

## Pressure infusion and air embolism

T. Prien

## Druckinfusion und Luftembolie

Klinik für Anästhesiologie, operative  
Intensivmedizin und Schmerztherapie,  
Universitätsklinikum Münster  
(Direktor: Prof. Dr. Dr. h.c. H. Van Aken)

### Zusammenfassung

Luft kann mit jeder intravenösen Infusion ins Blut gelangen. Eine besondere Risikosituation ist die Druckinfusion, die bei schweren Blutungen eingesetzt werden muss, um Flussraten bis zu 1.000 ml/min zu erreichen. Dafür unerlässlich sind Geräte, die eine Druckinfusion und Wärmetauscher kombinieren. Bei der Erwärmung von Flüssigkeiten entstehen Mikrobläschen, die ebenfalls pathogen sein können. Neben der generellen Forderung, möglichst luftfreie bzw. -arme Infusionsbehälter für die Druckinfusion zu verwenden, ist vor allem eine suffiziente apparative Elimination sowohl von akzidentell zugeführten größeren Luftmengen als auch von erwärmungsbedingten Mikrobläschen sicherzustellen. Technisch konstruktive Schutzmechanismen sind a) das Innenvolumen des Infusionssystems, b) Luftfallen, c) Luftabscheider und d) Luftdetektoren mit Infusionsstop. Diese Sicherungsmechanismen sollten auch bei Netzausfall funktionieren. Die kommerziell erhältlichen Druckinfusionsgeräte sind bezüglich des Luftembolieschutzes unterschiedlich zu bewerten.

### Summary

Air embolism is an immanent pitfall of intravenous infusion. Pressure infusion, as used for management of severe bleeding to allow for flow rates of up to 1,000 ml/min., constitutes an especially risky situation. For this purpose, devices are employed that combine pressure

infusion with heat exchangers. When liquids are heated, potentially pathogenic microbubbles are generated. Apart from the general demand to use air-free containers only, it is necessary to eliminate effectively any accidentally administered large amount of air or microbubbles. Technical and constructive measures are a) the volume of the infusion system, b) air traps, c) gas-permeable membranes, and d) air detectors with infusion stop. These safety measures should also work in case of an electrical power failure. Commercially available pressure infusion devices are equipped with various mechanisms to prevent venous air embolism.

### Einführung

Welchem Anästhesisten wäre das noch nicht passiert? Der Patient braucht schnell viel Volumen, die Infusion wird dazu von außen unter Druck gesetzt, es ist viel auf einmal zu tun. Plötzlich wird bemerkt: Der Infusionsbehälter ist leer, es ist Luft ins Venensystem gelangt, meistens ohne erkennbare Folgen. Dies sollte nicht zur Nachlässigkeit veranlassen: Bereits geringste Luftmengen können bei einem Rechts-Links-Shunt infarzieren [1]; Luftmengen im Bereich von 100-300 ml können tödlich sein, wenn der rechte Ventrikel durch intrakavitäre Luft funktionsunfähig wird [2].

Der Druck, der von außen auf die Infusionsflüssigkeit ausgeübt wird, ist dabei nur ein zusätzlicher Risikofaktor. Auch

### Schlüsselwörter

Luftembolie, venöse – Druckinfusion

### Keywords

Air Embolism, Venous – Pressure Infusion – Pressure Infusors

bei reiner Schwerkraftinfusion können Luftembolien auftreten, insbesondere unter Spontanatmung, im Extremfall sogar tödliche bei peripheren Zugängen [3].

Hier wird nur die besondere Problematik der Druckinfusion behandelt.

### Druckinfusion

Als „Druckinfusion“ wird die Applikation der Infusionsflüssigkeit durch zusätzliche, „aktive“ externe Kräfte bezeichnet. Der Begriff „Druckinfusion“ grenzt von der „passiven“ „Schwerkraftinfusion“ ab, bei der die Infusionsflüssigkeit lediglich dem natürlichen hydrostatischen Druckgefälle folgend in den Körper gelangt.

