

C. Klüß, H. Keller, K.-H. Oeinck,
M. Diefenbach, R. Meinert, M. Koch, J. Meier¹,
D. Meininger¹, K. Zacharowski¹, A. Moritz²

Maquet Cardiovascular GmbH,
Clinical Service
Klinik für Thorax-, Herz- und
thorakale Gefäßchirurgie

¹Klinik für Anästhesiologie, Intensivmedizin
und Schmerztherapie
(Direktor: Prof. Dr. Dr. Kai Zacharowski, FRCA)

²Klinik für Thorax-, Herz- und thorakale
Gefäßchirurgie
(Direktor: Prof. Dr. Anton Moritz)

Johann Wolfgang Goethe-Universität
Frankfurt/Main

Messung des „endtidalen“ CO₂ an der Herz-Lungen-Maschine

ZUSAMMENFASSUNG

Die endtidale CO₂-Messung bei beatmeten Patienten während der Narkose ist seit Langem ein bewährtes Standardverfahren zur Beurteilung der sicheren Intubation sowie zur Abschätzung des zu erwartenden CO₂-Spiegels in der arteriellen Blutgasanalyse (BGA). Hierbei wurden Abweichungen des PaCO₂ zu PetCO₂ von ± 4–5 mmHg beschrieben [1, 2, 3, 4]. Inhalt dieser Studie ist die Übertragung dieser Grundidee auf die extrakorporale Zirkulation (EKZ) unter Verwendung eines Narkosegasmonitors Vamos (Dräger). Während der EKZ wird die Narkose durch Sevofluran-Zufuhr mittels eines vom TÜV zertifizierten Applikationssystem in den Blutkreislauf aufrechterhalten. Bestimmt wurden die Abweichung des PaCO₂ zu PetCO₂ für das Alpha-stat- und pH-stat-Verfahren unter moderater Hypothermie bei 32 °C.

Ziel war es zu zeigen, dass die endtidale CO₂-Messung an der EKZ genauso verlässlich ist wie bei der Narkoseführung und somit eine Onlinemessung des CO₂ möglich ist.

SCHLÜSSELWÖRTER

Expiratorische CO₂-Messung, endtidales CO₂, Oxygenator, Narkosegasmonitor, CO₂-Onlinemessung

ABSTRACT

Endtidal CO₂ measurement on patients under artificial respiration is since quite a long time a well established standard procedure to come to secured evaluation on intubation

as well as for the purpose of prognosis with regard to patient's CO₂ level to be expected. In that respect aberrances from PaCO₂ to PetCO₂ of ± 4–5 mmHg have been observed [1, 2, 3, 4]. Content of this study mainly is to transfer that basic reflection on procedure of extracorporeal circulation (ECC). The before mentioned aberrances from PaCO₂ to PetCO₂ for alpha-stat and pH-stat procedures have been confirmed under moderate hypothermic effect under 32 °C. Final aim was to prove that endtidal CO₂ measurement during ECC is of comparable reliability compared to those under anesthesiologist's guidance meaning that an online measurement procedure on CO₂ is feasible.

KEY WORDS

Expiratory CO₂ measurement, endtidal CO₂, anesthesia monitoring, CO₂ online measurement

EINLEITUNG

Die Übertragung des Verfahrens der endtidalen Messung des CO₂ aus der Anästhesie an die Herz-Lungen-Maschine ist in der Literatur mehrfach in den 1990er und 2000er Jahren beschrieben worden [5, 6, 7]. Die Autoren kommen in ihren Arbeiten zu widersprüchlichen Ergebnissen über die Verwertbarkeit dieser Technik in der klinischen Anwendung.

Nach Diskussion dieser Arbeiten und Vergleich unserer klinischen Erfahrung mit der endtidalen CO₂-Messung an der HLM

als Online-CO₂-Messung kommen wir zu dem Schluss, dass keine der Arbeiten unserer klinischen Bedingungen – Alpha-stat-Verfahren und moderate Hypothermie bei 32 °C – entspricht.

Wir untersuchten daher 70 Patienten mit jeweils drei bis zehn Messzeitpunkten, um die Zuverlässigkeit der CO₂-Onlinemessung eindeutig zu belegen und eine zu erwartende Abweichung der endtidalen zur arteriellen Messung zu bestimmen.

