

Redaktion

R. Larsen, Homburg/Saar

T. W. Felbinger^{1,2} · M. S. Goepfert^{1,2} · T. Goresch² · A. E. Goetz^{1,2} · D. A. Reuter^{1,2}

¹ Klinik und Poliklinik für Anästhesiologie, Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf

² Klinik für Anästhesiologie, Kliniken Grosshadern-Innenstadt der Universität München

Arterielle Pulskonturanalyse zur Messung des Herzindex unter Veränderungen der Vorlast und der aortalen Impedanz

Die vor ca. 30 Jahren von Swan und Ganz beschriebene Technik der pulmonalarteriellen Thermodilution [33], die erlaubt, den Herzindex (CI) mithilfe eines Pulmonalarterienkatheters zu bestimmen, wurde bisher als klinischer „Gold Standard“ für invasives hämodynamisches Monitoring angesehen [20, 22]. Allerdings wurde aufgrund von negativen Ergebnissen aus mehreren randomisierten Studien in den letzten Jahren die Verwendung des Pulmonalarterienkatheters sehr kontrovers diskutiert [2, 6, 31].

Die arterielle Pulskonturanalyse wurde als eine mögliche Alternative zur Bestimmung des CI unter Vermeidung der potenziellen Risiken einer pulmonalarteriellen Katheterisierung untersucht. Basierend auf dem von Wesseling et al. beschriebenen Algorithmus [35] kann das Schlagvolumen (SV) aus dem Quotienten der Fläche des systolischen Anteils der aortalen Druckkurve und der aortalen Impedanz, die durch Thermodilution bestimmt wird, berechnet werden. Nach initialer Kalibrierung des Messsystems durch Thermodilution kann im Folgenden anhand der Pulskonturanalyse der CI kontinuierlich bestimmt werden. Der so gemessene CI_{PC} wurde bei herzchirurgischen oder kritisch kranken Patienten während unterschiedlicher klinischer Bedingungen validiert und zeigt eine gute Übereinstimmung

mit den anhand des Pulmonalarterienkatheters (CI_{PA}) oder der arteriellen Thermodilution (CI_{TD}) ermittelten Werten [4, 7, 8, 17, 19, 23]. Ein neuer Algorithmus beinhaltet des Weiteren die Analyse der Form der Blutdruckkurve und berücksichtigt die patientenspezifische aortale Impedanz. Wir konnten in früheren Untersuchungen zeigen, dass CI_{PC} mit diesem Algorithmus unter stabilen hämodynamischen Bedingungen [9], während spontanen CI-Veränderungen und hämodynamischer Instabilität [13], aber auch bei raschen Veränderungen der Vorlast nach Flüssigkeitsbolus [10] klinisch eine gute Übereinstimmung mit CI_{PA} und CI_{TD} aufweist.

Vor Kurzem wurde die Kritik geäußert, dass die Zusammenhänge von linksventrikulärem SV und arteriellem Blutdruckprofil bei Veränderungen des aortalen Gefäßtonus oder bei Umverteilung des Blutflusses zwischen verschiedenen Gefäßarealen möglicherweise nicht mehr zutreffend sind: Nach Pinsky [21] besteht die Möglichkeit, dass bei solchen Veränderungen der aortalen Impedanz der CI_{PC} den CI_{PA} nicht mehr reflektiert.

Während kardiochirurgischer Eingriffe ändern sich häufig Vorlast und aortale Impedanz, z. B. durch Sternotomie und Einsetzen des Sternumretraktors, mit dadurch veränderten intrathorakalen und arteriellen Druckverhältnissen [16, 18,

28]. In einer prospektiven Untersuchung an Patienten während elektiver koronarer Bypassoperation verglichen wir daher die absoluten Werte und die relativen Veränderungen von CI_{PC} , CI_{TD} , und CI_{PA} in Abhängigkeit dieser Veränderungen während Sternotomie.

Methodik

Patienten

Die Studie wurde von der örtlichen Ethikkommission begutachtet und genehmigt. Alle Patienten wurden über die Untersuchung aufgeklärt und gaben schriftlich ihre Einverständnis. Es wurden 28 Patienten des American Society of Anesthesiology Physical Status (ASA) II–III, bei denen eine elektive koronare Bypassoperation geplant war, prospektiv in die Untersuchung aufgenommen. Ausschlusskriterium war eine schwere periphere arterielle Verschlusskrankheit, da dies als relative Kontraindikation für eine femoralarterielle Kanülierung anzusehen ist. Weiterhin wurden Patienten mit dem Befund einer hochgradigen Trikuspidalinsuffizienz in der präoperativen Echokardiographie von der Teilnahme an der Untersuchung ausgeschlossen, da dieses Klappenitium die Genauigkeit einer Thermodilutionsmessung beeinflussen kann [1].

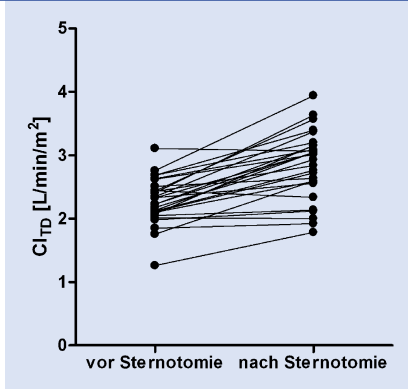


Abb. 1 ▲ Einzelwertdarstellung der Absolutwerte des Herzindex (CI) von allen untersuchten Patienten vor und nach Sternotomie, $p < 0,0001$

Die Allgemeinanästhesie zur aortokoronaren Bypassoperation wurde mit 0,1–0,15 mg/kg KG Midazolam, 0,5–1 µg/kg KG Sufentanil und 0,1–0,15 mg/kg KG Pancuronium als intravenöse Injektion eingeleitet. Nach orotrachealer Intubation wurde die Narkose mit 1–1,8 µg/kg KG/h Sufentanil als kontinuierliche i.v.-Infusion, 4–8 mg Pancuronium i.v. und 0,4–1,5% Isofluran inspiratorisch in 100% Sauerstoff aufrechterhalten. Nach Narkoseeinleitung wurde ein 8-Fr-Zentralvenenkatheter (Arrow, Reading, PA, USA) in die V. jugularis interna eingebracht. Alle Druckaufnehmer wurden auf Höhe der mittleren Axillarlinie zu atmosphärischem Druck auf Null abgeglichen. Die Beatmung erfolgte volumenkontrolliert mit 10 ml/kg KG Tidalvolumen, einem Inspirations-/Expiration-Verhältnis von 1:2 und einem positiv-endexpiratorischen Atemwegsdruck von 5 cmH₂O. Die Atemfrequenz wurde so gewählt, dass der endtidale CO₂-Partialdruck Werte zwischen 35 und 40 mmHg ergab. Jede weitere individuelle Therapie wurde unverändert fortgeführt.

