

19.2 Intraoperative Echokardiographie

J. M. Erb

Roter Faden

Echokardiographie als Überwachungsverfahren
Untersuchungstechnik

Allgemeine hämodynamische Überwachung

► Grundlagen

► Überwachung von Volumenstatus und Vorlast

► Überwachung der Pumpfunktion

► Überwachung der Nachlast

Spezielle Überwachung

Echokardiographie bei Notfällen

Echokardiographie als Überwachungsverfahren

Seit Jahren gehört die transösophageale Echokardiographie (TEE) zum Standard der intraoperativen Überwachung in der Kardioanästhesie und hat sich auch in überwachungsintensiven Bereichen der Allgemeinanästhesie bewährt. In der Kardiologie meist bei wachen Patienten angewendet, ermöglichen drei entscheidende Faktoren die Adaptation dieses diagnostischen Verfahrens für die intraoperative Überwachung:

- ▶ Bei anästhesierten und intubierten Patienten sind Sedierung und Atemwegssicherung gewährleistet.
- ▶ Bei anästhesierten und intubierten Patienten entfällt die zeitliche Limitierung der TEE-Untersuchung.
- ▶ Die im Ösophagus gut fixierbare TEE-Sonde erlaubt die Beobachtung über einen längeren Zeitraum.

Wichtig! Die TEE kann nur bei aktivem Einsatz des Untersuchers zur Überwachung dienen und nicht – einmal installiert – automatisch gewisse Parameter erfassen. Auch fehlen als wesentliche Eigenschaften der konventionellen Überwachung die Alarmfunktionen, die bei Überschreiten einstellbarer Grenzen aktiviert werden.

Komplikationen. In der Hand des Erfahrenen ist die TEE mit sehr geringen Risiken verbunden. Schwerwiegende Komplikationen sind Perforationen von Hypopharynx oder Ösophagus, deren Inzidenz zwischen 0,01–0,03% liegt (Min et al. 2005; Daniel et al. 1991). Die publizierte Gesamtmorbidität listet u. a. Läsionen und Blutungen im Oropharynxbereich, Zahnschäden und Schluckbeschwerden und liegt zwischen 0,2–2,6% (Kallmeyer et al. 2001; Hüttemann et al. 2004).

Indikationen. Von den entsprechenden Fachgesellschaften wurden Empfehlungen für die Indikation der intraoperativen Echokardiographie erarbeitet (Thys et al. 1996; Cheitlin et al. 2003). Beim geplanten Einsatz der TEE zur Überwachung soll jeder Patient über die TEE aufgeklärt werden. Der Einsatz in Notfallsituationen ist im Rahmen der Richtlinien als Klasse-I-Indikation auch ohne Aufklärung zu rechtfertigen.

Kontraindikationen. Absolute Kontraindikationen sind Ösophagustumoren und stenosierende oder wandschwächende Veränderungen des Ösophagus. Hiatushernien und Ösophagusvarizen sind relative Kontraindikationen, bei denen dem Einsatz der TEE eine sorgfältige Risiko-Nutzen-Abwägung vorangehen soll.

Untersuchungstechnik

Die intraoperative TEE-Überwachung erfordert eine fokussierte Untersuchung, für die wenige standardisierte Schnittebenen ausreichen. Die Basisschnittebenen der echokardiographischen Überwachung sind der transgastri-sche mitt-papilläre Querschnitt (TGmQ) sowie der mitt-ösophageale Vierkammerblick (ME4K). Diese Schnittebenen können mit der spannungsfrei fixierten TEE-Sonde über längere Zeit problemlos eingestellt bleiben.

Im Interesse des Patienten und des Verfahrens soll immer eine vollständige echokardiographische Untersuchung unter Einschluss aller Standardschnittebenen dokumentiert werden. Hierzu empfiehlt sich das Vorgehen nach publizierten Richtlinien (Shanewise et al. 1999; Flachskampf et al. 2001). Auf die Besprechung des Untersuchungsgangs wird hier unter Verweis auf die entsprechenden Publikationen verzichtet, es werden jedoch die dort definierten Standardschnittebenen verwendet.

Hinweis für die Praxis: Ist die TEE-Sonde schwierig einzuführen, empfiehlt sich die frühzeitige Zuhilfenahme eines Laryngoskops. Niemals darf bei der Einführung der TEE-Sonde Gewalt angewendet werden.

Allgemeine hämodynamische Überwachung

► Grundlagen

Wichtig! Die Stabilität der Hämodynamik wird durch folgende Determinanten bestimmt:

- ▶ Volumenstatus (Vorlast),
- ▶ biventrikuläre Pumpfunktion (Kontraktilität),
- ▶ vaskulärer Widerstand (Nachlast).

Vorlast und Kontraktilität bestimmen mit Herzfrequenz und Herzrhythmus das Herzzeitvolumen (HZV) bzw. den Cardiac Index (CI), die Nachlast den mit einem bestimmten CI erreichbaren Blutdruck. Die Echokardiographie erlaubt eine rasche, zuverlässige und wiederholte Beurteilung aller dieser Parameter und qualifiziert sich hiermit als ideales Instrument für die hämodynamische Überwachung.

Überwachung von Volumenstatus und Vorlast

Grundlagen

Definition: Vorlast ist die enddiastolische Vorspannung der Myofibrillen, die durch die vom enddiastolischen Volumen erzeugte Dehnung der Herzmuskelfasern erreicht wird.

Beim linken Ventrikel (LV) steigert eine höhere Vorlast innerhalb gewisser Grenzen das Schlagvolumen (Frank-Starling-Mechanismus). Meist wird die Vorlast über den enddiastolischen Druck im LV oder Surrogate desselben (pulmonalkapillärer Verschlussdruck oder Zentralvenendruck; ZVD) beschrieben. Dabei ist die Beziehung zwischen Druck und Volumen im LV weder linear noch konstant, weshalb diese Werte als Prädiktoren für den Volumenstatus eher ungeeignet sind (Kumar et al. 2004).

Die TEE kann das ventrikuläre Volumen dagegen direkt erfassen. Die qualitative oder semiquantitative Abschätzung kann fast kontinuierlich erfolgen, die quantitative Messung erfordert wenige Minuten und ist mit vertretbarem Aufwand durchaus in Intervallen durchführbar.

Qualitative Abschätzung der Vorlast

Die einfachste Aussage zur Vorlast erfolgt über die Abschätzung der Füllung der Herzkammern, hauptsächlich der Ventrikel. Am schnellsten und zuverlässigsten erfolgt dies im TGmQ des LV (Abb. 19.13).

Hinweis für die Praxis: Um die Größenabschätzung zu erleichtern, ist für die Darstellung des transgastriischen mitt-papillären Querschnitts initial immer die gleiche Bildeindringtiefe zu wählen (ca. 10–12 cm).

Bei der Abschätzung der LV-Vorlast wird primär die diastolische Füllung anhand von Durchmesser und Fläche des Ventrikelkavums beurteilt. Änderungen der Querschnittsfläche des LV korrelieren eng mit Änderungen des LV-Volumens (Appleyard u. Glantz 1990; Clements et al. 1990). Allerdings soll auch die endsystolische Größe des Kavums beurteilt werden, da besonders sehr geringe endsystolische Volumina Hinweis auf eine reduzierte Vorlast sind (Leung u. Levine 1995).