PATIENTENAUSWAHL UND GEMESSENE PARAMETER

Alle Patienten dieser prospektiven Anwendungsbeobachtung unterzogen sich einer Herzoperation mit EKZ. In der Zeit vom März bis Juli 2009 wurden insgesamt 90 Patienten mit Einfacheingriffen: ACB 56 %, AKE 27 % und MKR 3 % sowie Doppeleingriffen 14 %, die eine Maschinenzeit von 120 min voraussichtlich nicht überschreiten würden, eingeschlossen.

Ausgeschlossen wurden insgesamt 20 von 90 Patienten [11]. 15 dieser Patienten wurden wegen intraoperativen Wechsels zum OPCAB-Verfahren ausgeschlossen, drei Patienten wegen Schwierigkeiten mit dem Filter in der Narkosegasabsaugleitung.

Auslöser dieses Problems war die Sättigung des Filters durch Kondenswasser, welche zu Messfehlern führte. Die Messungen waren in diesen Fällen falsch niedrig. Ein Wechsel des Abnahmepunktes vor dem Filter löste dieses Problem.

Die verbleibenden zwei Patienten wurden wegen Fehlbestimmungen in der Blutgasanalyse ausgeschlossen.

Bei 13 Patienten wurde jeweils ein Messzeitpunkt ausgeschlossen. Aufgrund

Eingriff	Anzahl	Geschlecht m / w	Alter	EKZ-Zeit	Klemm-Zeit	Reperfusion
ACB	39	33 / 6	68 ± 9,3	87 ± 31	49 ± 21	27 ± 10
AKE	19	9 / 10	73,5 ± 4,9	97 ± 28	67 ± 20	19 ± 9
MKR	2	1 / 1	67,5 ± 21,9	108 ± 20	80 ± 33	26 ± 14
Kombi	10	7 / 3	69 ± 8,9	133 ± 42	96 ± 28	22 ± 9
Gesamt	70	50 / 20	69 ± 9,1	97 ± 35	61 ± 27	24 ± 10

Tab. 1: Übersicht der Eingriffe

Gruppe	p-Wert
1. PaCO ₂ (37) / 2. PetCO ₂	0,03
2. PetCO ₂ / 3. PaCO ₂ (Temp)	2,85

Tab. 2: Student's t-Test

der initialen Kühlung der Patienten kam es zu kurzfristigen Bluttemperaturen von 24 °C. Bei 13 Patienten lagen die gemessenen Bluttemperaturen zu jeweils einem der Messzeitpunkte unter 30 °C. Diese Messzeitpunkte wurden wegen der aus der niedrigen Temperatur resultierenden falsch niedrigen Werten ausgeschlossen (Tab. 1).

Die Kontrolle der mit dem Narkosegasmonitor Vamos (Dräger AG, Lübeck) gemessenen endtidalen CO₂-Werte erfolgte nach fünf Minuten, 15 Minuten und dann alle 15 Minuten bis zum Ende der EKZ. Zusätzlich erhobene Werte waren die Körperkerntemperatur, gemessen in der Blase, die arterielle Bluttemperatur, gemessen am arteriellen Oxygenatorausgang, der Gasfluss sowie das errechnete, temperaturkorrigierte CO₂.

Die temperaturkorrigierten Werte wurden mit der im Blutgasanalysator ABL 800 Flex (Radiometer, Willich) hinterlegten Formel berechnet:

$$pCO_2(T) = pCO_2(37\text{ °C}) \times 10^{[0,021 \times (T - 37)]}$$

Bestimmt wurde die jeweilige Abweichung der arteriellen zur endtidalen CO₂-Messung am Oxygenator jeweils für das Alpha-stat- und das pH-stat-Verfahren.

