

**Empfehlung: Perioperatives anästhesiologisches Management bei neurochirurgischen Operationen in
sitzender oder halbsitzender Position**

Autoren:

**Peter Michels¹, Martin Söhle², Werner Klingler³, Anselm Bräuer¹, Berthold Drexler⁴
für den Wissenschaftlichen Arbeitskreis Neuroanästhesie (WAKNA) der DGAI**

Klinik für Anästhesiologie, Universitätsmedizin Göttingen¹

Klinik für Anästhesiologie und Operative Intensivmedizin, Universitätsklinikum Bonn²

Anästhesie, Intensivmedizin und Schmerztherapie, SRH Krankenhaus Sigmaringen³

Universitätsklinik für Anästhesiologie und Intensivmedizin, Universitätsmedizin Tübingen⁴

Einleitung

Um ein für den Patienten bestmögliches Ergebnis im Rahmen der operativen Versorgung erreichen zu können, wurden und werden in allen operativen Fachgebieten teils komplexe Lagerungsformen durchgeführt. Hieraus ergibt sich für unser anästhesiologisches Fachgebiet die Aufgabe, neben der üblichen Sicherstellung adäquater Vitalparameter auch durch die Lagerung bedingte Komplikationen möglichst zu vermeiden oder frühzeitig erkennen und suffizient behandeln zu können.

Im Bereich der Neurochirurgie besitzt die Lagerung des Patienten in (halb-)sitzender Position zur operativen Versorgung insbesondere bei Prozessen im Bereich der hinteren Schädelgrube eine relevante Verbreitung, kann diese den beteiligten Disziplinen doch eine Reihe von Vorteilen im Vergleich zu anderen Lagerungsarten bieten. Prinzipiell sind aber auch viele der in dieser Leitlinie aufgeführten Punkte ebenso für die sichere Versorgung der Patienten in anderen operativen Disziplinen zu beachten, werden doch auch zum Beispiel bei der "beach-chair"-Position zur Schulterchirurgie oder Stabilisierungen im Bereich der oberen Halswirbelsäule Lagerungen mit erhöhtem Oberkörper angewandt.

Von besonderer Bedeutung sind bei diesen Lagerungsformen neben den speziellen Risiken durch die Lagerung selbst vor allem die Sicherstellung einer adäquaten zerebralen Durchblutung und das Erkennen und Behandeln einer venösen Luftembolie (VLE). Für die Anästhesie ergibt sich hierbei die Anforderung, mittels transösophagealer Echokardiographie (TEE) eine VLE früh zu erkennen und in Kommunikation mit dem operativen Partner diese gezielt behandeln zu können. Die im Jahr 2008 veröffentlichten Empfehlungen aus dem WAKNA zu „Monitoring bei neurochirurgischen Operationen in sitzender oder halbsitzender Position“ wurden überarbeitet und ergänzt (Fritz 2008).

1) Darstellung der Lagerungsformen und deren Auswirkungen

1.1) Die Lagerung des Patienten in (halb-)sitzender Position

Die Anwendung der sitzenden Position zur Chirurgie der zervico-dorsalen Wirbelsäule sowie Prozessen in der hinteren Schädelgrube wurde besonders in den 1960er und 1970er-Jahren in der anästhesiologischen Fachliteratur beschrieben. Seit den 1990er Jahren scheint im angloamerikanischen Sprachraum jedoch die Anwendungshäufigkeit um mehr als 50 % zurückzugehen (^{Porter 1999}).

Auch in Deutschland ist die Anwendung der (halb-)sitzenden Lagerung zur Gefäß- oder Tumoroperation in der Neurochirurgie insgesamt rückläufig, wurde aber 2014 weiterhin gleich häufig wie die Bauchlage (41,4 vs. 40,4 % der Fälle) als Lagerungsform bei Operationen im Bereich der hinteren Schädelgrube gewählt, während ansonsten die modifizierte Rücken- bzw. Seitenlage angewendet wurde (^{Schaffranietz 2016}).

1.2) Durchführung und Risiken der Lagerung zur (halb-)sitzenden Position

Um einen möglichst freien Zugang zum Operationsgebiet erreichen zu können, wird der Kopf des Patienten in Rückenlage mittels einer Drei-Punkt-Schraubklemme („Mayfield-Klemme“) mit dem Operationstisch verbunden und somit die Halswirbelsäule nebst Kopf in der erforderlichen Position fixiert. Anschließend wird der Oberkörper des Patienten aufgerichtet und bildet mit den waagrecht liegenden Beinen einen Winkel von etwa 90- 100°.

Bei der **sitzenden Lagerung** wird zur weiteren Exponierung des operativen Situs der gesamte OP-Tisch als Einheit gekippt, so dass die Patientenbeine durchaus in Richtung Boden zeigen und deutlich unterhalb des Operationsgebietes liegen.

Durch die **halbsitzende Lagerung** soll letzteres vermieden werden. Hierzu erfolgt neben der Flexion in der Hüfte eine zusätzliche Beugung der Kniegelenke um ca. 30° mit sich daran anschließender Kippung des OP-Tisches soweit „Oberkörper-tief“, dass die Füße des Patienten regelhaft auf Höhe des Patientenkopfes und somit des Sinus transversus sind. Zwecks besserer Exponierung des Operationsgebietes ist danach eine Anteflexion in der HWS-Ebene notwendig, welche bei der halbsitzenden Position ausgeprägter sein muss als bei der sitzenden Position.

Insbesondere wenn ein lateraler Zugang zur hinteren Schädelgrube gewählt wird, muss die Halswirbelsäule des Patienten neben der starken Beugung auch einer Rotation im Sinne einer seitlichen Drehbewegung unterzogen werden.

Zur Vermeidung von lagerungsbedingten Schäden ist bei diesen Lagerungsformen auf folgendes zu achten:

- Die Verwendung von Muskelrelaxanzien kann die Wahrscheinlichkeit von Lagerungsschäden erhöhen (^{Müller-Vah 2010}).
- Eine übermäßige Flexion im Hüftgelenk kann u.a. zu einer Schädigung des N. ischiadicus und Durchblutungsstörungen durch Kompression der Iliakal- und Femoralgefäße führen.
- Beim Vorhandensein von degenerativen Wirbelsäulenveränderungen können z.B. Osteophyten lagerungsbedingt in den Spinalkanal hineinragen und durch einen vermehrten Druck eine Schädigung des Rückenmarkes hervorrufen.

- Die Anteflexion der HWS kann neben einer Schwellung der Zunge auch durch Zug am Rückenmark sowie durch eine kompressionsbedingte spinale Minderperfusion zur sogenannten „midcervical flexion myelopathy“ bis hin zu einer Tetraplegie führen (Deinsberger 1998, Lam 2000, McAllister 1974, Yahanda 2020). Diese Schädigung ist jedoch bei (halb-)sitzender Lagerung wie bei Bauchlage gleich häufig (Yahanda 2020).

Idealerweise könnte eine Probelagerung am wachen Patienten erfolgen, um die beschriebenen Probleme zu vermeiden (Abbildung 1). Die sonst übliche Alternative zur Erkennung von neurologischen Auffälligkeiten ist in der klinischen Praxis aber die Lagerung des Patienten unter elektrophysiologischem intraoperativem Monitoring (IONM) wie z.B. der Ableitung von somatosensorisch evozierten Potentialen, um eine drohende Schädigung des Rückenmarks frühzeitig zu detektieren und somit diese gefürchtete Komplikation zu vermeiden (Anastasian 2009, Jadik 2009, Yahanda 2020). Bei der Interpretation der erfassten evozierten Potentiale ist zu beachten, dass deren Amplituden und Latenzen unter anderem von der Narkosetiefe und dem Relaxierungsgrad abhängig sind (Michels 2017). Daher empfiehlt sich eine nach stattgehabter Einleitung mittels prozessiertem EEG ermittelte gleichbleibende Narkosetiefe ohne Nachrelaxierung des Patienten mit „Baseline-Erhebung“ der evozierten Potentiale vor Beginn der Lagerungsmaßnahmen.



Abbildung 1: Probelagerung am wachen Patienten

Immer sollte neben der üblichen visuellen Lagerungskontrolle darauf geachtet werden, dass zwischen Kinn und Sternum problemlos 2 Querfinger gelegt werden können, um eine übermäßige Anteflexion zu vermeiden. Eine Durchblutungsstörung der Beinarterien ist ebenso einfach durch die wiederholte Kontrolle der Rekapillarierungszeit an den Zehen zu erkennen.

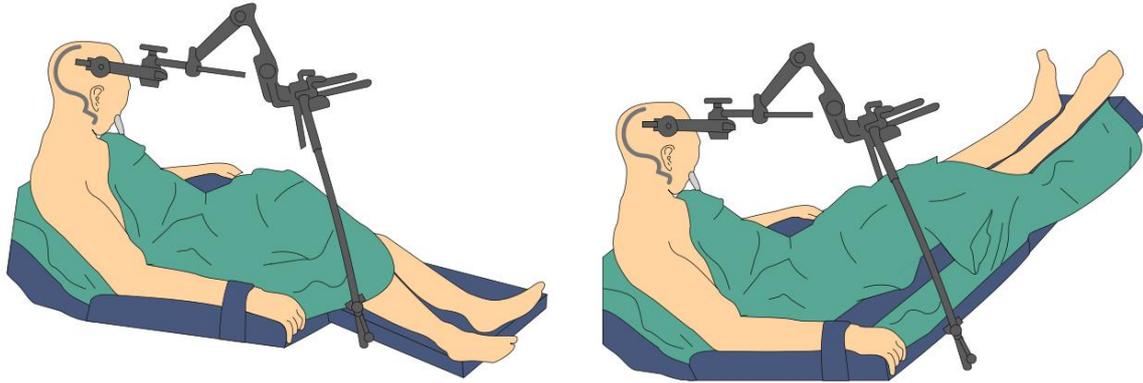


Abbildung 2: Vergleich sitzende (links) und halbsitzende (rechts) Position; Kopf mittels Mayfield-Klemme am OP-Tisch fixiert

Bei der zur Schulterchirurgie üblichen Beach-Chair-Lagerung wird der Patientenkopf nicht durch eine stabile Verbindung wie der Mayfield-Klemme gesichert, sondern in eine-Kopfschale gelegt und mit Bändern über den knöchernen Gesichtsschädel fixiert, um ein Abrutschen des Kopfes aus dieser Halterung zu vermeiden. Insbesondere bei der Schulterchirurgie ist neben Beachtung der sicheren Fixierung des Kopfes darauf zu achten, dass eine zunehmende Seitwärtsbewegung der HWS durch den intraoperativen Zug am Arm des Patienten zur Nervenschädigung führen kann und deshalb vermieden werden sollte.

1.3) Vor- und Nachteile der (halb-)sitzenden Position:

Bei einer „herkömmlichen“ Lagerungsform wie der Rücken- oder Bauchlage befinden sich das Operationsgebiet sowie das Herz auf einer nahezu gleichen Ebene ohne Höhendifferenz. Da der intravasale Druck unter positiver Druckbeatmung regelhaft höher als der Umgebungsdruck ist, würde somit aus einer eröffneten Vene Blut austreten und den Eintritt von Luft verhindern. Im Falle einer Blutung im OP-Situs verschlechtert sich hierdurch bei herkömmlicher Lagerung die Sicht des Operateurs und erschwert auch das Auffinden der Blutungsquelle.

Im Gegensatz hierzu kommt es durch eine Oberkörperhochlagerung zu einer Änderung der hydrostatischen Druckdifferenz zwischen OP-Gebiet und Herz, so dass das Blut schwerkraftbedingt aus dem OP-Gebiet abfließt und die Sicht des Chirurgen somit verbessert wird. Dieses Prinzip machen sich auch andere operative Disziplinen wie z.B. die Urologie bei einer roboterassistierten Prostatektomie mit verstärkter Trendelenburglagerung oder die Unfallchirurgie bei einer Beach-Chair-Lagerung zur Schulter-Operation zu Nutze.

Ebenso kann im Bereich der Neurochirurgie eine Operation in sitzender oder halbsitzender Position Vorteile bieten (Goraksha JNCC 2020, Porter 1999). Unter anderem sinkt der intrakranielle Druck (ICP) und der Liquorabfluss wird verbessert. Durch eine schwerkraftbedingte Trennung der Gewebestrukturen ergibt sich für die Neurochirurgie oftmals eine Verbesserung der operativen Bedingungen besonders bei Operationen im Bereich des Kleinhirns oder des 4. Ventrikels.

Auch aus anästhesiologischer Sicht bietet eine (halb-)sitzende Lagerung Vorteile im Vergleich zur Rücken- oder Bauchlage. So wird insbesondere bei adipösen Patienten durch das Absinken der Bauchorgane und damit des

Zwerchfelles die Compliance von Thorax und Lunge gesteigert und somit die Beatmung erleichtert. Im Rahmen des Atemwegsmanagements ist bei der (halb-)sitzenden Lagerung der Zugang zu Gesicht und Hals des Patienten ungestörter. Ebenso können bei Einsatz eines elektrophysiologischen Monitorings, wie zum Beispiel beim Monitoring des N. facialis, die Antworten auf den Stimulus im Gesicht besser gesehen werden.

