Aus der Klinik für Anästhesiologie
Universtitäts-Krankenhaus Eppendorf
Direktor Prof. Dr. med. Dr. h.c. J. Schulte am Esch

Vergleichende Untersuchung des hämodynamischen Monitorings bei OPCAB Operationen mittlels Pulmonaliskatheter, Pulskonturanalyse und transösophagealer Echokardiographie bei kardiochirurgischen Patienten

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

dem Fachbereich Medizin der Universität Hamburg vorgelegt von

Julia Herre

aus Hamburg

Hamburg, 2005

Angenommen vom Fachbereich Medizin
der Universität Hamburg am: 14.02.2006

Veröffentlicht mit Genehmigung des Fachbereichs
Medizin der Universität Hamburg

Prüfungsausschuss, die Vorsitzende: Priv. Doz. Dr. Bischoff
Prüfungsausschuss: 2. Gutachter: Priv. Doz. Dr. Wagner
Prüfungsausschuss: 3. Gutachter: Priv. Doz. Dr. Kähler

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung 1

2. Material und Methoden 9

2.1. Patienten 9

2.1.1 Indikationen und Einschlusskriterien 10

2.1.2 Kontraindikationen und Ausschlusskriterien 10

2.2 Anästhesie 10

2.3 Methodische Grundlagen zur Bestimmung des Herzzeitvolumens 14

2.4 Pulskonturanalyse 22

2.5 Pulmonaliskatheter 24

2.6 Transösophageale Echokardiographie 26

2.7 Überwachungsparameter 28

2.8 Versuchsanordnung 30

2.9 Statistische Methoden……35

3. Ergebnisse 36

3.1. Biometrische Daten der Patienten 36

3.2. Hämodynamisches Standardmonitoring 37

3.3. Erweitertes hämodynamisches Monitoring 40

4. Diskussion 73

4.1. Kritik an der Methode 73

4.2. Vergleich der Methoden 77

4.3. Vergleich zur Erfassung der Vorlast Parameter 84

4.4. Klinische Relevanz 85

5. Zusammenfassung 91

6. Literatur 94

7. Abkürzungsverzeichnis……107

8. Abbildungsverzeichnis……108

9. Tabellenverzeichnis……110

10. Danksagung……111

11. Lebenslauf……112

12. Erklärung……114

1. Einleitung

Kardiovaskuläre Erkrankungen stellen immer noch die Todesursache Nummer eins in Deutschland dar. Innerhalb des letzten Jahres wurden in der Bundesrepublik ungefähr 70.000 Bypass-Operationen zur Revaskularisierung der Koronararterien durchgeführt, davon circa 4-5% ohne den Einsatz der Herz-Lungen-Maschine (HLM). Diese so genannten „Off-pump“ Verfahren gewinnen in der letzten Zeit zunehmend an Bedeutung.
Die erste koronare Bypassoperation ohne HLM wurde 1964 von *Kolessov* in St. Petersburg durchgeführt. Hier wurde als Bypass die A. thoracica interna verwendet [32]. Beinahe zeitgleich operierte man in den USA den ersten koronaren Bypass unter Einsatz der HLM. Auf Grund der Tatsache, dass diese Operationstechnik den Chirurgen „ideale“ Operationsbedingungen verschaffte, da sich das Herz intraoperativ nicht bewegte, entwickelte sich diese Methode zu einer Standardoperation.
Die Operation am schlagenden Herzen „off pump coronary artery bypass“ oder kurz OPCAB, kam mit der Einführung der so genannten „minimal-invasiven“ Techniken wieder vermehrt auf. Diese ermöglichen, Teile des Myokards lokal so zu stabilisieren, dass das Herz zwar intraoperativ weiterschlägt, der Anteil, an welchem der Bypass zu operieren ist, allerdings still steht. Dies ist durch das Aufsetzen verschiedener Stabilisationssysteme, wie zum Beispiel dem Octopus, möglich geworden. Außerdem besteht ein vermehrtes Bestreben der Chirurgen, die durch die Herz-Lungen-Maschine verursachten Komplikationen zu vermeiden.

Aortocoronare Bypass Operation mit HLM

Bei der Herz-Lungen-Maschine handelt es sich um eine Art Saugpumpe. Durch die Kanülierung des rechten Vorhofes wird das venöse Blut über spezielle Schlauchsysteme an einem Oxygenator vorbeigeführt. Bei diesem handelt es sich um eine Membran, über welcher ein Sauerstoffgefälle besteht, und über die der Sauerstoff in das venöse Blut diffundiert. Somit wird die Aufgabe der Lunge übernommen. Anschließend wird das Blut wieder der Aorta zugeführt. Es ent-

steht hierbei, im Gegensatz zur normalen, pulsatilen Blutdruckkurve, ein gleichmäßiger, nicht pulsatiler Fluss, der von der Laufgeschwindigkeit der Maschine, dem Volumenstatus und dem peripheren Widerstand des Patienten abhängt.
Bevor allerdings ein Patient an die Herz-Lungen-Maschine angeschlossen werden kann, muss er mit ungefähr 300 I.E./kgKG voll-heparinisiert werden, damit das Blut während der extrakorporalen Zirkulation nicht koaguliert. Nachdem ein Patient von der Maschine entwöhnt worden ist, muss dieser Heparineffekt wieder antagonisiert werden.
Die Verwendung der HLM kann zu verschiedenen Nebeneffekten bzw. Komplikationen führen. Dazu zählt das „systemic inflammatory response syndrome“ oder kurz SIRS. Hierbei handelt es sich um eine generalisierte Entzündungsreaktion des Körpers. Im Gegensatz zur Sepsis ist dieses nicht mikrobiell induziert, kann aber letal enden. Ebenso wird der Einsatz der Herz-Lungen-Maschine für postoperative Einschränkungen der pulmonalen und renalen Funktion verantwortlich gemacht [19].
Weitere wichtige Komplikationen bilden die postoperativen schwerwiegenden neurologischen Veränderungen der Patienten wie Schlaganfälle und hirnorganische Psychosyndrome. Diese treten nach Bypassoperationen mit Einsatz der HLM in einer Inzidenz von 0.8-5.2% [9,14,26,49,63,65,74] auf, je nach dem präoperativen Risikoprofil des Patienten. Durch Operationen mit Anwendung der HLM wird insgesamt, wenn alle neurologischen Vorkommnisse, wie kognitive Defekte oder Enzephalopathien betrachtet werden, die Inzidenz einer temporären neurologischen Morbidität bis zu 80% der Patienten beschrieben [10,69].
In der Literatur wurde von Mikroembolien als ungewollter Komplikation des kardiopulmonalen Bypasses berichtet [21], welche als Verursacher der neurologischen Ausfälle angesehen werden. Obwohl die Kanülierung, die für die HLM notwendig ist, als Embolusquelle zählt, konnte auch gezeigt werden, dass die Herz-Lungen-Maschine als solche eine signifikante Anzahl Mikroembolien produziert [10]. Dieses wird vorwiegend auf den Kontakt des Blutes mit den Kunststoffmaterialien der HLM in Zusammenhang gebracht.

Koronare Bypass Operation in OPCAB Technik

Die koronare Bypassoperation in der OPCAB Technik erfolgt in der Regel über eine mediane Sternotomie. Nachdem zumeist die linke Arteria mammaria präpariert worden ist, wird der Stabilisator, der Octopus, auf das Herz aufgebracht (Abb.1). Damit wird der Teil des Myokards stabilisiert, an dem die Bypassanastomose genäht werden soll. Daraufhin wird zeitweilig der koronare Blutstrom vollständig unterbunden, um mikrochirurgisch die Anastomose zu schaffen. Während einer OPCAB Operation wird der Patient in der Regel nur mit 100 I.E /kgKG i.v. heparinisiert.

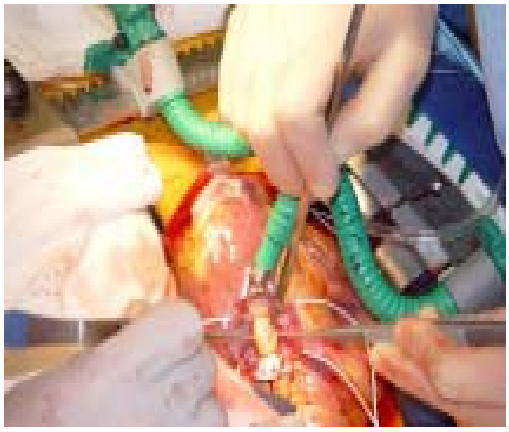


Abbildung 1: Der Stabilisator (Octopus) intraoperativ bei OPCAB auf das Myokard aufgebracht

Diese Operationstechnik zeichnet sich in mehrfacher Hinsicht gegenüber der unter Einsatz der HLM positiv aus. Dazu gehört, dass durch den Verzicht auf die HLM die dadurch induzierte Aktivierung des Komplementsystems und das SIRS erheblich reduziert werden kann [4,8].
In der Frage der Morbidität und Mortalität zeigt sich der deutlichste Vorteil des OPCAB darin, dass neuropsychologische Veränderungen im Vergleich zu Bypassoperationen unter Einsatz der HLM signifikant seltener auftraten. Verschiedene Studien belegen, dass es in weniger als 1% der Fälle zu schwerwiegenden neurologischen Defiziten, wie Schlaganfällen oder Komata, kommt [35,43,73]. Vorteile des OPCAB ergeben sich allerdings nicht nur aufgrund des Verzichts der HLM. Obwohl während der Operation kurzfristige lokale koronararterielle

Ischämien durch die Unterbindung des Blutflusses vorkommen, wird die potentielle globale Ischämie des gesamten Herzens während des Einsatzes der Herz-Lungen-Maschine vermieden. In einer Studie, in welcher die Troponin-Werte während beider Operationsformen bestimmt wurden, konnte nachgewiesen werden, dass die OPCAB Technik mit signifikant geringerer Erhöhung des Troponins einhergeht und somit eine geringere myokardiale Schädigung besteht [3,42,80].

Außerdem konnte gezeigt werden, dass weniger positiv inotrope Medikamente intraoperativ benötigt wurden und es in weniger Fällen zu einem Vorhofflimmern kam. Des weiteren musste perioperativ sowohl weniger häufig das Herz mit einem Schrittmacher stimuliert [43,73] als auch seltener Blut transfundiert werden [76]. Zusätzlich verkürzten sich die Nachbeatmungszeit und die Hospitalisierungsdauer der Patienten [23].

Allerdings bringt auch diese Methode der Bypass Operation spezifische Komplikationen mit sich. Ein besonders kritischer Zeitpunkt im Verlauf des Eingriffs liegt während der temporären Myokardischämie. Hierbei wird analog zu einem primären Herzinfarkt der Blutfluss vollständig in einer Koronararterie aufgehoben, um die Gefäßanastomose zu schaffen. Während der Naht der Anastomose gibt es keine Möglichkeit, die temporäre Myokardischämie wieder aufzuheben. Die Unterbrechung der Koronardurchblutung kann klinisch völlig problemlos ablaufen, aber auch zu einer sehr ernsthaften Beeinträchtigung der Herztätigkeit sowie Herzrhythmusstörungen führen und letal enden.

Weitere kurzfristige und plötzliche, ausgeprägte Veränderungen der Hämodynamik können auch durch anderweitige chirurgische Manipulationen ausgelöst werden. Dazu zählen die Luxation des Herzens aus der anatomischen Ebene und das Aufbringen der Stabilisatoren. Darunter kann sich das Herz nicht mehr vollständig diastolisch füllen und somit wird das potentielle Schlagvolumen deutlich herabgesetzt.

Als besonders wichtig ist zu beachten, dass es sich bei den Patienten, die sich einer off-pump aortokoronaren Bypassoperation unterziehen, um kardial vorgeschädigte und multimorbide Patienten handelt. Diese weisen zum Teil mehrere Kontraindikationen für den Einsatz der HLM auf. Dazu zählen insbesondere vaskuläre Vorerkrankungen, wie ischämische Insulte und Niereninsuffizienz. Gerade bei diesen Patienten, die ein hohes Risikoprofil aufweisen, kann es zu

intraoperativen Zwischenfällen kommen, die schnellstmöglich zu therapieren sind.
Das OPCAB-Verfahren setzt daher ein möglichst kontinuierliches und engmaschiges hämodynamisches Monitoring voraus, welches ein sofortiges Einleiten von Maßnahmen zur hämodynamischen Stabilisierung ermöglicht.

Hämodynamisches Monitoring während Herzoperationen

Das Standardmonitoring während einer Herzoperation besteht in der Regel in einer sowohl invasiven als auch nicht invasiven Blutdruckmessung und der Überwachung des zentralvenösen Drucks. Außerdem wird ein 12-Kanal EKG abgeleitet und mit dem Pulsoxymeter die Sauerstoffsättigung des Blutes bestimmt.
Darüber hinaus relevant sind Parameter, die direkte Aussagen über die kardiale Funktion zulassen. Besonders wichtig ist dieses bei den off-pump Verfahren. Hier wird, wie oben beschrieben, intraoperativ eine Ligatur einer Koronararterie durchgeführt. Dieses kann durch massive Herzrhythmusstörungen oder ein direktes Pumpversagen des Herzens zu einem kardiogenen Schock mit Multiorganversagen führen. Dieser Umstand macht die Notwendigkeit eines zeitnahen Monitorings deutlich. Dazu gehören sowohl die Kenntnis der kardialen Vorlast als auch in erster Linie die des Herzzeitvolumens.
Bisher galt dazu die Anwendung des Pulmonaliskatheters als Standardverfahren. Allerdings gibt es die Möglichkeit, das Herzzeitvolumen auch mit anderen Methoden zu bestimmen. Dazu zählen die Messung des HZV anhand der Pulskonturanalyse und der transösophagealen Echokardiographie (TEE).

Pulmonaliskatheter

Bisher galt die Bestimmung des Herzzeitvolumens anhand des Pulmonaliskatheters als Goldstandardverfahren [62]. Das Prinzip beruht auf der 1870 von *Fick* aufgestellten Theorie der Indikatorverdünnung. Als Indikator diente hierbei der Sauerstoffverbrauch [31]. Zunächst konnte mit dem Pulmonaliskatheter nur diskontinuierlich das HZV mit Hilfe von Bolusinjektionen gemessen werden. Eine Weiterentwicklung ermöglicht allerdings auch eine kontinuierliche Erfassung. Auf dem Fickschen Prinzip beruhend werden hier als Indikator dauernd abgegebene

Hitzeimpulse verwendet, die dann über eine modifizierte Stewart-Hamilton Gleichung eine Bestimmung des Herzzeitvolumens zulassen. Außerdem verfügt der Pulmonaliskatheter über einen Druckaufnehmer. Darüber werden der pulmonalarterielle Druck sowie der kapilläre Verschlussdruck (Wedge-Druck) gemessen.
Der Pulmonaliskatheter ist allerdings schon seit langer Zeit Gegenstand kontroverser Diskussionen. In einer ausgedehnten Studie wurde herausgefunden, dass dieser die Mortalität, den Krankenhausaufenthalt des Patienten und die Kosten erhöht [15].
In der Literatur werden immer wieder ernsthafte Zwischenfälle beschrieben, wie die Perforation des rechten Ventrikels [40], Pneumothorax, Supraventrikuläre- und Ventrikuläre Herzrhythmusstörungen, Schenkelblöcke, Knotenbildung des Katheters intravasal oder intracardial, Klappenschädigungen, Pulmonalarterienrupturen, Infektionen, Endokarditis, Kathetersepsis und Thrombenbildung [71,86,88].
Daher stellt sich die Frage, ob es nicht möglich wäre, dieses invasive Monitoring durch eine nichtinvasive oder komplikationsärmere Alternative, den Patienten weniger belastendes und schonenderes Verfahren zu ersetzen.

Pulskonturanalyse

Es handelt sich hier um eine weitere Methode der Herzzeitvolumenmessung, die auf dem Fickschen Prinzip beruht. Als Indikator dient hier ein in den ZVK applizierter Kältebolus, der nach Herz- und Lungenpassage in einer peripheren Arterie detektiert wird. Dazu werden ein zentraler Venenkatheter, dem ein Injektatsensorgehäuse zwischengeschaltet wird, und ein arterieller PiCCO-Katheter (**p**uls **c**ontour **c**ardiac **o**utput), mit einem eingebauten Thermistor, benötigt. Sowohl ein zentraler Venenkatheter als auch ein arterieller Katheter gehören zum Standardmonitoring jeder Herzoperation. Daraus ergibt sich der Vorteil dieser Methode, dass zur Herzzeitvolumenmessung keine weiteren, den Patienten belastenden und komplikationsträchtigen Zugänge notwendig werden.
Des weiteren lassen sich anhand der Thermodilutionsmessungen Aussagen zur Vorlast des Herzen und somit indirekt auch zum Pumpvermögen des Herzens machen.

Transösophageale Echokardiographie

Die dritte Methode, die in dieser Studie betrachtet wird, ist die HZV Bestimmung durch die transösophageale Echokardiographie (TEE). Dabei wird die Flussgeschwindigkeit des Blutes über der Aortenklappe gemessen und darüber das Herzzeitvolumen ermittelt [17].
Der Vorteil dieser Methode ist darin zu sehen, dass sie eine sehr geringe Komplikationsrate aufweist [19]. Trotzdem lässt sie eine kontinuierliche Überwachung des anästhesierten Patienten und dessen Herzzeitvolumen zu [17,88]. Außerdem können direkte Aussagen zu der Kontraktilität der Ventrikel und Wandbewegungsstörungen getroffen werden.
Allerdings ist hinzuzufügen, dass der Nachteil bei diesem Verfahren darin liegt, dass die Interpretation der Ergebnisse vom Erfahrungsstand des Untersuchers abhängt. Außerdem ist der Einsatz dieser Technik zum Teil auch dadurch eingeschränkt, dass zum Beispiel durch Aortenvitien oder Cardiomyopathien Untersuchungsergebnisse verfälscht werden können [83].

Fragestellung

Studien, in welchen die Aussagekraft der Herzzeitvolumenmessungen durch die transpulmonale Thermodilution mit dem PiCCO oder anhand des TEE evaluiert wurde, befanden diese als geeignete Alternativen zum bisher eingesetzten Pulmonaliskatheter [17,57]. Die Untersuchungen fanden allerdings meist bei Intensivpatienten oder während einer Herzoperation unter Einsatz der HLM statt. Daher ist bisher unklar, welche Relevanz diese unter den Bedingungen eines OPCAB haben. Es stellt sich die Frage, ob diese Alternativen in der Lage sind, den invasiven Pulmonaliskatheter während eines OPCAB zu ersetzen. Dazu müssen diese eine geeignete Methode darstellen, plötzliche hämodynamische Veränderungen zeitnah zu erfassen, um so eine schnellstmögliche anästhesiologische oder operative Therapie einzuleiten.
Das Ziel dieser Studie sollte sein, die Zuverlässigkeit des PiCCO und des TEE während eines OPCAB zu evaluieren. Als zentraler Parameter wurde dafür die Bestimmung des Herzzeitvolumens herangezogen. Ebenso soll in dieser Studie auf die Vorlastparameter eingegangen werden, da die Kenntnis dieser für eine

adäquate Volumentherapie von Bedeutung ist. Dazu wurden anhand des Pulmonaliskatheters, des PiCCO und des TEE zeitgleiche Messungen sowohl des Herzzeitvolumens als auch des Wedge-Drucks, zentralen Venendrucks und intrathorakalen Blutvolumens an definierten Zeitpunkten intraoperativ vorgenommen.

Die Ergebnisse und Auswertungen der drei verschiedenen Messmethoden sollen fundierte Aussagen über die Zuverlässigkeit der intraoperativen Überwachung ermöglichen.

Bei der Interpretation der Werte steht im Mittelpunkt der Überlegung, ob durch gesichertes Monitoring der weniger invasiven Überwachungsmethoden, des PiCCO in Kombination mit dem TEE, eine sichere hämodynamische Kontrolle des Patienten gewährleistet werden kann.

Somit stellt sich die Frage, ob auf den invasiven Pulmonaliskatheter als Monitoring bei einer OPCAB Operation verzichtet werden könnte, wenn sich die Alternativmethoden TEE und PiCCO diesem gegenüber als überlegen herausstellen sollten.

2. Patienten und Methoden

2.1 Patienten

Nach Einverständnis der örtlichen Ethikkommission und schriftlicher Einwilligung der Patienten, wurden in der Zeit von Juli 2002 bis September 2003 insgesamt 20 Patienten in die Studie aufgenommen (Tab.1). Davon waren 15 männlich und 5 weiblich. Das Alter lag zwischen 46 und 78, im Mittel bei 62±8 Jahren. Präoperativ lagen das Gewicht bei 84±15 kg und die Größe bei 174±10cm.

Tabelle 1: Patientenkollektiv

Patient	Alter	Diagnose	OP
1	56	KHK, 40-50% Hauptstammstenose	LIMA-LAD
2	70	Z.n. 3fach ACB, Z.n. PTCA	A.gastroepiploica- RCA
3	62	2 Gefäßerkrankung	LIMA-LAD
4	70	Instabile Angina Pectoris	LIMA-LAD
5	61	Z.n. Stent, 3 Gefäßerkrankung	LIMA-LAD
6	67	3 Gefäßerkrankung	LIMA-LAD
7	55	1 Gefäßerkrankung	LIMA-LAD
8	66	3 Gefäßerkrankung	LIMA-LAD
9	76	Z.n. Stent 3 Gefäßerkrankung	LIMA-LAD
10	61	1 Gefäßerkrankung	LIMA-LAD
11	69	3 Gefäßerkrankung	LIMA-LAD
12	75	1 Gefäßerkrankung	LIMA-LAD
13	67	KHK, Z.n. ACB	LIMA-LAD
14	49	KHK, Z.n. Stent	LIMA-LAD
15	46	KHK Hauptstammstenose	LIMA-LAD
16	53	2 Gefäßerkrankung	LIMA-LAD
17	78	3 Gefäßerkrankung, Z.n. 4fach ACB	LIMA-LAD
18	53	1 Gefäßerkrankung	LIMA-LAD
19	59	2 Gefäßerkrankung	A.radialis-RCA
20	51	2 Gefäßerkrankung, Z.n. PTCA	LIMA-LAD

LIMA = linke Arteria mammaria interna
LAD = linke anteriore descendierende Koronararterie
RCA = rechte Koronararterie
PTCA = perkutane transluminale coronare Angioplastie
ACB = aorto coronarer Bypass

2.1.1 Indikation und Einschlusskriterien

Eingeschlossen in die prospektive Studie wurden alle Patienten, bei denen eine elektive Bypass-Operation in OPCAB-Technik geplant war. Voraussetzung war die Einwilligung der Patienten, sowie ein Alter von über 18 Jahren.

2.1.2 Kontraindikation und Ausschlusskriterien

Ausgeschlossen von der Studie wurden Patienten, die ein operativ zu versorgendes Shuntvitium hatten. Außerdem wurden Patienten unter 18 oder über 80 Jahren nicht mit in die Datenerhebung aufgenommen. Schwangere oder Notfall Operationen waren zudem ausgeschlossen. Des Weiteren waren eine Sepsis oder schwerwiegende Infektionen ein Ausschlusskriterium für die vorliegende Studie.
Patienten, bei denen es während der Operation zu einem Einsatz der Herz-Lungen-Maschine kam, wurden von der Studie ausgeschlossen. Patienten mit einer speziellen Kontraindikation gegen den Einsatz des TEE, z.B. einem Zenkerdivertikel, wurden ebenfalls ausgeschlossen.

2.2 Anästhesie

Die Patienten wurden am Vorabend der Operation prämediziert mit Flurazepam (Dalmadorm®, ICN, Frankfurt/Main), am Operationstag mit Midazolam (Dormicum®, Roche, Grenzach-Wyhlen), und Clonidin (Clonidin-ratiopharm®, Ratiopharm, Ulm/ Donautal).

In der Einleitungseinheit erhielt der Patient, wie bei jeder anderen Herzoperation auch, zunächst ein nicht-invasives Monitoring:

- 12-Kanal EKG
- pulsoximetrische Sauerstoffsättigungsmessung
- nicht-invasive Blutdruckmessung

Anschließend wurde ein PiCCO - Kathether in die A. femoralis in Lokalanästhesie und unter sterilen Bedingungen zur invasiven Blutdrucküberwachung und transpulmonalen Thermodilutionsmessungen gelegt. Als arteriellen Zugang wurde ein PiCCO-Katheter (Kit PV 2015L13, Firma Pulsion) mit eingebautem Thermistor und einem Lumen für die arterielle Blutdruckmessung benutzt. Der Katheter hat eine Lumengröße von 5F und ist 13 cm lang.

Gelegt wurde dieser in Seldinger Technik und die Lage in der Arteria femoralis anhand der arteriellen Druckkurve kontrolliert. Das zur Druckmessung angewandte PiCCO Monitoring Kit PV 8015 setzt sich aus einem Infusionssystem, einem Druckaufnehmer, einer 150 cm langen Druckleitung und einer Spülvorrichtung zusammen. Nach dem Anlegen eines Druckbeutels, der Entlüftung des Systems und dem Verbinden der Druckleitung an den Katheter, wurden Thermistor und Druckaufnehmer mit dem PiCCO Gerät über das entsprechende Kabel verbunden.

Die Druckaufnehmer der Systeme wurden am Kopfteil des Operationstisches an einer dafür bestimmten Halterung auf Höhe des rechten Vorhofs angebracht.

Zu Beginn der Messungen wurden Patientendaten wie die Identifikationsnummer, Größe, Gewicht, und die jeweilige Katheterart in die Überwachungsgeräte eingegeben. Das PiCCO Gerät erforderte außerdem noch die Eingabe des Injektatvolumens von 20 ml sowie des zentralen Venendrucks.

Die für die Thermodilution nötige 0,9% NaCl Lösung war in einer Metallbox, die mit Eis gefüllt war, kalt zu stellen, um die optimale Temperatur des Injektats zu sichern. Dieses erfolgte mindestens eine halbe Stunde vor der ersten Messung, um die erwünschte Temperatur sicherzustellen.

Nach ausreichender Präoxigenierung des Patienten wurde die Allgemeinanästhesie mit Sufentanil (Sufenta®, Janssen- Cilag, Neuss), Etomidat (Etomidat®-Lipuro, BBraun, Melsungen) und Pancuronium (Pancuronium-rathiopharm®, Ratiopharm, Ulm/ Donautal) eingeleitet und der Patient oral intubiert. Aufrechterhalten wurde die Anästhesie mit Sufentanil (Sufenta®,

Janssen-Cilag, Neuss), Pancuronium (Pancuronium-rathiopharm®, Ratiopharm, Ulm/ Donautal) und Propofol 2% (Disoprivan2%®, Astra-Zeneca, Wedel). Bei allen Patienten wurde eine Intubationsnarkose durchgeführt. Die Beatmung erfolgte in einem druckregulierten Modus mit einem Tidalvolumen von ungefähr 10 ml pro Kilogramm Körpergewicht, einem positiven endexpiratorischem Beatmungsdruck von 5 mmHg und einem FiO_2 von 1.0 in der Narkoseeinleitung und 0,4 intraoperativ .

Nach der Intubation wurde, wie bei Herzoperationen üblich, ein 3-lumiger zentralvenöser Katheter der Firma B Braun mit der Lumengröße 7F in Seldinger Technik in die Vena jugularis interna eingebracht. Nach dem Entlüften der Leitungen wurde der Katheter mit dem unten beschriebenen Druckaufnehmer verbunden. An dem proximalen Schenkel des ZVK wurde ein für die Thermodilution vorgesehenes Injektatsensorgehäuse (aus dem PiCCO Monitoring Kit PV 8015) hinter den Dreiwegehahn zum Einspritzen des Kältebolus geschaltet. Dieser Injektatsensor war anhand des dafür vorgesehenen Kabels an das PiCCO Gerät anzuschließen. Sowohl für die zentralvenöse und arterielle als auch die unten beschriebene pulmonalarterielle Druckmessung, wurde das medex medical DPS Dreifach Druckmesssystem mit Spülsystem der Firma B Braun verwendet. Das System wurde mit 250 ml einer NaCl 0,9% (250 ml NaCl Beutel der Firma Baxter) über einen Druckbeutel gespült. Zunächst wurden das System, die Tropfkammer und der Schlauch, sowie die drei Leitungen für die zentralvenöse, pulmonalarterielle und die arterielle Druckmessung jedoch erst vollständig entlüftet und der Druckbeutel auf einen Druck von 300 mmHg aufgepumpt. Dann konnte es an die Katheter angeschlossen werden. Im Anschluss daran wurden die Druckwerte nach Kalibration auf dem Monitor abgelesen.

Als erweiterte Maßnahme kam in dieser Studie der Einsatz eines Pulmonaliskatheters hinzu. Das Einbringen des Pulmonaliskatheters zur kontinuierlichen Bestimmung des Herzzeitvolumens (vier Lumina, 7,5F Swan Ganz CCOmbo/ SvO_2 Thermodilutionskatheter, Edwards Lifesciences) erfolgte mit Hilfe einer 8F Schleuse (Intradyn, B Braun Medical) in die Vena jugularis interna (Abb.2). Die richtige Platzierung des Katheters wurde anhand der Druckkurve überprüft.

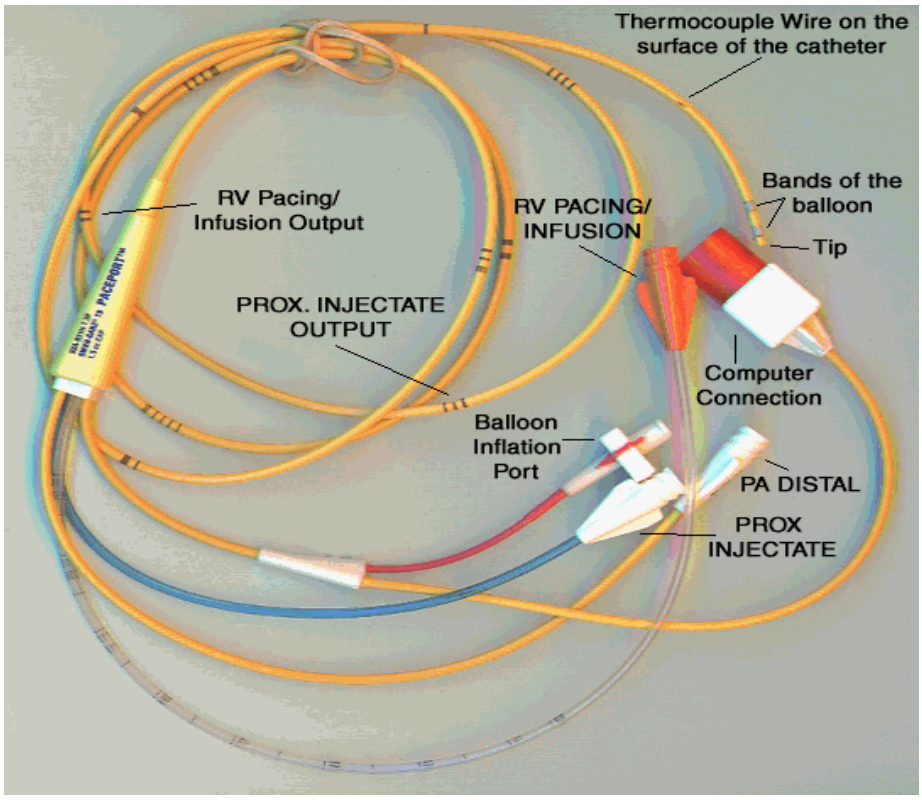


Abbildung 2: Swan- Ganz Katheter

PA = Pulmonalarterie

RV = rechter Ventrikel

Zur Bestimmung des Herzzeitvolumens anhand der transösophagealen Echokardiographie bekam der Patient in der Einleitungseinheit eine Ultraschallsonde (Agilent Schallopf Modell 21364A, 5,0-3,4 MHz) durch den zuständigen Anästhesisten gelegt. Um eine bessere Bildqualität zu erreichen, wurde ein Ultraschallgel verwendet (Endopurin Olympus Optical). Der Schallkopf wurde im Operationssaal mit dem Philips Sonos 5500 verbunden. Zur Dokumentation erfolgte ein Videomitschnitt jeder Messung.

OPCAB Operationen sollen an einem normothermen Patienten durchgeführt werden. Dazu wurden die Patienten auf einer Wärmematte platziert, sowie erwärmte Infusionen verwendet.

Die Patienten wurden unter der Operation mit 100 I.E. i.v. / kg KG heparinisiert und mit 50 I.E. i.v./ kgKG Protamin im Anschluß wiederum antagonisiert.

Operativer Ablauf

Bei einer Bypass-Operation in der OPCAB Technik erfolgt der Zugang zunächst über eine mediane Sternotomie. Anschließend erfolgt die Präparation der linken Arteria mammaria interna und des stenosierten Coronargefässes. Daraufhin wird ein sog. Octopus auf das Herz aufgebracht, der den Teil des Myokards stabilisieren soll, auf welchen die Anastomose aufgenäht werden soll. Steht nun das Myokard lokal still, wird anhand einer Ligatur der coronare Blutfluss des stenosierten Gefäßes unterbunden und die beiden präparierten Arterien anhand einer Naht miteinander anastomosiert. Anschließend wird der Blutfluss wieder freigegeben. Bei ausreichendem coronaren Fluss kann der Thorax wieder verschlossen und die Operation beendet werden.