SYSTEMAUFBAU UND PERFUSIONSFÜHRUNG

Unsere Standard-Herz-Lungen-Maschine ist die HL 20 Classic mit der Datenaufzeichnung OR Computer, der Online-Blutgasmessung BMU 40 (Maquet Cardiopulmonary AG, Hirrlingen), ein Vapor 2000, ein Vamos zur Narkosegas- und CO₂-Messung (Dräger, Lübeck), ein Perfusor Anästhesie Pilot (Fresenius Vial S.A., Brezins, Frankreich). Das Einmalset besteht aus venösem Reservoir mit arteriellen 1/2"-Rollenpumpen-Schlauch, Oxygenator Quadrox-i mit integriertem arteriellen 40-µm-Filter (Maquet Cardiopulmonary AG, Hirrlingen). Das System wird nach Standard mit 250 ml Manitol 20 %, 500 ml Haes 6 %, 500 ml Ringerlösung, 250 ml Hämodilutionsblut des Patienten, 10.000 I.E. Heparin sowie 2 g Cyclocapronsäure gefüllt. Das Primingvolumen beträgt 1522 ml, 1272 ml hiervon sind kristalloid. Die Heparinisierung des Patienten erfolgte mit 400 I.E./kg/KG. Die Ziel-ACT vor Beginn der EKZ liegt bei > 480 sec. Der Anschluss der EKZ erfolgte arteriell in der Aorta ascendens mit einer 20-Fr.-Kanüle, venös wurde bei ACB und AKE eine Zweistufenkanüle ACB 32/37 Fr. und AKE 28/32 Fr. (Maquet Cardiopulmonary AG, Hirrlingen) verwendet. Bei der MKR wur-

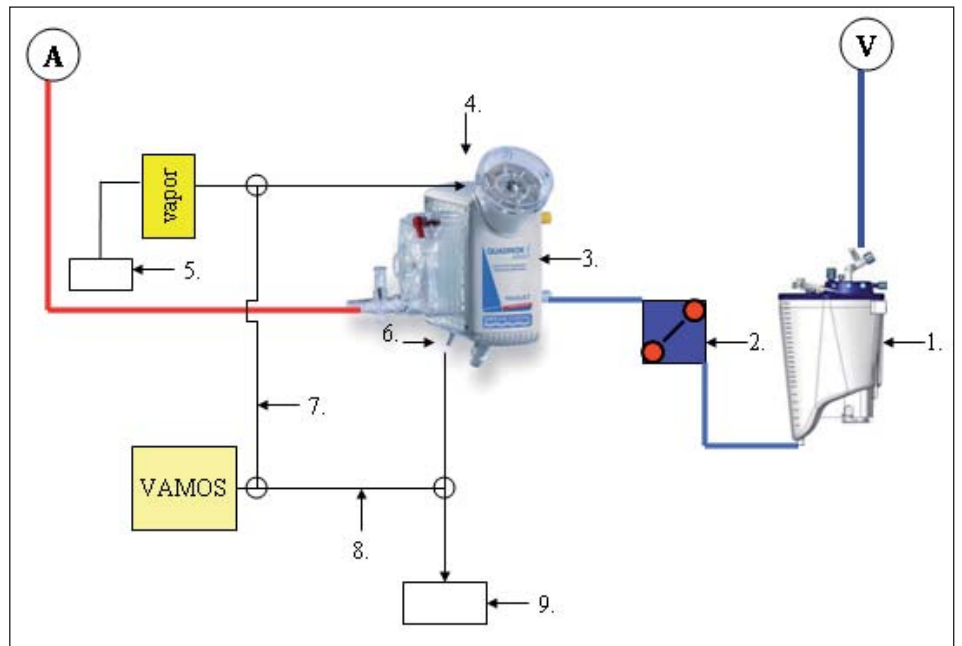


Abb. 1: Schematische Darstellung des Systemaufbaus zur Narkosegas- und CO₂-Messung
 Legende: 1. Venöses Reservoir, 2. Rollerpumpe, 3. Oxygenator, 4. Gaseinlass, 5. Gasblender, 6. Gasauslass, 7. Inspiratorische Narkosegasmessleitung, 8. expiratorische Gasmessleitung, 9. Narkosegasabsaugung

