

Aus dem Institut für Rechtsmedizin  
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Computertomographischer Nachweis von Gasbildung in  
menschlichen Leichen in Abhängigkeit vom postmortalen Intervall

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Lisa Schmidt

aus Mönchengladbach

Datum der Promotion: 07.12.2018

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis .....	VI
Diagrammverzeichnis .....	VII
Tabellenverzeichnis.....	IX
<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>1</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>3</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 Postmortale Computertomographie .....</b>	<b>4</b>
1.1.1 Technik und Funktionsweise.....	4
1.1.2 Einsatz in der Rechtsmedizin .....	5
1.1.3 Nachweis von Gas .....	6
<b>1.2 Postmortales Intervall.....</b>	<b>7</b>
1.2.1 Körperkerntemperatur .....	7
1.2.2 Totenflecke .....	8
1.2.3 Totenstarre.....	8
1.2.4 Supravitale Phänomene .....	9
1.2.5 Fäulnis und Verwesung .....	10
<b>1.3 Ursachen peri- und postmortaler Gasbildung.....</b>	<b>10</b>
1.3.1 Gasbildung durch Fäulnis und Verwesung .....	11
1.3.2 Gaseintritt durch medizinische Eingriffe .....	11
1.3.3 Gaseintritt durch offenes Trauma.....	12
1.3.4 Gaseintritt / -verlagerung durch geschlossenes Trauma.....	13
<b>1.4 Differenzierung zwischen Luft und Fäulnisgas .....</b>	<b>13</b>
<b>1.5 Stand der Wissenschaft.....</b>	<b>14</b>
<b>1.6 Fragestellung.....</b>	<b>14</b>
<b>2 Methodik .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Prospektive Erfassung der postmortalen Gasbildung .....</b>	<b>16</b>
2.1.1 Auswahl und Herkunft der Schweine.....	16
2.1.2 Versuchsdurchführung .....	16
2.1.3 Auswertung und Analyse der pmCT .....	17
<b>2.2 Retrospektive Fallauswertung.....</b>	<b>17</b>
2.2.1 Auswahl der Stichprobe .....	17

2.2.2	Auswertung der Akten.....	18
2.2.3	Einteilung in PMI-Gruppen.....	19
2.2.4	Messung der Gasbildung im pmCT.....	20
2.2.5	Statistik.....	24
2.2.5.1	Allgemeine Auswertung.....	24
2.2.5.2	Abhängigkeit vom postmortalen Intervall.....	24
2.2.5.3	Einfluss von Gefäßzugängen und äußeren Verletzungen.....	25
2.2.5.4	Andere Einflussfaktoren.....	25
<b>3</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Intervallmessung der postmortalen Gasbildung an Schweinen.....</b>	<b>26</b>
3.1.1	Allgemeine Messdaten .....	26
3.1.2	Gasfreie Phase .....	27
3.1.3	Beginn und Verlauf der Fäulnisgasbildung.....	27
I.	Gas im Herz-Kreislauf-System .....	28
II.	Gas in den Körperhöhlen und im Spinalkanal.....	29
3.1.4	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	32
<b>3.2</b>	<b>Retrospektive Fallauswertung von rechtsmedizinischen Fällen .....</b>	<b>33</b>
3.2.1	Allgemeine Auswertung.....	33
3.2.1.1	Merkmale der Stichprobe .....	33
3.2.1.2	Verteilung äußerer Verletzungen.....	34
3.2.1.3	Verteilung medizinischer Gefäßzugänge und Drainagen.....	35
3.2.1.4	Verteilung der Todesursachen .....	37
3.2.1.5	Verteilung der Score-Werte.....	38
3.2.1.6	Prüfung auf Normalverteilung.....	39
3.2.1.7	Fehlende Werte.....	41
3.2.2	Abhängigkeit vom postmortalen Intervall.....	41
3.2.2.1	Prozentualer Anteil Gas-positiver Fälle.....	41
3.2.2.2	Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests .....	44
3.2.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	49
3.2.3	Einfluss von Gefäßzugängen und äußeren Verletzungen.....	50
3.2.3.1	Gefäßzugänge .....	50
3.2.3.2	Drainagen.....	52
3.2.3.3	Äußere offene Verletzungen.....	53
3.2.4	Andere Einflussfaktoren.....	56
3.2.4.1	Todesursache .....	56
3.2.4.2	Liegezeit von der Todesfeststellung bis zum pmCT .....	61
3.2.5	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	66
<b>4</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>70</b>

<b>4.1 Interpretation der Ergebnisse .....</b>	<b>70</b>
4.1.1 Gasbildung in Abhängigkeit vom PMI .....	70
4.1.2 Einfluss äußerer Faktoren für das Auftreten postmortalen Gases .....	71
<b>4.2 Vergleich mit anderen Studien.....</b>	<b>72</b>
<b>4.3 Limitationen der Arbeit.....</b>	<b>75</b>
<b>4.4 Fazit .....</b>	<b>81</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>83</b>
<b>Eidesstattliche Versicherung.....</b>	<b>88</b>
<b>Lebenslauf.....</b>	<b>89</b>
<b>Danksagung.....</b>	<b>91</b>

# Abkürzungsverzeichnis

BMI	<i>Body-Mass-Index</i> , engl. Körpermasseindex
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CT	Computertomographie
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
HU	<i>Hounsfield-Unit(s)</i> , engl. „Hounsfield-Einheit(en)“
M	Mittelwert
Min.	Minuten
MOV	Multiorganversagen
MRT	Magnetresonanztomographie
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
p.m.	<i>post mortem</i> , lat. „nach dem Tod“
pmCT	postmortales Computertomogramm
PMI	<i>post-mortem intervall</i> , engl. „postmortales Intervall“
SD	Standardabweichung
SHT	Schädel-Hirn-Trauma
Std.	Stunden
t hh:mm	Zeitformat: Tage (t), Stunden (hh), Minuten (mm)

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Schematischer Aufbau und Funktionsweise eines Computertomographen.....	14
<b>Abbildung 2:</b> pmCT-Darstellung von Thorax und Abdomen in der Koronarebene.....	32
<b>Abbildung 3:</b> pmCT-Darstellung der Oberschenkel in der Koronarebene .....	32
<b>Abbildung 4:</b> pmCT-Darstellung von Thorax und Abdomen in der Sagittalebene .....	32
<b>Abbildung 5:</b> pmCT-Darstellung des Thorax in der Sagittalebene .....	32
<b>Abbildung 6:</b> Fäulnisstadien von Schwein 1 in der Transversalebene, Leberhöhe .....	39
<b>Abbildung 7:</b> Fäulnisstadien von Schwein 1 in der Transversalebene, Herzhöhe.....	39
<b>Abbildung 8:</b> Fäulnisstadien von Schwein 2 in der Transversalebene, Leberhöhe .....	40
<b>Abbildung 9:</b> Fäulnisstadien von Schwein 2 in der Transversalebene, Herzhöhe.....	40

# Diagrammverzeichnis

<b>Diagramm 1:</b> Rektale Körperkerntemperatur [°C] in Abhängigkeit vom PMI [Std.] .....	35
<b>Diagramm 2:</b> Häufigkeit und Verteilung der Score-Werte von Herz und Gefäßen .....	48
<b>Diagramm 3:</b> Häufigkeit und Verteilung der Score-Werte von Muskulatur, Knochenmark, Spinalkanal und Körperhöhlen.....	48
<b>Diagramm 4:</b> Prozentualer Anteil Gas-positiver Fälle (Score-Wert > 0) an der Gesamtzahl der Fälle mit gleichem PMI für die Messregionen Herz und Gefäße. ....	51
<b>Diagramm 5:</b> Prozentualer Anteil Gas-positiver Fälle (Score-Wert > 0) an der Gesamtzahl der Fälle mit gleichem PMI für die Messregionen Muskulatur und Knochenmark.....	53
<b>Diagramm 6:</b> Prozentualer Anteil Gas-positiver Fälle (Score-Wert > 0) an der Gesamtzahl der Fälle mit gleichem PMI für die Messregionen Spinalkanal und Körperhöhlen.....	53
<b>Diagramm 7:</b> Mittlere Rangwerte von Herz und Gefäßen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit vom PMI.....	55
<b>Diagramm 8:</b> Mittlere Rangwerte von Muskulatur und Knochenmark nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit vom PMI.....	57
<b>Diagramm 9:</b> Mittlere Rangwerte von Spinalkanal und Körperhöhlen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit vom PMI.....	59
<b>Diagramm 10:</b> Mittlere Rangwerte von Herz und Gefäßen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit von der Art des Gefäßzugangs .....	62
<b>Diagramm 11:</b> Mittlere Rangwerte von Spinalkanal und Körperhöhlen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit von der Art der Drainage .....	63
<b>Diagramm 12:</b> Mittlere Rangwerte von Herz und Gefäßen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit von der Verletzungsart .....	67
<b>Diagramm 13:</b> Mittlere Rangwerte von Muskulatur, Knochenmark, Spinalkanal und Körperhöhlen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit von der Verletzungsart.....	67
<b>Diagramm 14:</b> Mittlere Rangwerte von Herz und Gefäßen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit von der Todesursache .....	69
<b>Diagramm 15:</b> Mittlere Rangwerte von Muskulatur, Knochenmark, Spinalkanal und Schädelhöhlen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit von der Todesursache.....	70
<b>Diagramm 16:</b> Mittlere Rangwerte von Herz und Gefäßen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit vom Zeitraum Fund – pmCT .....	73

<b>Diagramm 17:</b> Mittlere Rangwerte von Muskulatur, Knochenmark, Spinalkanal und Körperhöhlen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit von der ungefähren Kühlzeit (Fund bis zum pmCT) .....	73
<b>Diagramm 18:</b> Mittlere Rangwerte von Herz und Gefäßen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit) vom Zeitraum Fund – pmCT.....	75
<b>Diagramm 19:</b> Mittlere Rangwerte von Muskulatur, Knochenmark, Spinalkanal und Körperhöhlen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit vom Zeitraum Fund – pmCT.....	76
<b>Diagramm 20:</b> Prozentualer Anteil Gas-positiver Fälle in der gleichen PMI-Gruppe. Alt: Alle Fälle, siehe Diagramm 4. Neu: Nach Ausschluss von Thoraxdrainagen, äußeren Verletzungen und traumatischen Todesursachen (Polytrauma, Schädel-Hirn-Trauma) sowie bei unklarer Todesursache.....	79



# Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Ausprägung von Totenflecken in Abhängigkeit von der Todeszeit.....	17
<b>Tabelle 2:</b> Ausprägung der Totenstarre in Abhängigkeit von der Liegezeit .....	18
<b>Tabelle 3:</b> Einteilung des PMI in Abhängigkeit von sicheren Todeszeichen.....	28
<b>Tabelle 4:</b> Messebenen der erfassten Gefäße und Körperkompartimente.....	30
<b>Tabelle 5:</b> Zuordnung: Messwert zu Scorewert .....	30
<b>Tabelle 6:</b> Erstmaliges Auftreten von Gas in Abhängigkeit vom postmortalen Intervall .....	37
<b>Tabelle 7:</b> Merkmale der Stichprobe in Abhängigkeit vom PMI.....	44
<b>Tabelle 8:</b> Verteilung äußerer Verletzungen in Abhängigkeit vom PMI .....	45
<b>Tabelle 9:</b> Verteilung medizinischer Gefäßzugänge in Abhängigkeit vom PMI .....	46
<b>Tabelle 10:</b> Verteilung medizinischer Draingen und Katheter in Abhängigkeit vom PMI.....	46
<b>Tabelle 11:</b> Verteilung der Todesursachen in Abhängigkeit vom PMI.....	47
<b>Tabelle 12:</b> Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests für Herz und Gefäße .....	50
<b>Tabelle 13:</b> Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests für Spinalkanal, Körperhöhlen, Muskulatur und Knochenmark.....	50
<b>Tabelle 14:</b> Nicht messbare Werte in Abhängigkeit vom PMI .....	52
<b>Tabelle 15:</b> Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für die Messregionen Herz und Gefäße .....	55
<b>Tabelle 16:</b> Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der PMI-Gruppen nach Bonferroni für Herz und Gefäße .....	56
<b>Tabelle 17:</b> Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für die Messregionen Muskulatur und Knochenmark .....	57
<b>Tabelle 18:</b> Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der PMI-Gruppen nach Bonferroni für Muskulatur und Knochenmark.....	57
<b>Tabelle 19:</b> Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für die Messregionen Muskulatur und Knochenmark .....	59
<b>Tabelle 20:</b> Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der PMI-Gruppen nach Bonferroni für Spinalkanal und Körperhöhlen.....	59
<b>Tabelle 21:</b> Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für medizinische Gefäßzugänge in den Messregionen Herz und Gefäße .....	61
<b>Tabelle 22:</b> Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der Gruppen (Gefäßzugänge) nach Bonferroni für Lebergefäße .....	62

<b>Tabelle 23:</b> Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für Drainagen in den Messregionen Spinalkanal und Körperhöhlen.....	64
<b>Tabelle 24:</b> Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der Gruppen (Drainagen) nach Bonferroni für die Brusthöhle .....	64
<b>Tabelle 25:</b> Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für Verletzungen in den Messregionen Herz und Gefäße.....	65
<b>Tabelle 26:</b> Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für Verletzungen in den Messregionen Spinalkanal, Körperhöhlen, Muskulatur und Knochenmark.....	65
<b>Tabelle 27:</b> Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der Gruppen (Verletzungen) nach Bonferroni von Herz, Gefäßen und Knochenmark.....	66
<b>Tabelle 28:</b> Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der Gruppen (Verletzungen) nach Bonferroni von Spinalkanal, Körperhöhlen und Muskulatur .....	66
<b>Tabelle 29:</b> Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für Todesursachen in den Messregionen Herz und Gefäße .....	69
<b>Tabelle 30:</b> Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der Todesursachen nach Bonferroni für Herz und Hirngefäße .....	69
<b>Tabelle 31:</b> Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für Todesursachen in den Messregionen Spinalkanal, Körperhöhlen, Muskulatur und Knochenmark .....	72
<b>Tabelle 32:</b> Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der Gruppen (Todesursachen) nach Bonferroni für M. pectoralis, Oberarmmuskulatur, Spinalkanal und Körperhöhlen....	72
<b>Tabelle 33:</b> Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für den Zeitraum Fundzeit - pmCT in den Messregionen Herz und Gefäße .....	74
<b>Tabelle 34:</b> Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für den Zeitraum Fund - pmCT in den Messregionen Spinalkanal, Körperhöhlen, Muskulatur und Knochenmark .....	75
<b>Tabelle 35:</b> Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der Gruppen (Zeitraum: Fund - pmCT) nach Bonferroni für die Gefäße des Oberschenkels .....	75
<b>Tabelle 36:</b> Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für den Zeitraum Fund – pmCT in den Messregionen Herz und Gefäße .....	77
<b>Tabelle 37:</b> Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für den Zeitraum Fund - pmCT in den Messregionen Spinalkanal, Körperhöhlen, Muskulatur und Knochenmark .....	77
<b>Tabelle 38:</b> Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der Gruppen (Zeitraum: Fund - pmCT) nach Bonferroni für Knochenmark von Oberarm und Oberschenkel.....	78

# **Zusammenfassung**

## **Einleitung**

Die in der Rechtsmedizin immer häufiger eingesetzte postmortale Computertomographie hat in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen, v.a. bei der forensischen Dokumentation von Verletzungen und möglichen Todesursachen. Ein Problem in diesem Zusammenhang ist die Differenzierung zwischen z.B. traumatisch bedingten systemischen Gasembolien und erst postmortal entstandenem Fäulnisgas, welches bisher nur durch eine Probenentnahme und gaschromatographische Analyse sicher nachgewiesen werden konnte.

## **Methodik**

Die vorliegende Arbeit hatte das Ziel, im postmortalen Computertomogramm (pmCT) die Bildung von Fäulnisgas in Abhängigkeit vom postmortalen Intervall (PMI) zu untersuchen. Es wurde einerseits eine prospektive Studie an zwei Schweinekadavern durchgeführt, bei der postmortal in regelmäßigen Abständen ein pmCT erstellt und das entstehende Fäulnisgas beobachtet wurde. In einer zweiten retrospektiven Analyse von bereits vorliegenden pmCT aus dem Institut für Rechtsmedizin der Charité - Universitätsmedizin Berlin wurde das PMI auf Basis von Informationen aus den Fallakten soweit wie möglich eingegrenzt und anschließend mit der Gasmenge im pmCT verglichen. Die Gasmenge wurde in 19 Messregionen, u.a. im Herz, Gefäßen unterschiedlicher Lokalisation, der Muskulatur, dem Markraum der Knochen und den Körperhöhlen erfasst.

## **Ergebnisse und Schlussfolgerung**

Es konnte gezeigt werden, dass die postmortale Fäulnisgasbildung im pmCT sowohl bei den beiden Schweinen als auch bei menschlichen Leichen nach einem PMI von etwa 24 Stunden auftrat. Medizinische Gefäßzugänge und Drainagen hinterließen keinen signifikanten Effekt auf das Gasvorkommen, nur die Thoraxdrainage zeigte einen signifikanten Einfluss auf freie Gasansammlungen in der Brusthöhle. Von den äußeren offenen Verletzungen führten insbesondere Schuss- und Stichwunden sowie grobe Zertrümmerungen zu einem erhöhten Gasvorkommen im Gefäßsystem sowie in den betroffenen Körperhöhlen. Eine Untersuchung von äußerlich unversehrten Leichen mit einem PMI von weniger als sechs Stunden ergab außerdem, dass traumatisch bedingte Todesursachen wie ein Polytrauma oder Schädel-Hirn-Trauma trotz geschlossener Körperoberfläche ebenfalls zu einem signifikant erhöhten Gasvorkommen führen. Ein Einfluss der Liegezeit vom Leichenfund bis zum Zeitpunkt des

pmCT, also annähernd der Kühlzeit, konnte in dieser Studie nicht ermittelt werden. Trotz Analyse dieser unterschiedlichen Einflussfaktoren blieb nach Ausschluss betroffener Fälle letztlich immer noch ein hoher Anteil Gas-positiver Fälle mit einem kurzen PMI übrig, für welche die Ursache des Gases nicht vollständig geklärt werden konnte. Es ist zu vermuten, dass u.a. die Reanimation kurz vor dem Tod eine wichtige Rolle für die Gasbildung spielt, welche in dieser Studie nicht berücksichtigt werden konnte. Für kommende Studien erscheint eine Untersuchung dieses Einflussfaktors von großer Bedeutung.

# **Abstract**

## **Introduction**

The use of postmortem computed tomography (pmCT) in legal medicine nowadays has become increasingly important in recent years, especially in forensic documentation of injuries and causes of death. A problem at this point is the differentiation between systemic gas embolism and postmortem decomposition gas, which could only be detected by sampling and chemical analysis so far.

## **Methods**

The aim of this study was to detect formations of putrefactive gas in postmortem computed tomography (pmCT) depending on the postmortem interval (PMI). First a prospective study was carried out, in which multislice computed tomography of two pig cadavers was performed in defined intervals after death and the resulting putrefactive gas was observed. In a second retrospective analysis of already existing pmCT from the Institute of Legal Medicine and Forensic Sciences of the Charité - Universitätsmedizin Berlin, the PMI was estimated by evaluating information from case files. The estimated PMI was then compared with the accumulation of gas in pmCT. The amount of gas was measured in 19 fields, e.g. in the heart, vessels, musculature, the bone marrow and the body cavities.

## **Results and conclusion**

It could be shown that putrefactive gas in pmCT occurred in both pigs and in human bodies after a PMI of nearly 24 hours. Medical care like vascular access did not have a significant effect on the occurrence of gas; only thoracic drainage showed a significant influence on free gas in the thoracic cavity. Especially wounds caused by stitches and gunshots as well as severe open injuries led to an increased gas accumulation in the vascular system and in body cavities. The examination of externally uninjured corpses with a PMI of less than six hours also showed that traumatic causes of death such as polytrauma or craniocerebral trauma led to significantly increased gas formation. An influence of the time between finding the cadaver and the pmCT (nearly equivalent to cooling time) could not be determined in this study. In spite of analyzing these different factors, a high amount of gas-positive cases with a short PMI was still left, for which the cause of gas accumulation could not be clarified completely. It can be assumed that i.a. resuscitation plays an important role in gas formation, which could not be considered in this study. For future studies, an investigation of this factor might be of high importance.

# 1 Einleitung

## 1.1 Postmortale Computertomographie

Die Computertomographie (CT), 1969 von Godfrey N. Hounsfield und Allan M. Cormack entwickelt und 1972 erstmals klinisch eingesetzt, ist ein Röntgenverfahren, bei dem computergestützt aneinander gereihete Schnittbilder generiert werden.<sup>1</sup> Im Gegensatz zum konventionellen Röntgen, bei dem eine einzige überlappende Projektion erzeugt wird, werden in der CT Röntgenstrahlen schichtweise aus verschiedenen Richtungen auf den zu scannenden Körper abgegeben und die auf dem dahinter liegenden Strahlendetektor entstehenden Absorptionsprofile übereinander gelegt. Dadurch kann die Strahlendichte einzelner Punkte berechnet und als elektrisches Signal an einen Computer weitergeleitet werden, der diese dann als Bildpunkte in unterschiedlichen Graustufen darstellt. Es entstehen aufeinander folgende Bildebenen, die computertechnisch zu einem dreidimensionalen Körper zusammengesetzt und in allen drei Dimensionen neu berechnet werden können. Gewebe und Organe können dadurch überlagerungsfrei dargestellt werden.<sup>1-3</sup>

### 1.1.1 Technik und Funktionsweise

Ein Computertomograph besteht aus einem zentral gelegenen Scanner, der sogenannten Gantry, einem Patientenlagerungstisch, der elektrisch durch die Gantry fährt, und einem Bedienpult mit Computer zur Datenverarbeitung (Abbildung 1). Vereinfacht besteht die Gantry aus einer rotierenden Röntgenröhre und einem Detektorsystem auf der gegenüberliegenden Seite. Die Röntgenröhre gibt unter Verwendung von Blenden einen fächerförmigen Strahl mit verstellbarer Dicke in Richtung des Untersuchungstisches ab.<sup>2</sup> Der Körper, der sich auf dem Tisch befindet, schwächt diese Strahlung in einer bestimmten Intensität ab. Dieses Profil wird auf der gegenüberliegenden Seite durch den Detektor gemessen, in elektrische Signale umgewandelt und an den Computer weitergeleitet. Durch 360°-Rotation der Röntgenröhre wird gradweise aus jedem Winkel ein solches Intensitätsprofil erstellt und aus deren Gesamtheit eine quadratische Ebene mit einzelnen Bildpunkten, in der Regel 1024 x 1024 Pixel, berechnet.<sup>4</sup> Die Bildpunkte entsprechen wegen der zuvor definierten Schichtdicke von ein bis zehn Millimeter einer Volumeneinheit, dem sogenannten Voxel, und werden durch ihre individuelle relative Strahlendichte definiert. Als Referenz dient die Röntgenabsorption von Wasser mit der sogenannten Hounsfield-Einheit (engl. *Hounsfield-Units*, HU) Null. Sehr strahlendichte Medien

wie Knochen haben Dichtewerte von bis zu 2000 HU, weiche Gewebe zwischen 20 und 100 HU und Luft etwa -1000 HU. Mit zunehmender Schichtdicke wird zwar die Untersuchungszeit verkürzt, jedoch steigt dadurch auch das Volumen eines Voxels und die Genauigkeit der Messung nimmt entsprechend ab.<sup>2,4</sup>

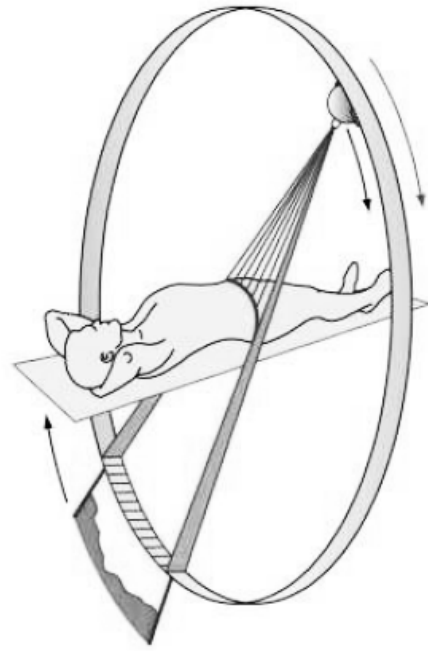
In der konventionellen Computertomographie musste die Röntgenröhre früher aufgrund der Kabelführung immer wieder zurückrotieren und der Tisch in Einzelschritten vorgeschoben werden, um die nächste Ebene zu erzeugen. Dadurch konnte es, z.B. durch Atmung des Patienten, zu Artefakten kommen. Im heutzutage durchgeführten Spiral-CT rotiert die Röntgenröhre dagegen fortlaufend, während sich der Untersuchungstisch kontinuierlich durch die Gantry bewegt.

Dies ermöglicht es Bildebenen übergangsfrei direkt aneinander zu reihen, wodurch auch 3D-Rekonstruktionen erstellt werden können und nicht zuletzt die Untersuchungszeit enorm verkürzt wird.<sup>2</sup>

Jede der rund 3000 HU kann vom Computer theoretisch in einer anderen Graustufe dargestellt werden. Da das menschliche Auge jedoch nur fähig ist, 40 bis 100 Graustufen voneinander zu unterscheiden, ist es notwendig, die Aufnahmen durch sogenannte Fenster zu filtern. Ein Fenster ist ein vorgegebener enger HU-Bereich, der dann vergleichsweise kontrastreich dargestellt wird, während darüber und darunter liegende HU-Werte sehr hell bzw. sehr dunkel erscheinen. Gewebe, die eine relative Strahlendichte in diesem HU-Bereich haben, können dadurch besser differenziert werden.<sup>4,5</sup>

### 1.1.2 Einsatz in der Rechtsmedizin

In der deutschsprachigen Rechtsmedizin wurde der Einsatz der CT erstmals im Jahr 1983 dokumentiert, als SCHUMACHER ET AL. die radiologischen Befunde bei Kopfschussverletzungen mit denen der konventionellen Obduktion verglichen.<sup>6</sup> Obwohl diese die CT damals bereits als geeignete Ergänzung der forensischen Beurteilung beurteilten, dauerte es bis zum Ende der 1990er Jahre an, bis die CT einen höheren Stellenwert in der Rechtsmedizin erlangte. Am Institut für Rechtsmedizin der Universität Bern (Schweiz) wurde die CT um die



**Abbildung 1:** Schematischer Aufbau und Funktionsweise eines Computertomographen.

Aus REISER ET AL. Duale Reihe Radiologie (2006)<sup>5</sup>

Jahrtausendwende im Rahmen des Forschungsprojekts VIRTOPSY eingesetzt, um die virtuellen Untersuchungsbefunde in postmortalen CT und MRT (Magnetresonanztomographie) mit denen der Autopsie zu vergleichen und deren Zuverlässigkeit zu validieren.<sup>7,8,9</sup> Es konnte gezeigt werden, dass die zusätzliche Schnittbildgebung entscheidende Vorteile gegenüber der alleinigen Obduktion und auch dem zuvor angewandten konventionellen Röntgen bietet: Befunde können objektiv und untersucherunabhängig genau dokumentiert werden, ohne Strukturen irreversibel zu zerstören. Selbst kleinere Frakturen oder Organveränderungen, die bei einer Obduktion leicht zu übersehen sind, können diagnostiziert und im Gegensatz zum Röntgen genau lokalisiert werden.<sup>10</sup> Des Weiteren ist es möglich mit 3D-Rekonstruktionen, z.B. von Schusskanälen, Verletzungsbefunde für medizinische Laien wie Juristen und Polizisten leichter nachvollziehbar und für das menschliche Auge neutral, sprich unblutig, darzustellen. Im Falle von Massenkatastrophen bietet die Schnittbildgebung bei Untersuchungszeiten von fünf bis zehn Minuten außerdem die Möglichkeit, in relativ kurzer Zeit viele Datensätze von Opfern zu generieren, die eine schnellere Identifizierung ermöglichen können. Nachteil gegenüber dem klinischen Einsatz ist die nicht vorhandene Blutzirkulation, die eine Nutzung von Kontrastmittel erschwert.<sup>11</sup> Ein weiteres Problem sind metallische medizinischen Implantate und andere Fremdkörper (z.B. Projektile), die zum Teil großflächige Artefakte in der Bildgebung erzeugen. Trotzdem ist es mittlerweile möglich 60 bis 80 % der Todesursachen ohne Obduktion zu detektieren.<sup>7,8,12</sup>

Im Institut für Rechtsmedizin der Charité wird das postmortale Computertomogramm (pmCT) seit 2011 in ausgewählten Fällen als Ergänzung zur Obduktion eingesetzt. Dies betrifft vor allem Opfer von Tötungsdelikten, Verkehrsunfalltote, Kindstodesfälle, nicht identifizierte Verstorbene, Verstorbene in öffentlichem Gewahrsam (Straf- oder Maßregelvollzug, Gefangenensammelstellen der Polizei Berlin), Opfer scharfer oder stumpfer Gewalteinwirkung, Opfer von Schussverletzungen und andere Fälle, in denen nach Angaben der Ermittlungsorgane rekonstruktive Fragestellungen oder ein erhöhter Dokumentationsbedarf bestehen.

### **1.1.3 Nachweis von Gas**

In den letzten Jahren hat das pmCT auch beim Nachweis der Luftembolie, einer potenziell tödlichen Ansammlung von Gas im Gefäßsystem, immer mehr an Bedeutung gewonnen.