Diese Vorteile sind gegenüber den potenziellen Risiken abzuwägen (Tabelle 1).

Neben dem Auftreten von Lagerungsschäden sind vor allem venöse Luftembolien als typische Risiken der sitzenden oder halbsitzenden Lagerung zu nennen. Wie unten aufgeführt, kann der Ausprägungsgrad solcher Luftembolien vom asymptomatischen Zufallsbefund über katecholaminpflichtige Kreislaufprobleme bis hin zum Rechtsherzversagen mit Todesfolge führen. Beim Vorhandensein eines persistierenden Foramen ovale (PFO) drohen durch paradoxe VLE-Ereignisse sowohl Hirn- und/oder Myokardinfarkte durch luftbedingte arterielle Gefäßverschlüsse.

Der Nachweis von intrakranieller Luft im Sinne eines Pneumocephalus ist ein sehr häufiger Befund in der postoperativen Bildgebung nach intrakraniellen Eingriffen sowohl in liegender wie auch in (halb-)sitzender Lagerung. Ein behandlungsbedürftiger Spannungspneumocephalus ist jedoch mit ca. 3 % ein seltenes Ereignis (Machetanz 2020).

Hieraus begründet sich eine sorgfältige Nutzen-Risiko-Abwägung der Art der Lagerung, welche interdisziplinär aus chirurgischer und anästhesiologischer Sicht erfolgen und im jeweiligen Patientenaufklärungsgespräch Berücksichtigung finden sollte.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile einer Operation in (halb-)sitzender Position (IONM: intraoperatives Neuromonitoring; PFO: Persistierendes Foramen ovale; VLE: venöse Luftembolie)
<p>Vorteile durch</p> <ul style="list-style-type: none"> - verbesserte Ergonomie aus operativer Sicht - verbesserte Exposition des OP-Gebietes insb. bei Operationen im Bereich der hinteren Schädelgrube - verbesserte Liquor- und Blutdrainage mit Senkung des intrakraniellen Druckes - Reduzierung von Blutverlust und Gewebstrauma - erleichterte Lagerung und Beatmung insbesondere adipöser Patienten - besserer Zugang zu Gesicht und Hals des Patienten - besserer Zugang zum Patienten in Notfallsituationen - erleichterte Beobachtung der Muskelantwort bei Einsatz des IONM
<p>Nachteile bzw. erhöhtes Risiko für</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zungenschwellung durch übermäßige Flexion der Halswirbelsäule - Nervenschäden (z.B. Nervus ischiadicus bis hin zur Tetraparese) - Hirnnervenschädigung - postoperativen Pneumocephalus - VLE mit hämodynamischen Auswirkungen bis zum Rechtsherzversagen - VLE mit konsekutiver Koagulopathie - paradoxe VLE mit Schlaganfall und/oder Koronararterienverschuß bei vorhandenem PFO

1.4) Physiologische Änderungen durch die sitzende Position

Das Verbringen des Patienten aus der Rückenlage in eine sitzende Position ist regelhaft mit einer Hypotension assoziiert (^{Pin-On 2013}). Als Ursache hierfür gilt die orthostatische Dysregulation mit Umverteilung des Blutvolumens in die abhängigen Körperpartien (venöses Pooling) und damit einhergehender Reduzierung der kardialen Vorlast. Untersuchungen an einem neurochirurgischen Patientenkollektiv ohne kardiovaskuläre Vorerkrankungen zeigten, dass ein Aufrichten des Oberkörpers mit einem signifikanten Absinken des Vorhofdrucks sowie des arteriellen Mitteldrucks verbunden ist (^{Buhre et al. 2000}). Darüber hinaus kommt es zu einer Abnahme des Herzzeitvolumens sowie des intrathorakalen Blutvolumens (^{Jo et al. 2014, Tsaousi 2010}).

Der Einsatz von Anästhetika vermindert insbesondere die Reaktionsgeschwindigkeit und Effektivität des Barorezeptorenreflexes als einen physiologischen Adaptationsmechanismus auf diese positionierungsbedingten hämodynamischen Effekte und aggraviert damit die Hypotensionsgefahr.

Der zerebrale Blutfluss wird maßgeblich durch den mittleren arteriellen Blutdruck (MAP) als treibende Kraft sowie den intrakraniellen Druck (ICP) als stromabwärts gerichteten, postkapillären Druck bestimmt. Im MAP-Bereich von ca. 60–160 mmHg sorgt unter physiologischen Bedingungen eine effektive zerebrovaskuläre Autoregulation durch zerebrale Vasodilatation oder -konstriktion für eine suffiziente Durchblutung des Gehirns. Bei Unterschreiten des unteren Grenzpunktes des Autoregulationsbereiches resultiert ein steiler Abfall der zerebralen Durchblutung und somit des zerebralen Sauerstoffangebots, so dass es zu neuronalen Schäden kommen kann. Nachgewiesen wurde bei herzinsuffizienten Patienten eine Verschlechterung der zerebralen Perfusion nach dem Aufsetzen durch Unterschreitung des unteren Grenzpunktes der zerebralen Autoregulation (^{Fraser 2015}).

Besonders zu betonen ist, dass der untere Punkt des zerebralen Autoregulationsbereichs durch Vorerkrankungen wie chronische arterielle Hypertonie oder Atherosklerose nach rechts (also zu höheren MAP-Werten hin) verschoben ist. Bei Patienten mit zerebraler Ischämie, Schädel-Hirn-Trauma oder stattgehabter subarachnoidaler Blutung kann die zerebrale Autoregulation sogar gänzlich aufgehoben sein, so dass hier die zerebrale Durchblutung direkt abhängig vom MAP ist. Die intraoperative Hypotension ist mit der Gefahr einer myokardialen oder zerebralen Ischämie verbunden, wobei diese Effekte abhängig vom Ausmaß und der Zeitdauer der Hypotension sind (^{Abbott 2018, Gregory 2021 Guarracino 2022}). So zeigt eine retrospektive Studie von Wachtendorf et al nach Auswertung von mehr als 300.000 Patienten einen Anstieg der Delirwahrscheinlichkeit mit zunehmender Dauer von Hypotensionsphasen, definiert als ein Unterschreiten des arteriellen Mitteldrucks von 55 mmHg (^{Wachtendorf 2022}). Obwohl diese Gefahren für die Patienten klar sind und der Blutdruck eine wesentliche Größe für eine zielorientierte Therapie darstellt, gibt es interessanterweise bislang keine allgemeingültige Definition einer intraoperativen Hypotension. Als Konsens gilt, dass eine Reduktion des am wachen Patienten gemessenen Ausgangsblutdruckes um mehr als 20 % als Hypotension zu werten ist (^{Weinberg 2022}).

1.5) Häodynamisches Monitoring des Patienten zur Operation in (halb-)sitzender Position

Arterielle Blutdruckmessung

Da die (halb-)sitzende Position eine arterielle Hypotension begünstigt, erfordert hier das Blutdruckmonitoring besondere Aufmerksamkeit. Die korrekte Messung des Blutdrucks ist nicht trivial und birgt medizinische und technische Fallstricke. Das Messergebnis hängt vom Messort, dem Messverfahren und der Form der Pulswelle ab, denn mit zunehmender Entfernung vom Herzen fällt die Blutflussgeschwindigkeit und steigt die Blutdruckamplitude, wodurch die Form der Pulswelle und die Messgenauigkeit beeinflusst wird. Die invasive Blutdruckmessung ist der non-invasiven Blutdruckmessung sowohl in der zeitlichen Auflösung als auch in der Validität überlegen und hat eine sehr niedrige Komplikationsrate. Die Messung des mittleren arteriellen Druckes als geometrisches Mittel der Pulswelle ist am wenigsten fehleranfällig ^(Kim 2014). Tatsächlich ist die Mortalität bei Patienten mit invasiver Blutdruckmessung niedriger als in der Vergleichsgruppe mit non-invasiver Messung, was vermutlich im besseren Erkennen von hypotensiven Phasen liegt ^(Lehmann 2013). Neben der reinen Darstellung der absoluten Werte kann der variierende Amplitudenverlauf der arteriellen Druckkurve betrachtet werden, um einen "swing" der Kurve im Sinne einer "pulse pressure variation" (PPV) zur Beurteilung des Volumenstatus des Patienten sehen zu können.

Für eine aussagekräftige Messung des zerebralen Blutdrucks bei einer Operation in (halb-)sitzender Position ist die korrekte Positionierung des Druckwandlers, welcher das mechanische Signal der arteriellen Blutsäule in ein elektrisches Signal umwandelt, besonders zu beachten. Prinzipiell gilt die Schädelbasis bzw. der äußere Gehörgang als Referenzebene für den herrschenden Blutdruck im Gehirn, so dass der arterielle Druckwandler auf diesem Niveau positioniert werden sollte. Bei einer nicht-invasiven Blutdruckmessung z.B. am Oberarm muss die entsprechende hydrostatische Druckdifferenz berücksichtigt werden, um den arteriellen Blutdruck im Gehirn anhand der Höhendifferenz abschätzen zu können. Hierbei ist zu beachten, dass ein Höhenunterschied von 1,34 cm einer Druckdifferenz von 1 mmHg entspricht. Wird der arterielle Mitteldruck (MAP) mittels Manschette am Oberarm mit 65 mmHg gemessen, muss bei einer Höhendifferenz von 26,8 cm deshalb eine Differenz von 20 mmHg angenommen werden, was im Beispiel einem MAP im Gehirn von lediglich 45 mmHg entspräche. Auch postoperativ während Transport und Aufenthalt in der Überwachungseinheit ist die Höhenpositionierung des Druckwandlers zu beachten, umso mehr da in diesen Situationen die Ausprägung der Oberkörperhochlagerung stärker variiert als während der Operation selbst.

Prinzipiell ist bei jeglicher therapeutischen Intervention die Ursache der Hypotension zu behandeln. Dem Ausgleich einer Hypovolämie kommt eine besondere Bedeutung zu, denn auch ohne Blutverlust ist bei einer (halb-)sitzenden Position eine relative Hypovolämie durch die Umverteilung von Blut in die abhängigen Körperpartien immanent. Spricht ein Patient auf die Gabe von Volumen an, so äußert sich dies in einem Anstieg des Blutdrucks und einer Reduktion der Schlagvolumenvariabilität ^(Lindroos 2013). Die Applikation von α -Sympathomimetika (wie z.B. Noradrenalin) zur Steigerung des peripheren Gefäßtonus kann ergänzend sinnvoll sein ^(de Wit 2016). Zu beachten ist allerdings, dass die Steigerung des systemvaskulären Widerstands mit einer Verringerung der kardialen Auswurfleistung und einer reduzierten regionalen Oxygenierung des Cerebrums sowie weiterer Organe einhergehen kann. Demgegenüber wird die Aufrechterhaltung des Blutdrucks mittels β -

Sympathomimetika primär durch den Anstieg der kardialen Auswurfleistung vermittelt und scheint in Bezug auf die zerebrale Oxygenierung vorteilhaft zu sein, kann jedoch insbesondere bei einer bestehenden Hypovolämie zu einer ausgeprägten Tachykardie führen (Castle-Kirszbaum 2022, Schramm 2016). Neben der Aufrechterhaltung des Blutdrucks als solchen ist also auf ein adäquates Herzzeitvolumen im Sinne der Perfusion zu achten.

Die für eine differenzierte und ursachenorientierte Therapie einer Hypotension notwendigen Informationen können durch den leitliniengerechten Einsatz der TEE bei neurochirurgischen Operationen in (halb-)sitzender Lagerung gewonnen werden.

Maßnahmen zur Vermeidung der intraoperativen arteriellen Hypotension bei (halb-)sitzender Lagerung sind deshalb:

- i) Präoperative kardiale Evaluation
- ii) Engmaschiges Monitoring des mittleren arteriellen Blutdruckes (invasive Messung)
- iii) Eine stufenweise vorgenommene Lagerung unter engmaschiger Blutdruckkontrolle
- iv) Verringerung eines venösen „pooling“ durch
 - a. Kompression der unteren Extremitäten (Strümpfe oder Wechseldruckmanschetten)
 - b. Lagerung der Unterschenkel auf Höhe des rechten Vorhofs
- v) Bedarfsadaptierte Volumengabe
- vi) Bereithalten eines Noradrenalinperfusors als Vasopressor der Wahl
- vii) Erweiterte, differenzierte Katecholamintherapie in Abhängigkeit des TEE-Befundes

Zentraler Venenkatheter

Die Anlage eines zentralen Venenkatheters (ZVK) ausschließlich zur Messung des zentralen Venendruckes (ZVD) erscheint nicht prinzipiell zwingend. Der ZVD wurde in der Vergangenheit und wird auch heute noch oftmals als Surrogatparameter für den venösen Füllungsstatus benutzt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass ein hochnormaler ZVD mit einer Euvolämie bzw. milden Hypervolämie gleichzusetzen ist. Wenn auch die Betrachtung nur eines einzelnen Wertes keine valide Aussage über den Volumenhaushalt ergibt, kann der ZVD bei Trendbeobachtung bzw. einem plötzlichen Anstieg einen Rückschluss auf die Pumpfunktion vor allem des rechten Herzens bzw. des Vorliegens einer Lungenarterienembolie zulassen. Ergänzend kann über die Bestimmung der zentralvenösen Sauerstoffsättigung eine differenzierte Katecholamintherapie erfolgen.

