80/min  |
|--|--|
| Blutdruck RR                           | 100–140 mmHg (syst.)                                 |
|  | 60–90 mmHg (diast.)                                  |
|  | 70–105 (mitt.)                                       |
| Schlagvolumen SV                       | 60–100 ml  |
| Schlagvolumenindex SVI                 | 33–47 ml/m <sup>2</sup>                              |
| Herzzeitvolumen CO                     | 4,0–8,0 l/min  |
| Herzindex CI                           | 2,5–4,0 l/min/m <sup>2</sup>                         |
| Systemvaskulärer Widerstand SVR        | 900–1400 dyn × s × cm <sup>-5</sup>                  |
| Systemvaskulärer Widerstandsindex SVRI | 1700–2400 dyn × s × cm <sup>-5</sup> /m <sup>2</sup> |
| Stroke volume variation SVV            | <10–15 %   |

## Neuentwicklungen

- ProAQT-Sensor als Komponente des PulsioFlex-Monitorings (Fa. Pulsion Medical Systems)
- Messung basierend auf dem PiCCO-Puls-kontur-Algorithmus
- integrierter Signalindikator im Sensor zur Vermeidung von Fehlmessungen bzw. inkorrektem Nullabgleich
- automatische Startwertbestimmung: ausgehend von Patientendaten und Details der arteriellen Druckkurve wird ein Startwert für das Herzindex-Trend-Monitoring bestimmt
- kontinuierliche Herzindexmessung: Die Puls-kontur der arteriellen Druckkurve wird kontinuierlich analysiert und daraus der HI-Trend ermittelt
- optional manuelle Kalibrierung: Um die Genauigkeit des Herzindex-Monitorings zu erhöhen, kann ein z. B. mittels TEE gemessener Wert für eine manuelle Kalibrierung eingegeben werden
- verfügbare Parameter:
  - CI<sub>Trend</sub>, CI<sub>cal</sub>, SVI
  - SVV, PPV (Volumenreagibilität)
  - SVRI, MAP

- dPmax, CPI
- DO<sub>2</sub>, VO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>ER (in Kombination mit kontinuierlicher Messung der SvO<sub>2</sub>)

## 2.10.3 Kalibrierte Pulskonturanalyse

### PiCCO-System (Pulse Contour Cardiac Output, Fa. Pulsion Medical Systems GmbH)

#### Messprinzip

- PiCCO-System vereint die transpulmonale Thermodilution (Kalibrierung!) mit der Puls-konturanalyse
- benötigte Ausstattung: ZVK sowie spezieller arterieller Katheter mit Thermistor (A. femoralis bzw. A. axillaris/A. brachialis) → weniger invasiv als PAK!

#### Transpulmonale Thermodilution

- Berechnung des HZV nach Injektion von 20 ml eiskalter Kochsalzlösung in den rechten Vorhof mit Hilfe des **Stewart-Hamilton-Prinzips** (Extrapolation von Rezirkulationsphänomenen; Mittelwert aus 3 Messungen):

$$\text{HZV} = \frac{(T_B - T_{\text{inj}}) \times V_{\text{inj}} \times k}{\sum_0^{\infty} \Delta T_B(t) dt}$$

- T<sub>B</sub>: Bluttemperatur (Thermistor)
- T<sub>inj</sub>: Injektattemperatur (»Inline-Temperaturfühler« am ZVK)
- V<sub>inj</sub>: Injektatvolumen
- K: Berechnungskonstante
- $\sum_0^{\infty} \Delta T_B(t) dt$   
Fläche unter der arteriellen Thermodilutionskurve (Integral des Temperaturverlaufs über die Zeit)
- Validität und Reliabilität der transpulmonalen Thermodilution vergleichbar mit pulmonalarterieller Thermodilution (klinischer Goldstandard, s. u.)
- zusätzlich Erfassung zahlreicher volumetrischer Parameter möglich (■ Abb. 2.13)
- die mittlere Transitzeit wird anhand der Kety-Schmid-Formel (mtt: Zeit bis zu der 50 % des

Repetitorium Intensivmedizin

Vorbereitung auf die Prüfung "Intensivmedizin"

Fresenius, M.; Heck, M.; Zink, W.

2014, XVII, 694 S., Softcover

ISBN: 978-3-642-44932-1