Intrakardiales Gas konnte früher nur durch die Probe nach M. Richter nachgewiesen werden, bei der nach Öffnung des Brustkorbs vorsichtig der Herzbeutel eröffnet und mit Wasser gefüllt wurde. Steigen dann bei Punktieren des rechten und linken Ventrikels Blasen an die Oberfläche,



konnte Gas im Gefäßsystem oder im Herzen nachgewiesen werden.<sup>13</sup> Neben dem präparatorischen Aufwand und der fehlenden Reproduzierbarkeit konnte hierbei aber weder die genaue Lokalisation noch die Menge des Gases ermittelt werden. Auch eine Differenzierung von postmortal entstandenem Fäulnisgas war hiermit nicht möglich. Aufwendige Techniken zum Auffangen und Untersuchen der Gase wurden entwickelt, fanden jedoch in die tägliche Routine keinen Eingang. Das pmCT erlaubt es dagegen, durch relativ kurze und unkomplizierte Untersuchung, nicht-invasiv und reproduzierbar sowohl Ort als auch Ausdehnung von Gas im Gefäßsystem zu erkennen. Mithilfe von Volume Rendering ist es außerdem möglich, 3D-Rekonstruktionen einer Gasembolie darzustellen und so für medizinische Laien anschaulich zugänglich zu machen.<sup>14</sup> Zudem ist nach der Detektion einer möglichen Luftembolie – vor ersten präparatorischen Schritten – eine bildgestützte Punktion und Entnahme des Gases möglich, welches dann einer chemischen Analyse unterzogen werden kann.

## **1.2 Postmortales Intervall**

Als postmortales Intervall (PMI) wird der Zeitraum nach Eintritt des Todes und weiteren Untersuchungen der Leiche definiert. Ist der genaue Zeitpunkt des Todes nicht bekannt, z.B. weil eine Person allein zuhause verstirbt und erst später aufgefunden wird, so kann das PMI rechtsmedizinisch nur auf Basis von sicheren Todeszeichen wie Totenstarre, Totenflecke und Fäulniszeichen, sog. supravitaler Phänomene sowie der Körperkerntemperatur auf einen Zeitraum von Stunden bis Tagen eingegrenzt werden.

### **1.2.1 Körperkerntemperatur**

Nach Eintritt des Todes gleicht sich die Körpertemperatur des Verstorbenen an die der Umgebung an. Nach einem Temperaturplateau von zwei bis drei Stunden kommt es durch Konduktion und Konvektion zum Wärmeverlust und zum Abfall der Körperkerntemperatur um etwa 0,5 bis 1,5 °C pro Stunde.<sup>15</sup> Die Abkühlungsgeschwindigkeit ist dabei stark abhängig von äußeren Faktoren wie Bekleidung, Körperfett sowie Feuchtigkeit der Umgebung. Eine Berechnungshilfe bietet hier die Nomogramm-Methode nach Henßge<sup>16</sup>, die in der Praxis jedoch selten Anwendung findet. Sofern keine rektale Messung der Körpertemperatur vorliegt, ist es vom subjektiven Eindruck des leichenschauenden Arztes oder Kriminalbeamten abhängig, ob ein Leichnam als eher warm oder kalt eingestuft wird.

## 1.2.2 Totenflecke

Unmittelbar nach Todeseintritt kommt es durch Sistieren der Herz-Kreislauf-Funktion zum Absinken von Blutbestandteilen in die kleinsten Gefäße und Kapillaren der Lederhaut an den abhängigen Körperpartien.<sup>17</sup> In den ersten Stunden lassen sich diese Blutansammlungen noch durch leichten Druck in den Gefäßen verschieben, später kommt es durch Hämolyse zur Diffusion von Blutbestandteilen nach extraluminal und so zum Konfluieren der Blutansammlungen, die nach längerer Liegezeit nur noch schwer und später gar nicht mehr wegdrückbar sind.<sup>16</sup> Anhand von Angaben zur Ausprägung der Totenflecke bei der Leichenschau vor Ort kann unter Berücksichtigung der folgenden Tabelle nach Mallach aus dem Jahr 1964 der Todeszeitpunkt näher eingegrenzt werden (Tabelle 1)<sup>16</sup>.

**Tabelle 1:** Ausprägung von Totenflecken in Abhängigkeit von der Todeszeit

Liegezeit nach Angaben der Literatur von 1905 bis 1963. Nach Mallach (1964). Aus Henßge/Madea, Methoden zur Bestimmung der Todeszeit an Leichen, Lübeck (1988)<sup>16</sup> x = Durchschnittswerte, s = Streuung.

Stadium	Nach Sistieren des Kreislaufs in Std.				Variationsbreite		Anzahl der Literatur-Quellen
	$\bar{x}$	s	Grenzen bei 95,5% Wahrscheinlichkeit (2 s)		Untere Grenze	Obere Grenze	
			Untere Grenze	Obere Grenze			
Beginn	0,75	0,5	-	2	0,25	3	17
Konfluieren	2,5	1	0,75	4,25	1	4	5
Größte Ausdehnung und Intensität	9,5	4,5	0,5	18,25	3	16	7
Wegdrückbar							
1. Vollständig auf Daumendruck	5,5	6	-	17,5	1	20	5
2. Unvollständig auf starken Druck (Messer, Pinzette)	17	10,5	-	37,5	10	36	4
Verlagerbarkeit							
1. Vollständig	3,75	1	2	5,5	2	6	11
2. Unvollständig	11	4,5	2,25	20	4	24	11
3. Höchstens geringe Abblassung	18,5	8	2,5	34,25	10	30	7

## 1.2.3 Totenstarre

Nach Stillstand des Herz-Kreislauf-Systems kommt es durch Sauerstoffmangel zu einem Abfall der ATP-Konzentration in den Muskelzellen, wodurch die Bindungen zwischen Aktinfilamenten

und Myosinköpfchen nicht mehr gelöst werden können und so die Muskulatur versteift. Nach der Nysten'schen Regel tritt die Totenstarre in der Regel zuerst in der Kiefer- und Nackenmuskulatur auf und breitet sich dann nach distal aus. Es ist möglich sie manuell zu brechen, woraufhin sie im frühen postmortalen Intervall fortschreitet. Ist die Starre einmal voll ausgeprägt, ist dies nicht mehr möglich. Erst mit Autolyse der Muskelzellen nach wenigen Tagen erschlafft die Muskulatur wieder. Angaben zur Ausprägung der Totenstarre bei Auffindung des Leichnams sind daher ebenfalls von großer Bedeutung um das postmortale Intervall einzugrenzen. Einen Überblick bietet auch hier die Tabelle nach Mallach aus dem Jahr 1964 (Tabelle 2).<sup>16</sup>

**Tabelle 2:** Ausprägung der Totenstarre in Abhängigkeit von der Liegezeit

Nach Angaben der Literatur von 1811 bis 1960. Nach Mallach (1964). Aus Henßge/Madea, Methoden zur Bestimmung der Todeszeit an Leichen, Lübeck (1988)<sup>16</sup>  $\bar{x}$  = Durchschnittswerte  $s$  = Streuung.

Stadium	Nach Sistieren des Kreislaufs in Std.						Anzahl der Literatur-Quellen
	$\bar{x}$	s	Grenzen bei 95,5% Wahrscheinlichkeit (2s)		Variationsbreite		
			Untere Grenze	Obere Grenze	Untere Grenze	Obere Grenze	
Auftreten	3	2	-	7	< 0,5	7	26
Wiederbildung	bis 5				2	8	
Volle Ausprägung	8 (25)	1 (12)	6	10	2	20	28
Dauer	57	14	29	85	24	96	27
Vollständige Lösung	76 (95)	32	12	140	24	192	27

## 1.2.4 Supravitale Phänomene

Als supravitale Phänomene bezeichnet man frühe postmortale Reaktionen von noch überlebendem Gewebes auf einen von außen gesetzten Reiz. Dazu zählen z.B. die Pupillenreaktion nach subkonjunktivaler Injektion von pupillomotorisch wirksamen Pharmaka oder die Kontraktion eines Muskels durch mechanische Stimulation (Zsako'sches Muskelphänomen, idiomuskulärer Wulst) sowie die elektrische Reizung insb. der mimischen Muskulatur.<sup>15</sup> Das Auslösen dieser Phänomene kann ebenfalls zur genaueren Eingrenzung des postmortalen Intervalls beitragen, spielt für die vorliegende Arbeit aufgrund von fehlendem routinemäßigem Einsatz in der rechtsmedizinischen Arbeit eine untergeordnete Rolle.

### **1.2.5 Fäulnis und Verwesung**

Nach irreversiblen Sistieren des Herz-Kreislauf-Systems kommt es aufgrund von Sauerstoffmangel im Gewebe zuerst zur Umstellung des zellulären Stoffwechsels auf Glykolyse zur Energiegewinnung und später, sobald alle Glukosereserven aufgebraucht sind, zum vollständigen Stoffwechselstillstand. Schutzmechanismen, die zu Lebzeiten eine Autolyse der Zellen verhindert haben, können nicht mehr aufrecht erhalten werden und es kommt zur Freisetzung von hydrolytischen Enzymen. Die besonders hohe Konzentration solcher Verdauungsenzyme im Gastrointestinaltrakt führt dazu, dass abdominelle Organe in der Regel zuerst zersetzt werden. Zudem trägt die endogene bakterielle Flora des Darms dazu bei, dass Fäulnis in diesem Bereich schon früh auftritt. Auch Herz und Gefäße sowie das zentrale Nervensystem werden durch den hohen Sauerstoff- und ATP-Bedarf rasch selbstverdauenden Prozessen zugänglich gemacht. Dagegen werden Skelettmuskulatur und insbesondere Bindegewebe, Knochen und das Integument erst sehr spät zersetzt, da die eingebauten Kollagenfasern aufgrund ihrer komplexen molekularen Struktur schwer zu lysieren sind.<sup>18</sup> Durch die körpereigene Autolyse und die anfangs aerobe Zersetzung durch endogene Bakterien wird durch den Verbrauch von Sauerstoff ein anaerobes Milieu geschaffen, das die Vermehrung von anaeroben Darmbakterien vorantreibt. Durch fäulnisbedingte Zerstörung der Körperoberfläche gelangt mit der Zeit wieder atmosphärischer Sauerstoff ins Körperinnere und der Wassergehalt des Gewebes nimmt durch Verdunstung ab. Die Fäulnisflora wird dadurch von aeroben Mikroorganismen verdrängt und der Leichnam geht in die Verwesung über.<sup>16,18</sup> Sowohl durch Fäulnis als auch durch Verwesung entstehen bei der Zersetzung freie Gase. Äußerlich sichtbar wird dieser Prozess in der Regel nach mindestens vier Tagen durch typische Fäulnisblasen unter der Haut und nach etwa acht bis zwölf Tagen durch Dunsung von Gesicht und Abdomen.<sup>19</sup> Diese und weitere, nicht zersetzungsbedingte Ursachen von Gasbildung werden im folgenden Kapitel beschrieben. Eine Todeszeitschätzung anhand der Fäulnisveränderungen ist nur mit großer Unschärfe möglich.

### **1.3 Ursachen peri- und postmortaler Gasbildung**

Wird Gas im Gefäßsystem nachgewiesen, sei es durch die konventionelle Technik nach Richter oder im pmCT, bleibt die Frage, ob es sich dabei um eine zu Lebzeiten eingetretene Luftembolie handelt und damit als Todesursache in Betracht kommt, oder es durch postmortale Fäulnisprozesse entstanden ist. Die potenziellen Ursachen von intravasalem Gas sind im Folgenden dargestellt.

### 1.3.1 Gasbildung durch Fäulnis und Verwesung

Wie bereits in Kapitel 1.2.5 beschrieben entstehen Fäulnisgase insbesondere in den späten Zersetzungsstadien beim anaeroben Abbau von Eiweiß. Hierbei werden faulig riechende Kohlenwasserstoffe und Ammoniakverbindungen produziert, die als Gasblasen Gefäße und Organe schaumig durchsetzen. Bei der späteren oxidativen Zersetzung durch aerobe Mikroorganismen entstehen vor allem aromatische Kohlenwasserstoffe, Kohlenstoffdioxid, Methan, Ammoniak und die charakteristisch riechenden Schwefelwasserstoffe.<sup>20</sup>

Fäulnis und Verwesung sind dabei stark von mehreren Faktoren abhängig. Der größte Faktor, der die Zersetzung beeinflusst, ist die Umgebungstemperatur. Nach der Reaktionsgeschwindigkeit-Temperatur-Regel, auch *van-'t-Hoff'sche* Regel genannt, verdoppelt bis vervierfacht sich die Reaktionsgeschwindigkeit eines chemischen Prozesses bei Erhöhung der Temperatur um 10°C. Eine hohe Umgebungstemperatur hat demnach auch eine beschleunigte Zellaulyse zur Folge. Ferner beeinflusst die Temperatur auch das Bakterien- und Pilzwachstum. So liegt das Wachstumsoptimum der meisten verwesungsrelevanten Mikroorganismen zwischen 30°C und 40°C, unter 5°C kommt das Wachstum nahezu zum Erliegen.<sup>21</sup> Weitere Faktoren sind die umgebende Feuchtigkeit, Veränderungen des pH-Werts und der atmosphärische Sauerstoffpartialdruck. Insbesondere die umgebende Feuchtigkeit, z.B. bei in Gewässern aufgefundenen Toten, kann sowohl einen beschleunigenden als auch verlangsamenden Effekt auf Fäulnis und Verwesung haben, abhängig z.B. von Strömung, Salzgehalt und pH.<sup>18</sup>

### 1.3.2 Gaseintritt durch medizinische Eingriffe

Eine schwerwiegende Komplikation einiger medizinischer Eingriffe ist die Luftembolie. Dabei kommt es bei Eröffnung oder Punktion eines großen Gefäßes, z.B. bei Einführen eines zentralen Venenkatheters, zum Eindringen atmosphärischer Luft, die in Form von Gasblasen durch das Gefäßsystem fortgeleitet wird und wie ein Thrombus zum Verschluss kleiner Gefäße führen kann. Aus rechtsmedizinischer Sicht kann eine solche iatrogene Luftembolie deshalb auch als Todesursache in Frage kommen. In der Regel wird ein Eindringen von mehr als 70 ml Luft als potenziell letal angesehen.<sup>22</sup>

Einige Studien legen mittlerweile nahe, dass nicht nur Komplikationen bei invasiven Eingriffen zur Luftembolie führen können, sondern auch die manuelle Beatmung und Herzdruckmassage bei einer Reanimation mit intravasalem Gas assoziiert sein können. Dabei spielen wahrscheinlich drei grundlegende Mechanismen eine Rolle:

- I. Zum einen wird bei der Beatmung des reanimationspflichtigen Patienten Luft mit erhöhtem Druck in die Lunge gepresst, was zur Überdehnung der alveolären Membran und ggf. auch zur Ruptur der Alveolen führt. Solche kleinsten Schäden im Lungenparenchym können deshalb zum Übertritt von kleinen Volumina eingeatmeter Luft in die Alveolarkapillaren und damit in die pulmonalen Gefäße bis hin zum Herzen führen.<sup>23</sup>
- II. Es ist außerdem möglich, dass bei einer Maskenbeatmung nicht zwangsläufig nur die Lunge, sondern über den Magen auch der Gastrointestinaltrakt mit Luft gefüllt wird. Die Darmschlingen werden dadurch fortlaufend gedehnt, was ebenfalls zu Mikrorissen in der Darmmukosa führen kann und damit eine potenzielle Eintrittspforte für Luft in portalvenöse Gefäße der Leber darstellt.<sup>24,25</sup> Prädisponierend hierfür scheint auch, dass der Gastrointestinaltrakt bei Zentralisation kurz vor dem Tod minderdurchblutet wird und die Mukosa zusätzlich ischämisch geschädigt ist.<sup>24,26,27</sup> Möglich scheint auch eine erhöhte Permeabilität der Darmmukosa durch chronische inflammatorische Prozesse, Ulzera oder Ähnliches zu sein.<sup>28</sup>
- III. Als dritter Mechanismus wird vermutet, dass durch Kompression des Thorax bei der Reanimation eigentlich im Blut gelöste Gase, wie z.B. O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>, durch kurzfristig erhöhten intravasalen Druck aus dem Blut herausgelöst werden und diese sich im Herzen und in herznahen Gefäßen ansammeln.<sup>22,23,29</sup> Die Bedeutung dieses Mechanismus ist allerdings umstritten, da es sich um physiologisch vorhandenes Gas handelt und die eher geringen Mengen in kurzer Zeit ins Blut rückresorbiert werden können.<sup>30</sup> Eine letale Gasembolie allein dadurch erscheint fraglich.

### **1.3.3 Gaseintritt durch offenes Trauma**

Luft kann ebenso durch ein offenes Trauma in das Gefäßsystem gelangen, z.B. durch Stich- oder Schussverletzungen oder auch offene Knochenbrüche. Eine solche Gasembolie weist auf Vitalität zum Zeitpunkt des Traumas hin und wird ab einem Volumen von etwa 70 ml bereits als kritisch angesehen.<sup>22,31</sup> In einer Studie von JACKOWSKI ET AL. (2007) konnte bereits gezeigt werden, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen Gas in den portalvenösen und intrahepatischen Gefäßen und einer offen-traumatischen Todesursache besteht, ohne dass die Leber dabei direkt geschädigt wurde.<sup>32</sup>

### **1.3.4 Gaseintritt / -verlagerung durch geschlossenes Trauma**

Auch bei geschlossenen Traumata ohne gefäßeröffnende Verletzungen, z.B. durch stumpfe Gewalt oder Stürze, kann Gas im Gefäßsystem nachgewiesen werden.

So schilderten LAI ET AL. (2011) den Fall eines 81-jährigen Patienten in der Notaufnahme, der nach Sturz aus 5 m Höhe ohne offene Verletzungen, Pneumothorax oder Rippenfrakturen Gas in der Pulmonalarterie zeigte, noch bevor eine Reanimation durchgeführt wurde.<sup>33</sup> In einem weiteren Fall wird von einem 19-jährigen Mann berichtet, der nach stumpfem Thoraxtrauma bei einem Verkehrsunfall in der CT eine ausgedehnte Luftembolie in der Pulmonalvene, einer Koronararterie, im linken Ventrikel und im Gehirn zeigte und anschließend verstarb.<sup>34</sup> Ähnlich präsentiert sich der Fall eines 16-jährigen Jungen, der als Fußgänger von einem Auto angefahren wurde und während der Reanimation verstarb. Im pmCT zeigten sich massive Gasansammlungen in beiden Ventrikeln und im Aortenbogen.<sup>35</sup> Eine konkurrierende Todesursache zur Luftembolie konnte in keinem der Fälle festgestellt werden.

Eine Luftembolie bei geschlossenem Trauma verläuft vermutlich ähnlich zu den bereits erwähnten Mechanismen. Zum einen kann es auch bei einem stumpfen Trauma, besonders gegen den Thorax, zum Zerreißen von Pulmonalgefäßen und dadurch zum Eintritt von eingetmeter Luft über die Lunge kommen.<sup>36</sup> Zum Anderen ist es analog zur Reanimation möglich, dass sich bei einem stumpfen Trauma der Druck in den Gefäßen oder im Herzen kurzfristig so ändert, dass eigentlich gebundenes CO<sub>2</sub> oder O<sub>2</sub> als Gas herausgelöst wird. Es sei aber auch hier angemerkt, dass es sich dabei nur um sehr kleine Mengen handeln kann, die eher keine eigenständige Todesursache darstellen.

## **1.4 Differenzierung zwischen Luft und Fäulnisgas**

Auch wenn der Nachweis von intravasalem Gas im pmCT heute problemlos möglich ist, ist es nach wie vor schwierig zwischen einer womöglich tödlichen Luftembolie und postmortal entstandenem Fäulnisgas zu differenzieren. In einer Untersuchung von PEDAL ET AL. (1987) konnte zwar durch gaschromatographische Analysen gezeigt werden, dass die Gase unterschiedliche Zusammensetzungen haben<sup>13</sup>, aber eine solche routinemäßige Untersuchung ist aufgrund sehr hoher Fehleranfälligkeit nicht sensitiv genug und durch den immensen zeitlichen und materiellen Aufwand auch praktisch nicht realisierbar. Eine genaue Kenntnis des zeitlichen Auftretens von Fäulnisgasbildung im pmCT unter Berücksichtigung verschiedener äußerer Faktoren ist deshalb enorm wichtig geworden, um Fäulnisgas ggf. von einer Luftembolie als konkurrierender Todesursache differenzieren zu können.

## 1.5 Stand der Wissenschaft

Es liegen mehrere Forschungsarbeiten vor, die sich bisher mit der Frage beschäftigt haben, ob und wie man im pmCT intravasale Gasansammlungen durch eine Gasembolie von fäulnisbedingtem Gas unterscheiden kann. So konnte eine Studie von FISCHER ET AL. (2012) bereits zeigen, dass sich bei einer Gasembolie die Menge an intrahepatischem Gas in den ersten 29 Stunden nicht signifikant veränderte, obwohl bereits zu Versuchsbeginn vermutlich embolisch bedingte Gasansammlungen zu sehen waren.<sup>37</sup> EGGER ET AL. (2012) stellten bei der Auswertung von Fällen ohne offene Verletzungen fest, dass Fäulnisgas zuerst in zentralen Gefäßabschnitten wie Aorta und V. cava sowie im Herz und den Gefäßen der Leber auftritt und erst später die gastrointestinalen Organe betrifft.<sup>38</sup> Eine aktuelle Studie von OKUMURA ET AL. (2017) konnte zeigen, dass sich die im pmCT bestimmte Menge an intrahepatischem Gas konkordant zum PMI verhält.<sup>39</sup> Eine ausführliche Besprechung der hier genannten Studien findet sich im Kapitel 4.2.

Gemeinsames Merkmal und gleichzeitig Anlass zur Durchführung der vorliegenden Arbeit war zum einen die jeweils geringe Fallzahl, die eine oberflächliche Analyse der Zusammenhänge zwar zuließ, jedoch keine detaillierteren Rückschlüsse erlaubte. Zum anderen gibt es momentan offensichtlich keine Studie, die eine breit gefächerte Untersuchung von mehreren Organsystemen und Lokalisationen durchführte. Alle hier genannten Studien fokussierten sich hauptsächlich auf das Vorkommen von Gas in der Leber, dem zentralen Herz-Kreislauf-System, dem Gehirn und der Schädelhöhle oder den Gastrointestinaltrakt.

## 1.6 Fragestellung

Bisher ist es allein von der Erfahrung des untersuchenden Rechtsmediziners abhängig, ob intravasales Gas als Luftembolie oder postmortale Fäulnis gewertet wird und ob ggfs. zur Differenzierung aufwendige chemische Untersuchungen eingeleitet werden. Dies gestaltet sich vor allem deshalb schwierig, weil Fäulnis von vielen verschiedenen Einflussfaktoren wie Umgebungstemperatur und Liegezeit abhängig ist und von außen erst sehr verzögert sichtbar wird, während womöglich im Körperinneren bereits kleinste Mengen Fäulnisgase entstanden sind. Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, das Auftreten von Gas im pmCT mit der Leichenliegezeit zu vergleichen und zwischen durch Fäulnis entstandenem Gas und zu Lebzeiten ins Gefäßsystem eingetretenem Gas zu differenzieren.



Die durchgeführten Untersuchungen sollen klären, in welchem postmortalen Intervall (PMI) Fäulnisgasbildung erstmalig zu erwarten ist. Es soll außerdem analysiert werden, in welchen Organen oder Geweben Fäulnisgasbildung zuerst beginnt und wie sie dort fortschreitet. Da bei menschlichen Leichen eine solche prospektive Untersuchung mit einem größeren Studienkollektiv ethisch nicht durchführbar wäre, wurde ein geeignetes Tiermodell herangezogen und eine retrospektive Auswertung von vorhandenen pmCT durchgeführt. Als Tiermodell werden in diese Arbeit zwei Versuchsschweine in festgelegten postmortalen Intervallen computertomographisch gescannt und im Verlauf deren innere Gasbildung dokumentiert. Zum anderen sollen Fälle aus dem Institut für Rechtsmedizin der Charité im Hinblick auf Gaseinschlüsse bei unterschiedlichen postmortalen Intervallen analysiert werden. Es soll außerdem geklärt werden, ob Traumata und Verletzungen der Körperoberfläche Einfluss auf das Auftreten von Gas in menschlichen Leichen, besonders bei kurzen Leichenliegezeiten, nehmen. Hierfür werden in der Auswertung der rechtsmedizinischen Fälle Informationen zu Todesursache, medizinischer Versorgung, z.B. durch Gefäßzugänge, Drainagen und Katheter, und offenen Verletzungen wie Stich- oder Schusswunden erfasst.

## **2 Methodik**

### **2.1 Prospektive Erfassung der postmortalen Gasbildung**

#### **2.1.1 Auswahl und Herkunft der Schweine**

Für eine prospektive Analyse der fäulnisbedingten Gasbildung wurden von der Versuchstierhaltung der experimentellen Forschungseinrichtung der Charité – Campus Virchow Klinikum (CVK) zwei erwachsene Schweine als Tiermodell zur Verfügung gestellt. Die beiden Tiere dienten zuvor tierexperimentellen Studien der Anästhesiologie, bei denen unter Narkose spinale Injektionen und Lokalanästhesien durchgeführt wurden. Nach Abschluss der Versuche wurde durch Kaliuminjektion ein Herzstillstand herbeigeführt, der Todeszeitpunkt dokumentiert und die Schweine-Kadaver in je einem Leichenbergesack in das Institut für Rechtsmedizin der Charité transportiert. Außerdem wurde je eine Blutprobe der Schweine asserviert und zur Analyse in das chemisch-toxikologische Labor des Instituts geschickt. Die Analysen ergaben keinen Nachweis von Antibiotika oder Fungiziden. Es konnten lediglich Narkosemedikamente in therapeutischer Konzentration nachgewiesen werden.

#### **2.1.2 Versuchsdurchführung**

Vor Beginn der computertomographischen Messungen wurden die Schweine gewogen und äußere Verletzungen dokumentiert.

Während des Versuchszeitraums befanden sich die Schweine immer im klimatisierten CT-Raum des Instituts in je einem Leichenbergesack. Die Raumtemperatur wurde während der Messungen konstant bei  $19,0^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  gehalten. Vor jedem pmCT wurde jeweils einmal die rektale Körpertemperatur gemessen. Bis auf eine Umlagerung auf den Untersuchungstisch vor jedem pmCT wurden an den Schweinekadavern im Versuchszeitraum keine Manipulationen vorgenommen. Das pmCT erfolgte mit dem institutseigenen Mehrschichtcomputertomographen (Activion 16, Toshiba Medical Systems, Neuss). Die erste Messung wurde ca. eine Stunde post mortem (p.m.) durchgeführt und in den ersten zehn Stunden stündlich wiederholt. Danach wurde das Mess-Intervall tagsüber auf drei Stunden erhöht, bei Nacht lagen zwischen zwei Messungen sechs bis neun Stunden.

Nach 88 Stunden p.m. wurde die letzte Messung durchgeführt und die Untersuchung anschließend beendet. Die Schweine wurden zur fachgerechten Entsorgung an die Versuchstierhaltung der experimentellen Forschungseinrichtung zurückgegeben.

### **2.1.3 Auswertung und Analyse der pmCT**

Die angefertigten pmCT der beiden Schweine wurden in das interne Picture Archiving and Communication System (PACS) (Curapacs, Curasystems, Karlsdorf) übertragen und an einer Vitrea<sup>®</sup> Workstation (Toshiba Medical Systems Europe) ausgewertet.

Zur Erfassung der Gasbildung wurden Lokalisation und Menge (qualitativ) des auftretenden Gases für folgende Organe tabellarisch notiert:

- Gefäße des Gehirns
- Herzhöhlen
- Aorta
- V. cava
- Gefäße der Leber
- Spinalkanal
- Schädel-, Brust- und Bauchhöhle

Von besonderem Interesse war hier der Zeitpunkt des erstmaligen Auftretens von Gas bzw. der Zeitpunkt des letztmaligen definitiv gasfreien pmCT. Eine Quantifizierung der Gasmenge wurde nicht vorgenommen, da ihr aufgrund der von menschlichen Leichen abweichenden Anatomie des Tiermodells keine Aussagekraft zukommt und bei einer Fallzahl von zwei Schweinen auch keine valide statistische Analyse möglich ist.

## **2.2 Retrospektive Fallauswertung**

Für die retrospektive Auswertung von pmCT-Daten von Fällen aus dem Institut für Rechtsmedizin der Charité wurde zuerst eine Auswertung der Fallakten vorgenommen, auf deren Grundlage dann das PMI ermittelt wurde. Im zweiten Schritt wurde dann das dazugehörige pmCT analysiert. Sämtliche pmCT wurden mit dem institutseigenen Mehrschichtcomputertomographen (Activion 16, Toshiba Medical Systems, Neuss) durchgeführt und in einem PACS (Curapacs, Curasystems, Karlsdorf) archiviert.

### **2.2.1 Auswahl der Stichprobe**

In die Untersuchung eingeschlossen wurden alle in den Jahren 2013 bis 2015 im Institut für Rechtsmedizin der Charité obduzierten Fälle, bei denen auch ein pmCT durchgeführt wurde.