2.3 Methodische Grundlagen zur Bestimmung des Herzzeitvolumens

Berechnung des Herzzeitvolumens anhand Thermodilution mit dem PiCCO

Bei den Thermodilutionsverfahren wird das Herzzeitvolumen über das Ficksche Prinzip kalkuliert. Dieses besagt, dass ein nicht bekanntes Volumen in einem Hohlkörper bestimmt werden kann, indem man ein um ein vielfach geringeres Indikatorvolumen hinzufügt. Dieses lässt sich über die untenstehende Formel kalkulieren (Gleichung 1). Dabei gilt als Voraussetzung die Konstanz beider Größen [31].

Gleichung 1:

$$Q = I / {}^{*}tCi$$

Q = Fluss (Volumen/Zeit)
I = bestimmte Menge eines Indikators
t = Zeit
Ci = Konzentration des Indikators nach Einfügen in das Volumen

Nach dem Einbringen des Indikators in den Kreislauf und dem Messen der Konzentration stromabwärts, entsteht am Ort der Detektion eine Konzentrationskurve.
Das Volumen, das diese Messstelle in einer bestimmten Zeit passiert hat, kann mit der Steward-Hamilton-Gleichung über das Integral aus der Fläche unter der Indikatorkurve bestimmt werden (Gleichung 2). Hierbei verhält sich das ermittelte Volumen umgekehrt proportional zu der Fläche unter der Kurve [52].

Gleichung 2:

$$Q=I/\int \Delta Ci*dt$$

$\Delta Ci*dt$ = Änderung der Indikatorkurve als Funktion der Zeit

Für die hier beschriebene Thermodilution werden 20ml einer gekühlten physiologischen Kochsalzlösung als Bolus injiziert. Nach der zentralvenösen Injektion des Kältebolus vermischt sich der Indikator mit dem enddiastolischen Volumen des rechten Vorhofs. Eine weitere Verdünnung findet dann im rechten Ventrikel statt, bevor die Kältewelle mit dem Auswurf des rechten Ventrikels weiter transportiert wird. Bei der transpulmonalen Thermodilution durchläuft der Indikator nun noch die Arteria pulmonalis und das linke Herz. Das daraufhin bestimmte Herzzeitvolumen entspricht dem Volumen des linken Ventrikels.
Die Berechnung des Herzzeitvolumens ist für jegliche Art der Thermodilution gleich (Gleichung 3):

Gleichung 3:

$$HZV=Vi*(Tb-Ti)*K1*K2/\int \Delta Tb*dt$$

HZV= Herzzeitvolumen
Vi = Injektatvolumen
Tb = Bluttemperatur
Ti = Injektattemperatur
$\Delta Tb*dt$ = Änderung der Bluttemperatur als Funktion der Zeit

K1 = Dichtefaktor

K2 = Berechnungsfaktor [44,52]

Um den Anteil der Rezirkulation bei der Berechnung unter der Fläche der Indikatorverdünnungskurve auszuschließen, nimmt man zur Berechnung des Integrals eine lineare Extrapolation des absteigenden Schenkels der Indikatorkurve auf die Nulllinie vor [31,57].

Im Unterschied zu der herkömmlichen pulmonalarteriellen Thermodilution, bei der nach zentralvenöser Kältebolusapplikation die Indikatorkonzentration in der Arteria pulmonalis gemessen wird (untere Kurve), erscheint die Indikatorkurve der transpulmonalen Thermodilution etwas verspätet, verläuft etwas flacher und protrahierter (obere Kurve) (Abb. 3).

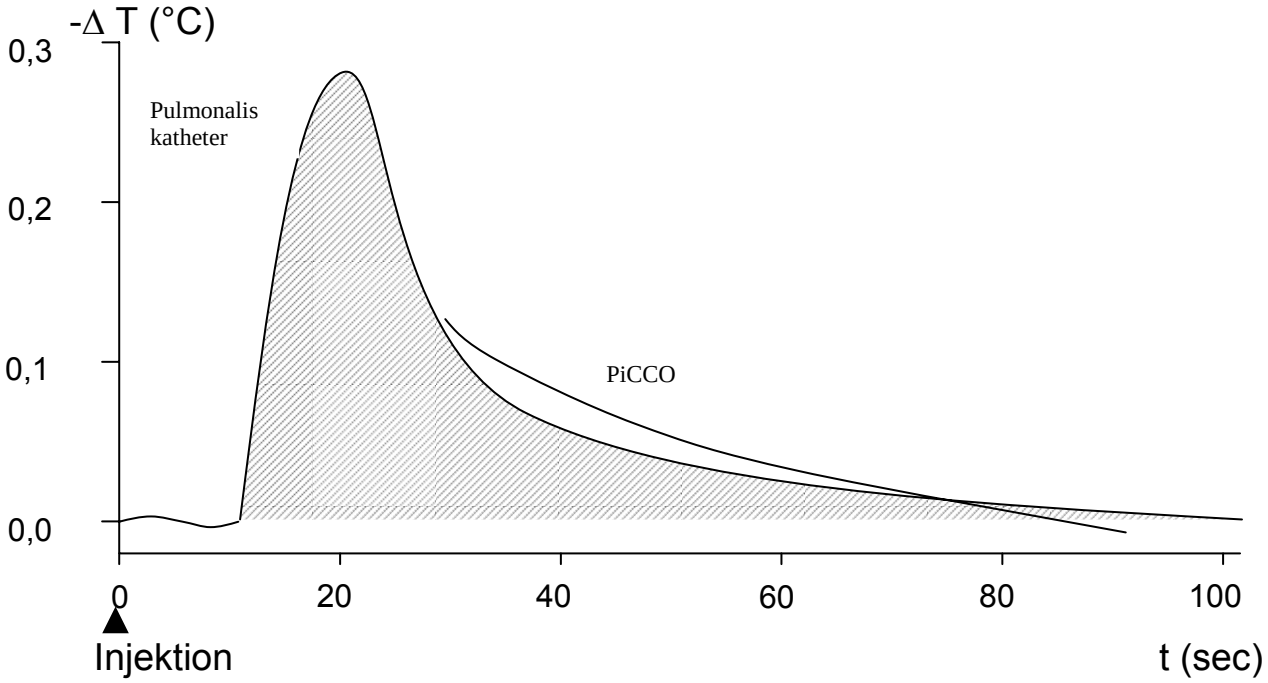


Abbildung 3: Thermodilutionskurven der transpulmonalen und der pulmonalarteriellen Thermodilution.

Die während eines Atemzyklus entstehenden Schwankungen des Herzzeitvolumens werden bei der transpulmonalen Messung durch die weitere Mess-

strecke, und der dadurch höheren Durchmischung, gemittelt und sind somit eine geringe Fehlerquelle für die Bestimmung des Herzzeitvolumens [72].

Intrathorakale Volumina

Anhand der transpulmonalen Thermodilution kann außer der Bestimmung des Herzzeitvolumens noch eine Zahl an intrathorakalen Volumina bestimmt werden. Hierzu wird die Indikatorverdünnungkurve in verschiedene Zeitabschnitte gegliedert.
Die Abbildung 4 zeigt eine Indikatorkurve der transpulmonalen Thermodilution in linearer Aufzeichnung (oben) und semilogarithmischer Skala (unten).

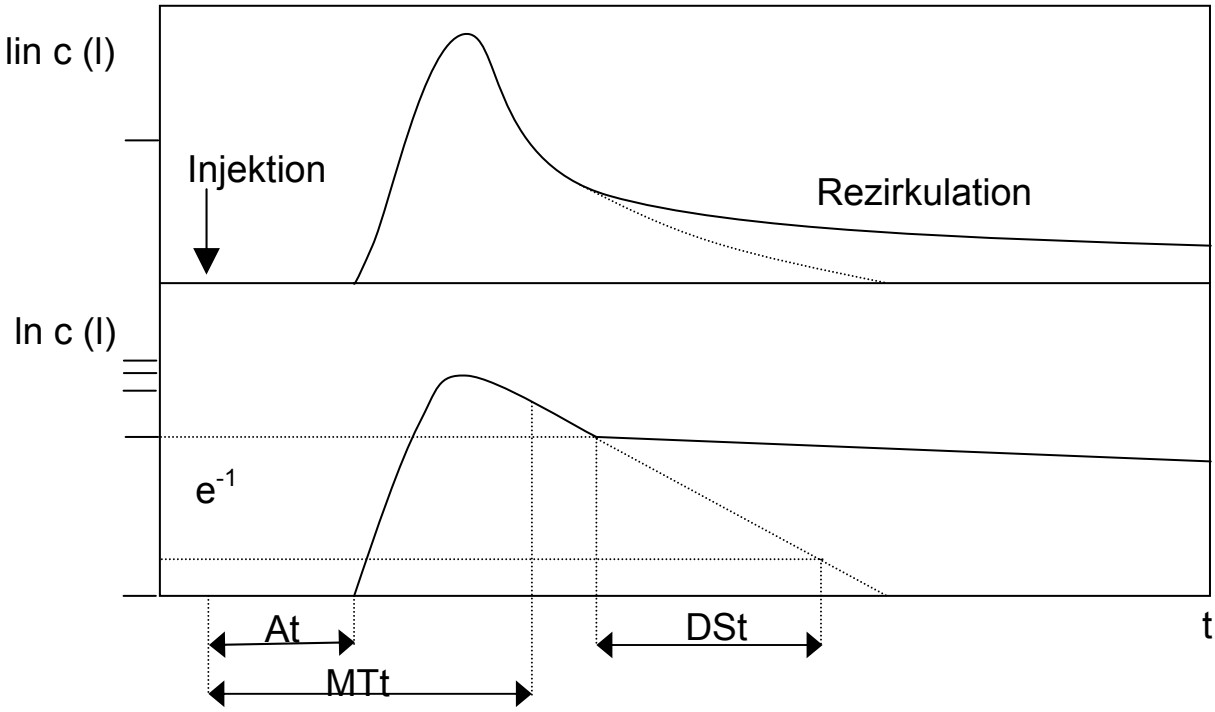


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Dilutionskurve

At = die Erscheinungszeit des Indikators nach der Injektion
MTt = die mittlere Durchgangszeit, also der Mittelwert der Zeit, in welcher alle Indikatorteile vom Injektionsort zum Detektionsort gelangen

DSt = die exponentielle Abfallzeit entspricht dem Volumen der größten Mischkammer gleich (der Lunge), aus der der Indikator verspätet beziehungsweise nur sehr langsam den Ort der Messung erreicht.

Das von dem Indikator durchlaufene Volumen kann, wie in Gleichung 4 dargestellt, berechnet werden. Die Herleitung dieser und folgender Formeln findet sich ausführlich in [6,57,59].

Gleichung 4:

$$V=Q*MTt$$

V = Volumen
Q = Fluss
MTt = mittlere Durchgangszeit

Der Fluss Q stimmt hierbei mit dem Herzzeitvolumen überein. Bei der Verwendung eines Kältebolus als Indikator entspricht das Thermovolumen des gesamten Thorax daher dem Produkt aus Herzzeitvolumen und der mittleren Durchgangszeit (Gleichung 5).

Gleichung 5:

$$ITTV=HZV*MTt$$

ITTV = intrathorakales Thermovolumen

Das pulmonale Thermovolumen ist das Produkt aus Herzzeitvolumen und der exponentiellen Abfallszeit (Gleichung 6).

Gleichung 6:

$$PTV=HZV*DSt$$

PTV = pulmonales Thermovolumen
DSt = exponentielle Abfallszeit

ITTV und PTV bieten die Basis für die weitere Berechnung von intrathorakalen Volumina.
Das globale enddiastolische Volumen bezeichnet die Menge Blut, die sich am Ende der Diastole in allen vier Herzhöhlen befindet. Es entspricht damit dem Vorlastvolumen des gesamten Herzens [24] (Gleichung 7).

Gleichung 7:

$$GEDV=ITTV-PTV$$

GEDV = globales enddiastolisches Volumen

Das intrathorakale Blutvolumen, welches ebenfalls als aussagekräftiges Vorlastparameter gilt [46], wird üblicherweise anhand der Thermo-Dye Methode bestimmt. Es setzt sich zusammen aus dem GEDV und dem pulmonalen Blutvolumen [25,45].
Zwischen dem GEDV und dem intrathorakalen Blutvolumen besteht eine sehr hohe Korrelation, aus welcher eine spezifische Best-Fit-Gleichung abgeleitet werden kann. Hiermit kann das intrathorakale Blutvolumen aus dem GEDV der Thermodilution abgeleitet werden [12,67] (Gleichung 8):

Gleichung 8:

$$ITBV^*=a*GEDV+b$$

ITBV* = abgeschätztes intrathorakales Blutvolumen
a = spezifischer Koeffizient
b = spezifische Konstante

Hiermit ist auch die Kalkulation des extravasalen Lungenwassers, welches mit dem extravasalen Thermovolumen übereinstimmt, durch die transpulmonale Thermodilution möglich (Gleichung 9):

Gleichung 9:

EVLW*=ITTV-ITBV*

EVLW* = abgeschätztes extravasales Lungenwasser

Pulmonaliskatheter

Das Herzzeitvolumen kann, im Gegensatz zu der oben beschriebenen intermittierenden Technik mit einem Kältebolus, auch kontinuierlich mit Hilfe eines dauernden Impulsgebers in Form von Heizimpulsen ermittelt werden. Bei dieser Methode wird das Herzzeitvolumen ebenfalls durch das Prinzip der Thermodilution bestimmt, und kann anhand einer etwas modifizierten Steward-Hamilton-Gleichung berechnet werden (siehe Gleichung 2).
Für diese Bestimmung wird ein Swan-Ganz Katheter, der über ein Heizfilament verfügt, über das rechte Herz in die Pulmonalarterie eingeführt. Hierbei werden kontinuierlich im Abstand von einigen Sekunden kleine Wärmeimpulse in das passierende Blut abgegeben und das vorbeiströmende Blut im rechten Herzen geringfügig erwärmt.
Der Temperaturunterschied wird durch einen weiter distal in der Pulmonalarterie liegenden Thermistor des Pulmonaliskatheters detektiert. Hieraus wird das Herzzeitvolumen berechnet.

Transösophageale Echokardiographie

Anhand der transösophagealen Dopplerechokardiographie ist es nicht nur möglich, den Volumenstatus eines Patienten, oder die Kontraktilität des Myokards zu beurteilen, sondern man hat auch die Möglichkeit, das Herzzeitvolumen des untersuchten Patienten zu bestimmen.

Das Herzzeitvolumen wird berechnet als (Gleichung 10):

Gleichung 10:

$$HZV = HF*V$$

HZV = Herzzeitvolumen
HF = Herzfrequenz
V = Volumen

Die Herzfrequenz kann durch das Standardmonitoring erfasst werden.
Zur Bestimmung des Herzzeitvolumens ist es notwendig, den linksventrikulären Ausflusstrakt des Herzens (LVOT) auszumessen, und das Geschwindigkeits-Zeit-Integral (VTI) über dem linksventrikulären Ausflusstrakt zu bestimmen. Dazu wird in der 2D-Darstellung die proximale Aorta mit der Aortenklappe und dem LVOT des linken Ventrikels aufgesucht. In der Phase der maximalen Klappenöffnung wird der Durchmesser des LVOT gemessen. Zur Bestimmung des Geschwindigkeit-Zeit-Integrals wird ein PW–Dopplerstrahl über den linksventrikulären Ausflusstrakt gelegt. Dieses Signal wird ausgemessen und das VTI dadurch bestimmt.
Anhand dieser erhobenen Parameter, lässt sich das Volumen errechnen (Gleichung11):

Gleichung 11:

$$V=VTI_{pw}*(d/2)^2*\pi$$

V = Volumen
VTI_{pw} = Geschwindigkeit-Zeit-Integral des PW-Dopplers
d = LVOT

Um nun das Herzzeitvolumen nach der obigen Gleichung 10 zu berechnen, werden die einzelnen Variablen eingesetzt (Gleichung 12),

Gleichung 12:

$$HZV = HF*VTI_{pw}*(d/2)^2*\pi.$$

HZV = Herzzeitvolumen
HF= Herzfrequenz
VTI_{pw}= Geschwindigkeit-Zeit-Integral des PW-Dopplers
d=LVOT

2.4 Pulskonturanalyse

Das PiCCO Gerät der Firma Pulsion Medizintechnik, (München) ermöglicht die Messung des Herzzeitvolumens weniger invasiv und kann zusätzlich ein echtes „beat to beat“ Signal mit Hilfe der Pulskonturanalyse ermitteln. Daher stammt auch der Name, PiCCO (**p**uls **c**ontour **c**ardiac **o**utput).
Auf der Vorderseite ist ein LCD Bildschirm zu sehen, der immer das gerade gewählte Programm anzeigt (Abb.5). Unterhalb des Bildschirms befinden sich fünf Funktionstasten. Mit ihnen können von dem Hauptmenü ausgehend verschiedene Konfigurationen und Menüs gewählt und geändert werden. Dazu zählen das Eingabemenü zur Speicherung der Patientendaten, das Konfigurationsmenü zum Einrichten der Darstellungsweise der verschiedenen Parameter, sowie drei weitere Menüs für die transpulmonale Thermodilution, die Pulskonturanalyse und die Kalibrierung der Pulskonturanalyse.

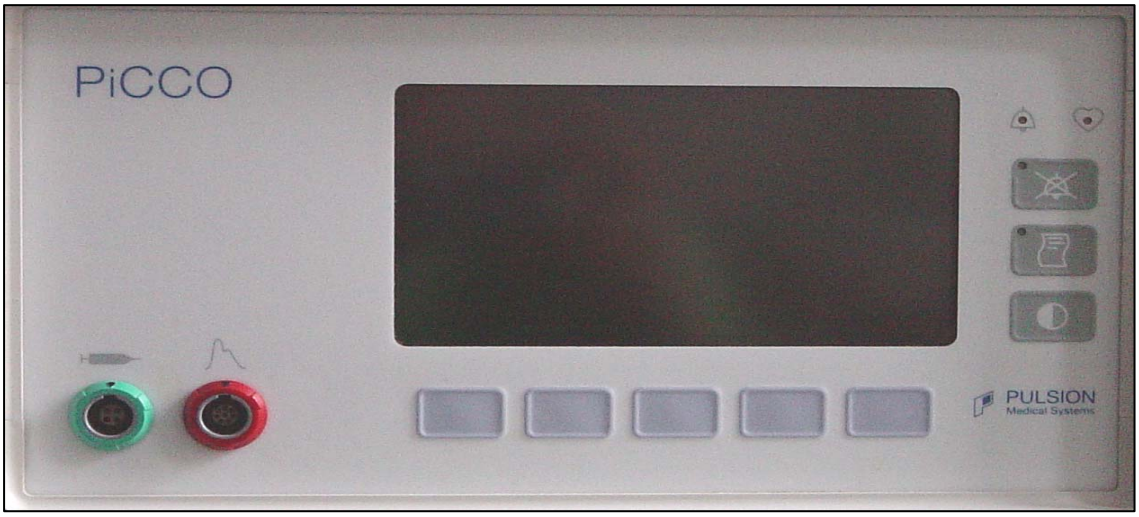


Abbildung 5: PiCCO Gerät

Neben den Funktionstasten befinden sich die Buchsen für das Temperaturkabel und das Kabel zur arteriellen Druckmessung. Dieses zweigt sich y-förmig auf in einen Anschluss für den Druckaufnehmer und einen zweiten für den Thermistor des arteriellen Katheters.
Auf der Rückseite des Gerätes befindet sich der Netzanschluss, der Hauptnetzschalter, ein AUX-Anschluss und eine RS232 Schnittstelle.
Das Gerät bietet außerdem die Möglichkeit, die im Thermodilutionsmenü errechneten Werte zu drucken.

Transpulmonale Thermodilution mit PiCCO

Um eine transpulmonale Thermodilution durchzuführen, werden ein zentralvenöser Zugang, der mit einem Injektatsensor zur Erfassung der Temperatur des Kältebolus ausgestattet sein muss, und ein arterieller Zugang, der einen Thermistor zur Messung der Bluttemperatur aufweist, benötigt (s.o.).
Nach dem Umschalten in das Thermodilutonsmenü am PiCCO Gerät wird der Status „Bereit“ auf dem Bildschirm angezeigt. Durch Starten der Messung beginnt eine Analyse der Basislinie der Bluttemperatur. Ist diese genügend konstant, wechselt der Status von „unstabil“ auf „stabil“, und der Kältebolus kann appliziert werden. Bei richtigem Erkennen der Injektion erscheinen die Statusmeldung „Injektion“, sowie die Injektattemperatur und die Indikatorverdünnungskurve auf dem Bildschirm. Sobald die Messung abgeschlossen ist, werden die Nachricht „Fertig“ und die Ergebnisse der einzelnen Thermodilutionmessung angezeigt. Bei mehreren aufeinander folgenden Messungen ist die letzte Zeile der Anzeige der errechnete Mittelwert der einzelnen Messungen (Abb.6).

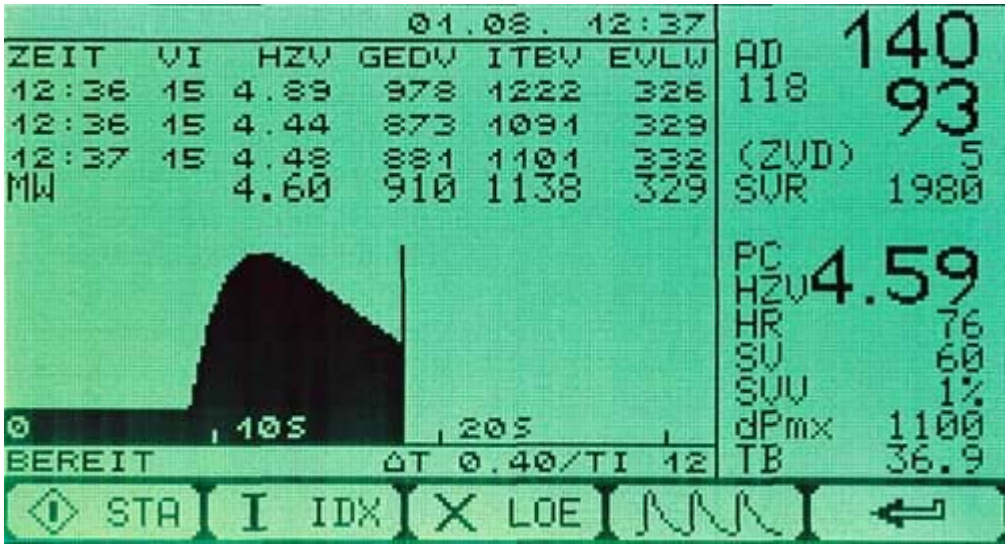


Abbildung 6: Menü der transpulmonalen Thermodilution

Zur Überwachung der Herzfrequenz, des arteriellen Blutdrucks und des kontinuierlichen Herzzeitvolumens ist ein akustischer und optischer Warnhinweis mit verstellbaren Grenzen vorhanden. Im Thermodilutionsmenü werden Instabilitäten bei der Analyse der Basislinie für die Bluttemperatur angezeigt. Dauert eine Messung länger als zwei Minuten, wird diese automatisch abgebrochen. Für den Fall, dass es zu ungültigen Messungen kommt, werden diese mit Sternchen anstelle der sonst angegebenen Messwerte gekennzeichnet.

2.5 Pulmonaliskatheter

Der Pulmonaliskatheter wird an das Gerät Vigilance-Monitor der Edwards Critical–Care Division angeschlossen (Abb.7).
Auf der Vorderseite liegen der Hauptnetzschalter und ein Bildschirm, der jeweils das ausgewählte Programm anzeigt. Auf der rechten Seite des Bildschirms befinden sich fünf Funktionstasten. Anhand dieser ist es möglich, verschiedene Menüs aufzurufen.
Hierzu zählen das Menü der Patientendaten, Einstellung der Alarmfunktion, der Herzzeitvolumen Messung, die Einstellung des Betriebsintervalls, sowie des Menüpunktes, in dem Audio- und Anzeigemerkmale konfiguriert werden können.

Neben den Funktionstasten sind die Buchsen für das optische Modul und den Katheter Anschluss.
Unterhalb des Bildschirms befindet sich eine Balkentaste, anhand derer es möglich ist, numerische Daten einzugeben und den Cursor zu bewegen.

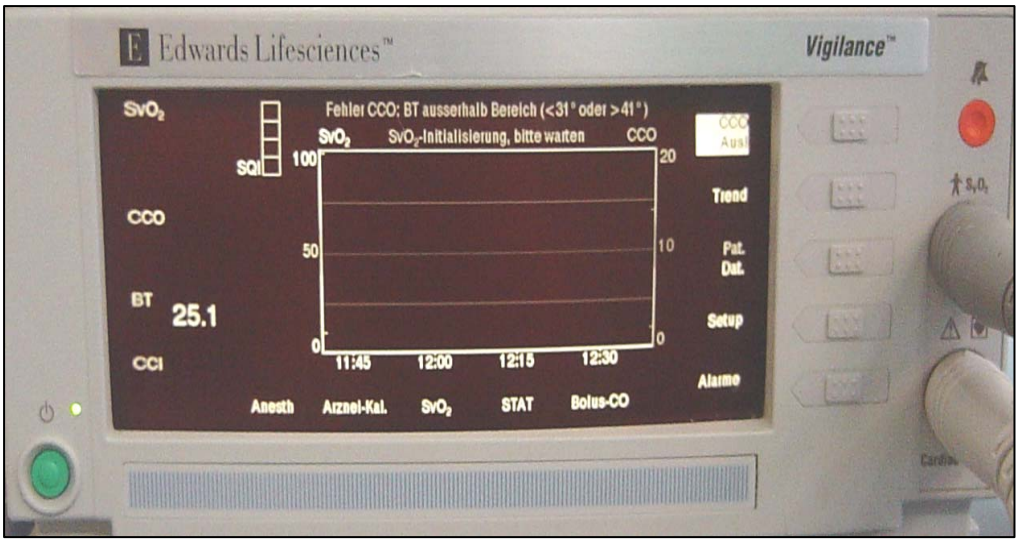


Abbildung 7: Gerät zur kontinuierlichen Bestimmung des Herzzeitvolumens

Auf der Rückseite des Geräts befinden sich der Netzanschluss, zwei Analogeingänge, zwei Analogausgänge und eine RS-232 Schnittstelle.

Kontinuierliche Thermodilution mit dem Pulmonaliskatheter

Der Pulmonalarterienkatheter muss mit einem Heizfilament ausgestattet sein, der kontinuierlich kleine Wärmeimpulse an das zirkulierende Blutvolumen abgibt. Außerdem muss dieser Katheter weiter distal über einen Thermistor verfügen, der die Temperaturunterschiede detektiert.
Nach dem Einschalten des Monitors und der entsprechenden Verbindung des Patienten mit dem Monitor, erscheint die Meldung „Zur CCO-Überwachung CCO drücken“. Danach zeigt das Gerät den Beginn des Messvorgangs zum einen mit der Zustandsanzeige „EIN!“ unter der CCO - Anzeige, und zum anderen mit der Bildschirmmeldung „CCO Datenerfassung“ an. Nach ungefähr drei bis sechs Minuten, wenn genügend Daten gesammelt wurden, erscheint der CCO- Wert links in der Anzeige.

Die CCO - Daten werden außerdem auf den Trendgraphen aufgetragen. Das auf dem Graph blinkende Kästchen stellt den zuletzt gemessenen CCO-Wert dar. Alle 30 bis 60 Sekunden, sobald ein neuer Wert ermittelt wurde, wird die Trendanzeige aktualisiert.

2.6 Transösophageale Echokardiographie

Bei diesem Gerät handelt es sich um das Philips Sonos 5500 Ultraschall Bildverarbeitungssystem, sowie den Philips Schallkopf mit einem Messbereich von 3.4 bis 5.0 MHz.
Auf der Vorderseite des Geräts sind zwei Pultfenster zu sehen. Das rechte Pultfenster ist das Steuerfeld für die Ultraschall Betriebsart, mit dem linken werden seltener verwendete Steuerfelder bedient. Außerdem befinden sich an der vorderen Seite die Tastatur und weitere Bedienungselemente, der Trackball (Kugel), mit dem sich Konturen abfahren lassen und die Platzierung des Dopplerstrahls möglich ist, Regler für die Bildqualität und Tasten für Dokumentation und Bildschleifenfunktion.
Unterhalb der Tastatur ist der Schallkopfanschluss platziert. An der Seite des Gerätes befinden sich ein Videorecorder und der Hauptnetzschalter. Alle Messungen dieser Studie wurden auf Video festgehalten und in einer offline- Analyse ausgewertet.

Abbildung 8: Sonde zur transösophagealen Echokardiographie

Herzzeitvolumenmessung anhand transösophagealer Echokardiographie

Um mit dieser Methode das Herzzeitvolumen zu bestimmen, muss dem Patienten eine Ultraschall–Sonde gelegt werden. Dies geschah in diesem Fall bei den schon anästhesierten, relaxierten und intubierten Patienten. Mit einem Beißschutz wurde die Unversehrtheit der Sonde gewährleistet.
Für die jeweilige Messung wurde der PW–Doppler über dem LVOT auf dem Videoband festgehalten. Auszuwerten war dieser, indem der jeweilige Abschnitt der Aufzeichnung in den Modus „Standbild “ gebracht wurde. Zunächst musste das Bild kalibriert werden, bevor eine Messung möglich ist. Für die Messung wird das Fadenkreuz auf den Beginn der Doppler-Kurve gebracht, welche dann abgefahren wird und das Gerät daraufhin das zugehörige Geschwindigkeit-Zeit-Integral angibt.
Es werden insgesamt drei Kurven bestimmt, um dann den Mittelwert des Integrals zu bilden, der schließlich in die Gleichung zur Berechnung des Herzzeitvolumens eingeht (Abb.9).

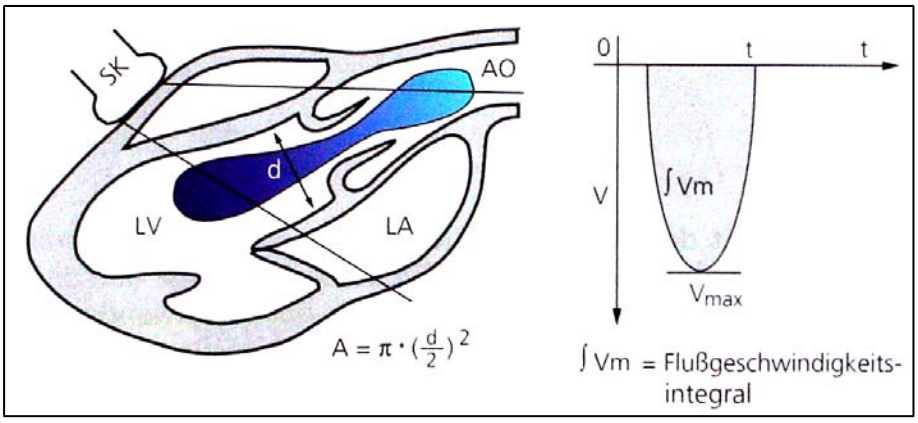


Abbildung 9: Dopplerechokardiographische Bestimmung des Herzzeitvolumens

SK = Schallkopf
d = Durchmesser
LV = linker Ventrikel
LA = linker Vorhof
AO = Aorta

2.7 Überwachungsparameter

Parameter anhand des PiCCO

Es lassen sich anhand der transpulmonalen Thermodilution mit dem PiCCO Gerät folgende Werte erfassen, anhand derer eine Überwachung des Patienten möglich ist:

Tabelle 2: Parameter der Pulskonturanalyse

Bezeichnung	Abkürzung	Einheit	Normalwerte
Linksventrikuläres Herzzeitvolumen	HZV PiCCO	[l/min]	4,0-7,0
Linksventrikulärer Herzzeitvolumen Index	HZV PiCCOi	[l/min/m²]	2,5-4,2
intrathorakales Blutvolumen	ITBV	[ml]	800-1000
extravasales Lungenwasser	EVLW	[ml]	8,0-10,0
Schlagvolumenindex	SVI	[ml/m²]	40-60

Parameter des Pulmonaliskatheters

Zu den Standardparametern zur Überwachung der Hämodynamik anhand des Swan-Ganz Katheters haben sich die in der folgenden Tabelle 3 zusammengestellten Werte etabliert:

Tabelle 3: Parameter des Pulmonaliskatheter

Bezeichnung	Abkürzung	Einheit	Normalwerte
rechtsventrikuläres Herzzeitvolumen	CCO	[l/min]	4,0-7,0
rechtsventrikulärer Herzzeitvolumen Index	CCOi	[l/min/m²]	2,5-4,2
zentralvenöser Druck	ZVD	[mmHg]	2,0-8,0
mittlerer pulmonalarterieller Druck	MPAP	[mmHg]	9,0-16,0
pulmonalkapillärer Okklusionsdruck	PCWP	[mmHg]	5,0-12,0
Gemischt venöse Sauerstoff-Sättigung	SvO_2	[%]	68-80

Transösophageale Echokardiographie

Die transösophageale Echokardiographie hat ihren Vorzug darin, das Herz bildlich darzustellen. Dabei wird vornehmlich die Kontraktilität beurteilt und darauf geachtet, Bewegungsstörungen, Thromben oder Herzklappenfehler zu diagnostizieren und dokumentieren. Es ist außerdem möglich, das Herzzeitvolumen und den Fluss der Pulmonalvenen zu bestimmen, sowie Aussagen über den Volumenstatus des Patienten zu treffen [20,64].

Es handelt sich bei diesem Verfahren vor allem um eine qualitative Beurteilung des Patienten, wobei eine zeitnahe direkte Beurteilung der kardialen Leistung möglich ist.