Bei der (halb-)sitzenden Position in der Neuroanästhesiologie bietet ein ZVK insbesondere die Möglichkeit der herznahen und sicheren intravenösen Applikation von Medikamenten wie Katecholaminen und Osmotherapeutika. Die gewünschte Positionierung der ZVK-Spitze kann während des Vorschubens des Katheters entweder mittels EKG-Ableitung oder direkter Visualisierung im TEE erfolgen. In der klinischen Versorgung sind bei der Positionierung der ZVK-Spitze zwei Philosophien zu unterscheiden:

- A) ZVK-Spitze im rechten Vorhof: hier erfolgt der Aspirationsversuch des „air-lock“ (schaumiges Blutsekret, welches den venösen Einstrom in das rechte Herz behindert) primär über das endständige Lumen.
- B) ZVK-Spitze in der V. cava superior: in diesem Falle kann der Aspirationsversuch auch über die seitlichen Lumenöffnungen erfolgen. Dieses Vorgehen wird in tierexperimentellen Studien propagiert (Artru 1992, Colley 1989, Hanna 1991)

Beide Vorgehensweisen stehen für die anästhesiologische Versorgung des Patienten in (halb-) sitzender Lagerung gleichberechtigt nebeneinander. Das Vorgehen sollte sich an den lokalen Gegebenheiten und am individuellen Risiko für eine VLE orientieren.

Bei der Auswahl der Kathetergröße ist zu berücksichtigen, dass das Volumen einer Flüssigkeit, welche durch ein Rohrsystem (wie z.B. ZVK und angeschlossener Verlängerung) pro Zeiteinheit fließt, nach der Formel von Hagen-Poiseuille für laminare Strömungen stark abhängig vom Innendurchmesser und der Länge dieses Rohrsystems ist. Prinzipiell ist hieraus auch für turbulente Strömungen von Blut-Gas-Gemischen ableitbar, dass für die Menge eines durch einen Katheter zu aspirierenden Volumens der Innendurchmesser des Kathetersystems eine entscheidende Einflussgröße darstellt. Diese Gesetzmäßigkeit gilt sowohl für den passiven Rückstrom als auch für eine aktive Aspiration (Söhle²⁰¹⁹). **Tabelle 2** zeigt die Flussraten unterschiedlicher handelsüblicher zentraler Venenkatheter von normaler Kochsalzlösung bei Raumtemperatur und einem hydrostatischen Druckgradienten von 100 cm H₂O. Wenn das Prinzip der Aspiration des Luft-Blut-Gemisches als therapeutische Option bei schwerer VLE angewandt wird, sollte unseres Erachtens ein großlumiger Katheter mit möglichst kurzer Strecke von der Katheteröffnung bis zum Leitungsende benutzt werden. Diese großlumigen und dabei steiferen Katheter sind aber auch mit einem höheren Verletzungsrisiko des Myokards vergesellschaftet und sollten daher mit ihrer Spitze in der Endstrecke der Vena cava superior verbleiben und nicht bis in den rechten Vorhof vorgeschoben werden.

Tabelle 2: Flussraten handelsüblicher zentraler Venenkatheter. Vergleich unterschiedlicher zentralvenöser Katheter und deren Flussraten in Abhängigkeit von der Größe. Die Flussraten wurden den Herstellerangaben entnommen und unter Verwendung von normaler Kochsalzlösung bei Raumtemperatur und einer Höhendifferenz von 100 cm ermittelt

Kathetergröße (Fr)	Katheterlänge (cm)	Lumen (Anzahl)	Lumengröße (Gauge)	Flussrate (ml/h)
7	30	3	16	2.400
			18 (2x)	1.070 - 1160
8,5	30	4	14	3.900
			16	2.100
			18 (x2)	1.000
12	16	3	16	3.060
			12 (2x)	11.700 - 15.240

1.6) Intraoperative Beatmung und Anwendung von PEEP bei (halb-)sitzender Lagerung

Während in den letzten Jahren große randomisierte Studien zum Einsatz lungenprotektiver Beatmungsstrategien z.B. für den Bereich der Abdominalchirurgie durchgeführt wurden (Campos 2022), ist die Studienlage für die spezielle Situation der (halb-)sitzenden Lagerung vergleichsweise gering.

Da unter Verwendung eines PEEP durch die konsekutive Erhöhung des intrathorakalen Drucks ein gemessener ZVD regelhaft ansteigt, wird oftmals eine PEEP-Erhöhung zur Risikoreduktion einer VLE angewandt. Als Rationale hierfür gilt die Vorstellung, dass es unter Euvolämie bzw. milder Hypervolämie bei chirurgischen Eingriffen in (halb-)sitzender Lagerung eher zu einer Blutung aus einem venösen Sinus bzw. einer Vene im OP-Situs kommt als zum Eindringen von Luft in das venöse System. Allerdings konnte bei PEEP-Werten bis 15 cm H₂O weder dieser Effekt (Giebler 1998) noch eine signifikante Erhöhung des Druckes im Sinus sagittalis nachgewiesen werden (Iwabuchi 1983, Grady 1986, Iwabuchi 1986). Hingegen wurde beobachtet, dass durch einen erhöhten intrathorakalen Druck ein funktionell verschlossenes Foramen ovale wiedereröffnet werden kann und somit das Risiko einer paradoxen VLE steigt (Gronert 1979, Jaffe 1992). Des Weiteren kann die intrathorakale Druckerhöhung den venösen Rückstrom zum Herzen verringern und dadurch neben der Verstärkung einer (relativen) Hypovolämie, die durch eine VLE ausgelöste kardiovaskuläre Dysfunktion noch zusätzlich aggravieren.

Aus den wenigen vorliegenden Studien können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- i) Oxygenierung: ein PEEP (5-10 cm H₂O) kann mittelbar zu einer verbesserten Oxygenierung bei (halb-)sitzender Lagerung beitragen (Mirski 2007).
- ii) Hämodynamik: ein PEEP (\leq 15 cm H₂O) kann zu einer Verschlechterung der kardiozirkulatorischen Funktion bei (halb-)sitzender Lagerung führen (Perkins 1984).
- iii) Intrakranieller Druck (ICP): Veränderungen des PEEP (\leq 15 cm H₂O) können zu einer Erhöhung des ICP bei (halb-)sitzender Lagerung beitragen, insbesondere wenn der ICP bereits erhöht ist bzw. die zerebralen Reserveräume aufgebraucht sind (Lodrini 1989).
- iv) Druck im venösen Sinus: ein PEEP (\leq 10 cm H₂O) führt nicht regelhaft zu einem (angestrebten) Druckanstieg in den venösen Sinus des Gehirns (Giebler 1998).
- v) VLE-inzidenz: ein PEEP (\leq 15 cm H₂O) führt nicht zu einer Verhinderung von VLE-Ereignissen bei (halb-)sitzender Lagerung (Giebler 1998, Zentner 1991).

Vor diesem Hintergrund erscheint eine intraoperative Beatmung mit hohen PEEP-Werten bei (halb-)sitzender Lagerung nicht empfehlenswert (Schmitt 2002, Zasslow 1988), manche Autoren raten explizit davon ab (Giebler 1998). Es sollte somit eine übliche, d.h. lungenprotektive Beatmung mit einem PEEP-Niveau (5-10 cm H₂O) zum Einsatz kommen.

2. Venöse Luftembolie (VLE)

Der zugrundeliegende Pathomechanismus einer VLE während einer Operation in (halb-)sitzender Lagerung ist begründet durch die in Relation zum Herzen erhöhte Lagerung des Operationsgebietes. Durch diesen Höhenunterschied resultiert eine hydrostatische Druckdifferenz zwischen einer offenen Vene und dem Herzen, wodurch Lufteintritt in die venöse Strombahn stattfinden kann. Je ausgeprägter diese Druckdifferenz ist, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit einer VLE (Türe 2018). In der Neurochirurgie sind als große venöse Eintrittspforten im Operationsgebiet besonders die Sinus sigmoideus und transversus sowie der Sinus occipitalis zu nennen, wobei auch durch die Vv. emissariae sowie Vv. diploicae des Schädelknochens ein Lufteintritt stattfinden kann (Muth 2000, Papadopolus 1994).

Üblicherweise kollabieren Venen, sobald sich ein subatmosphärischer Druck im Venenlumen einstellt. Dieser Kollaps führt zum Sistieren des (venösen) Blutflusses und verhindert ein Eintreten von Luft in die venöse Strombahn. Die venösen Sinus des Gehirns hingegen sind bindegewebig mit dem Knochen verbunden und werden hierdurch offengehalten. Erst durch diese anatomische Besonderheit kann es in den venösen Sinus (und den sinusnahen Venen) zum Auftreten eines subatmosphärischen Drucks und – im Fall einer Gefäßverletzung – zum Lufteintritt kommen.

Zusammenfassend sind als mögliche Prädilektionsstellen für den venösen Lufteintritt zu nennen:

- a) Die Galeavenen, die adhärent an der Kalotte sind und bei der Präparation mit z.B. dem Raspatorium eröffnet werden können
- b) Die Venae diploicae, die zwischen der Tabula interna und externa des Schädelknochens liegen. Durch das Aufsägen des Schädelknochens liegt dieses Gefäßsystem frei an der Atmosphäre und muss chirurgisch verschlossen werden. In der Regel werden diese Gefäße durch Knochenwachs abgedichtet.
- c) Die Emissarvenen, welche in knöchernen Kanälen verlaufend die oberflächlichen Schädelvenen mit den Sinus durae matris verbinden.
- d) Die venösen Sinus des Gehirns, die von den Durablättern gebildet werden und bei Eröffnung ebenfalls offenbleiben.

2.1) Inzidenz der VLE

In der Literatur finden sich für das Auftreten einer VLE in (halb-)sitzender Position Inzidenzwerte von sehr unterschiedlichem Niveau von z.B. 76 % bei Operationen in der hinteren Schädelgruppe bzw. 25 % an der Wirbelsäule bis hin zu 100 % bei neurochirurgischen Eingriffen in sitzender Position (Papadopoulos 1994, Mammoto 1998). Hervorzuheben ist, dass eine VLE auch bei einer Hirntumor-Operation in Rückenlage auftreten kann. So wurden bei entsprechendem Monitoring mittels TEE in 11 % der Fälle Luftembolieereignisse detektiert (Konrad 2022). Ein nach Schweregrad differenziertes Auftreten einer VLE beschreiben Feigl et al. mit 42,3 % (Nachweis von Luftblasen) sowie 3,8 % (Abfall des etCO_2 um mehr als 3 mmHg) und 1,9 % (Blutdruckabfall > 20 % oder HF-Anstieg > 40 %) (Feigl 2014). Jedoch muss bei der Interpretation dieser Daten beachtet werden, dass sowohl die Definition des Eintretens einer VLE selbst als auch die eingesetzten Nachweisverfahren und deren Sensitivität uneinheitlich sind. Verstärkt wird dieser Umstand dadurch, dass in der Literatur regelhaft keine Aussagen über die zugrundeliegenden Umgebungsbedingungen und physiologischen Variablen wie Volumenhaushalt,

transthorakalem Druck, ZVD, PEEP, systemischer Blutdruck sowie der Höhendifferenz zwischen rechtem Vorhof und dem Operationsgebiet getroffen werden. Somit bleibt die wahre Inzidenz der VLE während einer Operation in (halb-)sitzender Position letztlich unklar, sicherlich ist diese aber auch von der zu operierenden Struktur selbst (Hirntumor, Gefäßsystem, Knochen) abhängig.

2.2) Pathophysiologische Effekte der VLE

Da die eingetretene Luft in erster Linie via rechtes Atrium und rechten Ventrikel in das pulmonalarterielle Stromgebiet gelangt und dieses teilweise verlegt, entsprechen die ersten Auswirkungen einer VLE den klinischen Symptomen einer Lungenarterienembolie. Ein fortdauernder Lufteintritt wird das Ventilations-Perfusions-Verhältnis der Lunge durch die zunehmende Obstruktion der pulmonalarteriellen Strombahn weiter verschlechtern und eine Oxygenierungs- sowie CO₂-Eliminationsstörung zur Folge haben. Ebenso wird der pulmonale Gefäßwiderstand (PVR) und damit die Nachlast des rechten Herzens erhöht, wobei dieser Effekt durch weitere Mechanismen wie z.B. Aktivierung des Gefäßendothels, Komplementaktivierung, Zytokinfreisetzung, Produktion von Sauerstoffradikalen, Bildung von thrombozytären Mikroaggregaten und lokale sowie systemische Entzündungsreaktionen verstärkt wird (Tanus-Santos 2000). Der akute PVR-Anstieg führt zu einem akuten Druckanstieg im eher muskelschwachen rechten Herzen mit der Folge einer Rechtsherzdilatation mit Trikuspidalinsuffizienz und Herzrhythmusstörungen. Diese Vergrößerung des rechten Herzens führt zu einer Verschiebung des Herzseptums mit zunehmender Kompression des linken Herzens, was eine Minderung von arteriellem Blutdruck, Koronarperfusion und Myokardkontraktilität bis hin zum Kreislaufstillstand zur Folge hat. Hervorzuheben ist, dass die klinischen Auswirkungen einer VLE nicht primär vom Volumen der eingetretenen Luft selbst, sondern vom eingetretenen Volumen pro Zeiteinheit abhängig ist.