Von diesen insgesamt 914 vorhandenen Fällen wurden 129 aufgrund folgender Kriterien ausgeschlossen:

- Körpergröße kleiner als 140 cm (fehlende Vergleichbarkeit der Messwerte, n = 70)
- Akte zum Auswertzeitpunkt unvollständig / fehlend (n = 22)
- pmCT wurde erst während oder nach der Obduktion durchgeführt (n = 15)
- Gasbildung ist im pmCT nicht beurteilbar (z.B. fäulnisbedingte Gewebsverluste, Teilskelettierung, stark verstümmelnden Verletzungen, ausgedehnte Defekte durch Insektenfraß; n = 13)
- Es war kein Ganzkörper-pmCT vorhanden (z.B. nur Kopf-CT; n = 6)
- Zustand nach Organexplantation (n = 3)

Nach Ausschluss verblieben somit 785 Fälle für die Auswertung.

## **2.2.2 Auswertung der Akten**

Aus dem Archiv des Instituts für Rechtsmedizin der Charité wurden die zu den pmCT gehörigen Fallakten herausgesucht und zu jedem Fall folgende Informationen pseudonymisiert dokumentiert:

- Alter (in Jahren)
- Geschlecht
- Größe (in cm)
- Gewicht (in kg)
- Todesursache
- Offene Verletzungen
  - Quetsch-Riss-Wunden: nein (0), ja (1)
  - Schnittverletzungen: nein (0), ja (1)
  - Stichverletzungen: nein (0), ja (1)
  - Schussverletzungen: nein (0), ja (1)
  - Grobe Zertrümmerung (offene Frakturen, Amputationen): nein (0), ja (1)
  - Großflächige Verbrennungen / Brandzehrung: nein (0), ja (1)
- Invasive medizinische Maßnahmen

- Periphere (an Extremitäten, z.B. A. radialis, V. cephalica, V. brachialis) und zentrale (V. jugularis interna, V. subclavia) Gefäßzugänge (arteriell und venös zusammengefasst): keine (0), nur peripher (1), nur zentral (2), peripher und zentral (3)
- Drainagen, Katheter und Messsonden, die die Körperoberfläche verletzen: keine (0), Drainagen der Schädelhöhle (1), Drainagen der Brusthöhle (2), Drainagen der Bauchhöhle (3), Drainagen in mehr als einer Körperhöhle (4)
- Sichere Todeszeichen bei Fund (Totenstarre, Totenflecke, Fäulniszeichen) sowie Beschreibung von „Restwärme“ in der kriminalpolizeilichen Leichenschau
- Zeitpunkt: Zuletzt lebend gesehen, letztes Lebenszeichen (Datum, ggf. Uhrzeit)
- Zeitpunkt: Todesfeststellung (Datum, Uhrzeit)
- Zeitpunkt: Leichenschau bei Fund (Datum, Uhrzeit)
- Zeitpunkt: pmCT
- Zeitpunkt: Sektion (Datum, Uhrzeit)

### **2.2.3 Einteilung in PMI-Gruppen**

In der hier durchgeführten Untersuchung wurde das PMI auf Basis der Informationen aus den Fallakten einer von sechs Gruppen zugeordnet. Als Ausgangspunkt diente der Zeitraum zwischen dem letzten Lebenszeichen der bzw. des Verstorbenen (zuletzt von Anderen lebend gesehen, letztes Telefonat) und der letztlichen Todesfeststellung. Durch Angaben zu Körpertemperatur, Totenstarre, Totenflecken und ggf. Fäulniszeichen bei Auffinden des Leichnams wurde das PMI wie in Tabelle 3 dargestellt eingeteilt. Konnte ein Fall nicht eindeutig einer PMI-Gruppe zugeteilt werden, weil die vorhandenen Daten mit zwei Gruppen vereinbar waren, wurde der Fall der höheren Gruppe zugeordnet.

**Tabelle 3:** Einteilung des PMI in Abhängigkeit von sicheren Todeszeichen

Gr.	PMI	Restwärme	Totenflecke	Totenstarre	Fäulniszeichen
1	< 6 Std.	Noch deutlich vorhanden (je nach Umgebungstemperatur)	Noch nicht bis vollständig vorhanden, auf Daumendruck vollständig wegdrückbar	Beginnend in Nacken/Kiefer, brechbar und wiedereintretend	Keine
2	6 – 12 Std.	Ggf. noch gering vorhanden	Vollständig vorhanden, auf Daumendruck vollständig wegdrückbar	Vollständig ausgeprägt, brechbar und wiedereintretend	Keine
3	12 – 24 Std.	I.d.R. nicht mehr vorhanden	Auf Daumendruck oder ggf. starken Druck (Pinzette) wegdrückbar, möglicherweise unvollständig	Nicht mehr brechbar	Keine
4	24 – 48 Std.	Nicht mehr vorhanden	I.d.R. nicht mehr wegdrückbar	Nicht brechbar, evtl. nur noch wächsern vorhanden oder in Lösung begriffen	Evtl. grünliche Verfärbung der Bauchdecke (insb. im rechten Unterbauch), Erweichung der Augäpfel
5	48 – 96 Std.	Nicht mehr vorhanden	Nicht mehr wegdrückbar, ggf. fäulnisüberlagert	In Lösung begriffen oder bereits vollständig gelöst	Grünliche Verfärbung der gesamten Haut, Austritt von rötlich-tingierter Fäulnisflüssigkeit aus Mund und Nase, durchschlagendes Venennetz
6	> 96 Std.	Nicht mehr vorhanden	Nicht mehr wegdrückbar, ggf. fäulnisüberlagert	Vollständig gelöst	Austritt von Fäulnisflüssigkeit, grünbraune Verfärbung der Oberhaut, Gasblähung von Abdomen und Skrotum, Dunsung des Gesichts, Fäulnisblasen und Oberhautablösung

## 2.2.4 Messung der Gasbildung im pmCT

Die Auswertung der pmCT erfolgte an einer Workstation mit OsiriX (Version 64 Bit, 4.4.1) für Mac OS X 10.9. unter Verwendung des Lungenfensters mit Zentrum bei -500 HU (engl. *window level*, WL) und einer Breite von 1400 HU (engl. *window width*, WW) bei einer Schichtdicke von 10 mm. Das Ausmaß der Gasbildung wurde dabei für folgende Organe erfasst:

- Herz-Kreislauf-System:
  - Herzhöhlen
  - Aorta und Vena cava
  - Gefäße von Leber, Pankreas, Milz, Niere
  - Gefäße der Extremitäten: Oberarm und Oberschenkel
  - Gefäße des Gehirns
- Muskulatur:
  - M. pectoralis
  - M. psoas
  - Muskulatur der Extremitäten: Oberarm und Oberschenkel
- Knochenmark:
  - Oberarm (Humerus)
  - Oberschenkel (Femur)
- Körperhöhlen:
  - Schädelhöhle
  - Brusthöhle
  - Bauchhöhle
- Spinalkanal

Da eine Messung des Gasvolumens im pmCT bei einem Umfang von 785 Fällen zu aufwändig gewesen wäre, wurde die Ausdehnung des Gases durch Messung der maximalen Ausdehnung in einer festgelegten Ebene (Tabelle 4) bestimmt und der Wert einem sechsstufigen Score zugeordnet (Tabelle 5).

**Tabelle 4:** Messebenen der erfassten Gefäße und Körperkompartimente

	<b>Gefäße</b>	<b>Muskulatur</b>	<b>Knochenmark</b>	<b>Körperhöhlen und Spinalkanal</b>
<b>Koronarschnittebene</b>	Leber Nieren Milz Oberarme Oberschenkel	M. psoas Oberarme Oberschenkel	Oberarme (Humerus) Oberschenkel (Femur)	
<b>Sagittalschnittebene</b>	Aorta, V. cava Gehirn	M. pectoralis		Schädelhöhle Brusthöhle Bauchhöhle Herzhöhlen Spinalkanal
<b>Axialschnittebene</b>	Pankreas			

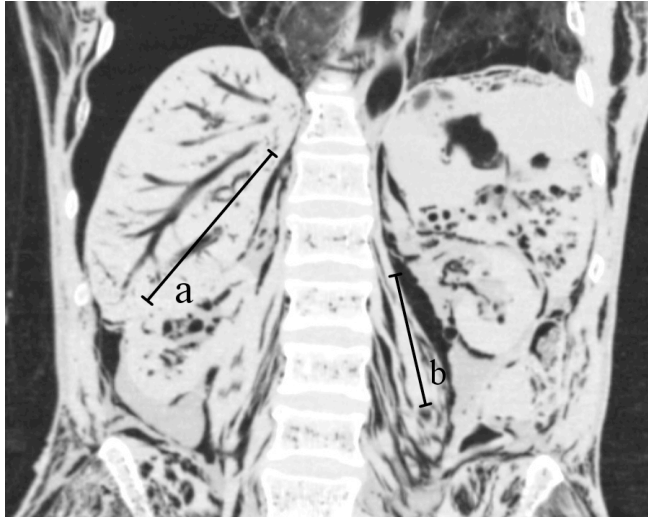
**Tabelle 5:** Zuordnung: Messwert zu Scorewert

Score-Wert	Messwert
0	Kein Gas detektierbar
1	< 1,5 cm
2	1,5 – 3,0 cm
3	3,0 – 6,0 cm
4	6,0 – 12,0 cm
5	> 12,0 cm

Jeder in der jeweiligen Ebene gemessene Wert wurde einem Score-Wert zugeordnet, um den Gasgehalt des jeweiligen Gefäßes oder Organs quantifizieren zu können. Auf die Erfassung des einzelnen Messwerts wurde deshalb verzichtet, weil sich aufgrund von z.B. gebogenen Gefäßverläufen oder zum Teil leicht abweichender Lagerung der Toten auf dem Untersuchungstisch unvermeidlich Messschwankungen ergeben hätten, die den zusätzlichen Arbeitsaufwand nicht gerechtfertigt hätten.

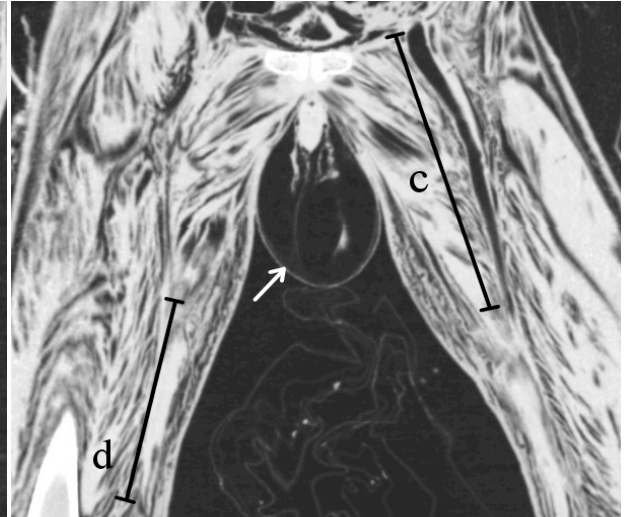
Bei geringen Mengen Gas entspricht die Messung z.B. dem Durchmesser einer einzelnen Gasblase, bei fortgeschrittener Gasbildung und Zusammenschluss mehrerer Gasblasen der maximalen Länge eines vollständig mit Gas gefüllten Gefäßes in der jeweiligen Ebene (Bsp.: Gefäße der Leber, Abbildung 2; Gefäße der unteren Extremität, Abbildung 3, S.23). Die Ebene wurde so ausgewählt, dass ein möglichst großer Querschnitt des jeweiligen Organs zu sehen ist. Besonderheiten gab es bei Gas in der Muskulatur und in den Körperhöhlen: Da sich Fäulnisgas in der Muskulatur entlang der Faserrichtung des jeweiligen Muskels ausbreitet, wurde die Länge solcher gasdurchzogenen Fasern gemessen (Bsp.: M. psoas, Abbildung 2; Untere Extremität, Abbildung 3, S.23). In den Körperhöhlen sowie im Herzen sammelt sich Gas aufgrund der liegenden Position des Leichnams entgegen der Schwerkraft frei an der oben liegenden Körperseite. Hier wurde der maximale Abstand zwischen Restgewebe und Körperoberfläche bzw. Herzmuskelgewebe und Blut in der Sagittalebene gemessen (Bsp.: Brust- und Bauchhöhle, Abbildung 4; Herz, Abbildung 5, S.23).





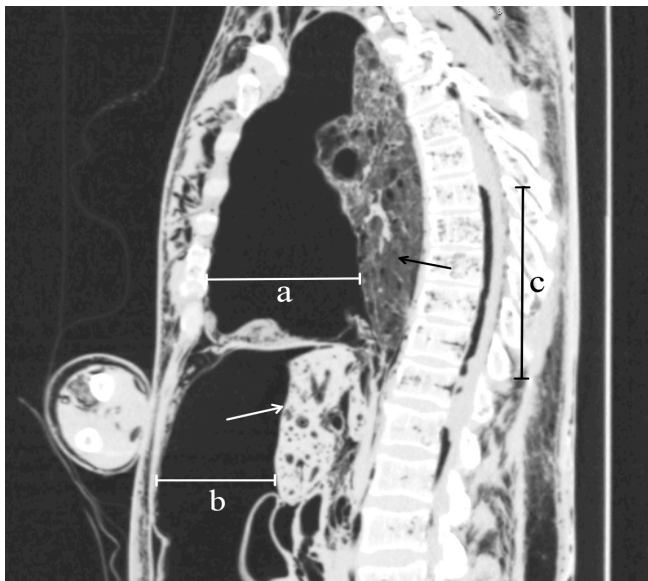
**Abbildung 2:** pmCT-Darstellung von Thorax und Abdomen in der Koronarebene

Beispielmessung von Gas in den Lebergefäßen (a) und dem M. psoas (b). Beide entsprechen einem Wert von 4.



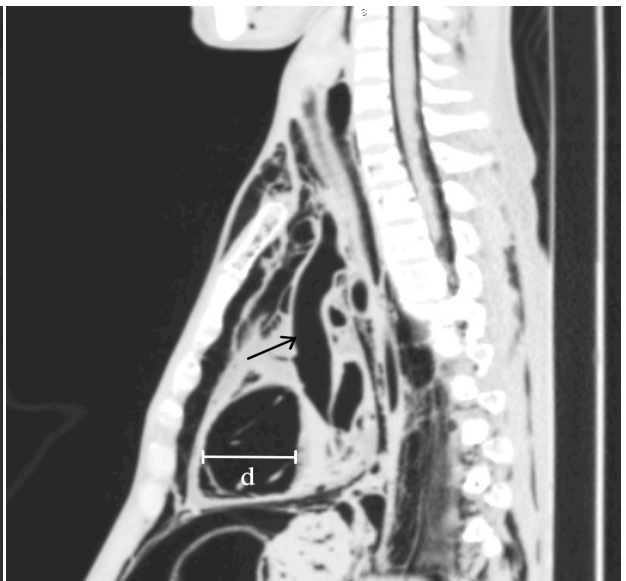
**Abbildung 3:** pmCT-Darstellung der Oberschenkel in der Koronarebene

Beispielmessung von Gas in Gefäßen der unteren Extremität (hier V. femoralis, c) und der Muskulatur der unteren Extremität (d). Beide entsprechen einem Wert von 5. Pfeil: Gasgeblähtes Skrotum.



**Abbildung 4:** pmCT-Darstellung von Thorax und Abdomen in der Sagittalebene

Beispielmessung von Gas in der Brusthöhle (a), Bauchhöhle (b) und im Spinalkanal (c). Entsprechen einem Scorewert von 3 (Bauchhöhle) und 4 (Brusthöhle und Spinalkanal). Restliches Parenchym von Lunge (schwarzer Pfeil) und Leber (weißer Pfeil).



**Abbildung 5:** pmCT-Darstellung des Thorax in der Sagittalebene

Beispielmessung von Gas im Herzen (rechter Ventrikel). Entspricht einem Wert von 3. Pfeil: Gasgefüllte Aorta ascendens.

In wenigen Fällen konnten einzelne Werte nicht gemessen werden, z.B. weil Gefäße eines Organs nicht mehr als solche vom restlichen, bereits fäulnisveränderten Parenchym abgrenzbar waren. Diese Werte wurden als fehlend markiert und flossen somit nicht in die statistische

Berechnung ein. Bei paarigen Organen wie z.B. den Nieren wurde beidseitig gemessen und dann der größere Wert notiert, sofern die Werte voneinander abwichen.

## **2.2.5 Statistik**

Die statistische Auswertung erfolgte mit Hilfe des Programms SPSS Statistics (IBM®), Version 23.0.0.0, für Mac OS X. Statistische Signifikanz wurde bei  $p < 0,05$  angenommen.

### **2.2.5.1 Allgemeine Auswertung**

Für die deskriptive Statistik wurden zunächst für die Gesamtgruppe und jeweils in Abhängigkeit vom PMI der Mittelwert (M) und die Standardabweichung (SD) für die Merkmale Alter, Größe, Gewicht und Body-Mass-Index (BMI, berechnet aus Körpergewicht und Körpergröße) sowie für die Liegezeit vom Zeitpunkt der Todesfeststellung bis zum durchgeführten pmCT berechnet. Zur Testung auf Unterschiede zwischen den Gruppen erfolgte dann eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA). War der Levene-Test zur Prüfung der Varianzen signifikant und diese damit nicht homogen, wurde statt des normalen F-Tests ein adjustierter F-Test nach Brown-Forsythe durchgeführt. Zur Untersuchung der Unterschiede zwischen den einzelnen PMI-Gruppen wurde im Anschluss ein Post-hoc-Test mit Bonferroni-Korrektur durchgeführt.

Für das Merkmal Geschlecht wurden die absolute und prozentuale Häufigkeit sowie das Verhältnis männlich zu weiblich berechnet und die Verteilung mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests nach Pearson auf signifikante Unterschiede geprüft.

### **2.2.5.2 Abhängigkeit vom postmortalen Intervall**

Um einen ersten Überblick über die gesammelten Messdaten zu erhalten, wurde deren Verteilung für jede der 19 Regionen (Herz, Aorta/V.cava usw.) als Boxplot dargestellt. Außerdem wurde die prozentuale Häufigkeit der gas-positiven Fälle, also allen Fällen mit einem Messwert größer Null, an der Gesamtfallzahl im jeweiligen PMI berechnet.

Als Vorbereitung für die Testung der Messdaten auf signifikante Unterschiede wurde der Datensatz mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests auf Normalverteilung geprüft. Da die Daten keiner einzigen Region normalverteilt waren, wurde bei allen der Kruskal-Wallis-Test für nicht normalverteilte, unabhängige Stichproben mit mehr als zwei Gruppen durchgeführt. Als Nullhypothese wurde immer „Die zu untersuchenden Gruppen weisen keinen Unterschied auf“ zugrunde gelegt. Beim Kruskal-Wallis-Test werden auch sogenannte *Mittlere Rangwerte* berechnet, die sich – ähnlich einem Mittelwert, nur für ordinalskalierte Daten – untereinander vergleichen lassen. Die Rangwerte werden nach folgendem Prinzip berechnet: ordinalskalierte

Daten werden gruppenunabhängig aufsteigend nach ihrem Wert sortiert und mit Rangnummern versehen. Kommen Werte mehrmals vor (und kann somit kein eindeutiger Rang zugeteilt werden), wird aus allen Rangnummern mit gleichem Messwert der Mittelwert berechnet und dieser dann allen diesen Rängen zugeteilt. Zum Schluss werden die Rangwerte in Abhängigkeit von der Gruppe addiert und somit eine Rangsumme erstellt. Geteilt durch die Gesamtzahl der vergebenen Ränge in der jeweiligen Gruppe wird so ein mittlerer Rangwert berechnet.

Fiel der Test signifikant aus, wurde ein paarweiser Vergleich der Gruppen mit Bonferroni-Korrektur angeschlossen.

### **2.2.5.3 Einfluss von Gefäßzugängen und äußeren Verletzungen**

Um äußere Einflüsse auf die postmortale Gasbildung zu untersuchen, wurde die PMI-Gruppe 1 mit einer Liegezeit von bis zu sechs Stunden aus der Gesamtpopulation extrahiert und nur diese Fälle analysiert. Für die Testung der Gefäßzugänge auf signifikante Unterschiede wurden ebenso alle Fälle mit Drainagen, Kathetern oder offenen Verletzungen ausgeschlossen, um eine Verfälschung des Ergebnisses zu vermeiden. Für die Testung der äußeren Verletzungen wurden dann aus selbigem Grund auch alle Fälle mit Gefäßzugängen oder Drainagen ausgeschlossen. Als Test wurde auch hier wieder der Kruskal-Wallis-Test und der anschließende paarweise Vergleich mit Bonferroni-Korrektur verwendet.

### **2.2.5.4 Andere Einflussfaktoren**

Für die Untersuchung weiterer Einflussfaktoren wurden wiederum nur die PMI-Gruppe 1 und davon nur äußerlich unversehrte Fälle analysiert, d.h. alle Fälle mit offenen Verletzungen oder medizinischen Zugängen und Drainagen ausgeschlossen. Es folgte ein Vergleich der fünf häufigsten Todesursachen in dieser PMI-Gruppe sowie eine Testung der Liegezeit von der Todesfeststellung bis zum pmCT, also der näherungsweisen Kühlzeit. Beides wurde ebenfalls mit dem Kruskal-Wallis-Test bewerkstelligt.

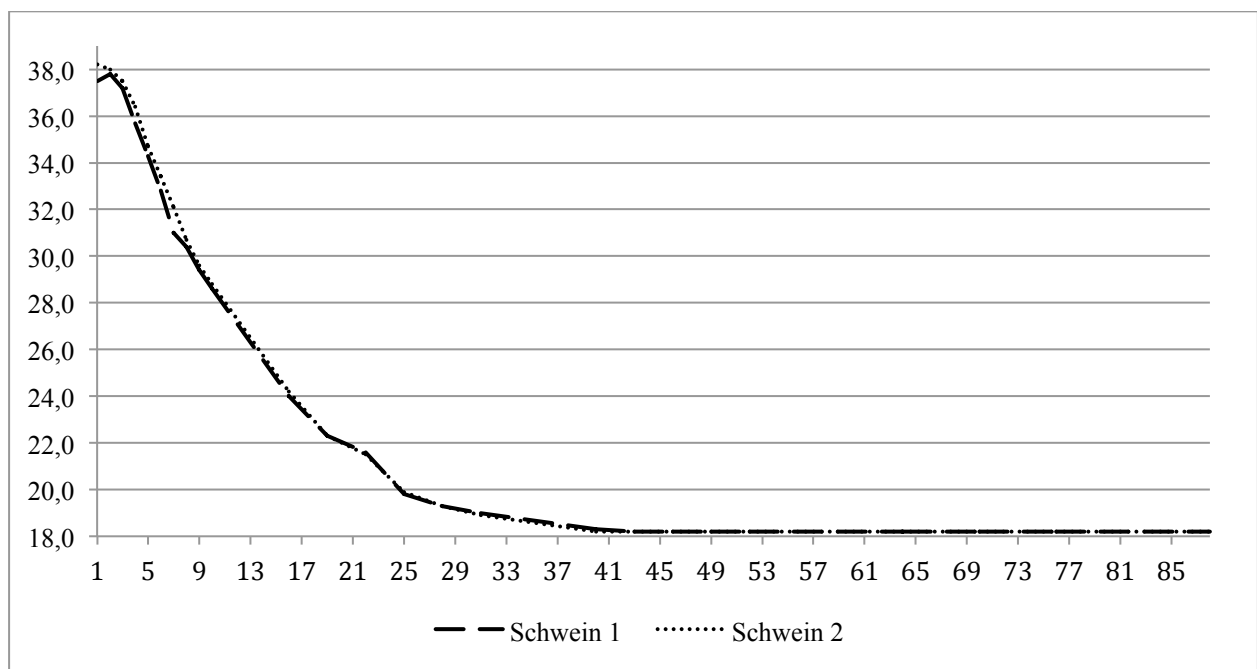
## 3 Ergebnisse

### 3.1 Intervallmessung der postmortalen Gasbildung an Schweinen

#### 3.1.1 Allgemeine Messdaten

Schwein 1 wog vor Beginn der Messungen 48 kg, Schwein 2 hatte ein Gewicht von 45 kg. Beide wiesen kleinere Einstichverletzungen im Bereich der Wirbelsäule und der Axilla auf, die auf zuvor durchgeführte Injektionen der Anästhesisten zurückzuführen sind. Die Blutproben wurden außerdem positiv auf folgende Substanzen getestet: Ketamin (beide), Clomazon (beide), Xylazin (nur Schwein 1), Fentanyl und Norketamin (nur Schwein 2). Clomazon ist ein Herbizid, das wahrscheinlich über die Nahrung aufgenommen wurde. Alle anderen Substanzen fallen in den Bereich der Veterinärmedizin bzw. Anästhesie und wurden in den vorherigen Versuchen, z.B. zur Narkoseeinleitung verabreicht.

Die Veränderung der rektal gemessenen Körperkerntemperatur während des Versuchs ist in Diagramm 1 dargestellt.



**Diagramm 1:** Rektale Körperkerntemperatur [°C] in Abhängigkeit vom PMI [Std.]

Die Körperkerntemperatur beider Schweine nahm nach dem Tod insgesamt nahezu identisch ab. Bei Schwein 1 konnte nach zwei Stunden p.m. im Vergleich zur Messung nach einer Stunde ein leichter Anstieg der Temperatur verzeichnet werden, was vermutlich auf eine unterschiedliche rektale Tiefe der ersten Messungen zurückzuführen ist. In den ersten zehn Stunden p.m. lag die

Körpertemperatur bei Schwein 1 durchschnittlich  $0,47^{\circ}\text{C}$  unter der von Schwein 2, die maximale Temperaturdifferenz lag bei  $1,1^{\circ}\text{C}$  nach sieben Stunden. Danach verliefen die beiden Temperaturkurven nahezu gleich. Bei beiden Schweinen konnte ein Temperaturplateau von etwa zwei Stunden festgestellt werden, wonach der Abfall der Körpertemperatur mit einer durchschnittlichen Abnahme von  $0,49^{\circ}\text{C}$  pro Stunde bei Schwein 1 bzw.  $0,51^{\circ}\text{C}$  pro Stunde bei Schwein 2 begann. Nach 40 Stunden war die Endtemperatur von  $18,2^{\circ}\text{C}$  bei beiden Schweinen erreicht. Es fällt auf, dass diese um  $0,8^{\circ}\text{C}$  unter der anfangs gemessenen Raumtemperatur von  $19^{\circ}\text{C}$  lag, was vermutlich auf Messunterschiede von Thermostat der Klimaanlage und Rektalthermometer zurückzuführen ist.

### **3.1.2 Gasfreie Phase**

Im ersten pmCT, etwa eine Stunde p.m., zeigten beide Schweine geringe Mengen diffus verteiltes Gas im Unterhautfettgewebe der Axilla beidseits, Schwein 1 zusätzlich an einzelnen Stellen entlang der Wirbelsäule. Beides ließ sich mit den bereits zuvor festgestellten Injektionsstellen vereinbaren. Herz, Aorta, V. cava, Lebergefäße, Gehirn, Spinalkanal und die drei Körperhöhlen waren zu diesem Zeitpunkt bei beiden Schweinen gasfrei.

In den ersten sechs Stunden p.m. konnte bei beiden Schweinen keine Änderung verzeichnet werden. Bei einem PMI von sieben Stunden wurde bei Schwein 1 erstmalig eine neu aufgetretene, etwa 2 mm durchmessende Gasblase im Spinalkanal auf Höhe der Lendenwirbelsäule gefunden, die in den folgenden 18 Stunden, also bis zum Zeitpunkt 25 Stunden p.m., nicht an Größe zunahm. Da Schwein 2 bis 22 Stunden p.m. gar keine Änderungen zeigte, ist diese Gasansammlung am wahrscheinlichsten durch spinale bzw. peridurale Injektionen im Rahmen der Anästhesie-Versuche zu erklären. Warum sie erst sieben Stunden p.m. auftrat, konnte nicht geklärt werden. Die letzte gasfreie Messung bei Schwein 2 war demnach bei einem PMI von 22 Stunden, bei Schwein 1 (abgesehen von dem vermutlichen Artefakt im Spinalkanal) nach 25 Stunden p.m.

### **3.1.3 Beginn und Verlauf der Fäulnisgasbildung**

Die Zeitpunkte des erstmaligen Auftretens von Fäulnisgas im pmCT bei beiden Schweinen sind in Tabelle 6 (S.28) dargestellt.

## I. Gas im Herz-Kreislauf-System

Bei Schwein 1 wurden erstmalig 28 Stunden p.m. vereinzelte Gasblasen mit max. 2 mm Durchmesser in kleinen Lebergefäßen festgestellt, bei Schwein 2 nach 40 Stunden p.m. an derselben Lokalisation. Bei beiden nahm das intravasale Gasvolumen der Leber danach kontinuierlich zu, von zuerst vereinzelt Blasen mit bis zu 5 mm Durchmesser hin zu komplett mit Gas gefüllten Gefäßabschnitten. Während zuerst vor allem kleinere, periphere Gefäße von Gasbildung betroffen waren, waren nach 64 Stunden p.m. auch die großen Portalgefäße gasgefüllt.

Während bei Schwein 1 die erste fäulnisbedingte Gasbildung also in der Leber festgestellt wurde (PMI 28

Stunden), tauchte bei Schwein 2 das erste Gas nach 25 Stunden p.m. in der V. cava auf Höhe der Brustwirbelsäule auf. Der maximale Durchmesser betrug hier 3 mm über eine Strecke von etwa 20 mm. In den folgenden Stunden nahm nur die Länge der Gasansammlung kontinuierlich zu, der Durchmesser blieb nahezu gleich. Erst nach 49 Stunden erweiterte sich auch dieser, bis nach 70 Stunden p.m. das gesamte Lumen der V. cava gasgefüllt war.

