

Originalarbeiten / Original Works

Luftembolie oder Fäulnis? Gasanalytische Befunde und ihre Interpretation

I. Pedal¹, A. Moosmayer¹, H.J. Mallach¹ und M. Oehmichen²

¹Institut für Gerichtliche Medizin der Universität,
Nägelestraße 5, D-7400 Tübingen, Bundesrepublik Deutschland

²Institut für Rechtsmedizin der Universität,
Melatengürtel 60–62, D-5000 Köln 30, Bundesrepublik Deutschland

Air Embolism or Putrefaction? Results of Gas Analysis and Their Interpretation

Summary. Gas was detected in the hearts of 111 necropsy cases. The gas was quantified and then analyzed by gas chromatography. In 70 cases H₂, a clear marker of putrefaction, could be identified in the samples. After critical consideration, air embolism was accepted in 36 of the remaining cases. In nearly all instances, severe skull trauma or stab wounds to the neck or clavicular region gave rise to the air embolism. When the gas analysis data were compared, clear-cut differences were found between the two groups of putrefaction and air embolism. CO₂ concentrations below 15%, N₂ concentrations above 70%, and a CO₂/N₂ ratio below 0.2 proved to be good criteria to determine an air embolism. However, gas volumes, O₂ concentrations, and CO₂/O₂ ratios largely overlapped in the two groups. Air embolism samples consistently had lower O₂ concentrations and higher CO₂ concentrations than atmospheric air, and this was evidently independent from incipient putrefaction. We suggest that these deviations result from a gas exchange between the venous blood and the embolized air volume taking place in the right heart ventricle. The dimensions of the concentration shifts may be understood from severe agonal hypoxia and hyperkapnia.

Key words: Air embolism or putrefaction – Gas analysis, in air embolism

Zusammenfassung. Bei 111 Sektionen wurde Gas aus dem Herzen entnommen. Die Volumina wurden gemessen, anschließend wurden die Proben gaschromatographisch analysiert. In 70 Fällen enthielt das Gasgemisch H₂, so daß eindeutig Fäulnis vorlag. In 36 der verbleibenden Fälle war nach kritischer Prüfung von einer Luftembolie auszugehen. Lufteintrittspforten wa-

ren in dieser Gruppe mit wenigen Ausnahmen schwere Schädeltraumata oder eröffnete Venen des Vorderhalses und der oberen Thoraxapertur. Als gute gasanalytische Kriterien einer Luftembolie erwiesen sich CO₂-Konzentrationen unter 15%, N₂-Konzentrationen über 70% und ein Quotient CO₂/N₂ unter 0,2. Dagegen ergaben die gemessenen Volumina, die O₂-Konzentrationen und die Quotienten CO₂/O₂ keine scharfe Diskriminierung zwischen Luftembolie und Fäulnis. Das bei Luftembolie gewonnene Gas weist im Vergleich zu atmosphärischer Luft, offenbar unabhängig von Fäulnisveränderungen, erniedrigte O₂- und erhöhte CO₂-Konzentrationen auf. Wir sehen hierin die Folge eines Gasaustausches zwischen dem venösen Blut des rechten Herzens und der eingedrungenen Luft; das Ausmaß der O₂- und CO₂-Konzentrationsänderungen ist durch agonale Hypoxie und Hyperkapnie erklärbar.

Schlüsselwörter: Luftembolie oder Fäulnis – Gasanalyse, bei Luftembolie

Einleitung

Bei Verdacht auf Luftembolie wird zu Beginn der Sektion unter Schonung der großen Venen der Herzbeutel eröffnet und mit Wasser gefüllt; danach wird mit dem Skalpell erst die rechte, dann die linke Herzkammer angestochen, worauf im positiven Falle grobe Blasen aufsteigen (Technik nach Richter 1905). Bei kurzem postmortalen Intervall und fehlenden Fäulniszeichen gilt dieser Nachweis von Gas im Herzen als beweisend für das Vorliegen einer Luftembolie. Nicht verwertbar ist der Befund, wenn zwischen Tod und Leichenöffnung ein längerer Zeitraum verstrichen ist oder Zeichen der Fäulnis erkennbar sind.

Der Beginn relevanter mikrobieller Zersetzungerscheinungen mit Gasbildung ist von der Zusammensetzung der Leichenflora und von den schwer charakterisierbaren Milieubedingungen abhängig, also von Fall zu Fall recht variabel. Nicht jede später gasanalytisch gesicherte Fäulnis wird bei der Leichenöffnung erkannt. Orientiert man sich also bei der Bewertung des Befundes „Gas im Herzen“ allein am postmortalen Intervall und der Ausprägung von Fäulniszeichen, so wird man einerseits einen gewissen Prozentsatz von Fäulnis-gasbefunden falsch-positiv als Luftembolien, andererseits manche echten Luftembolie-Fälle als Fäulnis-Artefakte, also falsch-negativ interpretieren.

Durch die Analyse des im Herzen nachgewiesenen Gases sollte es aber gelingen, zwischen Luftembolie-Gas und Fäulnisprodukten zu unterscheiden. Seit Dyrenfurth (1924) haben sich mehrere Autoren mit der Entwicklung von Geräten befaßt, mit denen das Gas aus dem Leichenherzen entnommen, gemessen und für eine anschließende Analyse asserviert werden kann (Literatur bei Schmidt 1979); am Institut für Gerichtliche Medizin der Universität Tübingen ist ein von Schmidt entwickeltes „Aspirometer“ in Gebrauch, das an anderer Stelle im Detail beschrieben wurde (Mallach und Schmidt 1980). Die Analyse der asservierten Gasproben erfolgt heute allgemein gaschromatographisch.

Seit 1979 führen wir in nahezu jedem Sektionsfall mit Hilfe des Aspirometers die Probe auf Gas in den Herzkammern durch und unterziehen jedes Gas-Asservat der Analyse. Da es an größeren Reihenuntersuchungen bisher man-

gelt und Unsicherheiten hinsichtlich der Interpretation gasanalytischer Befunde bestehen, möchten wir unsere Beobachtungen zusammenfassend darstellen.

Material und Methodik

Bis etwa 2400 von Anfang 1979 bis zur Jahresmitte 1987 durchgeführten Gerichtlichen Leichenöffnungen erfolgte mit Hilfe des W. K. Schmidt'schen Aspirometers zu Sektionsbeginn die Prüfung auf Gas in den Herzkammern. Um Vergleichswerte zu erhalten, wurden Leichen mit erkennbaren Fäulnisveränderungen in die Studie einbezogen. In 111 Fällen, also etwa 4,6% der Prüfungen, konnte Gas aus mindestens einer Herzkammer gewonnen werden. Das Gas wurde – gegebenfalls aus beiden Herzkammern getrennt – quantitativ entnommen. Sein Volumen wurde gemessen. Anschließend wurden die Proben in head space-Ampullen umgefüllt und der Gasanalytik zugeführt. Als Sperrflüssigkeit verwendeten wir Wasser. Damit werden gewisse Verfälschungen der Gaszusammensetzung (Keil et al. 1980) in Kauf genommen, die aber quantitativ keine wesentliche Rolle spielen sollen (Schneider et al. 1982).