Tabelle 19.3 LV-Durchmesser- und Flächenindizes sowie deren systolische fraktionelle Änderung. Alle Werte als Mittelwerte \pm 2fache Standardabweichung (95% Konfidenzintervall)

Schnittebene	Transgastrialer mitt-papillärer Querschnitt		Mitt-ösophagealer Vierkammerblick	
	männlich	weiblich	männlich	weiblich
EDDI _{ai} (cm m ⁻²)	2,2 \pm 0,3	2,2 \pm 0,3		
ESDI _{ai} (cm m ⁻²)	1,5 \pm 0,3	1,4 \pm 0,2		
EDLI (cm m ⁻²)			4,0 \pm 0,6	3,7 \pm 0,5
ESLI (cm m ⁻²)			3,3 \pm 0,5	2,9 \pm 0,4
EDAI (cm ² m ⁻²)	8,2 \pm 1,9	7,1 \pm 1,6	15,1 \pm 3,1	12,5 \pm 1,8
ESAI (cm ² m ⁻²)	3,4 \pm 1,1	2,7 \pm 0,7	10,0 \pm 2,6	7,3 \pm 1,9
FAC (%)	59 \pm 8	62 \pm 6	33 \pm 11	41 \pm 11
FS _{ai} (%)	34 \pm 9	37 \pm 7		

EDDI = enddiastolischer Durchmesserindex; ESDI = endsystolischer Durchmesserindex; EDLI = enddiastolischer Längenindex; ESLI = endsystolischer Längenindex; EDAI = enddiastolischer Flächenindex; ESAI = endsystolischer Flächenindex; FAC = fraktionelle systolische Flächenänderung; FS = Verkürzungsfraction; a = anterior; i = inferior

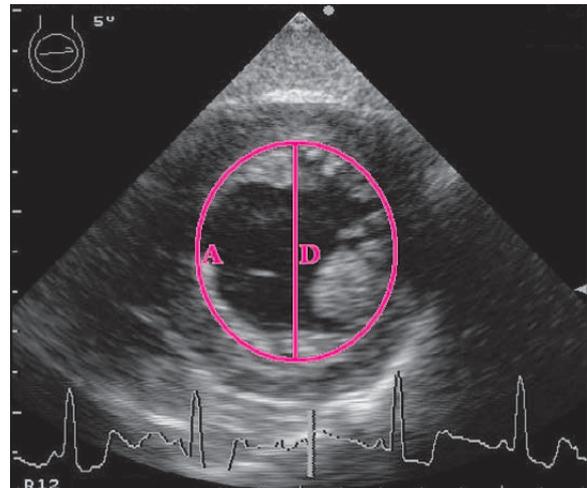


Abb. 19.13 Linker Ventrikel im TGmQ. Markiert sind Durchmesser und Fläche in der Diastole. A = Fläche; D = Durchmesser.

Hinweis für die Praxis: Das Bild der „küssenden Papillarmuskeln“ (wenn sich bei leer pumpendem LV die beiden Papillarmuskeln endsystolisch berühren) ist fast immer ein sicheres Hypovolämiezeichen.

Für eine semiquantitative Beurteilung der Ventrikelfüllung werden Durchmesser und Fläche des LV enddiastolisch gemessen (Abb. 19.13). Tabelle 19.3 zeigt die Referenzwerte für Patienten unter einer Intubationsnarkose (Skarvan et al. 2001). Diese Werte unterscheiden sich von Normwerten, die an wachen Patienten erhoben sind (Cohen et al. 1995).

Hinweis für die Praxis: Der transgastriische mitt-papilläre Querschnitt eignet sich besonders zur Überwachung, weil die TEE-Sonde in dieser Position gut fixiert werden kann, was eine wiederholte Suche nach der optimalen Schnittebene unnötig macht.

Die Abschätzung des rechtsventrikulären (RV) Volumens im TGmQ ist weniger zuverlässig und hat orientierenden Charakter. Dementsprechend sind für den TGmQ auch kei-

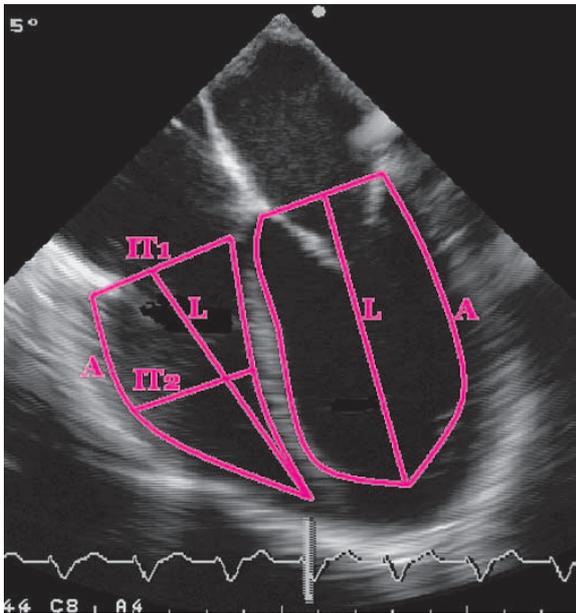


Abb. 19.14 Vorhöfe und Ventrikel im ME4K. Markiert sind ventrikuläre Durchmesser und Flächen in der Diastole. A = Fläche; L = Länge; IT1 = basaler RV-Diameter; IT2 = mittlerer RV-Diameter.

ne Referenzwerte für RV-Durchmesser und -Flächen definiert. Orientierend gilt, dass die Querschnittsfläche des RV die des LV normalerweise nicht überschreitet (Tab. 19.4).

Im ebenfalls leicht einstellbaren mitt-ösophagealen Vierkammerblick (ME4K) lässt sich auf einen Blick qualitativ die Füllung aller vier Herzhöhlen (rechter und linker Vorhof, RV und LV) beurteilen (Abb. 19.14).

Wichtig! Von besonderer Bedeutung ist die Beantwortung der Frage, ob der Volumenstatus zwischen den einzelnen Herzhöhlen balanciert ist, was bei alleinigen Änderungen der Vorlast zu erwarten ist.

Treten deutliche Unterschiede zwischen den Kammern auf, wofür die Position und Bewegung des Vorhof- und Ventrikelseptums häufig wegweisend ist, sind Differenzialdiagnosen abzuklären (Tab. 19.5). Die Füllung der Herzhöhlen lässt sich im ME4K über die Messung der Diameter und Flächen auch semiquantitativ beurteilen (Tab. 19.3 u. 19.4, Abb. 19.14).

Für den RV bietet sich zur Beurteilung des Volumenstatus zudem der RV-Einfluss-Ausfluss-Trakt-Blick (RVEAT) an. Diese Schnittebene zeigt den RV im Verlauf von der Trikuspidalklappe bis zur Pulmonalklappe und bietet eine gute Übersicht über die Füllung und Funktion des RV (Abb. 19.15).