Thermodilution

Vor Narkoseeinleitung wurde bei allen Patienten unter Lokalanästhesie ein arterieller 5-Fr-Katheter mit Thermistor (PV 2025L20, 5 F FT-PULSIOCATH, Pulsion Medical Systems AG, München, Deutschland) in die Femoralarterie eingebracht und in die distale Aorta vorgeschoben. Der Katheter wurde mit dem Pulskonturanalyse-Monitor (PiCCO, V 5.1, Pulsion Medical Systems AG, München, Deutschland) verbunden. Dieses System erlaubt die in-

termittierende Messung des Schlagvolumens (SV), des Herzzeitvolumens und des CI (nach Bestimmung der Körperoberfläche) durch arterielle Thermodilution [9, 13]. Bei 6 Patienten, bei denen aus medizinischer Sicht die Überwachung der pulmonalarteriellen Drücke indiziert war, wurde zusätzlich eine 8,5-Fr-Schleuse in die rechte Jugularvene eingebracht und ein 7,5-Fr-4-Lumen-Pulmonalarterienkatheter (Ohmeda, Erlangen, Deutschland) unter Monitoring der Druckkurven des proximalen und distalen Katheterlumens in die Pulmonalarterie eingeschwenkt. Für die Thermodilutionsmessungen wurden 10 ml einer eiskalten 0,9%igen Kochsalzlösung zu zufälligen Zeitpunkten während des Atemzyklus rasch in den Zentralvenenkatheter bzw. Pulmonalarterienkatheter injiziert. Das thermische Signal wurde an der Spitze des arteriellen Katheters in der distalen Aorta und bei Patienten mit Pulmonalarterienkatheter zusätzlich an der Spitze des Pulmonalarterienkatheters detektiert. Alle Thermodilutionsmessungen wurden 3fach durchgeführt; der arithmetische Mittelwert wurde berechnet und registriert. Weiterhin wurde jede Thermodilutionskurve visuell beurteilt, um mögliche Artefakte auszuschließen.

Als Surrogatparameter für die Veränderung der Vorlast vor und nach Sternotomie wurde das globale enddiastolische Volumen (GEDV) durch arterielle Thermodilution bestimmt. Dieser Parameter erlaubt weiterhin eine Abschätzung des intrathorakalen Blutvolumens (ITBV): $ITBV = 1,25 \cdot GEDV$ [ml/m²] [24]. Als Surrogatparameter für die Veränderung der aortalen Impedanz und damit der Nachlast wurde vor und nach Sternotomie die effektive arterielle Elastanz (E_a) aus SV und systolischem Blutdruck (SAP) berechnet: $E_a = SAP/SV$ [mmHg/ml] [15, 32].

Pulskonturanalyse

Das PiCCO-System (PiCCO, V 5.1, Pulsion Medical Systems AG, München, Deutschland) besteht aus einem tragbaren Monitor, einem Inline-Temperatur-Sensor für das Injektat, einem arteriellen Katheter mit Thermistor an der Katheterspitze und der Verbindung zu einem Druckaufnehmer. Das System erlaubt nach einer initialen Kalibrierung mittels arterieller Ther-

modilution durch Anwendung der arteriellen Pulskonturanalyse die kontinuierliche Aufzeichnung des linksventrikulären SV und des Herzzeitvolumens. Der hier verwendete Algorithmus basiert auf dem von Wesseling et al. vorgestellten Modell [35]: Das SV wird nach Kalibrieren (cal) kontinuierlich aus dem systolischen Anteil der Fläche unter der aortalen Blutdruckkurve ($P(t)/SVR$) berechnet. Weiterhin wird mit dem in dieser Untersuchung verwendeten Algorithmus zusätzlich die Form der aortalen Blutdruckkurve anhand der Veränderung des Druckes über die Zeit (dP/dt) analysiert. Auch wird die patientenspezifische aortale Impedanz ($C(p)$), die zuvor als Quotient des nichtkalibrierten Pulskontur-SV und des aus der arteriellen Thermodilution ermittelten SV errechnet wurde, bei der Berechnung von CI_{PC} berücksichtigt. Daneben fließen in die Bestimmung von CI_{PC} die Herzfrequenz (HR) und die aus Körpergewicht und Körpergröße bestimmte Körperoberfläche („body surface area“, BSA) ein:

$$CI_{PC} = cal \cdot HR \cdot$$

$$\int_{Systole} \frac{P(t)}{SVR} + C(p) \cdot \frac{dp}{dt} dt / BSA$$

Der Pulskonturanalyse-Monitor wurde zu Beginn der Untersuchung einmalig durch eine dreifache arterielle Thermodilution kalibriert. Die Thermodilution wurde stets von derselben Person durchgeführt, um den Einfluss von Variationen zu minimieren. Danach wurden Herzfrequenz, arterieller Blutdruck, SVI und CI_{PC} kontinuierlich aufgezeichnet. Weitere Messgrößen, die mit dem PiCCO-System erfasst werden, werden hier nicht dargestellt, da diese Parameter in einer anderen Arbeit mit einer gesonderten Fragestellung diskutiert werden [28].