In der Aorta wurde bei beiden Schweinen erstmalig bei einem PMI von 40 Stunden Gas registriert, ähnlich dem bereits beschriebenen Fund in der V. cava bei Schwein 2. Nach 49 Stunden war bereits der gesamte Aortenbogen gasgefüllt, erst unregelmäßig und teilweise unterbrochen, nach 76 Stunden dann vollständig und bis in abdominale Aortenabschnitte reichend.

In den Herzhöhlen begann die Gasbildung bei Schwein 1 nach 40 Stunden und bei Schwein 2 nach 43 Stunden mit vereinzelt, etwa 5 bis 15 mm großen Gasblasen vor allem im rechten Ventrikel. Diese nahmen im Verlauf schnell an Größe zu, so dass bereits nach 52 Stunden bei beiden Schweinen nahezu der gesamte rechte Ventrikel gasgefüllt war und nun auch im restlichen Herz große Areale von Fäulnisgas zu finden waren. Nach 70 Stunden konnte bei Schwein 1 freies Gas im Herzbeutel nachgewiesen werden.

**Tabelle 1:** Erstmaliges Auftreten von Gas in Abhängigkeit vom postmortalen Intervall

	PMI in Std.	
	Schwein 1	Schwein 2
<b>Herz</b>	40	43
<b>Aorta</b>	40	40
<b>V. cava</b>	40	25
<b>Lebergefäße</b>	28	40
<b>Hirngefäße</b>	64	64
<b>Spinalkanal</b>	(7) 28	40
<b>Schädelhöhle</b>	46	52
<b>Brusthöhle</b>	-	-
<b>Bauchhöhle</b>	46	46

Unter allen untersuchten Gefäßen setzte die Fäulnisgasbildung in den Hirngefäßen als letztes ein. Erst nach 64 Stunden konnten hier vereinzelt kleine Gasareale im Circulus arteriosus Willisii nachgewiesen werden.

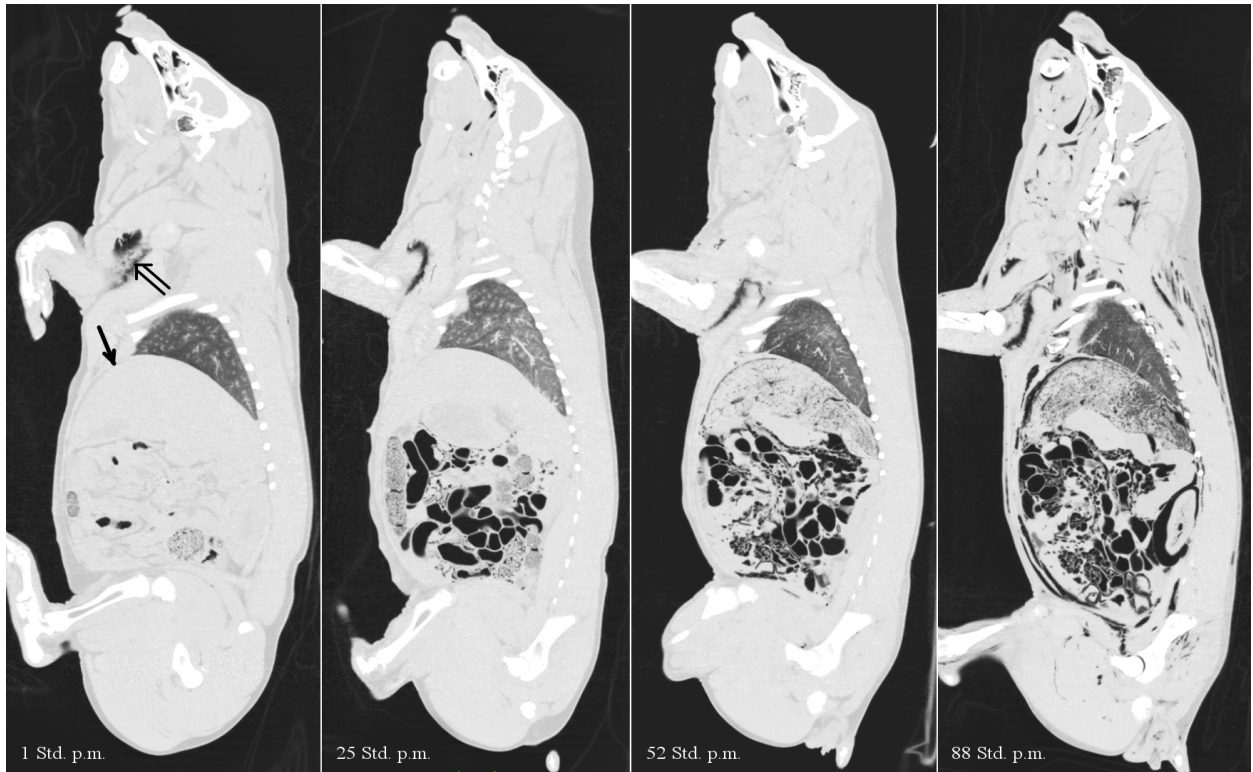
## **II. Gas in den Körperhöhlen und im Spinalkanal**

Wie bereits erwähnt zeigte Schwein 1 im Spinalkanal bereits nach sieben Stunden vermutlich durch vorangegangene Injektionen bedingte Gaseinschlüsse, was auch dadurch bestätigt wird, dass sich diese in den folgenden Messungen bis zu einem Zeitpunkt von 25 Stunden nicht veränderten. Ab einem PMI von 28 Stunden konnten bei Schwein 1 weitere, max. 3 mm durchmessende Gasblasen detektiert werden, die im Verlauf immer häufiger auftraten und in ihrer Größe leicht zunahmten. Bei Schwein 2 konnte dieser Prozess ab einem PMI von 40 Stunden beobachtet werden. Insbesondere die Brust- und Lendenwirbelsäule waren von der frühen Fäulnisgasbildung betroffen. Nach 52 Stunden (Schwein 1) bzw. 70 Stunden (Schwein 2) war nahezu der gesamte Spinalkanal ununterbrochen von Gas durchsetzt.

In der Schädelhöhle wurde freies Gas bei Schwein 1 nach 46 Stunden und Schwein 2 nach 52 Stunden p.m. insbesondere in parietalen Abschnitten gefunden. Bis zum Ende der Messungen nach 88 Stunden blieb es hier aber bei nur vereinzelt auftretenden, geringen Mengen mit einer maximalen Ausdehnung von 5 mm.

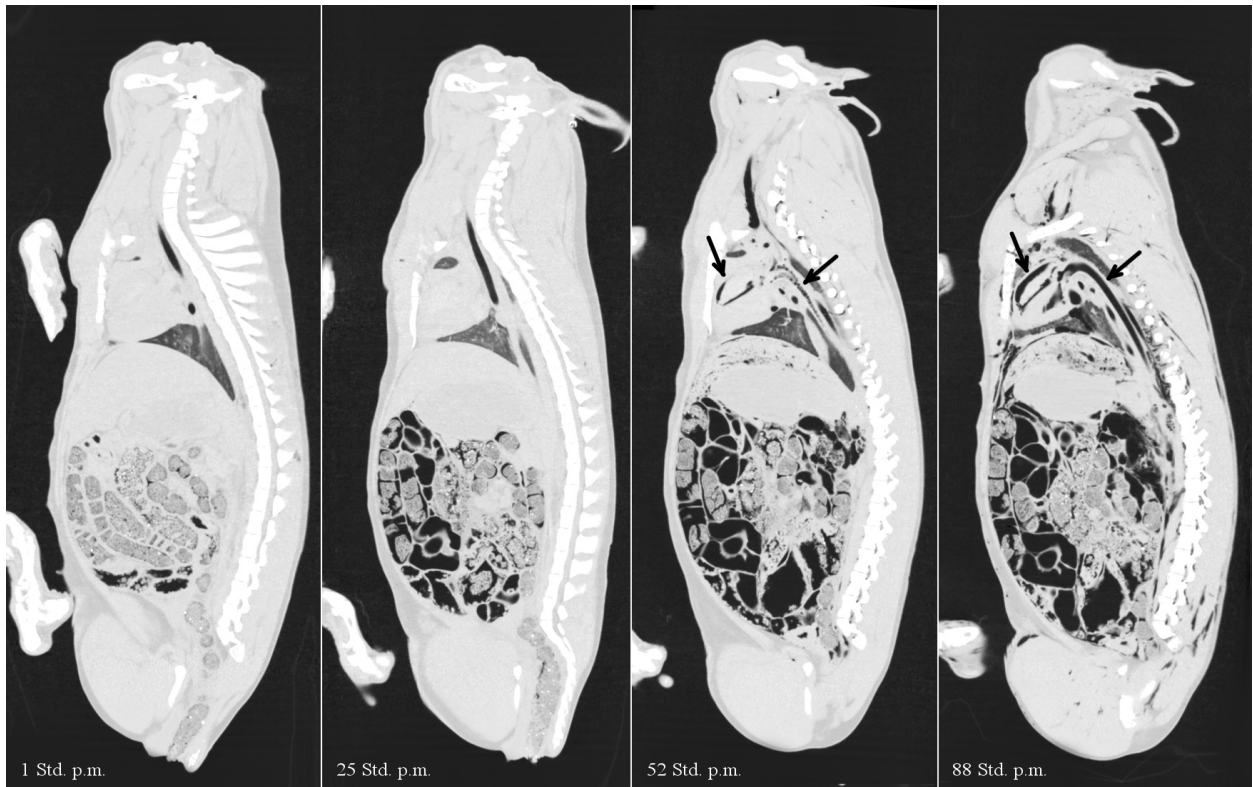
Bei beiden Schweinen begann die Gasbildung in der Bauchhöhle ebenfalls nach 46 Stunden p.m., wobei hier eine deutlich schnellere Größenzunahme zu beobachten war. Aufgrund der seitlichen Körperlage sammelte sich das Gas an der jeweils oben liegenden Bauchseite. Nach 70 Stunden hob sich die Bauchdecke bereits um mehr als 50 mm. Auch von außen war nun bereits eine deutliche Dunsung des Abdomens sowie eine großflächige grünliche Verfärbung der Oberhaut und ein sog. Durchschlagen des Gefäßnetz zu erkennen. Im Gegensatz zur Schädel- und Bauchhöhle konnte in der Brusthöhle bis zum Versuchsende nach 88 Stunden kein freies Gas gemessen werden.

Die röntgenologisch-morphologischen Veränderungen der beiden Schweine in unterschiedlichen Fäulnisstadien sind in den Abbildungen 6 bis 9 auf den Seiten 29 und 30 dargestellt.



**Abbildung 6:** Fäulnisstadien von Schwein 1 in der Transversalebene, Leberhöhe

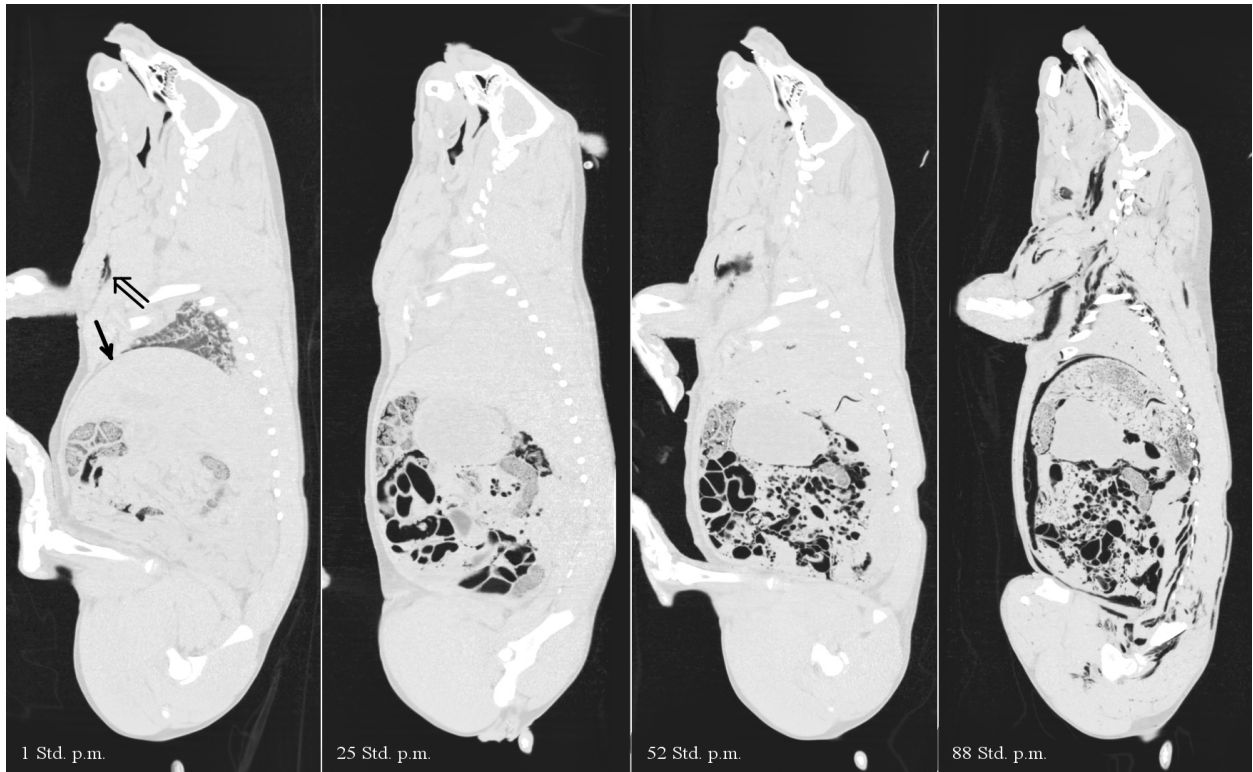
WL: -500, WW: 1400. Schnitt durch die Leber (Pfeil). Artifizielle Gaseinschlüsse in der Axilla durch vorangegangene Injektionen (Doppelpfeil).



**Abbildung 7:** Fäulnisstadien von Schwein 1 in der Transversalebene, Herzhöhe

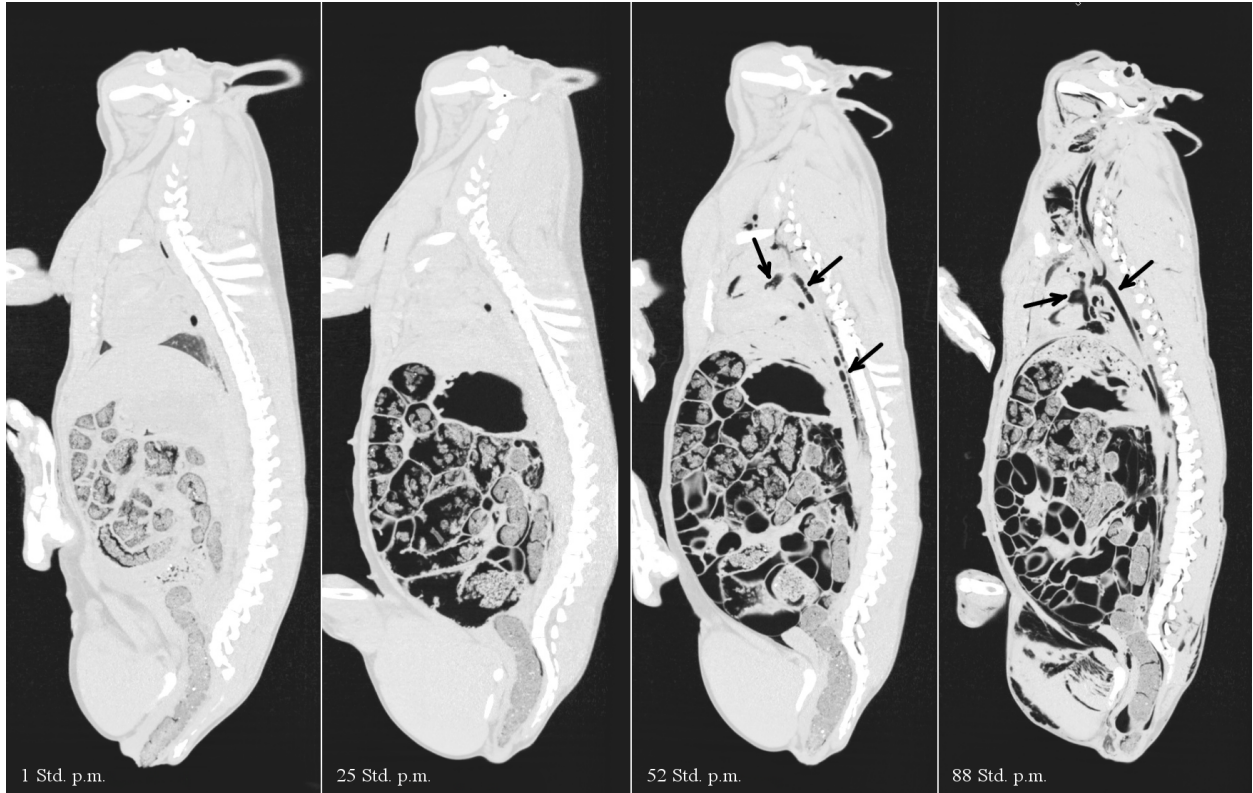
WL: -500, WW: 1400. Schnitt durch Herz und Aorta. Teilweise Darstellung des Spinalkanals. Gaseinschlüsse in Herz und Aorta (Pfeile), erst grobbläsig dann lumenfüllend.





**Abbildung 8:** Fäulnisstadien von Schwein 2 in der Transversalebene, Leberhöhe

WL: -500, WW: 1400. Schnitt durch die Leber (Pfeil). Artifizielle Gaseinschlüsse in der Axilla durch vorangegangene Injektionen (Doppelpfeil).



**Abbildung 9:** Fäulnisstadien von Schwein 2 in der Transversalebene, Herzhöhe

WL: -500, WW: 1400. Schnitt durch Herz und Aorta. Teilweise Darstellung des Spinalkanals. Gaseinschlüsse in Herz und Aorta (Pfeile), erst grobblasig dann lumenfüllend.

### **3.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die fäulnisbedingte intravasale Gasbildung bei Schwein 1 nach 28 Stunden (Lebergefäße) und bei Schwein 2 nach 25 Stunden (V. cava) erstmalig im pmCT sichtbar war. In den meisten untersuchten Gefäßen konnte nach etwa 40 Stunden Gas nachgewiesen werden. Von früher postmortalen Gasbildung waren bei beiden Schweinen v.a. die Gefäße der Leber (28 und 40 Stunden p.m.), die Herzhöhlen (40 und 43 Stunden p.m.) sowie die großen herznahen Abschnitte von Aorta (40 Stunden p.m.) und V. cava (40 und 25 Stunden p.m.) betroffen. In Schädel- und Bauchhöhle wurde Gas erst etwas später (nach ca. 46 Stunden) festgestellt, in den Hirngefäßen sogar erst nach 64 Stunden p.m. In der Brusthöhle war bis zum Versuchsende nach 88 Stunden gar kein freies Gas messbar.

Die Menge des artifiziell anwesenden Gases insbesondere in der Axilla und der paravertebralen Muskulatur hat sich während des Versuchs insgesamt kaum verändert und auch nicht zu einer übermäßigen Gasansammlung in der jeweiligen Region beigetragen. Inwiefern die Gasbildung bei den beiden Schweinen mit der bei menschlichen Leichen und den Ergebnissen der folgenden Studie zu vergleichen sind, wird in Kapitel 4 (Diskussion) thematisiert.

## 3.2 Retrospektive Fallauswertung von rechtsmedizinischen Fällen

### 3.2.1 Allgemeine Auswertung

#### 3.2.1.1 Merkmale der Stichprobe

Von den 785 in die Studie eingeschlossenen Fällen wurden mehr als die Hälfte (58,60%) der ersten PMI-Gruppe mit einer Liegezeit von max. sechs Stunden zugeordnet. Hierunter fielen vor allem Todesfälle in Kliniken und Pflegeheimen, Verkehrsunfallopfer sowie andere Todesfälle im öffentlichen Raum (z.B. Suizide). Die wenigsten Fälle konnten der Gruppe 4 (PMI von 24 bis 48 Stunden, 7,01%) und Gruppe 5 (PMI von 48 bis 96 Stunden, 5,86%) zugeordnet werden.

In der gesamten untersuchten Stichprobe waren mehr als doppelt so viele Männer wie Frauen vorhanden (Verhältnis m/w=2,23), in Gruppe 6 (PMI von über 96 Stunden) waren es sogar mehr als viermal so viele (m/w=4,36). Der Unterschied war nicht signifikant ( $p=0,168$ ). Das Durchschnittsalter bei Versterben lag in allen Gruppen zwischen 48,5 und 55,5 Jahren ( $p=0,081$ ). Die ältesten Toten gab es im Schnitt in Gruppe 1 (M=55,54 Jahre) und Gruppe 2 (M=55,31 Jahre), am niedrigsten lag das Sterbealter in Gruppe 6 (M=48,52 Jahre). Die mittlere Körpergröße lag in allen Gruppen zwischen 169,5 und 170,5 cm bei einer Standardabweichung (SD) von 8,68 cm bis 13,06 cm ( $p=0,981$ ). Das mit Abstand höchste durchschnittliche Körpergewicht lag in Gruppe 1 mit 80,59 kg (SD=21,17 kg) vor, die niedrigsten Werte wurden hier in Gruppe 5 (M=68,99 kg, SD=17,14 kg) und Gruppe 6 (M=66,86 kg, SD=20,12 kg) festgestellt, was mit dem postmortalen Wasserverlust und Zersetzungsprozess vereinbar ist. Die Differenz zwischen PMI-Gruppe 1 und jeweils der Gruppe 3 (M=69,93 kg, SD=13,59 kg), Gruppe 5 und Gruppe 6 war signifikant (jeweils  $p\leq 0,002$ ). Ähnlich fielen die Tests auch beim Body-Mass-Index (BMI) aus. In den Gruppen mit kurzer postmortaler Liegezeit lag der BMI am höchsten mit durchschnittlich 27,76 kg/m<sup>2</sup> (Gruppe 1, SD=6,50 kg/m<sup>2</sup>), am niedrigsten in Gruppe 5 (M=23,99 kg/m<sup>2</sup>, SD=5,95 kg/m<sup>2</sup>) und Gruppe 6 (M=22,96 kg/m<sup>2</sup>, SD=6,29 kg/m<sup>2</sup>). Auch hier unterschied sich Gruppe 1 jeweils signifikant von Gruppe 3 (M=24,07 kg/m<sup>2</sup>, SD=3,98 kg/m<sup>2</sup>), Gruppe 5 und Gruppe 6 (jeweils  $p\leq 0,001$ ).

Der Zeitraum von der Todesfeststellung bis zum pmCT lag insgesamt im Schnitt bei 4 Tagen und 22 Stunden (SD=3 Tage, 3,5 Stunden). Das längste Intervall hatten hier die Fälle aus Gruppe 1 (M=5 Tage, 10 Stunden), das kürzeste Gruppe 2 (M=3 Tage, 16 Stunden) und Gruppe 3 (M=3 Tage, 18 Stunden). Die Unterschiede waren zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 ( $p\leq 0,001$ ) sowie zwischen Gruppe 1 und Gruppe 3 ( $p=0,001$ ) signifikant.

Die Werte aller PMI-Gruppen und der gesamten Stichprobe sind in Tabelle 7 (S.34) dargestellt:

**Tabelle 7:** Merkmale der Stichprobe in Abhängigkeit vom PMI

	<b>PMI 1</b> < 6 Std.	<b>PMI 2</b> 6-12 Std.	<b>PMI 3</b> 12-24 Std.	<b>PMI 4</b> 24-48 Std.	<b>PMI 5</b> 48-96 Std.	<b>PMI 6</b> > 96 Std.	<b>Gesamt</b>
<b>Anzahl</b> n (%)	460 (58,60)	88 (11,21)	61 (7,77)	55 (7,01)	46 (5,86)	75 (9,55)	785 (100)
<b>Geschlecht: Männlich (m)</b> n (%)	305 (38,85)	60 (7,64)	43 (5,48)	41 (5,22)	32 (4,08)	61 (7,77)	542 (69,04)
<b>Geschlecht: Weiblich (w)</b> n (%)	155 (19,75)	28 (3,57)	18 (2,29)	14 (1,78)	14 (1,78)	14 (1,78)	243 (30,96)
<b>Verhältnis: m : w</b>	1,97	2,14	2,39	2,93	2,29	4,36	2,23
<b>Alter (y)</b> M ± SD	55,54 ± 21,86	55,31 ± 19,75	51,00 ± 19,11	54,25 ± 21,17	51,11 ± 18,51	48,52 ± 21,45	54,14 ± 21,23
<b>Körpergröße (cm)</b> M ± SD	169,51 ± 13,06	169,67 ± 8,81	170,26 ± 9,58	170,35 ± 9,30	170,09 ± 8,68	170,4 ± 10,08	169,76 ± 11,64
<b>Körpergewicht (kg)</b> M ± SD	80,59 ± 21,17	74,85 ± 16,36	69,93 ± 13,59	74,16 ± 15,44	68,99 ± 17,14	66,86 ± 20,12	76,68 ± 20,10
<b>Body Mass Index (kg/m<sup>2</sup>)</b> M ± SD	27,76 ± 6,50	25,88 ± 4,76	24,07 ± 3,98	25,44 ± 4,48	23,99 ± 5,95	22,96 ± 6,27	26,42 ± 6,21
<b>Intervall: Todesfeststellung – pmCT (t hh:mm)</b> M ± SD	5 10:08 ± 3 04:54	3 16:26 ± 2 06:24	3 18:09 ± 2 06:49	4 05:46 ± 2 20:47	5 06:06 ± 5 03:52	4 15:55 ± 2 00:38	4 22:23 ± 3 03:33

### 3.2.1.2 Verteilung äußerer Verletzungen

Etwa ein Drittel aller Fälle (n=280, 35,67%) wies äußere offene Verletzungen auf. Davon waren die häufigsten Verletzungsarten Quetsch-Riss-Wunden (n=110, 39,29% der Fälle mit Verletzungen, gilt auch im Folgenden), gefolgt von Schnittverletzungen (n=59, 21,07%) sowie grobe Zertrümmerungen von Körperteilen (n=56, 20%), worunter z.B. offene Brüche oder Amputationen fallen. Stich- und Schussverletzungen traten jeweils in 32 Fällen (11,43%) auf, Verbrennungen in 24 Fällen (8,57%). Die Verteilung in den PMI-Gruppen war insgesamt ausgewogen, nur Verbrennungen kamen ab Gruppe 4 gar nicht mehr vor. Die meisten Verletzungen gab es durchweg in den Gruppen mit kurzer Liegezeit, besonders in Gruppe 1, was durch zahlreiche Unfalltote und Gewaltdelikte im öffentlichen Raum in dieser Gruppe zu erklären ist. Die gesamte Verteilung äußerer Verletzungen in der untersuchten Stichprobe ist in Tabelle 8 (S.35) dargestellt.

**Tabelle 8:** Verteilung äußerer Verletzungen in Abhängigkeit vom PMI

	<b>PMI 1</b> < 6 Std.	<b>PMI 2</b> 6-12 Std.	<b>PMI 3</b> 12-24 Std.	<b>PMI 4</b> 24-48 Std.	<b>PMI 5</b> 48-96 Std.	<b>PMI 6</b> > 96 Std.	<b>Gesamt</b>
<b>Anzahl Fälle gesamt</b> n (%)	460 (58,60)	88 (11,21)	61 (7,77)	55 (7,01)	46 (5,86)	75 (9,55)	785 (100)
<b>Ohne Verletzungen</b> n (%)	273 (34,78)	52 (6,62)	43 (5,48)	36 (4,59)	37 (4,71)	64 (8,15)	505 (64,33)
<b>Mit Verletzungen</b> n (%)	187 (23,82)	36 (4,59)	18 (2,29)	19 (2,42)	9 (1,15)	11 (1,40)	280 (35,67)
<b><u>Davon:</u></b>							
<b>Quetsch-Riss-Wunden</b> n (%*)	85 (45,45)	12 (33,33)	6 (33,33)	5 (26,32)	0	2 (18,18)	110 (39,29)
<b>Schnittverletzungen</b> n (%*)	22 (11,76)	13 (36,11)	5 (27,78)	9 (47,37)	5 (55,56)	5 (45,45)	59 (21,07)
<b>Stichverletzungen</b> n (%*)	14 (7,49)	7 (19,44)	5 (27,78)	2 (10,53)	1 (11,11)	3 (27,27)	32 (11,43)
<b>Schussverletzungen</b> n (%*)	21 (11,23)	2 (5,56)	1 (5,56)	4 (21,05)	2 (22,22)	2 (18,18)	32 (11,43)
<b>Grobe Zertrümmerung oder Zerreißung</b> n (%*)	48 (25,67)	3 (8,33)	3 (16,67)	1 (5,26)	1 (11,11)	1 (9,09)	56 (20)
<b>Verbrennungen</b> n (%*)	20 (10,70)	3 (8,33)	1 (5,56)	0	0	0	24 (8,57)

\* Prozentangaben innerhalb aller Fälle mit Verletzungen in Abhängigkeit vom PMI. Mehrfachverletzungen eingeschlossen.

### 3.2.1.3 Verteilung medizinischer Gefäßzugänge und Drainagen

Das Vorkommen medizinischer Zugänge in Abhängigkeit vom PMI ist in Tabelle 9 (S.36) dargestellt. Die Mehrheit der Fälle (n=526, 67,01%) wies keinerlei Gefäßzugänge auf, dementsprechend konnten bei 32,99% der Fälle (n=259) ein oder mehrere medizinische Zugänge festgestellt werden. Die alleinigen peripheren Gefäßzugänge, bspw. an Armbeuge oder Handrücken, waren mit Abstand am häufigsten vertreten und kamen nur in Gruppe 1 (n=144, 55,60% der Fälle mit Gefäßzugängen, gilt auch im Folgenden) und Gruppe 2 (n=5, 1,93%) vor. In Kombination mit einem zentralen Zugang gab es 93 Fälle (35,91%) in Gruppe 1 und 2 Flle (0,77%) in Gruppe 2. Selten waren dagegen nur zentrale Gefäßzugänge in V. jugularis oder V. subclavia mit nur 14 Fällen in Gruppe 1 (5,41%) und einem Fall in Gruppe 2 (0,39%).