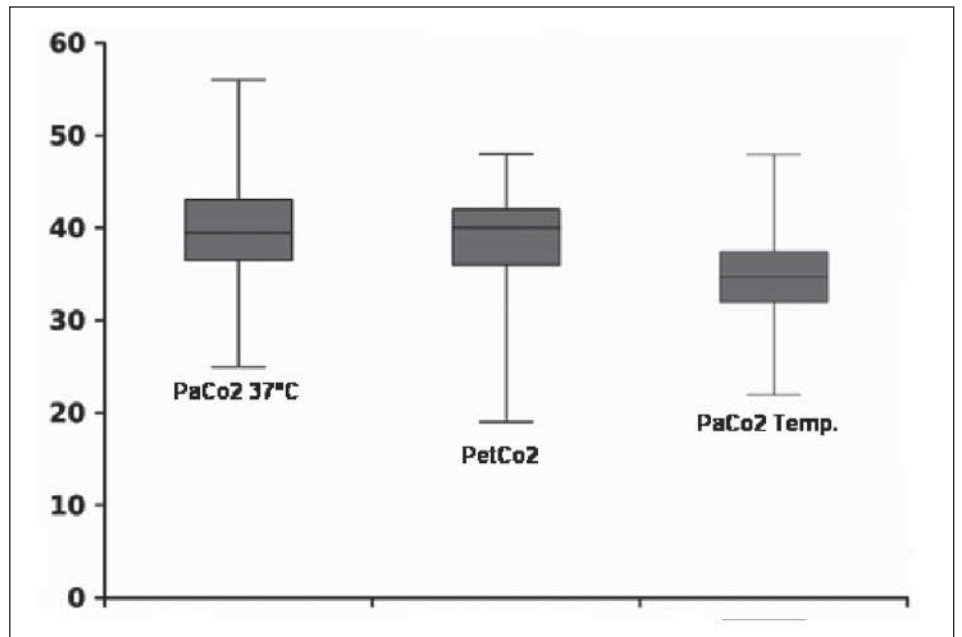


Abb 2: Vergleich der Gruppen 1, 2 und 3

de mit 22-Fr.-Kanülen (Medtronic, Meerbusch) über die obere und untere Hohlvene kanüliert.

Der Cardiac Index betrug je nach Euroscore 2,6 l/m²/KOF oder 3,0 l/m²/KOF. Die Körperoberfläche (KOF) wurde nach DuBois berechnet.

Das OP-Feld wurde bei Eingriffen mit offenen Herzhöhlen mit 2 l/min CO₂ gespült.

Nach Erreichen des errechneten Flusses wurde der Aortenwurzelvent mit Kardioplegie-, Ventkanüle Antegrad 9 Fr. (Maquet Cardiopulmonary AG, Hirrlingen) angelegt.

Zur Aortenklemmung wurde die Bluttemperatur kurzfristig auf 24 °C abgesenkt, um danach 32 °C Körperkerntemperatur zu erreichen. Die Kardioplegie erfolgte bei ACBs nach dem Calafiore-Schema. Bei AKEs und MKRs sowie den Doppeleingriffen erfolgte die Kardioplegie nach Buckberg-Schema, initial 800 ml bis 1200 ml, danach alle 20 min eine Reinfusion für zwei Minuten. Vor der Aortenöffnung erfolgte eine normoxische Reperfusion mit 36 °C warmem venösen Blut für zwei Minuten [8, 9]. Nach Beendigung der chirurgischen Therapie und Wiedererwärmung des Patienten erfolgte das stufenweise

Gruppe	Median	25 %	75 %	p-Wert
1. PaCO ₂ 37 °C	39,5	36,5	43,15	
2. PetCO ₂	41	36	42	
3. PaCO ₂ Temp.	34,7	31,95	37,5	
1. vs. 3.				<0,05
1. vs. 2.				>0,05
2. vs. 3.				<0,05

Tab. 3: Darstellung und Vergleich der Gruppen

Abgehen von der EKZ. Das CO₂-Management und die Gasflusssteuerung erfolgten nach der Messung der expiratorischen CO₂-Konzentration, die kontinuierlich mit dem Narkosegasmonitor am Oxygenatorausgang gemessen wurde (Abb. 1).

Der Gasfluss wurde so eingestellt, dass die am Narkosegasmonitor gemessenen

Werte zwischen 35 mmHg und 45 mmHg lagen. Die Kontrolle der Werte erfolgte, wie im Protokoll vorgegeben, nach fünf Minuten, 15 Minuten und danach alle 15 Minuten mit den in der BGA gemessenen CO₂-Spiegeln.