Die gaschromatographischen Untersuchungen erfolgten durch Direkteinspritzung mittels gasdichter Spritzen mit eingeschweißter Kanüle (Fa. Hamilton) nach der von Schmidt (1979) angegebenen Methode.

Geräteparameter:

Hewlett-Packard-Gaschromatograph HP 5750 (2 Säulen-Gerät) mit Hitzdrahtdetektor (WLD).

Säule A: 1,5 m Glas, 3 mm
Molekularsieb 5 Å

Säule B: 1m Glas, 3 mm
Kieselgel-GC (80–100 mesh)

Trägergas: 60 ml/min He

Otentemperatur: 110°C

Integrator HP 3370 B

Säule A (Molsieb 5 Å) trennt sehr gut H₂, O₂, N₂ und CH₄, während CO₂ auf der Säule verbleibt. Durch gelegentliches Konditionieren bei 250°–300°C muß das CO₂ entfernt werden, um konstante Analysenbedingungen für die anderen Gase zu erreichen.

Umgekehrt werden auf Säule B (Kieselgel) H₂, O₂, N₂ und CH₄ praktisch nicht getrennt, jedoch läßt sich CO₂ hier sehr gut bestimmen. Für die Gasanalyse erfolgen also zwei getrennte Probenaufgaben auf die zwei verschiedenen Säulen.

Die Eichung für O₂ und N₂ wird durch Analyse von Luft durchgeführt, deren O₂- und N₂-Gehalt bekannt und wohl auch heute noch weitgehend konstant ist. Die Eichung der übrigen Gase erfolgt durch Analyse der einzelnen Reingase, deren Reinheit über O₂- und N₂-Analyse kontrolliert und korrigiert wird.

Zur Analyse werden 50 µl des Gasgemisches injiziert. Dabei lassen sich 1% der Gase im Analysengemisch noch gut bestimmen. Nur für H₂ liegt die Empfindlichkeit wesentlich schlechter, da der Unterschied der Wärmeleitfähigkeiten von H₂ und Trägergas He wesentlich geringer ist als bei den übrigen Gasen. Diese Differenz der Wärmeleitfähigkeit ist ja mit ausschlaggebend für die Empfindlichkeit der Bestimmung.

Da sich Konzentrationen unter 10% H₂ nicht mehr genügend genau bestimmen lassen, werden Werte unter 10% H₂ nur als „Spur“ angegeben. Eine gewisse Empfindlichkeitssteigerung läßt sich durch Erhöhung des injizierten Probenvolumens erreichen. Doch dies führt zu größeren Schwankungen der Ergebnisse vor allem auch der übrigen Gase. Eine weitere Verbesserung der H₂-Bestimmung ist bei Verwendung von N₂ als Trägergas zu erwarten, doch würde dies zu einem ganz erheblichen Mehraufwand der Methode führen.

Weitere, bei der Fäulnis mögliche Zersetzungprodukte wie NH₃ oder H₂S werden mit der angewandten Methode nicht erfaßt. Doch können diese Verbindungen mengenmäßig keine große Rolle spielen, da die Summe der analysierten Gase nicht wesentlich unter 100% liegt.

Die Daten über Vorgeschichte, Fäulniszeichen, Sektionsbefunde und postmortales Intervall wurden den Sektionsakten entnommen.

Ergebnisse

1. Gliederung des Materials

Da die Anwesenheit von Wasserstoff Fäulnisprozesse eindeutig beweist, bietet sich eine erste Aufteilung des Gesamtkollektivs ($n = 111$) in H₂-positive und H₂-negative Fälle an. Das erste Teilkollektiv umfaßt 70 Sektionsfälle, bei denen mit Sicherheit Fäulnis vorliegt, wobei fallweise eine Überlagerung von Luftembolie und Fäulnis zu diskutieren sein wird. Das zweite Teilkollektiv ($n = 41$), charakterisiert durch das Fehlen nachweisbarer Wasserstoffmengen, beinhaltet unter anderem alle Fälle einer echten, nicht durch Fäulnisgas verfälschten Luftembolie. Fünf Fälle, bei denen trotz fehlenden Wasserstoff-Nachweises nicht von einer Luftembolie auszugehen war, wurden aus folgenden Gründen eliminiert:

- einmal handelte es sich um einen Tauchunfall, bei dem die Zusammensetzung des Atemgasgemisches nicht bekannt ist;
- dreimal fielen eine Undichtigkeit des Aspirometers und/oder eine mit atmosphärischer Luft identische Gaszusammensetzung auf;
- einmal lag die Kohlendioxid-Konzentration eklatant über den sonst beobachteten Werten, so daß mikrobielle Aktivität ohne wesentliche Wasserstoff-Produktion zu vermuten war.

Nach Elimination dieser fünf Fälle verbleibt ein bereinigtes Kollektiv von 36 Sektionsfällen, bei denen vom Vorliegen einer Luftembolie ausgegangen wird. Sie weisen übereinstimmend Gefäßverletzungen auf, die eine Luftembolie plausibel machen; sie zeigen darüberhinaus, wie wir sehen werden, in der Zusammensetzung des aspirierten Gases gute Übereinstimmungen.

Insgesamt ergibt sich folgende Gliederung:

Gesamtkollektiv: $n = 111$		
H ₂ -positiv	H ₂ -negativ	
$n = 70$	$n = 41$	
Fäulnis	eliminiert	Luftembolie
	$n = 5$	$n = 36$

2. Die 70 Fälle mit gesicherter Fäulnis (H₂-positive Fälle)

Das Kollektiv der Fälle, in denen aus dem Herzen H₂-haltiges Fäulnisgas gewonnen wurde, ist unter verschiedenen Aspekten recht inhomogen:

Die Todesursachen – auf die es bei der gegebenen Fragestellung aber nicht wesentlich ankommt – waren vielfältig. In einigen Fällen lagen traumatische

Veneneröffnungen (offene Schädel-Hirn-Traumata, zentrale Venenkatheter) vor, die zu einer Luftembolie geführt haben könnten; in diesen Fällen ist eine sekundäre Verfälschung des Luftembolie-Befundes durch Fäulnis in Betracht zu ziehen.

Das postmortale Intervall variierte zwischen einem Tag und mehreren Monaten. Ebenso uneinheitlich ist das Milieu, in dem die Leichen gefunden wurden (Wasser, Wohnung, unbeheizte Gebäude, ungeschützte Lage im Freien).