Parameter	Normalbereich	Deutlich abnormal
ME4K basaler RV-Diameter (RVIT 1)	2,0–2,8 cm	≥ 3,9 cm
ME4K mittlerer RV-Diameter (RVIT 2)	2,7–3,3 cm	≥ 4,2 cm
ME4K Länge Basis – Spitze	7,1–7,9 cm	≥ 9,2 cm
ME4K EDA	11–28 cm ²	≥ 38 cm ²
ME4K ESA	7,5–16 cm ²	≥ 23 cm ²
ME4K FAC	32–60 %	≤ 17 %
RVEAT mittlerer RVOT-Diameter (RVOT 1)	2,5–2,9 cm	≥ 3,6 cm
RVEAT anulärer RVOT-Diameter (RVOT 2)	1,7–2,3 cm	≥ 3,2 cm

Tabelle 19.4 RV-Durchmesser und -Flächen sowie deren systolische fraktionelle Änderung. Normbereiche für Erwachsene

ME4K = mitt-ösophagealer Vierkammerblick; RVEAT = rechtsventrikulärer Einfluss-Ausfluss-Trakt-Blick; RVIT = rechtsventrikulärer Einflusstrakt; RVOT = rechtsventrikulärer Ausflusstrakt; EDA = enddiastolische Fläche; ESA = endsystolische Fläche; FAC = fraktionelle systolische Flächenänderung

Echokardiographische Merkmale	Differenzialdiagnosen
Schlecht gefüllter linker Ventrikel und normal gefüllte bis dilatierte sonstige Herzkammern	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Mitralstenose ▶ Cor triatriatum ▶ Vorhofseptumdefekt
Schlecht gefülltes linkes Herz (Vorhof und Ventrikel) und dilatiertes rechtes Herz	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Pulmonalarterienembolie ▶ Lungenvenenfehlmündung
Dilatiertes linkes Herz und normal bis schlecht gefülltes rechtes Herz	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Aorteninsuffizienz ▶ Aortenstenose ▶ Mitralinsuffizienz
Dilatierter rechter Vorhof und übrige Herzkammern schlecht gefüllt	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Trikuspidalstenose
Dilatiertes rechtes Herz und normal gefülltes linkes Herz	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Trikuspidalinsuffizienz ▶ Vorhofseptumdefekt
Insgesamt schlecht gefüllte Herzkammern mit diastolischem Kollaps des rechten Ventrikels	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Perikardtamponade

Tabelle 19.5 Differenzialdiagnosen bei Volumendiskrepanzen zwischen verschiedenen Herzkammern

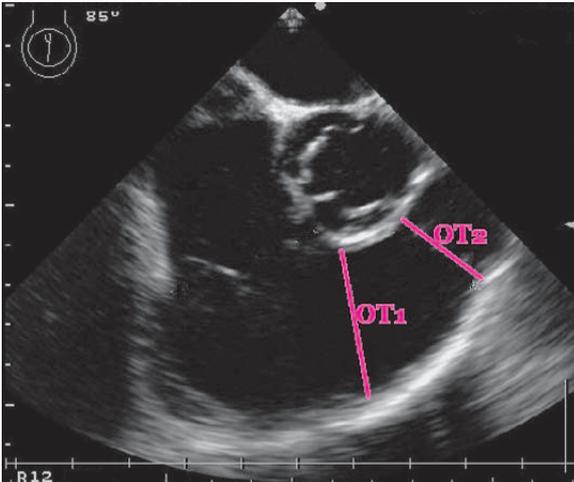


Abb. 19.15 Rechter Ventrikel im RVEAT mit diastolisch messbaren Diametern.

OT1 = mittlerer RVOT-Diameter; OT2 = anulärer RVOT-Diameter.

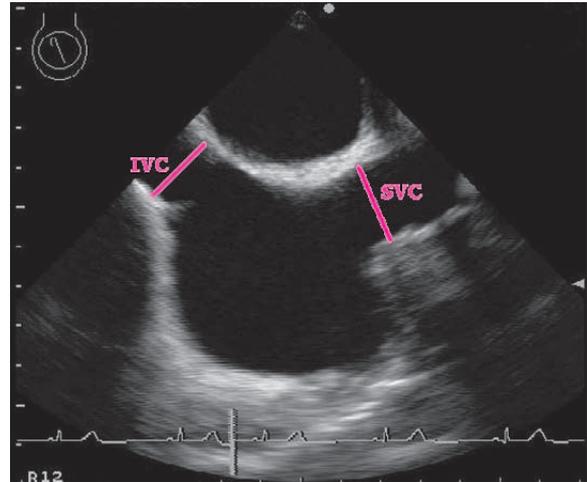


Abb. 19.16 Der bikavale Blick erlaubt die Darstellung des rechten Vorhofes mit der einmündenden oberen (SVC) und unteren Hohlvene (IVC).

Quantitative Bestimmung des Volumenstatus

Volumen kann nur über eine dreidimensionale Untersuchungstechnik direkt bestimmt werden. Alternativ kann aus zwei orthogonalen Schnittebenen über Rechenmodelle das Volumen ermittelt werden. Für den LV gilt die Scheibchen-Summations-Methode als Referenz (Feigenbaum et al. 2004). Hierbei wird der linke Ventrikel im ME4K und mitt-ösophagealen Zweikammerblick (ME2K) untersucht, Längsachse und Kavumfläche wie in Abb.19.14 vermessen und mit der Formel

$$EDV = \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^{20} a_i \cdot b_i \cdot \frac{L}{20}$$

das enddiastolische Volumen (EDV) präzise berechnet. Nur beim normal konfigurierten Herzen ohne regionale Wandbewegungsstörungen erlaubt die Anwendung der Durchmesserformel

$$EDV = LVEDD^3$$

(LVEDD = linksventrikulärer enddiastolischer Durchmesser)

im TGMQ eine ausreichend genaue Angabe des LV-EDV (Feigenbaum et al. 2004). Aufgrund seiner komplexen, asymmetrischen Form ist der RV nicht mit vereinfachten Methoden volumetrisch erfassbar. Dagegen korrelieren RV-Flächenangaben gut mit in Referenzverfahren gemessenen Volumina (Anavekar et al. 2007).

Weitere Hinweise auf den Volumenstatus

Ein sich abhängig von der Respiration zwischen den Vorhöfen hin- und herwölbendes interatriales Septum ist ein Hypovolämiezeichen. Dagegen weist ein sich starr in einer Richtung wölbendes Vorhofseptum auf eine Volumen- und Drucküberlastung auf der konkaven Septumseite hin (Royse et al. 2001). Die bei Hypovolämie ausgeprägte respirato-

rische Variation der Vorhof- und Ventrikelfüllung zeigt im Spektraldoppler die Oszillation der mitralen Einflussprofile. Analog erzeugt die respiratorische Variation des Schlagvolumens synchrone Änderungen der aortalen Velocity-Time-Integrale (VTI). Feissel und Mitarbeiter (Feissel et al. 2001) konnten zeigen, dass Variationen der maximalen aortalen Blutflussgeschwindigkeit ab 12% ein zuverlässiges Hypovolämiezeichen sind. Eine respiratorische Durchmesservariation der vorhofnahen großen Hohlvenen über 50% geht mit rechtsatrialen Drücken unter 10 mmHg einher und kann meist als Zeichen der Hypovolämie gewertet werden (Kircher et al. 1990; Vieillard-Baron et al. 2004) (Abb.19.16).

Hinweis für die Praxis: Die Durchmesservariation ist im bikavalen Blick mit dem M-Mode besonders gut zu messen.

Überwachung der Pumpfunktion

Grundlagen

Grundlage der Beurteilung der systolischen Globalfunktion des Herzens ist die Bestimmung der Pumpleistung. Dabei wird das Schlagvolumen (SV) als prozentuale Fraktion des EDV als Aufwurffraktion oder englisch als „ejection fraction“ (EF) bezeichnet. Diese errechnet sich somit nach der Formel

$$EF = \frac{EDV - ESV}{EDV}$$

wobei ESV das endsystolische Volumen bezeichnet. Obwohl die EF sowohl durch die Vorlast als auch durch die Nachlast beeinflusst wird, ist die Kontraktilität doch ihre wesentliche Determinante.