Ähnlich zeigte sich die Verteilung medizinischer Drainagen (Tabelle 10, S.36). In insgesamt 11,46% der Fälle (n=90) wurden verbliebene Drainagen, Katheter oder Messsonden festgestellt, davon gehörten 89 Fälle zur PMI-Gruppe 1 und lediglich ein Fall zur Gruppe 2. Die mit Abstand häufigste Drainageart war mit 63,33% die Brustkorbdrainage (auch Thoraxdrainage).

**Tabelle 9:** Verteilung medizinischer Gefäßzugänge in Abhängigkeit vom PMI

	<b>PMI 1</b> < 6 Std.	<b>PMI 2</b> 6-12 Std.	<b>PMI 3</b> 12-24 Std.	<b>PMI 4</b> 24-48 Std.	<b>PMI 5</b> 48-96 Std.	<b>PMI 6</b> > 96 Std.	<b>Gesamt</b>
<b>Anzahl Fälle gesamt</b> n (%)	460 (58,60)	88 (11,21)	61 (7,77)	55 (7,01)	46 (5,86)	75 (9,55)	785 (100)
<b><u>Gefäßzugänge</u></b>							
<b>Keine</b> n (%)	209 (26,62)	80 (11,21)	61 (7,77)	55 (7,01)	46 (5,86)	75 (9,55)	526 (67,01)
<b>Vorhanden</b> n (%)	251 (31,97)	8 (1,02)	0	0	0	0	259 (32,99)
<b><u>Davon</u></b>							
<b>Peripher</b> n (%*)	144 (55,60)	5 (1,93)	0	0	0	0	149 (57,53)
<b>Zentral</b> n (%*)	14 (5,41)	1 (0,39)	0	0	0	0	15 (5,79)
<b>Peripher und zentral</b> n (%*)	93 (35,91)	2 (0,77)	0	0	0	0	95 (36,68)

\* Prozentangaben innerhalb aller Fälle mit Gefäßzugängen in Abhängigkeit vom PMI.

**Tabelle 10:** Verteilung medizinischer Drainagen und Katheter in Abhängigkeit vom PMI

	<b>PMI 1</b> < 6 Std.	<b>PMI 2</b> 6-12 Std.	<b>PMI 3</b> 12-24 Std.	<b>PMI 4</b> 24-48 Std.	<b>PMI 5</b> 48-96 Std.	<b>PMI 6</b> > 96 Std.	<b>Gesamt</b>
<b>Anzahl Fälle gesamt</b> n (%)	460 (58,60)	88 (11,21)	61 (7,77)	55 (7,01)	46 (5,86)	75 (9,55)	785 (100)
<b><u>Drainagen</u></b>							
<b>Keine</b> n (%)	371 (47,26)	87 (11,08)	61 (7,77)	55 (7,01)	46 (5,86)	75 (9,55)	695 (88,54)
<b>Vorhanden</b> n (%)	89 (11,34)	1 (0,13)	0	0	0	0	90 (11,46)
<b><u>Davon</u></b>							
<b>Schädelhöhle</b> n (%*)	11 (12,22)	0	0	0	0	0	11 (12,22)
<b>Brusthöhle</b> n (%*)	56 (62,22)	1 (0,39)	0	0	0	0	57 (63,33)
<b>Bauchhöhle</b> n (%*)	13 (14,44)	0	0	0	0	0	13 (14,44)
<b>Mehrfachdrainagen</b> n (%*)	9 (0,1)	0	0	0	0	0	9 (0,1)

\* Prozentangaben innerhalb aller Fälle mit Drainagen in Abhängigkeit vom PMI.

### 3.2.1.4 Verteilung der Todesursachen

Die häufigste Todesursache in der Gesamtpopulation war mit 148 Fällen (18,85%) das Erhängen (atypisch und typisch zusammen), gefolgt von Polytrauma (n=107, 13,63%) und Herztod einschließlich Herzinfarkt (n=55, 7,01%). Während Erhängen in allen PMI-Gruppen mit mindestens 14 Fällen vertreten war, traten die Todesursachen Polytrauma und Herztod am häufigsten in den Gruppen 1 und 2 auf. Ab Gruppe 3 kamen diese nur noch vereinzelt, in Gruppe 6 überhaupt nicht vor. Ebenfalls in allen Gruppen vertreten sind die Todesursachen Verbluten aus Stich-, Schnitt- oder Schussverletzungen und Ertrinken sowie die extra aufgeführten Kopfschussverletzungen. Die Todesursachen Multiorganversagen (n=24, 3,06%), stumpfes Brustkorb- oder Bauchtrauma (n=12, 1,53%) und Pneumonie (n=11, 1,40%) kommen ausschließlich in den Gruppen 1 und 2 vor. In den Gruppen 5 und 6 blieb die Todesursache in 34,78% bzw. 56% der Fälle, und damit deutlich am häufigsten unter allen Gruppen, unklar.

In den PMI-Gruppen 1 und 2 war insgesamt die größte Streuung der Todesursachen zu beobachten, so dass 27,83% bzw. 17,05% der Fälle keiner der gelisteten Todesursachen zugeordnet werden konnten und in der Kategorie *Sonstige* zusammengefasst wurden. Im Gegensatz zur Kategorie *Unklar* war die Todesursache hier bekannt, jedoch so speziell, dass sie nicht in einer der anderen Kategorien eingruppiert werden konnte. In den restlichen PMI-Gruppen 3 – 6 lag der Anteil dieser Fälle lediglich zwischen 5 und 10 %.

Die gesamte Verteilung der einzelnen Todesursachen ist in Tabelle 11 dargestellt.

**Tabelle 11:** Verteilung der Todesursachen in Abhängigkeit vom PMI

	PMI 1 < 6 Std.	PMI 2 6-12 Std.	PMI 3 12-24 Std.	PMI 4 24-48 Std.	PMI 5 48-96 Std.	PMI 6 > 96 Std.	Gesamt
<b>Erhängen</b> n (% innerhalb PMI)	50 (10,87)	21 (23,86)	27 (44,26)	20 (36,36)	14 (30,43)	16 (21,33)	148 (18,85)
<b>Polytrauma</b> n (% innerhalb PMI)	99 (21,52)	5 (5,68)	3 (4,92)	0	0	0	107 (13,63)
<b>Herztod, Herzinfarkt</b> n (% innerhalb PMI)	37 (8,04)	9 (10,23)	3 (4,92)	3 (5,45)	3 (6,52)	0	55 (7,01)
<b>Verbluten aus Stich-, Schnitt- oder Schuss- verletzung*</b> n (% innerhalb PMI)	20 (4,35)	6 (6,82)	5 (8,20)	8 (14,55)	2 (4,35)	3 (4)	44 (5,61)
<b>Ertrinken</b> n (% innerhalb PMI)	18 (4,19)	12 (13,64)	4 (6,56)	3 (5,45)	3 (6,52)	2 (2,67)	42 (5,35)
<b>Multiorganversagen</b> n (% innerhalb PMI)	24 (5,22)	0	0	0	0	0	24 (3,06)

<b>Kopfschussverletzung</b> n (% innerhalb PMI)	13 (2,83)	2 (2,27)	1 (1,64)	2 (3,64)	2 (4,35)	2 (2,67)	22 (2,80)
<b>Intoxikation</b> n (% innerhalb PMI)	5 (1,09)	4 (4,55)	4 (6,56)	2 (3,64)	0	0	15 (1,91)
<b>Schlaganfall</b> n (% innerhalb PMI)	10 (2,17)	1 (1,14)	0	0	1 (2,17)	0	12 (1,53)
<b>Stumpfes Brustkorb- oder Bauchtrauma</b> n (% innerhalb PMI)	12 (2,61)	0	0	0	0	0	12 (1,53)
<b>Pneumonie</b> n (% innerhalb PMI)	10 (2,17)	1 (1,14)	0	0	0	0	11 (1,40)
<b>GI-Blutung</b> n (% innerhalb PMI)	1 (0,22)	1 (1,14)	0	0	0	5 (6,67)	7 (0,89)
<b>Erdrosseln</b> n (% innerhalb PMI)	0	2 (2,27)	0	1 (1,82)	1 (2,17)	1 (1,33)	5 (0,64)
<b>Unklar</b> n (% innerhalb PMI)	33 (7,17)	9 (10,23)	8 (13,11)	12 (21,82)	16 (34,78)	42 (56)	120 (15,29)
<b>Sonstige</b> n (% innerhalb PMI)	128 (27,83)	15 (17,05)	6 (9,84)	4 (7,27)	4 (8,70)	4 (5,33)	161 (20,51)
<b>Anzahl Fälle gesamt</b> n (% innerhalb PMI)	460 (100)	88 (100)	61 (100)	55 (100)	46 (100)	75 (100)	785 (100)

\* ohne Kopfschussverletzung

### 3.2.1.5 Verteilung der Score-Werte

In den Diagrammen 2 und 3 (S. 39) ist die absolute Anzahl ermittelter Score-Werte im pmCT in Abhängigkeit von der jeweiligen Messregion dargestellt.

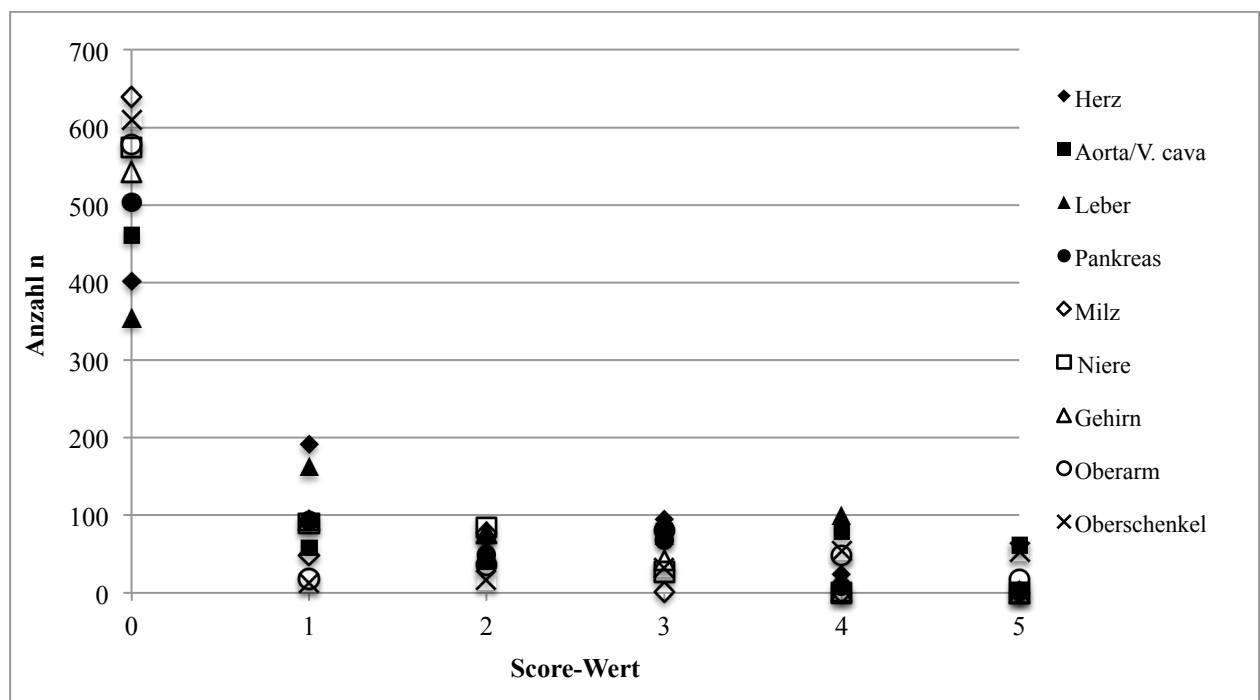
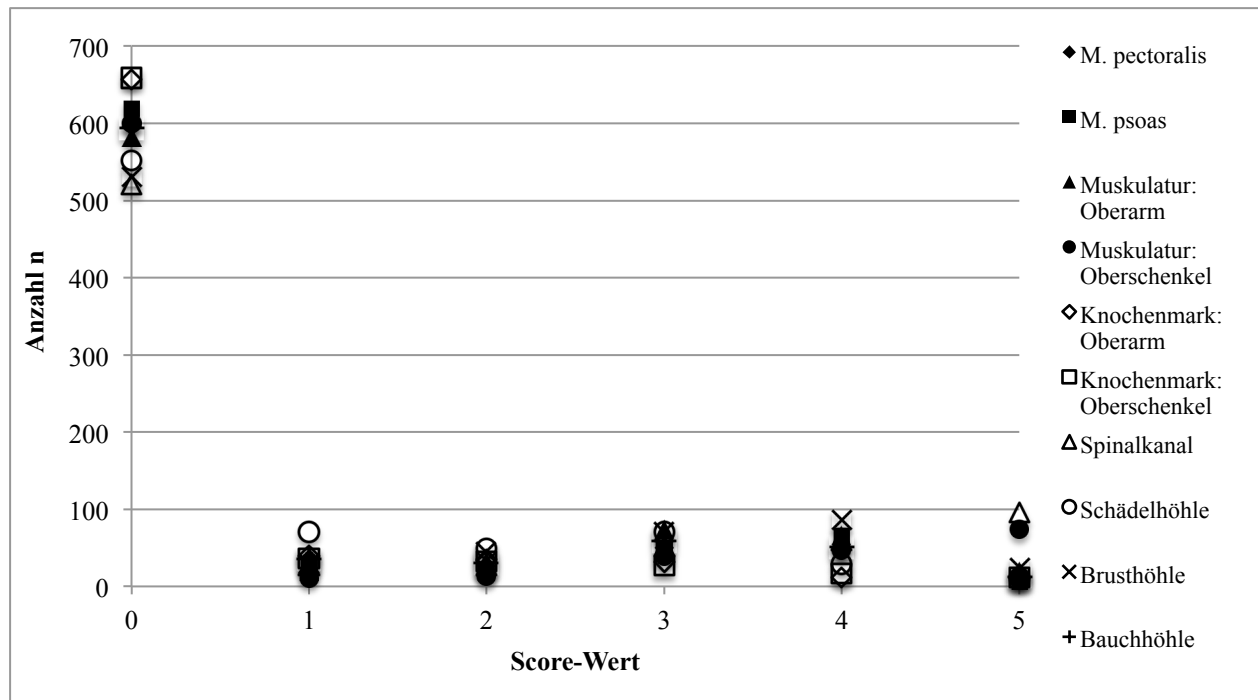


Diagramm 2: Häufigkeit und Verteilung der Score-Werte von Herz und Gefäßen





**Diagramm 3:** Häufigkeit und Verteilung der Score-Werte von Muskulatur, Knochenmark, Spinalkanal und Körperhöhlen

Wie zu erkennen ist, wurde der Wert 0 (kein Gas) in allen Messregionen mit Abstand am häufigsten vergeben. Die Anzahl der restlichen Score-Werte war insgesamt gleichmäßig auf die anderen PMI-Gruppen verteilt. Es lässt sich außerdem feststellen, dass Score-Werte größer als 3 (entspricht einer Gas-Messung  $\geq 3$  cm im pmCT) nicht mehr in allen Messregionen vorkamen. Beispielsweise wies die Milz lediglich Werte zwischen 0 und 2 auf, was mit der retikulären Gefäßarchitektur zu erklären ist, die im Querschnitt selten lange Gefäßabschnitte zeigt und damit zu niedrigeren Werten führt als bspw. die Aorta. Auch die Niere zeigte maximal Score-Werte von 3, was ebenfalls auf die im Vergleich relativ kurze Gefäßlänge zurückzuführen ist.

### 3.2.1.6 Prüfung auf Normalverteilung

Wie die Diagramme 2 und 3 aus dem letzten Kapitel bereits vermuten ließen, waren die gesammelten Messdaten nicht normalverteilt. Zur Prüfung dieser Vermutung wurde der Kolmogorov-Smirnov-Test durchgeführt, dessen Ergebnisse in den Tabellen 12 und 13 (S.40) dargestellt sind. Da die Testwerte aller Messregionen hochsignifikant ausfielen ( $p < 0,001$ ), war nicht von einer Normalverteilung der Werte auszugehen. Es kam deshalb ein Testverfahren für nicht-normalverteilte Daten (v.a. Kruskal-Wallis-Test, paarweiser Vergleich nach Bonferroni) zum Einsatz.

**Tabelle 12:** Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests für Herz und Gefäße

	Herz- höhlen	Gefäße							
		Aorta, V. cava	Leber	Pankreas	Niere	Milz	Gehirn	Ober- arm	Ober- schenkel
Anzahl n	783	782	776	725	776	765	758	778	779
Mittelwert	0,92	1,29	1,25	0,61	0,44	0,27	0,50	0,78	0,80
Standard- abweichung	1,174	1,777	1,465	1,069	0,822	0,637	0,905	1,438	1,628
<u>Max. Diff.</u>									
Absolut	0,296	0,356	0,260	0,411	0,443	0,498	0,428	0,450	0,472
Positiv	0,296	0,356	0,260	0,411	0,443	0,498	0,428	0,450	0,472
Negativ	-0,218	-0,234	-0,197	-0,285	-0,296	-0,337	-0,289	-0,293	-0,311
Teststatistik	0,296	0,356	0,260	0,411	0,443	0,498	0,428	0,450	0,472
Asympt. Sig. (2-seitig)*	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

\* Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

**Tabelle 13:** Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests für Spinalkanal, Körperhöhlen, Muskulatur und Knochenmark

	Spinal- kanal	Körperhöhlen			Muskulatur				Knochenmark	
		Schädel- höhle	Brust- höhle	Bauch- höhle	M. pect.	M. psoas	Ober- arm	Ober- schenkel	Ober- arm	Ober- schenkel
Anzahl n	785	783	784	783	778	784	785	784	785	784
Mittelwert	1,22	0,71	1,01	0,69	0,68	0,64	0,83	0,91	0,39	0,40
Standard- abweichung	1,888	1,267	1,605	1,363	1,373	1,348	1,506	1,740	1,005	1,048
<u>Max. Diff.</u>										
Absolut	0,405	0,416	0,412	0,453	0,455	0,473	0,450	0,464	0,486	0,488
Positiv	0,405	0,416	0,412	0,453	0,455	0,473	0,450	0,464	0,486	0,488
Negativ	-0,259	-0,289	-0,264	-0,306	-0,311	-0,317	-0,291	-0,301	-0,350	-0,352
Teststatistik	0,405	0,416	0,412	0,453	0,455	0,473	0,450	0,464	0,486	0,488
Asympt. Sig. (2-seitig)*	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

\* Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

### 3.2.1.7 Fehlende Werte

In 87 Fällen konnten ein oder mehrere Werte aufgrund von starker Fäulnis oder schweren Verletzungen nicht ermittelt werden. Insgesamt 158 Einzelwerte wurden deshalb nicht gemessen. Anzahl und Verteilung dieser Werte sind in Tabelle 14 dargestellt.

Die meisten Werte konnten in PMI-Gruppe 6 nicht gemessen werden (n=102, 64,56%), was in allen Fällen fäulnisbedingt war. Hierbei waren besonders die Gefäße von Pankreas (n=37), Milz (n=13) und Gehirn (n=18) betroffen. Sie machen zusammen bereits 66,7% der nicht messbaren Werte in Gruppe 6 aus.

In Gruppe 1 konnten in 20 Fällen insgesamt 31 Werte (19,62%) nicht ermittelt werden, was hier meist an schweren Verletzungen mit Eröffnung von Körperhöhlen und (Teil-)Verlust von Organen (z.B. von Hirnmasse bei offenem Schädel-Hirn-Trauma) lag. Auch hier sind am häufigsten die Gefäße von Pankreas (n=6), Milz (n=5) und die Hirngefäße (n=6) betroffen, insgesamt jedoch deutlich seltener als in PMI-Gruppe 6, insbesondere in Anbetracht der deutlich höheren Gruppengröße. Im Spinalkanal sowie in Muskulatur und Knochenmark der oberen Extremität konnten alle Werte ermittelt werden. Die untere Extremität war ebenfalls nur selten betroffen. Alle anderen Messregionen stellen eher Einzelfälle dar.

**Tabelle 14:** Nicht messbare Werte in Abhängigkeit vom PMI

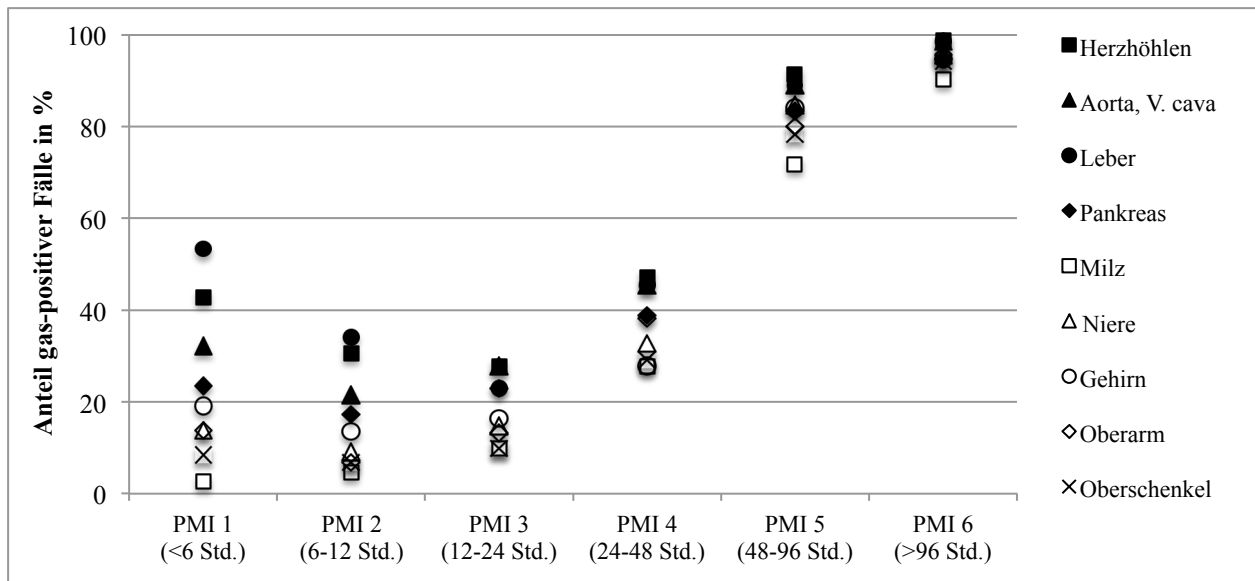
	PMI 1 < 6 Std.	PMI 2 6-12 Std.	PMI 3 12-24 Std.	PMI 4 24-48 Std.	PMI 5 48-96 Std.	PMI 6 > 96 Std.	Gesamt
<b>Anzahl nicht messbare Werte gesamt</b> n (%)	31 (19,62)	4 (2,53)	0	8 (5,06)	13 (8,23)	102 (64,56)	158 (100)
<b>Anzahl betroffener Fälle gesamt</b> n (%)	20 (22,99)	3 (3,45)	0	6 (6,90)	12 (13,79)	46 (52,87)	87 (100)

## 3.2.2 Abhängigkeit vom postmortalen Intervall

### 3.2.2.1 Prozentualer Anteil Gas-positiver Fälle

#### I. Herz und Gefäßsystem

Diagramm 4 (S.42) zeigt den prozentualen Anteil der Gas-positiven Fälle an der Gesamtfallzahl im gleichen PMI. Dieser Anteil bildet die Wahrscheinlichkeit ab, dass ein Fall mit einer bestimmten Liegezeit in der jeweiligen Messregion irgendeine Menge Gas enthält.



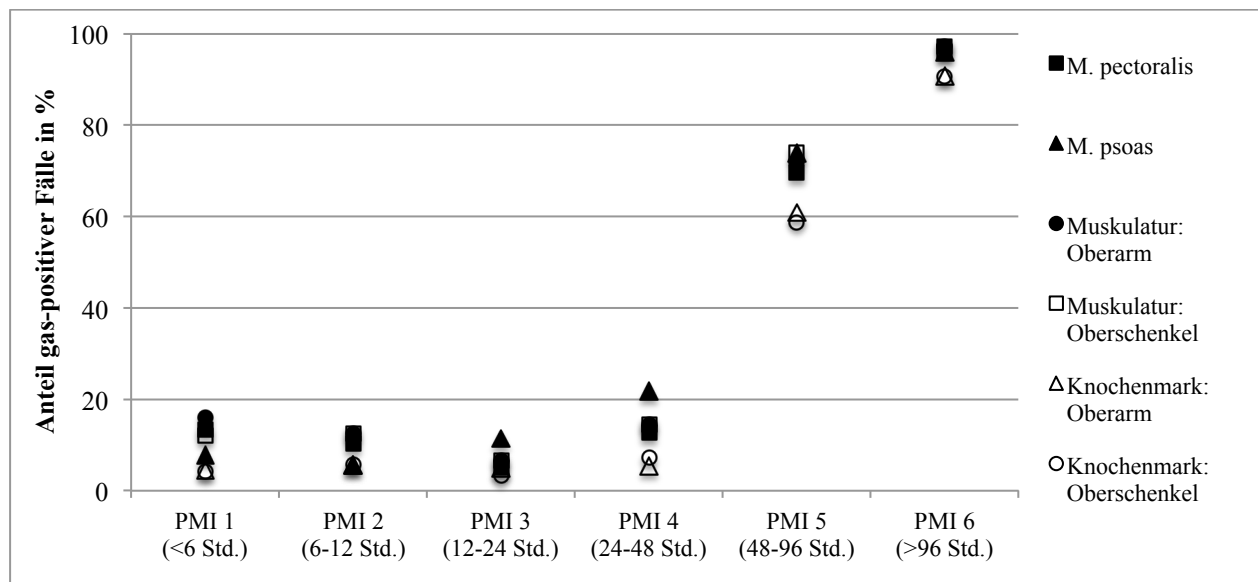
**Diagramm 4:** Prozentualer Anteil Gas-positiver Fälle (Score-Wert > 0) an der Gesamtzahl der Fälle mit gleichem PMI für die Messregionen Herz und Gefäße.

Es zeigt sich, dass mehr als die Hälfte der Fälle in Gruppe 1 (55%) Gas in den Lebergefäßen aufwies, im Herzen waren es etwa 43% und in Aorta und V. cava noch etwa ein Drittel (33%). In den Gefäßen von Niere und den Extremitäten fand sich dagegen nur in 8,5 bis 13,8% der Fälle Gas, in der Milz nur in 2,6% der Fälle. In den PMI-Gruppen 2 und 3 lagen die Werte zum Teil deutlich niedriger als in Gruppe 1. Einzige Ausnahmen waren hierbei die Milz, die einen kontinuierlichen Anstieg von 2,6% auf 9,8% verzeichnete, sowie die Gefäße der Niere und der unteren Extremität, bei denen die Werte in Gruppe 2 erst kleiner und in Gruppe 3 dann wieder größer ausfielen als in Gruppe 1. Bis zu einem PMI von 48 Stunden (Gruppe 4) lagen die prozentualen Anteile der Fälle mit Gasbildung bei maximal 47,3% im Herz sowie bei 45,5% in Aorta/V. cava und in den Gefäßen der Leber. In anderen Organen waren es meist weit unter 40%. Ab einer Liegezeit von 48 Stunden (Gruppe 5 und 6) war dann ein sprunghafter Anstieg zu verzeichnen: in Gruppe 5 waren es in allen Messregionen bereits mehr als 70% der Fälle, die Gasansammlungen aufwiesen, in Gruppe 6 mehr als 90%. Am deutlichsten fiel der Anstieg in Gruppe 6 im Herz (bis auf 98,7%), der Aorta/V. cava (98,6%) und in den Lebergefäßen (95,6%) aus. Bei den zu 100% fehlenden Prozentsätzen handelte es sich um einen einzigen Fall eines älteren Mannes, der in seiner Wohnung an einer gastrointestinalen Blutung starb und bereits in fortgeschrittenem Fäulniszustand aufgefunden wurde. Im Gegensatz zu den vielen anderen fäulnisveränderten Fällen wurde das pmCT hier bereits 13 Stunden nach dem Fund und nicht erst einige Tage später durchgeführt, was eine mögliche Erklärung für die abweichenden Werte sein kann (vgl. Kapitel 3.2.4.2 Ergebnisse und Kapitel 4 Diskussion).

## II. Muskulatur und Knochenmark

Diagramm 5 zeigt den prozentualen Anteil Gas-positiver Fälle in der jeweiligen PMI-Gruppe für die Messregionen Muskulatur und Knochenmark.

Bis zu einer Liegezeit von 48 Stunden (PMI-Gruppen 1-4) lag der relative Anteil an Fällen mit Gas in der Muskulatur in jeder Messregion unter 22%, Gas im Knochenmark wurde nur in unter 8% der Fälle festgestellt. Erst in Gruppe 5 zeigte sich auch hier ein deutlicher Anstieg, in der Muskulatur auf 69 bis 74% und im Knochenmark auf 58 bis 61%. Ab einer Liegezeit von 96 Stunden (Gruppe 6) fand sich in min. 96% der Fälle Gas in der Muskulatur, im Knochenmark in 91% der Fälle.