In nur sechs Fällen enthielt das Sektionsprotokoll keine Hinweise auf Zeichen der Fäulnis; in den übrigen 64 Fällen lagen typische Fäulnisveränderungen vor, teilweise überlagert von anderen späten Leichenveränderungen wie Mumifizierung, Verwesung, Fettwachsbildung.

Wasserstoffhaltiges Gas fand sich stets im rechten Herzen, oft war zusätzlich eine geringere Menge im linken Herzen nachweisbar. In der Regel konnten dem rechten Ventrikel Volumina zwischen 50 ml und 100 ml entnommen werden. Neunmal wurden zwischen 120 und 150 ml, einmal eine Menge von 350 ml gemessen. Die letztgenannte Beobachtung betrifft eine Leiche mit viertägiger Liegezeit und Veränderungen im Sinne der Verwesung; das aspirierte Gas war ungewöhnlich CO₂-reich (CO₂: 62%, H₂: Spur).

Über die Zusammensetzung der Fäulnisgase im Vergleich mit den Luftembolie-Fällen wird in Abschnitt 4 ausführlicher berichtet. Neben Wasserstoff wurden praktisch immer auch hohe CO₂-Konzentrationen beobachtet. Das quantitative Verhältnis zwischen H₂ und CO₂ war dabei durchaus inkonstant. In Fällen „typischer“ Fäulnis überwog tendenziell der H₂-Anteil; ungewöhnlich hohe CO₂-Konzentrationen fanden sich vorzugsweise – aber nicht ausschließlich – nach (sehr) langen Liegezeiten in feuchtem Milieu. Den hohen H₂- und CO₂-Konzentrationen standen, wie in Abschnitt 4 gezeigt werden wird, vergleichsweise niedrige Anteile an Sauerstoff und Stickstoff gegenüber.

In 15 Fällen konnte Methan nachgewiesen werden; es war ausnahmslos nur in Spuren vorhanden. Niemals war Methan in Abwesenheit von Wasserstoff nachweisbar. Mit Ausnahme eines einzigen Falles lag die Summe der gemessenen Gaskonzentrationen – bei einer tolerierbaren Fehlerbreite von wenigen Prozent – bei etwa 100%, so daß eine quantitativ bedeutende Beteiligung nicht erfaßter Fäulnisgase auszuschließen war.

3. Die 36 Fälle von Luftembolie

In Tabelle 1 sind die Fälle gesicherter Luftembolie nach Art der Traumatisierung, Lufteintrittspforte, postmortalem Intervall und gasanalytischen Befunden zusammengestellt. Da, abgesehen von einzelnen Ausnahmen, der Tod rasch am Ort der Traumatisierung eintrat und Reanimationsversuche nur sehr selten erfolgt waren, können verwertbare Angaben über den Zeitraum zwischen Verletzung und Todeseintritt nicht gemacht werden.

In einigen Fällen (vgl. Tabelle) war ein zentraler Venenkatheter gelegt worden, der als konkurrierende Lufteintrittspforte in Frage kommt. Nur in einem Falle (361/82) war der erst im Rahmen der Reanimationsversuche gelegte Venenkatheter als einzige mögliche Quelle einer gewissermaßen supravitalen Luftembolie anzusehen.

Tabelle 1. Übersicht über die 36 Fälle gesicherter Luftembolie

L-Nr.	Alter/ Geschlecht	Postmort. Intervall	Umstände des Todes/ Sektionsbefund	Mögliche Luft- eintrittspforte	Gasvolumen			Gasanalyse		
					(ml)	O ₂	CO ₂	N ₂		
68/79	77 m	31 Std.	Spättod nach VU. Pneumonie	Tracheotomiewunde; Nadelsteinstichstelle	re: – li: 120	19	2	79		
295/79	51 m	48 Std.	Verbluten bei Unter- schenkeldurchschuß	Beinvenen; Subclaviakatheter	re: 45 li: 45	8	9	85		
154/81	18 m	72 Std.	Schweres Schädel-Hirn- Trauma	Schädelvenen	re: 30 li: –	10	7	84		
250/81	50 m	54 Std.	Schweres Schädel-Hirn- Trauma	Schädelvenen	re: 10 li: –	15	2	84		
295/81	42 m	24 Std.	Kopfdurchschuß (Suizid)	Schädelvenen. Off. For. ovale!	re: 10 li: 10	5	6	89		
81/82	43 m	20 Std.	Polytrauma (Fenstersturz)	Part. Abriß der linken Lunge	re: – li: 30	20	7	72		
199/82	64 w	43 Std.	Schweres Schädel-Hirn- Trauma	Schädelvenen	re: 30 li: –	8	8	83		
266/82	29 m	47 Std.	Polytrauma (Flugzeugabsturz)	Schädelvenen; Subclaviapunkt.	re: 25 li: –	5	9	86		
309/82	21 w	4,5 Tage	Schwerstes Schädel- Hirn-Trauma	Schädelvenen	re: 20 li: –	5	10	82		
361/82	68 m	46 Std.	Coronartod	V. jugularis-Punktion (Reanimation)	re: 10 li: –	10	7	82		
149/83	24 m	37 Std.	Kopfdurchschuß (Suizid)	Schädelvenen	re: 70 li: –	9	14	76		
264/83	38 w	10 Std.	Messerstich (Homizid)	Li. V.jugularis und V.subclavia	re: 10 li: –	6	7	87		
294/83	25 m	16 Std.	Messerstiche (Homizid)	Re. V.axillaris; Subclaviapunkt.	re: 25 li: –	15	6	75		

303/83	39 m	30 Std.	Polytrauma (Flugzeugabsturz)	Gesichts- und Schädelvenen	re: 100 li: Schaum	6	13	78
307/83	53 m	57 Std.	Messerstiche (Homizid)	Halsvenen	re: 60 li: —	3	13	84
313/83	19 m	35 Std.	Schweres Schädel-Hirn- Trauma	Gesichts- und Schädelvenen	re: 100 li: wenig	9	10	80
96/84	58 m	24 Std.	Schweres Schädel-Hirn- Trauma	Schädelvenen	re: 70 li: 10	5	4	92
98/84	22 w	18 Std.	Schädel-Hirn-Trauma (Beilhiebe)	Schädelvenen	re: 25 li: —	6	4	91
146/84	19 w	58 Std.	Schweres Schädel-Hirn- Trauma	Schädelvenen	re: 30 li: 20	11	12	77
153/84	50 w	30 Std.	Schweres Schädel-Hirn- Trauma	Schädelvenen	re: wenig li: —	5	13	83
196/84	52 m	31 Std.	Messerstich (Homizid)	Re. V.jugularis interna	re: 40 li: —	4	11	84
56/85	56 m	15 Std.	Schweres Schädel-Hirn- Trauma	Schädelvenen	re: 17 li: —	4	10	84
66/85	48 w	37 Std.	Schweres Schädel-Hirn- Trauma	Schädelvenen	re: 60 li: —	10	13	77
86/85	35 m	1 Tag	Kopfdurchschuß (Suizid)	Schädelvenen	re: 20 li: —	11	10	72
104/85	46 w	2 Tage	Messerstich (Homizid)	Re. V.jugularis interna	re: 10 li: —	14	7	71
204/85	64 m	1 Tag	Verbluten aus Kopf- schwartenwunde	Venen der Kopf- schwarze	re: 20 li: —	15	8	70
206/85	9 w	39 Std.	Schädel-Hirn-Trauma, Thoraxkompression	Schädelvenen; V.jugularis-Punkt.	re: 80 li: —	8	19	73
228/85	41 m	1 Tag	Kopfdurchschuß (Suizid)	Schädelvenen	re: 20 li: —	12	8	84