Eine Druckinfusion wird immer dann verwendet, wenn hohe Flussgeschwindigkeiten erreicht werden müssen. Typische klinische Situationen sind die relative Hypovolämie (z.B. durch Sympathikolyse bei einer Anästhesieeinleitung) und die absolute Hypovolämie (z.B. bei starker Blutung).

Die zusätzliche externe Kraft auf die Infusionsflüssigkeit kann durch zwei Verfahren erzielt werden: erstens durch Kompression des Infusionsbehälters von außen (sei es manuell, durch eine flexible Überdruckmanschette oder durch eine feste Druckkammer), zweitens durch pumpengetriebene Infusion.

### Fallberichte

Die Inzidenz der Luftembolie unter Druckinfusion ist nicht bekannt. Es gibt nur vereinzelte Berichte. Dabei können beim Erwachsenen unter Umständen bereits ca. 200 ml Luft tödlich sein, wenn der rechte Ventrikel durch intrakavitäre Luft funktionsunfähig wird [4]. In CIRSains und CIRSmedical gibt es bisher zwei Fallberichte ([www.CIRSains.de](http://www.CIRSains.de)):

#### Fall 3095:

Problemlose Einleitung zur elektiven Herz-OP im Vorraum durch erfahrenes Team und externen Praktikanten. Druckinfusion kolloidaler Lösung bei Druckabfall, wurde fast vollständig infundiert. Im OP schlechte Kreislaufsituation, vor-

her normwertiges expiratorisches CO<sub>2</sub> jetzt niedrig. Sehr erfahrener Anästhesist vermutet Lungenembolie → rasche Thorakotomie und Punktion der Arteria pulmonalis durch den Operateur → viel Luft/Bläschen. Der Praktikant kann sich erinnern, zum Reinfahren in den OP das Druckventil der Druckinfusion geöffnet zu haben, drin habe er wieder Druck auf die Infusion gegeben. Dazwischen hat vermutlich die Kunststoffflasche Luft gezogen.

#### Fall-Nr: 34343:

Massivtransfusion, dabei Wechsel von EK-Beutel mit Druckbeutel auf Infusions-Plastikflasche mit Druckbeutel. Patientenseitig ist die Infusion an einen großlumigen Shaldon-Katheter angeschlossen. Die Infusion läuft unbeobachtet leer, durch den Druckbeutel gelangt die verbleibende Luft aus der Plastikflasche in großer Menge in den Patienten...

Auch bei apparativer Druckinfusion sind Luftembolien aufgetreten [5-9]. Die herstellereits mittlerweile eingebauten Sicherungsvorkehrungen bieten einen gewissen Schutz [10,11], aber nicht unter allen Umständen.

### Verwendung luftfreier (armer) Infusionsbehälter

Alle Blutprodukte (EK, FFP) werden in Kunststoffbeuteln zur Verfügung gestellt und sind praktisch luftfrei. Als Ausnahme enthalten die im Rahmen der maschinellen Autotransfusion hergestellten Erythrozytenkonzentrate einige Milliliter Luft, die aus dem Lumen des zuführenden Schlauches kommen.

Kristalloide und kolloidale Volumersatzflüssigkeiten gibt es in Flaschen und Beuteln. Beutel haben weniger Luft als Flaschen, die ca. 150 ml enthalten. Ferner wird bei Flaschen das unter Schwerkraftinfusion infundierte Volumen durch Luft ersetzt; wenn bereits teilentleerte Flaschen von außen komprimiert werden, kann dementsprechend mehr Luft infundiert werden (wahrscheinlich die Ursache im o.a. angeführten CIRS-Bericht 3095). In ungünstigen Fällen kann

genau dies auch bei teilentleerten Beuteln passieren [12].

Die Anwenderhinweise für Druckkammern sehen ausnahmslos vor, dass nur luftfreie Behälter verwendet werden dürfen. Insofern ist insbesondere die Verwendung lufthaltiger Flaschen kein bestimmungsgemäßer Gebrauch. Es muss aber leider davon ausgegangen werden, dass dagegen bewusst bzw. unbewusst verstoßen wird – vor allem auch, weil die indizierten Flüssigkeiten am Behandlungsplatz nur in Flaschen abgefüllt verfügbar sind. Insofern sind technische Sicherungen zur Vermeidung von Luftembolien zu fordern.