Studienplan

Während der kurzen Untersuchungsperiode wurde keine Flüssigkeit zugeführt. Katecholamine waren bei keinem Patienten zu diesem Zeitpunkt notwendig. Die Beatmung wurde nicht verändert. Relaxometrie mit der Train-of-four-Messung ergab, dass alle Patienten bei Untersuchungsbeginn vollständig relaxiert waren. Die kar-

Anaesthesist 2005 · 54:755–762
DOI 10.1007/s00101-005-0847-9
© Springer Medizin Verlag 2005

T. W. Felbinger · M. S. Goepfert · T. Goresch · A. E. Goetz · D. A. Reuter

Arterielle Pulskonturanalyse zur Messung des Herzindex unter Veränderungen der Vorlast und der aortalen Impedanz

Zusammenfassung

Hintergrund. Die arterielle Pulskonturanalyse wurde zur Bestimmung des Herzindex (CI) sowohl bei herzchirurgischen als auch bei kritisch kranken Patienten während unterschiedlichen klinischen Bedingungen validiert. Der anhand der Pulskonturanalyse bestimmte Herzindex (CI_{PC}) zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem durch arterielle (CI_{TD}) oder durch pulmonalarterielle Thermodilution (CI_{PA}) bestimmten Herzindex. Die Genauigkeit der Pulskonturanalyse unter Bedingungen des offenen Thorax mit Veränderungen der Vorlast und der aortalen Impedanz ist jedoch unklar. Daher wurden CI_{PC} , CI_{TD} und CI_{PA} in Abhängigkeit dieser Veränderungen durch Sternotomie verglichen.

Methodik. 28 Patienten während elektiver koronarer Bypassoperation wurden untersucht. CI_{PC} und CI_{TD} , sowie CI_{PA} bei 6 Patienten, wurden vor sowie nach Sternotomie bestimmt, und die relativen Veränderungen ΔCI_{PC} und ΔCI_{TD} und ΔCI_{PA} berechnet. **Ergebnisse.** Die Sternotomie resultierte bei 25 von 28 Patienten in einem signifikanten Anstieg des CI. Eine Regressionsanalyse wurde zwischen CI_{PC} und CI_{TD} vor bzw. nach Sternotomie ($r^2 = 0,87$, $p < 0,0001$, $r^2 = 0,88$, $p < 0,0001$) sowie zwischen CI_{PC} und CI_{PA} , vor bzw. nach Sternotomie ($r^2 = 0,85$, $p < 0,0001$, $r^2 = 0,93$, $p < 0,01$) und zwischen ΔCI_{PC} und ΔCI_{TD} ($r^2 = 0,72$, $p < 0,0001$) durchgeführt. Eine Bland Altman-Analyse ergab für Bias (m) und Grenzen der Über-

einstimmung (2SD) zwischen CI_{PC} und CI_{TD} vor und nach Sternotomie sowie zwischen ΔCI_{PC} und ΔCI_{TD} : $m = -0,03$ l/min/m², 2SD = $-0,34$ bis $0,28$ l/min/m², $m = -0,06$ l/min/m², 2SD = $-0,45$ bis $0,33$ l/min/m² und $m = -0,02$ l/min/m², 2SD = $-0,47$ bis $0,44$ l/min/m².

Schlussfolgerung. Veränderungen der Vorlast und der aortalen Impedanz während Sternotomie beeinflussen nicht die Genauigkeit der arteriellen Pulskonturanalyse. CI_{PC} , CI_{TD} , und CI_{PA} zeigen unter diesen Bedingungen eine gute Übereinstimmung.

Schlüsselwörter

Hämodynamisches Monitoring · Herzzeitvolumen · Swan Ganz Katheter · PiCCO

Accuracy of pulse contour cardiac index measurements during changes of preload and aortic impedance

Abstract

Background. Cardiac index obtained by arterial pulse contour analysis (CI_{PC}) demonstrated good agreement with arterial or pulmonary arterial thermodilution derived cardiac index (CI_{TD} , CI_{PA}) in cardiac surgical or critically ill patients. However as the accuracy of pulse contour analysis during changes of the aortic impedance is unclear, we compared CI_{PC} , CI_{TD} and CI_{PA} during changes of preload and the aortic impedance as occurring during sternotomy.

Patients and methods. CI_{PC} und CI_{TD} , were compared in 28 patients, (and CI_{PA} in 6 patients) undergoing elective coronary artery bypass grafting, before and after sternoto-

my. The relative changes ΔCI_{PC} und ΔCI_{PC} were calculated.

Results. Sternotomy resulted in a significant increase in CI in 25 out of 28 patients. Regression analysis was performed between CI_{PC} and CI_{TD} before and after sternotomy ($r^2 = 0,87$, $p < 0,0001$, $r^2 = 0,88$, $p < 0,0001$) as well as between CI_{PC} and CI_{PA} , before and after sternotomy ($r^2 = 0,85$, $p < 0,0001$, $r^2 = 0,93$, $p < 0,01$) and between ΔCI_{PC} and ΔCI_{TD} ($r^2 = 0,72$, $p < 0,0001$). Bland Altman-Analysis for determining bias (m) and precision (2SD) between CI_{PC} and CI_{TD} before and after sternotomy and between ΔCI_{PC} and ΔCI_{TD} resulted in m =

$-0,03$ L/min/m², 2SD = $-0,34$ to $0,28$ L/min/m², $m = -0,06$ L/min/m², 2SD = $-0,45$ to $0,33$ L/min/m² and $m = -0,02$ L/min/m², SD = $-0,47$ to $0,44$ L/min/m².

Conclusion. Pulse contour analysis derived CI_{PC} accurately reflects thermodilution derived CI_{TD} or CI_{PA} during changes of preload and the aortic impedance as occurring during sternotomy.

Keywords

Hemodynamic monitoring · Cardiac output · Swan Ganz catheter · PiCCO

Tabelle 1

Hämodynamische Parameter vor und nach Sternotomie

Parameter	Vor Sternotomie	Nach Sternotomie	p
SAP [mmHg]	107 (17)	128 (15)	<0,0001
MAP [mmHg]	74 (12)	84 (12)	<0,001
DAP [mmHg]	56 (12)	60 (14)	n.s.
HR [1/min]	59 (9)	67 (11)	<0,0001
SVI [ml/m ²]	39 (8)	42 (7)	<0,01
GEDVI [ml/m ²]	640 (150)	682 (139)	<0,001
E _a [mmHg/ml]	1,4 (0,4)	1,6 (0,4)	<0,01

Alle Werte sind als arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung (in Klammern) dargestellt. SAP systolischer arterieller Blutdruck, MAP mittlerer arterieller Blutdruck, DAP diastolischer arterieller Blutdruck, HR Herzfrequenz, SVI Schlagvolumenindex, GEDVI globaler enddiastolischer Volumenindex, E_a effektive arterielle Elastanz, p Signifikanzniveau, n.s. nicht signifikant.