Tabelle 1 (Fortsetzung)

L-Nr.	Alter/ Geschlecht	Postmort. Intervall	Umstände des Todes/ Sektionsbefund	Mögliche Luft- eintrittspforte	Gasvolumen (ml)	Gasanalyse		
						O ₂	CO ₂	N ₂
12/86	72 m	23 Std.	Schädel-Hirn-Trauma	Schädelvenen	re: 25 ii: –	12	4	84
95/86	33 m	6 Tage	Schweres Schädel-Hirn- Trauma	Schädelvenen	re: 20 ii: –	8	11	80
98/86	45 w	57 Std.	Kopf-Schrotschuß (Homizid)	Schädelvenen	re: 25 ii: –	13	7	80
100/86	48 m	60 Std.	Kopf-Schrotschuß (Suizid)	Schädelvenen	re: 65 ii: –	14	7	78
2/87	10 m	13 Std.	Kopfdurchschuß (Homizid)	Schädelvenen	re: 20 ii: –	10	11	78
27/87	22 m	15 Std.	Schweres Schädel-Hirn- Trauma	Schädelvenen	re: 10 ii: –	12	7	82
33/87	50 w	14 Std.	Messerstiche (Homizid)	Große Halsvenen	re: 30 ii: –	14	2	85
95/87	28 m	14 Std.	Schweres Schädel-Hirn- Trauma	Schädelvenen	re: 20 ii: –	12	6	82

Wie der tabellarischen Zusammenstellung zu entnehmen ist, war die Luftembolie in 25 Fällen Folge eines schweren Schädel-Hirn-Traumas. In sechs Fällen hatten Messerstiche zu Veneneröffnungen im Bereich des Halses oder der oberen Thoraxapertur geführt. In jeweils einem Falle ging die Luftembolie von einer Schußverletzung des Unterschenkels, von dem bei Reanimationsversuchen gelegten Venenkatheter, von Blutgefäßen der Kopfschwarte oder von einer Tracheotomiewunde aus; einmal hatte der partielle Abriß einer Lunge zur arteriellen Luftembolie geführt. In aller Regel – vor allem in der Gruppe der schweren Schädel-Hirn-Traumata – lagen so schwere Verletzungen vor, daß die Luftembolie als Begleitphänomen oder höchstens als mitwirkende Todesursache zu werten war.

Die aus dem rechten Herzen aspirierten Gasvolumina betrugen niemals mehr als 100 ml, am häufigsten etwa 20–25 ml. Manchmal, und zwar auch bei geschlossenem Foramen ovale, enthielt zusätzlich der linke Ventrikel ein geringes Gasvolumen. In diesem Zusammenhang muß aber betont werden, daß die Punktation des linken Herzens bei dilatierter rechter Kammer nicht einfach ist. Ein ungeübter Obduzent wird möglicherweise bei dem Versuch, den linken Ventrikel anzustechen, versehentlich septumnahe Teile der Ausstrombahn des rechten Ventrikels punktieren. Identische Gaszusammensetzungen der beiden Proben (295/81!) sind dann nicht verwunderlich.

Eine ausschließlich linkskardiale Luftembolie (30 ml) fand sich nach partiell Lungenabriß in dem Fall 81/82. In dem Sektionsfall 68/79 weckt das ungewöhnlich große Gasvolumen von 120 ml, das dem linken Ventrikel entstammen soll, den Verdacht auf ein Artefakt, zumal die Gaszusammensetzung derjenigen atmosphärischer Luft auffallend angenähert ist.

Die Zusammensetzung der bei Luftembolie asservierten Gasproben und der Vergleich mit den bei Fäulnis erhobenen Befunden ist Gegenstand des folgenden Abschnittes.

4. Vergleich der gasanalytischen Befunde bei Luftembolie und bei Fäulnis

4.1 Sauerstoffgehalt. Abbildung 1 zeigt die Verteilung der gemessenen Sauerstoffkonzentrationen bei Fäulnis und bei den Luftemboliefällen. Zur Erzielung vergleichbarer Säulenhöhen wurde in beiden Fallgruppen die Häufigkeit der einzelnen O₂-Meßwerte in Prozent des jeweiligen Teilkollektivs (a: n = 70 \triangleq 100%; b: n = 36 \triangleq 100%) ausgedrückt.

Die Gegenüberstellung der O₂-Konzentrationen in den beiden Fallgruppen macht deutlich:

- Nicht nur bei Fäulnis, sondern auch bei Luftembolie enthält das aspirierte Gas weniger Sauerstoff als atmosphärische Luft.
- In Fäulnisgas liegt der O₂-Gehalt im allgemeinen zwischen 1% und 5%, selten darüber.
- Bei Luftembolie kommen sehr variable O₂-Gehalte vor, häufig findet man Werte zwischen 8% und 15%. Bei niedrigeren Konzentrationen ist an die mögliche Überlagerung durch beginnende Fäulnis, bei höheren Konzentrationen an eine Verfälschung durch atmosphärische Luft zu denken. Werte von 19% oder 20%, die in je einem Fall gemessen wurden, sind jedenfalls ungewöhnlich.