**Diagramm 5:** Prozentualer Anteil Gas-positiver Fälle (Score-Wert > 0) an der Gesamtzahl der Fälle mit gleichem PMI für die Messregionen Muskulatur und Knochenmark.

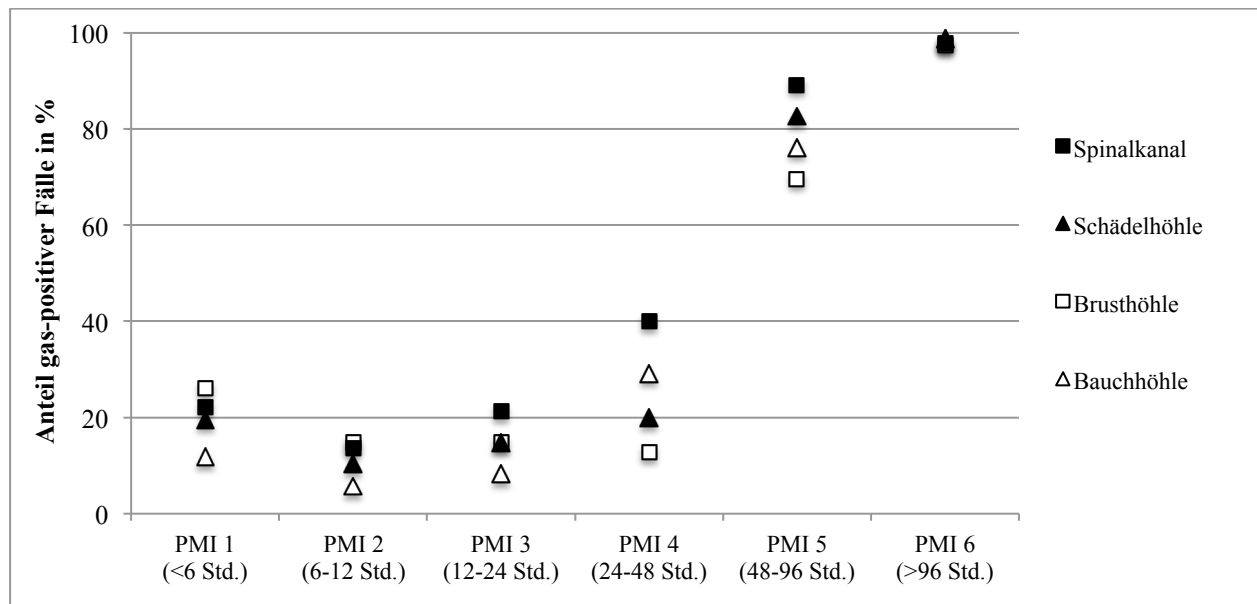
## III. Körperhöhlen und Spinalkanal

In Diagramm 6 (S.44) ist analog zu den oben gezeigten Ergebnissen der relative Anteil Gas-positiver Fälle an der Gesamtfallzahl mit gleicher postmortalen Liegezeit für die Messregionen Spinalkanal sowie Schädel-, Brust- und Bauchhöhle dargestellt.

In PMI-Gruppe 1 lag der Anteil an Fällen mit Gas in der Brusthöhle am höchsten mit rund 30%, am niedrigsten in der Bauchhöhle mit etwa 10%. Die Werte in den Gruppen 2 und 3 lagen auch hier – wie bereits beobachtet – durchweg niedriger, was am ehesten mit einer besonders hohen Fallzahl mit artifizierlicher Gasbeimengung durch offene Verletzungen und traumatische

Todesursachen in dieser Gruppe zu erklären wäre (vgl. Kapitel 3.2.3.2 Drainagen und 3.2.4.1 Äußere offene Verletzungen, Kapitel 4 Diskussion).

In den höheren PMI-Gruppen 4 und 5 war besonders auffällig, dass prozentual die meisten Fälle (40% bzw. 89,1%) Gas im Spinalkanal aufwiesen, seltener wurde Gas in der Brusthöhle gefunden (12,7% bzw. 69,6%). Ab einer Liegezeit von 96 Stunden (Gruppe 6) glichen sich die Werte bei etwa 98% an.



**Diagramm 6:** Prozentualer Anteil Gas-positiver Fälle (Score-Wert > 0) an der Gesamtzahl der Fälle mit gleichem PMI für die Messregionen Spinalkanal und Körperhöhlen.

### 3.2.2.2 Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests

#### I. Herz und Gefäßsystem

Zur Überprüfung der Unterschiede zwischen den PMI-Gruppen wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt, dessen Ergebnisse für die Messregionen des Herz-Kreislauf-Systems in Tabelle 15 (S.45) dargestellt sind. Die durchweg sehr niedrigen Testwerte ( $p \leq 0,001$ ) zeigten hierbei an, dass zwischen den PMI-Gruppen signifikante Unterschiede bestanden, gaben jedoch keinen Hinweis darauf, zwischen welchen Gruppen sie bestanden. Um dies zu prüfen wurde ein paarweiser Vergleich nach Bonferroni durchgeführt, dessen Ergebnis in Tabelle 16 (S.45) dargestellt ist. Diagramm 7 (S.45) zeigt die im Kruskal-Wallis-Test berechneten mittleren Rangwerte, die ähnlich einem arithmetischen Mittel (siehe Kapitel 2.2.5.2 Methodik) ebenfalls einen Überblick über Veränderungen in den einzelnen Gruppen geben.

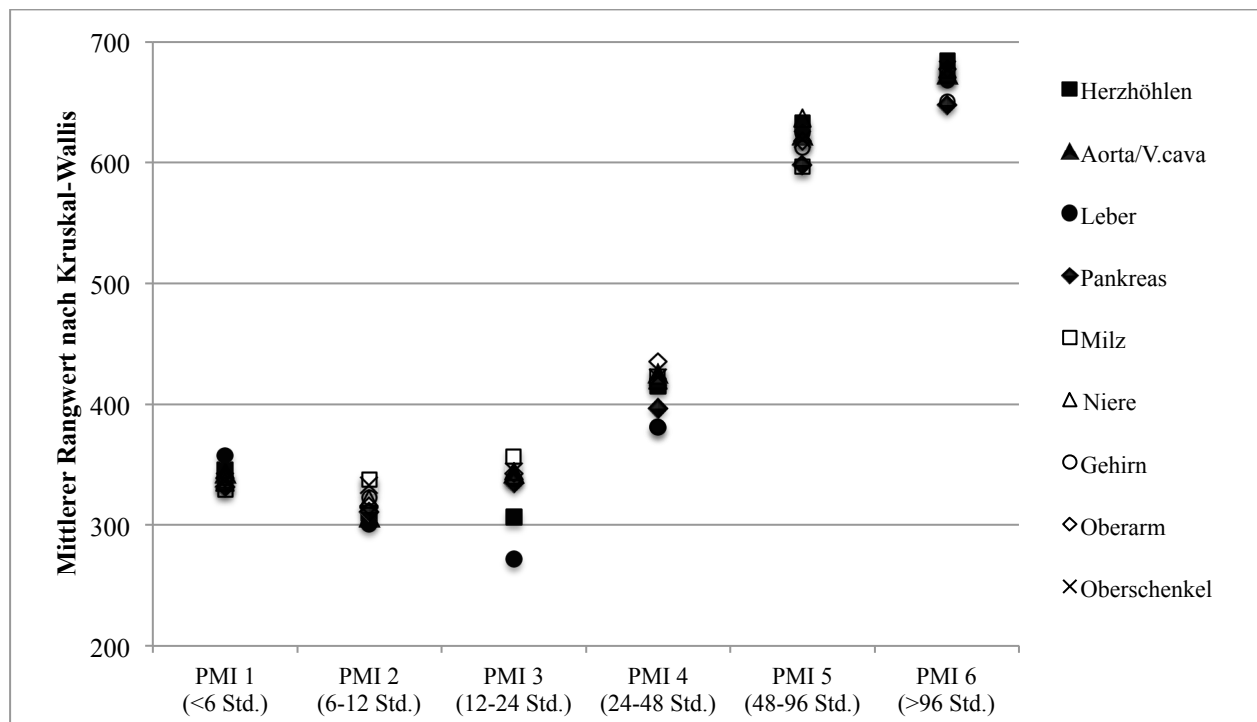
**Tabelle 15:** Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für die Messregionen Herz und Gefäße

	Herz- höhlen	Gefäße							
		Aorta, V. cava	Leber	Pankreas	Niere	Milz	Gehirn	Ober- arm	Ober- schenkel
Anzahl n	783	782	776	725	776	765	758	778	779
Teststatistik (Chi-Quadrat)	254,83 <sup>a</sup>	249,93 <sup>a</sup>	218,37 <sup>a</sup>	197,21 <sup>a</sup>	346,86 <sup>a</sup>	436,43 <sup>a</sup>	254,93 <sup>a</sup>	336,10 <sup>a</sup>	379,850 <sup>a</sup>
Freiheitsgrad (df)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Asympt. Sig. (2-seitiger Test)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

a = Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.

**Tabelle 16:** Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der PMI-Gruppen nach Bonferroni für Herz und Gefäße

Vergleich der Gruppen	Herz- höhlen	Gefäße							
		Aorta, V. cava	Leber	Pankreas	Milz	Niere	Gehirn	Ober- arm	Ober- schenkel
1 – 2	0,142	0,117	<b>0,021</b>	0,305	0,648	0,482	0,420	0,253	0,835
2 – 3	0,933	0,277	0,416	0,394	0,409	0,436	0,594	0,349	0,658
3 – 4	<b>0,005</b>	<b>0,028</b>	<b>0,006</b>	0,060	<b>0,013</b>	<b>0,018</b>	0,188	<b>0,004</b>	<b>0,009</b>
4 – 5	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
5 – 6	0,185	0,187	0,280	0,141	<b>0,007</b>	0,220	0,274	0,069	0,060



**Diagramm 7:** Mittlere Rangwerte von Herz und Gefäßen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit vom PMI.

Die Auswertung dieser Ergebnisse zeigt, dass in nahezu allen Gefäßen, bis auf die der Milz und der unteren Extremität, die mittleren Rangwerte in Gruppe 1 höher ausfielen als in Gruppe 2. In Herz, Aorta/V. cava sowie in den Gefäßen von Leber und Gehirn waren sie sogar höher als in Gruppe 3. In den Gefäßen der Leber war der Unterschied von Gruppe 1 zu Gruppe 2 signifikant ( $p=0,021$ ). Im Unterschied zu Gruppe 1 und 2 lagen die Werte in PMI-Gruppe 3 weiter auseinander, wobei hier insbesondere die Gefäße der Leber mit besonders niedrigen Werten herausstachen. Bei einer Liegezeit zwischen 24 und 48 Stunden (Gruppe 4) zeigten sich erstmals deutlich erhöhte Rangwerte. Die Differenz zu den Werten aus PMI-Gruppe 3 war in allen Messregionen mit Ausnahme der Gefäße von Pankreas und Gehirn signifikant. Ein sprunghafter Anstieg ließ sich zwischen Gruppe 4 und 5 beobachten: in nahezu allen Messregionen lagen die mittleren Rangwerte um mehr als 200 Punkte (ohne Einheit) auseinander, was einem Anstieg um 50% des Wertes in Gruppe 4 entsprach. Zwischen den beiden letzten Gruppen 5 und 6 nahm die Änderungsrate dann wieder stark ab. Lediglich bei den Gefäßen der Milz kam es noch zu einem Werteanstieg mit signifikantem Unterschied ( $p=0,007$ ).

## **II. Muskulatur und Knochenmark**

In den Tabellen 17 und 18 (S.47) sind die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests für ebendiese Messregionen dargestellt. Diagramm 8 (S.47) zeigt die mittleren Rangwerte von Muskulatur und Knochenmark in Abhängigkeit vom PMI.

In den Messregionen Muskulatur und Knochenmark lagen die Rangwerte insgesamt enger beieinander, insbesondere die Werte in den PMI-Gruppen 1 und 2 lagen nahezu identisch. Im Vergleich mit Gruppe 1 gab es hier nur vereinzelt niedrigere Werte in den Gruppen 2 und 3, dies betraf die Messregionen M. pectoralis, M. psoas und die Oberarmmuskulatur. Ab einer Liegezeit von 24 Stunden (Gruppe 4) lagen auch hier die mittleren Rangwerte leicht erhöht, insbesondere der Wert des M. psoas. Einen deutlichen Unterschied gab es wie bereits zuvor beim Vergleich von Gruppe 4 und 5, er ist in allen Messregionen signifikant ( $p<0,001$ ). Im Gegensatz zur Messregion Gefäße war hier auch der Unterschied zwischen Gruppe 5 und 6 noch signifikant ( $p<0,001$ ) und auch im Diagramm deutlich sichtbar.



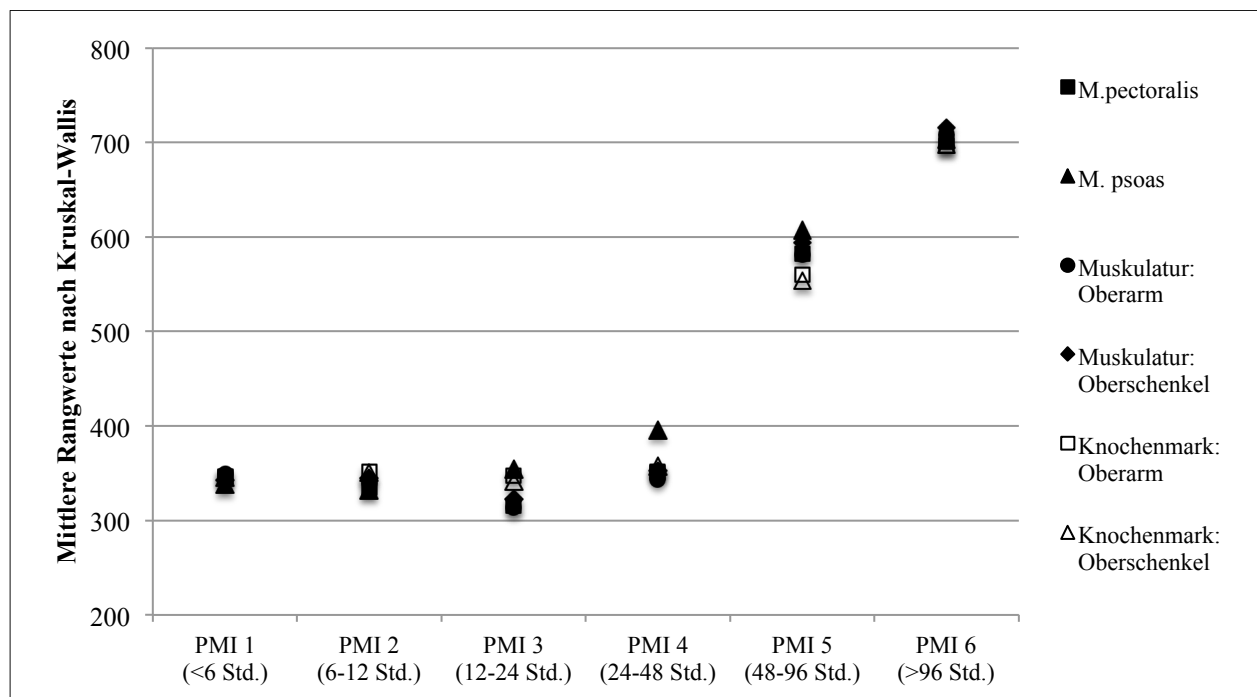
**Tabelle 17:** Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für die Messregionen Muskulatur und Knochenmark

	Muskulatur				Knochenmark	
	M. pectoralis	M. psoas	Oberarm	Oberschenkel	Oberarm	Oberschenkel
Anzahl n	778	784	785	784	785	784
Teststatistik (Chi-Quadrat)	368,416 <sup>a</sup>	425,710 <sup>a</sup>	355,913 <sup>a</sup>	404,551 <sup>a</sup>	449,031 <sup>a</sup>	460,060 <sup>a</sup>
Freiheitsgrad	5	5	5	5	5	5
Asympt. Sig. (2-seitig)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

a = Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.

**Tabelle 18:** Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der PMI-Gruppen nach Bonferroni für Muskulatur und Knochenmark

Vergleich der Gr.	Muskulatur				Knochenmark	
	M. pectoralis	M. psoas	Oberarm	Oberschenkel	Oberarm	Oberschenkel
1 – 2	0,530	0,779	0,630	0,912	0,764	0,747
2 – 3	0,500	0,420	0,363	0,439	0,875	0,693
3 – 4	0,256	0,169	0,351	0,341	0,873	0,549
4 – 5	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
5 – 6	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001



**Diagramm 8:** Mittlere Rangwerte von Muskulatur und Knochenmark nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit vom PMI.

### III. Körperhöhlen und Spinalkanal

Die Tabellen 19 und 20 zeigen die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests für die Messregionen Spinalkanal und Schädel-, Brust- und Bauchhöhle. Die Konstellation der mittleren Rangwerte ist in Diagramm 9 (S.49) dargestellt.

Insgesamt zeigte sich ein sehr ähnliches Bild wie bereits in den zuvor beschriebenen Ergebnissen dargestellt. In den Gruppen 1-3 mit einem PMI von max. 24 Stunden lagen die Rangwerte auf einem ähnlichen Niveau, wobei es wieder in allen Regionen eine Abweichung nach oben in Gruppe 1 gab. Dies traf insbesondere auf die Brusthöhle zu, die in den Gruppen 4 und 5 bemerkenswerter Weise wiederum die niedrigsten Werte zeigte.

Ab einem PMI von 48 Stunden (Gruppe 4-6) war auch hier wieder ein deutlicher Werteanstieg zu beobachten, der in der Messregion Bauchhöhle zwischen Gruppe 3 und 4 ( $p=0,012$ ) und in allen Messregionen zwischen Gruppe 4 und 5 signifikant ausfiel ( $p<0,001$ ). Zwischen PMI-Gruppe 5 und 6 gab es in den drei Körperhöhlen jeweils noch einen signifikanten Unterschied zu beobachten ( $p<0,001$ ).

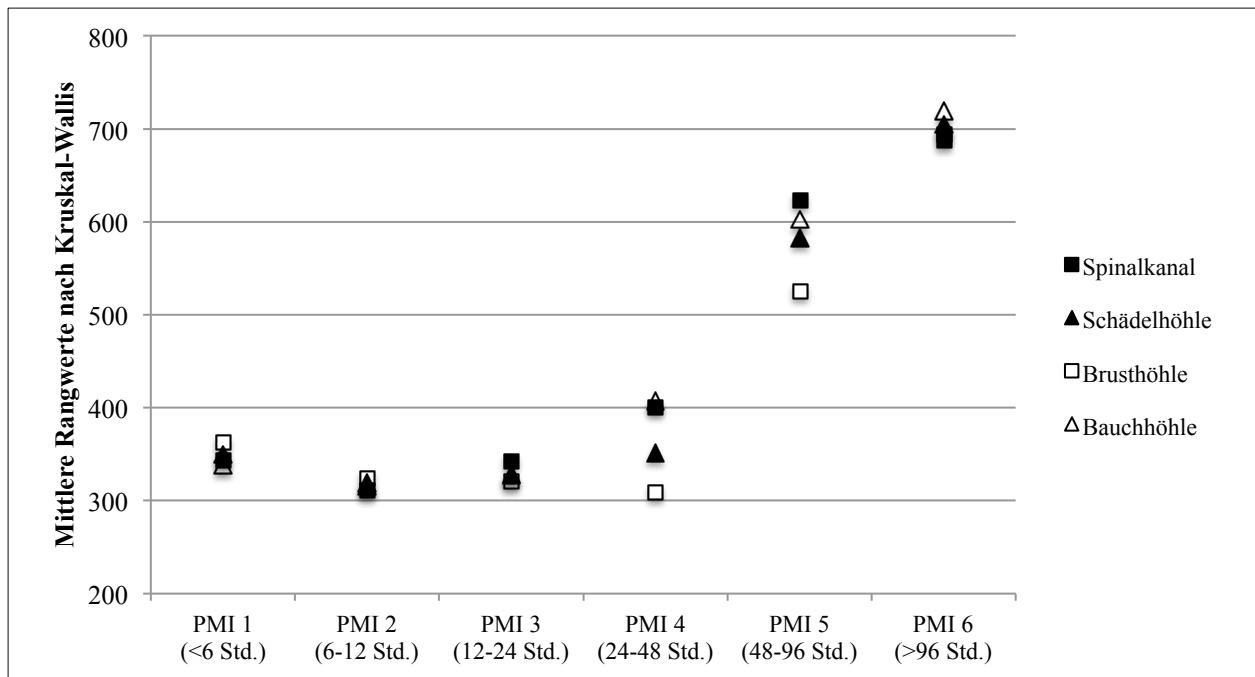
**Tabelle 19:** Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für die Messregionen Muskulatur und Knochenmark

	Spinalkanal	Körperhöhlen		
		Schädelhöhle	Brusthöhle	Bauchhöhle
Anzahl n	785	783	784	783
Teststatistik (Chi-Quadrat)	298,812 <sup>a</sup>	321,489 <sup>a</sup>	258,924 <sup>a</sup>	421,898 <sup>a</sup>
Freiheitsgrad	5	5	5	5
Asympt. Sig. (2-seitig)	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>

a = Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.

**Tabelle 20:** Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der PMI-Gruppen nach Bonferroni für Spinalkanal und Körperhöhlen

Vergleich der Gruppen	Spinalkanal	Körperhöhlen		
		Schädelhöhle	Brusthöhle	Bauchhöhle
1 – 2	0,138	0,118	0,080	0,329
2 – 3	0,317	0,692	0,895	0,749
3 – 4	0,099	0,504	0,754	<b>0,012</b>
4 – 5	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>
5 – 6	0,072	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>



**Diagramm 9:** Mittlere Rangwerte von Spinalkanal und Körperhöhlen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit vom PMI.

### 3.2.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt lassen sich anhand der gezeigten Ergebnisse zwei Phänomene beobachten.

Zum einen lagen die gemessenen Gas-Werte in der ersten Gruppe mit einer Liegezeit von unter sechs Stunden v.a. in den Gefäßen häufig deutlich über denen mit einem PMI zwischen sechs und 24 Stunden (Gruppe 2 und 3), was möglicherweise durch besonders viele Fälle mit artifiziellen Gaseinschlüssen aufgrund von perforierenden oder traumatischen Verletzungen in dieser Gruppe zu erklären wäre. Auch in den Körperhöhlen war in dieser Gruppe eine deutliche Abweichung der Werte zu erkennen, was zu offenen Traumata durchaus passen würde. Insgesamt schien das Gasvorkommen in Muskulatur und Knochenmark am wenigsten von äußeren Verletzungen abzuhängen, da in PMI-Gruppe 1 die Werte auf einem sehr ähnlichen Niveau wie in Gruppe 2 und 3 lagen.

Zum zweiten war in fast allen Messregionen ein sprunghafter Anstieg der Werte von PMI-Gruppe 4 (24-48 Stunden Liegezeit) zu Gruppe 5 (48-96 Stunden Liegezeit) zu beobachten. Inwiefern dies als Zeichen einer beginnenden Fäulnisgasbildung gewertet werden kann, wird im Kapitel 4 (Diskussion) thematisiert. In diesem Zusammenhang ist auch festzustellen, dass die Messwerte in der Messregion Herz und Gefäße bereits in Gruppe 4 deutlich zulegten, während in den Regionen Muskulatur, Knochenmark und den drei Körperhöhlen hier noch kaum Veränderungen sichtbar waren.

### 3.2.3 Einfluss von Gefäßzugängen und äußeren Verletzungen

In der Gesamtauswertung zeigten sich besonders bei Aorta und V. cava, den Gefäßen der Leber und den Herzhöhlen teils signifikant hohe Werte in PMI-Gruppe 1, die als Gruppe mit dem kürzesten PMI (unter sechs Stunden) eigentlich die geringsten Messwerte zeigen müsste. Am ehesten zu erklären wäre dieser Unterschied mit einer hohen Anzahl Fälle mit nicht fäulnisbedingten Gaseinschlüssen, also bspw. offenen Verletzungen als Eintrittspforte für atmosphärische Luft. Im Folgenden wird deshalb der Einfluss dieser Störfaktoren auf den Fund von Gas im pmCT untersucht.

#### 3.2.3.1 Gefäßzugänge

Ob medizinische Gefäßzugänge eine potenzielle Quelle für intravasales Gas darstellen, sollte in folgender Statistik überprüft werden. Dafür wurden nur Fälle aus der Gruppe 1 mit einer postmortalen Liegezeit unter sechs Stunden einbezogen, die keine sonstigen äußeren Verletzungen aufwiesen und auch keine anderen invasiven medizinischen Maßnahmen wie Drainagen oder Katheter besaßen. Getestet wurden nur die Messregionen des Herz-Kreislauf-Systems, da ein Effekt auf Muskulatur, Knochenmark oder Körperhöhlen nicht zu erwarten wäre.

**Tabelle 21:** Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für med. Gefäßzugänge in den Messregionen Herz und Gefäße

Nur PMI-Gruppe 1 (<6 Std.), keine äußeren Verletzungen, keine Drainagen/Katheter. a = Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst. b = Mehrfachvergleiche nicht notwendig, da kein signifikanter Unterschied zwischen den Stichproben besteht.

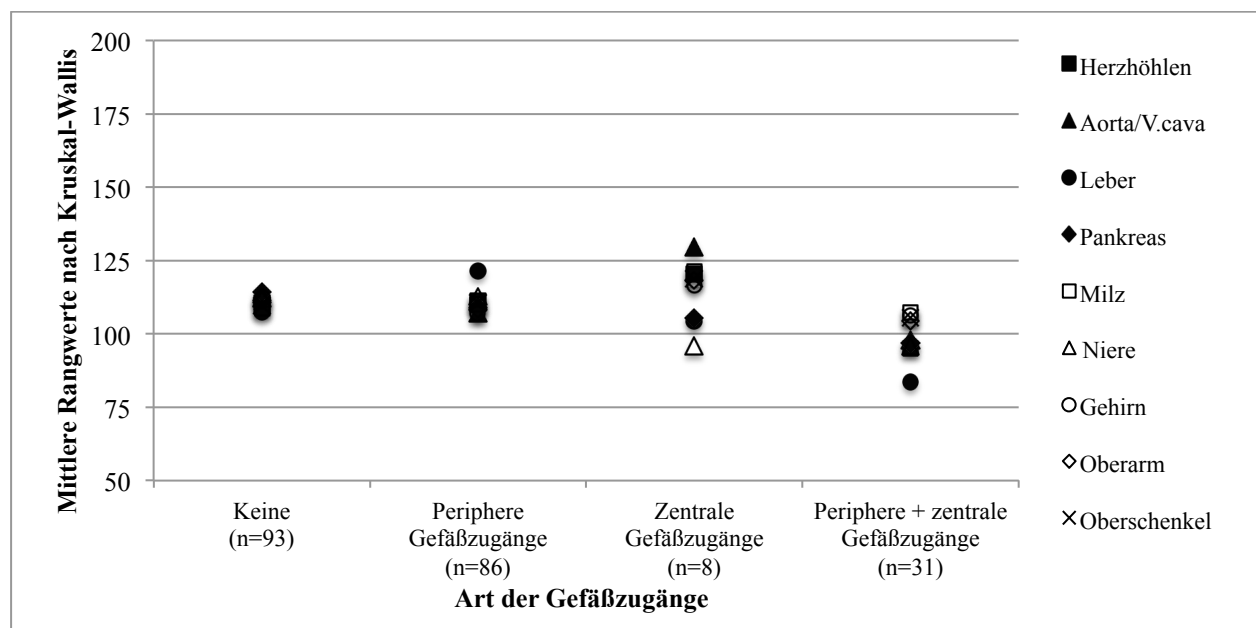
	Herz- höhlen	Gefäße							
		Aorta, V. cava	Leber	Pankreas	Niere	Milz	Gehirn	Ober- arm	Ober- schenkel
Anzahl n	217	218	218	218	218	218	218	218	218
Teststatistik (Chi-Quadrat)	3,138 <sup>a,b</sup>	4,849 <sup>a,b</sup>	10,609 <sup>a</sup>	4,010 <sup>a,b</sup>	6,674 <sup>a,b</sup>	6,179 <sup>a,b</sup>	3,158 <sup>a,b</sup>	3,592 <sup>a,b</sup>	3,130 <sup>a,b</sup>
Freiheitsgrad	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Asympt. Sig. (2-seitig)	0,371	0,183	<b>0,014</b>	0,260	0,083	0,103	0,368	0,309	0,372

Tabelle 21 zeigt das Ergebnis des Kruskal-Wallis-Tests für die Regionen Herz und Gefäße. Es fällt auf, dass sich im Gegensatz zu allen anderen bisherigen Tests (vgl. Kapitel 3.2.2) nur in den Gefäßen der Leber überhaupt ein signifikanter Unterschied zeigte. Alle anderen getesteten Messregionen zeigten keine besonderen Abweichungen. Vergleicht man die Gruppen

miteinander (Tabelle 22), kommt man zu dem Ergebnis, dass es bei den Gefäßen der Leber offenbar einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen „Keine Gefäßzugänge“ und „Periphere und zentrale Gefäßzugänge“ gab ( $p=0,042$ ). Vergleicht man dieses Ergebnis mit Diagramm 10 zeigt sich jedoch, dass dieser keinesfalls darin bestand, dass mehr Gas in der Gruppe mit Gefäßzugängen vorhanden war, sondern genau umgekehrt. In der Gruppe mit beiden Arten von Gefäßzugängen wiesen die Gefäße der Leber den niedrigsten mittleren Rangwert aller Gruppen auf. Auch bei Betrachtung des gesamten Diagramms zeigte sich keine deutliche Abweichung einer ganzen Gruppe nach oben oder unten. Die hier festgestellten Unterschiede scheinen deshalb zufällig zustande gekommen zu sein. Die Hypothese, dass Gefäßzugänge eine Eintrittspforte für atmosphärische Luft darstellen und Tote mit diesen deshalb ein höheres Vorkommen an intravasalem Gas aufweisen müssten als Tote ohne Gefäßzugänge, konnte auf Basis der vorliegenden Ergebnisse deshalb nicht bestätigt werden.