2.8 Versuchsanordnung

Versuchsdurchführung

Die standardisierte Überwachung der Patienten erfolgte mit dem Monitor Marquette und umfasste ein 12 Kanal EKG, ST-Streckenanalyse, Herzfrequenz, ZVD, Sauerstoffsättigung, arterielle Blutdruckmessung, Temperaturmessung und die Pulmonalarteriendruckmessung.
Alle intravasalen Zugänge, sowie die Ultraschallsonde, wurden von dem zuständigen Anästhesisten in der Einleitungseinheit direkt vor der Operation gelegt.

Pulmonaliskatheter

Zur kontinuierlichen Bestimmung des Herzzeitvolumen und der gemischt venösen Sättigung wurden die entsprechenden Patientenkabel mit den farbcodierten Buchsen des Vigilance-Monitor verbunden. Dem optischen Modul für die Messung des SvO_2 musste 20 Minuten Zeit zur Kalibration gegeben werden, bevor die ersten Werte zu erheben waren. Für das Menü des Vigilance Monitors waren außerdem noch Angaben über den augenblicklichen Hämoglobinwert und Hämatokrit zu machen. Die Werte waren direkt auf dem Vigilance Monitor abzulesen.

Herzzeitvolumenmessung anhand des PiCCO

Die Bestimmung des Herzzeitvolumens erfolgte über eine manuelle Kältebolusinjektion von 20 ml der 5°C bis 10°C kalten Lösung.
Bei der transpulmonalen Thermodilution wurde auf eine gleichmäßige Injektion des Kältebolus geachtet, die immer von derselben Person ausgeführt wurde, um

Unregelmäßigkeiten zu minimieren. Der Zeitpunkt der Injektion bezogen auf den Atemzyklus fand randomisiert statt, um einen systematischen Fehler auszuschließen.
Während der Messungen war für ein möglichst ungestörtes Signal zu sorgen, weshalb zum Teil kurzzeitig der Operationsvorgang unterbrochen wurde.

Transösophageale Echokardiographie

Zu den einzelnen Messpunkten wurde vom zuständigen Anästhesisten der Blutfluss über der Aorta und der Aortendurchmesser dokumentiert und per Videomitschnitt festgehalten. Die Daten konnten später in einer offline Analyse ausgewertet werden. Außerdem wurden auftretende Wandbewegungsstörungen des Herzens dokumentiert.
Vor der ersten Messung wurde ein Nullabgleich der Geräte durchgeführt. Die Messungen erfolgten stets in flacher Lagerung des Patienten und unter Allgemeinanästhesie. Jeder Messblock bestand aus drei aufeinander folgenden Thermodilutionsmessungen, deren Mittelwert vom Gerät berechnet, und auf dem Protokoll dokumentiert wurde. Währenddessen wurden die Werte der kontinuierlichen Messung registriert und aus voneinander abweichenden Werten der Mittelwert gebildet, um diese Methode über den gleichen Zeitraum zu bestimmen, wie die manuellen Thermodilutionsmessungen. Zeitgleich wurden der PW-Doppler über dem linksventrikulären Ausflusstrakt und die mittlere Herzfrequenz bestimmt.
Die Messungen zur Bestimmung des Vorlastparameter fanden an denselben Messzeitpunkten wie die der Herzzeitvolumina statt. Die anhand der transpulmonalen Thermodilution mit dem PiCCO ermittelten Werte wurden ebenfalls über drei aufeinander folgende Messungen gemittelt. Gleichzeitig wurde der zentralvenöse Druck dokumentiert, und sich über den Zeitraum der drei Messungen verändernde Werte gemittelt. Der präkapiläre Verschlußdruck Druck wurde zu Beginn eines Messzeitpunktes und zum Abschluß desselben bestimmt. Aus abweichenden Werten wurde der Mittelwert gebildet und dieser dokumentiert.

Messzeitplan

Der Aufbau der Messungen und die Erhebung der Daten erfolgte in der oben beschriebenen Weise. Alle Parameter wurden in einem Protokoll dokumentiert (siehe unten).
Die Bestimmung des Herzzeitvolumens mit dem PiCCO wurde durch die manuelle Injektion des Kältebolus durchgeführt. Die drei Messungen folgten schnell aufeinander, um plötzliche hämodynamische Veränderungen und mögliche Unterschiede in deren Erfassung der einzelnen Geräte gut dokumentieren zu können.
Als Beginn der einzelnen Messeinheit wurde die Meldung „Injektion“ der ersten Thermodilution gewertet, als Abschluss der Messeinheit die Meldung „Fertig“ der dritten Thermodilutonsmessung. Bei ungültigen Messungen (siehe 2.4.2) wurde die einzelne Messung wiederholt.
Zusätzlich zu den hämodynamischen Parametern wurden außerdem noch weitere Werte erfasst, wie die Temperatur, der Beatmungstyp, Auffälligkeiten im EKG, Wandbewegungsstörungen des Myokards, die linksventrikuläre Funktion, die Flüssigkeitsbilanz und der Einsatz von vasoaktiven oder inotropen Substanzen.
Diese Daten wurden allerdings im Rahmen dieser Studie nicht weiter verwendet.

	Einleitung	Sternotomie	Prä-Ischäme	Ischämie	Reperfusion	Thorax-verschluß	OP-Ende
HF							
RR							
SaO_2							
CO_2							
ZVD							
Pulmonalis katheter							
PCWP							
HZV							
PiCCO							
HZV							
SVI							
ITBV							
TEE							
HZV							

Abbildung 10: Messprotokoll

HF = Herzfrequenz
RR = Blutdruck
CO_2 = endexpiratorisches Kohlendioxid
ZVD = zentraler Venendruck
PCWP = präkapillärer Verschlussdruck in der Pulmonalisarterie
HZV = Herzzeitvolumen
SVI = Schlagvolumenindex
ITBV = intrathorakales Blutvolumen

Es wurden sieben verschiedene Messzeitpunkte festgelegt.

1. Nach Einleitung der Anästhesie

2. Nach der Sternotomie

3. Prä–Ischämie Zeitpunkt, an dem der Stabilisator auf dem Herzen aufgebracht war.

4. Ischämie: zwei Minuten nach vollständiger Okklusion des Koronargefäßes.

5. Reperfusion: zwei Minuten, nachdem der Fluss in dem Koronargefäß wieder freigegeben war.

6. Thorax Verschluss: Nach Anlage und Verschluß aller Drahtcerclagen

7. OP Ende: nach OP Ende, vor der Verlegung auf die Intensivstation.

2.9 Statistische Methoden

Die Ergebnisse wurden als Mittelwerte ± Standardabweichung von drei aufeinander folgenden Messungen, beziehungsweise aus dem Mittelwert abweichender Messwerte dargestellt.
Der Vergleich der Methoden zur Ermittlung des Herzzeitvolumens untereinander erfolgte über die Regressionsanalyse mit Bestimmung der Steigung als Ausmaß des proportionalen Fehlers und des Achsenabschnitts für die Bestimmung des Ausmaßes für den konstanten Fehler.
Zur Ermittlung von signifikanten Unterschieden in der Bestimmung der Herzzeitvolumina zwischen den Messverfahren wurde der Test nach Greenhouse-Geisser verwendet, wobei ein signifikanter Unterschied bei einem $p<0.05$ vorliegt.
Zur Untersuchung der Übereinstimmung der Vorlast Parameter wurde der Korrelationskoeffizient nach Spearman-Rho berechnet.

3. Ergebnisse

3.1. Biometrische Daten der Patienten

Alle 20 Patienten sind im Anschluss an den Eingriff auf die Intensivstation verlegt worden, von diesen konnten 19 innerhalb der nächsten Tage ohne Komplikationen weiterverlegt werden. Bei einem Patienten kam es zu massiven Nachblutungen, die noch am selben Tag einen weiteren operativen Eingriff zur Folge hatten.
Während der Operation wurden alle Patienten wie üblich mit einem externen Schrittmacher ausgestattet, der auch bei 6 Patienten zur Anwendung kam. Drei Patienten entwickelten intraoperativ neu auftretende Arrhythmien und 17 benötigten Katecholamine. Bei zwei Patienten wurde Blut transfundiert.
Bei allen Patienten war eine Bestimmung des Herzzeitvolumens anhand der transösophagealen Echokardiographie möglich, bei zwei Patienten ergaben sich allerdings in der Beurteilung der linksventrikulären Funktion und von eventuellen Wandbewegungsstörungen Probleme, da bei diesen Patienten das Herz mittels der Saugglocke luxiert wurde und so fast nicht mehr im Ultraschallbild einsehbar war. Daher konnte auch bei zwei Patienten an einem Messzeitpunkt das Herzzeitvolumen nicht berechnet werden.

Erfassung der myokardialen Wandbewegungsstörungen intraoperativ

Alle Patienten wurden intraoperativ an den jeweiligen Messzeitpunkten auf lokale myokardiale Hypokinesien untersucht. Bei einem Patienten traten keine, bei 4 Patienten allerdings durchgehend Störungen im Operationsverlauf auf. Wie oben schon erwähnt konnten bei 2 Patienten während der kritischen Messzeitpunkte der Prä-Ischämie und Ischämie allerdings keine Aussagen anhand des TEE getroffen werden, da das Herz aus der einsehbaren Achse luxiert wurde. Es konnten bei 9 Patienten während der Messpunkte der Prä-Ischämie, Ischämie im Unterschied zum Beginn der Operation neu aufgetretene Bewegungsstörungen erfasst werden, welche allerdings in der Reperfusionsphase rückläufig waren. Des Weiteren wurden bei 4 Patienten anfänglich bestehende Hypokinesien als rückläufig nach der Reperfusionsphase dokumentiert.

3.2 Hämodynamisches Standardmonitoring

Herzfrequenz

Die Herzfrequenz nahm während der Operation im Mittel um etwa 15 Schläge pro Minute zu. Dieses Ergebnis wurde intraoperativ allerdings durch den Einsatz eines Herzschrittmachers beeinflusst.

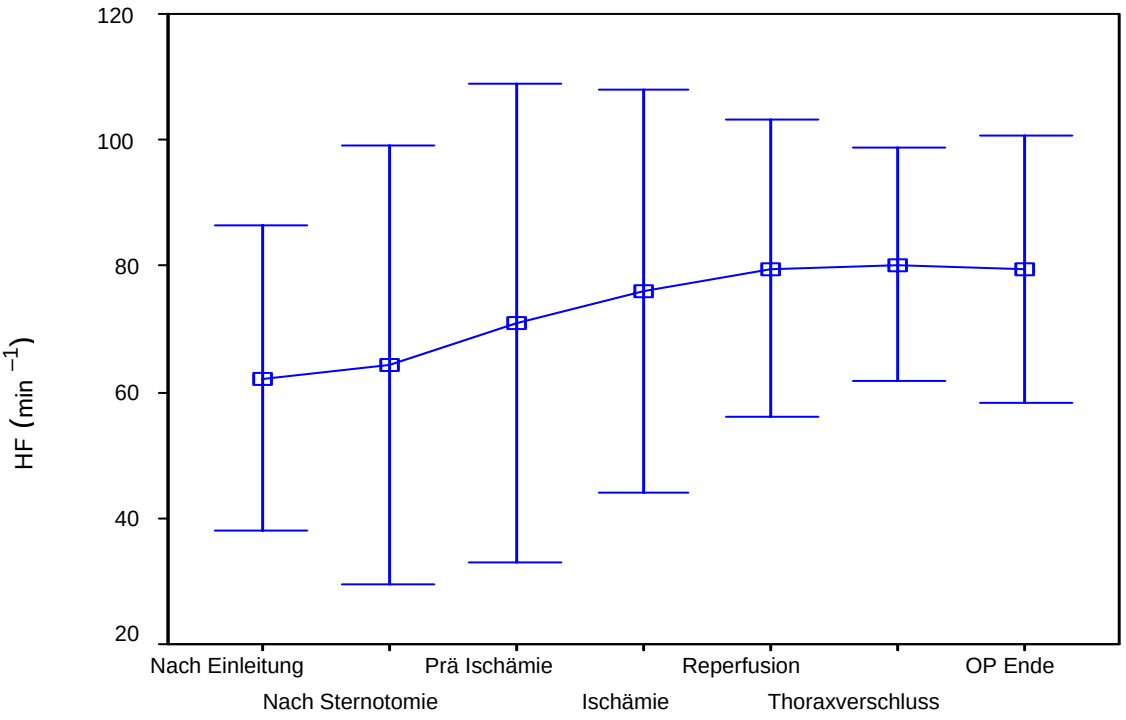


Abbildung 11: Herzfrequenz zu definierten Messzeitpunkten bei Patienten mit koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik (n=20). Die Werte sind angegeben als Mittelwerte ± Standardabweichung.

Arterieller Mitteldruck

Im Verlauf der Operation konnte insgesamt ein Abfall des arteriellen Mitteldrucks beobachtet werden, obwohl ein Großteil der Patienten mit vasoaktiven und positiv inotropen Medikamenten behandelt wurde. Auffällig war der Abfall des Blutdrucks während der Phase, in welcher der Octopus dem Herzen aufliegt sowie während der Koronarokklusion.
Im Mittel fiel der mittlere arterielle Blutdruck in den kritischen Phasen jedoch nicht unter 70 mmHg.

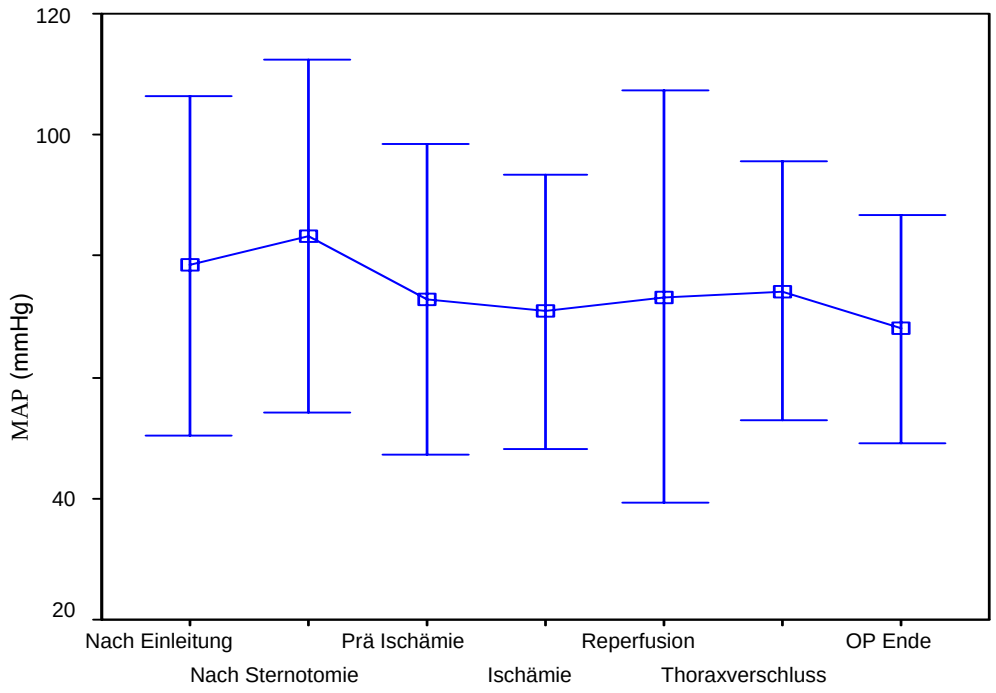


Abbildung 12: Arterieller Mitteldruck zu definierten Messzeitpunkten bei Patienten mit koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik (n=20). Die Werte sind angegeben als Mittelwerte ± Standardabweichung.

Zentraler Venendruck

Der zentrale Venendruck stieg zwar während der Okklusion des Koronargefäßes an, dies aber nur in geringem Maße um etwa 1-2 mmHg im Vergleich zu den beiden vorherigen Messzeitpunkten. Insgesamt wurden konstante zentrale Venendrücke gemessen.

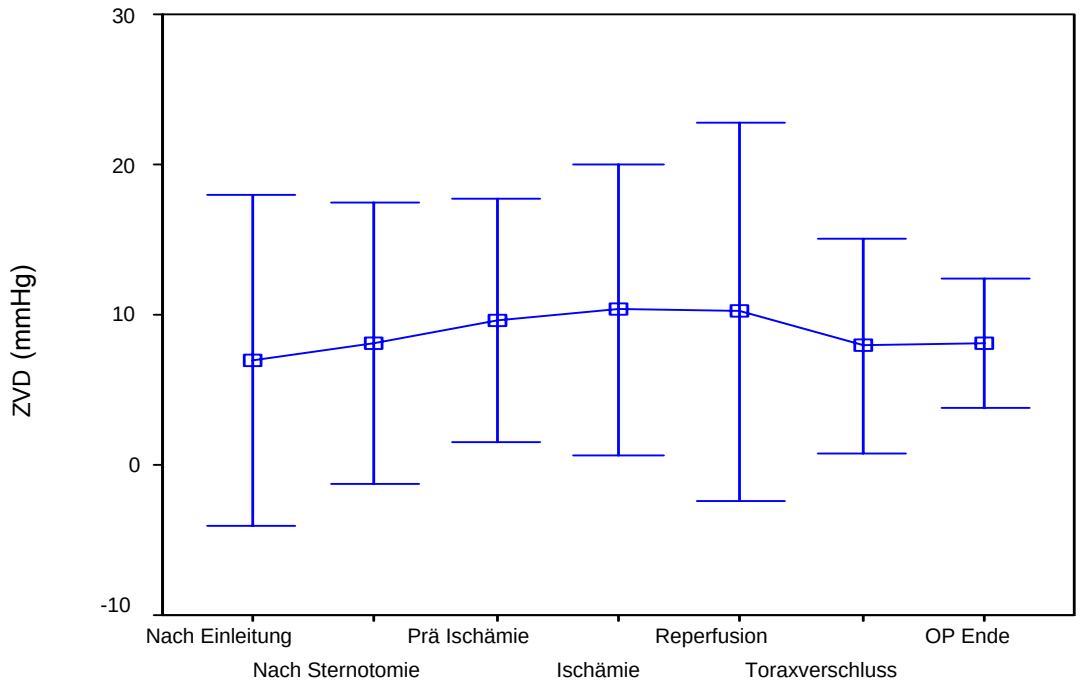
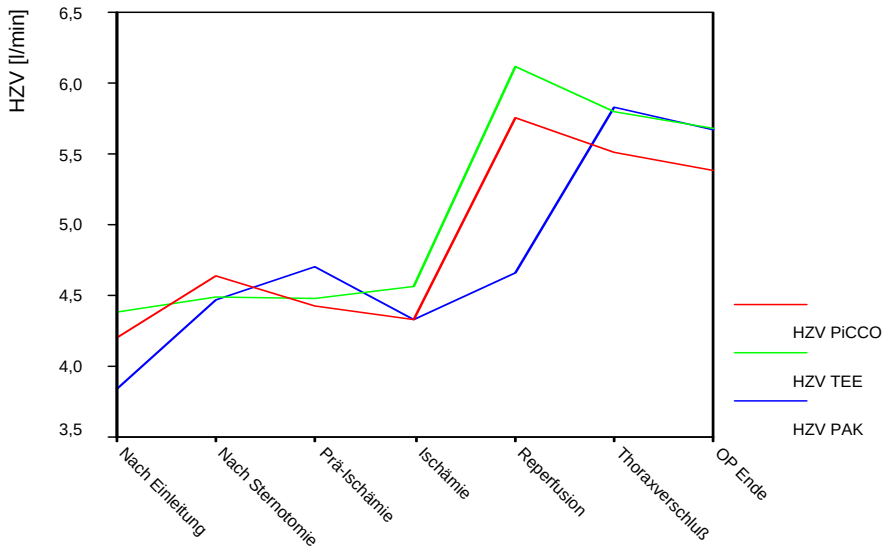


Abbildung 13: Zentraler Venendruck zu definierten Messzeitpunkten bei Patienten mit koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik (n=20). Die Werte sind angegeben als Mittelwerte ± Standardabweichung.

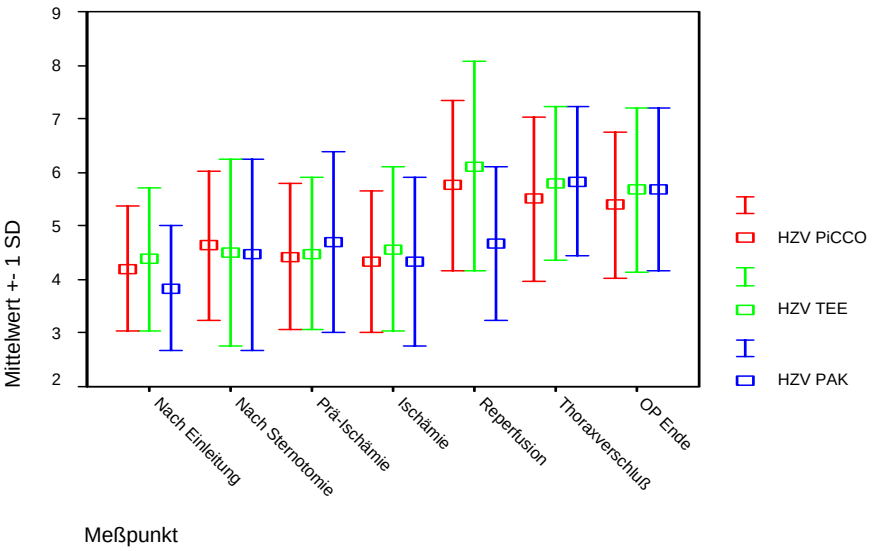
3.3 Erweitertes hämodynamisches Monitoring

HZV Messungen der drei Methoden

Während der Operation gleichen sich die Werte der Messungen des PiCCO, TEE und die des Pulmonaliskatheters. Ein signifikanter Unterschied liegt nur zum Zeitpunkt der Reperfusion vor, wo der Pulmonaliskatheter deutlich niedrigere Werte angibt, als die beiden anderen Verfahren. Die deutliche Zunahme des Herzzeitvolumens nach Koronarreperfusion wird durch den Pulmonaliskatheter erst verzögert angezeigt.



A



b

Abbildung 14: Herzzeitvolumina gemessen mit Pulmonaliskatheter, PiCCO und TEE zu definierten Messzeitpunkten bei Patienten mit koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik (n=20). Die Werte sind angegeben als **a** Mittelwerte und **b** ± SD.

Vergleich und Darstellung der Herzzeitvolumina gemittelt über alle Messzeitpunkte

In den folgenden Abbildungen ist zu erkennen, dass der Pulmonaliskatheter (PAK) im Vergleich zu den beiden Vergleichsmethoden insgesamt niedrigere Werte ermittelt. Ein signifikanter Unterschied, ermittelt anhand des Greenhouse-Geisser Test ($p<0,05$) ist nicht zu finden. Insgesamt liegt eine höhere Übereinstimmung der Messungen durch die transösophageale Dopplerechokardiographie mit der transpulmonalen Thermodilution vor (Abb. 15-17).

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
HZV PAK (l/min)	**4,7**	**1,6**	**1,7**	**10,0**
HZV PiCCO (l/min)	**4,9**	**1,4**	**2,0**	**9,2**
HZV TEE (l/min)	**5,0**	**1,6**	**2,2**	**11,6**

HZV PAK = Herzzeitvolumen Pulmonaliskatheter
HZV PiCCO = Herzzeitvolumen Pulskonturanalyse
HZV TEE = Herzzeitvolumen anhand transösophagealer Echokardiographie

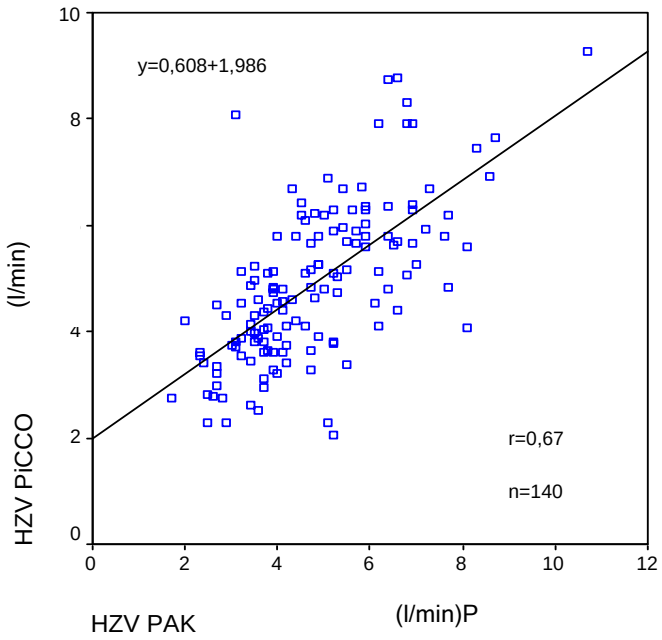


Abbildung 15:Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des Pulmonaliskatheters und des PiCCO gemittelt über alle Messzeitpunkte (siehe Patienten und Methoden) bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

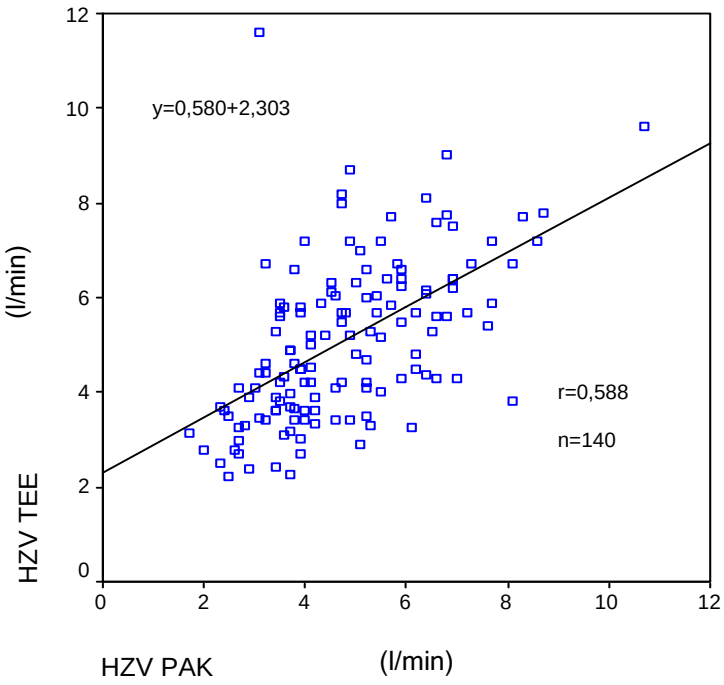


Abbildung 16: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des Pulmonaliskatheters und des TEE gemittelt über alle Messzeitpunkte (siehe Patienten und Methoden) bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

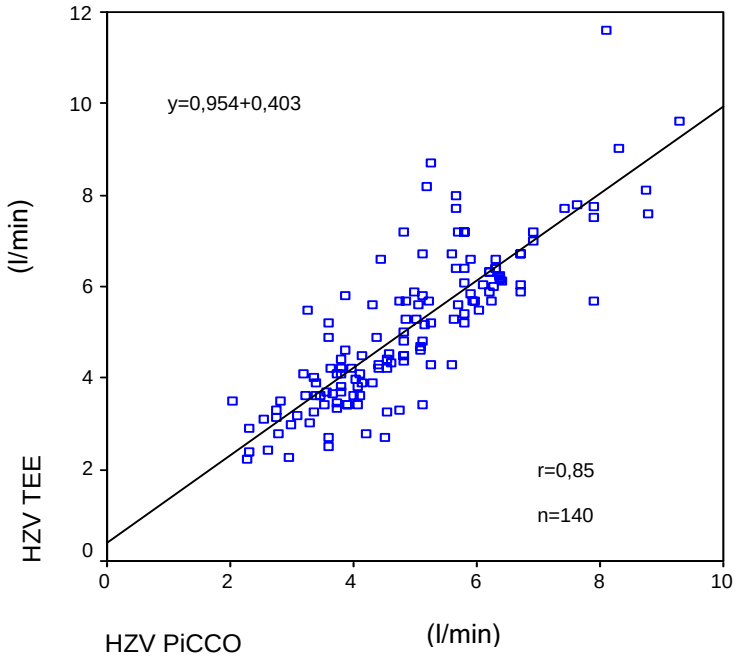


Abbildung 17: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des PiCCO und des TEE gemittelt über alle Messzeitpunkte (siehe Patienten und Methoden) bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

Herzzeitvolumina an den einzelnen Messzeitpunkten

Nach der Einleitung

Den folgenden Abbildungen ist zu entnehmen, dass anhand des Pulmonaliskatheters leicht niedrigere Herzzeitvolumina ermittelt worden sind, als bei den Messverfahren der beiden anderen Methoden, allerdings ohne statistische Signifikanz (p=0,068). Die Mittelwerte der Differenz sind bei den drei verglichenen Verfahren zudem ohne klinische Relevanz.

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
HZV PAK (l/min)	**3,8**	**1,1**	**2,0**	**7,3**
HZV PiCCO (l/min)	**4,2**	**1,1**	**2,7**	**6,7**
HZV TEE (l/min)	**4,3**	**1,3**	**2,2**	**7,2**

HZV PAK =Herzzeitvolumen Pulmonaliskatheter
HZV PiCCO = Herzzeitvolumen Pulskonturanalyse
HZV TEE = Herzzeitvolumen anhand transösophagealer Echokardiographie

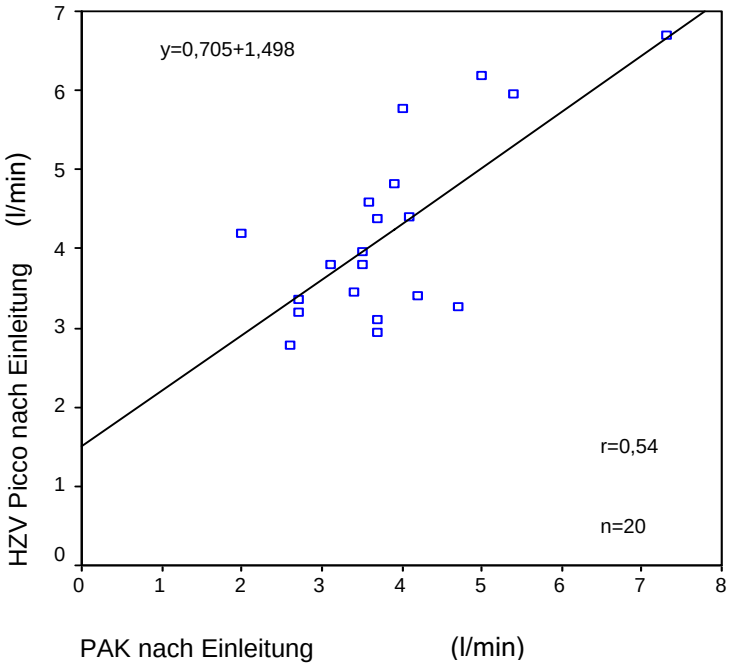


Abbildung 18: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des Pulmonaliskatheters und des PiCCO zum Messzeitpunkt nach der Einleitung bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

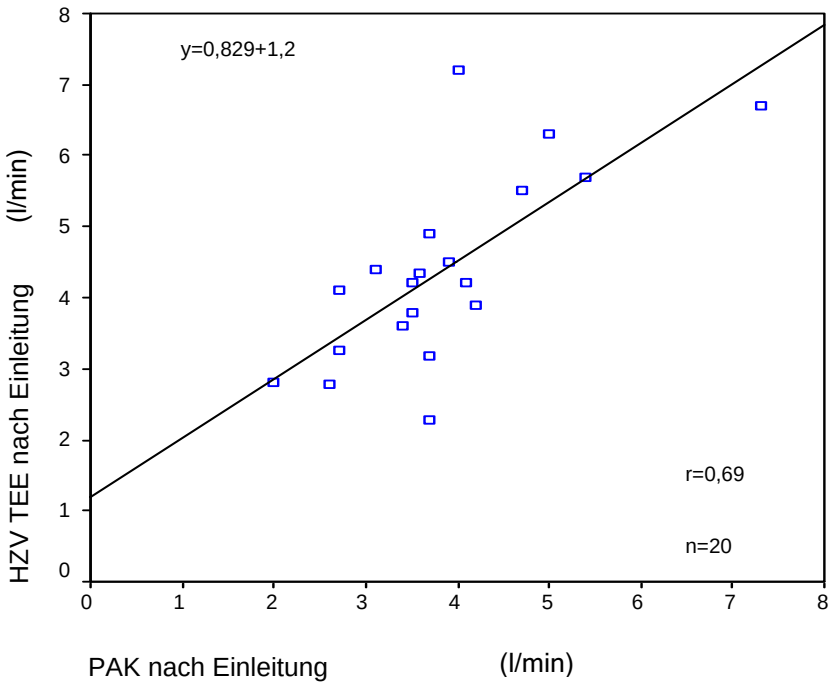


Abbildung 19: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des Pulmonaliskatheters und des TEE zum Messzeitpunkt nach der Einleitung bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

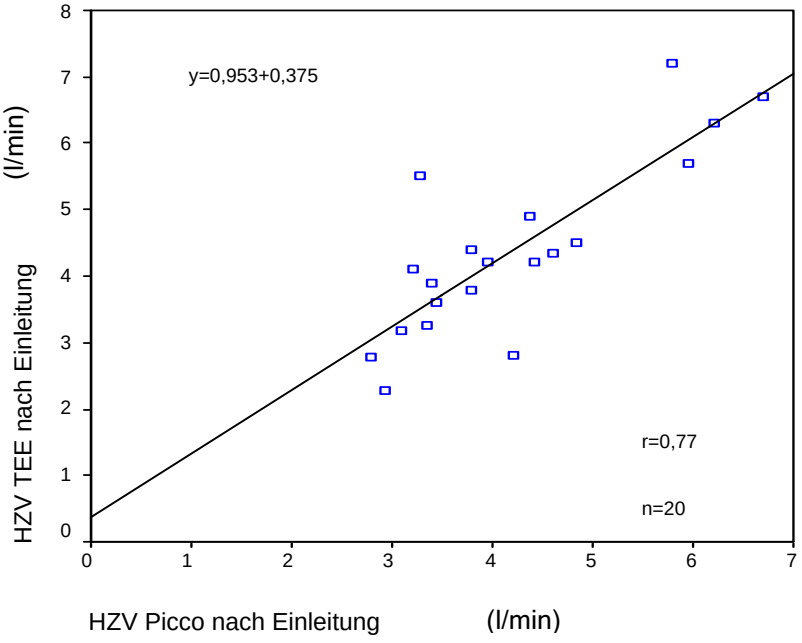


Abbildung 20: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des TEE und des PiCCO zum Messzeitpunkt nach der Einleitung bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

Nach der Sternotomie

Zu diesem Messzeitpunkt stimmen alle Messmethoden miteinander überein, sodass allen Verfahren zuverlässige Werte zu diesem Zeitpunkt der Operation zu entnehmen sind (p=0,458).