Neben der oben beschriebenen Klinik der pulmonalarteriellen Luftembolie ist die Möglichkeit einer paradoxen Luftembolie besonders zu beachten, wofür in diesem Rahmen zwei Mechanismen existieren:

- a) Bei länger bestehendem Lufteintritt kommt es neben einer pulmonalarteriellen Obstruktion zur zunehmenden Erschöpfung der Filtrationsfähigkeit des Gefäßbettes für die eingedrungenen Luftblasen, so dass diese die Lungenstrombahn durchwandern und in die systemische Zirkulation gelangen können (Muth 2000).
- b) Damit bis zur Geburt der fetale Kreislauf unter Umgehung der Lungenstrombahn bestehen kann, existiert eine offene Verbindung auf Vorhofebene. Dieses Foramen ovale verschließt sich in der Regel unmittelbar nach der Geburt funktionell durch eine Membranüberlappung aus dem linken Vorhof, welche in der Zeit mit der linken Vorhofwand verwachsen soll. Jedoch existiert bei ca. 25-30 % der Bevölkerung ein PFO, welches nur funktionell –also ohne Verwachsung der Membran mit der Vorhofwand– verschlossen ist (Hagen 1984, Mirski 2007, Muth 2000) und somit wiedereröffnet werden kann, wenn der rechtsatriale den linksatrialen Druck übersteigt.

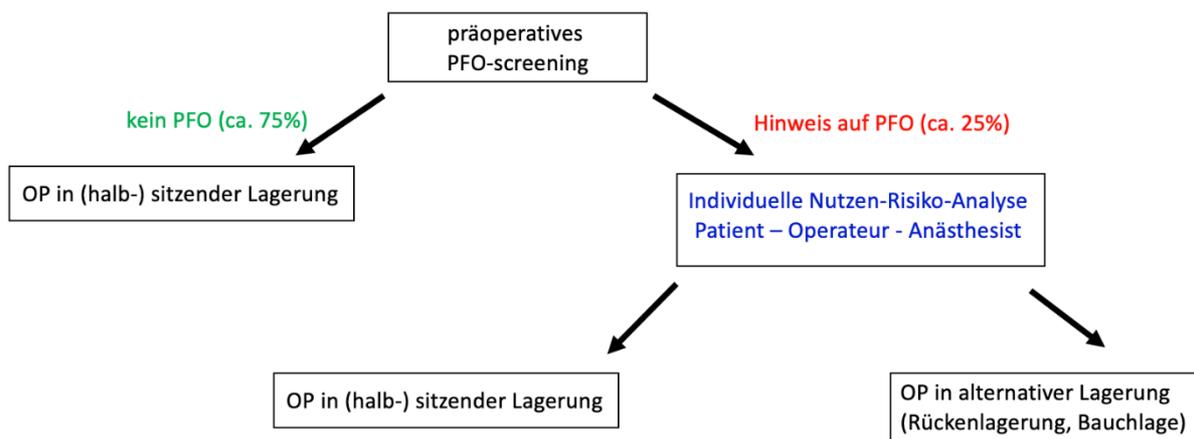
2.3) Präoperative Abklärung eines persistierenden Foramen ovale (PFO)

Um das individuelle Risiko eines Patienten für eine paradoxe VLE bereits präoperativ abschätzen zu können, ist die Abklärung eines PFO wünschenswert. Lange galt unter den verfügbaren Verfahren der transkranialen

Dopplersonographie (TCD), transthorakalen Echokardiographie (TTE) sowie der transösophagealen Echokardiographie (TEE) die letztgenannte Technik als Methode der Wahl und als „Goldstandard“ für diese Fragestellung (Pearson 1991). Diese Alleinstellung der TEE wurde jedoch zuletzt in Frage gestellt (Pristipino 2019). Durch technische Verbesserungen (z.B. sog. „harmonic imaging“ und „second harmonic imaging“) ist die TTE bei Einsatz von Kontrastmittel (z. B. agitierte Kochsalzlösung) und einem Valsalva-Manöver inzwischen als ebenbürtig oder gar der TEE überlegen anzusehen (Daniels 2004, Thanigaraj 2005). Somit steht also mit der TTE ein nicht-invasives Verfahren zur Verfügung, welches bei adäquater Anwendung eine gute diagnostische Sensitivität besitzt und im Vorfeld einer planbaren Operation auch ambulant durchgeführt werden kann. Als Alternative erfolgt im klinischen Alltag die Abklärung eines PFO auch unmittelbar vor OP-Beginn, d.h. nach Narkoseeinleitung am intubierten Patienten mittels TEE durch einen erfahrenen Untersucher.

Bei einer geplanten Operation in (halb-)sitzender Lagerung bedeutet das Vorliegen eines PFO ein erhöhtes Risiko für eine paradoxe Luftembolie mit potentiell neurologischen Schäden bis hin zu lebensbedrohlichen Komplikationen. Beim Hinweis auf ein PFO sollte deshalb im Vorfeld der Operation eine individuelle Nutzen-Risiko-Analyse erfolgen und das geplante Vorgehen (Operation in (halb-)sitzender Lagerung oder aber alternativ in Rücken- bzw. Bauchlagerung) zusammen mit dem Patienten besprochen werden. Eine frühzeitige präoperative Detektion eines PFO vor dem Operationstag selbst erleichtert eine rechtzeitige interdisziplinäre Absprache darüber, welche Lagerungsform für den geplanten Eingriff mit dem besten Nutzen-Risiko-Verhältnis einhergeht (Abb. 3). Wenn die Untersuchung und damit einhergehende Diagnose erst im Rahmen der Einleitung erfolgt, sollten die Alternativen bereits im Rahmen des Aufklärungsgespräches im Rahmen einer „was-wäre-wenn-Diskussion“ mit dem Patienten und Operateur erörtert werden.

Abbildung 3: Entscheidungsfindung zur Lagerung je nach Vorhandensein eines PFO



Eine präoperative Abklärung der Frage persistierender Foramen ovale (PFO) erscheint sinnvoll vor dem Hintergrund, dass ca. 25 % der Menschen ein PFO aufweisen. Bei einer geplanten Operation in (halb-)sitzender Lagerung bedeutet das Vorliegen eines PFO ein Risiko für eine paradoxe Luftembolie mit potenziell lebensbedrohlichen Konsequenzen. Beim Hinweis auf ein PFO sollte deshalb idealerweise im Vorfeld der Operation eine individuelle Nutzen-Risiko-Analyse erfolgen und das geplante Vorgehen (Operation in (halb-) sitzender Lagerung oder aber alternativ in Rücken- oder auch Bauchlagerung) zusammen mit dem Patienten besprochen werden.

2.4) Diagnostik der intraoperativen VLE

Für die sichere Durchführung von Eingriffen in (halb-)sitzender Lagerung kommt der frühzeitigen Diagnose von intravasal eingedrungener Luft eine zentrale Bedeutung zu, da die Auswirkungen einer VLE durch Gesamtvolumen und Volumen pro Zeiteinheit der eingedrungenen Luft beeinflusst werden. Die möglichen Nachweisverfahren hierfür unterscheiden sich in ihrer Empfindlichkeit deutlich (Tabelle 3). Prinzipiell ist bei klinischem Verdacht auf eine VLE die Visualisierung durch eine Echokardiographie anzustreben.

Tabelle 3: Übersicht über Verfahren zur Diagnostik einer intraoperativen VLE unter Angabe der Volumina zur Detektion eingedrungener Luft (modifiziert nach Mirski)			
Monitoringverfahren	Volumen (ml/kg)	Bei einer 70 kg schweren Person entspricht dies (ml) (errechnete Werte)	Sensitivität
Transoesophageale Echokardiographie	0,02	1,4	hoch
Präkordialer Doppler	0,05	3,5	moderat
Endtidale CO ₂ -Messung	0,5	35	moderat
Pulsoximetrische Sättigung	1,0	70	niedrig
Ösophagusstethoskop	1,0	70	niedrig
Arterieller Blutdruck	1,0	70	niedrig

Als aktueller Goldstandard zur Detektion einer intraoperativen VLE gilt aufgrund ihrer ausgeprägten Sensitivität derzeit die transösophageale Echokardiographie (TEE), da hiermit bereits sehr geringe Luftmengen erkannt werden können.

Neben der hohen Sensitivität und Spezifität zur VLE-Detektion bietet die TEE als weitere Vorteile sowohl das direkte Sichtbarmachen des Luftübertritts durch ein PFO in den linken Vorhof als auch dessen Auswirkungen auf die Herzdimensionen und -funktion (^{Mammoto, Hayashi 1998}).

2.5) TEE-Standardschnitte zur VLE-Detektion

In vielen Veröffentlichungen werden die Schnittebenen der TEE-Untersuchung nicht (^{Jadik 2009}) oder nicht eindeutig (^{Feigl 2014}) angegeben. Prinzipiell ist beim Einsatz einer TEE-Sonde ein standardisierter kompletter Untersuchungsablauf wie in der Kardioanästhesie wünschenswert (^{Hahn 2013}). Für den Einsatz z.B. in der Neuroanästhesie mit dem Fokus auf eine VLE sind die folgend beschriebenen Standardschnitte zumeist ausreichend (Abbildung 4) (^{Michels 2021}):

- Mittösophagealer 4-Kammerblick (ME-4-Kammerblick)
- Mittösophagealer Blick auf den rechtsventrikulären Einfluss- und Ausflusstrakt
- Mittösophagealer bicavaler Blick (ME-bicavaler-Blick)

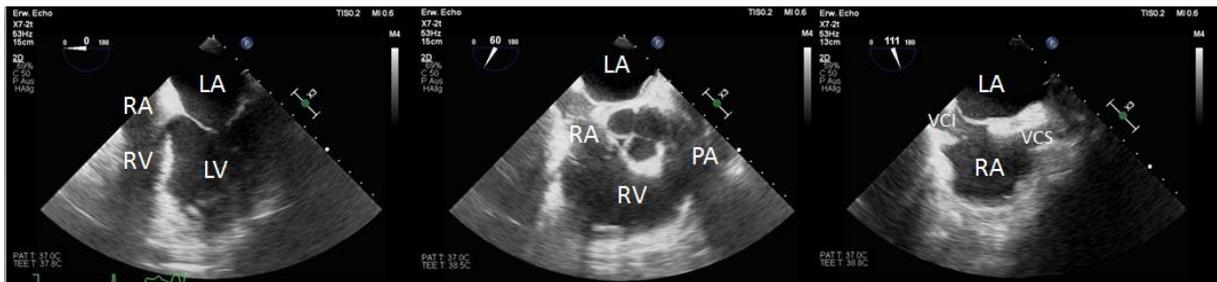


Abbildung 4: TEE-Schnittebenen zur Diagnostik eines persistierenden Foramen ovale und der VLE. Von links nach rechts: 1) mittösophagealer 4-Kammerblick 2) mittösophagealer Blick auf den rechtsventrikulären Ein- und Ausflusstrakt 3) mittösophagealer bicavaler-Blick; RA = rechter Vorhof, LA = linker Vorhof, RV = rechter Ventrikel, LV = linker Ventrikel, PA = Hauptstamm der Pulmonalarterie, VCS = Vena cava superior, VCI = Vena cava inferior

Idealerweise erfolgt unter Verwendung des Laryngoskops die atraumatische Intubation des Ösophagus mit der TEE-Sonde (SungWon 2009). Bei einer Einführtiefe von circa 30-40 cm und leichter Retroflexion der Sonde ist der mittösophageale -4-Kammerblick stets auffindbar und dient als Ausgangspunkt für die anderen Schnitte. Auch falls sich die Sondenlage intraoperativ verändert hat, kann dieser Schnitt zur Orientierung jederzeit wieder aufgesucht werden.

Der mittösophageale -4-Kammerblick zeigt beide Vorhöfe und Ventrikel des Herzens, so dass hier ein Lufteintritt in den rechten Vorhof, den rechten Ventrikel und ein Luftübertritt in den linken Vorhof und Ventrikel zu sehen ist. Ebenso sind die Dimensionen der Herzhöhlen, die Richtung der Septumbewegung sowie die Myokardkontraktilität (vor allem der septalen und lateralen Wandanteile des linken Ventrikels) zu erkennen. Durch den Einsatz des Farbdopplers kann ein Insuffizienzjet über der Trikuspidal- und Mitralklappe gesehen werden.

Der mittösophageale 2-Kammerblick wird ohne Änderung der Sondenposition durch die elektronische Rotation der multiplanen TEE-Sonde um ca. 90° erreicht. Erneut kann die linksventrikuläre Funktion beurteilt werden, im Gegensatz zum 4-Kammerblick sind jetzt die Vorder- und Hinterwand des linken Ventrikels zu sehen.

Eine weitere Rotation des multiplanen Schallkopfes auf 120° zeigt dann im mittösophagealen Längsachsenblick die anteroseptalen und inferolateralen bzw. posterioren Anteile des linksventrikulären Myokards sowie den linksventrikulären Ausflusstrakt mit der Aortenklappe. Hier kann auch mit Hilfe des Farbdopplers und anhand von Morphologie und Reflexverhalten eine Pathologie der Aortenklappe erkannt werden.