Tabelle 2

Validierung der Pulskonturanalyse mithilfe des Pulmonalarterienkatheter

	Bias [l/min]	95%-Grenzen der Übereinstimmung (2SD)	r ²	p
CI _{PC} vs. CI _{TD} (vor ST)	-0,03	-0,34-0,28	0,87	<0,0001
CI _{PC} vs. CI _{TD} (nach ST)	-0,06	-0,45-0,33	0,88	<0,0001
CI _{PA} vs. CI _{TD} (vor ST)	0,08	-0,28-0,43	0,96	<0,01
CI _{PA} vs. CI _{TD} (nach ST)	0,16	-0,10-0,41	0,94	<0,01
CI _{PA} vs. CI _{PC} (vor ST)	0,10	-0,25-0,44	0,85	<0,0001
CI _{PA} vs. CI _{PC} (nach ST)	0,24	-0,06-0,55	0,93	<0,01

CI_{PC} Herzindex mithilfe der Pulskonturanalyse, CI_{TD} Herzindex mithilfe der arteriellen Thermodilution, CI_{PA} Herzindex mithilfe der pulmonalarteriellen Thermodilution, ST Sternotomie, SD Standardabweichung, r² Korrelationskoeffizient, p Signifikanzniveau.

diovaskulären Parameter wurden an zwei definierten Zeitpunkten erhoben: T₁, nach Hautinzision und vor Sternotomie; T₂, nach Sternotomie, Eröffnung des Thorax und des Perikards, mit eingesetztem Sternumretraktor.

Statistik

Alle erhobenen Daten wurden auf Normalverteilung überprüft. Normalverteilte Daten sind als Mittelwert und Standardabweichung (MW±SD) dargestellt. Vergleiche der normalverteilten Daten zwischen T₁ und T₂ wurden mit dem Student-t-Test für gepaarte Stichproben durchgeführt; CI_{PC} und CI_{TD}, CI_{PC} und CI_{PA}, CI_{TD} und CI_{PA} sowie die relativen Veränderungen vor und nach Sternotomie ΔCI_{TD} und ΔCI_{PC} wurden mit der linearen Regression und Berechnung der Korrelation nach Pearson verglichen. Die Bland-Altman-

Analyse wurde herangezogen, um Bias und Präzision der verglichenen Methoden zu bestimmen [3]. Die Bias oder Genauigkeit wird als Differenz der Mittelwerte der beiden verglichenen Methoden dargestellt. Die Präzision wird als Bereich der Übereinstimmung (2 Standardabweichungen) angegeben, in dem sich 95% der Unterschiede zwischen den verglichenen Methoden befinden. Statistische Signifikanz wurde bei p<0,05 angenommen. Alle Berechnungen und Abbildungen wurden mithilfe der Software Prism 4.0 (GraphPad Software Inc, San Diego CA, USA) durchgeführt.

Ergebnisse

In die Untersuchung und die Auswertung wurden 21 männliche und 7 weibliche Patienten im Alter von 58±12 Jahren aufgenommen. Der Body-Mass-Index betrug

27,5±4,3 kg/m². Die anhand der präoperativ durchgeführten Ventrikulographie bestimmte linksventrikuläre Ejektionsfraktion lag zwischen 49 und 89% (Median 68%). Bei 25 von 28 Patienten war die Sternotomie mit einem Anstieg des CI verbunden (vor Sternotomie, CI=2,3±0,4 l/min/m²; nach Sternotomie, CI=2,8±0,5 l/min/m²; p<0,0001; **Abb. 1**). Die Sternotomie resultierte in einer signifikanten Steigerung des GEDVI um ca. 10%. Auch die effektive E_a nahm nach Sternotomie um ca. 10% zu. Die hämodynamischen Parameter vor und nach Sternotomie sind in **Tabelle 1** dargestellt.

Insgesamt wurden 28 Mittelwerte von CI_{PC} und CI_{TD} aus je dreifacher Einzelmessung vor und nach Sternotomie ermittelt. Eine Regressionsanalyse zwischen CI_{PC} und CI_{TD} vor bzw. nach Sternotomie ergab r²=0,87, p<0,0001, y=0,78*x+0,46 und r²=0,88, p<0,0001, y=0,87*x+0,31 (**Abb. 2a, 3a**). Die Bland-Altman-Analyse wurde zur Bestimmung der Genauigkeit und Präzision der beiden verglichenen Methoden durchgeführt. Die Unterschiede der Mittelwerte (m) und die Standardabweichung (SD) zwischen CI_{PC} und CI_{TD} vor und nach Sternotomie ergaben m=-0,03 l/min/m², SD=0,16 l/min/m² und m=-0,06 l/min/m², SD=0,20 l/min/m² (**Abb. 2b, 3b**). Zur Erfassung von Veränderungen des CI durch Sternotomie wurde ΔCI als Differenz vor und nach Sternotomie berechnet. Die Regressionsanalyse von ΔCI_{PC} and ΔCI_{TD} ergab r²=0,72, p<0,0001, y=0,78*x+0,11 (**Abb. 4a**). Die Bland-Altman-Analyse ergab für Bias und Präzision zwischen ΔCI_{PC} und ΔCI_{TD} m=-0,02 l/min/m², SD=0,23 l/min/m² (**Abb. 4b**). Bei Patienten, bei denen ein Pulmonalarterienkatheter eingeschwenkt wurde, wurden zusätzlich Mittelwerte von CI_{PA} und CI_{TD} sowie von CI_{PA} und CI_{PC} miteinander verglichen. Die Ergebnisse für Bias zeigen, dass der CI_{PA} gegenüber CI_{TD} und CI_{PC} vor wie auch nach Sternotomie geringfügig höhere Werte aufweist (**Tabelle 2**). Die 95%-Grenzen der Übereinstimmung zeigen keine Unterschiede zwischen den verglichenen Methoden und auch keine Veränderungen dieser Übereinstimmung durch die Sternotomie. Ebenso zeigt sich eine gleichbleibend gute signifikante Korrelation zwischen den zwei Methoden nach Sternoto-