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
HZV PAK (l/min)	**4,4**	**1,7**	**2,4**	**10,7**
HZV PiCCO (l/min)	**4,6**	**1,3**	**2,6**	**9,2**
HZV TEE (l/min)	**4,5**	**1,7**	**2,4**	**9,6**

HZV PAK = Herzzeitvolumen Pulmonaliskatheter
HZV PiCCO = Herzzeitvolumen Pulskonturanalyse
HZV TEE = Herzzeitvolumen anhand transösophagealer Echokardiographie

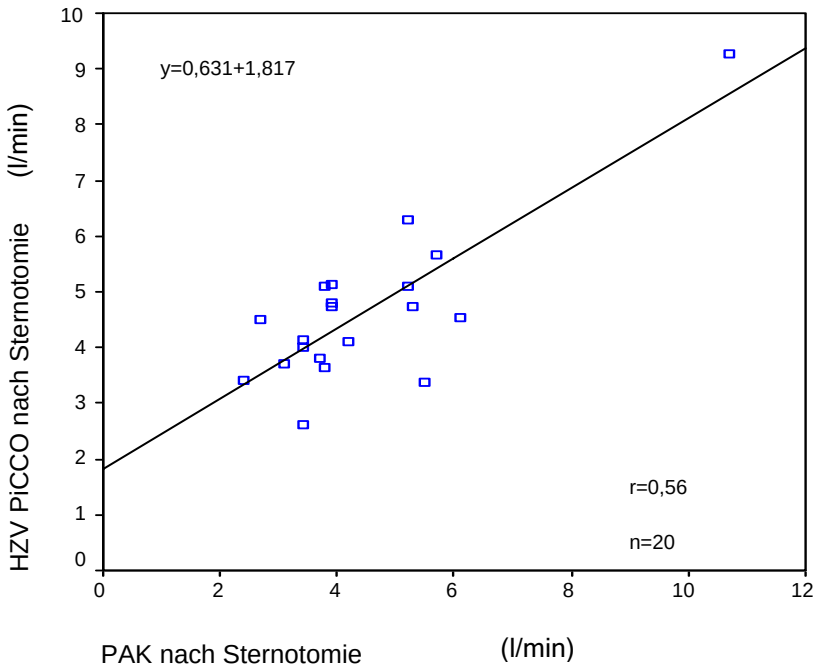


Abbildung 21: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des Pulmonaliskatheters und des PiCCO zum Messzeitpunkt nach der Sternotomie bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

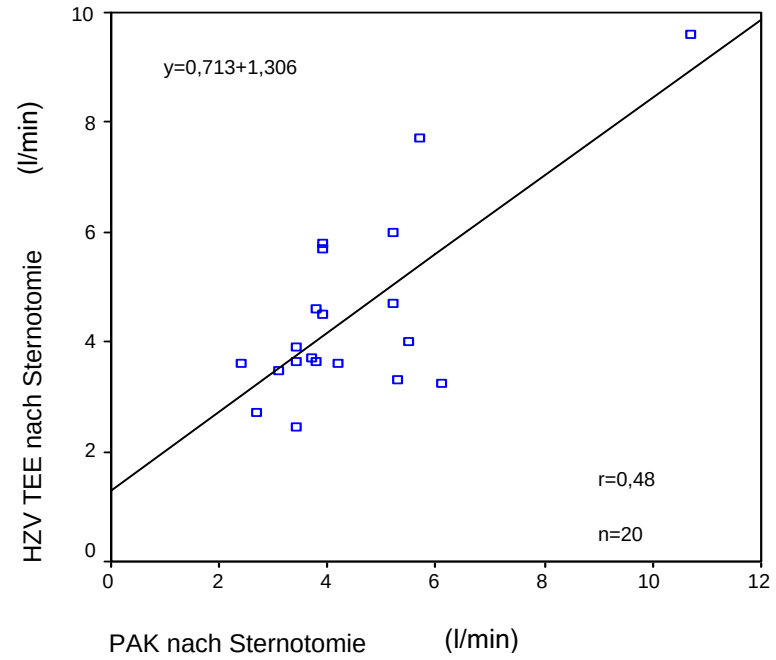


Abbildung 22: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des Pulmonaliskatheters und des TEE zum Messzeitpunkt nach der Sternotomie bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

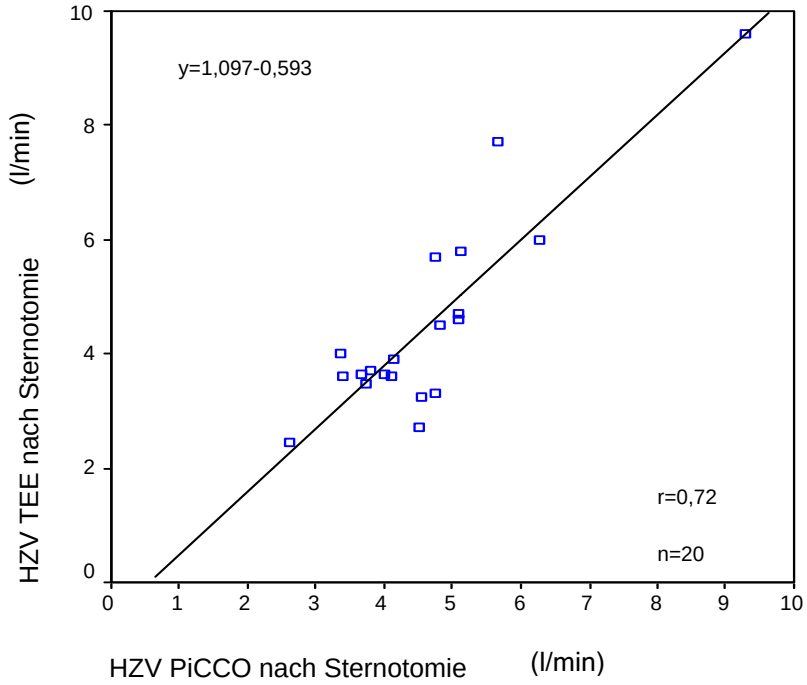


Abbildung 23: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des PiCCO und des TEE zum Messzeitpunkt nach der Sternotomie bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

Prä-Ischämie

Wie am vorherigen Messzeitpunkt messen während der Prä-Ischämie im Operationsverlauf alle drei untersuchten Methoden zuverlässige und gleichwertige Herzzeitvolumina (p=0,716) (Abb. 24-26).

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
HZV PAK (l/min)	**4,6**	**1,6**	**2,5**	**8,1**
HZV PiCCO (l/min)	**4,4**	**1,3**	**2,3**	**7,9**
HZV TEE (l/min)	**4,4**	**1,4**	**2,4**	**7,5**

HZV PAK = Herzzeitvolumen Pulmonaliskatheter
HZV PiCCO = Herzzeitvolumen Pulskonturanalyse
HZV TEE = Herzzeitvolumen anhand transösophagealer Echokardiographie

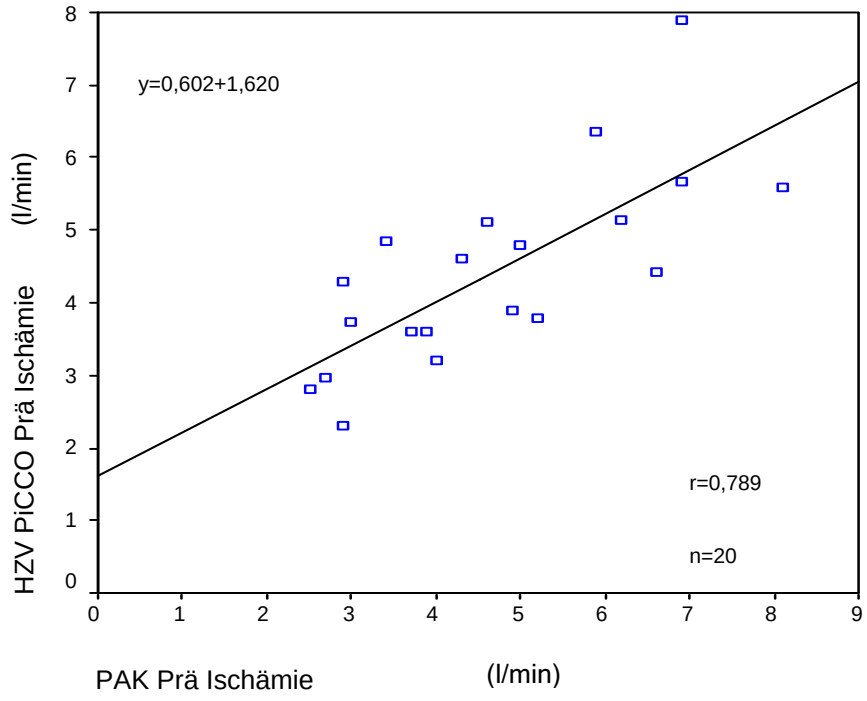


Abbildung 24: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des Pulmonaliskatheters und des PiCCO zum Messzeitpunkt der Prä Ischämie bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

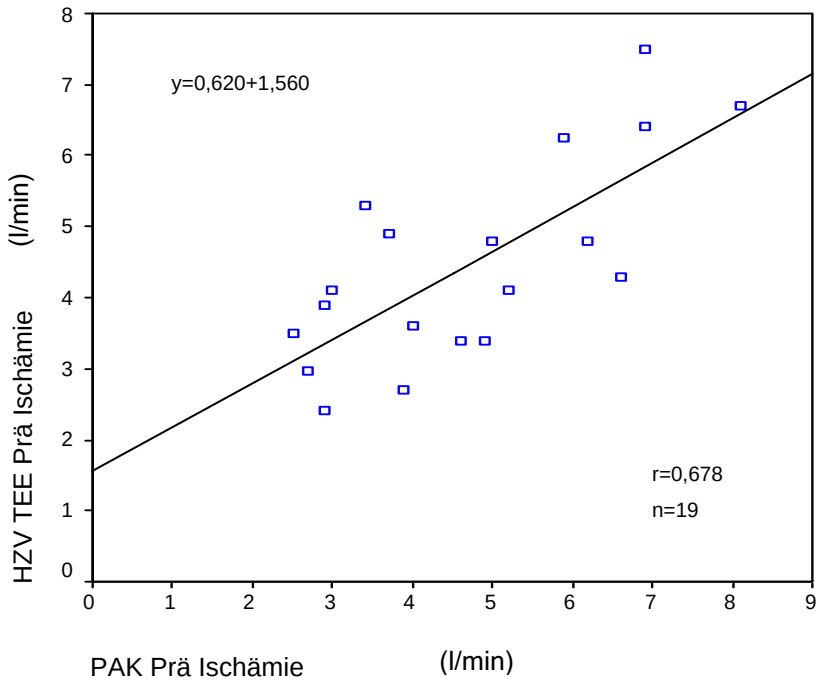


Abbildung 25: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des Pulmonaliskatheters und des TEE zum Messzeitpunkt der Prä Ischämie bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

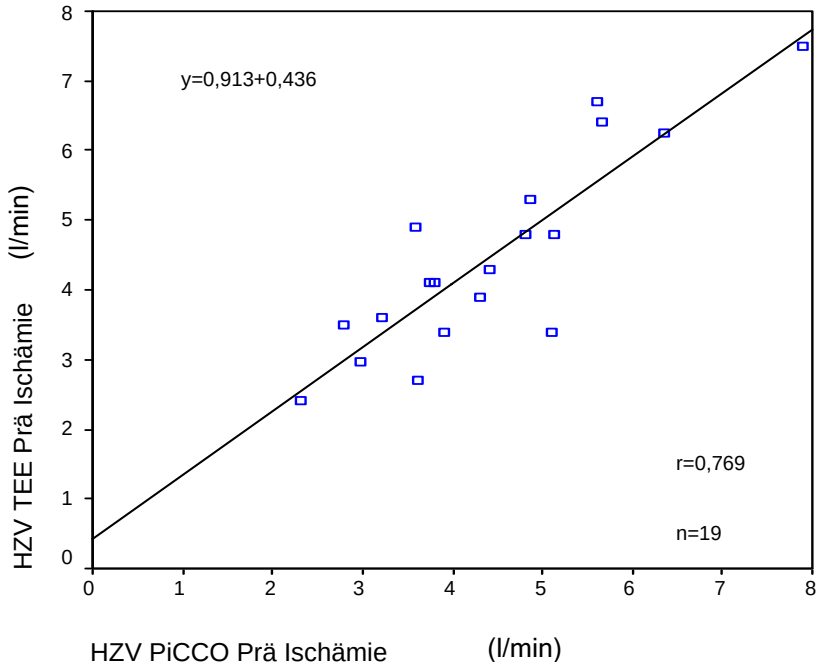


Abbildung 26: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des TEE und des PiCCO zum Messzeitpunkt der Prä Ischämie bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

Ischämie

Auch während der Koronarokklusion entsprechen sich die Daten der 3 untersuchten Methoden. Damit ist es möglich zu diesem kritischen Zeitpunkt anhand jeder überprüften Messmethode den Patienten zuverlässig zu überwachen (p=0,49) (Abb.27-29).

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
HZV PAK (l/min)	**4,3**	**1,4**	**1,7**	**7,7**
HZV PiCCO (l/min)	**4,3**	**1,2**	**2,2**	**6,9**
HZV TEE (l/min)	**4,5**	**1,5**	**2,2**	**7,2**

HZV PAK = Herzzeitvolumen Pulmonaliskatheter
HZV PiCCO = Herzzeitvolumen Pulskonturanalyse
HZV TEE = Herzzeitvolumen anhand transösophagealer Echokardiographie

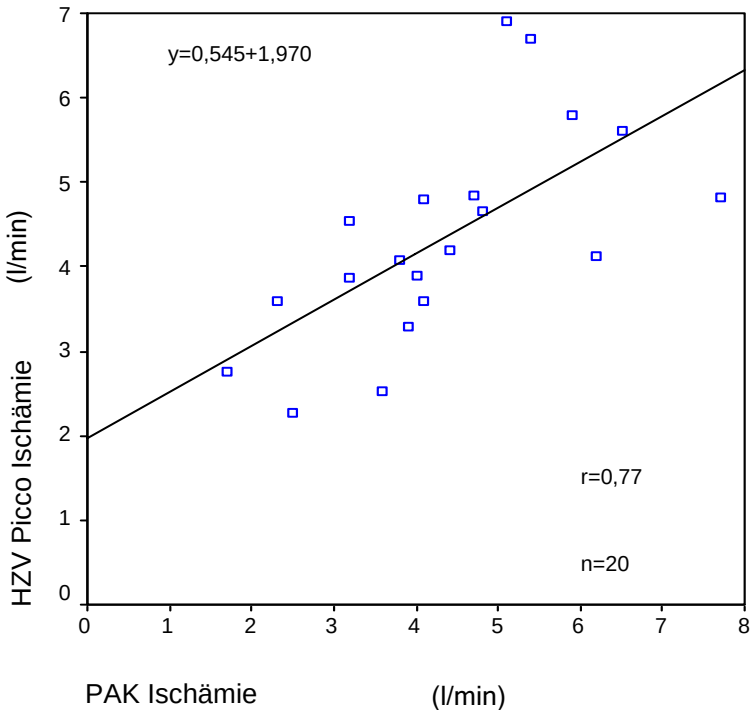


Abbildung 27: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des Pulmonaliskatheters und des PiCCO zum Messzeitpunkt der Ischämie bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

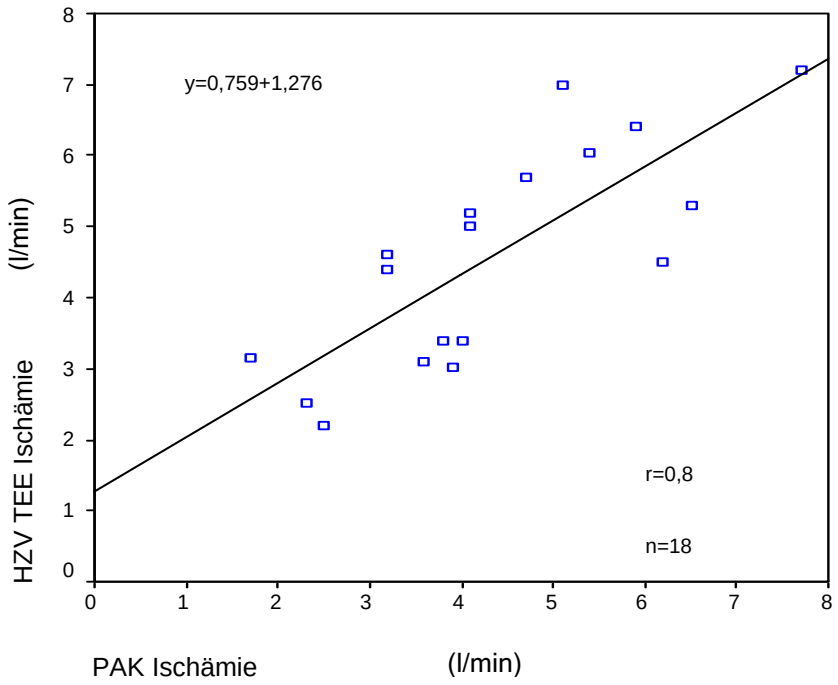


Abbildung 28: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des TEE und des Pulmonaliskatheters zum Messzeitpunkt der Ischämie bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

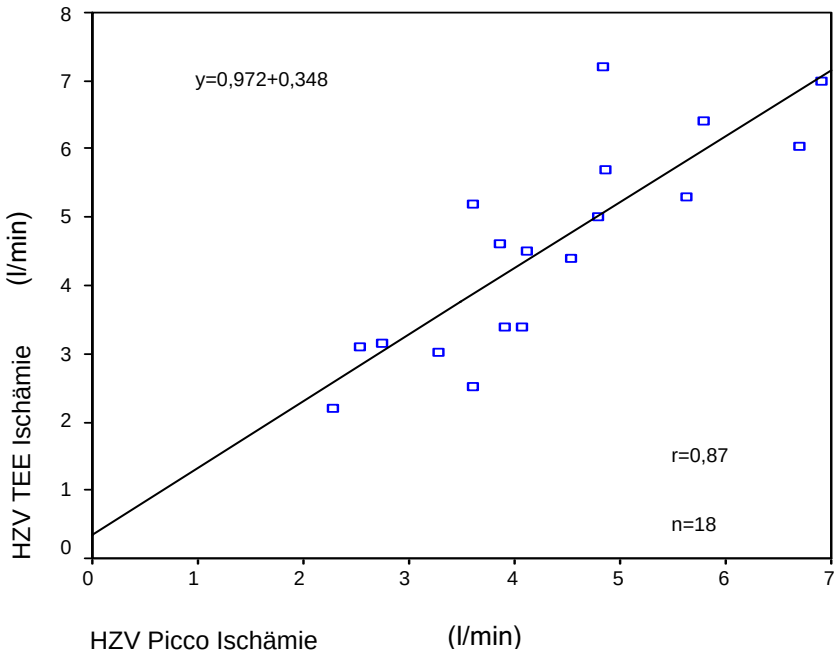


Abbildung 29: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen mit den Methoden des TEE und des PiCCO Gerätes zum Messzeitpunkt der Ischämie bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

Reperfusion

Die Werte für das Herzzeitvolumen, die vom Pulmonaliskatheter ermittelt werden, fallen zum Zeitpunkt der Reperfusion niedriger aus, als die, die durch das PiCCO oder das TEE ermittelt werden. Der Pulmonaliskatheter zeigt im Mittel 1,0 l/min weniger an. Nach dem Test von Greenhouse- Geisser liegt an dem Messpunkt der Reperfusion ein signifikanter Unterschied der Messwerte des Pulmonaliskatheters zu denen des PiCCO und des TEE vor (p=0,009) (Abb.30-32).

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
HZV PAK (l/min)	**4,6**	**1,4**	**2,3**	**7,0**
HZV PiCCO (l/min)	**5,7**	**1,5**	**2,7**	**8,7**
HZV TEE (l/min)	**6,1**	**1,8**	**3,3**	**11,6**

HZV PAK = Herzzeitvolumen Pulmonaliskatheter
HZV PiCCO = Herzzeitvolumen Pulskonturanalyse
HZV TEE = Herzzeitvolumen anhand transösophagealer Echokardiographie

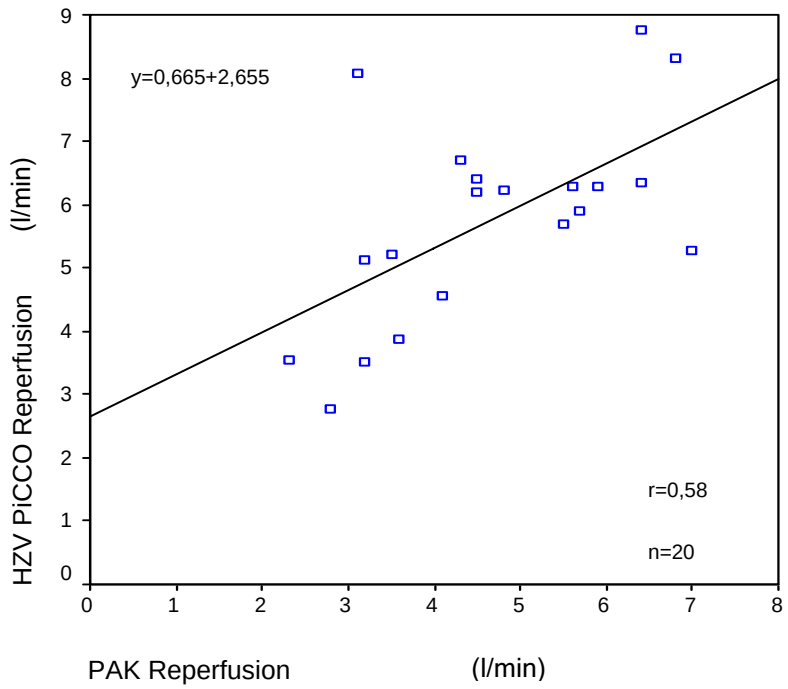
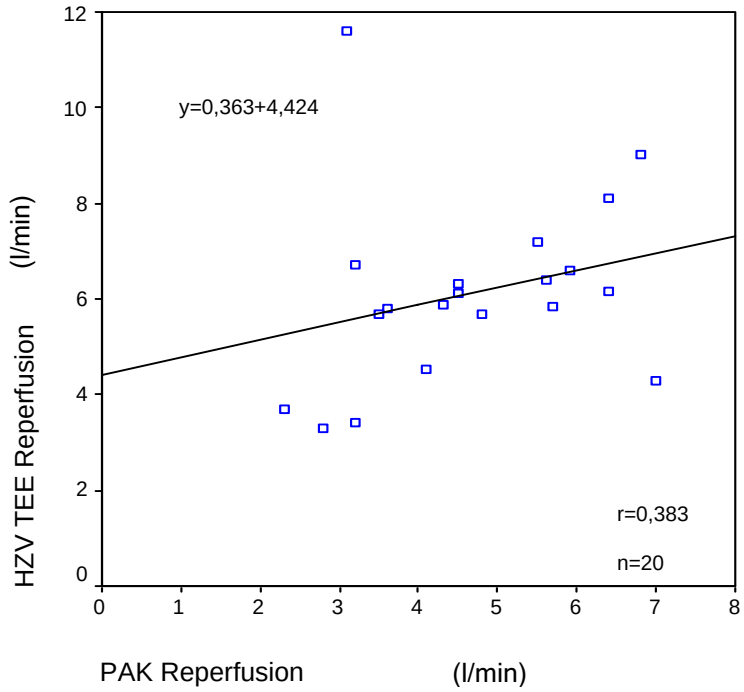


Abbildung 30: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des Pulmonaliskatheters und des PiCCO zum Messzeitpunkt der Reperfusion bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.



Abbilldung 31: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des TEE und des Pulmonaliskatheters zum Messzeitpunkt der Reperfusion bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

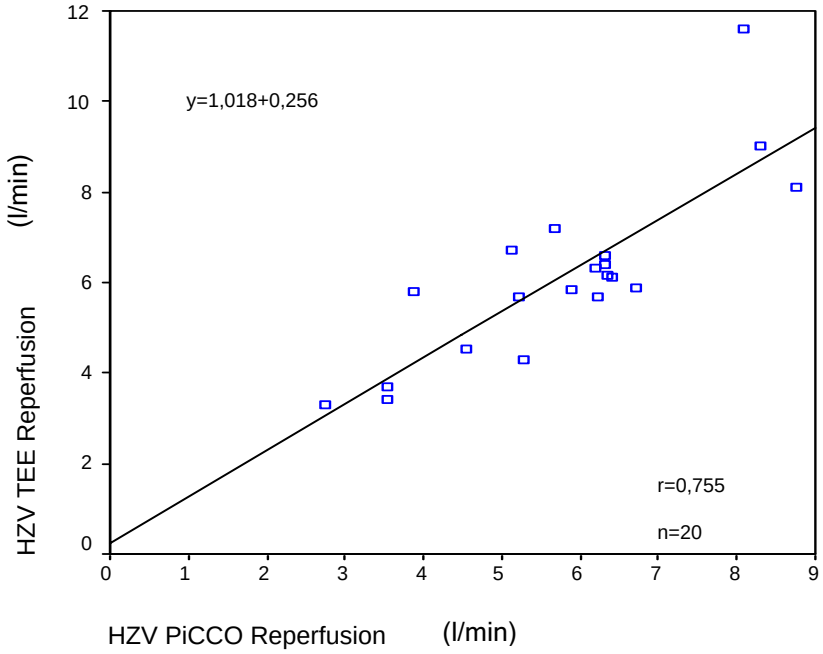


Abbildung 32 Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des TEE und des PiCCO zum Messzeitpunkt der Reperfusion bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

Thoraxverschluss

Zu diesem Messzeitpunkt zeigt der Pulmonaliskatheter Herzzeitvolumina, die geringfügig höher liegen, als die des PiCCO und des TEE. Hier zeigt der Pulmonaliskatheter im Verlauf die Werte, die anhand der beiden anderen Messmethoden schon zur Reperfusion gemessen wurden. Insgesamt liegt hier jedoch kein signifikanter Unterschied der verschiedenen Messmethoden vor (0,191) (Abb.33-35).

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
HZV PAK (l/min)	**5,8**	**1,3**	**3,5**	**8,7**
HZV PiCCO (l/min)	**5,5**	**1,5**	**2,0**	**8,7**
HZV TEE (l/min)	**5,7**	**1,4**	**3,5**	**8,7**

HZV PAK = Herzzeitvolumen Pulmonaliskatheter
HZV PiCCO = Herzzeitvolumen Pulskonturanalyse
HZV TEE = Herzzeitvolumen anhand transösophagealer Echokardiographie

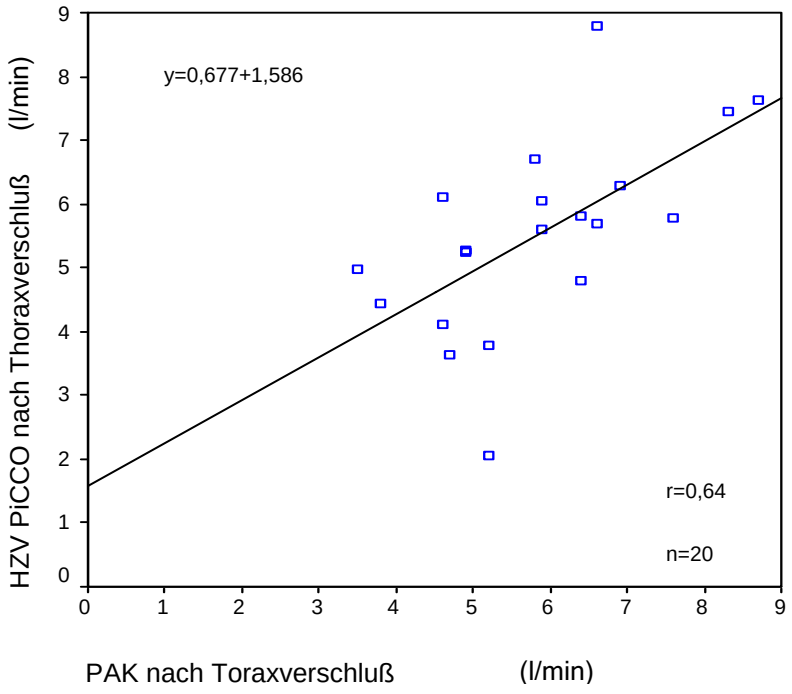


Abbildung 33: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des PiCCO und des Pulmonaliskatheters zum Messzeitpunkt des Thoraxverschlußes bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

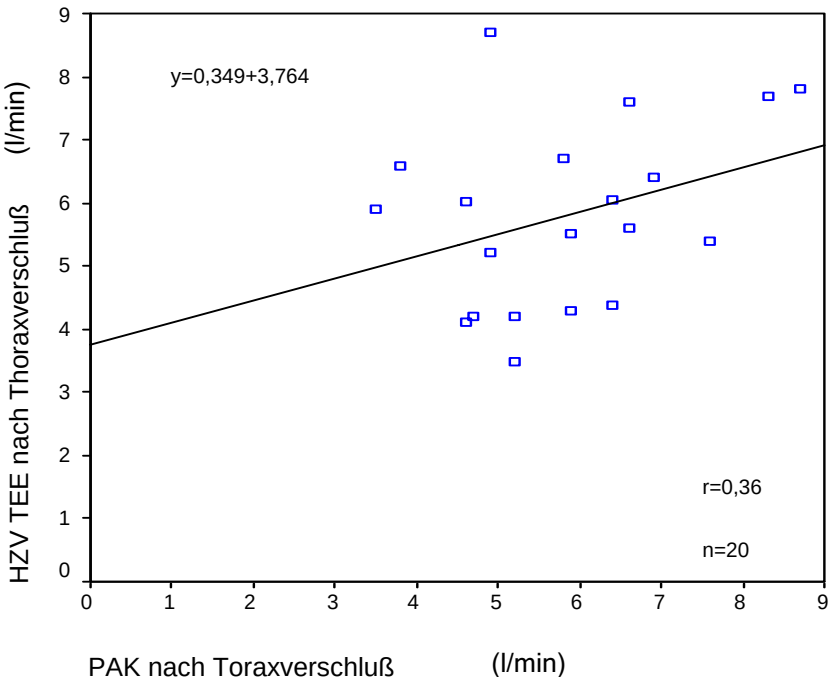


Abbildung 34: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des TEE und des Pulmonaliskatheters zum Messzeitpunkt des Thoraxverschlußes bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

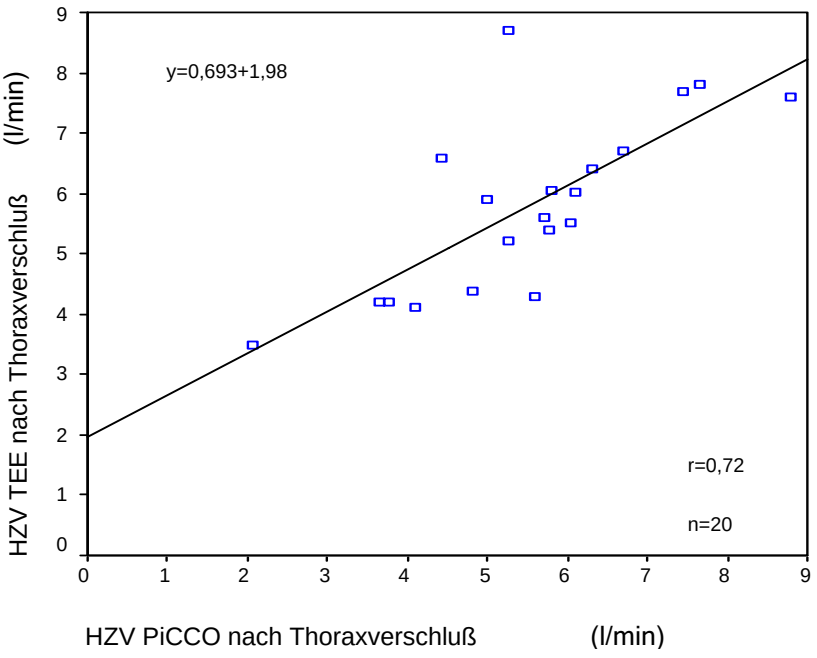


Abbildung 35: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des TEE und des PiCCO zum Messzeitpunkt des Thoraxverschlußes bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

OP-Ende

Zum Ende der Operation lassen sich vergleichbare Herzzeitvolumina aller drei Messmethoden ermitteln. Nach dem Greenhouse-Geisser Test liegt kein signifikanter Unterschied der verschiedenen Messmethoden vor (p=0,552) (Abb 36-38).