Für den LV wurde die Bestimmung des EDV bereits oben besprochen. Analog erfolgt die Bestimmung des ESV zum Ende der Systole, wenn der LV am kleinsten ist. Die Bestimmung der LVEF mittels der Scheibchen-Summations-Methode ist präzise, aber für die intraoperative Überwachung zu aufwendig. Deutlich vereinfacht – aber nur bei norma-

ler Kontraktilität und Ventrikelgeometrie erlaubt – ist die Bestimmung der LVEF nach der Durchmessermethode. Für die Klinik geeignete Methoden zur Bestimmung der RVEF aus Volumenbestimmungen fehlen.

Wichtig! Als Ersatz für aufwendige Kalkulationen der LVEF hat sich klinisch die qualitative Abschätzung der EF durch den erfahrenen Untersucher als ausreichend genau erwiesen (McGowan u. Cleland 2003).

Eine anfängliche komplette Untersuchung des Ventrikels in allen Schnittebenen dient der Erfassung der Ventrikelgeometrie. Danach wird die LVEF aus der ventrikulären Flächenänderung während der Systole abgeschätzt (Eyeball-Methode). Dazu eignen sich prinzipiell alle Schnittebenen des Ventrikels, es wird jedoch meist der TGmQ benutzt, der sich auch für die Verlaufsbeobachtung am besten eignet.

Hinweis für die Praxis: Es genügt, die LVEF mittels einer qualitativen Skala zu bewerten. Diese korreliert für den erfahrenen Untersucher mit einer in 10–15% Schritten eingeteilten LVEF-Skalierung (Tab. 19.6).

Ein ähnliches Vorgehen wird auch für den rechten Ventrikel angewendet.

Am Echokardiographiegerät wird die Flächenänderung direkt im zweidimensionalen Bild gemessen, indem die enddiastolische Fläche (EDA) und die endsystolische Fläche (ESA) entlang der endokardialen Begrenzung des Kavums markiert werden. Papillarmuskeln und Trabekel werden dem Kavum zugerechnet.

Unter allen LV-Schnittebenen ist der TGmQ zur Überwachung besten geeignet. Analog zur EF wird die systolische Flächenänderung (engl.: „fractional area change“ = FAC) als prozentuale Fraktion der EDA angegeben und nach der Formel

$$FAC = \frac{EDA - ESA}{EDA}$$

berechnet. Die Normwerte der FAC unterscheiden sich von denen der EF und sind in Tab. 19.3 für anästhesierte Patienten angegeben. Für den RV ist die Messung der FAC im ME4K die am besten etablierte und validierte Methode (Anavekar et al. 2007) (Tab. 19.4). Alternativ bietet sich die Messung im RVEAT an.

Überwachung der regionalen systolischen Wandbewegung – Ischämie-Überwachung

Die TEE erlaubt eine differenzierte Beurteilung der regionalen systolischen Wandbewegung. Dies ist insbesondere für das LV-Myokard von Bedeutung. In den mitt-ösophagealen

Tabelle 19.6 Qualitative Skala der LVEF und Korrelation mit einer quantitativen numerischen Skala (Lang et al. 2005)

Qualitative EF-Skala	Quantitative EF-Skala
Normal	≥ 55 %
Leicht eingeschränkt	45–54 %
Moderat eingeschränkt	30–44 %
Stark eingeschränkt	< 30 %

Standardschnittebenen des LV – ME4K, ME2K und Längsachsenblick (MELAx) – wird das Myokard in eine anteriore, anteroseptale, inferoseptale, inferiore, inferolaterale und anterolaterale Zone unterteilt. Diese Zonen wiederum werden in basale, mitt-papilläre und apikale Abschnitte unterteilt. Daraus ergeben sich definierte Myokardsegmente. Das aktuellere 17-Segment-Modell (Abb. 19.17) unterscheidet sich vom bisher gebräuchlichen 16-Segment-Modell durch das neu definierte apikale Segment und eine leicht geänderten Nomenklatur für die Myokardzonen (Cerqueira et al. 2002).

Ausgehend von einer enddiastolischen Wanddicke von 10–11 mm zeigt ein normal kontraktiles Myokard eine systolische Wanddickenzunahme um ca. 50% zu einer endsystolischen Wanddicke von 14–16 mm. Gleichzeitig bewegt sich das Myokard zur ventrikulären Längsachse hin. Dies lässt sich im TEE messen oder mit dem geübten Auge zuverlässig abschätzen, wodurch die Kinetik eines jeden Myokardsegments entsprechend der beschriebenen Kriterien einteilbar ist in:

- ▶ Normokinesie: normale Wanddickenzunahme und systolische Einwärtsbewegung,
- ▶ Hypokinesie: reduzierte Wanddickenzunahme und reduzierte systolische Einwärtsbewegung,
- ▶ Akinesie: keine Wanddickenzunahme und keine systolische Einwärtsbewegung,
- ▶ Dyskinesie: keine Wanddickenzunahme und paradoxe systolische Auswärtsbewegung.

Auch die RV-Kontraktilität lässt sich nach diesem Schema beurteilen. Hierzu sind der ME4K und der RVEAT sinnvoll.

Hinweis für die Praxis: Für die Beurteilung der RV-Kontraktilität ist weniger die systolische Wanddickenzunahme als die Wandbewegung ausschlaggebend.

Die Überwachung der regionalen Kontraktilität ist v.a. zur Ischämiedetektion interessant. Eine beginnende Ischämie ist fast unmittelbar an einer Kinetikeinschränkung im betroffenen Myokardsegment echokardiographisch zu erkennen, zeitlich häufig bevor ischämiebedingte EKG-Veränderungen zu sehen sind (Smith et al. 1985).

Wichtig! Eine Myokardischämie ist anhand neu aufgetretener Wandbewegungsstörungen im TEE im Vergleich zum EKG mit deutlich höherer Sensitivität und Spezifität zu diagnostizieren.

Unter Kenntnis der segmentalen Einteilung und der koronaren Versorgungsgebiete (Abb. 19.18) lässt sich ein bedrohtes Myokardsegment (z.B. bei bekannter Koronarstenose) gezielt überwachen bzw. eine beobachtete Myokardischämie der vorsorgenden Koronararterie zuordnen.

Überwachung des HZV

Allgemeines

Die echokardiographische Bestimmung des HZV ist auf mehrere Arten möglich und bei korrekter Durchführung im Vergleich zum klinischen Standard der Thermomodulation in vielen Studien – wenn auch nicht unwidersprochen – als ausreichend präzise beurteilt worden (Katz et al. 1993; Darmon et al. 1994; Perrino et al. 1998; Poelaert et al. 1999; Bettex et al. 2004; Schmidt et al. 2005). Im Vergleich zu anderen Methoden (Pulmonalarterienkatheter, Pulskontur-