Die Verwendung lufthaltiger Infusionsflaschen wird dadurch befördert, dass Deutschland (im Gegensatz z.B. zu den USA oder Holland) ein „Flaschenmarkt“ ist. Die Gründe sind unklar, vielleicht rein historisch und gewöhnungsbedingt. Im Augenblick ist die Situation aber so, dass gebräuchliche Infusionslösungen in Beuteln entweder nicht zur Verfügung stehen bzw. deutlich teurer sind. Von Seiten des Marktführers B. Braun AG (Melsungen) ist diesbezüglich auch keine Änderung zu erwarten, da erhebliche Investitionen in Flaschenabfüllanlagen getätigt wurden und auch international „auf die Flasche gesetzt wird“ (persönliche Kommunikation).

So bleibt im Augenblick nur die relativ leicht realisierbare Forderung, alle Infusionsbehälter, bevor sie von außen unter Druck gesetzt werden, zu entlüften. Dies gilt insbesondere für teilentleerte Infusionsbehälter, in denen Flüssigkeit durch Luft ersetzt wurde.

### Mikrobläschen

Apparative Druckinfusionen werden meist in Kombination mit Flüssigkeitwärmern eingesetzt. Bei der Erwärmung von Flüssigkeiten auf Körpertemperatur werden darin gelöste Gase freigesetzt, die in Form von Mikrobläschen sichtbar werden (Ausgasung; ca. 7 ml Gas pro 1.000 ml Flüssigkeit). Obwohl es sich dabei um eine „Gasmenge“ handelt, die bei der Infusion der kalten (ungewärmten) Flüssigkeit in gelöster Form

auch in das Venensystem gelangt wäre, muss davon ausgegangen werden, dass diese Mikrobläschen ins pulmonale Kapillarnetz gelangen. Dort obstruieren sie, aktivieren Leukozyten und induzieren Ultrastrukturschäden mit erhöhter Permeabilität [1]. Gekreuzte Mikroembolien ins arterielle System (z.B. bei offenem Foramen ovale) sind nicht ausgeschlossen. Auch erwärmungsbedingte Mikrobläschen sollten daher – so gut es geht – entfernt werden. Dazu sind entsprechende Luftfänger hinter dem Wärmetauscher einzusetzen. Lachgas kann das Volumen von Mikrobläschen vergrößern und ist zu vermeiden; eine stickstoffarme Atemluft mit hohen Sauerstoffkonzentrationen fördert die Stickstoffresorption aus den Gasbläschen.

### Technische Möglichkeiten zur Verhinderung einer Luftembolie

Grundsätzlich gibt es vier Möglichkeiten, die Infusion von Luft und/oder Mikrobläschen zu verhindern:

#### 1. Tropfkammer

In der Tropfkammer können kleinere Luftmengen abgefangen werden.

**Vorteil:** passiv physikalisches Prinzip, unabhängig von elektrischer Versorgung.

**Nachteil:** unwirksam bei gefüllter Kammer sowie bei größeren Luftmengen (abhängig vom Kammervolumen).

#### 2. Innenvolumen des Infusionssystems

Luft befindet sich immer oberhalb der Infusionsflüssigkeit. Deshalb tritt bei Aufhängung des Infusionsbehälters Luft immer zuletzt, unmittelbar vor dem Kollaps des Behälters und dem damit verbundenen Infusionsstopp in das System. Je größer das Volumen des Systems, desto geringer die Wahrscheinlichkeit bzw. das Ausmaß einer Luftembolie. Das Totraumvolumen bietet also einen gewissen Schutz, da Luftmengen unterhalb des Totraumvolumens zunächst nicht bis zum Patienten gelangen und der Fehler meist beim Wechsel der Infusion bemerkt wird.