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
HZV PAK (l/min)	**5,6**	**1,5**	**3,5**	**8,6**
HZV PiCCO (l/min)	**5,3**	**1,4**	**2,2**	**7,9**
HZV TEE (l/min)	**5,6**	**1,5**	**2,9**	**8,2**

HZV PAK = Herzzeitvolumen Pulmonaliskatheter
HZV PiCCO = Herzzeitvolumen Pulskonturanalyse
HZV TEE = Herzzeitvolumen anhand transösophagealer Echokardiographie

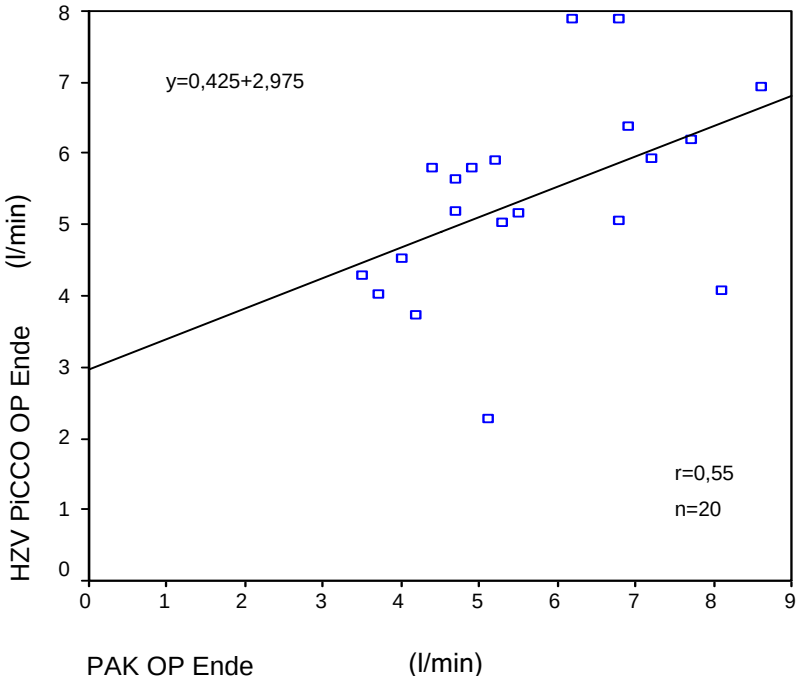


Abbildung 36: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des PiCCO und des Pulmonaliskatheters zum Messzeitpunkt des OP-Endes bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

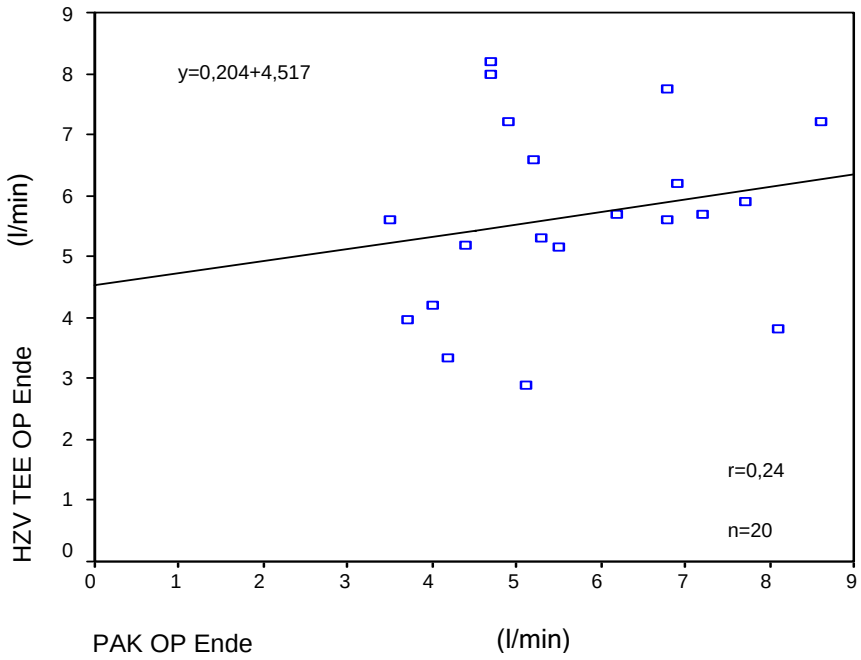


Abbildung 37: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des TEE und des Pulmonaliskatheters zum Messzeitpunkt des OP-Endes bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

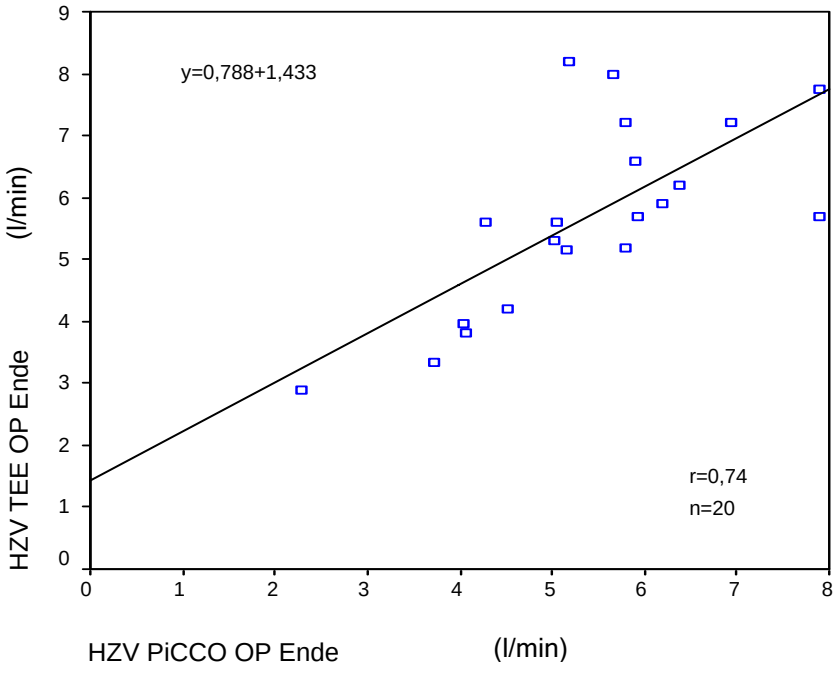


Abbildung 38: Regressionsanalyse vom Herzzeitvolumen gemessen anhand des TEE und des PiCCO zum Messzeitpunkt des OP-Endes bei Patienten einer koronaren Bypass-Operation in OPCAB Technik.

Vergleich der Vorlast Parameter der verschiedenen Methoden

Vergleich der Vorlast Parameter gemittelt über alle Messzeitpunkte

In den folgenden Abbildungen ist die Korrelation von jeweils ITBV, PCWP und ZVD mit dem Schlagvolumenindex graphisch dargestellt, gemittelt über alle Messzeitpunkte (siehe Patienten und Methoden). Es ist zu erkennen, dass nur das ITBV eine Aussage über das tatsächliche Preload zulässt, wenn man davon ausgeht, dass der Schlagvolumenindex bei einem erhöhten Preload ansteigt. Hier liegt die Korrelation bei 0,5, während diese zwischen PCWP und Schlag-volumenindex –0,03 und zwischen ZVD und Schlagvolumenindex bei –0,27 liegt (Abb. 39-41).

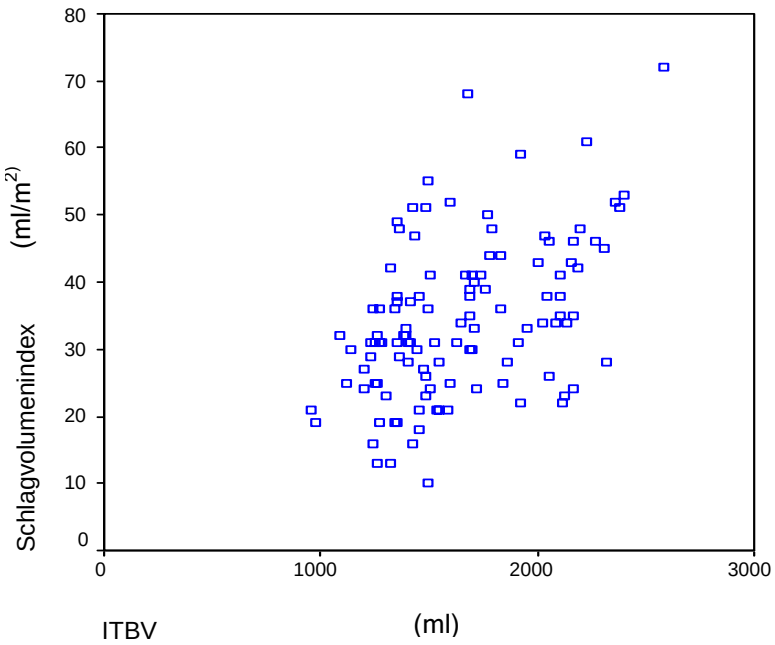


Abbildung 39: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem intrathorakalen Blutvolumen, gemittelt über alle Messzeitpunkte(siehe Patienten und Methoden) bei Patienten während koronarer Bypass-Operation der OPCAB Technik.

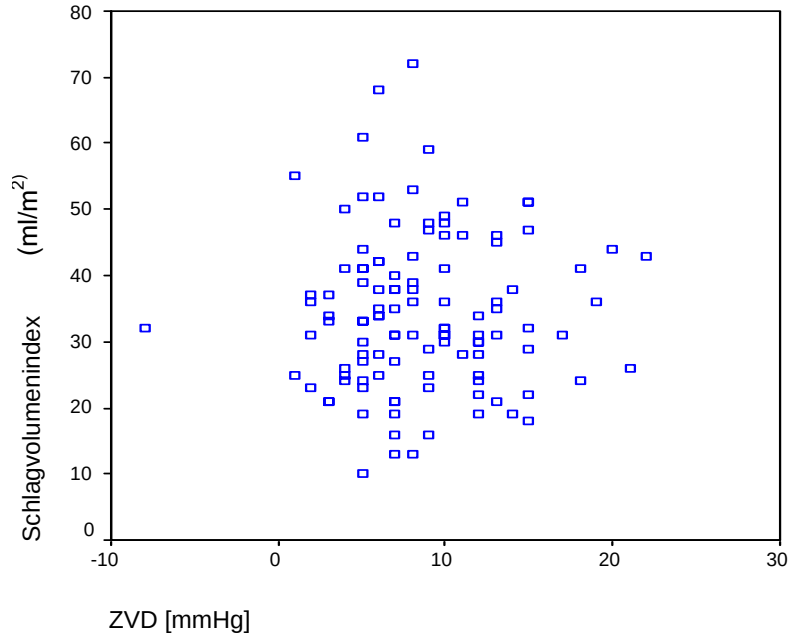


Abbildung 40: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem zentralvenösen Druck, gemittelt über alle Messzeitpunkte (siehe Patienten und Methoden) bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

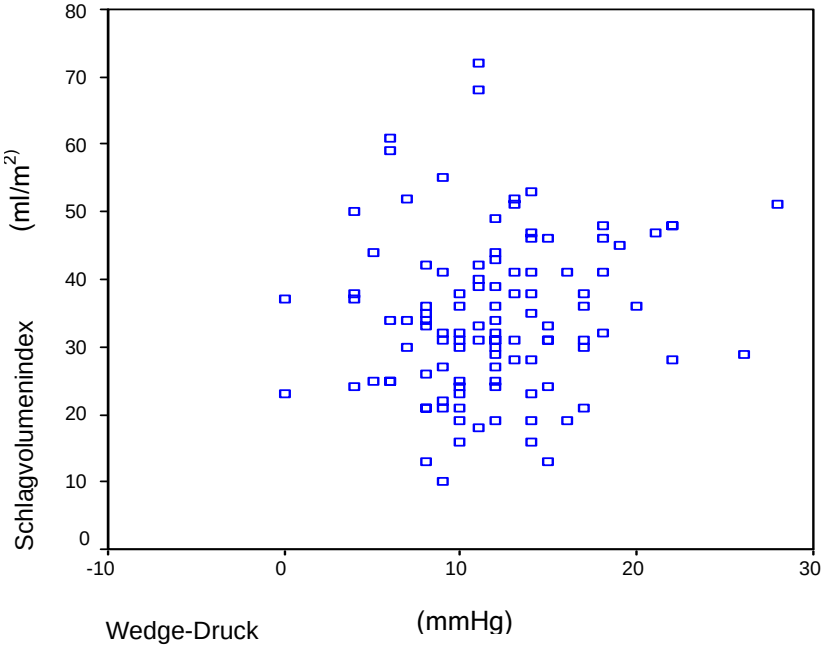


Abbildung 41: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem Wedge-Druck, gemittelt über alle Messzeitpunkte (siehe Patienten und Methoden) bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

Vergleich der Vorlast Parameter an den einzelnen Messzeitpunkten

Nach der Einleitung

In den folgenden Abbildungen ist die Korrelation zwischen dem intrathorakalen Blutvolumen, dem Wedge Druck und dem zentralen Venendruck mit dem Schlagvolumenindex graphisch zum Messzeitpunkt nach der Einleitung dargestellt. Die Korrelation von ITBV und dem Schlagvolumenindex ist deutlich (0,46), während die beiden anderen Parameter keine Übereinstimmung mit dem Schlagvolumenindex zeigen. Zwischen PCWP und Schlagvolumenindex liegt die Korrelation bei 0,13 und bei dem ZVD bei -0,25 (Abb.42-44).

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
ZVD (mmHg)	**7**	**5,4**	**- 8**	**18**
PCWP (mmHg)	**10**	**5,4**	**0**	**22**
ITBV (ml)	**1526**	**356**	**970**	**2200**

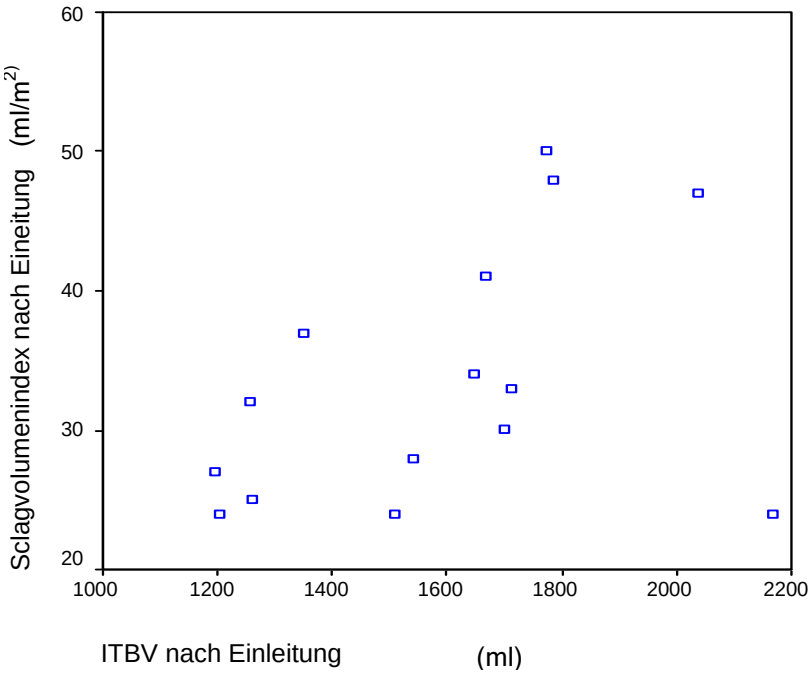


Abbildung 42: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem intrathorakalen Blutvolumen nach der Einleitung bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

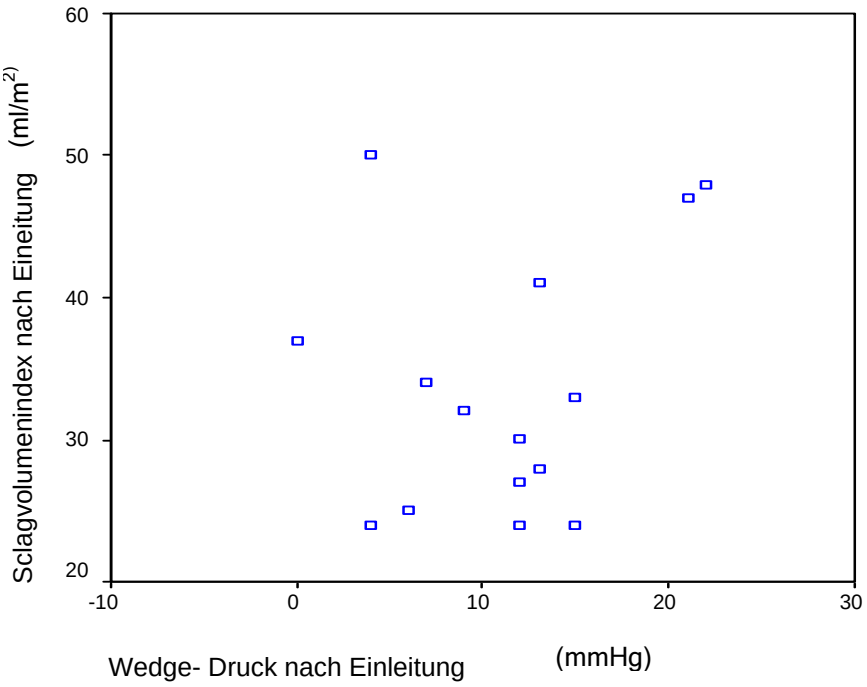


Abbildung 43: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem Wedge-Druck nach der Einleitung bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

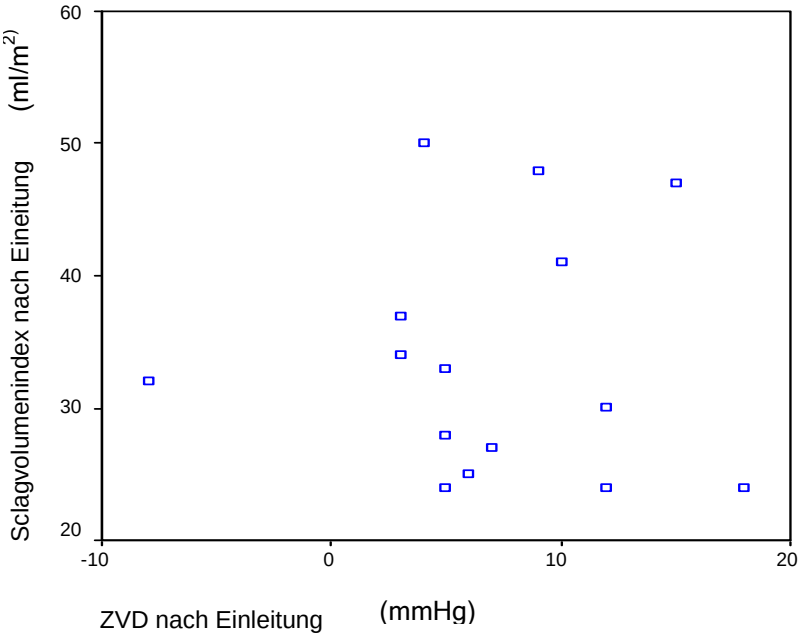


Abbildung 44: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem zentralvenösen Druck nach der Einleitung bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

Nach der Sternotomie

Die folgenden Graphen zeigen die Korrelation der Vorlastparameter kurz nach der Sternotomie. Die Korrelation von ITBV und dem Schlagvolumenindex beträgt 0,4, die von ZVD liegt bei 0,3 und die Korrelation des Wedge Druckes liegt bei 0,48. Daraus lässt sich zu diesem Zeitpunkt der Operation keine überlegene Methode bestimmen (Abb. 45-47).

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
ZVD (mmHg)	**8**	**4**	**1**	**17**
PCWP (mmHg)	**12**	**4**	**0**	**18**
ITBV (ml)	**1676**	**461**	**905**	**2734**

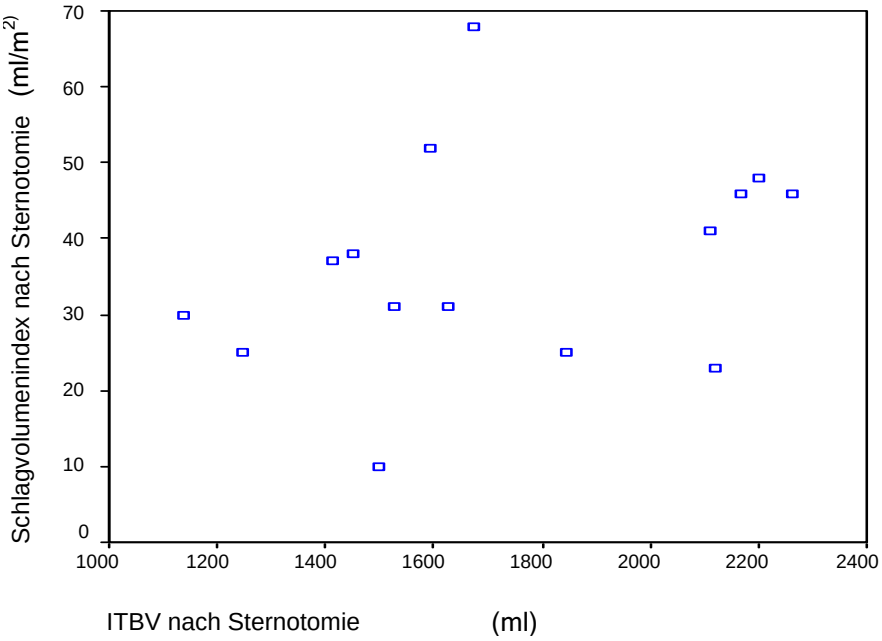


Abbildung 45: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem intrathorakalen Blutvolumen nach der Sternotomie bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

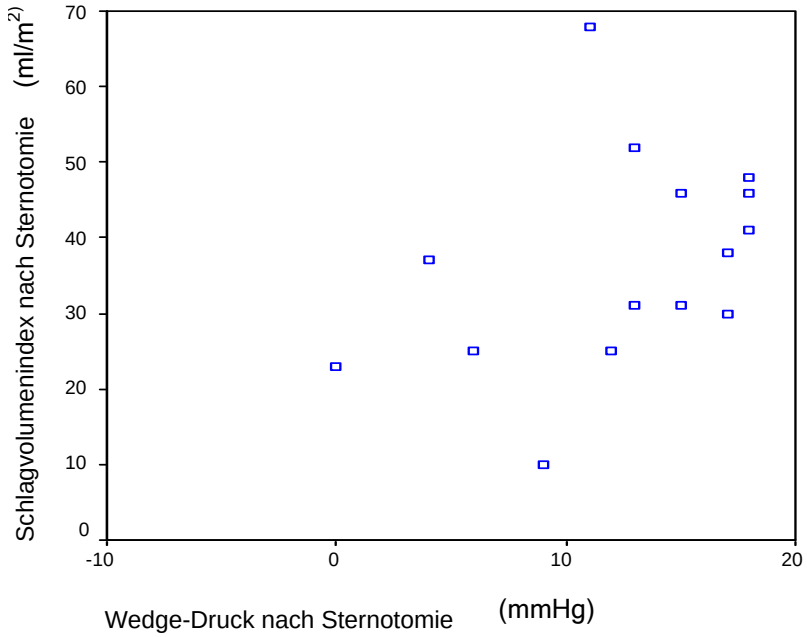


Abbildung 46: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem Wedge-Druck nach der Sternotomie bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

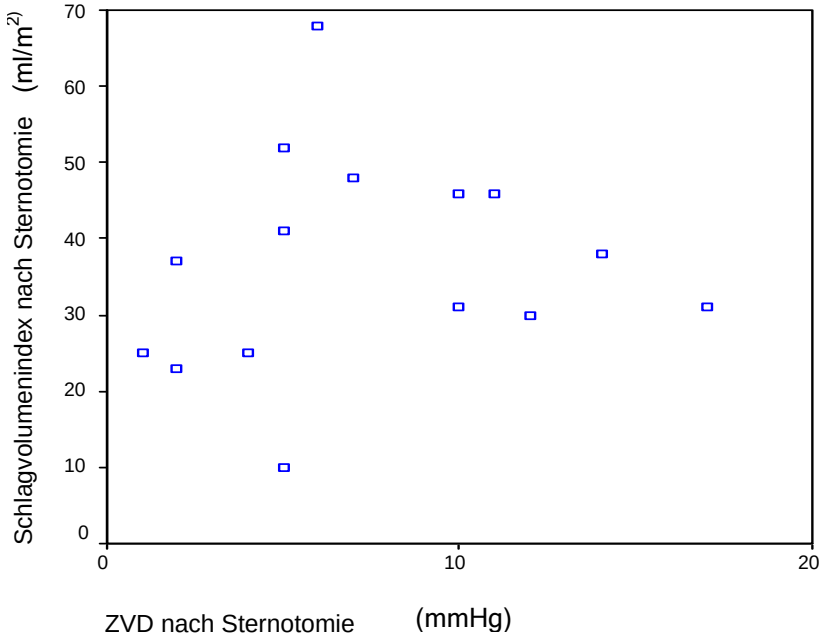


Abbildung 47: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem zentralvenösen Druck nach der Sternotomie bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

Prä-Ischämie

Dargestellt ist die Korrelation zwischen dem intrathorakalen Blutvolumen, dem Wedge Druck und dem zentralen Venendruck mit dem Schlagvolumenindex zur Prä-Ischämie. Die Korrelation von ITBV und dem Schlagvolumenindex ist deutlich (0,53), während die beiden anderen Parameter keine Übereinstimmung mit dem Schlagvolumenindex zeigen. Zwischen PCWP und Schlagvolumenindex liegt die Korrelation bei 0,14 und bei dem ZVD bei -0,035 (Abb.48-50).

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
ZVD (mmHg)	**9**	**3**	**2**	**15**
PCWP (mmHg)	**12**	**3**	**5**	**20**
ITBV (ml)	**1608**	**430**	**840**	**2376**

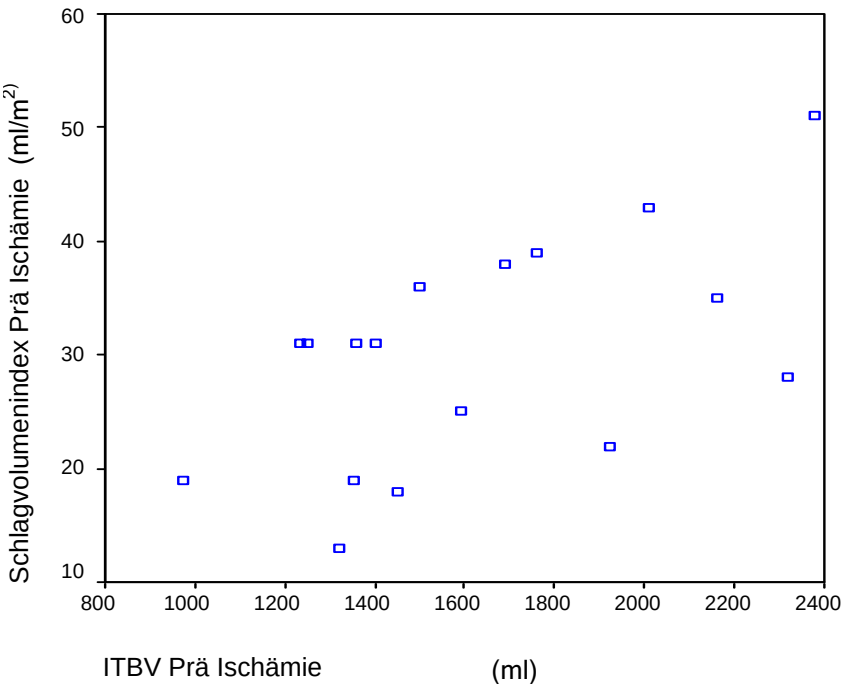


Abbildung 48: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem intrathorakalen Blutvolumen, zum Zeitpunkt der Prä Ischämie bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

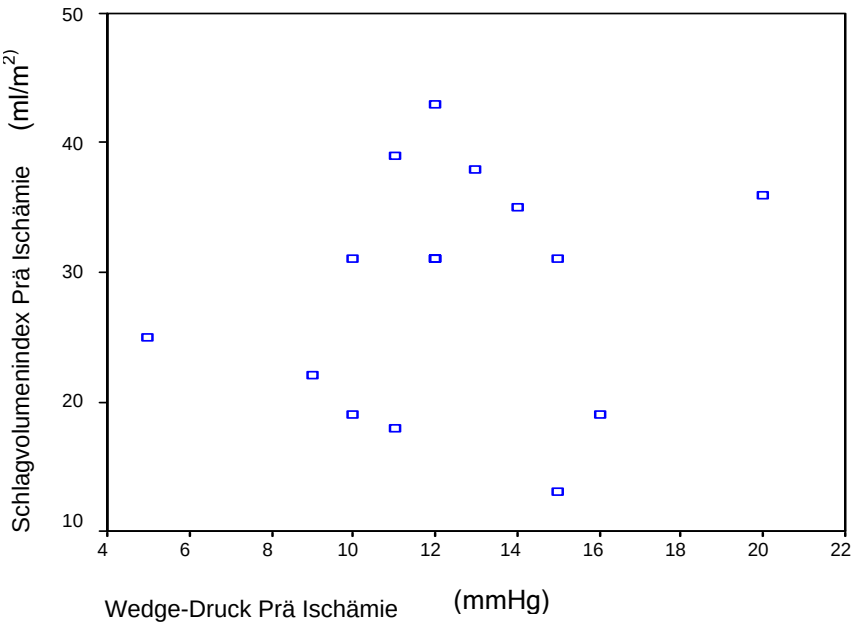


Abbildung 49: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem Wedge-Druck zum Zeitpunkt der Prä Ischämie bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

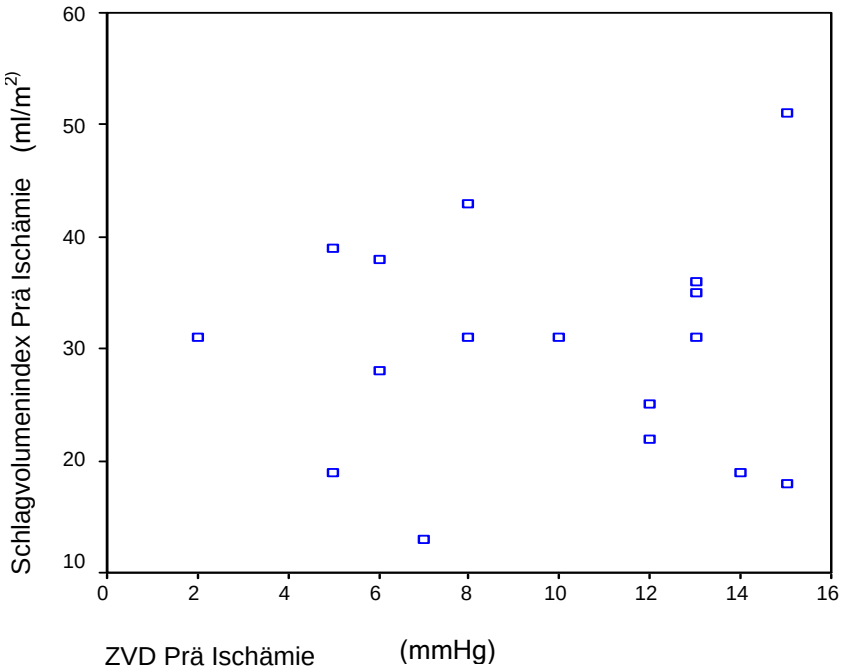


Abbildung 50: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem zentralvenösen Druck zum Zeitpunkt der Prä Ischämie bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

Ischämie

Eine positive Korrelation des intrathorakalen Blutvolumens mit dem Schlagvolumenindex liegt zum Messzeitpunkt der Ischämie vor (0,65). Sowohl der Wedge-Druck, mit einem Korrelationskoeffizienten von –0,4, als auch der ZVD mit einer Korrelation von –0,3 scheinen zu diesem Zeitpunkt eher gegenläufige Werte zum Schlagvolumen anzuzeigen (Abb. 51-53).