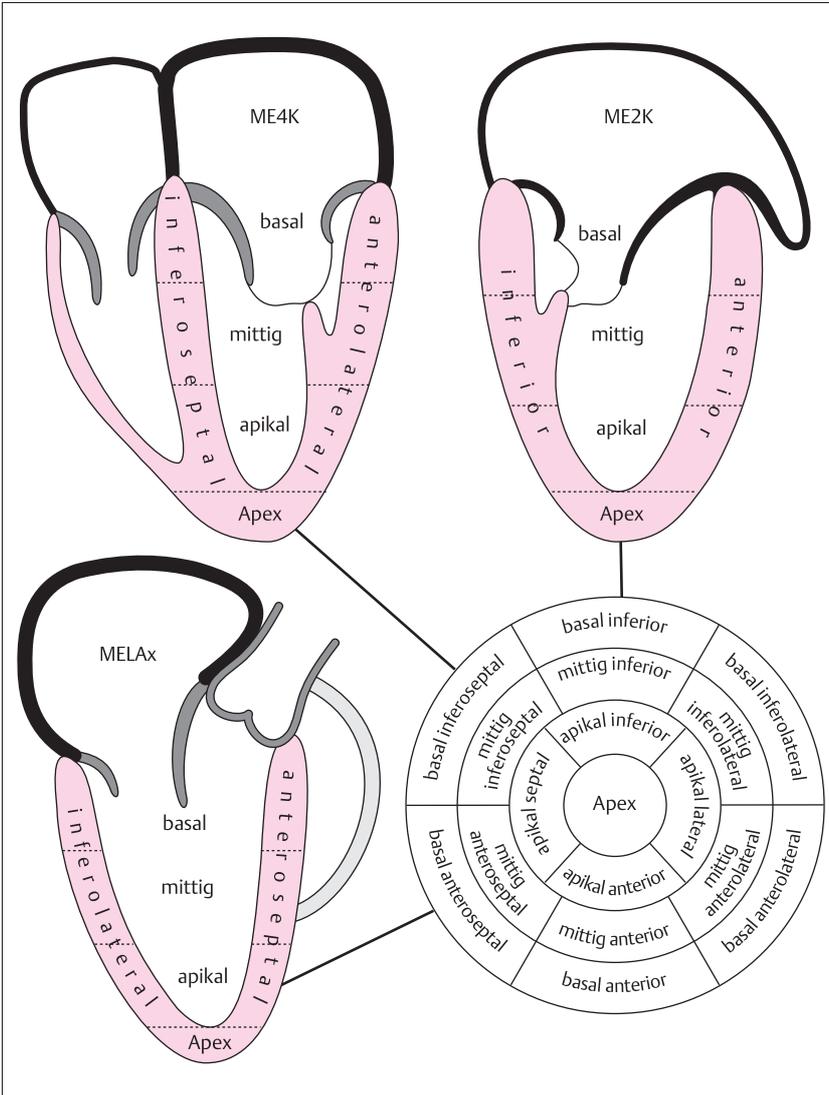


Abb. 19.17 Darstellung des 17-Segment-Modells und Zuordnung der Myokardsegmente des linken Ventrikels zu den Standardschnittebenen. ME2K = mitt-ösophagealer Zweikammerblick; ME4K = mitt-ösophagealer Vierkammerblick; MELAx = Längsachsenblick.

analyse, Impedanzkardiographie, ösophageale Dopplersonde) kann die Messung des HZV mittels TEE nur diskontinuierlich erfolgen und setzt darüber hinaus immer einen versierten Untersucher voraus, während ein einmal installiertes alternatives Messsystem automatisch Messergebnisse generiert, die selbst demjenigen zugänglich sind, der in der Anwendung der Systeme selbst nur eingeschränkte Kenntnisse besitzt.

Bestimmung des HZV über die Messung der Ventrikelvolumina

Mit den oben vorgestellten Methoden zur Volumenbestimmung lässt sich nach den Formeln

SV = EDV – ESV und HZV = SV × Herzfrequenz

SV und HZV berechnen. Die Bestimmung des HZV über die Ventrikelvolumina ist aber zu aufwendig, um damit eine Überwachung des HZV während einer therapeutischen Maßnahme häufiger als nur gelegentlich durchführen zu können.

Bestimmung des HZV aus Velocity-Time-Integralen

In laminarer Strömung ist die Flussgeschwindigkeit (V) proportional zur Flussrate, dem pro Zeit fließenden Volumen. Laminare Flussprofile finden sich im Herzen über normalen Herzklappen und im ventrikulären Ausflusstrakt sowie in großen herznahen Gefäßen. Ist die durchströmte Querschnittsfläche (A) einer solchen Struktur bekannt, kalkulierbar oder messbar und kann dort die Flussgeschwindigkeit über die Zeit (= VTI) gemessen werden, so errechnen sich SV und HZV nach den Formeln

SV = A × VTI und HZV = SV × Herzfrequenz

Beispiele zeigen Tab.19.7 und Abb.19.19.

Hinweis für die Praxis:

- Da auch diese Methode zur Bestimmung des HZV aufwendig und dadurch nur diskontinuierlich möglich ist, empfiehlt sich eine Vereinfachung: Für Wiederholungsmessungen des HZV genügt die erneute Messung des VTI an der gleichen Stelle, da die Querschnittsfläche konstant ist. Somit lässt sich das SV schnell neu berechnen.

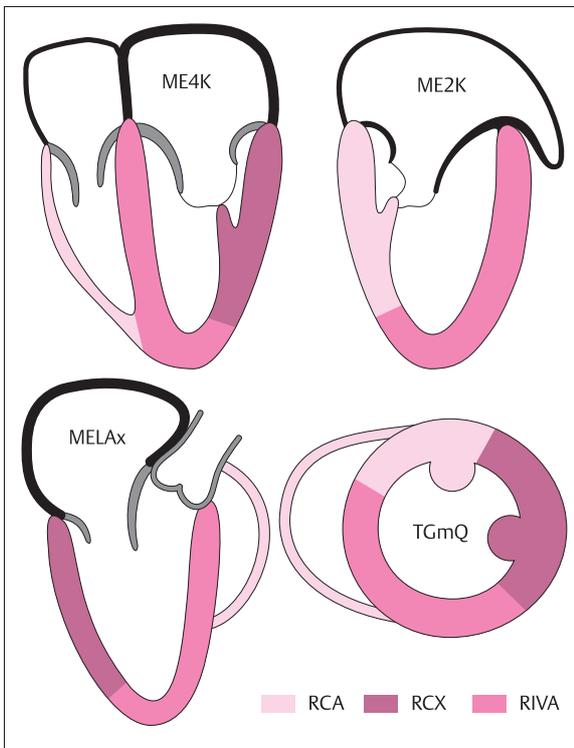


Abb. 19.18 Abbildung der Koronarversorgung des linken Ventrikels in den Standardschnittebenen. ME2K = mittl-ösophagealer Zweikammerblick; ME4K = mittl-ösophagealer Vierkammerblick; MELAx = Längsachsenblick; TGmQ = transgastrischer mitt-papillärer Querschnitt; RIVA = Ramus interventricularis anterior; RCX = Ramus circumflexus; RCA = rechte Koronararterie.

► Da bei konstanter Querschnittsfläche Änderungen des SV aus Änderungen des VTI resultieren, gilt: Für die intraoperative Überwachung reicht die prozentuale Veränderung des VTI als Indikator für gleichgerichtete prozentuale Veränderungen des SV aus. Bei konstanter Herzfrequenz gilt dieselbe prozentuale Veränderung auch für das messbare HZV.

Überwachung der Nachlast

Blutflussgeschwindigkeiten (V) im Herzen werden vom Druckgradienten (ΔP) zwischen zwei Herzhöhlen erzeugt. Mit der vereinfachten Bernoulli-Formel

$$\Delta P = 4 V^2$$

kann der treibende Druckgradient, der für eine mittels Dopplerechokardiographie gemessene Geschwindigkeit V verantwortlich ist, bestimmt werden. Ist zusätzlich entweder der Druck in der treibenden oder empfangenden Kammer bekannt, so lässt sich der jeweils andere Druck berechnen.