**Vorteil:** passiver, konstruktiver Schutz.

**Nachteil:** Füllvolumina gängiger Systeme deutlich unter 200 ml (Tab. 1), kein Schutz gegen Mikrobläschen.

#### 3. Luftabscheider

Dabei wird die Luft an einer hydrophoben Membran von der Flüssigkeitsphase getrennt und über ein Einwegventil abgeleitet. Die Leistungsfähigkeit hängt von der Fläche der Membran und dem Druck in der Kammer (Widerstand im Abflussbereich; je höher der Kammerinnen- druck, desto effektiver die Luftabscheidung) ab. Deshalb muss der Luftabscheider unterhalb des Patienten angebracht werden, wenn er – was sinnvoll ist – zwischen Wärmetauscher und Patient positioniert ist. Wenn der Kammerinnendruck in den Bereich des Atmosphärendrucks sinkt (z.B. Verbindung mit einem ZVK bei einem angestrengt spontan atmenden Patienten; hydrostatischer Sogeffekt bei Positionierung oberhalb des Patienten), kann Luft passieren. Wenig ist bekannt über eine mögliche „innere“ Verstopfung der Trennmembran durch Blutprodukte und Kolloide [10]; vorsichtshalber wird die Einsatzzeit dieser Membranen daher zeitlich beschränkt, z.B. auf drei Stunden beim Level 1® H-1200. Auch eine „äußere“ Verstopfung (z.B. durch Befeuchtung oder Verkleben des Entlastungsventils) kann sie funktionsunfähig machen.

**Vorteil:** passiv physikalisches Prinzip, unabhängig von elektrischer Versorgung.

**Nachteil:** sichere Funktion abhängig von korrekter Positionierung und unbeeinträchtigter Filtrationsmembran, die bei Massivtransfusion fraglich ist; limitierte Einsatzzeit.

#### 4. Luftdetektor

Erkennt Luft (Ultraschall) und unterbricht die Infusion.

**Vorteil:** keine Kapazitätsgrenzen.

**Nachteil:** abhängig von elektrischer Versorgung; Reaktionszeit bei hohen Flussgeschwindigkeiten; Restluft im System kann bei Wiederinbetriebnahme infundiert werden.

### Praxis der Druckinfusion

In der Mehrzahl der Fälle wird eine Druckinfusion neben der manuellen Kompression des Infusionsbehälters mit Hilfe einer Überdruckmanschette durchgeführt. Schutz vor einer Luftembolie bieten nur die Verwendung luftfreier bzw. -armer Behälter und die Tropfkammer sowie das Volumen des Infusionssystems.

Für Massivtransfusionen sind in Deutschland kombinierte Druckkammer-/Blutwärmesysteme üblich, die hohe Flussraten von auf Körpertemperatur angewärmten Flüssigkeiten ermöglichen.

Verbreitet sind zurzeit drei Geräte: „Level 1® H-1200“ (Smiths Medical ASD), „Ranger“ (3M) und „Fluido“ (The Surgical Company). Die drei Geräte verfügen über jeweils zwei Druckkammern, die über einen elektrischen Kompressor betrieben werden. Die Hersteller bieten unterschiedliche Sets, die für unterschiedliche Flussraten/Erwärmungsleistungen ausgelegt sind. Abgesehen von unterschiedlichen Volumina dieser Sets gibt es unterschiedliche Maßnahmen zur Verhinderung von Luftembolien (Tab. 1).

Die pumpengetriebenen Geräte („Rapid Infusion System“ und dessen Nachfolgemodell „Belmont® Rapid Infuser“ (Belmont Industrial Corp.)) haben bisher in Deutschland keine Rolle gespielt, vor allem auch wegen der höheren Verbrauchsmaterialkosten und wegen geringer Vermarktungsinitiativen des Herstellers (Tab. 1). Aktuell gibt es weitere pumpengetriebene Geräte, die in Deutschland aber noch nicht vermarktet werden (z.B. „Flowtherm“ - [www.gamidatech.com](http://www.gamidatech.com); „ThermaCor 1200“ - [www.thermacor1200.com](http://www.thermacor1200.com)). Ein besonderer Vorteil der Rollerpumpengeräte ist es, dass damit definierte Flussmengen eingestellt und definierte Boli gegeben werden können; die Infusionsgeschwindigkeit lässt mit Entleerung des Flüssigkeitsbehälters auch nicht nach wie bei druckkammerbetriebenen Geräten [13]; ferner verfügen sie konstruktionsbedingt über einen Druckalarm, der die Infusion bei Überschreiten eines einstellbaren Grenzwertes unterbricht.