Der mittösophageale bicavale Blick wird durch leichte Drehung der TEE-Sonde im Uhrzeigersinn erreicht. Auf der rechten Bildschirmseite ist die Vena cava superior (VCS) und auf der linken Bildschirmseite die Vena cava inferior (VCI) zu sehen (letztere kommt häufig nicht so gut zur Darstellung). In der Bildschirmmitte befindet sich das Vorhofseptum, dessen dünnste Stelle die Fossa ovalis ist. Im Bereich der VCS können ggf. die Reflexionen eines in-situ liegenden zentralen Venenkatheters gesehen werden. In dieser Sondenposition sind ein Lufteintritt über die Vena cava in den rechten Vorhof ebenso wie ein Luftübertritt (bzw. Kontrastmittelübertritt) in den linken Vorhof gut zu erkennen.

Um in den mittösophagealen Blick auf den rechtsventrikulären Einfluss- und Ausflusstrakt zu gelangen, muss die Sonde wieder gegen den Uhrzeigersinn gedreht und der multiplane Schallkopf elektronisch auf 80° rotiert

werden. In dieser Einstellung sind rechter Vorhof, rechtsventrikulärer Ein- und Ausflusstrakt, Aortenklappe und ein Teil des linken Vorhofs zu sehen.

Dieser strukturierte Untersuchungsgang sollte unbedingt vor etwaigen Lagerungsmaßnahmen des Patienten durchgeführt werden, weil

- in Rückenlage die Darstellung der Schnittebenen zuverlässiger erfolgen kann als bei einem aufgerichteten Oberkörper
- die korrekte Lage des ZVK verifiziert werden kann
- eine ggf. bereits erfolgte Untersuchung bzgl. eines PFO reevaluiert werden kann
- jetzt die letzte Möglichkeit zur PFO-Diagnostik besteht
- bei Nachweis anderer relevanter pathologischer Veränderungen des Herzens wie höhergradiger Vitien oder eingeschränkter Pumpfunktion die Lagerung überdacht werden kann bzw. zielgerichtete Maßnahmen vor dem Aufsetzen zur Sicherung der Hämodynamik eingeleitet werden können
- ein visueller Ausgangsbefund der Herzdimensionen dargestellt wird, der mit etwaigen intraoperativen Veränderungen korreliert werden kann.

Intraoperativ kann zusätzlich zur Darstellung des Herzens im B-Bild ein in den Bereich des rechten Vorhofs gelegter pulsed-wave Doppler (PW-Doppler) genutzt werden, womit in Analogie zum präkordialen Doppler eine akustische Meldung über das Eindringen von Luft erhalten werden kann. Da der PW-Doppler ein bestimmtes, einstellbares Areal untersucht, ist diesem gegenüber dem continuous-wave (CW) Doppler der Vorzug zu geben. Dieses PW-Dopplersignal sollte vor OP-Beginn geprüft werden, indem z.B. geringe Mengen der initial zur PFO-Diagnostik eingesetzten „Kontrastmittel-Lösung“ (z. B. 10 bis 20 ml agitierte Vollelektrolytlösung wie weiter unten beschreiben) injiziert werden.

Bei längerer Anwendung des PW-Dopplers sollte mit einer möglichst geringen Verstärkung („power gain“) des Doppler-Signals gearbeitet werden, um das niedrige aber prinzipielle Risiko einer thermischen Schleimhautschädigung durch die TEE-Sonde weiter reduzieren zu können (^{Hilberath 2010}).

2.6) TEE zur PFO-Detektion

Sollte im mittösophagealen bicavalen Blick mittels Farbdoppler (Einstellung des Nyquist Limits auf 30 cm/s) ein bestehender Links-Rechts-Shunt nachgewiesen werden (Abbildung 5), ist dieser beweisend für ein PFO (^{Sukernik 2007}).

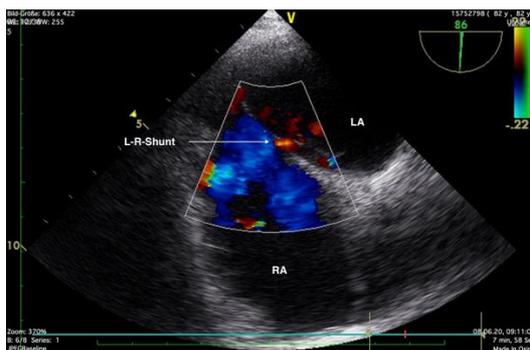


Abbildung 5: Links-Rechts-Shunt im Farbdoppler. Mithilfe des Farbdopplers lässt sich ein Links-Rechts-Shunt nachweisen. L-R-Shunt = Links-Rechts-Shunt, LA = Linker Vorhof, RA = Rechter Vorhof

Wenn per Farbdoppler kein Links-Rechts-Shunt nachzuweisen ist, so muss mittels Echokontrastmittel und Valsalva-Manöver ein solcher ausgeschlossen werden. Im Ultraschall gut zu sehende Echokontrastmittel („Microbubbles“) sind sowohl durch autologes Patientenblut als auch durch agitierte (schnell aufgezugene) Vollelektrolyt- oder Kolloidlösung herzustellen. Mit einer ersten Gabe weniger Milliliter kann eine Lageverifizierung des ZVK erfolgen. Danach erfolgt unter normaler Beatmung eine erneute Gabe von 10-20 ml dieser Lösung, um ein anatomisch offenes PFO nachweisen zu können. Bei fehlendem KM-Übertritt innerhalb von fünf Herzzyklen wird der intrathorakale Druck im Sinne eines Valsalva-Manövers erhöht (Sukernik 2007), so dass das Vorhofseptum eine linkskonvexe Stellung einnimmt (Abbildung 6). Unter Beibehaltung des hohen intrathorakalen Drucks wird wiederum KM gegeben, so dass der rechte Vorhof mit Bubbles gefüllt ist. Nach wiederum fünf Herzzyklen wird bei ggf. weiterer simultanen KM-Gabe das APL-Ventil schnell geöffnet, um einen erhöhten venösen Rückstrom in den rechten Vorhof zu generieren. Das Erscheinen von Microbubbles im linken Vorhof unter einem derart durchgeführten Valsalva-Manöver gilt als beweisend für ein PFO (Tabelle 4).

Ein Valsalva-Manöver kann am beatmeten Patienten z.B. wie folgt durchgeführt werden: Das Narkosebeatmungsgerät wird auf Handbeatmung und das Überdruck-/APL-Ventil auf einen Druck von 30 cm H₂O eingestellt. Der Druck im Beatmungssystem überträgt sich nach intrathorakal, wodurch es zu einer Druckumkehr auf Vorhofebene kommt und der Druck im rechten Vorhof denjenigen im linken Vorhof übersteigt. Zu erkennen ist dieses durch eine Auswölbung des Vorhofseptums in Richtung des linken Vorhofs. Durch diese Druckumkehr kann sich ein – unter physiologischen Bedingungen geschlossenes – Foramen ovale öffnen. Für das Valsalva-Manöver sollte der hohe Beatmungsdruck für circa 20 Sekunden aufrechterhalten werden. Von längeren Zeitdauern wird abgeraten, da es unter dem Valsalva-Manöver zu nicht unerheblichen Abfällen des systemarteriellen Blutdrucks kommen kann.

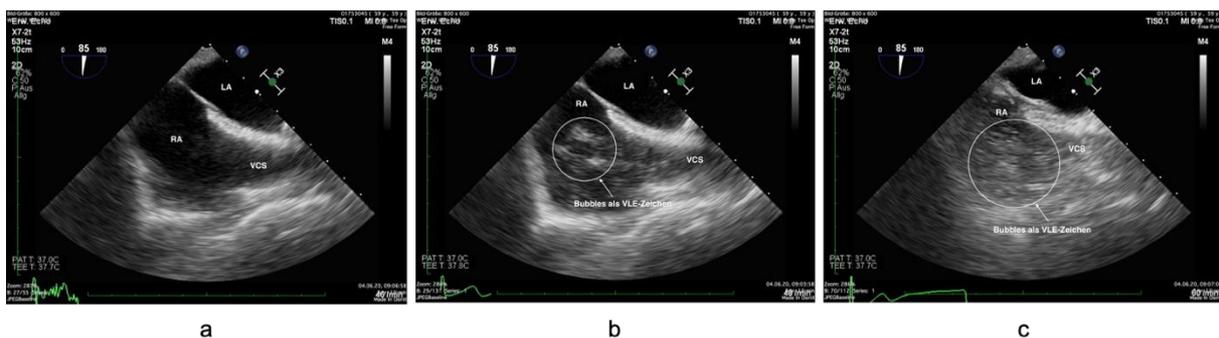


Abbildung 6: Microbubbles als Nachweis einer VLE. Mittösophageal bicavalen Blick ohne (a), mit wenig (b) und mit viel (c) Bubbles als Zeichen einer VLE. LA = Linker Vorhof, RA = Rechter Vorhof, VCS = Vena cava superior (Michels 2021)

Tab. 4: Vorgehen zur Diagnostik eines Rechts-Links-Shunts (z.B. PFO) auf Vorhofebene

-Einstellung mittösophagealer bicavalen Blick mit folgender Konfiguration:

- 1) Farbdoppler auf Vorhofseptum
- 2) Gabe von Echokontrastmittel unter Standard-(Be)atmungssituation
- 3) Gabe von Echokontrastmittel unter Valsalva-Manöver (Vorhofseptum mit Shift in linkes Atrium)

Ein Rechts-Links-Shunt auf Vorhofebene gilt als ausgeschlossen, wenn unter obenstehender Konfiguration

- 1) das Farbdoppler-Signal unauffällig und bei
- 2) und 3) innerhalb von fünf Herzzyklen kein Echokontrastmittel im linken Vorhof zu sehen ist

2.7) Schweregradeinteilung der VLE

Eine für die Klinik praktikable Schweregradeinteilung der eingetretenen VLE findet sich in der "Tübingen Venous Air Embolism Grading Scale" (Feigl 2014), welche die Einteilung von Jadik weiter differenziert (Jadik 2009). Hier erfolgt neben dem Nachweis von eingedrungener Luft durch das TEE auch die Berücksichtigung der klinischen Ausprägung (Tabelle 5).

Tab.5: "Tübingen Venous Air Embolism Grading Scale": Graduierung einer klinisch relevanten VLE nach Feigl (Feigl 2014) TEE = Transoesophageale Echokardiographie; etCO₂ = endtidales CO₂; MAP = Mittlerer arterieller Druck; HF = Herzfrequenz

Grad	Beobachtete Veränderung
0	Keine sichtbaren Luftblasen im TEE, keine VLE
I	Luftblasen sichtbar im TEE, kein Abfall im etCO ₂
II	Luftblasen sichtbar im TEE, Abfall im etCO ₂ ≤ 3 mmHg
III	Luftblasen sichtbar im TEE, Abfall im etCO ₂ > 3 mmHg
IV	Luftblasen sichtbar im TEE, Abfall im etCO ₂ > 3 mmHg, Abfall des MAP ≥ 20 % und/oder Anstieg der HF ≥ 40 %
V	Grad IV und hämodynamische Instabilität, die eine Reanimation erfordert

3) Vorgehen und Maßnahmen bei eingetretener VLE

Auch wenn durch sensitive Untersuchungsverfahren wie der TEE bei sehr vielen Prozeduren eine VLE gesehen werden kann, so verläuft diese doch zumeist klinisch inapparent (^{Al-Afif 2022}). Je nach Schweregrad des VLE-Ereignisses sind von anästhesiologischer und chirurgischer Seite verschiedene Maßnahmen zu ergreifen.