Systolischer pulmonalarterieller Druck. Hohen praktischen Nutzen hat dieses Prinzip in der echokardiographischen Abschätzung des systolischen pulmonalarteriellen Druckes (PAP_s). Die zur Messung des PAP_s notwendige Insuffizienz der Trikuspidalklappe ist fast immer bei Erhöhung des PAP_s zu beobachten. Die Messung der maximalen

Geschwindigkeit des Insuffizienzjets erlaubt die Kalkulation des Druckgradienten zwischen systolischem RV-Druck und rechtsatrialem Druck (Abb. 19.20). Bei normaler Pulmonalklappe darf der systolische RV-Druck dem PAP_s gleichgestellt werden, während der rechtsatriale Druck dem ZVD entspricht. Somit gilt:

$$PAP_s = \Delta P + ZVD.$$

Akute und chronische pulmonale Druckerhöhungen können so zuverlässig erkannt werden. Wird der ZVD nicht invasiv gemessen, genügt dessen Abschätzung für die Diagnose eines klinisch relevant erhöhten PAP_s . Klinisch wird deshalb häufig die Aussage: $PAP_s = \Delta P + ZVD$ verwendet.

Linksventrikuläre Nachlast. Analog kann die linksventrikuläre Nachlast bei Präsenz eines Mitralinsuffizienzjets bestimmt werden. Die klinische Bedeutung besteht in der Aufdeckung einer deutlichen Diskrepanz zwischen peripherem systolischem Blutdruck und echokardiographisch gemessenem linksventrikulärem systolischem Druck, die Anlass sein soll, den Ort dieses Gradienten aufzuspüren. Eine weitere Methode zur Bestimmung der linksventrikulären Nachlast ist die Berechnung des endsystolischen Druck-Flächen-Produkts nach der Formel

$$\text{Druck-Flächen-Produkt (mm Hg cm}^2\text{)} = \text{systolischer arterieller Blutdruck} \times \text{endsystolische Fläche.}$$

Es beschreibt die systolische Wandspannung, die mit Zunahme der endsystolischen Fläche und des Blutdruckes ansteigt (Greim et al. 1995).

Spezielle Überwachung

Wichtig! Mittels TEE kann bei Operationen oder Maßnahmen mit besonderen Risiken oder Fragestellungen eine spezialisierte Überwachung erfolgen.

Hier beeinflusst die anästhesiologische Überwachung häufig direkt das chirurgische Vorgehen. Gelegentlich sind dafür nur einmalige Untersuchungen nötig, sodass diese Anwendungen in den Grenzbereich zur Diagnostik fallen.

Embolieüberwachung. Die dauerhaft mögliche Darstellung von oberer und unterer Hohlvene sowie des rechten Vorhofs mittels TEE empfiehlt deren Einsatz bei neuro- und HNO-chirurgischen Eingriffen mit dem Risiko der *Luftembolie* und tumorchirurgischen Eingriffe mit Beteiligung der V. cava. Zur Emboliedetektion empfehlen sich besonders der ME4K sowie der bikavale Blick (Abb. 19.14 u. 19.16). Präoperativ ist ein persistierendes Foramen ovale mittels Farbdoppler und Kontrastmittel auszuschließen. Ist ein Trikuspidalinsuffizienzjet darstellbar, soll der initiale PAP_s bestimmt werden, um im Falle einer Embolie durch wiederholte Messung des PAP_s die Entwicklung des pulmonalarteriellen Widerstands beurteilen zu können.

Gefäßdarstellung. TEE-Überwachung ist hilfreich zur korrekten Platzierung von Gefäßstents in der thorakalen Aorta. Leckagen können erkannt werden und durch Überwachung des Blutflusses in abgehenden Gefäßen, z.B. der A. subclavia links, können akzidentelle Okklusion oder Flussbeeinträchtigung vermieden bzw. rechtzeitig korrigiert werden.

Tabelle 19.7 Auflistung der für die Bestimmung des Schlagvolumens zur Kombination geeigneten Messorte von Querschnittsfläche und Velocity-Time-Integralen (VTI)

Ort der Bestimmung	Querschnittsfläche		VTI		Zu beachten
	Formel	Messparameter	Doppler	Messort	
Linksventrikulärer Ausflusstrakt (LVOT)	Πr^2	Diameter LVOT	PW	LVOT	Messort 0,5–1 cm proximal AK-Anulus
Aortenklappe (AK)	Planimetrie $0,433 L^2$	Öffnungsfläche Trigonumlänge (L)	CW	AK	maximale Geschwindigkeiten des CW-Signals
Mitralklappe (MK)	$\Pi r_1 r_2$	Diameter MK quer und längs	PW	MK-Anulus	E-Welle und A-Welle addieren
Pulmonalarterie (PA)	Πr^2	Diameter PA	PW	PA	proximale PA nahe der Pulmonalklappe

LVOT = linksventrikulärer Ausflusstrakt; PW = Pulswellendoppler; CW = kontinuierlicher Doppler

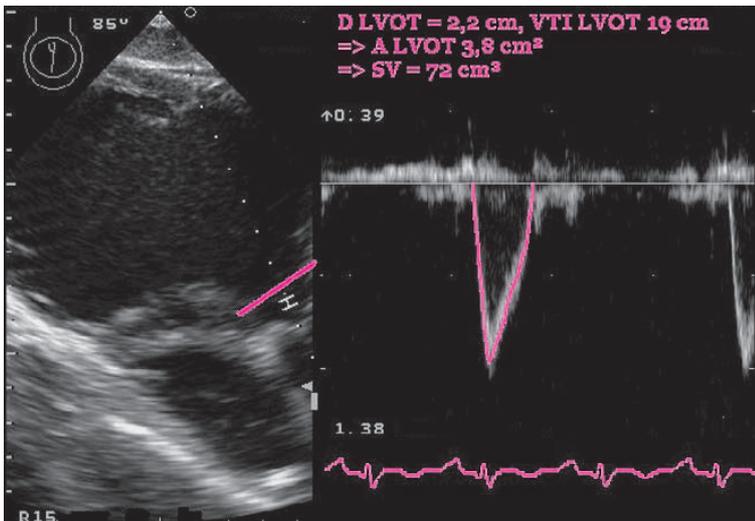


Abb. 19.19 Bestimmung des Schlagvolumens (SV) aus dem Velocity-Time-Integrale (VTI) über den linksventrikulären Ausflusstrakt (LVOT).

A = Fläche; D = Durchmesser.

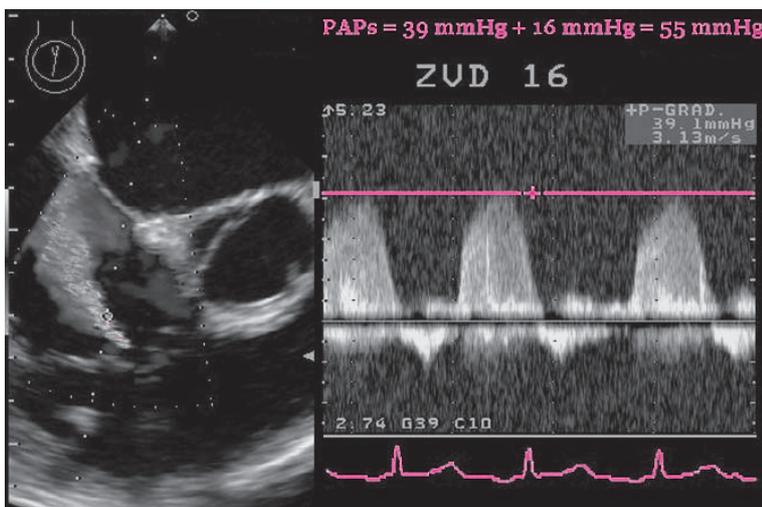


Abb. 19.20 Kalkulation des systolischen Pulmonalarteriendruckes aus der maximalen Geschwindigkeit des Insuffizienzjets der Trikuspidalklappe und dem ZVD. PAPs = systolischer pulmonalarterieller Druck.