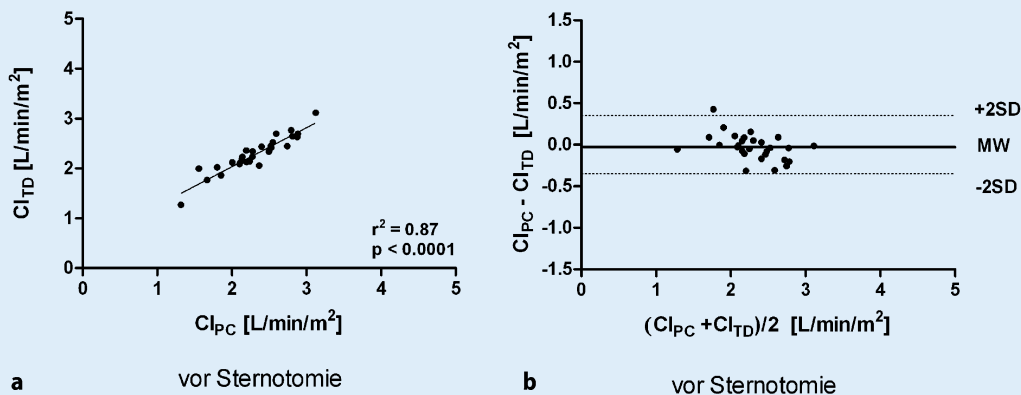


Abb.2 ▲ a Lineare Regressionsanalyse des Herzindex anhand der Pulskonturanalyse (CI_{PC}) und des Herzindex anhand der arteriellen Thermodilution (CI_{TD}) vor Sternotomie: $y=0,78 \cdot x+0,46$, Korrelationskoeffizient $r^2=0,87$, $p<0,0001$ (dünne Linie Regressionslinie). b Bias zwischen CI_{PC} und CI_{TD} ist als Differenz der Mittelwerte gemäß der Bland-Altman-Analyse dargestellt (durchgezogene Linie). Mittlere Bias (m) und Standardabweichung (SD) ergab $m=-0,03 \text{ l/min/m}^2$, $SD=0,16 \text{ l/min/m}^2$

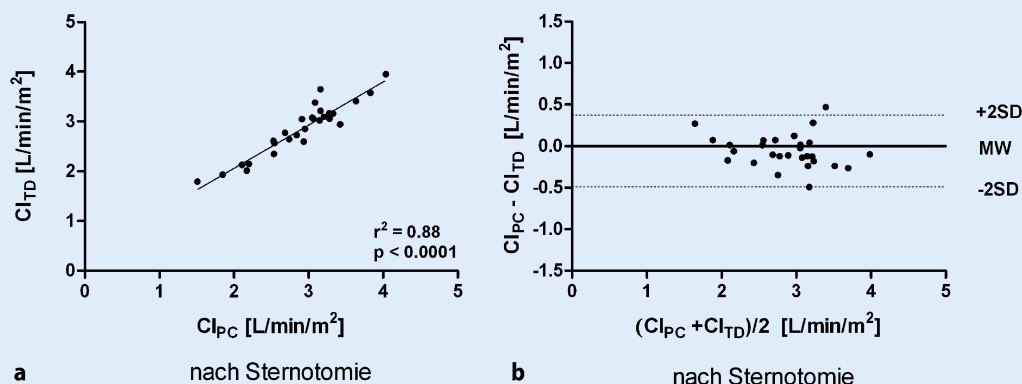


Abb.3 ▲ a Lineare Regressionsanalyse des Herzindex mithilfe Pulskonturanalyse (CI_{PC}) und des Herzindex anhand arterieller Thermodilution (CI_{TD}) nach Sternotomie: $y=0,87 \cdot x+0,31$. Korrelationskoeffizient $r^2=0,88$, $p<0,0001$ (dünne Linie Regressionslinie). b Bias zwischen CI_{PC} and CI_{TD} ist als Differenz der Mittelwerte gemäß Bland-Altman-Analyse dargestellt (durchgezogene Linie). Mittlere Bias (m) und Standardabweichung (SD) ergab $m=-0,06 \text{ l/min/m}^2$, $SD=0,20 \text{ l/min/m}^2$

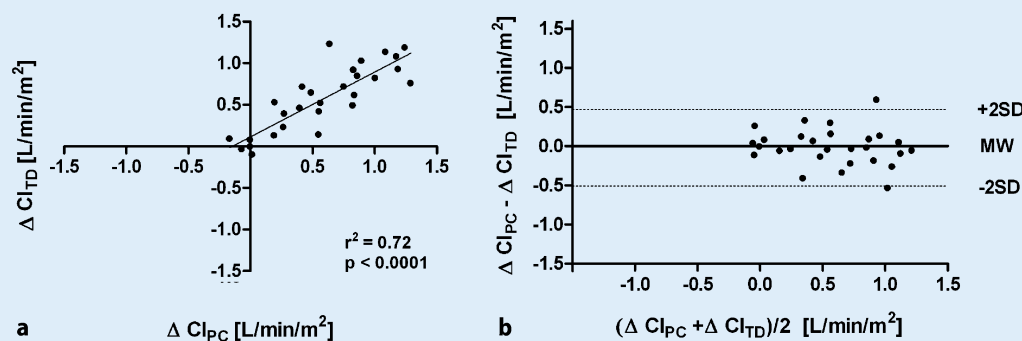


Abb.4 ▲ a Lineare Regressionsanalyse zwischen den relativen Veränderungen des Herzindex anhand Pulskonturanalyse ΔCI_{PC} und des Herzindex anhand der arteriellen Thermodilution ΔCI_{TD} : $y=0,78 \cdot x+0,11$. Korrelationskoeffizient $r^2=0,72$, $p<0,0001$ (dünne Linie Regressionslinie). b Bias zwischen ΔCI_{PC} and ΔCI_{TD} ist als Differenz der Mittelwerte gemäß Bland-Altman-Analyse dargestellt (durchgezogene Linie). Mittlere Bias (m) und Standardabweichung (SD) ergab $m=-0,02 \text{ l/min/m}^2$, $SD=0,23 \text{ l/min/m}^2$

mie im Vergleich der Korrelationen vor der Sternotomie.