Im Folgenden werden einige im Augenblick in Deutschland relevante **Modelle** dargestellt. Die Angaben beruhen auf den Informationen der Hersteller in deren Internetpräsenz zum Zeitpunkt der Manuskripterstellung im Frühjahr 2013.

Das Gerät **Level 1® H-1200** (Smiths Medical ASD Inc., Rockland, MA, USA) ist in Deutschland am weitesten verbreitet. Der Luftabscheider ist relativ klein dimensioniert. Die Einsatzzeit der Blutfilter/Luftabscheider-Komponente ist auf drei Stunden beschränkt. Der bei den neuen Modellen vorhandene bzw. nachrüstbare (H-31B) Luftsensord/Abschalter öffnet sich bei Stromausfall (z.B. Ziehen des Netzsteckers). Eine Luftinfusion (auch von zuvor detektierter Luft) ist dann mit dem Restdruck in den Druckkammern möglich. Versuche, einen zusätzlichen Luftabscheider im Bereich des Luftdetektors einzubauen (Einmalset F-50), sind

bislang an Betriebsproblemen (abknickende Schläuche und Undichtigkeiten) gescheitert; dies dürfte auch der Grund sein, warum das Gerät H-1200 und der Luftdetektor H-31B zurzeit in der EU nicht in den Verkehr gebracht werden darf. Erhältlich ist zurzeit in der EU nur die Vorgängerversion H-1025 ohne integrierten Luftdetektor (mit dem relativ klein dimensionierten Luftabscheider), für den eine nicht in allen Fällen ausreichende Lufteliminationskapazität belegt ist [6,14].

Der **Ranger®** (3M Center, St. Paul, MN, USA) kann zusammen mit zwei Applikationssets eingesetzt werden. Das Hochfluss-Set verfügt über einen sehr leistungsfähigen Luftabscheider, dessen einwandfreie Funktion jedoch nicht anwenderfehlerfrei ist (s. oben). Hinsichtlich des Luftembolierisikos und bestehender Bedenken wegen Mikrobläschen

ist besonders kritisch, dass bei Verwendung des Applikationssets Modell 24250 („Standard Flow“, normotherm bis 150 ml/h) weder Luftabscheider noch Luftdetektor vorhanden sind.

Das Gerät **Fluido®** (The Surgical Company, Amersfoort, NL) verfügt über einen Luftdetektor (Fluido® Air Guard) zwischen Wärmetauscher und Patient, aber keinen Luftabscheider. Bei Luftdetektion muss die Luft vor Wiederaufnahme der Infusion manuell entfernt werden. Bei Stromausfall wird die Flüssigkeitszufuhr unterbrochen und es gibt einen akustischen Alarm (Akkubetrieb). Es ist dann möglich, die Kammer des Infusionssystems aus dem Luftdetektor zu entfernen und ohne Erwärmung und erneute Kompression weiter zu infundieren – auch Luft. Ferner ermöglicht das Gerät von vornherein die Druckinfusion erwärmter Flüssigkeit ohne Nutzung des separaten Luftdetektors.

**Tabelle 1**

Vergleich von Druckinfusionsgeräten für die Massivtransfusion.