Der prinzipielle Ablauf in dieser Situation umfasst:

- a) Information an den Operateur
- b) Vermeidung des weiteren Lufteintritts
- c) Therapie der hämodynamischen Veränderungen
- d) Evaluation der Ausprägung durch Blutgasanalyse und TEE
- e) Ggf. Versuch der Aspiration der eingetretenen Luft bzw. des air-lock
- f) Gerinnungsstatus überprüfen

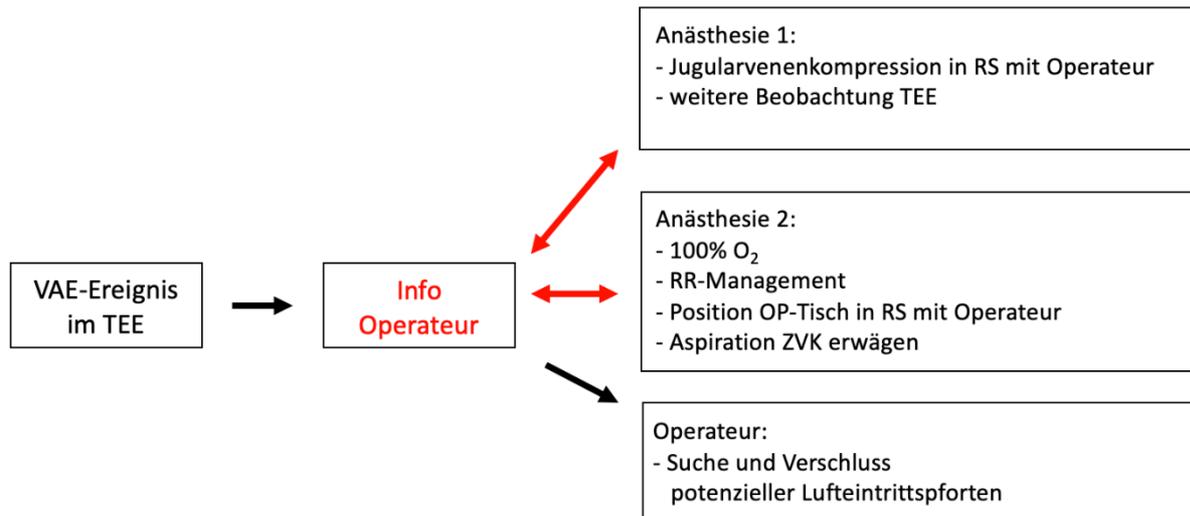
Die kausale Therapie einer VLE ist die Verhinderung weiteren Eindringens von Luft in den rechten Ventrikel und in die pulmonalarterielle Strombahn!

a) Information an den Operateur

Generell ist der Operateur umgehend zu informieren, wenn im TEE Luftblasen sichtbar werden, dabei ist eine klare und unmissverständliche Kommunikation zwischen beiden Seiten unverzichtbar für das erfolgreiche Management des VLE-Ereignisses. Auch ist eine wiederholte Aussage zum aktuellen Status der Situation mit klinischer Ausprägung notwendig. Idealerweise findet im Sinne einer „closed-loop“-Kommunikation eine Rückmeldung des Operateurs statt, dass er die Information erhalten hat, um Missverständnisse bzw. Fehler bei der Behandlung zu vermeiden. Auch sollte in diesem Rahmen durch den Operateur mitgeteilt werden, ob er die Eintrittsstelle der Luft darstellen kann und welche Maßnahmen (Knochenwachs, Abdeckung des OP-Gebietes) vorgenommen werden.

Das Anästhesie-Team muss wiederholt evaluieren, ob weiteres Personal der Anästhesie hinzugezogen werden sollte (Abbildung 7).

Abbildung 7: strukturiertes Vorgehen bei Eintritt einer intraoperativen VLE



Bei einem VLE-Ereignis müssen eine Reihe von anästhesiologischen Aufgaben in rascher Folge bewältigt werden. Dieses erfordert regelhaft den Einsatz von (mindestens) zwei Personen aus der Anästhesie (1x Arzt und 1x Anästhesiefachpflege), ggf. ist hier eine Personalforderung zu bedenken. Eine eindeutige Aufgabenteilung basierend auf klinikinternen SOPs ist für den Erfolg der Maßnahmen unabdingbar. Basis eines erfolgreichen Managements einer VLE ist die engmaschige Kommunikation zwischen Operateur und Anästhesist.

b) Vermeidung eines weiteren Lufteintritts

Der weitere Eintritt von Luft sollte durch einen definitiven Verschluss der offenen venösen Eintrittspforte verhindert werden. Primäre Maßnahmen hierfür sind z.B. das Fluten des OP-Gebietes mit Flüssigkeit oder Auflegen feuchter Kompressen sowie einer Versiegelung der Knochenränder durch Wachs.

Zur Erleichterung des Auffindens einer offenen Vene und somit potenzieller Lufteintrittspforte im Operationsgebiet kann eine temporäre, manuelle beidseitige Kompression der Jugularvenen angewandt werden. Durch eine korrekte beidseitige Kompression der Jugularvenen kann der Druck in den venösen Sinusgefäßen des Gehirns dergestalt ansteigen, sodass ein (weiteres) Eindringen von Luft vermindert bzw. vermieden werden kann (Grady 1986, Iwabuchi 1986, Takahashi 1997, Toung 1984, Toung 1988). Zusätzlich entsteht durch die Abflussbehinderung des venösen Drainageblutes aus anderen zerebralen Venen ein retrograder Blutfluss, welcher einen Blutaustritt durch die offene Vene zur Folge hat und diese somit durch den Operateur identifiziert werden kann (Losasso 1992).

Prinzipiell kann dieses Verfahren somit unter zweierlei Gesichtspunkten eingesetzt werden:

- während der Präparationsphase, um eröffnete aber nicht kollabierte Venen identifizieren und somit potentielle Lufteintrittsstellen verschließen zu können
- während einer bestehenden VLE, um neben der Identifikation der Lufteintrittsstelle durch den venösen Rückstau den weiteren Lufteintritt selbst zu reduzieren.

Zu beachten ist bei einer Jugularvenenkompression unbedingt, dass ein zu hoher Druck auf die in unmittelbarer Nachbarschaft liegenden Aa. carotides neben Bradykardien auch eine zerebrale Perfusionsminderung bis hin zu einem -stillstand zur Folge haben kann (Losasso 1992). Ebenso führt der reduzierte venöse Abfluss durch die Zunahme

des zerebralen Blutvolumens zwangsläufig auch zu einem Anstieg des intrakraniellen Drucks (^{Frydrychowski 2012}). Um diese Risiken zu reduzieren, darf der ausgeübte Druck auf die Halsgefäße nicht höher als 40 mmHg sein! Durch die Anwendung der Sonographie zur Punktion eines jugularvenösen ZVK kann unkompliziert gesehen werden, mit wie wenig Kraftaufwand bereits eine Kompression der Vena jugularis interna (VJI) und auch der Arteria carotis communis erreicht wird.

Eine genauere Angabe eines kritischen Zeitfensters für die Dauer der Kompression findet sich in der Literatur bisher nicht. Während z.B. Losasso et al. empirisch ein "15-s-Limit" bei Menschen empfehlen, berichten Toung et al. im Tierexperiment von einem sicheren Intervall von 20 Minuten (^{Losasso 1992, Toung 2010}).

Der Druck sollte zwischen Schildknorpel und Unterkieferknochen und somit kranial der letzten Klappe in der VJI ausgeübt werden. Im klinischen Alltag geschieht dieses zumeist bimanuell, eine Verwendung pneumatischer Halskrausen oder -manschetten hat sich abseits von Studien bisher nicht durchgesetzt. Insgesamt ist die beidseitige Jugularvenenkompression ein sehr wirksames Verfahren, um den Druck in den venösen Sinus zu steigern und somit eine Lufteintrittsstelle in eine Stelle zu verwandeln, aus der es blutet. Auf Grund der Nebenwirkung der ICP-Steigerung sollte es nur passager und kurzzeitig angewandt werden, wobei es einer engen Absprache zwischen Operateur und Anästhesisten bedarf.

Sollte der Lufteintritt trotz dieser Maßnahmen persistieren und die Eintrittsstelle der Luft nicht gesehen werden können, muss ggf. durch Änderung der Tischposition das OP-Gebiet unter das Herzniveau des Patienten gelagert werden. Hierdurch kann zusätzlich durch den retrograden venösen Fluss die offene Vene durch den nun folgenden Blutaustritt erkannt werden (Abbildung 7).

c) Therapie von hämodynamischen Beeinträchtigungen

Eine massive VLE kann über mehrere Mechanismen zum Rechtsherzversagen führen. Dieses bedarf einer umgehenden supportiven Therapie, um die myokardiale Perfusion verbessern und die rechtsventrikuläre Funktion unterstützen zu können.

Zur Behandlung der entstandenen pulmonalarteriellen Druckerhöhung wird die Sicherstellung einer adäquaten Oxygenierung (Erhöhung der FiO_2 auf 1,0) und Normokapnie angestrebt, da sowohl eine Hypoxie als auch eine Hyperkapnie den pulmonalvaskulären Widerstand erheblich erhöhen. Eine inhalative Therapie mit Iloprost oder NO kann ebenfalls den pulmonalvaskulären Widerstand reduzieren. Durch diese Maßnahmen sollen die rechtsventrikuläre Nachlast und Wandspannung gemindert und konsekutiv der myokardiale Sauerstoffverbrauch reduziert werden.

Zur Steigerung der Koronarperfusion und des myokardialen Sauerstoffangebots ist eine Anhebung des systemischen Blutdrucks mittels Gabe von Noradrenalin geeignet. Im Tierversuch konnte gezeigt werden, dass durch die Gabe von Noradrenalin neben der Anhebung des Blutdrucks auch eine Verbesserung der Koronarperfusion und damit der (insbesondere rechts-)ventrikulären Funktion erreicht werden konnte (^{Angle 1989}). Eine positiv inotrope Pharmakotherapie, um ein höheres rechtsventrikuläres Schlagvolumen zu erzielen, ist meist nicht besonders erfolversprechend, da das rechtsventrikuläre Myokard dünn und weniger über β -

Sympathomimetika zu stimulieren ist. Weiterhin ist hierbei zu beachten, dass Adrenalin in höheren Konzentrationen eine pulmonal vasokonstringierende Wirkung besitzt und somit den Widerstand für das rechte Herz weiter erhöhen kann (Schäfer 2018). Eine weitergehende differenzierte Therapie mit Dobutamin, Vasopressin und anderen Medikamenten wie z.B. Calcium-Sensitizern oder Phosphodiesterasehemmern sollte nach den Empfehlungen der europäischen Gesellschaft für Kardiologie (McDonagh 2021) erfolgen.

Neu auftretende Herzrhythmusstörungen wie Tachykardie und Extrasystolie sind oftmals Ausdruck einer inadäquaten myokardialen Perfusion durch Hypotension oder luftembolischen Verschluss einer Herzkranzarterie und müssen ggf. additiv behandelt werden.

Kommt es bei massiver VLE zum Kreislaustillstand, so wird nach den aktuell gültigen Leitlinien des European Resuscitation Council (ERC) eine kardiopulmonale Reanimation durchgeführt (www.erc.edu).

d) Evaluation der Ausprägung durch BGA und TEE

Durch wiederholte arterielle Blut-Gas-Analysen wird anhand der Differenz des endtidalen und arteriellen CO₂-Wertes (P_{art-etCO₂}) die Ausprägung und der Verlauf der VLE bestimmt.

Mittels der TEE-Untersuchung kann durch die Beurteilung von Herzkonfiguration, Kontraktilität und Verschiebung des Vorhof- bzw. Ventrikelseptums das Ausmaß des Rechtsherzversagens beurteilt werden. Hierzu kann ohne großen Aufwand z.B. von der bicavalen Darstellung in den mittösophagealen 4-Kammer-Blick gewechselt werden.

e) Versuch der Aspiration der eingetretenen Luft bzw. des air-lock

Bei manifester Kreislaufdepression kann ein Versuch der „Luftaspiration“ über den liegenden ZVK durchgeführt werden. Auch wenn es aus ethischen Gründen für dieses Verfahren keine prospektiv randomisierten Untersuchungen am Menschen geben kann, so sind in verschiedenen Tierexperimenten positive Resultate im Sinne einer primär erhöhten Überlebensrate nach Induktion einer manifesten VLE und folgender Aspiration zu finden. In diesen Untersuchungen mit jedoch zumeist kleinen Fallzahlen wurden Katheter mit sehr unterschiedlichen Längen, Durchmessern und Anordnungen der Öffnungen im Bereich der Strecke von Vena cava superior (VCS) bis Aa. pulmonales genutzt (Artru 1992, Bowdle 1988, Colley 1987, Colley 1989, Mongan 1995). Ebenso lassen pathophysiologische Überlegungen den Schluss zu, den Versuch einer „Luftaspiration“ mindestens als ultima ratio bei schwerer VLE zu unternehmen. Hierbei werden in der Regel nicht die neu eingedrungenen Luftblasen per se direkt aspiriert, da diese in der Regel am Katheter vorbeifließen (Gould 1996). Stattdessen besteht das therapeutische Prinzip der Aspiration darin, das Volumen des bestehenden „air-locks“ (Blut-Schaum-Gemischs) im Bereich der VCS-Einmündung in den rechten Vorhof zu reduzieren.

Wieviel ml (oder %) der eingedrungenen Luft mittels eines optimal platzierten ZVK tatsächlich aspiriert werden können, ist unbekannt. Auch gibt es keine wissenschaftliche Evidenz, welche Positionierungsart der ZVK-Spitze beim Menschen mit einem besseren Behandlungsergebnis vergesellschaftet ist. Wichtig zum Verständnis dieser therapeutischen Maßnahme ist, dass sich typischerweise nicht etwa große Luftblasen, sondern vielmehr Anteile eines schaumigen Blutsekretes („air-lock“) aspirieren lassen. Daher kann die Luftaspiration keinesfalls als Ersatz

für einen Verschluss der Lufteintrittspforte durch den Chirurgen angesehen werden, sondern hat vielmehr das Ziel, durch die Aspiration eines Teils des „air-lock“ die venöse Füllung des rechten Herzens zu verbessern.