Die Messung des CO₂ erfolgt innerhalb der Messküvette des Vamos. Gemessen

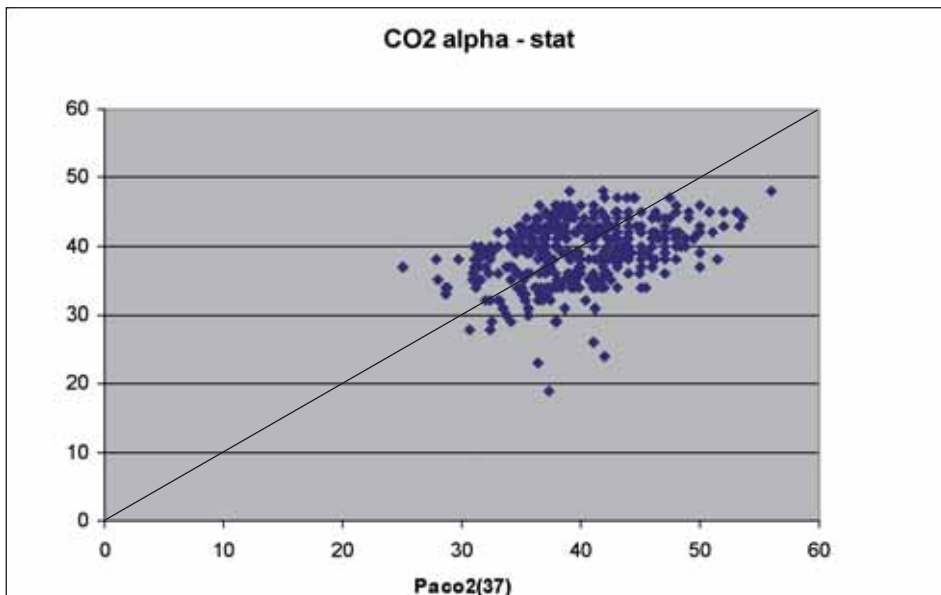


Abb. 3: Darstellung PetCO₂/PaCO₂ Alpha-stat-Verfahren

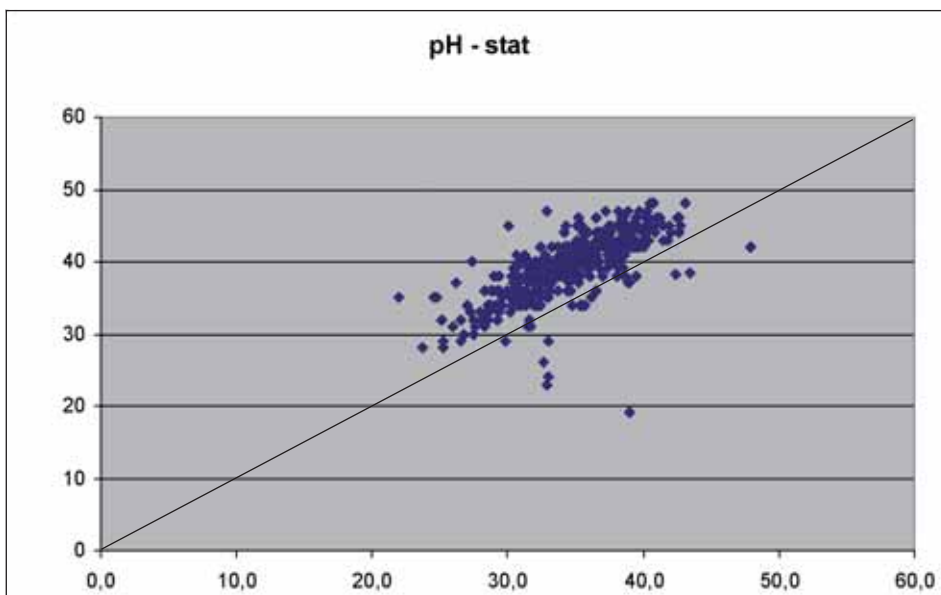


Abb 4: Darstellung PetCO₂/PaCO₂ pH-stat-Verfahren

wird bei einer konstanten Temperatur von 56 °C innerhalb der Küvette. Diese Temperatur ist von der Umgebungstemperatur im spezifischen Einsatzbereich von 10 °C bis 40 °C unabhängig. Gemessen wird ebenfalls der Luftdruck innerhalb der Küvette, da dieser nicht konstant ist und vom Luftdruck, dem Widerstand der Messgasleitung sowie dem Absaugfluss, der durch die Pumpe erzeugt wird, abhängt. Der gemessene Druck wird zur Korrektur der in der Küvette gemessenen Absorptionswerte genutzt. Temperaturkorrekturen werden im Gerät nicht vorgenommen. Aufgrund des Einflusses des Absaugschlauches auf den Widerstand der Absaugleitung verwenden wir den Standardschlauch der Firma Dräger (Lübeck).

STATISTISCHE AUSWERTUNG

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit Excel und SPSS. Durchgeführt wurden der Student's t-Test, die Kruskal-Wallis One-way Analysis of Variance (ANOVA) on Ranks sowie der Post Hoc Test Dunn's mit paarweisem Vergleich [11].

ERGEBNISSE

Das durchschnittliche HZV der Patienten unter EKZ betrug $5,31 \pm 0,52$ l/min. Die durchschnittliche EKZ-Dauer lag bei $97,1 \pm 35$ min, die Aortenklemmzeit bei 61 ± 27 min und die Reperfusionzeit bei $24,6 \pm 10$ min.

Berechnet wurden die Abweichungen von arteriellem CO₂ zu expiratorischem CO₂ am Oxygenatorausgang. Beim Alpha-stat-Verfahren betrug die Abweichung $0,72 \pm 5,43$ mmHg. Im pH-stat-Verfahren lag die Abweichung bei $4,74 \pm 3,11$ mmHg.

Gemessen wurden N = 408 Messzeitpunkte in jeder Gruppe. Mit dem Student's t-Test (Excel) wurden folgende Gruppen verglichen:

Für das Alpha-stat-Verfahren die Gruppe 1 mit der Gruppe 2.

Die Gruppen 2 und 3 wurden für das pH-stat-Verfahren verglichen (Tab. 2). Erwartet wurde ein nicht signifikanter Unterschied der Gruppen bei $p < 0,05$.

Zur Sicherung des Ergebnisses des Student's t-Test wurde mit SPSS eine Kruskal-Wallis One-way Analysis of Variance (ANOVA) on Ranks durchgeführt. Verglichen wurde hierbei der jeweilige Median der Gruppen 1, 2 und 3 (Abb. 2). Der Unterschied des jeweiligen Median war größer als erwartet. Es besteht ein signifikanter Unterschied der Mediane $p \leq 0,001$.

Zur Isolierung der Gruppe oder Gruppen (Tab. 3), die sich von den anderen unterscheiden, wurden diese paarweise mit dem Dunn's Test verglichen. Ein signifikanter Unterschied wurde bei $p < 0,05$ angenommen (siehe Tab. 3 und Abb. 2).

DISKUSSION

Die Messung des endtidalen CO_2 am Oxygenator erlaubt im Alpha-stat-Verfahren unter Normothermie und moderater Hypothermie bei 32°C eine sichere Onlinemessung des CO_2 -Spiegels in der BGA. Dies ermöglicht es ohne großen Kostenaufwand, den Gasfluss jederzeit den aktuellen Gegebenheiten anzupassen, ohne hierfür auf Onlinemesszellen zurückgreifen zu müssen.

Als besonders nützlich erweist sich dieses, wenn das OP-Feld mit CO_2 gespült wird, das durch Absaugen über den Vent und Tischsauger in das EKZ-System gelangt und dazu führt, dass der CO_2 -Spiegel im Blut deutlichen Schwankungen unterliegt: Klinisch waren bei einer CO_2 -Spülung des OP-Feldes CO_2 -Schwankungen von 40 bis 75 mmHg zu beobachten. Diese Schwankungen erforderten eine kontinuierliche, häufigere Anpassung des Gasflusses, die über den normalen klinischen Rahmen der Gasflüsse von 1,5–3,0 l/min hinausging.