Produkt	Level 1® H-1200	Ranger®	Fluido®	Belmont® Rapid Infuser
Internetpräsenz	www.smiths-medical.com	www.solutions.3mdeutschland.de	www.tsci.nl	www.belmontinstrument.com
Druckerzeugung	2 Druckkammern	2 Druckkammern, Modell 90032	2 Druckkammern	Rollerpumpe
Erwärmung	Konvektion, flüssig, Gegenstrom	Konvektion, trocken	Infrarot	Induktion; ab 10 ml/min
Applikationsset	DI-100 (4 verschiedene Sets verfügbar)	Modell 24350	Trauma Set 671500 (3 verschiedene Sets verfügbar)	Standard 903-00006***
Füllvolumen	73 ml	150 ml	145 ml	patientennah des Reservoirs ca. 100 ml
normothermer Flow bis*	800 ml/min**	500 ml/min	750 ml/min	750 (Option 1.000) ml/min****
Tropfkammer	ja	ja	ja	ja
Luftdetektor/Abschaltung	ja, (H 31 B)	nein	ja, Fluido Air Guard	2 (Eingang 0,8 ml Luft, Ausgang 0,1 ml Luft)
Luftabscheider	ja; alle drei Stunden zu ersetzen, oder wenn Abscheider trübe wird oder wenn Luft langsam abgeschieden wird	ja, bis 3.000 ml/Minute	nein	ja
Entlüftung	über Luftabscheider	über Luftabscheider	manuell	automatische Entlüftung
Stromausfall	Infusionsstopp; kein Akku; Restdruck-/Schwerkraftinfusion ohne Erwärmung weiter möglich; Luftabscheider unbeeinflusst	Infusionsstopp; kein Akku; Restdruck-/Schwerkraftinfusion ohne Erwärmung weiter möglich; evtl. Druckkammerbetrieb über Druckluftanschluss; Luftabscheider unbeeinflusst	Infusionsstopp; Akku versorgt Luftdetektor; Restdruck-/Schwerkraftinfusion ohne Erwärmung weiter möglich	reduzierter Akkubetrieb ohne Erwärmung bis zu 30 min; danach Schwerkraftinfusion ohne Luftdetektor

\* nur für Kristalloide bei Raumtemperatur; geräteabhängig deutlich geringere Leistung bei Transfusion gekühlter Erythrozytenkonzentrate [6]

\*\* 1.000 ml/min bei Set DI-300 und Einsatz einer dritten Druckkammer

\*\*\* ein Applikationsset mit 3-Liter-Reservoir ist alternativ erhältlich

\*\*\*\* 2 unterschiedliche Geräte.



Der **Belmont® Rapid Infuser** (Belmont Instrument Corporation, Billerica, MA, USA) verfügt über zwei Luftdetektoren, eingangs- und ausgangsseitig; bei Detektion von Luft wird eine Infusionssperre ausgelöst. Das Gerät hat ferner einen Luftabscheider im Bereich des Reservoirs, in das die Flüssigkeit zunächst gelangt. Luft hinter (patientennah) der Erwärmungseinheit sammelt sich in einer Luftfalle und wird von dort mit einem Spülvorgang zum Reservoir geführt und dort abgeschieden; dies gilt auch für Mikrobläschen, die mittels automatischer Spülzyklen eliminiert werden. Bei Stromausfall bzw. Trennung vom Netzstrom ist ein eingeschränkter Akkubetrieb mit reduziertem Flow und ohne Erwärmung für eine halbe Stunde möglich; die Luftdetektion und Abscheidung bleiben komplett erhalten. Konstruktionsbedingt ist eine vorherige Entlüftung von Infusionsbehältnissen nicht erforderlich.

### Zusammenfassung

- Die Luftembolie ist eine der Druckinfusion immanente Gefahr, die fast ausschließlich auf Anwenderfehler zurückzuführen ist.
- Wie auch vor der Schwerkraftinfusion sind die zum Patienten führenden Schläuche vor dem Anschluss sorgfältig zu entlüften.
- Bei Verwendung von Infusionsflaschen ist das Risiko höher als bei Verwendung von Beuteln. Besonders riskant ist die Druckinfusion teilentleerter Flaschen.
- Das Totraumvolumen der verwendeten Infusionssysteme stellt einen ungenügenden Schutz dar.
- Eine Druckinfusion darf daher nur mit luftfreien bzw. -armen Flüssigkeitsbehältern erfolgen. Ggf. sind diese vorher zu entlüften (Ausnahme: Belmont® Rapid Infuser).
- Eine dem augenblicklichen Stand der Wissenschaft entsprechende medizinische Versorgung schwerer Blutungen (z.B. Trauma, Lebertransplantation) erfordert die Infusion bzw. Transfusion von auf Körpertemperatur angewärmten Flüssig-

keiten mit Flussgeschwindigkeiten bis zu einem Bereich zwischen 500 und 1.000 ml/min.