Darstellung von Drainagen und Katheterplatzierungen. Die Entlastung eines perikardialen Hämatoms oder eines gekammerten Ergusses über eine subxyphoidal eingeführte Drainage wird häufig unter TEE-Kontrolle durchgeführt, um eine effiziente Entlastung zu erreichen. Die korrekte Lage einer intraaortalen Ballonpumpe ist echokardiogra-

phisch sicher verifizierbar, ebenso wie die Platzierung von Kathetern in zentralen Gefäßen. Für den Spezialbereich der Kardioanästhesie ergibt sich darüber hinaus für viele Eingriffe die Notwendigkeit, den Erfolg chirurgischer Maßnahmen sofort intraoperativ mittels TEE zu kontrollieren.

Tabelle 19.8 Echokardiographische Befunderhebung bei Notfällen

Notfall	Echokardiographischer Befund	Besonderheiten
Myokardinfarkt	<ul style="list-style-type: none"> ▶ neu aufgetretene regionale Wandbewegungsstörung (Hypokinesie bis Akinesie) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ akute Mitralinsuffizienz bei Papillarmuskelschämie oder Papillarmuskela-briss
Lungenembolie	<ul style="list-style-type: none"> ▶ RV-Dilatation und -Hypokinesie ▶ akute Trikuspidalinsuffizienz ▶ gelegentlich proximaler sitzender Embo-lus sichtbar 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Pulmonalarteriendruckmessung über Trikuspidalinsuffizienz
Aortendissektion	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Dissektionsmembran(en) ▶ Perikarderguss ▶ wahres/falsches Lumen ▶ Myokardischämie 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ <i>cave</i>: distale Aorta ascendens und proximaler Bogen nicht komplett einsehbar
Thoraxtrauma	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Wandbewegungsstörungen ▶ Ventrikeldilatation ▶ Perikarderguss ▶ Aortentranssektion 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ nach Klappenschäden und Vorhof-/ Ventrikel-Septum-Defekten suchen ▶ Locotypico: Aortenisthmus
Endokarditis	<ul style="list-style-type: none"> ▶ (mobile) Vegetationen an Klappen-segeln, Sehnenfäden und Myokard ▶ Destruktion der Klappensegel mit Insuffi-zenz möglich 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ andere mobile Strukturen können Vegetationen vortäuschen ▶ fehlende Vegetationen schließen Endokarditis nicht aus
Perikardtamponade	<ul style="list-style-type: none"> ▶ perikardialer Flüssigkeitssaum: ▶ „swinging heart“ ▶ frühdiastolischer RV-Kollaps ▶ V.-cava-Dilatation 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ bei kardiochirurgischen Patienten sind postoperativ lokalisierte Tampo-naden ohne Flüssigkeitssaum mög-lich
Dynamische Ausflusstraktobstruk-tion ± „systolic anterior motion“ (SAM) des anterioren Mitralsegels	<ul style="list-style-type: none"> ▶ hypovolämer, gut bis sehr gut kontrak-tiler (hypertropher) linker Ventrikel ▶ Flussturbulenz und Doppler -Druck-gradient im LVOT 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ bei schwerer Form zeigt sich häufig zusätzlich zur LVOT-Obstruktion eine spätsystolisch auftretende Mitral-insuffizienz (SAM)
Dekompensierte Aortenstenose	<ul style="list-style-type: none"> ▶ dilatierter global hypokineticischer linker Ventrikel ▶ stark stenosierte Aortenklappe 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ geringe Druckgradienten über der Aortenklappe als Folge des Links-herzversagens

Echokardiographie bei Notfällen

Wichtig! Beim Einsatz der Echokardiographie zur Abklärung einer Notfallsituation überschneiden sich Diagnostik und Überwachung. Gleichmaßen können viele Informationen nicht nur transösophageal, sondern auch transthorakal erhoben werden.

Gegenüber anderen diagnostischen Modalitäten überzeugt die Echokardiographie durch die schnelle Einsatzfähigkeit, hohe Mobilität und die geringe Invasivität. Tabelle 19.8 gibt eine Übersicht über den Einsatz der Echokardiographie bei Notfällen.

Kernaussagen

Echokardiographie als Überwachungsverfahren

Die TEE kann nur bei aktivem Einsatz des Untersuchers zur Überwachung dienen und nicht automatisch gewisse Parameter erfassen und einen entsprechenden Alarm auslösen.

Untersuchungstechnik

Ist die TEE-Sonde schwierig einzuführen, empfiehlt sich die frühzeitige Zuhilfenahme eines Laryngoskops. Niemals darf bei der Einführung der TEE-Sonde Gewalt angewendet werden.

Allgemeine hämodynamische Überwachung

Die Stabilität der Hämodynamik wird durch den Volumenstatus (Vorlast), die biventrikuläre Pumpfunktion (Kontraktilität) und den vaskulären Widerstand (Nachlast) bestimmt.

Die Füllung des Herzen kann differenziert für jede Herzkammer qualitativ und quantitativ beurteilt werden.

Die Domäne der echokardiographischen Überwachung ist die Beurteilung der biventrikulären systolischen Myokardfunktion. Dabei reicht häufig eine globale Abschätzung der systolischen Pumpfunktion aus, wobei mehrere Methoden zur Quantifizierung zur Verfügung stehen.

Da zur echokardiographischen Bestimmung des HZV ein gewisser Messaufwand notwendig ist, eignet sich diese Methode nicht zur kontinuierlichen Überwachung, sondern zur Überprüfung des HZV in Intervallen.

Hohe klinische Relevanz hat die nichtinvasive Bestimmung des systolischen pulmonalarteriellen Druckes aus der Messung einer Trikuspidalinsuffizienz, die sich hervorragend für Verlaufsbeobachtungen eignet.

Spezielle Überwachung

Die spezielle Überwachung erlaubt die Erkennung operativer Risiken; sie kann chirurgische Eingriffe lenkend unterstützen sowie deren Erfolg kontrollieren.

Wichtige Bereiche sind die Embolieüberwachung bei Risikoeingriffen für Luft- oder Tumorembolien, die Gefäßdarstellung bei endovaskulärer Stentplatzierung und die Darstellung von Drainagen und Katheterplatzierungen.

Echokardiographie bei Notfällen

Die TEE zeichnet sich durch schnelle Einsatzfähigkeit, hohe Mobilität und geringe Invasivität bei weitem diagnostischem Spektrum aus.