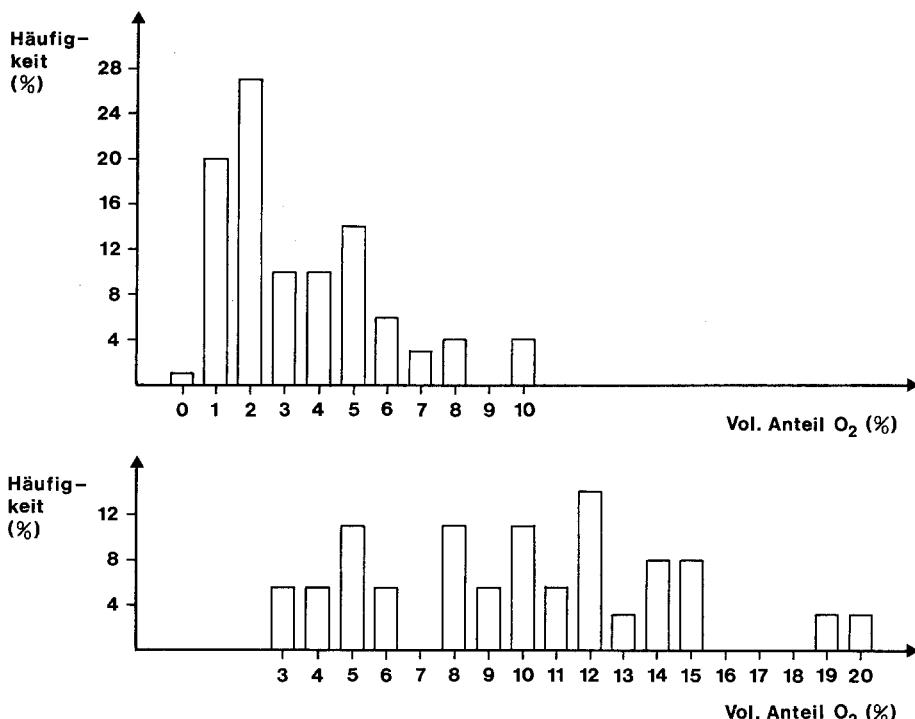


Abb. 1. Häufigkeitsverteilung der Sauerstoffkonzentrationen in Fäulnisgasen (oben) und bei Luftembolie (unten)

- O₂-Konzentrationen von 0%–2% wurden nur bei Fäulnis, Konzentrationen über 10% nur bei Luftembolie beobachtet; Werte zwischen 3 und 10% kamen in beiden Kollektiven vor.

Die drei „Fäulnis“-Fälle mit O₂-Konzentrationen von 10% sind atypisch: In einem Falle lag ein offenes Schädel-Hirn-Trauma vor, das postmortale Intervall betrug 23 Stunden, H₂ lag nur in Spuren und CO₂ in einer Konzentration von 30% vor; sehr wahrscheinlich handelt es sich um den Fall einer von Fäulnis überlagerten Luftembolie. In zwei Fällen betrug das postmortale Intervall zwei Monate, so daß eine diffusionsbedingte Angleichung der Gaszusammensetzung an atmosphärische Luft anzunehmen ist.

4.2 Kohlendioxidgehalt. Abbildung 2 zeigt die Verteilung der CO₂-Konzentrationen in den beiden Teilkollektiven. Die Häufigkeiten der CO₂-Konzentrations-Klassen 1%–5%, 6%–10%, 11%–15% etc. wurden analog zu Abb. 1 prozentual ausgedrückt.

Der Vergleich der CO₂-Konzentrationen in den beiden Teilkollektiven zeigt:

- Sowohl bei Fäulnis als auch bei Luftembolie enthält das aspirierte Gas, im Gegensatz zu atmosphärischer Luft, regelmäßig meßbare Mengen von CO₂.
- Der CO₂-Anteil der Fäulnispulse liegt, von Ausnahmen (s. u.) abgesehen, über 15%.

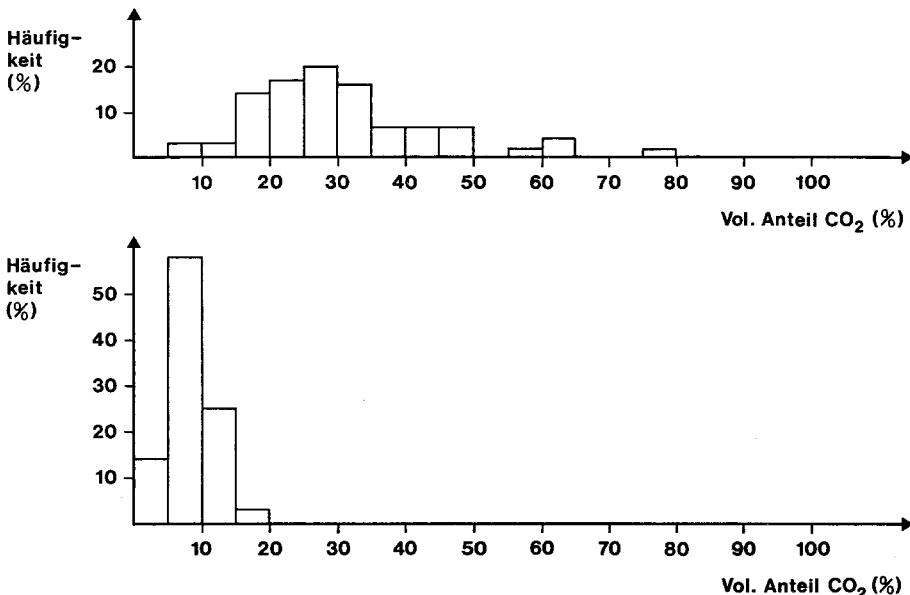


Abb. 2. Häufigkeitsverteilung der Kohlendioxidkonzentrationen in Fäulnsgasen (oben) und bei Luftembolie (unten)

- Bei Luftembolie liegt die CO₂-Konzentration praktisch immer unter 15%, in der Regel findet man Werte zwischen 5% und 15%. Ein Einzelfall (206/85) mit der ungewöhnlich hohen CO₂-Konzentration von 19% wird später gesondert diskutiert werden.
- Insgesamt vier „Fäulnis“-Fälle wiesen atypischerweise CO₂-Konzentrationen zwischen 5% und 15% auf. Zu diesen Fällen ist anzumerken: Einmal lag eine stark dominierende H₂-Produktion (H₂-Anteil 50%) vor, die offenbar auf die Eigenart der mikrobiellen Besiedelung zu beziehen ist; einmal handelte es sich um ein 53 Stunden überlebtes, offenes Schädel-Hirn-Trauma, bei dem H₂ nur in Spuren nachweisbar war, so daß eine Überlagerung von Luftembolie und Fäulnis wahrscheinlich ist; zweimal betrug die Leichenliegezeit zwei Monate, so daß ein Diffusionsausgleich mit atmosphärischer Luft angenommen werden kann.
- Läßt man diese Sonderfälle außer Betracht, wo werden die CO₂-Konzentrationen der beiden Kollektive durch eine bei etwa 15% liegende Grenze scharf voneinander getrennt.

4.3 Stickstoffgehalt. Abbildung 3 zeigt die Verteilung der N₂-Konzentrationen in den beiden Teilkollektiven. Die Darstellungsweise entspricht Abb. 2; es wurden Klassen der N₂-Konzentrationen zu je 10% gebildet.

Vergleicht man nun die N₂-Konzentrationen in den beiden Teilkollektiven, so stellt man fest:

- In den gesicherten Fällen von Luftembolie liegt der N₂-Gehalt des aspirierten Gases ausnahmslos zwischen 70% und 90%; eine deutliche Abweichung gegenüber dem N₂-Gehalt atmosphärischer Luft ist also nicht erkennbar.