Die Anlage aller Katheter verlief komplikationslos. Die arterielle Pulskonturanalyse konnte zu jedem Messzeitpunkt erfolgreich durchgeführt werden.

Diskussion

Besonders bei kardiochirurgischen Eingriffen treten häufig signifikante hämodynamische Schwankungen auf. Eine kontinuierliche Bestimmung des CI, z. B. durch Anwendung der arteriellen Pulskonturanalyse, ermöglicht im Gegensatz zu diskontinuierlichen Verfahren, wie der klassischen pulmonalarteriellen Thermodilution, das unmittelbare Erkennen von solchen hämodynamischen Schwankungen, eine differenzialdiagnostische Analyse und eine raschere Therapie. Die Genauigkeit von CI_{PC} war allerdings unter den potenziellen Veränderungen der aortalen Impedanz, wie sie während einer Sternotomie auftreten, unklar. Unsere Untersuchung belegt die Robustheit der arteriellen Pulskonturanalyse zur Bestimmung der kardialen Pumpfunktion unter Veränderung der Vorlast und der aortalen Impedanz während Sternotomie. Wir konnten zeigen, dass CI_{PC} unter diesen klinischen Bedingungen mit CI_{TD} und dem „Gold Standard“ der Messung von CI_{PA} , gut übereinstimmt.

Bei Verwendung des ursprünglichen Algorithmus der Pulskonturanalyse wurde davon ausgegangen, dass sich die Eigenschaften der Aorta bei wechselnden Wandspannungen nicht verändern. Besonders bei hämodynamischen Schwankungen hat sich dieser Algorithmus, bei dem die elastischen Eigenschaften der Aorta nicht genügend berücksichtigt wurden, als zu ungenau erwiesen [5, 29, 34]. Später wurde die aortale Impedanz in einem 3-Element-Modell abgeschätzt [36]. Rodig et al. konnten mit einem solchen älteren Algorithmus zeigen, dass bei Abweichungen des systemischen Widerstands bis zu 20% die Pulskonturanalyse in ihrer Genauigkeit nicht beeinträchtigt wird, aber bei ausgeprägteren Veränderungen des systemischen arteriellen Widerstands die Pulskonturanalyse durch Thermodilution neu kalibriert werden muss [29]. Auch während orthotoper Lebertransplantation wa-

ren nach Gabe von Vasopressoren die Abweichungen zwischen CI_{PC} und CI_{PA} größer als unter stabilen hämodynamischen Bedingungen [14]. Bei der Interpretation dieser Untersuchungen muss allerdings berücksichtigt werden, dass die verschiedenen publizierten Algorithmen für die arterielle Pulskonturanalyse teilweise deutlich voneinander abweichen und daher nicht direkt verglichen werden können [21]. In unserer Untersuchung wurde ein Algorithmus verwendet, bei dem die aortale Impedanz in alters- und Druck-Volumen-abhängigen Beziehungen an isolierten humanen Aortapräparaten ermittelt wurde. Mit diesem Algorithmus konnten wir bei Intensivpatienten beim Vergleich von Absolutwerten des Herzzeitvolumens im Bereich von 2,7–14,2 l/min und des systemischen Widerstands im Bereich von 450–2360 dyne \cdot s \cdot cm $^{-5}$ gute Übereinstimmungen mit gleichzeitig erhobenen CI_{TD} -Werten finden [13]. Die aortale Impedanz, v. a. im Bereich der proximalen Aorta, ist abhängig vom arteriellen Druck, vom Umgebungsdruck und damit von den intrathorakalen Druckverhältnissen [18]. Unter solchen Bedingungen mit einem entsprechenden Anstieg des arteriellen Blutdrucks um ca. 30% während der Sternotomie blieb in unserer Untersuchung die gute Übereinstimmung von CI_{PC} und CI_{TD} bestehen. Eine ähnlich gute Übereinstimmung von CI_{PC} mit CI_{TD} und CI_{PA} sowie zusätzlich gemessenem kontinuierlichen CI_{PA} vor Hautschnitt sowie nach Reperfusion konnten Della Rocca et al. kürzlich bei 58 Patienten während Lungentransplantation beschreiben [8]. Die gute Übereinstimmung von CI_{PC} mit CI_{PA} blieb trotz des Abklemmens der Pulmonalarterie mit der damit verbundenen Erhöhung der rechtsventrikulären Nachlast und möglicherweise konsekutiv auch der rechtsventrikulären Vorlast bestehen. Allerdings wurden in dieser Untersuchung Patienten während *Single-Lung-Transplantation*, die in der Regel in Seitenlage während Ein-Lungen-Ventilation und Abklemmen der Pulmonalarterie operiert werden, mit Patienten während *Double-Lung-Transplantation*, bei denen der Eingriff oft in Rückenlage nach Sternotomie unter Verwendung von extrakorporaler Zirkulation durchgeführt wird, gemeinsam untersucht. Weiterhin sind in dieser Untersuchung nur wenige Zeit-

punkte mit Intervallen von bis zu mehreren Stunden analysiert und damit nur langsame spontane Veränderungen der Hämodynamik erfasst; dies erlaubt keine Aussage über rasche Veränderungen der Hämodynamik während einer Lungentransplantation (z. B. direkt nach „clamping“ der Pulmonalarterie).

Der Anstieg des arteriellen Blutdrucks und des CI nach Sternotomie in unserer Untersuchung, ebenso wie bei Della Rocca et al., ist durch mehrere Faktoren erklärbar. Reuter et al. konnten zeigen, dass die Reduktion der intrathorakalen Druckverhältnisse nach Sternotomie zu einem Anstieg des globalen enddiastolischen Volumens und somit, abhängig von der Position auf der patientenspezifischen Frank-Starling-Kurve, zu einem Anstieg der biventrikulären Vorlast führt [28]. Weiterhin sind durch Sternotomie Veränderungen der Nachlast denkbar. In unserer Untersuchung führte die Sternotomie trotz der damit verbundenen Senkung der intrathorakalen Drücke zu einer Zunahme der effektiven E_a um ca. 10%. Adrenerge Reaktionen sind mögliche Ursachen für diese E_a - und CI-Anstiege. Die Herzfrequenz als zusätzliches Maß der adrenergen Stimulation war dementsprechend in unserer Untersuchung nach Sternotomie um ca. 15% höher.