**Tabelle 22:** Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der Gruppen (Gefäßzugänge) nach Bonferroni für Lebergefäße

Vergleich der Gruppen	Lebergefäße
Keine – Peripher Zugänge	0,095
Keine – Zentrale Zugänge	0,877
Keine – Periphere + zentrale Gefäßzugänge	<b>0,042</b>
Periphere – zentrale Zugänge	0,407



**Diagramm 10:** Mittlere Rangwerte von Herz und Gefäßen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit von der Art des Gefäßzugangs. Nur PMI-Gruppe 1 (<6 Std.), keine äußeren Verletzungen, keine Drainagen/Katheter.

### 3.2.3.2 Drainagen

Neben Gefäßzugängen können auch Katheter oder Drainagen zum Eindringen von atmosphärischer Luft, v.a. in eine der drei Körperhöhlen, führen. Um dies zu untersuchen, wurden deshalb nur Fälle aus Gruppe 1 mit einer postmortalen Liegezeit unter sechs Stunden einbezogen, die keine sonstigen äußeren Verletzungen aufwiesen. Wegen der anatomischen Nähe des Spinalkanals zur Schädelhöhle wurde dieser mitgetestet. Es wurden außerdem nur Fälle mit Drainagen in einer einzigen Körperhöhle berücksichtigt, um Überschneidungen zu vermeiden.

Tabelle 23 zeigt das Ergebnis des Kruskal-Wallis-Tests für die getesteten Messregionen. Es ist zu sehen, dass lediglich in der Brusthöhle überhaupt ein signifikanter Unterschied auszumachen war und in den drei anderen Messregionen anscheinend kein maßgeblicher Einfluss von Drainagen bestand. Im paarweisen Vergleich (Tabelle 24) zeigte sich, dass bei einer liegenden Thoraxdrainage die Werte der Brusthöhle im Vergleich zu Fällen ohne Drainagen oder mit Drainagen in Schädel- oder Bauchhöhle jeweils signifikant hoch waren. Die zugehörigen mittleren Rangwerte sind in Diagramm 11 dargestellt.

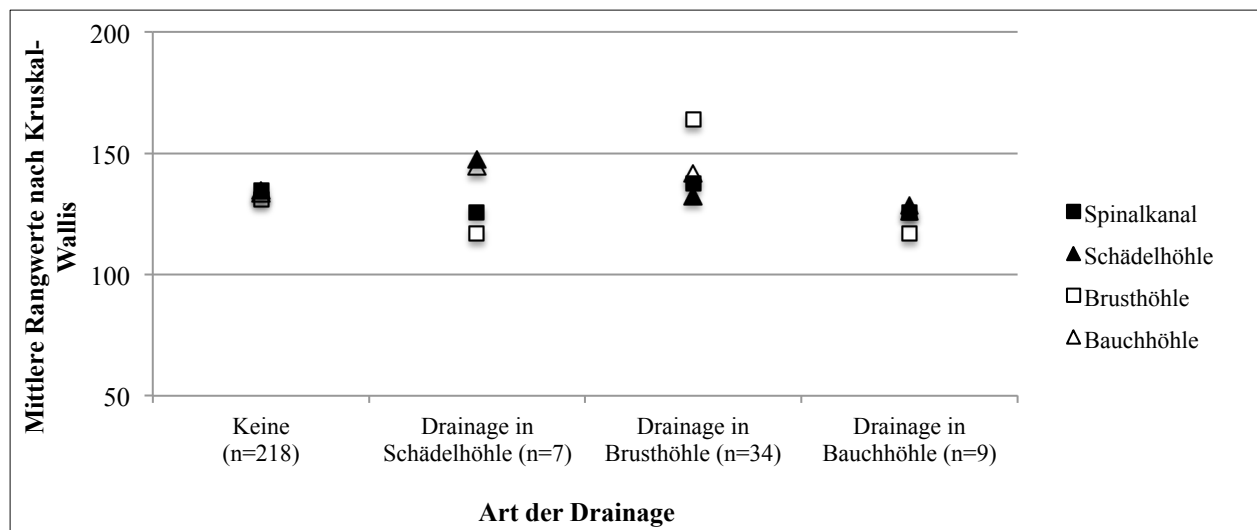
**Tabelle 23:** Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für Drainagen in den Messregionen Spinalkanal und Körperhöhlen

Nur PMI-Gruppe 1 (<6 Std.), keine äußeren Verletzungen. a = Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst. b = Mehrfachvergleiche nicht notwendig, da kein signifikanter Unterschied zwischen den Stichproben besteht.

	Spinalkanal	Körperhöhlen		
		Schädelhöhle	Brusthöhle	Bauchhöhle
Anzahl n	268	268	268	268
Teststatistik (Chi-Quadrat)	1,419 <sup>a,b</sup>	2,168 <sup>a,b</sup>	17,837 <sup>a,b</sup>	3,183 <sup>a,b</sup>
Freiheitsgrad	3	3	3	3
Asympt. Sig. (2-seitig)	0,701	0,538	<0,001	0,364

**Tabelle 24:** Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der Gruppen (Drainagen) nach Bonferroni für die Brusthöhle

Vergleich der Gruppen	Brusthöhle
Keine Drainage – Thoraxdrainage	<0,001
Thoraxdrainage – Drainage in Schädelhöhle	0,013
Thoraxdrainage – Drainage im Bauchhöhle	0,006



**Diagramm 11:** Mittlere Rangwerte von Spinalkanal und Körperhöhlen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit von der Art der Drainage

Nur PMI-Gruppe 1 (<6 Std.), keine äußeren Verletzungen.

### 3.2.3.3 Äußere offene Verletzungen

Um die Auswirkung verschiedener Verletzungsmuster zu prüfen, wurden hier ebenfalls nur Fälle aus Gruppe 1 (PMI unter sechs Stunden) mit einer oder mehr Verletzungen des jeweiligen Typs eingeschlossen. Mehrfachverletzungen mit unterschiedlichen Verletzungstypen (z.B. Quetsch-Riss-Wunden und Stichverletzungen) wurden nicht einbezogen, da es zu Überschneidungen kommen würde und der Einfluss der jeweiligen Verletzung verfälscht werden würde. Fälle mit medizinischer Versorgung, also z.B. Gefäßzugängen oder Drainagen, wurden ebenfalls ausgeschlossen.

**Tabelle 25:** Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für Verletzungen in den Messregionen Herz und Gefäße

Nur PMI-Gruppe 1 (< 6 Std.), keine Mehrfachverletzungen, keine Gefäßzugänge oder Drainagen. a = Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst. b = Mehrfachvergleiche nicht notwendig, da kein signifikanter Unterschied zwischen den Stichproben besteht.

	Herz- höhlen	Gefäße							
		Aorta, V. cava	Leber	Pankreas	Niere	Milz	Gehirn	Ober- arm	Ober- schenkel
Anzahl n	189	190	189	187	188	187	186	190	189
Teststatistik (Chi-Quadrat)	46,437 <sup>a</sup>	34,948 <sup>a</sup>	29,784 <sup>a</sup>	10,131 <sup>a,b</sup>	8,104 <sup>a,b</sup>	8,494 <sup>a,b</sup>	64,646 <sup>a</sup>	30,352 <sup>a</sup>	27,595 <sup>a</sup>
Freiheitsgrad	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Asympt. Sig. (2-seitig)	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,119	0,231	0,204	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>

**Tabelle 26:** Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für Verletzungen in den Messregionen Spinalkanal, Körperhöhlen, Muskulatur und Knochenmark

Nur PMI-Gruppe 1 (< 6 Std.), keine Mehrfachverletzungen, keine Gefäßzugänge oder Drainagen. a = Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst. b = Mehrfachvergleiche nicht notwendig, da kein sign. Unterschied zwischen den Stichproben besteht

	Spinalkanal	Körperhöhlen			Muskulatur				Knochenmark	
		Schädelhöhle	Brusthöhle	Bauchhöhle	M. pector.	M. psoas	Oberarm	Oberschenkel	Oberarm	Oberschenkel
Anzahl n	190	189	189	188	187	190	190	189	190	189
Teststatistik (Chi-Quadrat)	90,75 <sup>a</sup>	78,16 <sup>a</sup>	39,38 <sup>a</sup>	20,15 <sup>a</sup>	20,16 <sup>a</sup>	20,64 <sup>a</sup>	34,55 <sup>a</sup>	24,49 <sup>a</sup>	34,42 <sup>a</sup>	29,05 <sup>a</sup>
Freiheitsgrad	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Asympt. Sig. (2-seitig)	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,003</b>	<b>0,003</b>	<b>0,002</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>

**Tabelle 27:** Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der Gruppen (Verletzungen) nach Bonferroni von Herz, Gefäßen und Knochenmark

Nur PMI-Gruppe 1 (< 6 Std.), keine Mehrfachverletzungen, keine Gefäßzugänge oder Drainagen.

Vergleich der Gruppen	Herzhöhlen	Gefäße					Knochenmark	
		Aorta, V. cava	Leber	Gehirn	Oberarm	Oberschenkel	Oberarm	Oberschenkel
Keine – QRW	<b>0,001</b>	<b>0,003</b>	<b>0,005</b>	<b>0,009</b>	<b>0,008</b>	0,494	<b>0,046</b>	0,827
Keine – Schnittverletzungen	0,713	0,951	0,848	0,059	0,139	0,611	0,297	0,879
Keine – Stichverletzungen	<b>0,042</b>	0,933	<b>0,021</b>	0,421	0,720	0,810	1,000	0,916
Keine – Schussverletzungen	<b>0,000</b>	<b>0,011</b>	<b>0,010</b>	<b>0,000</b>	0,075	0,725	1,000	0,858
Keine – Zertrümmerung	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,004</b>	<b>0,014</b>
Keine – Verbrennungen	0,835	0,821	<b>0,040</b>	0,477	<b>0,012</b>	<b>0,001</b>	<b>0,000</b>	<b>0,001</b>

**Tabelle 28:** Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der Gruppen (Verletzungen) nach Bonferroni von Spinalkanal, Körperhöhlen und Muskulatur

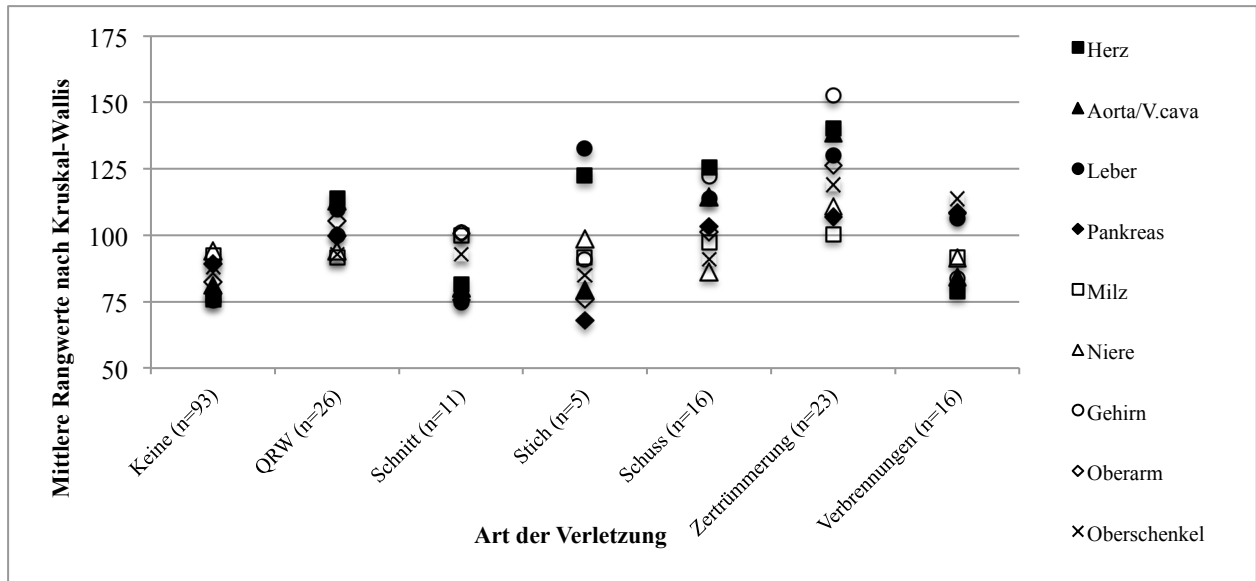
Nur PMI-Gruppe 1 (< 6 Std.), keine Mehrfachverletzungen, keine Gefäßzugänge oder Drainagen.

Vergleich der Gruppen	Spinalkanal	Körperhöhlen			Muskulatur			
		Schädelhöhle	Brusthöhle	Bauchhöhle	M. pectoralis	M. psoas	Oberarm	Oberschenkel
Keine – QRW	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,002</b>	<b>0,003</b>	0,307	<b>0,000</b>	<b>0,029</b>
Keine – Schnittverletzungen	0,102	0,473	0,226	0,222	0,365	0,161	0,425	0,346
Keine – Stichverletzungen	0,764	0,805	0,173	0,268	0,323	0,760	0,432	0,690
Keine – Schussverletzungen	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,485	0,401	0,232	0,363	0,527	0,499
Keine – Zertrümmerung	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,003</b>	<b>0,015</b>
Keine – Verbrennungen	0,995	<b>0,036</b>	0,305	0,822	<b>0,036</b>	0,845	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>



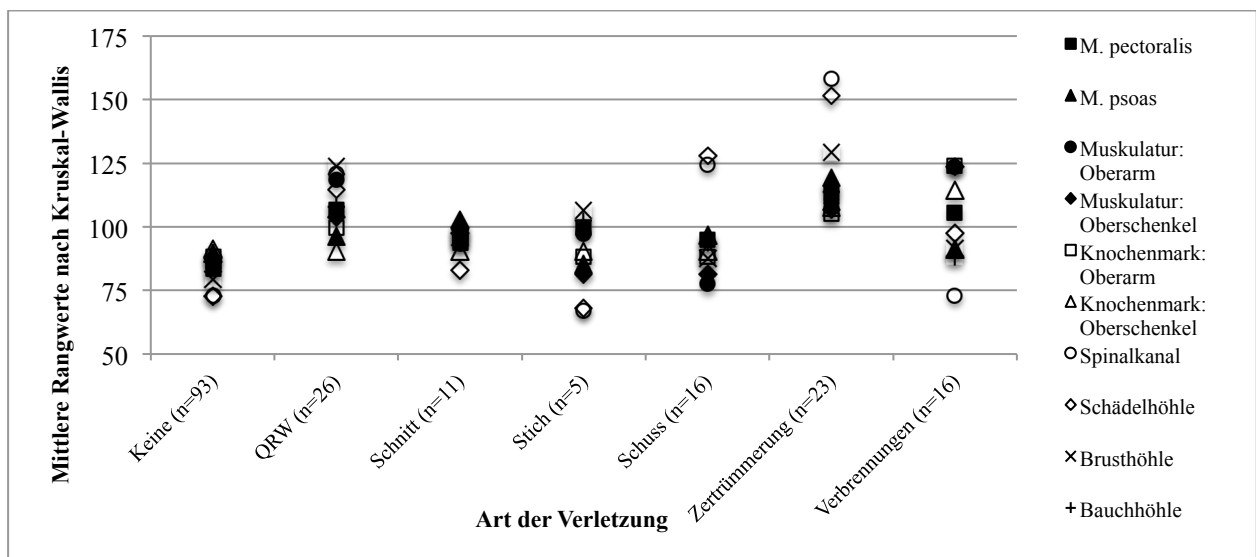
Wie in den Diagrammen 12 und 13 (S.56) zu sehen ist und durch die Ergebnisse der Tabellen 25 bis 28 (S.53-54) bestätigt wird, zeigten die untersuchten Verletzungsarten zum Teil sehr unterschiedliche Werte in den einzelnen Messregionen. Während bei Fällen ohne jegliche Verletzungen die Werte sehr eng beieinander lagen, kam es je nach Verletzungsart zu einer mehr oder weniger ausgeprägten Streuung.

Auffällig ist, dass Schnittverletzungen offenbar den geringsten Einfluss auf artifizielles Gas sowohl im Gefäßsystem als auch in Muskulatur, Knochenmark und den Körperhöhlen hatten. Es ließ sich in keiner einzigen Messregion ein signifikanter Unterschied feststellen. Im Gegensatz dazu wurden bei Quetsch-Riss-Wunden und größeren Zertrümmerungen oder Zerreißen in nahezu allen Regionen signifikant hohe Werte festgestellt. Während in Muskulatur und Knochenmark kein besonderer Schwerpunkt auszumachen ist, lagen bei den Gefäßen der kleinen inneren Organe (Milz, Pankreas, Niere) die Werte dabei vor allem am unteren Rand und bei der Schädelhöhle und dem Spinalkanal deutlich am oberen Rand, was v.a. auf einen hohen Anteil offener Schädel-Hirn-Traumata in dieser Gruppe zurückgehen kann. Bei Stichverletzungen ließ sich ebenfalls ein Schwerpunkt beobachten: mit großem Abstand waren hier die Gefäße der Leber und Herzhöhlen am deutlichsten betroffen, während in allen anderen Messregionen keine signifikanten Unterschiede zur Gruppe ohne Verletzungen festzustellen waren. Schussverletzungen führten nach diesen Ergebnissen hauptsächlich zu Gas in den herznahen Gefäßabschnitten (Lebergefäße, Aorta/V. cava) und dem Herz selbst. Außerdem waren hier ebenfalls besonders die Schädelhöhle und der Spinalkanal, in geringerem Maße auch die Bauchhöhle betroffen. Auch in dieser Gruppe ist von einer hohen Anzahl Schädeldurchschüsse, klassischer Weise in suizidaler Absicht, auszugehen. Während die Werte von Gefäßen, Muskulatur und Knochenmark der Extremitäten bisher noch keine besondere Rolle spielten, sieht dies in der Gruppe Verbrennungen anders aus: hier sind es insbesondere die Extremitäten und weniger die zentralen Gefäße oder großen Körperhöhlen, die im Vergleich mit der Gruppe ohne Verletzungen hohe Werte aufwiesen. Signifikante Unterschiede gab es hier in allen Extremitäten-Messregionen sowie dem M. pectoralis, den Gefäßen der Leber und der Schädelhöhle. Insgesamt zeigte sich hier besonders viel Gas in der oberflächlichen Muskulatur, während der M. psoas keinen signifikanten Unterschied zur Gruppe ohne Verletzungen aufwies. Dass die Extremitäten besonders stark betroffen waren, lässt sich mit dem schnelleren Verbrennen der Extremitäten im Vergleich zum Rumpf vereinbaren.



**Diagramm 12:** Mittlere Rangwerte von Herz und Gefäßen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit von der Verletzungsart

Nur PMI-Gruppe 1 (<6 Std.), keine Gefäßzugänge, keine Drainagen/Katheter.



**Diagramm 13:** Mittlere Rangwerte von Muskulatur, Knochenmark, Spinalkanal und Körperhöhlen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit von der Verletzungsart

Nur PMI-Gruppe 1 (<6 Std.), keine Gefäßzugänge, keine Drainagen/Katheter.

### 3.2.4 Andere Einflussfaktoren

#### 3.2.4.1 Todesursache

Um herauszufinden, was Fälle mit kurzem PMI (unter sechs Stunden) ohne äußere Verletzungen und ohne medizinische Versorgung beim Auftreten von intravasalem Gas im pmCT beeinflusst, wurden hier diese Fälle im Hinblick auf ihre Todesursache untersucht. Die Todesursache (z.B.

ein Polytrauma) kann Aufschluss darüber geben, was mit dem Leichnam kurz vor dem Tod passiert ist und ob es z.B. einen Aufprall oder ein anderes Trauma gegeben hat. Wie bereits in der Einleitung (vgl. Kapitel 1.2.4) beschrieben, kann es auch durch von außen wirkende Kräfte wie z.B. stumpfes Trauma zur Ruptur von pulmonalen Gefäßen und damit zu Übertritt von Gas ins Gefäßsystem kommen.

## I. Herz und Gefäßsystem

In Diagramm 14 (S.58) ist die Verteilung der mittleren Rangwerte dargestellt. Es ist eine insgesamt homogene Verteilung der Rangwerte über die verschiedenen Gruppen zu erkennen. Lediglich in der Gruppe Schlaganfall gab es eine sichtbare Abweichung in der Messregion Lebergefäße, die jedoch nicht signifikant ist. In den Gruppen Ertrinken, Schädel-Hirn-Trauma und Polytrauma war die Streuung insgesamt höher als in den anderen Gruppen. Wie Tabelle 29 zu entnehmen ist, unterschieden sich die Rangwerte nur in den Regionen Herzhöhlen und Gefäße des Gehirns überhaupt signifikant. Im paarweisen Vergleich (Tabelle 30, S.58) zeigte sich dieser in der Messregion Herzhöhlen immer im Vergleich der Gruppe Polytrauma mit jeweils einer beliebigen anderen Gruppe, lediglich im Vergleich mit der Gruppe Ertrinken war er nicht signifikant. Bei den Gefäßen des Gehirns war der Unterschied sowohl für die Gruppe Polytrauma als auch Schädel-Hirn-Trauma festzustellen und durchweg signifikant.

Insgesamt ist also festzuhalten, dass bei äußerlich unversehrten Leichnamen mit kurzem PMI in den Herzhöhlen und den Gefäßen des Gehirns erhöhte Mengen Gas bei einem Polytrauma als Todesursache zu finden waren, bei den Hirngefäßen zusätzlich auch bei einem Schädel-Hirn-Trauma.

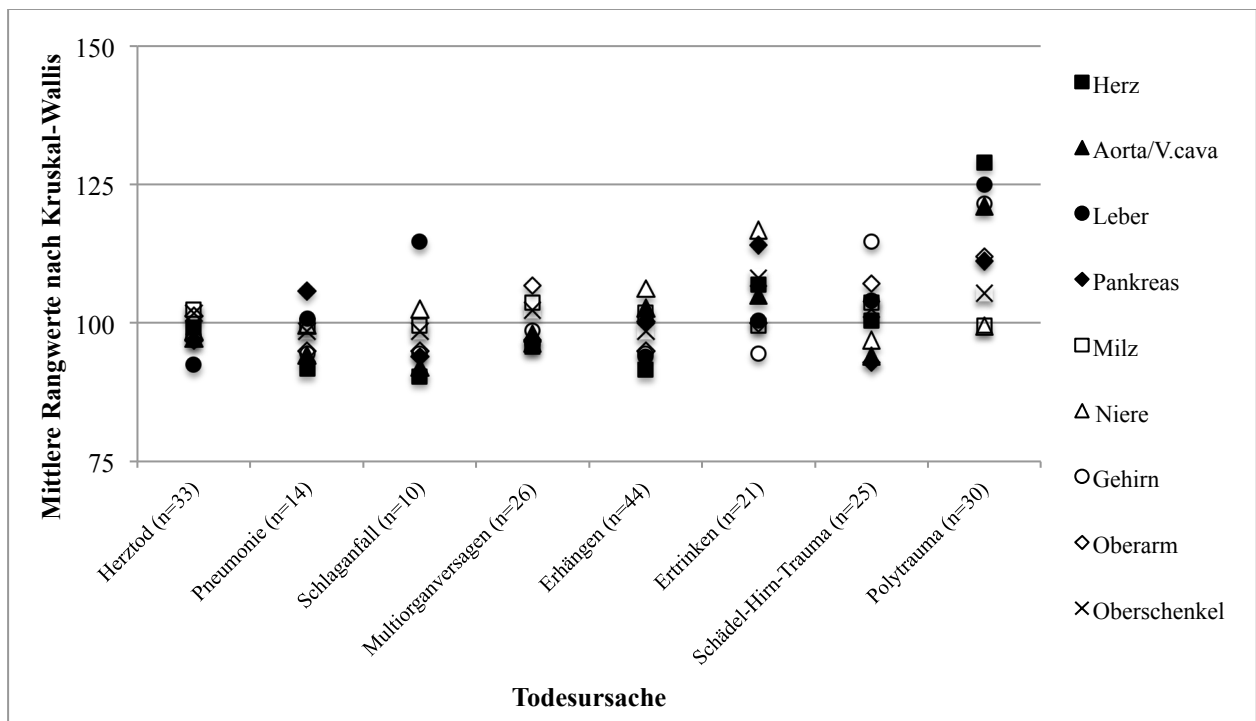
**Tabelle 29:** Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für Todesursachen in den Messregionen Herz und Gefäße

Nur PMI-Gruppe 1 (< 6 Std.), keine äußeren Verletzungen, keine Gefäßzugänge oder Drainagen. a = Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst. b = Mehrfachvergleiche nicht notwendig, da ein signifikanter Unterschied zwischen den Stichproben besteht.

	Herz- höhlen	Gefäße							
		Aorta, V. cava	Leber	Pankreas	Niere	Milz	Gehirn	Ober- arm	Ober- schenkel
Anzahl n	202	203	203	202	203	202	203	203	203
Teststatistik (Chi-Quadrat)	14,355 <sup>a</sup>	9,312 <sup>a,b</sup>	8,968 <sup>a,b</sup>	6,977 <sup>a,b</sup>	8,501 <sup>a,b</sup>	2,787 <sup>a,b</sup>	30,277 <sup>a</sup>	11,46 <sup>a,b</sup>	5,756 <sup>a,b</sup>
Freiheitsgrad	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Asympt. Sig. (2-seitig)	<b>0,045</b>	0,231	0,255	0,431	0,291	0,904	<b>&lt;0,001</b>	0,120	0,569

**Tabelle 30:** Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der Todesursachen nach Bonferroni für Herz und Hirngefäße

Vergleich der Gruppen	Herz- höhlen	Gefäße des Gehirns
Herztod – SHT	0,915	<b>0,015</b>
Herztod – Polytrauma	<b>0,011</b>	<b>&lt;0,001</b>
Pneumonie – SHT	0,578	<b>0,023</b>
Pneumonie – Polytrauma	<b>0,014</b>	<b>0,002</b>
Schlaganfall – SHT	0,566	<b>0,043</b>
Schlaganfall – Polytrauma	<b>0,024</b>	<b>0,005</b>
MOV – SHT	0,718	<b>0,031</b>
MOV – Polytrauma	<b>0,008</b>	<b>0,001</b>
Erhängen – SHT	0,446	<b>0,002</b>
Erhängen – Polytrauma	<b>0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>
Ertrinken – SHT	0,642	<b>0,010</b>
Ertrinken – Polytrauma	0,098	<b>&lt;0,001</b>
SHT – Polytrauma	<b>0,026</b>	0,340

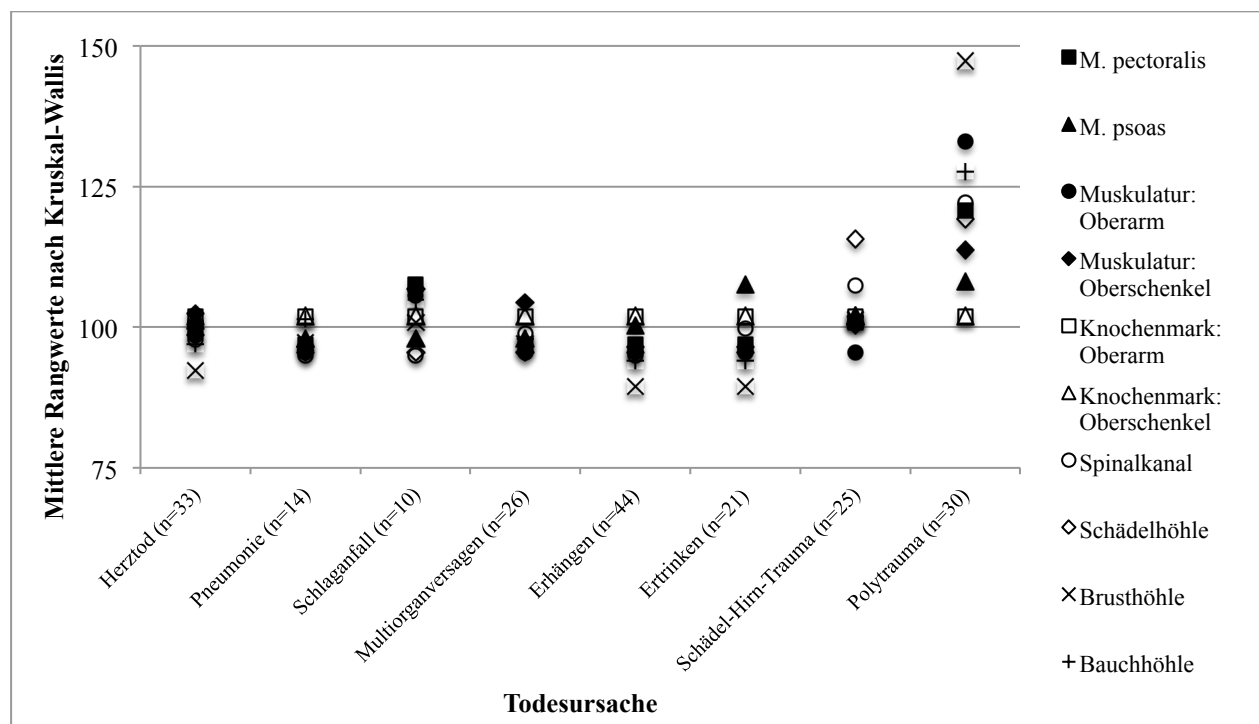


**Diagramm 14:** Mittlere Rangwerte von Herz und Gefäßen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit von der Todesursache

Nur PMI 1 (<6 Std.), keine äußeren Verletzungen, keine Gefäßzugänge oder Drainagen.