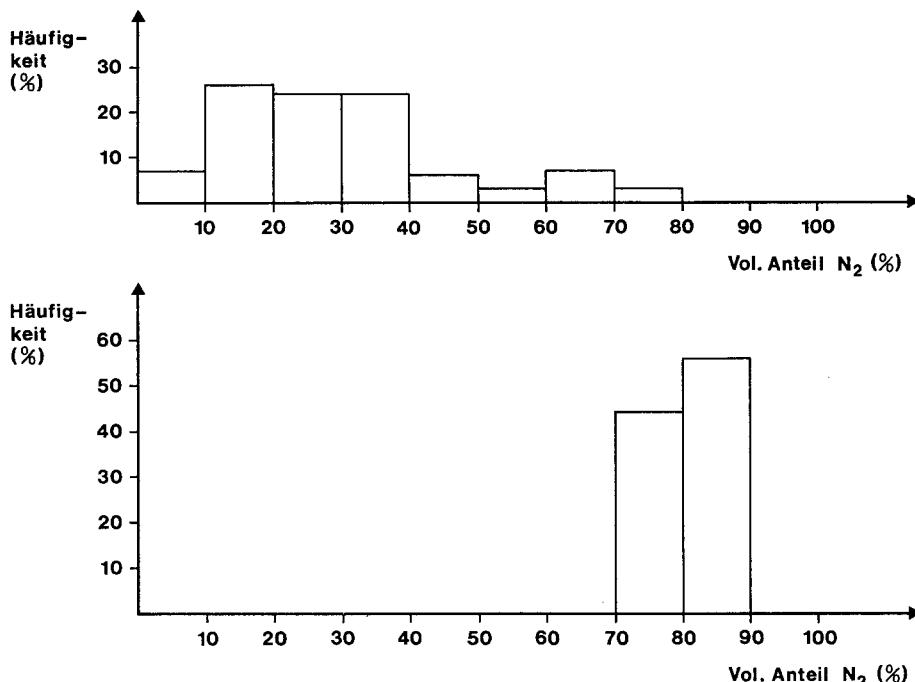


Abb. 3. Häufigkeitsverteilung der Stickstoffkonzentrationen in Fäulnisgasen (oben) und bei Luftembolie (unten)

– Fäulnisgase zeigen variable N₂-Konzentrationen. Die Mehrzahl der Werte liegt in dem Bereich zwischen 10% und 40%; Werte über 70% kommen kaum vor. In unserem Kollektiv gibt es hiervon nur zwei scheinbare Ausnahmen: Einer der Fälle zeigt nach zweimonatiger Liegezeit einen weitgehenden Diffusionsausgleich mit Atmosphärenluft; die andere scheinbare Ausnahme bildet eine Leiche mit offenem Schädel-Hirn-Trauma und dreitägiger Liegezeit, bei der die Gaszusammensetzung (7% O₂, 18% CO₂, 74% N₂, Spur H₂) den Verdacht auf eine Kombination von Luftembolie und beginnender Fäulnis nahelegt.

4.4 Wasserstoffgehalt. Bei Fällen unverfälschter Luftembolie liegt der H₂-Gehalt des aspirierten Gases definitionsgemäß bei 0 bzw. unter der Nachweisgrenze.

In den Fällen mit H₂-Nachweis lagen die Konzentrationen weit gestreut zwischen 0%–10% („Spur“) und 70%; am stärksten war mit einem Viertel der Fälle der Konzentrationsbereich zwischen 40% und 50% vertreten.

4.5 Der Quotient CO₂/N₂. Da CO₂ (überwiegend) bei mikrobieller Zersetzung entsteht, während N₂ und O₂ die Hauptbestandteile atmosphärischer Luft darstellen, werden die Quotienten CO₂/N₂ und CO₂/O₂ zur Diskriminierung zwischen Luftembolie- und Fäulnisgas empfohlen (Pierucci und Gherson 1968; Pierucci 1982). Für unser Fallmaterial ergibt sich folgende Verteilung:

Tabelle 2. Verteilung der Quotienten CO_2/N_2 bei Luftembolie und Fäulnis

	$\leq 0,1$	0,11–0,2	0,21–0,3	> 0,3
Fäulnis		3	4	63
$n = 70$.	4%	6%	90%
Luftembolie	19	16	1	.
$n = 36$	53%	44%	3%	.

Ausschließlich bei Luftembolie nimmt demnach der Quotient CO_2/N_2 einen Wert $\leq 0,1$ an. Bei gut der Hälfte der Luftembolie-Fälle liegt CO_2/N_2 in diesem niedrigen Bereich; bei allen Luftemboliefällen, mit einer Ausnahme, liegt der Quotient unter 0,2. Die Ausnahme ($\text{CO}_2/\text{N}_2 = 0,26$) betrifft den Sektionsfall 206/85 mit der abnorm hohen CO_2 -Konzentration von 19%; dieser Fall wird in der Diskussion gesondert besprochen. Ausschließlich bei Fäulnis beobachtet man CO_2/N_2 -Werte über 0,3. In der Hälfte der Fälle lag der Quotient sogar über 1; der höchste vorkommende Wert war 12. In 67 der 70 Fäulnisfälle war CO_2/N_2 größer als 0,2. Die drei Sonderfälle waren bereits durch ihre aberriedene CO_2 - bzw. N_2 -Konzentration aufgefallen: Es handelt sich um einen Fall ganz dominierender H_2 -Produktion, um einen Fall mit zweimonatiger Liegezeit (Diffusionsausgleich!) und um eine mutmaßliche Kombination von Luftembolie und Fäulnis.

Sieht man von diesen wenigen Ausnahmen ab, so markiert der CO_2/N_2 -Wert von 0,2 eine scharfe Grenze zwischen den Teilkollektiven Luftembolie und Fäulnis.

4.6 Der Quotient CO_2/O_2 . Bei keinem der Fäulnis-Fälle, aber bei der Hälfte der Luftembolie-Fälle ist der Quotient $\text{CO}_2/\text{O}_2 \leq 1,0$. Andererseits kommen bei Luftembolie gar nicht selten deutlich über 1,0 ja sogar über 3,0 liegende CO_2/O_2 -Werte vor. Bei Fäulnis liegt CO_2/O_2 im allgemeinen, aber keineswegs konstant über 3,0.

Insgesamt trennt der Quotient CO_2/O_2 demnach die beiden Teilkollektive weniger scharf als der Quotient CO_2/N_2 . Dies resultiert vor allem aus den in einem Teil der Luftembolie-Fälle vorkommenden hohen CO_2 - und niedrigen O_2 -Konzentrationen, die wir im Gegensatz zu anderen Autoren nicht zwingend auf beginnende Fäulnis beziehen (s. u.).