Das Lumen, über das im Falle einer VLE schaumiges Sekret aspiriert wird, sollte ein Lumen von mindestens 14 Gauge (2,2 mm) besitzen. Katheter mit einem größeren Lumen (z.B. 12 Gauge = 2,8 mm) ermöglichen die Aspiration von größeren Volumina pro Zeiteinheit, sind aber auch mit einem höheren Verletzungsrisiko vergesellschaftet. Daher werden diese Katheter nicht bis in den rechten Vorhof vorgeschoben, sondern verbleiben mit der Spitze in der Endstrecke der VCS.

f) Einfluss der venösen Luftembolie auf die Gerinnung

Es konnte sowohl *in vitro* als auch im Tierexperiment gezeigt werden, dass eine VLE die Freisetzung von Mediatoren wie Endothelin, Serotonin und Thromboxan induziert, welche wiederum zu einer Aktivierung des Komplementsystems führen (Schäfer 2009, Eckmann 2005). Insbesondere der Komplementfaktor C3 scheint darüber hinaus sowohl *in vitro* als auch *in vivo* eine koordinierte Aktivierung von Inflammation und hämostatischer Reaktion (sog. Thromboinflammation) zu induzieren (Gong 1996, Storm 2021, Storm 2022, Jackson 2019). So beschreiben einige klinische Fallberichte eine prolongierte und schwere Inflammationsreaktion nach einer stattgehabten VLE (Storm 2017, Kapoor 2003). Ob in diesen Situationen die Gabe von C3-Inhibitoren sinnvoll wäre, ist Gegenstand aktueller Forschung (Storm 2022).

Darüber hinaus wurde *in vivo* eine Adhäsion von Luftblasen an Thrombozyten nachgewiesen, welche von einem 50 %-igem Abfall der Thrombozytenzahl begleitet wurde (Schäfer 2009, Barak 2005, Eckmann 2005). Diese Thrombozytopenie könnte durch eine Ummantelung der Thrombozyten mittels der Luftblasen, einer Aggregation und venösem Pooling im Lungengefäßsystem begründet sein (Schäfer 2009, Barak 2005, Eckmann 2005).

Daraus resultiert, dass eine intraoperative VLE zu einer klinisch manifesten Störung der Gerinnungssituationen führen kann. Insbesondere bei Eingriffen in der hinteren Schädelgrube, wo bereits eine volumenmäßig nur geringe Nachblutung starken Druck auf das Gehirn ausübt, können dadurch deletäre Folgen für den Patienten entstehen. Deshalb sollte spätestens bei einer schwerwiegenden VLE (Grad ≥ 4 nach *Tübingen VAE Grading Scale*) oder rezidivierenden Ereignissen \geq Grad 3 nach *Tübingen VAE Grading Scale* die Gerinnungssituationen z.B. mittels Thrombelastographie und Bestimmung der Thrombozytenzahl sowie -funktion wiederholt kontrolliert werden, da durchaus eine kalkulierte Substitution von Gerinnungsfaktoren oder Thrombozytenkonzentraten erforderlich werden kann (Schaefer 2011).

4) Anwendung der (halb-)sitzenden Position in der pädiatrischen Neurochirurgie

In den venösen Sinus von Kindergehirnen treten bei (halb-)sitzender Lagerung subatmosphärische Drücke offenbar seltener auf als bei Erwachsenen. Anscheinend spielt hierbei die kleinere Körpergröße eine Rolle, die bereits theoretisch zu einer kleineren hydrostatischen Druckdifferenz zwischen Gehirn und Vorhof führen sollte.

Jedenfalls fanden Iwabuchi et al. bei keinem der untersuchten Kinder unter 6 Jahren negative Drücke im Confluens sinuum, im Weiteren berichten Grady et al. von subatmosphärischen Drücken nur bei einem Drittel der Kinder im Alter von 5 bis 15 Jahren (Iwabuchi 1983, Grady 1986).

Die sitzende Position wird in der pädiatrischen Neurochirurgie zwar insgesamt seltener angewendet als bei erwachsenen Patienten, gehört jedoch in einigen spezialisierten Zentren zum klinischen Standardrepertoire (Harrison 2002, Teping 2021, Hermann 2023). Prinzipiell sind die gleichen Vor- und Nachteile im Verhältnis zu anderen Lagerungsformen vorhanden, besonderes Augenmerk bei der Lagerung und Fixierung ist auf die relative Instabilität der kindlichen Schädelknochen und Wirbelsäule zu richten. Durch den Einsatz von größen- und gewichtsadaptierten Kathetern und TEE-Sonden ist das neuroanästhesiologische Prozedere weitestgehend identisch mit demjenigen bei erwachsenen Patienten.

Schlußwort

Diese Leitlinie fasst nach sorgfältiger Recherche und Diskussion den aktuellen Wissensstand zum **perioperativen anästhesiologischen Management bei neurochirurgischen Operationen in sitzender oder halbsitzender Position** zusammen. Hierbei ist zu beachten, dass insgesamt nur sehr wenige wissenschaftliche Studien zum Thema vorliegen. Deshalb wurden teilweise auch Studien an allgemeinchirurgischen Patienten und tierexperimentelle Arbeiten als Evidenz zu Rate gezogen, wenn keine spezifischen Studien bei Patienten in (halb-) sitzender Position vorlagen. Nicht zuletzt deshalb lohnt es sich, die weitere wissenschaftliche Entwicklung zu verfolgen.

Danksagung

Für die kritische Durchsicht unserer Arbeit und inhaltliche Anregungen möchten wir uns bedanken bei

- den neurochirurgischen Partnern: Prof. Dr. Veit Rohde, Präsident der DGNC (Göttingen), Prof. Dr. Marcos Tatagiba (Tübingen), PD Dr. Christoph Bock (Göttingen), Prof. Dr. Martin Schuhmann (Tübingen) und Dr. Georgios Naros (Tübingen)
- den Mitgliedern aus dem WAKNA: PD Dr. Johannes Ehler (Jena), Dr. Sebastian Heiderich (Hannover), Dr. Kerstin Hoppe (Würzburg), Dr. Dirk Repkewitz (Linz), Prof. Dr. Lutz Schaffranietz (Delitzsch), Prof. Dr. Nils Schallner (Hannover)
- Frau Ina Pappe sowie Frau Claudia Holt (beide Tübingen) für die Illustrationen

Literaturverzeichnis:

Abbott TEF, Pearse RM, Archbold RA, Ahmad T, Niebrzegowska E, Wragg A, Rodseth RN, Devereaux PJ, Ackland GL: A Prospective International Multicentre Cohort Study of Intraoperative Heart Rate and Systolic Blood Pressure and Myocardial Injury After Noncardiac Surgery: Results of the VISION Study. *Anesth Analg* 2018;126(6):1936-1945

Al-Afif S, Elkayekh H, Omer M, Heissler HE, Scheinichen D, Palmaers T, Nakamura M, Hermann EJ, Samii M, Krauss JK: Analysis of risk factors for venous air embolism in the semisitting position and its impact on outcome in a consecutive series of 740 patients. *J Neurosurg* 2022;137:258–265

Anastasian ZH, Ramnath B, Komotar RJ, Bruce JN, Sisti MB, Gallo EJ, Emerson RG, Heyer EJ: Evoked Potential Monitoring Identifies Possible Neurological Injury During Positioning for Craniotomy. *Anesth Analg* 2009; 109:817-821

Angle MR, Molloy DW, Penner B et al.: The cardiopulmonary and renal hemodynamic effects of norepinephrine in canine pulmonary embolism. *Chest* 1989;95:1333-1337

Artru AA: Venous air embolism in prone dogs positioned with the abdomen hanging freely: Percentage of gas retrieved and success rate of resuscitation. *Anesth Analg* 1992;75:715–9

Barak M, Katz Y: Microbubbles: pathophysiology and clinical implications. *Chest* 2005;128: 2918-32

Bowdle TA, Artru AA: Treatment of air embolism with a special pulmonary artery catheter introducer sheath in sitting dogs. *Anesthesiology* 1988;68:107–10

Buhre W, Weyland A, Buhre K, Kazmaier S, Mursch K, Schmidt M, Sydow M, Sonntag H: Effects of the sitting position on the distribution of blood volume in patients undergoing neurosurgical procedures. *Br J Anaesth* 2000;84(3):354-7

Campos NS, Bluth T, Hemmes SNT, Librero J, Pozo N, Ferrando C, Lorenzo Ball L, Mazzinari G, Pelosi P, Gama de Abreu M, Schultz MJ, Serpa Neto A, REPEAT; investigators for the PROVHILO study; iPROVE study; PROBESE study investigators; PROVE Network: Intraoperative positive end-expiratory pressure and postoperative pulmonary complications: a patient-meta-analysis of three randomised clinical trials. *Br J Anaesth* 2022;128(6):1040-1051

Castle-Kirsbaum M, Parkin WG, Goldschlager T, Lewis PM: Cardiac Output and Cerebral Blood Flow: A Systematic Review of Cardio-Cerebral Coupling. *J Neurosurg Anesthesiol* 2022;34(4):352-363

Colley PS, Artru AA: Bunegin-Albin catheter improves air retrieval and resuscitation from lethal venous air embolism in dogs. *Anesth Analg* 1987;66:991-994

Colley PS, Artru AA: Bunegin-Albin catheter improves air retrieval and resuscitation from lethal venous air embolism in upright dogs. *Anesth Analg* 1989;68:298–301

Daniëls C, Weytjens C, Cosyns B, Schoors D, De Sutter J, Paelinck B, Muyldermans L, Van Camp G: Second harmonic transthoracic echocardiography: the new reference screening method for the detection of patent foramen ovale. *Eur J Echocardiogr* 2004;5(6):449-52

Deinsberger W, Christophis P, Jödicke A et al.: Somatosensory Evoked Potential Monitoring during Positioning of the Patient for Posterior Fossa Surgery in the Semisitting Position. *Neurosurgery* 1998;43(1):36-40

Eckmann DM, Armstead SC, Mardini F: Surfactants reduce platelet-bubble and platelet-platelet binding induced by in vitro air embolism. *Anesthesiology* 2005;103:1204-10

Feigl, GC., Decker K, Wurms M, Krischek B, Ritz R, Unertl K, Tatagiba M; Neurosurgical procedures in the semisitting position: evaluation of the risk of paradoxical venous air embolism in patients with a patent foramen ovale. *World Neurosurg* 2014;81(1):159-164.

Fraser KS, Heckman GA, McKelvie RS, Harkness K, Middleton LE, Hughson RL: Cerebral hypoperfusion is exaggerated with an upright posture in heart failure: impact of depressed cardiac output. *JACC Heart Fail* 2015;3(2):168-75

Fritz G: Perioperative Management bei neurochirurgischen Operationen in sitzender oder halbsitzender Position. *Anästh Intensivmedizin* 2008;49:47-51

Frydrychowski AF, Winklewski PJ, Guminski W: Influence of acute jugular vein compression on the cerebral blood flow velocity, pial artery pulsation and width of subarachnoid space in humans. *PLoS One* 2012;7:e48245

Giebler R, Kollenberg B, Pohlen G, Peters J: Effect of positive end-expiratory pressure on the incidence of venous air embolism and on the cardiovascular response to the sitting position during neurosurgery. *Br J Anaesth* 1998; 0(1):30-35.

Gong J, Larsson R, Ekdahl KN, et al.: Tubing loops as a model for cardiopulmonary bypass circuits: both the biomaterial and the blood-gas phase interfaces induce complement activation in an in vitro model. *J Clin Immunol* 1996;16:222-9

Goraksha S, Thakore B, Monteiro J: Sitting Position in Neurosurgery. *J Neuroanaesthesiol Crit Care* 2020;7:77-83

Gould DS, Gould B: Venous air embolism retrieval catheters cannot capture bubbles; an air lock is required. *Acta Anesthesiol Scand* 1996;40:272

Grady MS, Bedford RF, Park TS: Changes in superior sagittal sinus pressure in children with head elevation, jugular venous compression, and PEEP. *J Neurosurg* 1986;65(2):199-202.

Gregory A, Stapelfeldt WH, Khanna AK, Smischney NJ, Boero IJ, Chen Q, Stevens M, Shaw A: Intraoperative hypotension is associated with adverse clinical outcomes after noncardiac surgery. *Anesth Analg* 2021;132(6):1654-1665.

Gronert GA, Messick JM, Cucciara RF, Michenfelder JD: Paradoxical air embolism from a patent foramen ovale. *Anesthesiology* 1979;50(6):548-549

Guarracino F, Bertini P: Perioperative hypotension: causes and remedies. *J Anesth Analg Crit Care* 2022;2, 17

Hagen PT, Scholz DG, Edwards WD: Incidence and size of patterns foramen ovale during the first 10 decades of life: an autopsy study of 965 normal hearts. *Mayo Clin Proc* 1984;59:17-20

Hahn RT, Abraham T, Adams MS, Bruce CJ, Glas KE, Lang RM, Reeves ST, Shanewise JS, Siu SC, Stewart W, Picard MH: Guidelines for performing a comprehensive transesophageal echocardiographic examination: recommendations from the American Society of Echocardiography and the Society of Cardiovascular Anesthesiologists. *J Am Soc Echocardiogr* 2013;26(9):921-964.