Für das pH-stat-Verfahren ist diese Messung aufgrund der hohen Abweichungen der CO_2 -Werte und dem nicht bestandenen Student's t-Test sowie Dunn's Test nicht geeignet (siehe Tab. 2, 3).

Im Rahmen der initialen Kühlung vor der Aortenklemmung konnte ein deutlicher Abfall des im Vamos gemessenen CO_2 -

Spiegels beobachtet werden, der nicht mit den in der BGA gemessenen CO_2 -Spiegeln korrelierte und sich nach kurzer Anpassungsphase wieder dem tatsächlichen CO_2 -Spiegel anglich. Die Ursache dieses Phänomens liegt unserer Meinung nach an dem großen Temperaturunterschied zwischen dem Messgas am Oxygenatorausgang (ca. 25°C) und der Temperatur in der Messzelle (50°C) und scheint somit ein physikalisches Problem zu sein.

Zusammenfassend ist die endtidale Messung des CO_2 am Oxygenatorausgang eine sichere Möglichkeit, das CO_2 online zu bestimmen. Wir konnten die Aussagen von O'Leary et al., dass die Messwerte extrem variabel sind, nicht bestätigen. Unsere Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Abweichung mit $0,72 \pm 4,74$ mmHg eine sichere Überwachung des CO_2 -Spiegels zulässt. Hiermit bestätigen sich die Ergebnisse von Graham et al., die eine Abweichung von 6 mmHg angeben. Im pH-stat-Verfahren ist die Messung aufgrund der hohen Abweichungen nicht geeignet.

LITERATUR

- [1] *Monitoring in der Anästhesie und Intensivmedizin.* Springer 2008
- [2] Lange, *Clinical Anesthesiology*, 2002
- [3] Bendallal H, Busso T: *Analysis of end-tidal and arterial PCO_2 gradients using a breathing model.* *Eur J Appl Physiol* 2000; 83: 402–408
- [4] Zander R: *Optimierung des Säure-Basen-Status unter Hypothermie.* *Der Anaesthesist* 9/2007; 56: 912–916
- [5] Graham JM, Gibbs NM, Weightman WM, Sheminant MR: *The relationship between oxygenator exhaust PCO_2 and arterial PCO_2 during hypothermic cardiopulmonary bypass.* *Anaesth Intensive Care* 2005; 33: 457–461

[6] O'Leary MJ, Mac Donnell SP, Ferguson CN: *Oxygenator exhaust capnography as an index of arterial carbon dioxide tension during cardiopulmonary bypass using a membrane oxygenator.* *Brit J Anaesthes* 1999; 82 (6): 843–846

[7] Ranucci M, Isgrò G, Romitti F, Sara Mele S, Biagioli B, Giomarelli P: *Anaerobic metabolism during cardiopulmonary bypass: predictive value of carbon dioxide derived parameters.* *Ann Thorac Surg* 2006; 81: 2189–2195

[8] Abdel-Rahman U, Risteski P, Tizi K, Kerschler S, Bejati S, Zwicker K, Scholz M, Brandt U, Moritz A: *Hypoxic reoxygenation during initial reperfusion attenuates cardiac dysfunction and limits ischemia – reperfusion injury after cardioplegic arrest in a porcine model.* *J Thorac Cardiovasc Surg* 2009; 137 (4): 978–982

[9] Abdel-Rahman U, Aybek T, Moritz A, Kleine P, Matheis G: *Graded reoxygenation limits lipid peroxidation during surgical reperfusion.* *Med Sci Monit* 2003; 9(9): CR389–391

[10] *Taschenatlas der Physiologie.* Thieme, 6. Auflage 2003

[11] *Angewandte Statistik.* Springer, 11. überarbeitete und aktualisierte Auflage 2003

Christian Klüß
Kardiotechniker ECCP
Maquet Cardiovascular GmbH,
Clinical Service
Klinik für Thorax-, Herz- und thorakale
Gefäßchirurgie
Johann Wolfgang Goethe-Universität
Frankfurt/Main
Theodor-Stern-Kai 7
60590 Frankfurt/Main
c-kluess@web.de