Tabelle 3. Verteilung der Quotienten CO_2/O_2 bei Luftembolie und Fäulnis

	$\leq 1,0$	1,1–2,0	2,1–3,0	> 3,0
Fäulnis		4	4	62
$n = 70$.	6%	6%	89%
Luftembolie	18	11	5	2
$n = 36$	50%	31%	14%	6%

Diskussion

Wie ist die Zusammensetzung des Gases bei Luftembolie zu deuten?

Im Jahre 1866 setzte sich Opitz mit einer zwei Jahre zurückliegenden Beobachtung Hervieux' auseinander, der in einem Falle von Luftembolie ohne Zeichen der Fäulnis folgende Zusammensetzung des bei der Autopsie gewonnenen Gases gefunden hatte: 7% O₂, 11% CO₂, 82% N₂. Verschiedene in neuerer Zeit durchgeführte Untersuchungen (Roer 1951; Pierucci und Gherson 1968; Mallauch und Schmidt 1980) bestätigten dieses erste Analysenergebnis insofern, als die bei Luftembolie aspirierten Proben im Vergleich zu atmosphärischer Luft stets a) erniedrigte O₂-Konzentrationen, b) beträchtliche CO₂-Konzentrationen und c) praktisch unveränderte N₂-Konzentrationen aufweisen. Ohne Präjudiz kann also festgestellt werden, daß die in das Gefäßsystem eingedrungene Luft „während des Lebens und nach dem Tode ihre Zusammensetzung geändert“ hat (Opitz 1866).

Experimentelle Untersuchungen mit intrakardialer Luftinsufflation an der Leiche (Roer 1951; Pierucci und Gherson 1968; Schneider et al. 1982) haben gezeigt, daß die postmortal applizierte Luft gleichartige Veränderungen wie bei Luftembolie durchmacht, daß die Veränderungen sich auch bei sehr kurzem postmortalen Intervall manifestieren, und daß die Veränderung der Gaszusammensetzung schon wenige Minuten nach der Luftinsufflation vollzogen ist.

Als Erklärung (Literaturübersicht bei Pierucci 1982) für dieses Phänomen werden häufig supravitale metabolische Prozesse mit O₂-Verbrauch und CO₂-Produktion diskutiert. Dieser Deutungsversuch kann indes nicht erklären, weshalb dasselbe Phänomen beobachtet wird, wenn viele Stunden post mortem – also nach dem Sistieren metabolischer Aktivitäten – Luft ins Leichenherz eingebracht wird. Schneider et al. (1982) schließen aus ihren Beobachtungen, es liege in diesen Fällen offenbar bereits ein „Gemisch aus Luft und Fäulnisgas“ vor.

Unserer Auffassung nach sind zur Erklärung der gasanalytischen Befunde weder metabolische Einflüsse noch Beimengungen von Fäulnisgas zu postulieren. Die für Luftembolien typische Gaszusammensetzung resultiert vielmehr aus der Durchmischung von Luft und venösem Blut im rechten Herzen (klinisch: „Mühlengeräusch“): Bei dieser Durchmischung erfolgt ein Gasaustausch zwischen Blut und Gasphase, der – analog den Vorgängen an der Blut-Gas-Membran der Lungenalveolen – zu einem CO₂-Anstieg und zu einem O₂-Abfall in der Gasphase führen muß. In einem vereinfachten Modell kann man Venenblut eines gesunden Probanden mit einem vergleichbaren Volumen atmosphärischer Luft schütteln. Dabei werden in der Gasphase in kürzester Zeit CO₂-Konzentrationen von etwa 5% erzeugt, während die O₂-Konzentration unter optisch zu verfolgender Oxihamoglobinbildung abnimmt. In vivo findet eine Nachlieferung venösen Blutes statt, so lange der Kreislauf noch tätig ist; es ist also eine vollständige Angleichung der Partialdrucke in der Gasphase an die Werte des venösen Blutes zu erwarten. Physiologischerweise herrscht im venösen Mischblut des rechten Herzens ein O₂-Partialdruck von 43 ± 3 mm Hg und ein CO₂-Partialdruck von 44 ± 4 mm Hg (Bühlmann 1982); nach idealer Druckangleichung wären demnach in der Gasphase CO₂- und O₂-Volumenanteile im

Bereich von 5,3 bis 6,3% zu postulieren. Nun gehen aber viele Formen der Agonie – so auch ein isoliertes Schädel-Hirn-Trauma mit Sistieren der Atmung bei zunächst erhaltener Kreislauftätigkeit – mit exzessiver Hyperkapnie und Hypoxie einher, woraus starke zusätzliche Erhöhungen der CO₂-Konzentration und Erniedrigungen der O₂-Konzentration in der Gasphase zwangsläufig resultieren werden.

In unserem Fallmaterial waren die O₂-Konzentrationen recht variabel, die CO₂-Konzentrationen lagen mit Ausnahme eines Falles unter 15%. Die Ausnahme (206/85) betrifft ein neunjähriges Mädchen, das unter ein umstürzendes Eisentor geraten war und einerseits eine Schädelbasisfraktur (Luftembolie!), andererseits eine massive Thoraxkompression mit Stauungsblutaustritten erlitt. Die extrem hohe CO₂-Konzentration von 19% ist möglicherweise Ausdruck der als Todesursache konkurrierenden Erstickung, wenngleich bei 39stündiger Liegezeit eine beginnende Fäulnis nicht definitiv auszuschließen ist.

Gasanalytische Kriterien zur Unterscheidung zwischen Luftembolie und Fäulnis

Das aus dem (rechten) Herzen gewonnene Gasvolumen liefert kein brauchbares Kriterium zur Differenzierung zwischen Luftembolie und Fäulnis, da in beiden Fallgruppen sehr variable Volumina gefunden werden. Sehr große Gasvolumina über 100 ml sprechen allerdings sehr für Fäulnis, während bei Luftembolie meist wesentlich geringere Mengen aspiriert werden. Ein unterer Grenzwert für die Diagnose einer tödlichen Luftembolie kann unseres Erachtens nicht postuliert werden. Todesursächlich ist bei der Luftembolie nämlich nicht die Luftfüllung des rechten Herzventrikels sondern – analog der pulmonalen Fettembolie – eine Verlegung der Lungenstrombahn (Frey 1929; Berg 1951), die, etwa nach Reanimationsversuchen, auch gegeben sein kann, wenn alle Luft aus dem rechten Herzen ausgetreten ist.

Der Nachweis der Fäulniggase H₂ oder, selten, CH₄ schließt die Diagnose einer „reinen“ Luftembolie aus. Unter den übrigen Analysenwerten kommt, wie im Ergebnisteil dargelegt, dem CO₂- und dem N₂-Gehalt des aspirierten Gases entscheidende differentialdiagnostische Bedeutung zu: N₂-Werte unter 70% sind mit einer unverfälschten Luftembolie unvereinbar; CO₂-Werte über 15% werden bei Luftembolie nicht oder nur in seltenen Ausnahmefällen erreicht. Bezuglich der O₂-Konzentration besteht zwischen beiden Fallgruppen eine breite Überlappung; die differentialdiagnostische Wertigkeit dieses Kriteriums ist also gering einzuschätzen.