Literatur**Referenzen**

- Anavekar NS, Gerson D, Skali H, Kwong RY, Yucel EK, Solomon SD. Two-dimensional assessment of right ventricular function: an echocardiographic – MRI correlative study. *Echocardiography* 2007 [online early release].
- Appleyard RF, Glantz SA. Two dimensions describe left ventricular volume change during hemodynamic transients. *Am J Physiol* 1990; 258:H277–H284.
- Bettex DA, Hinselmann V, Hellermann JP, Jenni R, Schmid ER. Transoesophageal echocardiography is unreliable for cardiac output assessment after cardiac surgery compared with thermodilution. *Anaesthesia* 2004; 59:1184–1192.
- Brown JM. Use of echocardiography for hemodynamic monitoring. *Crit Care Med* 2002; 30:1361–1364.
- Cerqueira MD, Weissman NJ, Dilsizian V, Jacobs AK, Kaul S, Laskey WK, Pennell DJ, Rumberger JA, Ryan T, Verani MS. Standardized myocardial segmentation and nomenclature for tomographic imaging of the heart. *Circulation* 2002; 105:539–542.
- Cheitlin MD, Armstrong WF, Aurigemma GP, Beller GA, Bierman FZ, Davis JL, Douglas PS, Faxon DP, Gillam LD, Kimball TR, Kussmaul WG, Pearlman AS, Philbrick JT, Rakowski H, Thys DM. ACC/AHA/AHA/ASE 2003 guideline update for the clinical application of echocardiography: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines (ACC/AHA/ASE Committee to update the 1997 Guidelines for the Clinical Application of Echocardiography). *Circulation* 2003; 108:1146–1162.
- Clements FM, Harpole DH, Quill T, Jones RH, McCann RL: Estimation of left ventricular volume and ejection fraction by two-dimensional transoesophageal echocardiography: comparison of short axis imaging and simultaneous radionuclide angiography. *Br J Anaesth* 1990; 64:331–336.
- Cohen GI, White M, Sochowski RA, Klein AL, Bridge PD, Stewart RA, Kwan-Leung C. Reference values for normal adult transoesophageal echocardiographic measurements. *J Am Soc Echocardiogr* 1995; 8:221–230.
- Daniel WG, Erbel R, Kasper W, Visser CA, Engberding R, Sutherland GR, Grube E, Hanrath P, Maisch B, Dennig K, Schartl M, Kremer P, Angermann C, Illiceto S, Curtius JM, Mügge A. Safety of transoesophageal echocardiography. A multicenter survey of 10,419 examinations. *Circulation* 1991; 83:817–821.
- Darmon PL, Hillel Z, Mogtader A, Mindich B, Thys D. Cardiac output by transoesophageal echocardiography using continuous-wave Doppler across the aortic valve. *Anesthesiology* 1994; 80:796–805.
- Feigenbaum H, Armstrong WF, Ryan T. *Echocardiography*. Philadelphia: Lippincott, Williams and Wilkins; 2004.
- Feissel M, Michard F, Mangin I, Ruyter O, Faller JP, Teboul JL. Respiratory changes in aortic blood velocity as an indicator of fluid responsiveness in ventilated patients with septic shock. *Chest* 2001; 119:867–873.
- Flachskampf FA, Decoodt P, Fraser AG, Daniel WG, Roelandt JRTC. Guidelines from the Working Group: Recommendations for performing transoesophageal echocardiography. *Eur J Echocardiography* 2001; 2:8–21.
- Greim CA, Roewer N, Schulte am Esch J. Assessment of changes in left ventricular wall stress from the end-systolic pressure-area product. *Br J Anaesth* 1995; 75:583–587.
- Hüttemann E, Schelenz C, Kara F, Chatzinkolaou K, Reinhart K. The use and safety of transoesophageal echocardiography in the general ICU – a minireview. *Acta Anaesthesiol Scand* 2004; 48:827–836.
- Kallmeyer IJ, Collard CD, Fox JA, Body SC, Sherman SK. The safety of intraoperative transoesophageal echocardiography: a case series of 7200 cardiac and surgical patients. *Anesth Analg* 2001; 92:1126–1130.
- Katz WE, Gasior TA, Quinlan JJ, Gorcsan III J. Transgastric continuous-wave Doppler to determine cardiac output. *Am J Cardiol* 1993; 71:853–857.
- Kircher BJ, Himelman RB, Schiller NB. Noninvasive estimation of right atrial pressure from the inspiratory collapse of the inferior vena cava. *Am J Cardiol* 1990; 66:493–496.
- Kumar A, Anel R, Bunnell E, Habet K, Zanotti S, Marshall S, Neumann A, Ali A, Cheang M, Kavinsky C, Parrillo JE. Pulmonary artery tetry occlusion pressure and central venous pressure fail to predict ventricular filling volume, cardiac performance, or the response to volume infusion in normal subjects. *Crit Care Med* 2004; 32:691–699.
- Lang RM, Bierig M, Devereux RB, Flachskampf FA, Foster E, Pellikka PA, Picard MH, Roman MJ, Seward J, Shanewise JS, Solomon SD, Spencer KT, St John Sutton M, Stewart WJ. Recommendations for chamber quantification: a report from the American Society of Echocardiography's Guidelines and Standards Committee and the Chamber Quantification Writing Group, developed in conjunction with the European Association of Echocardiography, a branch of the European Society of Cardiology. *J Am Soc Echocardiogr* 2005; 18:1440–1463.
- Leung JM, Levine EH. Left ventricular end-systolic cavity obliteration as an estimate of intraoperative hypovolemia. *Anesthesiology* 1994; 81:1102–1109.
- McGowan JH, Cleland JGF. Reliability of reporting left ventricular systolic function by echocardiography: a systematic review of 3 methods. *Am Heart J* 2003; 146:388–397.
- Min JK, Spencer KT, Furlong KT, DeCara JM, Sugeng L, Ward RP, Lang RM. Clinical features of complications from transoesophageal echocardiography: a single-center case series from 10,000 consecutive examinations. *J Am Soc Echocardiogr* 2005; 18:925–929.
- Perrino A Jr, Harris SN, Luther M. Intraoperative determination of cardiac output using multiplane transoesophageal echocardiography: a comparison to thermodilution. *Anesthesiology* 1998; 89:350–357.
- Poelaert J, Schmidt C, Van Aken H, Hinder F, Mollhoff T, Loick HM. A comparison of transoesophageal echocardiographic Doppler across the aortic valve and thermodilution technique for estimation cardiac output. *Anaesthesia* 1999; 54:128–136.
- Royle CF, Royle AG, Soeding PF, Blake DW. Shape and movement of the interatrial septum predicts change in pulmonary capillary wedge pressure. *Ann Thorac Cardiovasc Surg* 2001; 7:79–83.
- Schmidt C, Theilmair G, Van Aken H, Korsmeier P, Wirtz SP, Berendes E, Hoffmeier A, Meissner A. Comparison of electrical velocimetry and transoesophageal Doppler echocardiography for measuring stroke volume and cardiac output. *Br J Anaesth* 2005; 95:603–610.
- Shanewise JS, Cheung AT, Aronson S, Stewart WJ, Weiss RL, Mark JB, Savage RM, Sears-Rogan P, Mathew JP, Quinones MA, Cahalan MK, Savino JS. ASE/SCA Guidelines for performing a comprehensive intraoperative multiplane transoesophageal echocardiography examination. *J Am Soc Echocardiogr* 1999; 12:884–900.
- Skarvan K, Lambert A, Filipovic M, Seeberger M. Reference values for left ventricular function in subjects under general anaesthesia and controlled ventilation assessed by two-dimensional transoesophageal echocardiography. *Eur J Anaesthesiol* 2001; 18:713–722.
- Smith JS, Cahalan MK, Benefiel DJ, Byrd BF, Lurz FW, Shapiro WA, Roizen MF, Bouchard A, Schiller NB. Intraoperative detection of myocardial ischemia in high-risk patients: electrocardiography versus two-dimensional transoesophageal echocardiography. *Circulation* 1985; 72:1015–1021.
- Thys DM, Abel M, Bollen BA, Cahalan MK, Curling P, Dean RJ, Paulus D, Pearlman AS, Roizen MF, Smith J, Stewart WJ, Woolf SH. Practice Guidelines for perioperative transoesophageal echocardiography: a report by the American Society of Anesthesiologists and the Society of Cardiovascular Anesthesiologists Task Force on Transoesophageal Echocardiography. *Anesthesiology* 1996; 84:986–1006.
- Vieillard-Baron A, Chergui K, Rabiller A, Peyrouset O, Page B, Beauchet A, Jardin F. Superior vena caval collapsibility as a gauge of volume status in ventilated septic patients. *Intensive Care Med* 2004; 30:1734–1739.