Hanna PG, Gravenstein N, Pashayan AG: In vitro comparison of central venous catheters for aspiration of venous air embolism: effect of catheter type, catheter tip position, and cardiac inclination. *J Clin Anesth* 1991; 3:290-294

Harrison EA, Mackersie A, McEwan A, Facer E: The sitting position for neurosurgery in children: a review of 16 years' experience. *Br J Anaesth* 2002;88(1):12-17

Hermann EJ, Majernik GH, Scheinichen D, Al-Afif S, Heissler HE, Palmaers T, Krauss JK: resection of posterior fossa tumors in the semi-sitting position in children younger than 4 years of age. *Child's Nervous System* 2023; 39:159-167

Hilberath JN, Oakes DA, Shernan SK, Bulwer BE, D'Ambra MN, Eltzschig HK: Safety of transesophageal echocardiography. *Am Soc Echocardiogr* 2010;23(11):1115-27

Iwabuchi T, Sobata E, Suzuki M, Suzuki S, Yamashita M: Dural sinus pressure as related to neurosurgical positions. *Neurosurgery* 1983;12(2): 203-207.

Iwabuchi T, Sobata E, Ebina K, Tsubakisaka H, Takiguchi M: Dural sinus pressure: various aspects in human brain surgery in children and adults". *Am J Physiol* 1986;250(3 Pt 2):H389-96

Jackson SP, Darbousset R, Schoenwaelder SM: Thromboinflammation: challenges of therapeutically targeting coagulation and other host defense mechanisms. *Blood* 2019;133:906-918

Jadik S, Wissing H, Friedrich K, Beck J, Seifert V, Raabe A: A standardized protocol for the prevention of clinically relevant venous air embolism during neurosurgical interventions in the semisitting position. *Neurosurgery* 2009;64(3):533-538; discussion 538-539.

Jaffe RA, Pinto FJ, Schnittger I: Aspects of mechanical ventilation affecting interatrial shunt flow during general anesthesia. *Anesth Analg* 1992;75:484-488

Jo YY, Jung WS, Kim HS, et al.: Prediction of hypotension in the beach chair position during shoulder arthroscopy using pre-operative hemodynamic variables. *J Clin Monit Comput* 2014;28(2):173-178

Kapoor T, Gutierrez G: Air Embolism as a cause of the systemic inflammatory response syndrome: A case report. *Crit Care* 2003;R98-R100

Kim SH, Lilot M, Sidhu KS, Rinehart J, Yu Z, Canales C, Cannesson M: Accuracy and precision of continuous noninvasive arterial pressure monitoring compared with invasive arterial pressure: a systematic review and meta-analysis. *Anesthesiology*. 2014;120(5):1080-97.

Konrad FM, Mayer AS, Serna-Higuera LM, Hurth H, Tatagiba M, Reutershan J, Rosenberger P, Drexler B: Occurrence and Severity of Venous Air Embolism During Neurosurgical Procedures: Semisitting Versus Supine Position. *World Neurosurg* 2022;163:e335-e340

Lam AM, Vavilala MS: Macroglossia: Compartment Syndrome of the Tongue?". *Anesthesiology* 2000;92(6):1382-1385

Lehman LH, Saeed M, Talmor D, Mark R, Malhotra A. Methods of Blood Pressure Measurement in the ICU. *Crit Care Med*. 2013;41(1):34-40

Lindroos AC, Niiya T, Silvasti-Lundell M, Randell T, Hernesniemi J, Niemi TT: Stroke volume-directed administration of hydroxyethyl starch or Ringer's acetate in sitting position during craniotomy. *Acta Anaesthesiol Scand* 2013;57(6):729-36

Lodrini S, Montolivo M, Pluchino F, Borroni V: Positive End-Expiratory Pressure in Supine and Sitting Positions: Its Effects on Intrathoracic and Intracranial Pressures. *Neurosurgery* 1989;24(6):873-877

Losasso TJ, Muzzi DA, Cucchiara RF: Jugular venous compression helps to identify the source of venous air embolism during craniectomy in patients in the sitting position. *Anesthesiology* 1992;76(1):156-157.

Machetanz K, Leuze F, Mounts K, Trakolis L, Gugel I, Grimm F, Tatagiba M, Naros G: Occurrence and management of postoperative pneumocephalus using the semi-sitting position in vestibular schwannoma surgery. *Acta Neurochirurgica* 2020;162:2629–2636

Mammoto T, Hayashi Y, Ohnishi Y, Kuro M: Incidence of venous and paradoxical air embolism in neurosurgical patients in the sitting position: detection by transesophageal echocardiography. *Acta Anaesthesiol Scand* 1998;42(6):643-647.

McDonagh TA, Metra M, Adamo M, Gardner RS et al.: ESC Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure. *Eur Heart J Sep* 2021;21;42(36):3599-3726.

McAllister RG: Macroglossia – A Potential Complication. *Anesthesiology* 1974;40:199-200

Michels P, Bräuer A, Bauer M, Söhle M: Neurophysiologisches Monitoring bei operativen Eingriffen. *Der Anaesthesist* 2017;66:645-659

Michels P, Meyer EC, Brandes IF, Bräuer A: Intraoperative vaskuläre Luftembolie. *Der Anaesthesist* 2021;70:361-375

Mirski, MA, Lele AV, Fitzsimmons L, Toung TJ: Diagnosis and treatment of vascular air embolism. *Anesthesiology* 2017;106(1):164-177.

Mongan PD, Hinman JA: Evaluation of a double-lumen Multiorifice Catheter for Resuscitation of Swine from Lethal Venous Air Embolism. *Anesthesiology* 1995;83:1104-1111

Müller-Vahl H: Lagerungsbedingte Nervenschäden – Entstehung, klinisches Bild, Differenzialdiagnose und gutachterliche Bewertung. *Anästh Intensivmed* 2010;51:664-67

Muth CM, Shank ES: Gas embolism. *N Engl J Med* 2000;342(7):476-482

Papadopoulos G, Kuhly P, Brock M et al.: Venous and paradoxical air embolism in the sitting position. A prospective study with transoesophageal echocardiography. *Acta Neurochir (Wien)* 1994;126:140-143

Pearson AC, Labovitz AJ, Tatineni S, Gomez CR: Superiority of transesophageal echocardiography in detecting cardiac source of embolism in patients with cerebral ischemia of uncertain etiology. *J Am Coll Cardiol* 1991; 17(1):66-72

Perkins NA, Bedford RF: Hemodynamic Consequences of PEEP in Seated Neurological Patients-Implications for Paradoxical Air Embolism. *Anesth Analg* 1984;63:429-432

Pin-on P, Schroeder D, Munis J: The hemodynamic management of 5177 neurosurgical and orthopedic patients who underwent surgery in the sitting or "beach chair" position without incidence of adverse neurologic events. *Anesth Analg* 2013;116:1317-1324

Porter JM, Pidgeon C, Cunningham AJ: The sitting position in neurosurgery: a critical appraisal. *BJA* 1999; 82(1):117-27

Schäfer ST, Neumann A, Lindemann J et al.: Venous air embolism induces both platelet dysfunction and thrombocytopenia. *Acta Anaesthesiol Scand* 2009;53:736-741.

Schäfer B, Greim CA: Akute perioperative Rechtsherzinsuffizienz. *Der Anaesthesist* 2018;67:61-78

Schafer ST, Sandalcioglu IE, Stegen B et al.: Venous air embolism during semi-sitting craniotomy evokes thrombocytopenia. *Anaesthesia* 2011;66:25-30

Schaffranietz, L.: Die sitzende Position in der Neurochirurgie: Umfrageergebnisse der letzten 20 Jahre. *Deutscher Anästhesie Congress 2016, Leipzig*.

Schmitt HJ, Hemmerling TM: Venous Air Emboli Occur During Release of Positive End-Expiratory Pressure and Repositioning After Sitting Position Surgery. *Anesth Analg* 2002;94:400-3

Schramm P, Tzanova I, Hagen F, Berres M, Closhen D, Pestel G, Engelhard K: Cerebral oxygen saturation and cardiac output during anaesthesia in sitting position for neurosurgical procedures: a prospective observational study. *B J Anesth* 2016;117(4):482-488

Soehle M, Ellermann RK: Ungewöhnlicher Verblutungstod im Krankenhaus durch eine offene Steckverbindung im Infusionssystem. *Anästh Intensivmed* 2019; 60:544-545

Storm BS, Andreassen S, Hovland A, Nielsen EW: Gas Air embolism during hysteroscopy surgery? Three Cases and a literature review. *A A Case Rep* 2017;9:140-3

Storm BS, Christiansen D, Fure H, Ludviksen JK, Lau C, Lambris JD, Woodruff TM, Brekke OL, Braaten T, Nielsen EW, Mollnes TE: Air bubbles activate complement and trigger C3-dependent hemostasis and cytokine release ex vivo in human whole blood. *J Immunol* 2021;2828-40

Storm BS, Ludviksen JK, Christiansen D, Fure H, Pettersen K, Landsem A, Nilsen BA, Dybwik K, Braaten T, Nielsen EW, Mollnes TE: Venous Air Embolism Activates Complement C3 Without corresponding C5 Activation and Trigger Thromboinflammation in Pigs. *Front Immunol* 2022;13:839632

Sukernik MR, Bennett-Guerrero E: The incidental finding of a patent foramen ovale during cardiac surgery: should it always be repaired? A core review. *Anesth Analg* 2007;105(3):602-610.

SungWon Na, Chang Seok Kim, Ji Young Kim, Jin Seon Cho, Ki Jun Kim: Rigid Laryngoscope-assisted Insertion of Transesophageal Echocardiography Probe Reduces Oropharyngeal Mucosal Injury in Anesthetized Patients. *Anesthesiology* 2009;110:38–40

Takahashi T, Yano K, Kimura T, Komatsu T, Shimada Y: Prevention of venous air embolism by jugular venous compression under superior sagittal sinus pressure monitoring in a brachycephalic patient during craniofacial reconstruction. *Paediatr Anaesth* 1997;7:259-260

Tanus-Santos JE, Gordo WM, Udelsmann A, Cittadino MH, Moreno HJr: Nonselective endothelin-receptor antagonism attenuates hemodynamic changes after massive pulmonary air embolism in dogs. *Chest* 2000;118:175-17

Teping F, Linsler S, Zemlin M, Oertel J: The semisitting position in pediatric neurosurgery: pearls and pitfalls of a 10-year experience. *J Neurosurg Pediatr* 2021;28:724–733

Thanigaraj S, Valika A, Zajarias A, Lasala JM, Perez JE: Comparison of transthoracic versus transesophageal echocardiography for detection of right-to-left atrial shunting using agitated saline contrast. *Am J Cardiol* 2005;96(7):1007-10

Toung T, Ngeow YK, Long DL, Rogers MC, Traystman RJ: Comparison of the effects of positive end-expiratory pressure and jugular venous compression on canine cerebral venous pressure. *Anesthesiology* 1984;61:169-172

Toung TJ, Miyabe M, Mcshane AJ, Rogers MC, Traystman RJ: Effect of PEEP and Jugular Venous Compression on Canine Cerebral Blood Flow and Oxygen Consumption in the Head Elevated Position. *Anesthesiology* 1988;68:53-58

Tsaousi GG, Karakoulas KA, Amaniti EN, Soultati ID, Zouka MD, Vasilakos DG: Correlation of central venous-arterial and mixed venous-arterial carbon dioxide tension gradient with cardiac output during neurosurgical procedures in the sitting position. *Eur J Anaesthesiol* 2010;27(10):882-889

Türe H, Harput MV, Bekiroglu N, Keskin Ö, Köner Ö, Türe U: Effect of the degree of head elevation on the incidence and severity of venous air embolism in cranial neurosurgical procedures with patients in the semisitting position. *J Neurosurg* 2018;128:1560-1569

Wachtendorf LJ, Azimaraghi O, Santer P, Linhardt FC, Blank M, Suleiman A, Ahn C, Low YH, Bijan T, Kendale SM, Schaefer MS, Houle TT, Pollard RJ, Subramaniam B, Eikermann M, Wongtangman K: Association Between Intraoperative Arterial Hypotension and Postoperative Delirium After Noncardiac Surgery: A Retrospective Multicenter Cohort Study. *Anesthesia & Analgesia* 2022;134(4):822-833

Weinberg L, Ying Li S, Louis M, Karp J, Poci N, Carp BS, Miles LF, Tully P, Hahn R, Karalapillai D, Lee DK: Reported definitions of intraoperative hypotension in adults undergoing non-cardiac surgery under general anaesthesia: a review. *BMC Anesthesiology* 2022;22:69

de Wit F, van Vliet AL, de Wilde RB, Jansen JR, Vuyk J, Aarts LP, de Jonge E, Veelo DP, Geerts BF: The effect of propofol on haemodynamics: cardiac output, venous return, mean systemic filling pressure, and vascular resistances. *Br J Anaesth.* 2016 Jun;116(6):784-9

Yahanda AT, Chicoine MR: Paralysis Caused by Spinal Cord Injury After Posterior Fossa Surgery: A Systematic Review *World Neurosurgery* 2020;139:151-157

Zasslow MA, Pearl RG, Larson CP, Silverberg G, Shuer LF: PEEP Does Not affect Left Atrial-Right Atrial Pressure Difference in Neurosurgical Patients. *Anesthesiology* 1988;86:760-763

Zentner J, Albrecht TA, Hassler WH: Prevention of an Air Embolism by Moderate Hypoventilation during surgery in the Sitting Position. *Neurosurg* 1991;28(5):705-708