Wegen des jeweils gegensinnigen Verhaltens von CO₂ und N₂ bei Fäulnis und bei Luftembolie ist der Quotient CO₂/N₂ in beiden Fallgruppen klar different. Die Grenze zwischen den Teilkollektiven verläuft nach unseren Ergebnissen bei einem Quotienten CO₂/N₂ von 0,2. Geht man von dem Grenzwert 0,1 aus (Pierucci und Gherson 1968), so wird zwar sicher keine Luftembolie „falsch positiv“ diagnostiziert, andererseits aber fast die Hälfte der Luftembolie-Fälle zu unrecht eliminiert.

Entsprechend der geringen Aussagekraft der O₂-Konzentration liefert auch der Quotient CO₂/O₂ (Pierucci und Gherson 1968) schlechtere Ergebnisse als der Quotient CO₂/N₂.

Einige praktische Gesichtspunkte

Hauptziel der Gasanalytik ist die Sicherung der Diagnose Luftembolie durch den *Ausschluß von Fäulnisveränderungen*. In praktisch allen Fällen, in denen Fäulniszeichen bei der Sektion beobachtet wurden, ergab auch die Gasanalytik eindeutige Hinweise auf Fäulnis. Andererseits wurde in mehreren Fällen, in denen sinnlich wahrnehmbare Fäulniszeichen fehlten, selbst nach kurzen Liegezeiten Fäulnis nachgewiesen. Hieraus folgt a), daß bei erkennbar fäulnisveränderten Leichen mit gasanalytischen Befunden im Sinne einer unverfälschten Luftembolie nicht zu rechnen ist, und b), daß auf die gasanalytische Absicherung der Diagnose Luftembolie nicht verzichtet werden darf, wenn die Leichenliegezeit mehr als nur wenige Stunden beträgt. Ausnahmsweise können noch vier Tage post mortem gasanalytische Befunde im Sinne einer reinen Luftembolie erhoben werden.

Wichtigstes gasanalytisches Kriterium für Fäulnis ist der Nachweis von Wasserstoff. Das in dieser Studie eingesetzte Analyseverfahren besitzt eine geringe Sensitivität für H₂, so daß Konzentrationen unter 10% nur noch als „Spur“ zu erfassen waren. Für die Zukunft erscheint zur sicheren Erkennung beginnender Fäulnis die Entwicklung eines empfindlicheren H₂-Detektionssystems erstrebenswert. Damit ließe sich vielleicht auch zeigen, daß in den seltenen Fällen mit scheinbar selektiver CO₂-Produktion auch H₂ in geringer Konzentration vorhanden ist.

In einigen unserer Fälle war die *Überlagerung* einer Luftembolie mit Fäulnis wahrscheinlich. Diese Annahme ist plausibel, wenn bei gegebener Lufteintrittspforte Gaskonzentrationen im Grenzbereich zwischen „typischen“ Luftemboliebefunden und „typischer“ Fäulnis gefunden werden. Wegen der variablen Zusammensetzung der Fäulniggase wird sich aber in solchen Fällen eine vorbestehende Luftembolie nur ausnahmsweise – etwa bei typischem Luftemboliegas mit diskreter Beimengung von H₂ nach kurzer Liegezeit – mit der forensisch erforderlichen Sicherheit belegen lassen.

Durch Undichtigkeiten im Aspirometer-System kann Luft angesaugt werden, wodurch eine Luftembolie vorgetäuscht wird. Da sich Luftembolie-Gas in seiner Zusammensetzung eindeutig von atmosphärischer Luft unterscheidet, werden solche Fehler gasanalytisch erkannt. Die Gasanalyse hat also neben der Feststellung von Fäulnisveränderungen die Entlarvung von *Artefakten* zum Ziel. Auffallend hohe Sauerstoffwerte, wie sie in zwei unserer 36 Luftembolie-Fälle vorkamen, lassen eine Verfälschung durch Beimischung atmosphärischer Luft vermuten.

Literatur

- Berg S (1951) Der Todesmechanismus bei den Embolien des kleinen Kreislaufs und seine Bedeutung für die forensische Begutachtung. Dtsch Z Gerichtl Med 40: 669–679
Bühlmann AA (1982) Lunge und Atmung. In: Siegenthaler W (Hrsg) Klinische Pathophysiologie, 5. Auflage. Thieme, Stuttgart New York
Dyrenfurth F (1924) Zur Technik der Feststellung des Todes an Luftembolie. Dtsch Z Gerichtl Med 3: 145–146
Frey S (1929) Die Luftembolie. Ergeb Chir Orthop 22: 95–161

- Hervieux: zitiert bei Opitz 1866
- Keil W, Bretschneider K, Patzelt D, Behning I, Lignitz E, Matz J (1980) Luftembolie oder Fäulnisgas? Zur Diagnostik der cardialen Luftembolie an der Leiche. *Beitr Gerichtl Med* 38:395–408
- Mallach HJ, Schmidt WK (1980) Über ein quantitatives und qualitatives Verfahren zum Nachweis der Luft- oder Gasembolie. *Beitr Gerichtl Med* 38:409–419
- Opitz (1866) Über das Vorkommen von Luft in den Venen; nach Greene (Am J N S XCIII, p 38, Jan 1864) und Bouchaud (Gaz Hop 114. 1865). *Med Jahrb* 130:100–105
- Pierucci G (1982) La diagnosi medicolegale di embolia gassosa. *Arch Med Leg Assoc [Suppl]* 4:1–29
- Pierucci G, Gherson G (1968) Studio sperimentale sull' embolia gassosa con particolare riguardo alla differenziazione fra gas embolico e gas putrefattivo. *Zacchia* 43:1–27
- Richter M (1905) Gerichtsarztliche Diagnostik und Technik. Hirzel, Leipzig
- Roer H (1951) Ergebnisse der quantitativen und gasanalytischen Bestimmung embolisch eingeschwemmter Luft im Herzen. *Virchows Arch* 320:80–85
- Schmidt WK (1979) Die Luftembolie bei gerichtlichen Obduktionen. Statistische Betrachtungen. Qualitativer und quantitativer Nachweis. Inaugural-Dissertation, Tübingen
- Schneider V, Klug E, Phillip W (1982) Experimentelle Untersuchungen zum Nachweis der Luftembolie. XII. Kongreß der Internationalen Akademie für Gerichtliche und Soziale Medizin, Proceedings, Vol II, pp 983–987

Eingegangen am 21. August 1987