- Dafür unerlässlich sind Geräte, die eine Druckinfusion und Wärmetauscher kombinieren.
- Zu beachten ist ein pathogener Effekt von Mikrobläschen durch Ausgasung bei der Erwärmung. Diese sollten vorsichtshalber hinter dem Wärmetauscher abgefangen werden.
- Luftabscheider und Luftdetektor haben jeweils spezifische Vor- und Nachteile; der Luftabscheider bedarf der besonderen Kenntnis und Aufmerksamkeit des Anwenders, der Luftdetektor einer Stromversorgung, ggf. durch Akkubetrieb.
- Geräte, die eine Druckinfusion mit Erwärmung ohne Luftabscheider oder Luftdetektor ermöglichen, sind besonders risikoreich.
- Praktisch ausgeschlossen ist das Luftembolierisiko bei Geräten, die über einen Luftsensord mit Akkubetrieb und einen leistungsfähigen Luftabscheider hinter der Wärmeeinheit verfügen.

### Literatur

1. Orebaugh SL: Venous air embolism. *Crit Care Med* 1992;20:1169-77
2. Palmon SC, Moore LE, Lundberg J, Toung T: Venous air embolism: A review. *J Clin Anesth* 1997;9:251-7
3. Sowell MW, Lovelady CL, Brogdon BG, et al: Infant death due to air embolism from peripheral venous infusion. *J Forensic Sci* 2007;52:183-8
4. Toung TJK, Rossberg MI, Hutchins GM: Volume of Air in a Lethal Venous Air Embolism. *Anesthesiology* 2001;94:360-1
5. Adhikary GS, Massey SR: Massive air embolism: a case report. *J Clin Anesth* 1998;10:70-2
6. Comunale ME: A Laboratory Evaluation of the Level 1 Rapid Infuser (H1025) and the Belmont Instrument Fluid Management System (FMS 2000) for Rapid Transfusion. *Anesth Analg* 2003;97:1064-9
7. Linden JV, Kaplan HS, Murphy MT: Fatal air embolism due to perioperative blood recovery. *Anesth Analg* 1997;84:422-6
8. Mendenhall ML, Spain DA: Venous Air Embolism and Pressure Infusion Devices. *J Trauma* 2007;63:246
9. Schnoor J, Macko S, Weber I, Rossaint R: The air elimination capabilities of pressure infusion devices and fluid-warmers. *Anaesthesia* 204;59:817-21
10. Ramachandra RA, Kramer R Smith CE: Air Detection Performance of the Level 1 H-1200 Fluid and Blood Warmer. *Anesth Analg* 2005;101:1413-6
11. Zoremba N, Gruenewald C, Zoremba M, et al: Air elimination capability in rapid infusion systems. *Anaesthesia* 2011;66:1031-34
12. Pant D, Narani KK, Sood J: Significant air embolism: A possibility even with collapsible intravenous fluid containers when used with rapid infuser systems. *Indian J Anaesth* 2010;54:49-51
13. Barcelona SL, Vilich F, Coté CJ: A Comparison of Flow Rates and Warming Capabilities of the Level 1 and Rapid Infusion System with Various-Size Intravenous Catheters: *Anesth Analg* 2003;97:358-63
14. Eaton MP, Dhillon AK: Relative performance of the level 1 and ranger pressure infusion devices. *Anesth Analg* 2003;97:1074-7.

### Korrespondenzadresse



Prof. Dr. med.  
Thomas Prien, M.Sc.

Klinik für Anästhesiologie, operative Intensivmedizin und Schmerztherapie  
Universitätsklinikum Münster  
Albert-Schweitzer-Campus 1  
Gebäude A1  
48149 Münster, Deutschland  
Tel.: 0251 8347255  
Fax: 0251 8348667  
E-Mail: prient@uni-muenster.de