Der CI_{PC} zeigte bereits in verschiedenen klinischen Situationen gute Übereinstimmungen mit CI_{PA} und CI_{TD} [9, 10, 12, 30]. Eine wesentliche Verbesserung der Technik der arteriellen Pulskonturanalyse stellt die Möglichkeit dar, die initial notwendige Kalibrierung durch arterielle Thermodilution (transkardiopulmonale Thermodilution) und damit unabhängig von einem Pulmonalarterienkatheter durchzuführen, wie es im PiCCO-System realisiert ist [11]. In unserer Untersuchung war nur bei wenigen Patienten ein Pulmonalarterienkatheter eingeschwenkt. Trotz der nur wenigen Wertepaare war die Übereinstimmung zwischen CI_{TD} und CI_{PA} sehr gut. Dies ist ein weiterer Beleg dafür, dass das PiCCO_A-Messsystem, nach einer einzigen Kalibrierung durch arterielle Thermodilution, während Sternotomie sowie den damit verbundenen Änderungen der Vorlast und der aortalen Impedanz und unmittelbar nach Sternotomie nicht erneut kalibriert werden muss.

Einschränkend muss hinzugefügt werden, dass die hämodynamischen Parameter nach der Sternotomie in unserer Untersuchung nur an einem einzigen Messzeitpunkt erhoben wurden und damit nur eingeschränkt Aussagen über die Genauigkeit der Pulskonturanalyse während eines längeren Zeitraums nach Sternotomie möglich sind. Allerdings herrschen nach Sternotomie im Wesentlichen stabile hämodynamische Verhältnisse vor. Die Genauigkeit der Pulskonturanalyse während solcher stabiler intraoperativer Phasen bei spontanen CI-Veränderungen oder bei schnellen Veränderungen der Vorlast konnte in früheren Untersuchungen nachgewiesen werden [9, 10, 13] und kann deshalb auch in unserer Untersuchung angenommen werden.

Die Anlage eines Zentralvenenkatheters und einer arteriellen Verweilkanüle sind Routineverfahren in der Kardioanästhesie. Die arterielle Pulskonturanalyse in Kombination mit der arteriellen Thermodilution stellt somit eine Alternative zum

Pulmonalarterienkatheter dar. Ein weiterer Vorteil der arteriellen Pulskonturanalyse in Kombination mit der arteriellen Thermodilution ist, dass neben der kontinuierlichen CI-Bestimmung auch die Bestimmung des globalen enddiastolischen Volumens [24, 26] und der linksventrikulären SV-Variation [25, 27] möglich ist. Steht allerdings das Monitoring der pulmonalarteriellen Drücke im Vordergrund des klinischen Interesses, ist die Verwendung des Pulmonalarterienkatheters für das perioperative Monitoring weiterhin die Methode der Wahl.

Fazit für die Praxis

Besonders bei herzchirurgischen Eingriffen treten intraoperativ oft hämodynamisch relevante Schwankungen der kardialen Pumpfunktion auf. Die durch Sternotomie resultierende intrathorakale Druckänderung führt möglicherweise zu Änderungen der kardialen Vorlast und der aortalen Impedanz. Die Validität der

arteriellen Pulskonturanalyse zur kontinuierlichen CI-Bestimmung war in diesen Situationen unklar. Es konnte gezeigt werden, dass die Zuverlässigkeit der arteriellen Pulskonturanalyse mit dem verwendeten Algorithmus während Sternotomie bestehen bleibt. Somit stellt die arterielle Pulskonturanalyse in diesen Situationen eine gute Alternative zum Pulmonalarterienkatheter dar, um Veränderungen der kardialen Pumpfunktion früh zu entdecken und entsprechend zu behandeln.

Korrespondierender Autor

Dr. T. W. Felbinger

Klinik und Poliklinik für Anästhesiologie,
Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf,
Martinistr. 52, 20246 Hamburg
E-Mail: tfelbinger@uke.uni-hamburg.de

Interessenkonflikt: Der korrespondierende Autor versichert, dass keine Verbindungen mit einer Firma, deren Produkt in dem Artikel genannt ist, oder einer Firma, die ein Konkurrenzprodukt vertreibt, bestehen.

Hier steht eine Anzeige.