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
ZVD (mmHg)	**10**	**4**	**3**	**22**
PCWP (mmHg)	**13**	**5**	**7**	**26**
ITBV (ml)	**1608**	**417**	**812**	**2356**

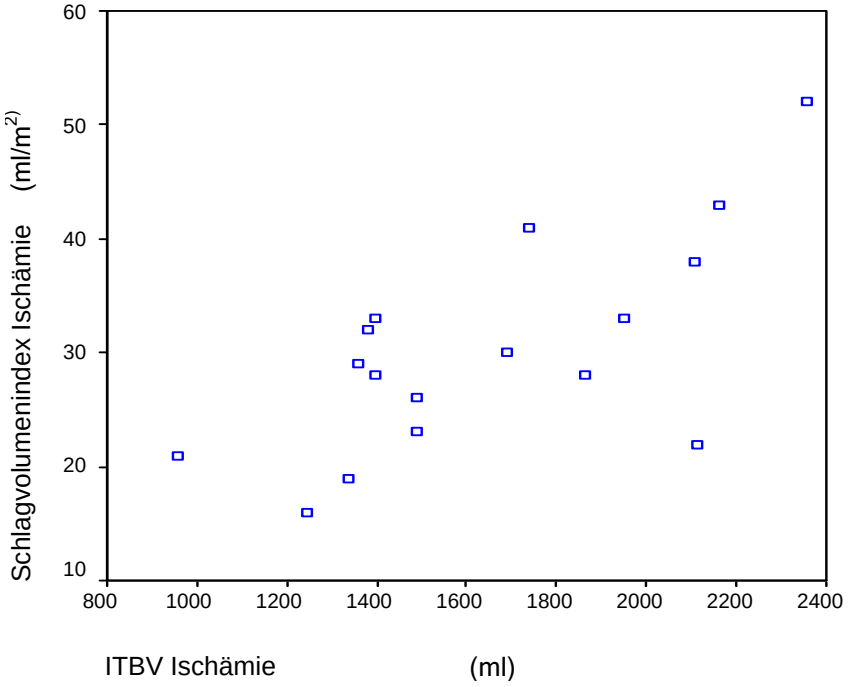


Abbildung 51: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem intrathorakalen Blutvolumen zum Zeitpunkt der Ischämie bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

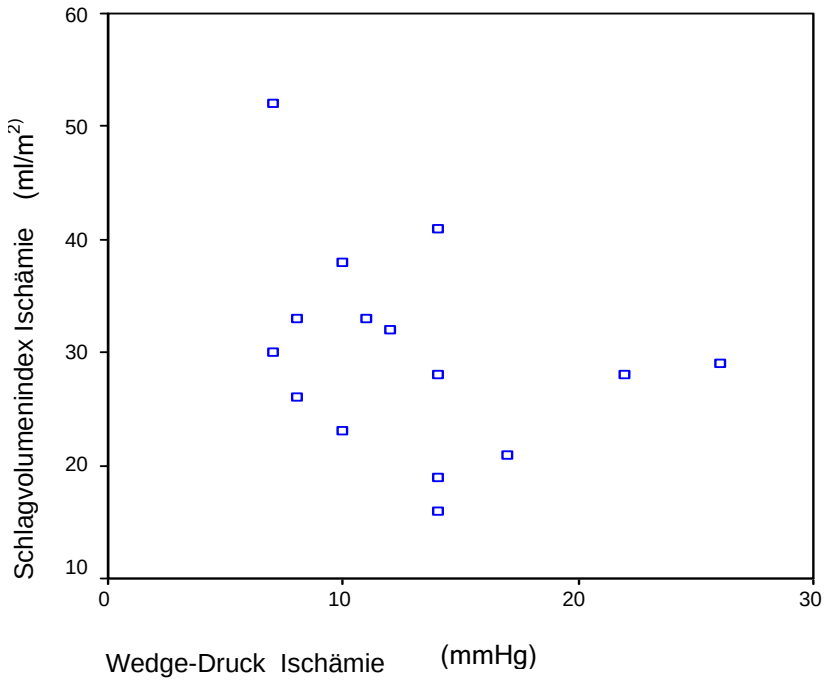


Abbildung 52: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem Wedge-Druck zum Zeitpunkt der Ischämie bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

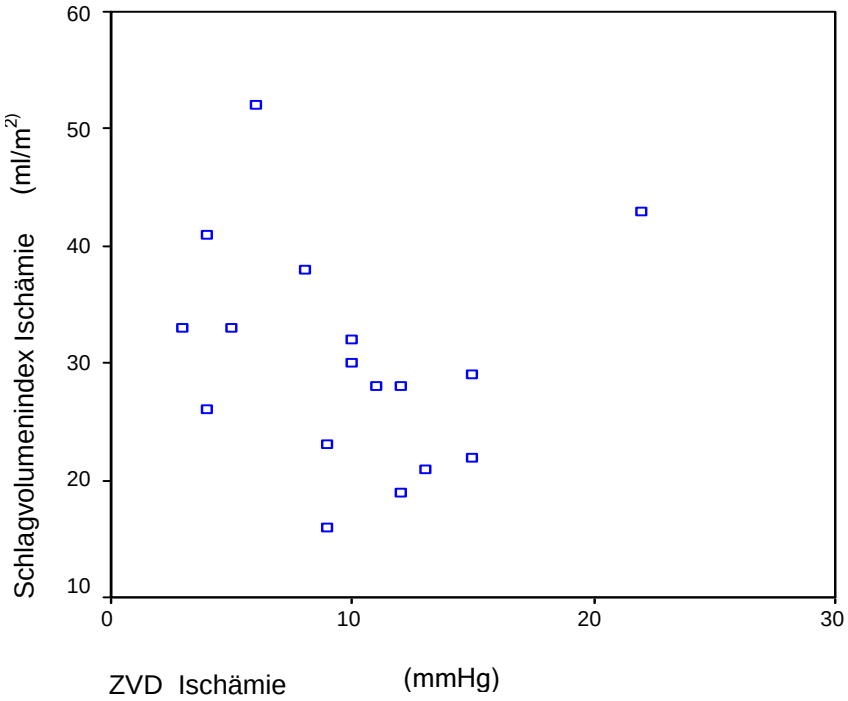


Abbildung 53: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem zentralvenösen Druck zum Zeitpunkt der Ischämie bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

Reperfusion

Zu diesem Messzeitpunkt lässt sich keine Aussage dazu treffen, welche Messmethode adäquate Vorlast Werte angibt, da keiner der untersuchten Parameter mit der Referenzmethode eine hohe Korrelation aufweist. Die Korrelation des intrathorakalen Blutvolumens mit dem Schlagvolumen liegt bei 0,2, die des Wedge-Drucks bei 0,2 und die des zentralvenösen Drucks bei 0,12 (Abb. 54-56).

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
ZVD (mmHg)	9	6	1	21
PCWP (mmHg)	13	5	5	28
ITBV (ml)	1639	406	951	2585

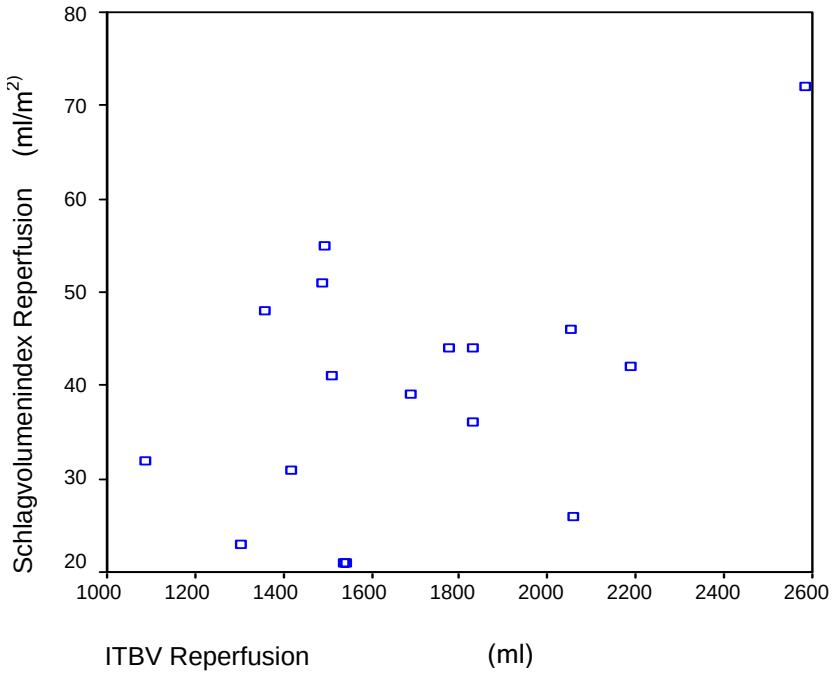


Abbildung 54: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem intrathorakalen Blutvolumen zum Zeitpunkt der Reperfusion bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

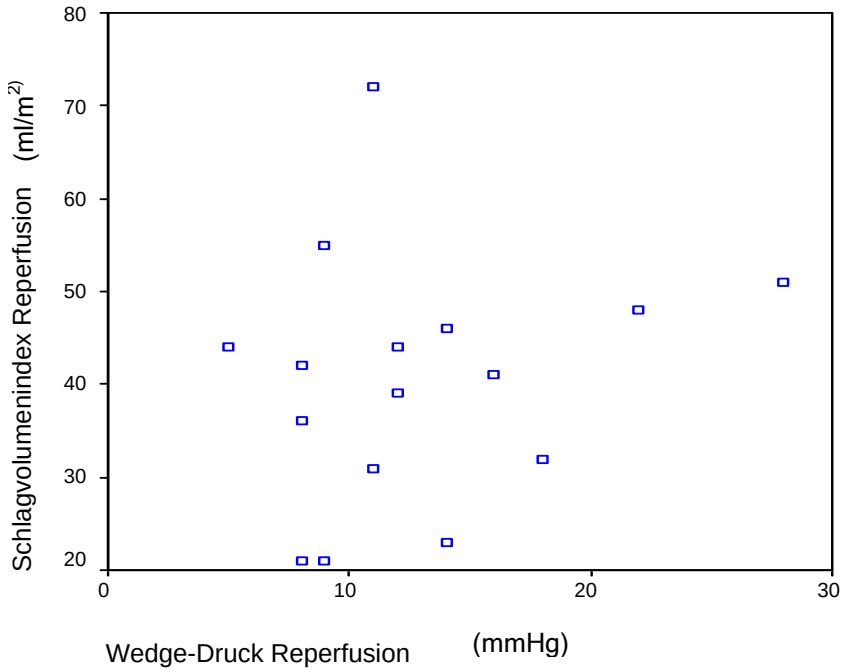


Abbildung 55: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem Wedge-Druck zum Zeitpunkt der Reperfusion bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

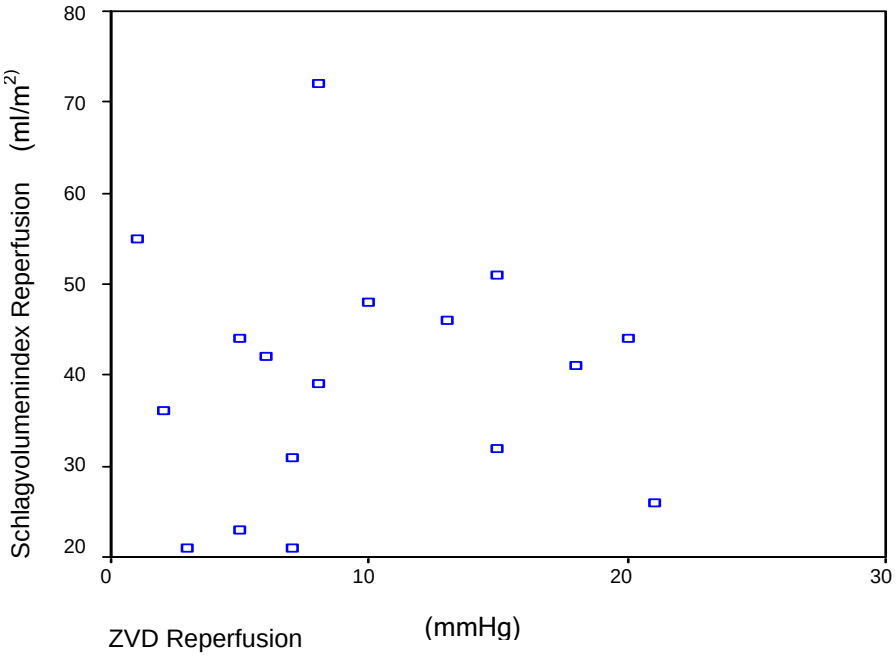


Abbildung 56: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem zentralvenösen Druck zum Zeitpunkt der Reperfusion bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

Thoraxverschluss

Die folgenden Abbildungen zeigen die graphische Darstellung der Korrelation des intrathorakalen Blutvolumens, des Wedge-Drucks und des zentralvenösen Drucks mit dem Schlagvolumenindex gemessen kurz nach dem Verschluß des Thorax. Dazu liegt die Korrelation des intrathorakalen Blutvolumens bei 0,3, die des Wedge Druck bei 0,4 und die des zentralvenösen Drucks bei 0,3 (Abb. 57-59).

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
ZVD (mmHg)	**7**	**3**	**3**	**19**
PCWP (mmHg)	**11**	**3**	**6**	**19**
ITBV (ml)	**1602**	**422**	**788**	**2304**

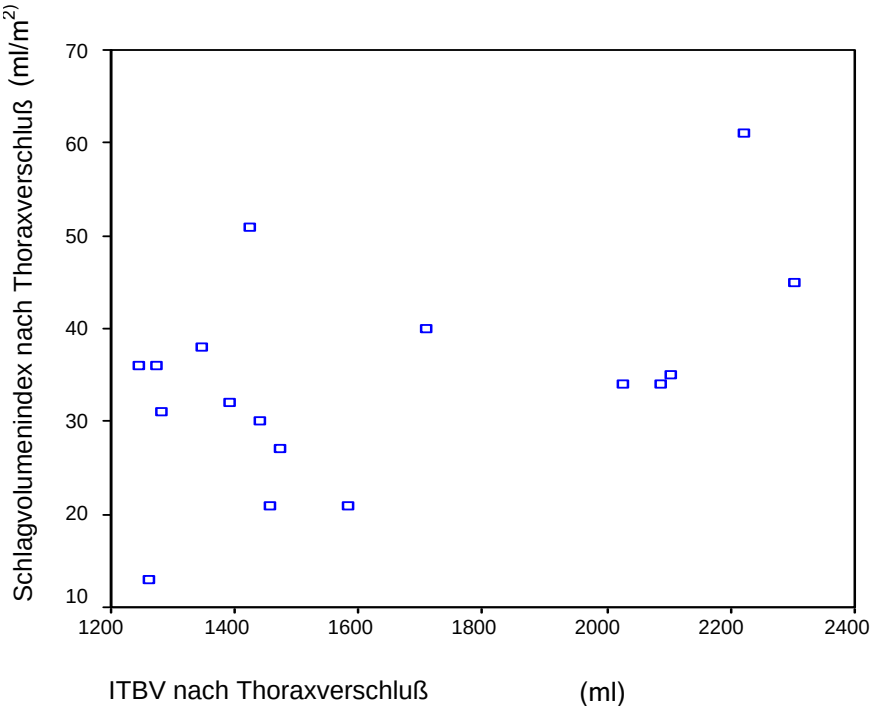


Abbildung 57: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem intrathorakalen Blutvolumen zum Zeitpunkt des Thoraxverschlußes bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

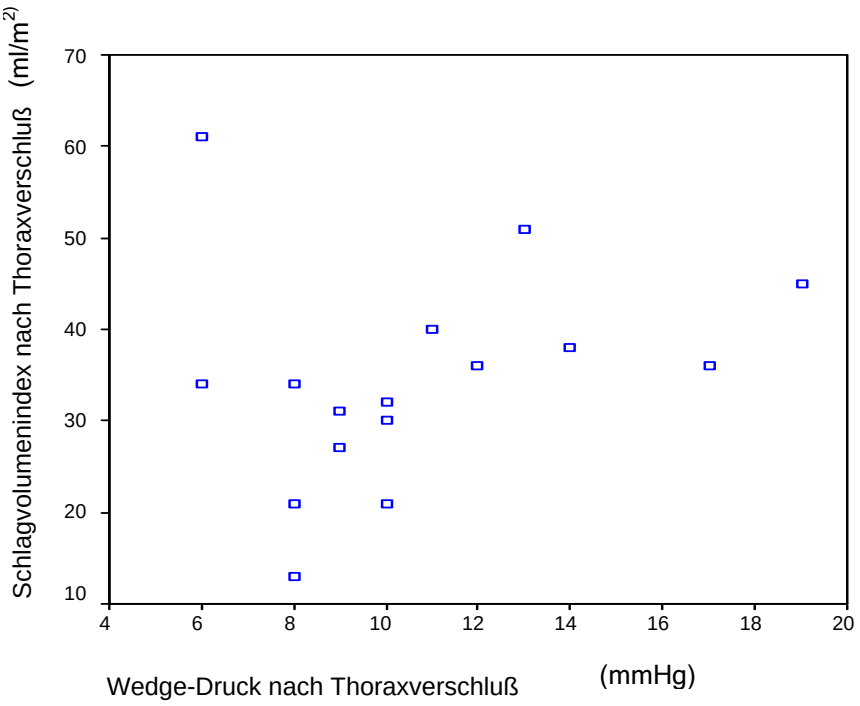


Abbildung 58: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem Wedge-Druck zum Zeitpunkt des Thoraxverschlußes bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

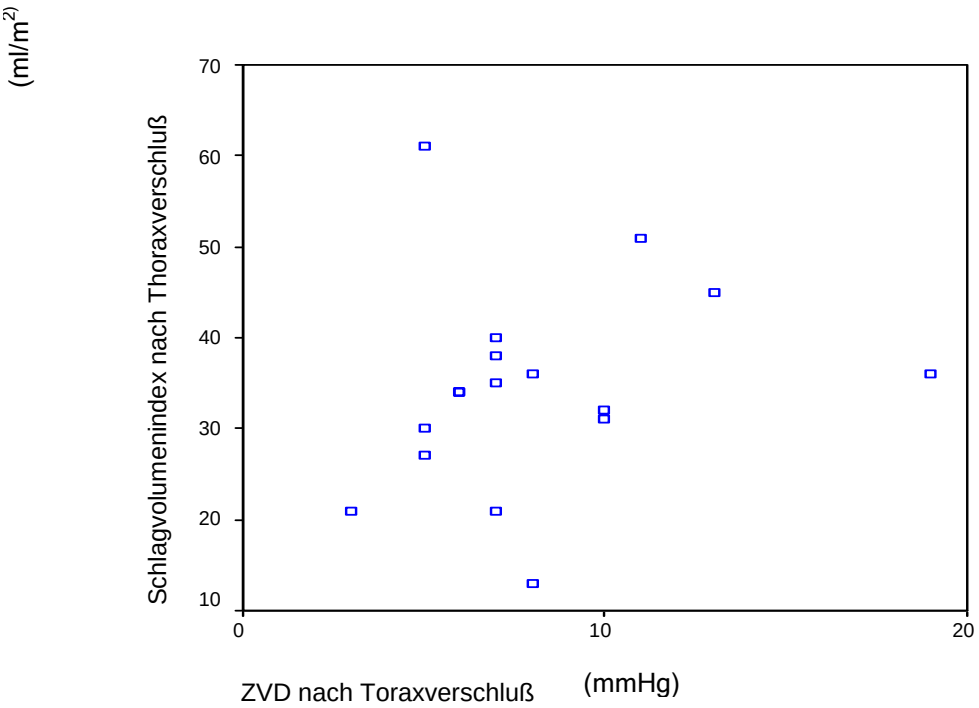


Abbildung 59: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem zentralvenösen Druck zum Zeitpunkt des Thoraxverschlußes bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

OP-Ende

Zum OP-Ende zeigt sich bei den hier untersuchten Vorlastparametern nur eine Übereinstimmung des ITBV mit dem Referenzparameter SVI mit einer Korrelation von (0,44). Die beiden anderen Parameter zeigen keine Übereinstimmung mit dem Schlagvolumenindex bei Korrelationen von 0,16 zwischen PCWP und Schlagvolumenindex und ZVD und SVI -0,01 (Abb. 60-62).

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
ZVD (mmHg)	**8**	**2**	**4**	**12**
PCWP (mmHg)	**10**	**3**	**4**	**17**
ITBV (ml)	**1572**	**391**	**809**	**2402**

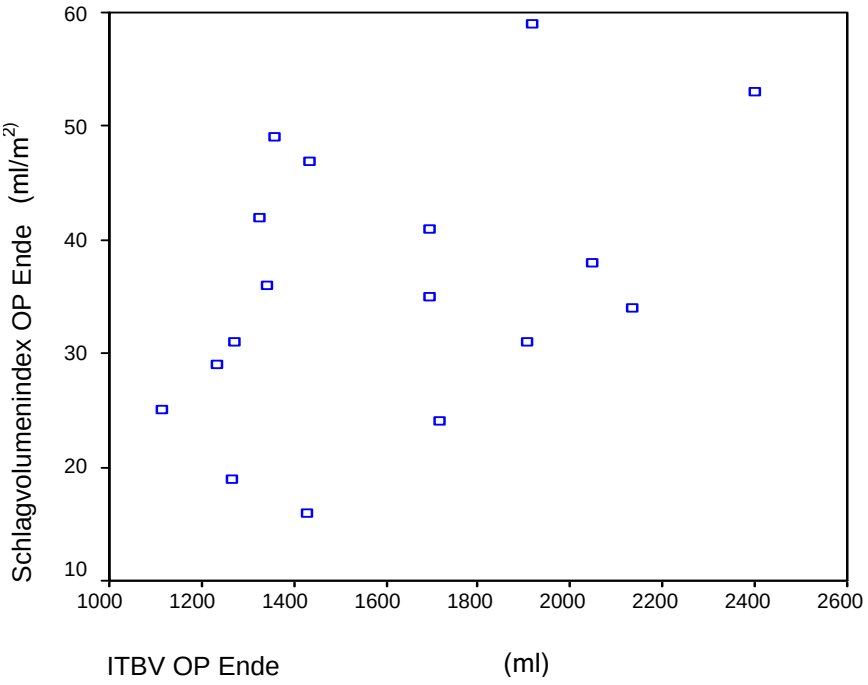


Abbildung 60: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem intrathorakalen Blutvolumen zum OP-Ende bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

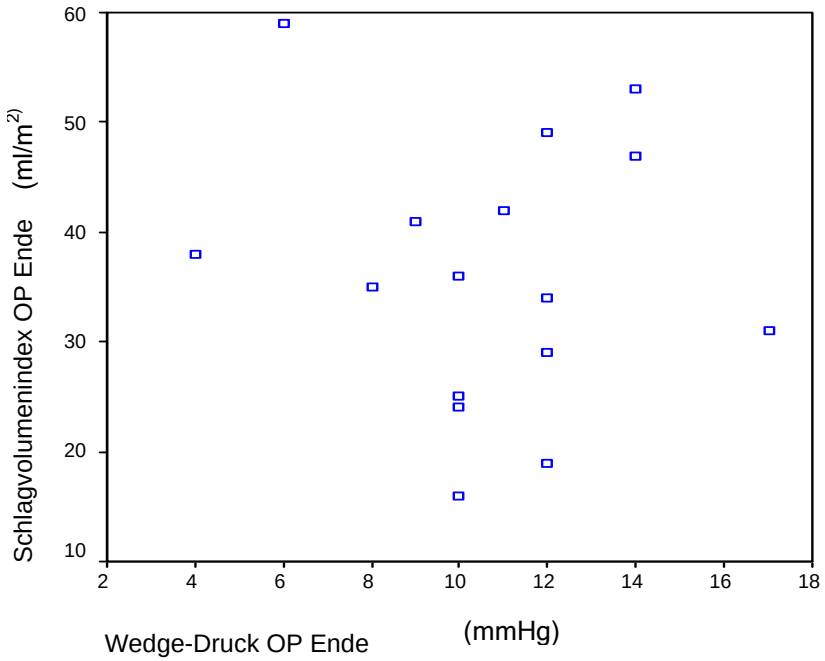


Abbildung 61: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem Wedge-Druck zum OP-Ende bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

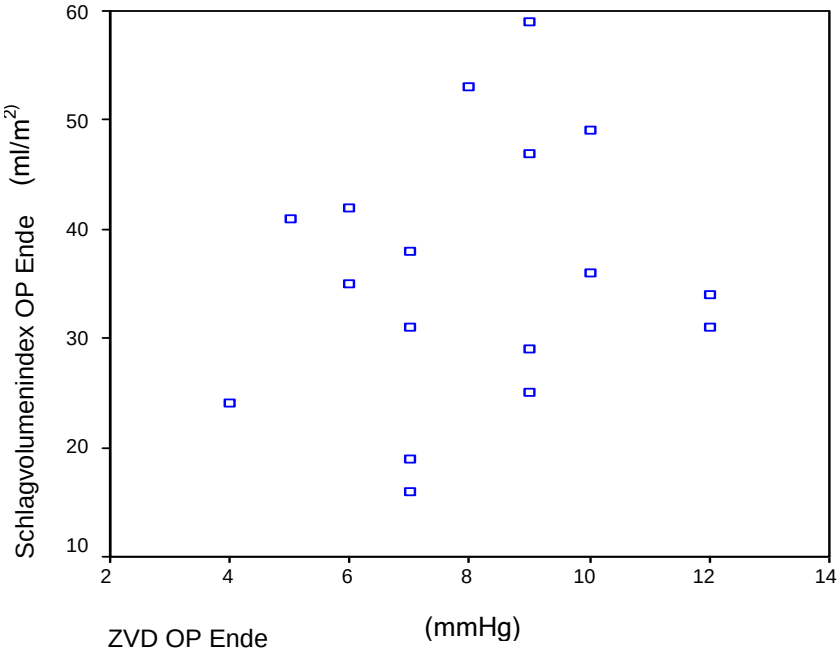


Abbildung 62: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Schlagvolumenindex und dem zentralvenösen Druck zum OP-Ende bei Patienten während koronarer Bypass-Operation in OPCAB Technik.

4. Diskussion

In der vorliegenden Arbeit sollte überprüft werden, welche Methoden der intraoperativen Überwachung bei einer Bypass Operation in OPCAB Technik einzusetzen sind, um eine optimale Überwachung des Patienten zu gewährleisten. Untersucht wurden hierzu die Herzzeitvolumenmessungen mittels Pulmonaliskatheter, Pulskonturanalyse und transösophagealer Echokardiographie. Anhand dieser drei Verfahren sind an 20 Patienten zeitgleiche Messungen des Herzzeitvolumens durchgeführt worden. Des Weiteren sollten die Vorlastparameter der verschiedenen Messmethoden miteinander verglichen und evaluiert werden.
Die Korrelation der Herzzeitvolumina bezogen auf alle Messzeitpunkte zwischen Pulmonaliskatheter und TEE lag bei 0,7, die von Pulmonaliskatheter und PiCCO bei 0,75. Die stärkste Korrelation zeigten die Messungen des TEE mit dem PiCCO von 0,92. Diese Messergebnisse sprechen dafür, dass insgesamt alle drei Messmethoden zur Erfassung des Herzzeitvolumens übereinstimmen. Somit könnte zunächst davon ausgegangen werden, dass alle drei Methoden während OPCAB-Operationen geeignet wären. Bei genauer Auswertung der Ergebnisse fällt jedoch auf, dass die vom Pulmonaliskatheter angezeigten Werte zum Messzeitpunkt der Reperfusion der zuvor ischämischen Koronararterie signifikant zu niedrig sind. Eine zeitnahe Erfassung des Herzzeitvolumens ist zu diesem Zeitpunkt mit dem Pulmonaliskatheter nicht möglich und damit eine lückenlose Überwachung des Patienten nicht gegeben.

4.1 Kritik an der Methode

Versuchsaufbau

Um eine klinische Evaluation einer Methode zur Messung des Herzzeitvolumens durchzuführen, muss ein weiteres, anerkanntes Verfahren hinzugezogen werden. Bei der Auswahl von Referenzverfahren liegt das Problem vor allem darin, eine möglichst exakte Technik zu finden, die das tatsächliche Herzzeitvolumen darstellt.

Obwohl die Bestimmung des Herzzeitvolumens inzwischen für die Diagnostik und Therapie sowohl während einer Herzoperation, als auch auf der Intensivstation zu einem nicht mehr verzichtbaren Parameter geworden ist, kann das tatsächliche, pro Zeiteinheit ausgeworfene Blutvolumen mit keinem Verfahren direkt erfasst und bestimmt werden. Das wahre Herzzeitvolumen lässt sich somit nicht absolut zuverlässig bestimmen. In einer klinischen Evaluierung ist es dennoch möglich, die Reproduzierbarkeit einer Methode zu ermitteln. Auch kann der Vergleich mit anderen Methoden einen Überblick über die Zuverlässigkeit schaffen. Allerdings ist nicht nur die Zuverlässigkeit der Methoden zu beachten, sondern in einem ganz besonderen Maße müssen das Risiko für den Patienten und der technische Aufwand berücksichtigt werden. Kritisch zur Methode der Untersuchung muss festgehalten werden, dass die Interpretation verschiedener Ergebnisse zum Teil sehr von der klinischen Erfahrung des einzelnen Untersuchers abhängig ist. Der Vergleich der Herzzeitvolumenbestimmung anhand des PiCCO, des Pulmonaliskatheters sowie der transösophagealen Echokardiographie ist daher nicht unproblematisch. Die Bestimmung des Herzzeitvolumens mit dem Pulmonaliskatheter wird in einem Abstand von jeweils 30 Sekunden automatisch aktualisiert. Das PiCCO Gerät misst hingegen bei jeder Messung über einen variierenden Zeitraum, der ebenfalls bis zu 30 Sekunden dauern kann. Diese Messung wird zudem drei Mal direkt aufeinander folgend durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Das heißt, dass jegliche Änderungen des Herzzeitvolumens, das mit dem Pulmonaliskatheter gemessen wird, während der drei wiederholten Messungen mit dem PiCCO zu berücksichtigen ist. Der Vergleich der eben genannten invasiven Methoden mit der transösophagealen Echokardiographie erweist sich als schwierig und muss zeitlich genau abgestimmt werden. Es muss darauf geachtet werden, dass die Messungen und die Videoaufnahme des PW-Dopplers, sowie die Dokumentation der Herzfrequenz über den gleichen Zeitraum erfolgt, wie die des Pulmonaliskatheters und des PiCCO, um die ermittelten Parameter vergleichbar zu machen.

Des Weiteren ist zu beachten, dass anhand des Pulmonaliskatheters das Herzzeitvolumen für den Lungenkreislauf bestimmt wird, wohingegen das PiCCO und die transösophageale Echokardiographie das Herzzeitvolumen für den Körper-

kreislauf anzeigen. Anhand dieser Versuchsbedingungen ist davon auszugehen, dass die in dieser Studie erhobenen Daten reproduzierbar sind. Die Verlässlichkeit der transpulmonalen Thermodilution anhand des PiCCO sowie Herzzeitvolumenmessungen des Pulmonaliskatheters und der transösophagealen Echokardiographie wurde bereits untersucht [17,31,76,64] und unterstützen die Ergebnisse der hier vorliegenden Studie.

Zugleich sollte in dieser Arbeit untersucht werden, wie die Aussagen, die anhand des Pulmonaliskatheters und des PiCCO zu der Vorlast des Herzens getroffen werden, zu bewerten sind. Auch hier ist es, ähnlich dem Problem der Erfassung der Herzzeitvolumina, schwierig, die Messwerte in einer klinischen Studie exakt zum selben Zeitpunkt eines Messblocks zu bestimmen.

In verschiedenen Studien zur Evaluation der Vorlastparameter wurde als Referenzwert, der zum Vergleich heranzuziehen gilt, der Schlagvolumen Index gewertet [66] und daher auch in der hier vorliegenden Arbeit als Bezugswert verwendet. Ein Vergleich der anhand der Thermodilutionsmethode mit dem PiCCO durchgeführten Messungen mit den Einzelwerten von Wedge- und zentralem Venendruck, konnte nur durch die Mittelung dieser Einzelwerte über den Zeitraum eines gesamten Messzeitraumes mit drei aufeinander folgenden Thermodilutionsmessungen erfolgen. Dazu wurden alle Änderungen des ZVD berücksichtigt, und der Wedge-Druck mehrmals während eines Messzeitpunktes bestimmt.

Unter klinischen Bedingungen liegen die Vorteile der in dieser Studie untersuchten Methoden darin, dass alle Verfahren die Durchführung der Messung bei einem relativ geringen technischen Aufwand erlauben. Auf eine zusätzliche Belastung des Patienten durch die Gabe von Farbstoffen oder Lithium, wie bei anderen Dilutionsverfahren üblich, kann hier verzichtet werden [7,48]. Somit sind alle drei untersuchten Methoden in der Klinik praktisch einfach durchführbar.

Versuchsdurchführung

Trotz Optimierung der Versuchsdurchführung können die Daten anhand verschiedener Fehlerquellen verfälscht werden. Durch ein Anliegen der Ka-

theterspitze an der Gefäßwand oder die unterschiedliche Durchblutung von verschiedenen Arealen der Lunge hätte es zu verfälschten Bestimmungen der Herzzeitvolumina und des Wedge–Drucks kommen können [11,53,81,82]. Dieses konnte durch regelmäßige Lagekontrollen ausgeschlossen werden. Die Kontrolle der korrekten Lage des Pulmonaliskatheters erfolgte anhand der Analyse der Druckkurve. Die Genauigkeit der intravasalen Druckmessverfahren, sowie die Aufzeichnung der Beatmungsparameter wurden nicht überprüft, da davon auszugehen war, dass die elektronischen Druckaufnehmer, sowie die Anzeige des Beatmungsgerätes den derzeitigen Anforderungen entsprechen.
Die Lage des peripheren arteriellen Katheters wurde durch die Überwachung der arteriellen Druckkurve überprüft. Bei Erwachsenen ist die Möglichkeit, dass der Katheter in der Aorta positioniert liegt durch die Länge des Katheters limitiert. Die zentrale Positionierung der Katheterspitze im Gefäßlumen konnte unter den klinischen Bedingungen nicht nachgeprüft werden.
Auf zusätzliche belastende Röntgenkontrollen zur Überprüfung des zentralvenösen Katheters, des Pulmonaliskatheters und des arteriellen Katheters wurde im Rahmen dieser Studie wie unter üblichen klinischen Bedingungen verzichtet.

Um keine fehlerhaften oder qualitativ schlechten Thermodilutionsmessungen zu dokumentieren, wurde die Qualität jeder einzelnen Kurve durch genaue Betrachtung beurteilt und bei Bedarf wiederholt. Um eine möglichst gleichmäßige Indikatorverdünnungskurve zu erhalten, wird in Studien verschiedener Autoren die Injektion des Kältebolus automatisch ausgeführt [37]. Diese Möglichkeit bestand im Rahmen dieser Arbeit nicht. Bei Durchführung der Thermodilution von Hand durch verschiedene Personen kann die Injektion des Kältebolus, durch unterschiedlichen Kraftaufwand, zu großen Differenzen in der Form der Indikatorkurve führen, und so zu Fehlern in der berechneten Fläche [61]. Um diesen auszuschließen, wurden in dieser Studie die Kältebolusinjektionen durch dieselbe Person geleistet. Dadurch konnten größere Abweichungen in der Injektionstechnik minimiert werden, Kontinuität und Kraftaufwand waren weitgehend gleich während der verschiedenen Messungen. Von Hand ausgeführte Messungen entsprechen dem klinischen Standard und wurden auch in anderen Studien zum Vergleich des Herzzeitvolumens angewandt [7,22,55].

Um möglichst standardisierte Werte für die Bestimmung des Herzzeitvolumen mit dem TEE zu erreichen, sowie die Tatsache, dass die Einschätzung von Kontraktilität und Wandbewegungsstörungen des Herzens in einem gewissen Grad abhängig von der beurteilenden Person sind, wurde diese auch immer von demselben, in der Echokardiographie erfahrenen Untersucher, durchgeführt.
Zusammenfassend lässt sich davon ausgehen, dass aufgrund der regelmäßigen Kontrollen sowohl der Indikatorkurven als auch der Katheterlage von zuverlässigen Messwerten ausgegangen werden kann.

4.2 Vergleich der Methoden

PiCCO versus Pulmonaliskatheter

Der Vergleich der beiden Thermodilutionsmethoden zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung miteinander. Das Herzzeitvolumen der transpulmonalen Messungen mit dem PiCCO liegt allerdings im Schnitt um etwa 0,2 l/min höher, als das der pulmonalarteriellen Bestimmung. Insgesamt ist der Unterschied dieser beiden Methoden jedoch im klinischen Alltag zu vernachlässigen. Abweichungen dieser Art werden auch von anderen Autoren beschrieben. Es wäre denkbar, dass sie durch die verschiedenen Messorte bedingt sind. Als mögliche Ursache wird ein Indikatorverlust von 3% bis 4% während der transpulmonalen Passage angenommen, welcher insbesondere bei niedrigen Herzzeitvolumina Auswirkungen auf die transpulmonalen Messungen haben könnte [7]. Dieser Umstand würde zu einer Überschätzung des Herzzeitvolumens anhand der transpulmonalen Messung führen. Ein Indikatorverlust konnte jedoch in einer experimentellen Studie an Hunden nicht nachgewiesen werden [1]. Auch in der hier durchgeführten Studie gibt es für einen Indikatorverlust bei der pulmonalen Passage keinerlei Anhaltspunkte als Ursache für die differierenden Herzzeitvolumina. Alternativ wurde ein niedrig gemessenes Herzzeitvolumen anhand transpulmonaler Technik damit begründet, dass der eingesetzte Indikator frühzeitig rezirkuliert und es dadurch zu einer Verfälschung der beobachteten Werte kommt [72]. Eine weitere Arbeit zeigte eine durch den Kältebolus ausgelöste Bradykardie, die zu einer kurzfristigen Verminderung des Herzzeit-

volumens geführt hat [29]. In dieser Studie zur Evaluierung des Herzzeitvolumens während einer OPCAB-Operation konnten Bradykardien im Zusammenhang mit der Injektion des Kältebolus nicht beobachtet werden.

Eine ebenfalls denkbare Ursache für eine fehlerhafte Bestimmung des Herzzeitvolumens liegt in der Schwankung der Körpertemperatur. Veränderungen der Bluttemperatur können zu einer Abweichung der Basislinie führen. Dabei ist zwischen schnellen, durch die Atmung bedingten Temperaturänderungen und langsamen Änderungen bei Anstieg oder Abfall der Körpertemperatur durch Fieberschübe oder Hypo- beziehungsweise Hyperthermie zu unterscheiden [53, 81, 84]. Obwohl die Patienten während einer OPCAB Operation in einer Normothermie gehalten werden sollen, kühlten fast alle Patienten unter eine zentral gemessene Körpertemperatur von 36°C aus. Um diesem vorzubeugen, wurden die Patienten auf einer Wärmematte gelagert. Es ist denkbar, dass es unter diesen Umständen zu einer ungleichmäßigen Wärmeverteilung bei einzelnen Patienten gekommen ist, wodurch eine Differenz der Bluttemperatur zwischen Vena cava superior und Vena cava inferior entstehen könnte. Dieses ist allerdings in dieser Arbeit nicht untersucht worden. Eine darauf basierende Verfälschung der Messwerte scheint jedoch eher unwahrscheinlich.

Des Weiteren haben Änderungen der intrathorakalen Druckverhältnisse ebenfalls Einfluss auf das Herzzeitvolumen. Sobald der Beatmungsdruck ansteigt, fällt zunächst das Herzzeitvolumen des rechten Ventrikels ab. Die Verminderung des Herzzeitvolumens des linken Ventrikes folgt mit einer Verzögerung von ungefähr zwei Herzschlägen [78]. Diese Verzögerung sollte jedoch bei der Thermodilutionsmessung durch die Mittelung über einen Messzeitraum unerheblich sein.
Allerdings kann die Messung beeinflusst werden, da die Berechnung des Herzzeitvolumens über die Indikatorverdünnungskurve einen konstanten Blutfluss voraussetzt. Bei beatmeten Patienten ist diese Situation jedoch nicht gegeben.
Die verschiedenen Messorte der transpulmonalen (PiCCO) und pulmonalarteriellen Thermodilution (Pulmonaliskatheter), werden als Ursache für die unterschiedlich bestimmten Schlagvolumina, besonders bei beatmeten Patienten, immer wieder beschrieben und in der Literatur häufig diskutiert [5,33,34,37].

Während eines Atemhubs entstehen intrathorakale Druck- und Flussänderungen, die sich bei jedem Atemzug zyklisch wiederholen. Durch diese Flussänderung schwankt das pulmonalarteriell berechnete Herzzeitvolumen innerhalb eines Atemzyklus [2]. Veränderungen des Herzzeitvolumens innerhalb eines Atemzyklus können bei linksventrikulärem Herzzeitvolumen bis 40%, bei rechtsventrikulärem bis zu 70% zwischen den einzelnen Messungen betragen [37,38]. Die durch den Atemzyklus bedingten Schwankungen werden bei der transpulmonalen Thermodilution (PiCCO) über die längere Messstrecke besser gemittelt. Auf der anderen Seite verläuft die Indikatorkurve der transpulmonalen Thermodilution wesentlich flacher und protrahierter als die rein pulmonalarterielle (Pulmonaliskatheter), was eine höhere Anfälligkeit für thermales Rauschen zur Folge hat. Bei Problemen dieser Art kann die Reproduzierbarkeit der transpulmonalen Thermodilution mit einem größeren Kältebolus verbessert werden [31,72]. Daher wurde hier ein Bolus von 20 ml zur transpulmonalen Thermodilution eingesetzt. Eine fehlerhafte Dilutionstechnik konnte durch die Kontrolle der Indikatorkurven und der Injektattemperatur ausgeschlossen werden.

Diese beiden Methoden zur Bestimmung des Herzzeitvolumens ergaben wie schon erwähnt vergleichbare Ergebnisse. Eine mittlere Abweichung von 0,2 l/min scheint klinisch insgesamt nicht relevant. Nur an dem Messpunkt zum Zeitpunkt der Reperfusion zeigt sich ein signifikanter Unterschied. Hier scheint das Herzzeitvolumen, das durch den Pulmonaliskatheter ermittelt wird, wahrscheinlich technisch bedingt, im Vergleich zu dem mit dem PiCCO gemessenen zu niedrig. Hier liegt eine statistisch und klinisch signifikante Abweichung von 0,9 l/min vor. Auffällig ist, dass der Pulmonaliskatheter zum Messpunkt des Thoraxverschluß Herzzeitvolumina misst, welche den Werten der Pulskonturanalyse und des TEE zur Reperfusion entsprechen. Daher ist von einer zeitlich verzögerten Messung des Pulmonaliskatheters auszugehen. Ansonsten zeigen Korrelation und Regressionsanalysen eine gute Übereinstimmung von Pulmonaliskatheter und Pulskonturanalyse.

An dieser Stelle sei allerdings nochmals auf die immer wieder beschriebenen Komplikationen, die durch den Einsatz des Pulmonaliskatheters zustande kommen, verwiesen. Neben Herzrhythmusstörungen, Infektionen, Sepsis, Endokarditis, Thrombosen und Pulmonalarterienrupturen, sowie die Perforation des

rechten Ventrikels, wurde in einer Studie eine längere Liegedauer auf der Intensivstation mit insgesamt längerem Krankenhausaufenthalt, sowie eine erhöhte Mortatilät festgestellt [15,40,57,79,89]. Rege wurden in der Fachliteratur die Ergebnisse der retrospektiv durchgeführten *Connors* Studie diskutiert [15]. Diese Studie vergleicht bei Patienten mit und ohne Pulmonaliskatheter bei gleicher Art und Schwere der Erkrankung die Verweildauer auf der Intensivstation und die Mortalität. Patienten ohne Pulmonaliskatheter haben demnach eine deutlich kürzere Liegezeit auf der Intensivstation und eine signifikant höhere Überlebensrate [15]. Weitere Untersuchungen über die in dieser Studie getroffenen Aussagen sind notwendig, um die Hintergründe genauer beurteilen zu können. Darauf sollte in der hier vorliegenden Studie allerdings nicht eingegangen werden, wobei der Einsatz des Pulmonaliskatheters bei allen Patienten dieser Studie komplikationslos verlief.

Die transpulmonale Thermodilution mit dem PiCCO zeichnet sich im Vergleich mit dem Pulmonaliskatheter dadurch aus, dass dieses Verfahren nach der Studienlage für den Patienten ein deutlich geringeres Risiko mit sich bringt. Abgesehen von den Komplikationen, die durch einen Katheter zur arteriellen Blutdruckmessung hervorgerufen werden können, sind keine weiteren Komplikationen zu erwarten. Da eine kontinuierliche Kontrolle des arteriellen Blutdrucks eine Standardmaßnahme des hämodynamischen Monitorings bei einer Herzoperation darstellt, bedeutet der arterielle Katheter, der für die Herzzeitvolumenmessung mit dem PiCCO notwendig ist, keine zusätzliche Belastung für den Patienten. Daraus zu folgern ist, dass eine Indikation für einen PiCCO Katheter bei jeder OPCAB-Operation zu stellen ist.

Transösophageale Echokardiographie

Die transösophageale Echokardiographie wird routinemäßig in Herzzentren eingesetzt. Ein besonderes Feld, diese Technik zu nutzen befindet sich im

Operationssaal. Hier und auch auf der Intensivstation wird es zum Monitoring von cardiovasculär instabilen Patienten einbezogen [20,54]. Neben der Information über den Status des Gefäßvolumens können mit dieser Überwachungsmethode Aussagen über viele weitere Parameter getroffen werden. Dazu zählen Informationen über die globale und regionale myokardiale Funktion, über die Herzklappenmorphologie und -funktion und zu Thromben im Bereich der Vorhöfe [20,54], sowie Aussagen über eventuell ischämisch bedingte Hypokinesien des Herzmuskels. Darüber hinaus sind Daten über die Ausprägung von kongenitalen Herzfehlern und der Pathologie der großen Gefäße, wie zum Beispiel Aortenaneurysmen, zu erheben [50,68].

In weiteren Studien wurde überprüft, ob die anhand der transösophagealen Echokardiographie erhobenen Werte für die Bestimmung des Herzzeitvolumens mit den gleichzeitig erhobenen Werten der Thermodilution vergleichbar sind. Hier wurde nachgewiesen, dass die anhand des Dopplers bestimmten Messwerte in der Tat eine hohe Korrelation mit denen anderer Methoden aufweisen [16,17]. Dieses Ergebnis konnte anhand der hier erhobenen Daten bestätigt werden. Die Verwendung des TEE intraoperativ wird zudem als schnell einsetzbare entscheidungsweisende Methode in der Therapie von plötzlich auftretenden Störungen während einer Kardioanästhesie bezeichnet, und ist daher eindeutig zu einer validen Technik zur Untersuchung des Herzens zu zählen [30].

Ein wesentlicher Punkt ist, dass der Einsatz des TEE nur eine geringe Komplikationsrate mit sich bringt. In einer Multizentrischen Studie über die Komplikationen im Zusammenhang mit der TEE wurden 10419 Patienten untersucht. Dabei wurde von einer Komplikationsrate von 0,18%, inklusive eines Todesfalls berichtet [18]. Eine weitere Studie erbrachte ein vergleichbares Ergebnis. Hier wird von einer TEE abhängigen Morbidität von 0,2% und einer Mortalität von 0% nachgewiesen an 7200 Patienten berichtet [39].

Als Nachteil der transösophagealen Echokardiographie wäre allerdings anzuführen, dass zu jedem Zeitpunkt eine geschulte Person die Messungen und die Interpretation der Messungen durchzuführen hat. Da während einer OPCAB-Operation allerdings ständig ein in der Kardioanästhesie erfahrener Anästhesist

anwesend ist, ist dieses in der Regel gewährleistet. Als zudem schwierig stellt sich allerdings dar, dass das Ergebnis der Untersuchung von der Erfahrung des einzelnen Untersuchers abhängt, vor allem in der Beurteilung von Wandbewegungsstörungen und der linksventrikulären Funktion. Durchaus unabhängig davon ist allerdings die Bestimmung des Herzzeitvolumens. Die hier erhobenen Daten sind ausschließlich objektiv.

In dieser Studie wurde die Möglichkeit, intraoperativ das Herz bildlich zu beurteilen als sehr wichtig und hilfreich eingeschätzt. Die durch den unterbundenen Koronarfluß auftretenden hypokinetischen Wandareale konnten so beobachtet und kontrolliert werden. Auch der Volumenstatus war anhand dieser Technik einfach zu steuern und die Volumentherapie direkt zu überprüfen. Allerdings war es während zwei Operationen zeitweise schwierig, genauere Aussagen zur Funktion des Herzens zu treffen, da zum Nähen der Gefäßanastomosen das Herz mit Hilfe des Octopus aus seiner anatomischen Lage luxiert wurde und so kurzfristig nicht mehr einsehbar war.

Insgesamt lässt sich folgern, dass anhand der transösophagealen Echokardiographie wichtige Aussagen zum Zustand des Patienten intraoperativ getroffen werden können, ohne ihn einem hohen Risiko auszusetzen. Die in dieser Studie erhobenen Messwerte für das Herzzeitvolumen zeigen außerdem gute Übereinstimmungen mit den durch die beiden invasiven Methoden erfassten Daten. Somit scheint der Einsatz des TEE bei OPCAB weitgehend unter Berücksichtigung der speziellen Kontraindikationen gerechtfertigt und sinnvoll.

Vergleich von PiCCO und Pulmonaliskatheter mit der transösophagealen Echokardiographie zur Bestimmung des Herzzeitvolumens

Die Ergebnisse aus dem Vergleich der transpulmonalen Thermodilution mit dem PiCCO, der Herzzeitvolumenbestimmung des Pulmonaliskatheters und des TEE

zeigen sich als insgesamt vergleichbar. Allerdings fällt auf, dass die Messungen, die mit dem Pulmonaliskatheter durchgeführt wurden, tendenziell niedriger ausfielen, als die Werte der anderen beiden Messmethoden. Insgesamt korrelieren die Herzzeitvolumenbestimmungen der Pulskonturanalyse und der transösophagealen Echokardiographie stärker miteinander als mit denen des Pulmonaliskatheters. Besonders hervorzuheben ist der Unterschied in der Reperfusionsphase der Operation. Hier misst der Pulmonaliskatheter mit ungefähr 0,9 l/min signifikant weniger Herzzeitvolumen, als die beiden anderen Verfahren. Diese Abweichung ist von daher wichtig, als dass in dieser Phase der Operation die Herzzeitvolumina widerspiegeln sollen, in wie fern das Herz von der Revaskularisation profitiert. Hierbei können zu niedrig gemessene Werte zu erheblichen Irritationen führen. Diese können fälschlicherweise suggerieren, dass beispielsweise der neue Bypass insuffizient ist, oder dass der Patient nachblutet. Diese klinisch signifikante Fehlmessung ist nicht akzeptabel und spricht daher gegen die Zuverlässigkeit und den Einsatz des Pulmonaliskatheters bei OPCAB-Operationen.

Die erhobenen Messungen weisen darauf hin, dass die anhand der transösophagealen Echokardiographie bestimmten Herzzeitvolumina zuverlässige und zeitnahe Werte darstellen. Das Ergebnis anderer Studien, in welchen die Erfassung des Herzzeitvolumens anhand der Pulskonturanalyse als zuverlässige Methode bewertet wurde, konnte somit in der hier durchgeführten Arbeit bestätigt werden. Durch die Pulskonturanalyse und das TEE lassen sich rechtzeitig kurzfristige Veränderungen des Herzzeitvolumens finden und dokumentieren, die eventuell, zumindest in der Reperfusion, vom Pulmonaliskatheter unentdeckt blieben.

4.3 Vergleich zur Erfassung der Vorlast Parameter

Abgesehen vom Herzzeitvolumen ist die Erfassung der Vorlast und des zirkulierenden Blutvolumens für die Volumentherapie während einer Herzoperation von essentieller Bedeutung.

Das Preload ist definiert als der Grad der Dehnung eines einzelnen Kardiomyozyten zu Beginn der systolischen Kontraktion. Im intakten Herzen korrespondiert diese mit dem endiastolischen Volumen. Diese Parameter werden in der Regel mit Hilfe eines zentralen Venenkatheters (zentraler Venendruck) oder des Pulmonaliskatheters (Wedge-Druck) bestimmt.
Von sowohl dem zentralen Venendruck, als auch dem Wedge-Druck wird angenommen, dass sie das zentrale Blutvolumen reflektieren, und somit sichere Indikatoren für die Volumentherapie darstellen. Diese Druckwerte sind jedoch bestenfalls indirekte Volumenindikatoren, da diese stark von der Lungencompliance und den intrathorakalen Druckverhältnissen beeinflusst werden. Des Weiteren sind diese Druckmessungen nicht nur vom intravasalen Blutvolumen abhängig, sondern werden außer den oben genannten Faktoren noch vom Gefäßtonus beeinflusst. Damit anhand des zentralen Venendrucks sichere Aussagen über die Vorlast getroffen werden können, muss nicht nur eine regelrechte Beziehung zwischen rechtem Ventrikel und Volumen bestehen, sondern auch, dass sich rechts- und linksventrikuläre Vorlast entsprechen. Dieses scheint bei kritisch kranken Patienten, mit kardialer Dysfunktion nicht gewährleistet.

In jüngeren Publikationen wurde diskutiert, ob das intrathorakale Blutvolumen einen besseren Indikator für die Vorlast darstellt, als die bisher üblicherweise verwendeten Parameter wie der Wedge-Druck oder der zentrale Venendruck. *Lichtwarck-Aschoff et al.* [23] veröffentlichten eine Studie, in welcher der Wedge-Druck (PCWP), der zentrale Venendruck (ZVD) und das intrathorakale Blutvolumen (ITBV) mit dem Cardiac Index (Herzzeitvolumen pro m^2) bei 21 mechanisch beatmeten Patienten verglichen wurden. Hier wurde herausgefunden, dass weder der ZVD noch der PCWP mit dem Cardiac Index korrelierten, sondern als einziger Wert dies das ITBVI (intrathorakales Blutvolumen pro m^2) erfüllt. Auch in einer Studie von *Hoeft et al.* wurde keine Korrelation der Druckwerte bei Patienten, die sich gerade einer Bypassoperation unterzogen hatten, gefunden. Hier zeigten nur der ITBVI mit Cardiac Index vergleichbare Werte.

Mit diesen Untersuchungen vergleichbar sind auch die Ergebnisse der hier durchgeführten Studie. In keiner Phase der Operation korrelierten der Wedge-

Druck oder der ZVD mit dem Schlagvolumen Index (Schlagvolumen pro m² Körperoberfläche). Nur das ITBV zeigte eine Korrelation von 0,5, während diese zwischen PCWP und Schlagvolumenindex bei –0,03 und ZVD mit Schlagvolumenindex bei –0,27 lag. Dieses unterstützt die These, dass die anhand der transpulmonalen Thermodilution mit dem PiCCO erhobenen Werte zutreffendere Aussagen über den Volumenstatus und die kardiale Vorlast zulassen. Anhand dieses Parameters ist es schneller möglich, dem Patienten eine adäquate Volumentherapie zukommen zu lassen. Darüber hinaus liegt bei dieser Methode der Vorteil auch darin, dass die Bestimmung des intrathorakalen Blutvolumens ohne die Gefährdung des Patienten durch den Einsatz eines Pulmonaliskatheters durchgeführt werden kann. Somit ist zur Steuerung einer adäquaten intraoperativen Volumentherapie der Einsatz des PiCCO indiziert.

4.4 Klinische Relevanz

Im Vergleich der verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Herzzeitvolumens zeigen sich die Messungen des PiCCO und des TEE mit denen des Pulmonaliskatheters als geeignetere intraoperative Monitoringverfahren während einer OPCAB Operation. Alle drei Methoden sind im Operationssaal einfach verfügbar. Für die Erfassung und Auswertung der Daten und Ergebnisse der Echokardiographie ist jedoch eine spezielle Ausbildung notwendig, während die anderen beiden Verfahren ohne besondere Einführungen schnell zu erfassen und abrufbar sind. Dies erklärt die weiterhin bestehende Attraktivität des Pulmonaliskatheters, welcher sich in den letzten 30 Jahren beim erweiterten hämodynamischen Monitoring als standardmäßig angewandte Methode etabliert hat.

Kritisch anzumerken ist jedoch, dass für die Messungen mit dem Pulmonaliskatheter das Legen einer Schleuse, die korrekte Platzierung des Katheters, sowie anschließende Lagekorrekturen viel Zeit in Anspruch nehmen können. Für das PiCCO–System ist der Zeitaufwand bei den Vorbereitungen deutlich geringer. Die Patienten, die sich einem herzchirurgischen Eingriff unterziehen, werden ohnehin

mit einem arterieller Katheter zur invasiven Blutdruckmessung sowie einem zentralvenösen Katheter im Rahmen des intraoperativen hämodynamischen Standardmonitoring versorgt. Der Vorteil liegt also darin, dass weitere intravasale Zugänge nicht notwendig sind und der Patient damit weniger Risiken ausgesetzt ist.

Bei Patienten, die sich einer koronaren Bypassoperation in der „off-pump“ Technik unterziehen, sind die anästhesiologisch therapeutischen Interventionen oft eine Reaktion auf extreme Abweichungen der Hämodynamik. Die Möglichkeit zur ständigen Kontrolle von Herzzeitvolumen und Vorlast, sowie des Volumenstatus über die transpulmonale Thermodilution mit dem PiCCO und die transösophageale Echokardiographie ermöglichen eine umfassende Beurteilung der hämodynamischen Situation in einem zeitgerechten Intervall. Dadurch kann eine sofortige Therapie ernsthafter Komplikationen schnell eingeleitet werden.
Dieses ist durch die Bestimmung des Herzzeitvolumens durch den Pulmonaliskatheter nicht gewährleistet, denn das errechnete Herzzeitvolumen gibt den Durchschnittswert der Messungen während der vorausgegangenen 3 bis 6 Minuten an [85]. Besonders auffällig ist dieses in der hier vorliegenden Studie zum Zeitpunkt der Reperfusion zu erkennen. Wie der Abbildung 14 zu entnehmen ist, zeigt der Pulmonaliskatheter die Zunahme des Herzzeitvolumens erst zu dem späteren Messzeitpunkt an. Damit sind die angezeigten Daten nicht zeitnah genug, um bei den in der Regel plötzlich auftretenden hämodynamischen Komplikationen adäquat und schnellstmöglich zu reagieren.

Wie auch aus dieser Studie zur Evaluierung des hämodynamischen Monitoring während der OPCAB-Operation zu entnehmen ist, wurde bereits in weiteren Arbeiten festgestellt, dass die mit dem Pulmonaliskatheter ermittelten Volumina zeitlich verzögert sind. Plötzlich auftretende Veränderungen des Herzzeitvolumens von 1 l/min wurden hier erst nach 12 Minuten zuverlässig angezeigt [27]. Eine sichere kontinuierliche Überwachung des Herzzeitvolumens und des Patienten scheint bei diesen Ergebnissen anhand dieser Methode nicht gewährleistet zu sein.

Von Bedeutung ist ebenso, ob ein im Operationssaal angewendetes Verfahren zum hämodynamischen Monitoring auch auf der Intensivstation weiterhin von Nutzen ist. Diese Bedingung erfüllt der Pulmonaliskatheter nicht uneingeschränkt. Bei Patienten, die sich nach der Operation in der Aufwachphase befinden, kommt es bei beginnender Spontanatmung zu großen und schnellen Veränderungen der Beatmungsdrücke und damit der intrathorakalen Drücke. Daher können die Messungen des Herzzeitvolumens und der Vorlastdrücke stark verfälscht werden, wie unter 4.2 beschrieben.
Von Nachteil in der klinischen Praxis ist jedoch die Anwendung des TEE auf der Intensivstation, da hier in der Regel nicht jeder Patient durchgehend von einer einzelnen Person echokardiographisch untersucht werden kann. Des Weiteren ist diese Überwachung nur an einem ausreichend sedierten Patienten möglich, welches in der Aufwachphase nicht mehr zutrifft. Somit ist eine kontinuierliche Überwachung des Herzzeitvolumens nicht mehr möglich und plötzliche Veränderungen der Hämodynamik können nicht erfasst werden. Der Einsatz des PICCO auf der Intensivstation ist in Studien evaluiert und als geeignet befunden worden [48].

Für die Beurteilung der klinischen Relevanz eines Gerätes zum hämodynamischen Monitoring im Operationssaal ist neben der Bestimmung des Herzzeitvolumens die Verfügbarkeit weiterer Parameter ausschlaggebend.
Ziele der Überwachung sind daher neben dem Herzzeitvolumen die Bewertung des Volumenstatus und die Gewährleistung der Sauerstoffversorgung. Die Indikationsstellung von Diuretika oder Katecholaminen bildet dabei die Grundlage für eine effektive anästhesiologische Therapie.
Die über den Frank-Starling–Mechanismus bekannten Zusammenhänge zwischen Faserlänge des Herzmuskels, ventrikulärem Druck und Volumen sollen eine Abschätzung der Vorlast mit der Messung von zentralem Venendruck und Wedge-Druck ermöglichen. Hierbei handelt es sich jedoch nur um eine indirekte Bestimmung der Vorlast, die gleichzeitig bei Veränderungen der Ventrikelsteifigkeit, des Perikards und des Thorax variieren kann. Möglicherweise werden diese Veränderungen nicht erkannt, da der PCWP nicht unbedingt mit dem enddiastolischen Volumen korreliert [13].

Das Flüssigkeitsmanagement bei Patienten mit Schock ist oft schwierig und gleicht eher einem Balanceakt zwischen der Vermeidung eines Lungenödems und der Bereitstellung der optimalen kardialen Vorlast. Wie schon unter 4.2 erwähnt haben mehrere Untersuchungen gezeigt, dass zwischen ZVD- sowie PCWP-Messungen und der Erfassung des Herzschlagvolumens, beziehungsweise dessen Änderungen, kein Zusammenhang besteht, und somit keine ausreichend gesicherten Rückschlüsse auf das zirkulierende Blutvolumen möglich sind [66,70,87]. Die Kompensationsmechanismen des Körpers, die das Gefäßsystem und damit auch die Druckmessungen bei Hypovolämie über Katecholaminausschüttung und venöse Konstriktion beeinflussen, sind eine mögliche Erklärung [58]. Fehleinschätzungen dieser Art können bei schwerkranken Patienten zum prärenalen Nierenversagen oder Lungenödem führen.

Die Bestimmung des intrathorakalen Blutvolumens durch die transpulmonale Thermodilution mit dem PiCCO ist im Vergleich dazu wesentlich aussagekräftiger. So reagiert der Parameter ITBV im Vergleich mit PCWP und ZVD bei Volumenentzug und Volumengabe deutlich sensitiver [25,60,66]. Auch der Vergleich von Änderungen des Schlagvolumens zu Änderungen des ITBV zeigt einen deutlichen Zusammenhang zwischen den gemessenen Parametern und der kardialen Vorlast [25,66]. Der Volumenbedarf zur Aufrechterhaltung des zirkulierenden Blutvolumens wird bei Beatmung durch die Änderungen des ITBV genau reflektiert, während die Füllungsdrücke wie Wedge und zentraler Venendruck sogar entgegengesetzte Veränderungen anzeigen. Das zudem über die transpulmonale Thermodilution mit dem PiCCO messbare extravasale Lungenwasser, allerdings in dieser Studie nicht evaluierte, ist zur frühzeitigen Diagnose eines Lungenödems besser geeignet als radiologische Kontrollen oder die Überwachung der Oxigenierung [28].

Bis vor kurzem war die Bestimmung des ITBV und EVLW nur mit der Thermo-dye Technik möglich. Hierbei handelt es sich um eine Doppelindikatorverdünnung, bei der die zwei Indikatoren Farbstoff und Kälte über die Dilutionstechnik hinter dem linken Ventrikel bestimmt werden. Beide Parameter können jedoch auch mit der einfachen transpulmonalen Thermodilution über die Messung des gesamt enddiastolischen Volumens kalkuliert werden, wie unter 2.3 in den Gleichungen 8

und 9 beschrieben ist. Ein Vergleich zwischen ITBV und EVLW, gemessen mit der Thermo-dye Dilution und einfacher transpulmonaler Thermodilution bei Patienten mit ARDS, Sepsis, Multiorganversagen, sowie Polytrauma und größeren Operationen, zeigten eine gute Übereinstimmung der beiden Methoden [67]. Bereits in der Entwicklung ist die Verwendung von raumtemperiertem Injektat anstatt der gekühlten Bolusinjektion, was noch einmal zu einer Vereinfachung des Verfahrens führen würde.

Intraoperativ ist die Sicherheit, die einem das bildgebende Verfahren der transösophagealen Echokardiographie gibt, von großer Bedeutung. Hier ist es möglich, das Ausmaß von Motilitätsstörungen des Herzens direkt zu beurteilen und im folgendem auf hämodynamische Konsequenzen zu schließen. Volumenstatus sowie Kontraktilität lassen sich leicht aus der enddiastolischen Fläche abschätzen. Hierbei handelt es sich nicht um eine Methode, die ein invasives Monitoring vollständig ersetzen kann, allerdings lassen sich hierdurch wichtige Zusatzinformationen gewinnen. In einer Studie wurde herausgefunden, dass der Einsatz des TEE nicht nur als Monitoringverfahren von Bedeutung ist, sondern auch von Fällen berichtet wird, wo gestellte Diagnosen nochmals überdacht wurden und geplante herzchirurgische Eingriffe durch die diagnostischen Möglichkeiten des TEE umstrukturiert werden mussten [16]. Daher bringt der Einsatz der transösophagealen Echokardiographie deutliche Vorteile sowohl peri- als auch intraoperativ und ist somit bei geringer Komplikationsrate weitgehend indiziert.

Schlussfolgerungen

Alle drei in dieser Studie bewerteten Methoden zur Erfassung des Herzzeitvolumens zeigen zuverlässige Werte während einer Bypassoperation in OPCAB Technik. Allerdings weicht das Herzzeitvolumen, das mit Hilfe des Pulmonaliskatheters ermittelt wird, zum Zeitpunkt der Reperfusion mit 0,9 l/min signifikant von dem der Pulskonturanalyse und des TEE ab. Damit sind nicht alle Messungen des Pulmonaliskatheters zuverlässig und somit zur zeitnahen Überwachung nicht uneingeschränkt einsetzbar. Des Weiteren zeichnet sich der Einsatz des PiCCO durch eine geringere Invasivität im Vergleich zu einem Pulmonaliskatheter aus, da hier keine weiteren intravasale Zugänge gelegt werden

müssen als die der Standardüberwachung. Zudem können komplikationslos Daten zum Volumenstatus und zur kardialen Vorlast erhoben werden, anhand derer eine adäquate Volumen- und Katecholamintherapie kalkuliert durchgeführt werden kann. Zur zusätzlichen intraoperativen Sicherheit trägt die Anwendung des TEE bei. Hiermit können direkt myokardiale Einschränkungen erkannt, sowie die linksventrikuläre Funktion dargestellt werden. Der Operationserfolg kann direkt bildgebend beurteilt und objektiv anhand der Herzzeitvolumenmessung eingeschätzt werden. Somit lässt sich ableiten, dass eine sichere Überwachung des Patienten unter Anwendung der Pulskonturanalyse und dem TEE gewährleistet werden kann, während ein Verzicht auf den Pulmonaliskatheter möglich ist und insgesamt die komplikationsärmeren Verfahren eine zeitnähere Überwachung des Patienten zulassen.

5. Zusammenfassung

Das zuverlässige hämodynamische Monitoring während einer „off-pump“ Bypass Operation setzt die Betrachtung und Beurteilung bestimmter Parameter voraus. Diese erklärt sich dadurch, dass intraoperativ die Koronararterie, auf die der Bypass genäht werden soll, kurzfristig unterbunden wird. Dadurch kann es zu Herzrhythmusstörungen mit ernsten hämodynamischen Komplikationen kommen. Eine lückenlose und genaue Überwachung des Patienten ist daher essentiell. Dazu zählt als zentraler Parameter die Bestimmung des Herzzeitvolumens.