 Springer

Literatur

- Balik M, Pachel J, Hendl J, Martin B, Jan P, Jan H (2002) Effect of the degree of tricuspid regurgitation on cardiac output measurements by thermodilution. *Intensive Care Med* 28:1117–1121
- Becker K Jr (1998) Resolved: a pulmonary artery catheter should be used in the management of the critically ill patient. *Con J Cardiothorac Vasc Anesth* 12:13–16
- Bland JM, Altman DG (1986) Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 1:307–310
- Buhre W, Weyland A, Kazmaier S, Hanekop GG, Baryalei MM, Sydow M, Sonntag H (1999) Comparison of cardiac output assessed by pulse-contour analysis and thermodilution in patients undergoing minimally invasive direct coronary artery bypass grafting. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 13:437–440
- Cerutti C, Gustin MP, Molino P, Paultre CZ (2001) Beat-to-beat stroke volume estimation from aortic pressure waveform in conscious rats: comparison of models. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 281: H1148–1155
- Connors AF Jr, Speroff T, Dawson NV et al. (1996) The effectiveness of right heart catheterization in the initial care of critically ill patients. SUPPORT Investigators. *JAMA* 276:889–897
- Della Rocca G, Costa MG, Pompei L, Coccia C, Pietropaoli P (2002) Continuous and intermittent cardiac output measurement: pulmonary artery catheter versus aortic transpulmonary technique. *Br J Anaesth* 88:350–356
- Della Rocca G, Costa MG, Coccia C, Pompei L, Marco P di, Vilaridi V, Pietropaoli P (2003) Cardiac output monitoring: aortic transpulmonary thermodilution and pulse contour analysis agree with standard thermodilution methods in patients undergoing lung transplantation. *Can J Anaesth* 50:707–711
- Felbinger TW, Reuter DA, Eltzschig HK, Moerstedt K, Goedje O, Goetz AE (2002) Comparison of pulmonary arterial thermodilution and arterial pulse contour analysis: evaluation of a new algorithm. *J Clin Anesth* 14:296–301
- Felbinger TW, Reuter DA, Eltzschig HK et al. (2005) Cardiac index measurements during rapid preload changes: a comparison of pulmonary artery thermodilution with arterial pulse contour analysis. *J Clin Anesth* 17:241–248
- Godje O, Hoke K, Lamm P, Schmitz C, Thiel C, Weirner M, Reichart B (1998) Continuous, less invasive, hemodynamic monitoring in intensive care after cardiac surgery. *Thorac Cardiovasc Surg* 46:242–249
- Goedje O, Hoeke K, Lichtwarck-Aschoff M, Faltchauser A, Lamm P, Reichart B (1999) Continuous cardiac output by femoral arterial thermodilution calibrated pulse contour analysis: comparison with pulmonary arterial thermodilution. *Crit Care Med* 27:2407–2412
- Goedje O, Hoke K, Goetz AE et al. (2002) Reliability of a new algorithm for continuous cardiac output determination by pulse-contour analysis during hemodynamic instability. *Crit Care Med* 30:52–58
- Grigorov Tzenkov I, Arnal Velasco D, Perez Pena JM, Olmedilla Arnal L, Garutti Martinez I, Sanz Fernandez J (2003) Cardiac output by femoral arterial thermodilution-calibrated pulse contour analysis during liver transplantation: comparison with pulmonary artery thermodilution. *Transplant Proc* 35:1920–1922
- Hayashi K, Shigemi K, Shihido T, Sugimachi M, Sunagawa K (2000) Single-beat estimation of ventricular end-systolic elastance-effective arterial elastance as an index of ventricular mechanoenergetic performance. *Anesthesiology* 92:1769–1776
- Hoar PF, Stone JG, Faltas AN, Bendixen HH, Head RJ, Berkowitz BA (1980) Hemodynamic and adrenergic responses to anesthesia and operation for myocardial revascularization. *J Thorac Cardiovasc Surg* 80:242–248
- Jansen JR, Wesseling KH, Settels JJ, Schreuder JJ (1990) Continuous cardiac output monitoring by pulse contour during cardiac surgery. *Eur Heart J* 11 [Suppl I]:26–32
- Li JK, Cui T, Drzewiecki GM (1990) A nonlinear model of the arterial system incorporating a pressure-dependent compliance. *IEEE Trans Biomed Eng* 37:673–678
- Mielck F, Buhre W, Hanekop G, Tirilomis T, Hilgers R, Sonntag H (2003) Comparison of continuous cardiac output measurements in patients after cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 17:211–216
- Nishikawa T, Dohi S (1993) Errors in the measurement of cardiac output by thermodilution. *Can J Anaesth* 40:142–153
- Pinsky MR (2003) Probing the limits of arterial pulse contour analysis to predict preload responsiveness. *Anesth Analg* 96:1245–1247
- Rapaport J, Teres D, Steingrub J, Higgins T, McGee W, Lemeshow S (2000) Patient characteristics and ICU organizational factors that influence frequency of pulmonary artery catheterization. *JAMA* 283:2559–2567
- Rauch H, Muller M, Fleischer F, Bauer H, Martin E, Bottiger BW (2002) Pulse contour analysis versus thermodilution in cardiac surgery patients. *Acta Anaesthesiol Scand* 46:424–429
- Reuter DA, Felbinger TW, Moerstedt K, Weis F, Schmidt C, Kilger E, Goetz AE (2002) Intrathoracic blood volume index measured by thermodilution for preload monitoring after cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 16:191–195
- Reuter DA, Felbinger TW, Schmidt C, Kilger E, Goedje O, Lamm P, Goetz AE (2002) Stroke volume variations for assessment of cardiac responsiveness to volume loading in mechanically ventilated patients after cardiac surgery. *Intensive Care Med* 28:392–398
- Reuter DA, Felbinger TW, Schmidt C, Moerstedt K, Kilger E, Lamm P, Goetz AE (2003) Trendelenburg positioning after cardiac surgery: effects on intrathoracic blood volume index and cardiac performance. *Eur J Anaesthesiol* 20:17–20
- Reuter DA, Kirchner A, Felbinger TW, Weis FC, Kilger E, Lamm P, Goetz AE (2003) Usefulness of left ventricular stroke volume variation to assess fluid responsiveness in patients with reduced cardiac function. *Crit Care Med* 31:1399–1404
- Reuter DA, Goresch T, Goepfert MS, Wildhirt SM, Kilger E, Goetz AE (2004) Effects of mid-line thoracotomy on the interaction between mechanical ventilation and cardiac filling during cardiac surgery. *Br J Anaesth* 92:808–813
- Rodig G, Prasser C, Keyl C, Liebold A, Hobbhahn J (1999) Continuous cardiac output measurement: pulse contour analysis vs thermodilution technique in cardiac surgical patients. *Br J Anaesth* 82:525–530
- Sakka SG, Reinhart K, Wegscheider K, Meier-Hellmann A (2000) Is the placement of a pulmonary artery catheter still justified solely for the measurement of cardiac output? *J Cardiothorac Vasc Anesth* 14:119–124
- Sandham JD, Hull RD, Brant RF et al. (2003) A randomized, controlled trial of the use of pulmonary-artery catheters in high-risk surgical patients. *N Engl J Med* 348:5–14
- Segers P, Stergiopoulos N, Westerhof N (2002) Relation of effective arterial elastance to arterial system properties. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 282: H1041–1046
- Swan HJ, Ganz W, Forrester J, Marcus H, Diamond G, Chonette D (1970) Catheterization of the heart in man with use of a flow-directed balloon-tipped catheter. *N Engl J Med* 283:447–451
- Tannenbaum GA, Mathews D, Weissman C (1993) Pulse contour cardiac output in surgical intensive care unit patients. *J Clin Anesth* 5:471–478
- Wesseling KH, Wit B de, Weber JAP, Smith NT (1983) A simple device for the continuous measurement of cardiac output. *Adv Cardiovasc Phys* 5:16–52
- Wesseling KH, Jansen JR, Settels JJ, Schreuder JJ (1993) Computation of aortic flow from pressure in humans using a nonlinear, three-element model. *J Appl Physiol* 74:2566–2573