Der Pulmonaliskatheter wurde bisher lange Zeit dazu routinemäßig eingesetzt und galt als Standardverfahren. Aufgrund der sowohl hohen Invasivität als auch begleitender Komplikationen gab dieses Verfahren allerdings seit Jahren immer wieder Anlass zu Diskussionen und Risikoabwägungen.
Durch den Einsatz des PiCCO Geräts ist es möglich sowohl das Herzzeitvolumen als auch die Vorlast und Volumenparameter zu ermitteln. Diese Messmethode zeichnet sich zunächst durch eine geringere Invasivität und weniger Komplikationen im Vergleich zum Pulmonaliskatheter aus.
Eine weitere Möglichkeit zur intraoperativen Überwachung des Patienten bietet die transösophageale Echokardiographie (TEE). Sie ist in der Regel komplikationslos einsetzbar. Zudem lässt das TEE neben der Herzzeitvolumenmessung die direkte Beobachtung des Myokards zu. Somit können sowohl lokale als auch globale Wandbewegungs- und Kontraktilitätsstörungen erkannt werden.

Die drei oben genannten Verfahren wurden in bisherigen Studien als zuverlässige Methoden zur Herzzeitvolumenmessung befunden. Unklar ist allerdings, welche unter den Umständen einer off-pump Herzoperation adäquat und zeitnah die Überwachung des Patienten zulässt und somit überlegen ist.
Um diese Problematik genauer beurteilen zu können, sollte in dieser Studie geklärt werden, ob ein erweitertes hämodynamisches Monitoring mit dem PiCCO in Kombination mit TEE ausreichen und ob bei Verzicht auf den Pulmonaliskatheter eine sichere Kontrolle des Patienten gewährleistet werden kann.

Dazu wurden 20 Patienten während einer OPCAB Operation mit einem Pulmonaliskatheter, einer transösophagealen Echokardiographiesonde und einem arteriellen PiCCO Katheter mit Thermistor neben dem Standardmonitoring ausgestattet.
An 7 definierten, im Operationsverlauf wichtigen Messpunkten, wurden Herzzeitvolumen Bestimmungen parallel durch jede der drei Methoden vorgenommen. Um statistisch belegbare Aussagen treffen zu können, wurden zur transpulmonalen Thermodilution mit dem PiCCO drei aufeinander folgende Messungen durchgeführt. Zeitgleich wurden die durch den Pulmonaliskatheter ermittelten Werte dokumentiert, sowie abweichende Daten gemittelt. Die intraoperativ gemachten Aufzeichnungen mit dem TEE während der einzelnen Messpunkte waren später in der offline Analyse zu vermessen. Hier wurde das Integral der Geschwindigkeit anhand von drei Graphen eines Messzeitpunktes zur Berechnung des HZV bestimmt.
Um Aussagen über die Vorlast zu treffen, wurden während derselben Messpunkte die dazugehörigen und später ausgewerteten Parameter dokumentiert. Hierzu zählen der ZVD, PCWP, ITBV und der SVI.

Der Vergleich der einzelnen Methoden zur Bestimmung des Herzzeitvolumens zeigte eine gute Übereinstimmung der Korrelationen. Insgesamt lässt sich von vergleichbaren Ergebnissen aller drei Verfahren sprechen. Allerdings unterscheiden sich die während der kritischen Phase der Reperfusion nach Koronarokklusion über den Pulmonaliskatheter ermittelten Werte signifikant von denen des PiCCO und TEE. Dieses könnte, wie schon in der Literatur beschrieben, auf technisch bedingte Verzögerungen der Messungen über den Pulmonaliskatheter zurückzuführen sein. In dieser Phase der Operation ist es möglich, dass die anhand des Pulmonaliskatheters zu niedrig gemessenen Werte zu gravierenden Irritationen führen.
In der Problemstellung der Vorlast Parameter konnte dokumentiert werden, dass als einziges das ITBV tatsächliche Rückschlüsse über den Volumenstatus und die Vorlast des Herzen zulässt. Sowohl der ZVD, als auch der PCWP scheinen hier keine eindeutigen Aussagen treffen zu lassen.

Bei Betrachtung und Analyse der Messdaten ist zu folgern, dass während einer OPCAB Operation auf den Einsatz des Pulmonaliskatheters verzichtet werden kann. Vielmehr bietet sich ein gezieltes hämodynamisches Monitoring als Kombination von TEE und transpulmonaler Thermodilution mit dem PiCCO als sichere Alternative an. Diese beiden Methoden lassen eine lückenlose Überwachung und eine zeitgerechte anästhesiologische Therapie zu.
Da nicht nur eine sichere Erfassung des Herzzeitvolumens dieser beiden Verfahren vorliegt, sondern zudem auch der Einsatz in der Regel komplikationsarm und im vergleich zum Pulmonaliskatheter weniger invasiv ist, sind sie die überlegenen Monitoring Verfahren während einer OPCAB Operation.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass während kardiochirurgischen Operationen der Pulmonaliskatheters nur eingeschränkt einzusetzen ist, während eine Indikation für das TEE und PiCCO breit zu stellen ist. Im Rahmen dieser Thematik wäre es weiterhin interessant zu erarbeiten, wie stark sich die intraoperativ neu auftretenden myokardialen Wandbewegungsstörungen, die mit dem TEE erfasst werden können, auf die Hämodynamik auswirken. Des Weiteren wäre noch in einer Studie zu objektivieren, ob der Grad der Funktionseinschränkung des linken Ventrikels eine zuverlässige Einschätzung von hämodynamischen Komplikationen zulässt, aufgrund welcher eine sofortige anästhesiologische Therapie eingeleitet werden könnte.

6.Literatur

1. **Arfors KE**, Malmberg P, Pavek K: Conservation of thermal indicator in lung circulation. Cardiovasc Res 5: 530-534, 1997

2. **Armengol J**, Man CWG, Balysy AJ, Wells AL: Effects of the respiratory cycle on cardiac output measurements: reproducibility of data enhanced by timing thermodilution injections in dogs. Crit Care Med 9:852-854, 1981

3. **Ascione R**, Lloyd CT, Gomes WJ, Caputo M, Bryan AJ, Angelini GD: Beating versus arrested heart revascularisation: evaluation of myocardial function in a prospective randomized study. Eur J Cardiothorac Surg 15:685-690, 1999

4. **Baufreton C**, Intrator L, Jansen PGM, te Velthuis H, LeBesnerais P, Vonk A: Inflammatory response to cardiopulmonary bypass using roller or centrifugal pumps. Ann Thorac Surg 67:972-977, 1999

5. **van den Berg PCM**, Grimbergen CA, Spaan JAE, Pinsky MR: Positive pressure inspiration diffentially affects right and left ventricular outputs in postoperative cardiac surgery patients. J Crit Care 12: 56-65, 1997

6. **Beale R**: Assessment of lung water and intrathoracic blood volume in the critical ill patient. In: Rennie M (ed): Intensive Care Britain 1993, Greycoat Publishing, London: 30-34, 1993

7. **Böck JC**, Barker BC, Mackersie RC, Tranbaugh RF, Lewis FR: Cardiac output measurement using femoral artery thermodilution in patients. J Crit Care 4:106-111, 1989

8. **Boyle EM**, Pohlman TH, Johnson MC, Verrier ED: Endothelial cell injury in cardiovascular surgery: the systemic inflammatory response. Ann Thorac Surg 63: 277-284, 1997

9. **Breuer AC**, Furlan AJ, Hanson MR: Central nervous system complications of coronary artery bypass graft surgery: prospective analysis of 421 patients. Stroke 14: 682-687, 1983

10. **Brillman J**: Central nervous system complications in coronary artery bypass graft surgery. Neurocardiology 11: 475-495, 1993

11. **Brower R**, Wise RA, Hassapoyannes C, Bromberger-Barnea B, Permutt S: Effect of lung inflation on lung blood volume and pulmonary venous flow. J Appl Physiol 58: 954-963, 1985

12**. Buhre W**, Bendyk K, Weyland A, Kazmaier S, Schmidt M, Mursch K, Sonntag H: Assessment of intrathoracic blood volume, thermo-dye dilution technique versus single thermodilution technique. Anaesthesist 47: 51-53, 1998

13. **Calvin JE**, Driedger AA, Sibbald WJ: Does the pulmonary cappilary wedge pressure predict left ventricular preload in critical ill patients? Crit Care Med 9: 437-443, 1981

14. **Coffey CE**, Massey EW, Roberts KB: Natural history of cerebral complications of coronary artery bypass graft surgery. Neurology 33: 1416-1421, 1983

15. **Connors AF**, Speroft T, Dawson NV, Thomas C, Harrell FE, Wagner D, Desbiens N, Goldman L, Wu AW, Catt RMM, Fuklerson WJ, Vidaillet H, Broste S, Bellamy P, Lynn J, Knaus WA: The effectiveness of right heart catheterisation in the initial care of critically ill patients. JAMA 276: 889-897, 1996

16. **Couture P**, Denault AY, McKenty S, Boudreault D, Plante F, Perron R, Babin D, Normandin L, Poirier N: Impact of routine use of intraoperative transesophageal echocardiography during cardiac surgery. Can J Anaesth 47: 20-26, 2000

17. **Damon PL**, Hillel Z, Mogtader A, Mindich B, Thys D: Cardiac output by transesophageal echocardiography using continuous-wave doppler across the aortic valve. Anesthesiology 80: 796-805, 1994

18. **Daniel WG**, Erbel R, Kasper W: Safety of transesophageal echocardiography: a multicenter survey of 10.419 examinations. Circulation 83: 817-21, 1991

19. **Fanshawe,Ellis, Habib, Konstadt, Reich:** A retrospective analysis of the costs and benefits related to alterations in cardiac surgery from routine intraoperative trans-esophageal echokardiographie. Anaesth Analg 95: 824-827, 2002

20. **Foster E**, Schiller NB: The role of transesophageal echocardiography in critical care: UCSF experience. J Am Soc Echocardiography 5: 368-374, 1992

21. **Gallagher EG**, Pearson DT: Ultrasonic identification of sources of gaseous microemboli during open heart surgery. Thorax 28: 295-305, 1973

22. **Ganz W**, Donso R, Marcus HS, Forrester JS, Swan HJC: A new technique for measurement of cardiac output by thermodilution in man. Am J Cardiol 27: 392-396, 1971

23. **Gershan JA**: Effect of positive end-expiratory pressure on pulmonary capillary wedge pressure. Heart Lung 12: 143-148, 1983

24. **Gödje O**, Peyerl M, Seebauer T, Dewald O, Reichart B: Reproducibility of double indicator dilution measurement of intrathoracic blood volume compartments, extravascular lung water and liver function. Chest 113: 1070-1077, 1998

25. **Gödje O**, Peyerl M, Seebauer T, Lamm T, Maier H, Reichart B: Central venous, pulmonary capillary wedge pressure and intrathoracic blood volumes as preload indicators in cardiac surgery patients. Eur J Cardiothorac Surg 13: 533-539, 1998

26. **Gonzalez-Scarano F**, Hurting HI: Neurologic complications of coronary artery bypass grafting: case-control study. Neurology 31: 1032-1035, 1981

27. **Haller M**, Zöllner C, Briegel J, Forst H: Evaluation of a new continuous thermodilution cardiac output monitor in critically ill patients: a prospective study. Crit Care Med 23: 860-866, 1995

28. **Halperin BD**, Feeley TW, Mihm FG, Chiles C, Guthaner DF, Blank NE: Evaluation of the portable chest roentgenogram for quantitating extravascular lung water in critically ill adults. Chest 88: 649-652, 1985

29. **Harris AP**, Miller CF, Beattie C, Rosenfeld GI, Rogers MC: The slowing of sinus rhythm during thermodilution cardiac output determination and effect of altering injectate temperature. Anesthesiology 63: 540-541, 1985

30. **Hinder F**, Poelaert JI, Schmidt C, Hoeft A, Möllhoff T, Loick HM, van Aken H: Assessment of cardiovascular volume status by transesophageal echo-cardiography and dye dilution during cardiac surgery. Eur J Anaesth 15: 633-640, 1998

31. **Hoeft A**: Transpulmonary indicator dilution: an alternative approach for hemodynamic monitoring. In: Vincent J-L: Yearbook of Intensive Care and Emergency Medicine, Springer, Berlin: 593-605, 1995

32. **Hoeft A**: Dilutionstechniken und Ficksches Prinzip. In: List WF, Mezler H, Pasch T: Monitoring in Anästhesie und Intensivmedizin, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg- New York- Barcelona- Budapest- Hongkong- London- Mailand- Paris-Singapur- Tokio: 250-291, 1995

33. **Hoffmann EA**, Ritmann EL: Intracardiac cycle constancy of total heart volume. Dynamic Cardiovascular Imaging 1: 199-205, 1988

34. **Hosie KF**: Thermal-dilution techniques. Circ Res 10: 491-504, 1962

35. **Iaco AL**, Contini M, Teodori G, Di Mauro M, Di Giammarco G, Vitolla G : Off or on bypass: what is the safety threshold? Ann Thorac Surg 68: 1486-1489, 1999

36. **Jansen JRC**, Schreuder JJ, Bogaard JM, v. Rooyen W, Versprille A: Thermodilution technique for measurement of cardiac output during artificial ventilation. J Appl Physiol 50: 584-591, 1981

37. **Jansen JRC**, Schreuder JJ, Settels JJ, Kloek JJ, Versprille A: An adequate strategy for the thermodilution technique in patient during mechanical ventilation. Intensive Care Med 16: 422-425, 1990

38. **Jansen JRC**, Versprille A: Improvement of cardiac output estimation by the thermodilution method during mechanical ventilation. Intensive Care Med 12: 71-79, 1986

39. **Kallmeyer IJ**, Collard CD, Fox JA, Body SC, Shernan SK: The safety of intraoperative transesophageal echocardiography: a case series of 7200 cardiac surgical patients. Anaesth Analg 92: 1126-1130, 2001

40. **Karakaya D**, Baris S, Tür A: Pulmonary artery catheter-induced right ventricular perforation during coronary artery bypass surgery. Br J Anaesth 82: 953, 1999

41. **Kolessov VI**: Mammary artery-coronary artery anastomosis as method of treatment for angina pectoris. J Thorac Cardiovasc Surg 54: 535-544, 1967

42. **Krejca M**, Skiba J, Szmagala P, Gburek T, Bochenek A: Cardiac Troponin T release during coronary surgery using intermittent crossclamp with fibrillation, on-pump and off-pump beating heart. Eur J Cardiothorac Surg 16: 337-341, 1999

43. **Kwon K**, Jenkins D, Firpo R, Tzeng T: Complete myocardial revascularisation on the beating heart. Am J Surg 178: 501-504, 1999

44. **Levett JM**, Replogle RL: Current research review thermodilution cardiac output: a critical analysis and review of the literature. J Surg Res 27: 392-404, 1979

45. **Lichtwarck-Aschoff M**, Zeravik J, Pfeiffer UJ: Intrathoracic blood volume accurately reflects circulatory volume status in critically ill patients with mechanical ventilation. Intensive Care Med 18: 142-147, 1992

46. **Lichtwarck-Aschoff M**, Beale, Pfeiffer UJ: Central Venous pressure, pulmonary artery occlusion pressure, intrathoracic blood volume and right ventricular end-diastolic volume as indicators of cardiac preload. J Crit Care 11: 180-188, 1996

47. **Linton DM**, Gilon D: Advances in non-invasive cardiac output monitoring. Ann Cardiac Anaesth 5: 141-148, 2002

48. **Linton R**, Band D, O`Brien T, Jonas M, Leach R: Lithium dilution cardiac output measurement: a comparison with thermodilution. Crit Care Med 25: 1545-1550, 1997

49. **Loop FD**, Cosgrove DM, Lytle BW: An 11-year old evolution of coronary arterial surgery. Ann Surg 190: 444-455, 1979

50. **Mishra M**, Chauhan R, Sharma KK: Real-time intraoperative transesophageal echocardiography: how useful? Experience of 5.016 cases.
J Cardiothorac Vasc Anaesth 12: 625-632, 1998

51. **Moltzahn S**, Zeydabadinejad M: Dopplerechokardiographie CW, PW, Farbdoppler- Eine Einführung, 44, Thieme Verlag, Stuttgart, 1994

52. **Niemer M**, Nemes C, Lundsgaard-Hansen P, Glauhut B: Datenbuch der Intensivmedizin Gustav Fischer Verlag, Stuttgart-Jena-New York, 1992

53. **Nishikawa T**, Dohi S: Errors in the measurement of cardiac output by thermodilution. Can J Anaesth 40: 142-153, 1993

54. **Oh JK**, Seward JB, Khanderia BK : Transesophageal echocardiography in critically ill patients. Am J Cardiol 66: 1492-1495, 1990

55. **Okamoto K**, Komatsu T, Kumar V, Sanchala V, Kubal K, Bhalodia R, Schibutani K: Effects of intermittent positive-pressure ventilation on cardiac output measurements by thermodilution. Crit Care Med 14: 977-980, 1986

56. **Padayachee TS**, Parsons S, Theobold R: The detection of microemboli in the middle cerebral artery during cardiopulmonary bypass: a transcranial Doppler ultrasound investigation using membrane and bubble oxygenators. Ann Thorac Surg 44: 298-302, 1987

57. **Pasch T**: Der Pulmonaliskatheter- Vom Boom zum Bann? Anaesthesist 46:79-80, 1997

58. **Pfeiffer UJ**: Das intrathorakale Blutvolumen als hämodynamischer Leitparameter.In: Pfeiffer UJ: Anaesthesiologie und Intensivmedizin 214, Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokio-Hongkong-Barcelona,1990

59. **Pfeiffer UJ**, Backus G, Blümel G, Eckart J, Müller P, Winkler P, Zeravik J, Zimmermann GJ: A fiberoptics based system for integrated monitoring of cardiac output, intrathoracic blood volume, extravascular lung water, O_2 saturation and a-v differences. In: Lewis FR, Pfeiffer UJ: Practical applications of fibreoptics in critical care monitoring, Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokio-Hongkong: 114-125, 1990

60. **Pfeiffer UJ**, Perker M, Zeravik J, Zimmermann G: Sensitivity of central venous pressure, pulmonary capillary wedge pressure and intrathoracic blood volume as indicators for acute and chronic hypovolemia. In: Lewis FR, Pfeiffer UJ: Practical applications of fibreoptics in critical care monitoring, Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York-Paris-Tokio-Hongkong : 25-31, 1990

61. **Pfeiffer UJ**, Zimmermann G: Fehlermöglichkeiten und Grenzen der Lungenwasserbestimmung mit der Thermo-dye Technik. In: Bergmann H, Gilly H, Steinbeithner KK, Sturm J: Lungenwasserbestimmung Teil II – klinische Bedeutung: Beiträge zur Anästhesiologie und Intensivmedizin 6, Verlag Wilhelm Maudrich, Wien-München-Berlin: 81-104, 1984

62. **Rauch H**, Müller M, Fleischer F, Bauer H, Martin E, Böttiger BW: Pulse contour analysis versus thermodilution in cardiac surgery patients. Acta Anaesthesiol Scand 46: 424-429, 2002

63. **Roach GW**, Kanchuger M, Mangano CM, et al.: Adverse cerebral outcome after coronary bypass surgery: Multicenter study of perioperative ischemia research group and the ischemia research and education foundation investigators N Engl J Med 335: 1857-1863, 1996

64. **Rödig G**, Prasser C, Keyl C, Liebold A, Hobbhahn J: Continuous cardiac output measurement: pulse contour analysis vs thermodilution technique in cardiac surgical patients. Br J Anaesth 82: 525-530, 1999

65. **Ropper AH**, Wechsler LR, Wilson LS: Carotid bruit and the risk of stroke in elective surgery. N Engl J Med 307: 1388-1390, 1982

66. **Sakka SG**, Bredle DL, Reinhart K, Meier-Hellmann A: Comparison between intrathoracic blood volume and cardiac filling pressures in the early phase of hemodynamic instability of patients with sepsis or septic shock. J Crit Care 14: 78-83, 1999

67. **Sakka SG**, Rühl CC, Pfeiffer UJ, Beale R, McLuckie A, Reinhart K, Meier-Hellmann A: Assessment of cardiac preload and extravascular lung water by single transpulmonary thermodilution. Intensive Care Med 26: 180-187, 2000

68. **Savage RM**, Lytle BW, Aroson S: Intraoperative echocardiography is indicated in high-risk coronary artery bypass grafting. Ann Thorac Surg 64: 368-373, 1997

69. **Shippy CR**, Appel RL, Shoemaker WC: Reliability of clinical monitoring to assess blood volume in critically ill patients. Crit Care Med 12: 107-112, 1984

70. **Sold M**: Der Stellenwert des Pulmonaliskatheters in Anästhesie und Intensivmedizin Teil II. Anästh Intensivmed 31: 198-204, 1990

71. **v.Spiegel T**, Wietasch G, Bürsch J, Hoeft A: HZV-Bestimmung mittels transpulmonaler Thermodilution. Eine Alternative zum Pulmonaliskatheter? Anaesthesist 45: 1945-1950, 1996

72. **Spooner TH**, Hart JC, Pym J: A two-year, three institution experience with the Medtronic Octopus: systematic off-pump surgery. Ann Thorac Surg 68: 1478-1481, 1999

73. **Taylor GJ**, Malik SA, Colliver JA: Usefulness of atrial fibrillation as a predictor of stroke after isolated coronary artery bypass grafting. Am J Cardiol 60: 905-907, 1987

74. **Tibby SM**, Hatherill M, Marsh MJ, Morrison G, Anderson D, Murdoch IA: Clinical validation of cardiac output measurement using femoral artery thermodilution with direct Fick in ventilated children and infants. Intensive Care Med 23: 987-991, 1997

75. **Turner WF**: “Off-pump” coronary artery bypass grafting: the first one hundred cases of the Rose city experience. Ann Thorac Surg 68: 1482-1485, 1999

76. **Turnipseed WD**, Berkoff HA, Belzer FO: Postoperative stroke in cardiac and peripheral vascular disease. Ann Surg 192: 365-368, 1980

77. **Verspille A**, Jansen JRC, Frietman RC, Hulsmann AR, v.d. Klauw MM: Negative effect of insufflation on cardiac output and pulmonary blood volume. Acta Anaesthesiol Scand 34: 607-615, 1990

78. **Vincent JL**, Dhainaut JF, Perret C, Suter P: Is the pulmonary artery catheter misused? A European view. Crit Care Med 26: 1283-1287, 1998

79. **Wan S**, Izzat MB, Lee TW, Wan IY, Tang NL, Yim AP: Avoiding cardiopulmonary bypass in multivessel CABG reduces cytokine response and myocardiyl injury. Ann Thorac Surg 68: 52-56. 1999

80. **Wessel HU**, Paul MH, James GW, Grahn AR: Limitations of thermal dilution curves for cardiac output determinations. J Appl Physiol 30: 643-652, 1971

81. **West J**, Dollery C: Distribution of blood flow and ventilation-perfusion ratio in the lung measured with radioactive CO_2. J Appl Physiol 15: 405-410, 1960

82. **Wong DH**, Tremper KK, Stemmer EA, O`Connor D, Wilbur S, Zaccari J, Reeves C, Weidoff P, Trujillo RJ: Noninvasive cardiac output: simultaneous comparison of two different methods with thermodilution. Anesthesiology 72: 784-792, 1990

83. **Woods M**, Scott RN, Harken AH: Practical considerations for the use of a pulmonary artery thermistor catheter. Surgery 79: 469-475, 1976

84. **Yelderman ML**, Ramsay MA, Quinn MD, Paulsen AW, McKwon RC, Gillman PH: Continuous thermodilution cardiac output measurement in intensive care unit patients. J Cardiothorac Vasc Anaesth 6: 270-274, 1992

85. **Zadrobilek E**, Schindler I, Jantsch H, Gilly H, Mauritz W, Draxler V: Die Bewertung der thermalen Messtechnik zur quantitativen Bestimmung des extravasculären Lungenwassers. Anaesthesist 34: 582-587, 1985

86. **Zarins CK**, Virgilio RW, Smith DE, Peters RM: The effect of vascular volume on positive end-expiratory pressure induced cardiac output depression and wedge-left atrial pressure discrepancy. J Surg Res 23: 348-360, 1977

87. **Zink W**, Graf BM: Der Pulmonalarterienkatheter. Anasthesist 50: 623-645, 2001

88. **Ohne Benennung des Autors**: Practice guidelines for pulmonary artery catheterisation. A report by the American society of anaesthesiologists task force on pulmonary artery catheterisation. Anesthesiology 78: 380-394, 1993

7. Abkürzungen

ASS	Acetylsalicylsäure
CI	Cardiac Index
EVLW	extravasales Lungenwasser
FiO_2	inspiratorische Sauerstoffkonzentration
GEDV	global enddiastolisches Volumen
HLM	Herz- Lungen Maschine
HZV	Herzzeitvolumen
HZV PiCCO	Cardiac Output des PiCCO
HZV TEE	Cardiac Output der transösophagealen Messungen
ITBV	intrathorakales Blutvolumen
ITBVI	Index des intrathorakalen Blutvolumen
KHK	koronare Herzkrankheit
LVOT	linksventrikulärer Ausflusstrakt
MAP	arterieller Mitteldruck
NaCl	Natrium- Chlorid
OPCAB	off pump coronarty artery bypass
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
pAVK	periphere arterielle Verschlußkrankheit
PCWP	verschlussdruck der Lungenkappilaren (Wedge)
PW-Doppler	Pulse Wave Doppler
r	Korrelationskoeffizient
TEE	transösophageale Echokardiographia
TIA	transitorische ischämische Attacke
SIRS	systemic inflammatory response
SVI	Schlagvolumenindex
SvO_2	gemischt venöse Sauerstoffsättigung
VTI	Geschwindigkeits-Zeit Integral
ZVD	zentraler Venendruck
ZVK	zentraler Venenkatheter

8. Abbildungsverzeichnis

		Seite
Abbildung1:	Octopus	3
Abbildung2:	Swan- Ganz Katheter	13
Abbildung3:	Thermodilutionskurven	16
Abbildung4:	Schematische Dilutionskurve	17
Abbildung5:	PiCCO Gerät	22
Abbildung6:	Menü der transpulmonalen Thermodilution	24
Abbildung7:	Vigilance Monitor	25
Abbildung8:	Sonde zur transösophagealen Echokardiographie	26
Abbildung9:	Bestimmung des HZV anhand der Dopplerecokardiographie	27
Abbildung10:	Messprotokoll	33
Abbildung11:	Herzfrequenz über alle Messzeitpunkte	37
Abbildung12:	arterieller Mitteldruck über alle Messzeitpunkte	38
Abbildung13:	zentralvenöser Druck über alle Messzeitpunkte	39
Abbildung14:	Herzzeitvolumina über alle Messzeitpunkte	40
Abbildung15:	Regressionsanalyse aller Messzeitpunkte des PAK und PiCCO	41
Abbildung16:	Regressionsanalyse aller Messzeitpunkte des PAK und TEE	42
Abbildung17:	Regressionsanalyse aller Messzeitpunkte des PiCCO und TEE	42
Abbildung18:	Regressionsanalyse nach der Einleitung des PAK und PiCCO	43
Abbildung19:	Regressionsanalyse nach der Einleitung des PAK und TEE	44
Abbildung20:	Regressionsanalyse nach der Einleitung des PiCCO und TEE	44
Abbildung21:	Regressionsanalyse nach der Sternotomie des PAK und PiCCO	45
Abbildung22:	Regressionsanalyse nach der Sternotomie des PAK und TEE	46
Abbildung23:	Regressionsanalyse nach der Sternotomie des TEE und PiCCO	46
Abbildung24:	Regressionsanalyse zur Prä-Ischämie des PAK und PiCCO	47
Abbildung25:	Regressionsanalyse zur Prä-Ischämie des PAK und TEE	48
Abbildung26:	Regressionsanalyse zur Prä-Ischämie des PiCCO und TEE	48
Abbildung27:	Regressionsanalyse zur Ischämie des PAK und PiCCO	49
Abbildung28:	Regressionsanalyse zur Ischämie des PAK und TEE	50
Abbildung29:	Regressionsanalyse zur Ischämie des PiCCO und TEE	50
Abbildung30:	Regressionsanalyse zur Reperfusion des PAK und PiCCO	51
Abbildung31:	Regressionsanalyse zur Reperfusion des PAK und TEE	52

Seite

Abbildung32: Regressionsanalyse zur Reperfusion des PiCCO und TEE 52
Abbildung33: Regressionsanalyse zumThoraxverschluß des PAK und PiCCO 53
Abbildung34: Regressionsanalyse zum Thoraxverschluß des PAK und TEE 54
Abbildung35: Regressionsanalyse zum Thoraxverschluß des TEE und PiCCO 54
Abbildung36: Regressionsanalyse zum OP Ende des PAK und PiCCO 55
Abbildung37: Regressionsanalyse zum OP Ende des PAK und TEE 56
Abbildung38: Regressionsanalyse zum OP Ende des TEE und PiCCO 56
Abbildung39: Korrelation von SVI und ITBV an allen Messzeitpunkten 57
Abbildung40: Korrelation von SVI und ZVD an allen Messzeitpunkten 58
Abbildung41: Korrelation von SVI und PCWP an allen Messzeitpunkten 58
Abbildung42: Korrelation von SVI und ITBV nach der Einleitung 59
Abbildung43: Korrelation von SVI und PCWP nach der Einleitung 60
Abbildung44: Korrelation von SVI und ZVD nach der Einleitung 60
Abbildung45: Korrelation von SVI und ITBV nach der Sternotomie 61
Abbildung46: Korrelation von SVI und PCWP nach der Sternotomie 62
Abbildung47: Korrelation von SVI und ZVD nach der Sternotomie 62
Abbildung48: Korrelation von SVI und ITBV zur Prä-Ischämie 63
Abbildung49: Korrelation von SVI und PCWP zur Prä-Ischämie 64
Abbildung50: Korrelation von SVI und ZVD zur Prä-Ischämie 64
Abbildung51: Korrelation von SVI und ITBV zur Ischämie 65
Abbildung52: Korrelation von SVI und PCWP zur Ischämie 66
Abbildung53: Korrelation von SVI und ZVD zur Ischämie 66
Abbildung54: Korrelation von SVI und ITBV zur Reperfusion 67
Abbildung55: Korrelation von SVI und PCWP zur Reperfusion 68
Abbildung56: Korrelation von SVI und ZVD zur Reperfusion 68
Abbildung57: Korrelation von SVI und ITBV zum Thoraxverschluß 69
Abbildung58: Korrelation von SVI und PCWP zum Thoraxverschluß 70
Abbildung59: Korrelation von SVI und ZVD zum Thoraxverschluß 70
Abbildung60: Korrelation von SVI und ITBV zum OP Ende 71
Abbildung61: Korrelation von SVI und PCWP zum OP Ende 72
Abbildung62: Korrelation von SVI und ZVD zum OP Ende 72

9. Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle1: Patientenkollektiv……9

Tabelle2: Parameter der transpulmonalen Thermodilution 28

Tabelle3: Parameter der kontinuierlichen Thermodilutionstechnik 28

10. Danksagung

Mein besonderer Dank gilt:

Herrn **Prof. Dr. F. Wappler**, für die Motivation und den Einsatz zur Durchführung der Untersuchungen, die Unterstützung beim Schreiben der Arbeit, sowie für die Ansprechbereitschaft bei Fragen und Problemen.

Herrn **Dr. O. Herden-Kirchhoff**, für die Hilfe bei der Erstellung des Studienprotokolls, sowie für den Einsatz während der Operationen.

Herrn **Dr. O. Zantis**, ebenfalls für die Hilfe bei der Datenerhebung während der Operationen.

Sowohl **Herrn Brose** als auch **Herrn Supplieth** für die Betreuung und ständige Hilfsbereitschaft während der statistischen Auswertung.

Meinen Eltern **Frau Margret Herre** und **Dr. Günter Herre** für den Ansporn, Unterstützung und Geduld.

Lebenslauf und Ausbildungsgang

Persönliche Daten

Julia Herre

geboren am 29.10.1978 in Hamburg, ledig

Schulausbildung

1985 – 1989	Katholische Grundschule Böhmestraße, Hamburg
1989 - 1998	Matthias – Claudius – Gymnasium
	Corinda State High School, Brisbane, Australien 1995
	Abitur am 27.06.1998; Note: 2,1

Hochschulstudium

an der Universität Hamburg

01.04.1999 - 01.04.2001	vorklinisches Studium
14.03.2001	Physikum (vorklinische Prüfung); Note: 2,66
21.03.2002	Erstes Staatsexamen; Note 2,0
23.03.2004	Zweites Staatsexamen; Note 2,0

Nebentätigkeiten

1998	Ausbildung zur Rettungssanitäterin

Praktisches Jahr

05.04.2004 - 30.05.2004	Anästhesie, Royal Brisbane and Women´s Hospital, Australien
21.06.2004 - 15.08.2004	Anästhesiologische Intensivstation, Universitätsklinik Hamburg - Eppendorf
16.08.2004 - 26.09.2004	Innere Medizin, Allgemeines Krankenhaus St. Georg, Hamburg

27.09.2004 - 31.10.2004	Kardiologie, Allgemeines Krankenhaus St. Georg, Hamburg
01.11.2004 - 05.12.2004	Internistische Notaufnahme und Aufnahmestation, Allgemeines Krankenhaus St. Georg, Hamburg
06.12.2004 – 27.03.2005	Chirurgie, Allgemeines Krankenhaus St. Georg, Hamburg

12.Erklärung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen nicht benutzt und die aus verwendeten Werken wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Erscheinungsjahr), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe. Außerdem versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem anderen Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.