## II. Muskulatur, Knochenmark, Körperhöhlen und Spinalkanal

In den Messregionen Muskulatur, Knochenmark, Körperhöhlen und Spinalkanal zeigte sich insgesamt eine im Vergleich zur Messregion Gefäße (siehe oben) deutliche Abweichung der Rangwerte in der Gruppe Polytrauma und Schädel-Hirn-Trauma im Vergleich zu den anderen eher atraumatischen Todesursachen. Wie in Diagramm 15 zu erkennen ist, lagen die Rangwerte in den Gruppen Herztod bis Ertrinken auf relativ ähnlichem Niveau mit nur geringer Streuung. In der Gruppe Schädel-Hirn-Trauma war bereits eine deutliche Abweichung in den Messregionen Spinalkanal und Schädelhöhle festzustellen, während in der Gruppe Polytrauma eine starke Streuung der Werte eintrat. Insbesondere die drei Körperhöhlen und die Muskulatur zeigten hier eine deutliche Abweichung nach oben im Vergleich mit den vorigen Gruppen. Am höchsten war die Abweichung in der Region Brusthöhle, zumal die Werte hier in den restlichen Gruppen eher am unteren Ende rangierten. Betrachtet man die Signifikanzwerte im paarweisen Vergleich (Tabelle 32, S.60), fällt auf, dass sich die Messwerte in den Messregionen M. pectoralis, Muskulatur der Oberarme, Schädel-, Brust- und Bauchhöhle sowie Spinalkanal immer in der Gruppe Polytrauma im Vergleich mit einer anderen Todesursache signifikant unterschieden. Für die Messregion Schädelhöhle traf dies zusätzlich auf die Gruppe Schädel-Hirn-Trauma zu. Alle anderen Todesursachen zeigten keinen signifikanten Unterschied untereinander.



**Diagramm 15:** Mittlere Rangwerte von Muskulatur, Knochenmark, Spinalkanal und Schädelhöhlen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit von der Todesursache

Nur PMI 1 (<6 Std.), keine äußeren Verletzungen, keine Gefäßzugänge oder Drainagen.

**Tabelle 31:** Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für Todesursachen in den Messregionen Spinalkanal, Körperhöhlen, Muskulatur und Knochenmark

Nur PMI-Gruppe 1 (< 6 Std.), keine äußeren Verletzungen, keine Gefäßzugänge oder Drainagen. a = Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst. b = Mehrfachvergleiche nicht notwendig, da ein sign. Unterschied zwischen den Stichproben besteht.

	Spinalkanal	Körperhöhlen			Muskulatur				Knochenmark	
		Schädelhöhle	Brusthöhle	Bauchhöhle	M. pect.	M. psoas	Oberarm	Oberschenkel	Oberarm	Oberschenkel
Anzahl n	203	203	203	203	203	203	203	203	203	203
Teststatistik (Chi-Quadrat)	25,98 <sup>a</sup>	30,45 <sup>a</sup>	67,47 <sup>a</sup>	33,68 <sup>a</sup>	28,28 <sup>a</sup>	7,00 <sup>a,b</sup>	55,86 <sup>a</sup>	13,95 <sup>a,b</sup>	0,00 <sup>a,b</sup>	0,00 <sup>a,b</sup>
Freiheitsgrad	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Asympt. Sig. (2-seitig)	<b>0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	0,430	<b>&lt;0,001</b>	0,071	1,000	1,000

**Tabelle 32:** Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der Gruppen (Todesursachen) nach Bonferroni für M. pectoralis, Oberarmmuskulatur, Spinalkanal und Körperhöhlen

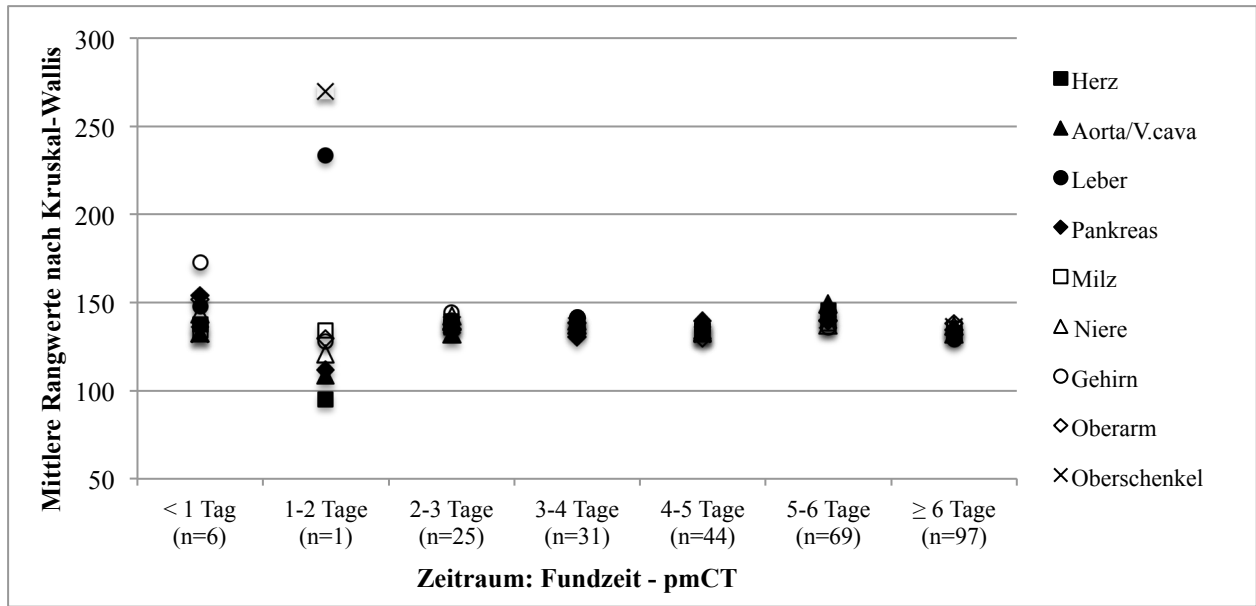
Vergleich der Gruppen	Muskulatur		Körperhöhlen			Spinalkanal
	M. pectoralis	Oberarm	Schädelhöhle	Brusthöhle	Bauchhöhle	
Herztod – SHT	0,871	0,660	<b>0,009</b>	0,309	0,503	0,167
Herztod – Polytrauma	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>
Pneumonie – SHT	0,596	1,000	<b>0,015</b>	0,721	0,967	0,151
Pneumonie – Polytrauma	<b>0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>0,003</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>0,003</b>	<b>0,001</b>
Schlaganfall – SHT	0,420	0,276	<b>0,030</b>	0,970	0,766	0,200
Schlaganfall – Polytrauma	<b>0,099</b>	<b>0,003</b>	<b>0,009</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>0,023</b>	<b>0,004</b>
MOV – SHT	0,527	1,000	<b>0,004</b>	0,641	0,619	0,237
MOV – Polytrauma	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>0,001</b>
Erhängen – SHT	0,480	1,000	<b>0,001</b>	0,159	0,254	0,056
Erhängen – Polytrauma	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>
Ertrinken – SHT	0,550	1,000	<b>0,006</b>	0,234	0,334	0,317
Ertrinken – Polytrauma	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>0,002</b>
SHT – Polytrauma	<b>0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	0,595	<b>&lt;0,001</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>0,033</b>

### **3.2.4.2 Liegezeit von der Todesfeststellung bis zum pmCT**

#### **I. Einfluss auf neue Fäulnisgasbildung**

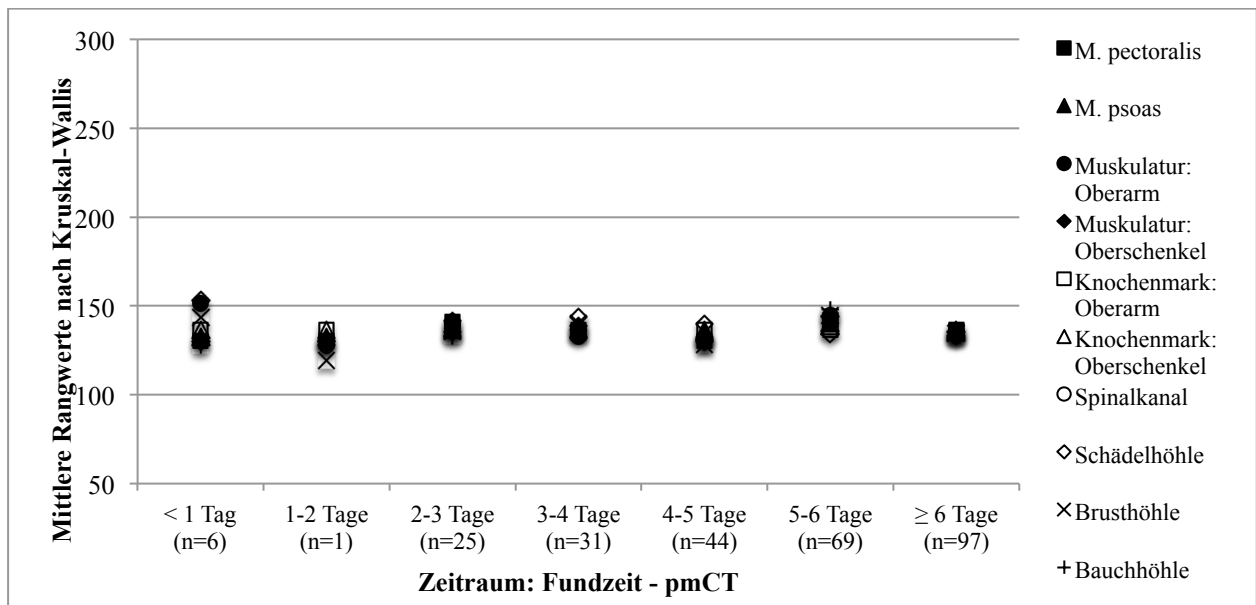
Für die Untersuchung, ob unterschiedliche Liegezeiten vom Fund bis zum pmCT, also der ungefähren Kühlzeit, eine Auswirkung auf das Vorkommen von Gas bei frischen, unversehrten Leichen haben, wurden Fälle aus der Gruppe PMI 1 ohne Verletzungen, Gefäßzugänge und Drainagen sowie ohne traumatische Todesursache (hier nur ohne Polytrauma, vgl. Ergebnisse aus 3.2.4.1) aus der Gesamtgruppe extrahiert, in Gruppen mit je einem Tag Liegezeit eingeteilt und nach bekanntem Schema mit Hilfe des Kruskal-Wallis-Tests analysiert (Tabelle 33-35, S. 63). In der letzten Gruppe sind alle Kühlzeiten über 6 Tagen zusammengefasst. Die höchste betrug 16 Tage und 12 Stunden bis zum pmCT.

Wie in den Diagrammen 16 und 17 (S.62) zu erkennen ist, blieben die mittleren Rangwerte der einzelnen Messregionen über alle Zeiträume hinweg auf etwa einer Ebene. Lediglich in Diagramm 16 ist zu beobachten, dass es in einzelnen Messregionen (insb. den Gefäßen der Leber, der oberen Extremität sowie des Gehirns) Abweichungen nach oben oder unten gab. Für die Gefäße der oberen Extremität war die Abweichung in der Gruppe mit einer Kühlzeit von 1-2 Tagen im Vergleich mit allen anderen Gruppen signifikant (Tabelle 35, S.63). Da es sich um ein isoliert auftretendes, signifikantes Ergebnis handelt und dieses der Hypothese, dass eine lange Kühlzeit zu einem höheren Vorkommen von Gas führt, sogar widerspricht, ist eher von einem Artefakt auszugehen. Die vorliegenden Daten lassen demnach keinen Schluss darauf zu, dass eine längere Kühlzeit das Auftreten von fäulnisbedingtem Gas bzw. dessen Vermehrung begünstigt, wenn die Leiche vorher in äußerlich unversehrtem Zustand und nach in einem frühen PMI aufgefunden wurde.



**Diagramm 16:** Mittlere Rangwerte von Herz und Gefäßen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit vom Zeitraum Fund – pmCT

Nur PMI 1 (<6 Std.), keine äußeren Verletzungen, keine Gefäßzugänge oder Drainagen, keine traumatische Todesursache.



**Diagramm 17:** Mittlere Rangwerte von Muskulatur, Knochenmark, Spinalkanal und Körperhöhlen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit von der ungefähren Kühlzeit (Fund bis zum pmCT)

Nur PMI 1 (<6 Std.), keine äußeren Verletzungen, keine Gefäßzugänge oder Drainagen, keine traumatische Todesursache.



**Tabelle 33:** Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für den Zeitraum Fundzeit - pmCT in den Messregionen Herz und Gefäße

Nur PMI 1 (<6 Std.), keine äußeren Verletzungen, keine Gefäßzugänge oder Drainagen, keine traumatische Todesursache. a = Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst. b = Mehrfachvergleiche nicht notwendig, da ein signifikanter Unterschied zwischen den Stichproben besteht.

	Herz- höhlen	Gefäße							
		Aorta, V. cava	Leber	Pankreas	Niere	Milz	Gehirn	Ober- arm	Ober- schenkel
Anzahl n	272	273	273	272	273	272	273	273	273
Teststatistik (Chi-Quadrat)	2,345 <sup>a,b</sup>	4,820 <sup>a,b</sup>	4,195 <sup>a,b</sup>	1,934 <sup>a,b</sup>	1,068 <sup>a,b</sup>	2,717 <sup>a,b</sup>	10,32 <sup>a,b</sup>	4,608 <sup>a,b</sup>	29,660 <sup>a</sup>
Freiheitsgrad	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Asympt. Sig. (2-seitig)	0,885	0,567	0,650	0,923	0,983	0,843	0,112	0,595	<b>&lt;0,001</b>

**Tabelle 34:** Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für den Zeitraum Fund - pmCT in den Messregionen Spinalkanal, Körperhöhlen, Muskulatur und Knochenmark

Nur PMI 1 (<6 Std.), keine äußeren Verletzungen, keine Gefäßzugänge oder Drainagen, keine traumatische Todesursache. a = Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst. b = Mehrfachvergleiche nicht notwendig, da ein signifikanter Unterschied zwischen den Stichproben besteht.

	Spinal- kanal	Körperhöhlen			Muskulatur				Knochenmark	
		Schädel- höhle	Brust- höhle	Bauch- höhle	M. pect.	M. psoas	Ober- arm	Ober- schenkel	Ober- arm	Ober- schenkel
Anzahl n	273	273	273	273	273	273	273	273	273	273
Teststatistik (Chi-Quadrat)	7,558 <sup>a,b</sup>	6,62 <sup>a,b</sup>	4,35 <sup>a,b</sup>	10,24 <sup>a,b</sup>	5,65 <sup>a,b</sup>	2,18 <sup>a,b</sup>	5,06 <sup>a,b</sup>	7,07 <sup>a,b</sup>	0,00 <sup>a,b</sup>	2,16 <sup>a,b</sup>
Freiheitsgrad	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Asympt. Sig. (2-seitig)	0,272	0,357	0,629	0,115	0,464	0,903	0,536	0,314	1,000	0,814

**Tabelle 35:** Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der Gruppen (Zeitraum: Fund - pmCT) nach Bonferroni für die Gefäße des Oberschenkels

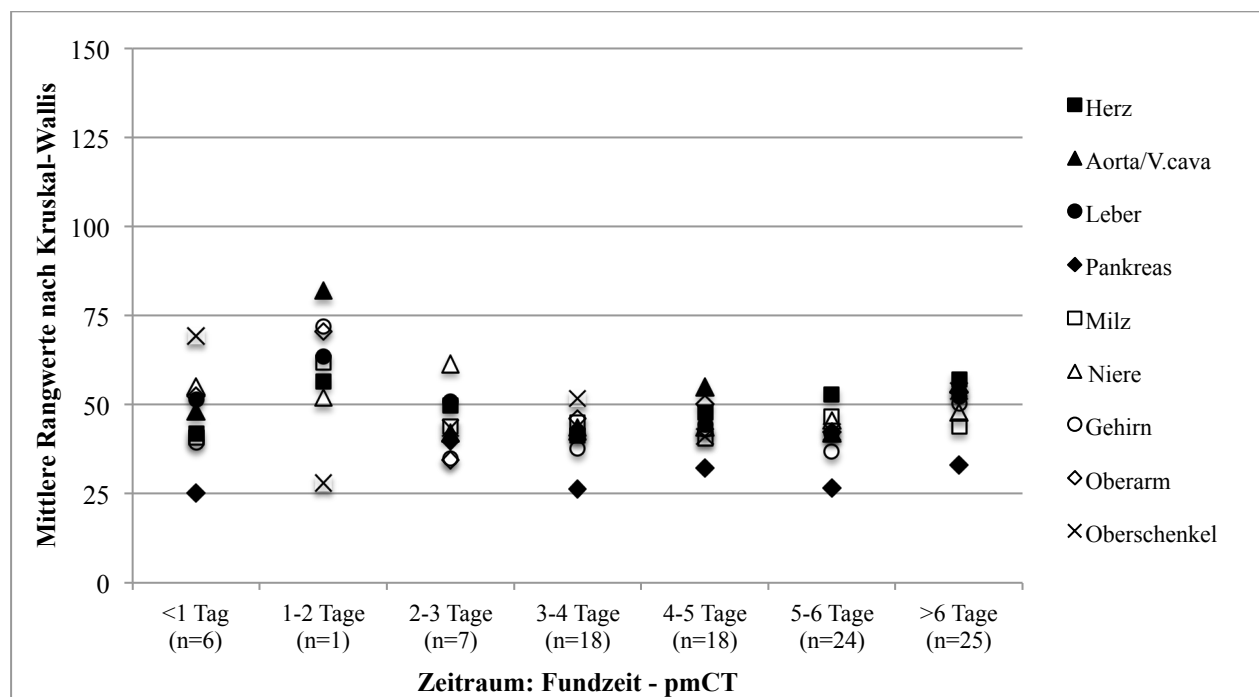
Nur PMI 1 (<6 Std.), keine äußeren Verletzungen, keine Gefäßzugänge oder Drainagen, keine traumatische Todesursache.

Vergleich der Gruppen	Gefäße Ober- schenkel
1-2 Tage – < 1 Tag	<b>&lt;0,001</b>
1-2 Tage – 2-3 Tage	<b>&lt;0,001</b>
1-2 Tage – 3-4 Tage	<b>&lt;0,001</b>
1-2 Tage – 4-5 Tage	<b>&lt;0,001</b>
1-2 Tage – 5-6 Tage	<b>&lt;0,001</b>
1-2 Tage – >6 Tage	<b>&lt;0,001</b>

## II. Einfluss auf Fortschreiten der Fäulnisgasbildung

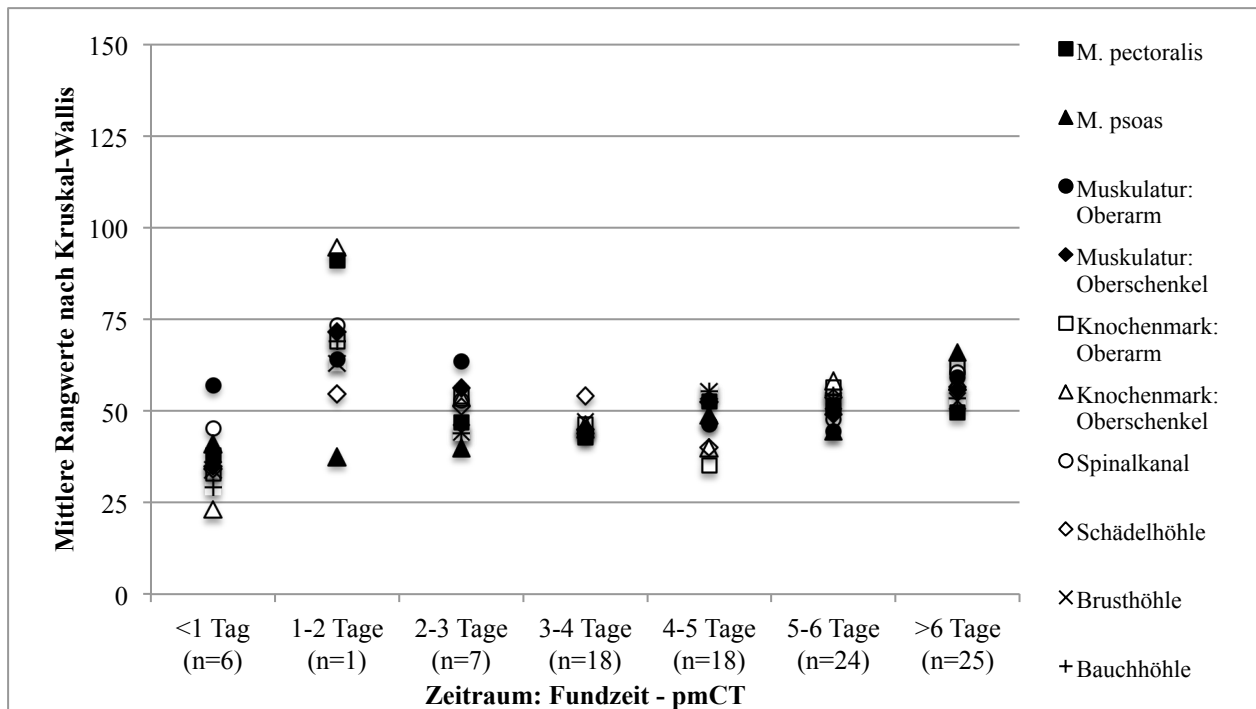
Der gleiche Test wurde dann noch einmal für bereits fäulnisveränderte Fälle unabhängig von Verletzungen durchgeführt, um herauszufinden, ob unterschiedliche Liegezeiten bis zum pmCT bei bereits stattfindender Fäulnisgasbildung einen Einfluss auf die Menge des Gases haben. Es wurden also alle Fälle mit einem PMI von 48 bis 96 Stunden (Gruppe 5) oder mehr als 96 Stunden (Gruppe 6) selektiert und in die gleichen Gruppen eingeteilt wie bereits in I.

Es ist zu beobachten, dass die mittleren Rangwerte aller Messregionen über die verschiedenen Gruppen hinweg ein relativ konstantes Niveau hielten und lediglich bei einem Zeitraum von 1-2 Tagen die Werte stark, sowohl nach oben (Aorta/V. cava, Diagramm 18; M. pectoralis, Knochenmark der unteren Extremität, Diagramm 19, S.65) als auch nach unten (Gefäße der unteren Extremität, Diagramm 18), abwichen. Im Kruskal-Wallis-Test (Tabelle 36-37, S. 65-66) waren diese Abweichungen allerdings nicht signifikant. Generell war nur in zwei Messregionen (Knochenmark der oberen und unteren Extremität, Tabelle 38, S.66) ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen feststellbar, welche in dieser Konstellation und aufgrund der geringen Fallzahl (n=1) in dieser Gruppe aber als Artefakt angesehen werden muss. Es ist außerdem feststellbar, dass der Wert für die Messregion Pankreas in dieser Gruppe fehlte (vgl. Kapitel 3.2.1.7).



**Diagramm 18:** Mittlere Rangwerte von Herz und Gefäßen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit vom Zeitraum Fund – pmCT

Nur PMI-Gruppe 5 (48-96 Std.) und 6 (> 96 Std.).



**Diagramm 19:** Mittlere Rangwerte von Muskulatur, Knochenmark, Spinalkanal und Körperhöhlen nach Kruskal und Wallis (H-Test) in Abhängigkeit vom Zeitraum Fund – pmCT

Nur PMI-Gruppe 5 (48-96 Std.) und 6 (> 96 Std.).

**Tabelle 36:** Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für den Zeitraum Fund – pmCT in den Messregionen Herz und Gefäße

Nur PMI-Gruppe 5 (48-96 Std.) und 6 (> 96 Std.). a = Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst. b = Mehrfachvergleiche nicht notwendig, da ein signifikanter Unterschied zwischen den Stichproben besteht.

	Herz- höhlen	Gefäße							
		Aorta, V. cava	Leber	Pankreas	Niere	Milz	Gehirn	Ober- arm	Ober- schenkel
Anzahl n	99	99	92	59	93	87	82	94	95
Teststatistik (Chi-Quadrat)	4,742 <sup>a,b</sup>	5,221 <sup>a,b</sup>	3,696 <sup>a,b</sup>	4,557 <sup>a,b</sup>	3,890 <sup>a,b</sup>	1,488 <sup>a,b</sup>	6,378 <sup>a,b</sup>	5,041 <sup>a,b</sup>	8,305 <sup>a,b</sup>
Freiheitsgrad	6	6	6	5	6	6	6	6	6
Asympt. Sig. (2-seitig)	0,577	0,516	0,718	0,472	0,692	0,960	0,382	0,539	0,217

**Tabelle 37:** Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für den Zeitraum Fund - pmCT in den Messregionen Spinalkanal, Körperhöhlen, Muskulatur und Knochenmark

Nur PMI-Gruppe 5 (48-96 Std.) und 6 (> 96 Std.). a = Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst. b = Mehrfachvergleiche nicht notwendig, da ein signifikanter Unterschied zwischen den Stichproben besteht.

	Spinalkanal	Körperhöhlen			Muskulatur				Knochenmark	
		Schädelhöhle	Brusthöhle	Bauchhöhle	M. pect.	M. psoas	Oberarm	Oberschenkel	Oberarm	Oberschenkel
Anzahl n	100	120	120	120	97	99	100	100	100	100
Teststatistik (Chi-Quadrat)	6,434 <sup>a,b</sup>	6,09 <sup>a,b</sup>	3,03 <sup>a,b</sup>	7,29 <sup>a,b</sup>	4,80 <sup>a,b</sup>	11,8 <sup>a,b</sup>	7,37 <sup>a,b</sup>	5,34 <sup>a,b</sup>	13,90 <sup>a,b</sup>	14,59 <sup>a,b</sup>
Freiheitsgrad	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Asympt. Sig. (2-seitig)	0,376	0,413	0,805	0,295	0,570	0,067	0,288	0,501	<b>0,031</b>	<b>0,024</b>

**Tabelle 38:** Asymptotische Signifikanz im paarweisen Vergleich der Gruppen (Zeitraum: Fund - pmCT) nach Bonferroni für Knochenmark von Oberarm und Oberschenkel

Nur PMI-Gruppe 5 (48-96 Std.) und 6 (> 96 Std.).

Vergleich der Gruppen	Knochenmark	
	Oberarm	Oberschenkel
< 1 Tag – 1-2 Tage	0,241	<b>0,021</b>
< 1 Tag – 5-6 Tage	0,069	<b>0,007</b>
4-5 Tage – 5-6 Tage	<b>0,014</b>	<b>0,035</b>
4-5 Tage – >6 Tage	<b>0,002</b>	<b>0,036</b>
< 1 Tag – > 6 Tage	<b>0,025</b>	<b>0,007</b>

### 3.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Untersuchungen haben im Hinblick auf die Beeinflussung der postmortalen Gasbildung Folgendes gezeigt: Fälle mit Gefäßzugängen zeigten keine signifikanten Abweichungen dahingehend, dass sie womöglich für ein erhöhtes Vorkommen von atmosphärischem Gas im Gefäßsystem verantwortlich sind. Bis auf Thoraxdrainagen, die sowieso zur Therapie des Pneumothorax eingesetzt werden, der sich im pmCT ebenfalls mit freier Luft im Brustraum präsentieren würde, oder bei falscher Anlage ebendiesen neu verursachen können, hatten auch sonstige Drainagen oder Hirnsonden keinen Einfluss auf die Vorkommen von Gas im pmCT.

Dagegen ließ sich auch feststellen, dass äußere offene Verletzungen in einem hohen Maße zu artifiziellem Gas beitrugen. Besonders betroffen waren hierbei die Gefäße, die Muskulatur und die Körperhöhlen, davon insbesondere die Schädelhöhle in Kombination mit dem Spinalkanal.

Den stärksten Einfluss hatten hier die Schussverletzungen und groben Zertrümmerungen, am geringsten war der Effekt bei Schnittwunden, die im direkten Vergleich kaum einen Unterschied zur Gruppe ohne äußere Verletzungen zeigten.

Abgesehen von äußerlich sichtbaren Einflussfaktoren auf das Vorkommen von Gas wurde auch untersucht, ob die Todesursache dabei eine Rolle spielt. Hier ließ sich beobachten, dass hauptsächlich Todesursachen wie Poly- oder Schädel-Hirn-Traumen zu mehr Gas im Herz-Kreislauf-System führten, obwohl sie keinerlei äußerlich sichtbare Verletzungen aufwiesen. Beim Polytrauma waren es lediglich die Herzhöhlen, die signifikant erhöhte Werte in dieser Gruppe zeigten, beim Schädel-Hirn-Trauma zusätzlich auch die Gefäße des Gehirns. Auch die Muskulatur und die drei Körperhöhlen waren durch Trauma von deutlich mehr Gasansammlungen betroffen: durch Polytrauma waren besonders die Muskulatur des Oberarms, der M. pectoralis sowie alle drei Körperhöhlen und der Spinalkanal von erhöhten Gaswerten betroffen, die Schädelhöhle wies zusätzlich bei Schädel-Hirn-Trauma signifikant hohe Werte auf.

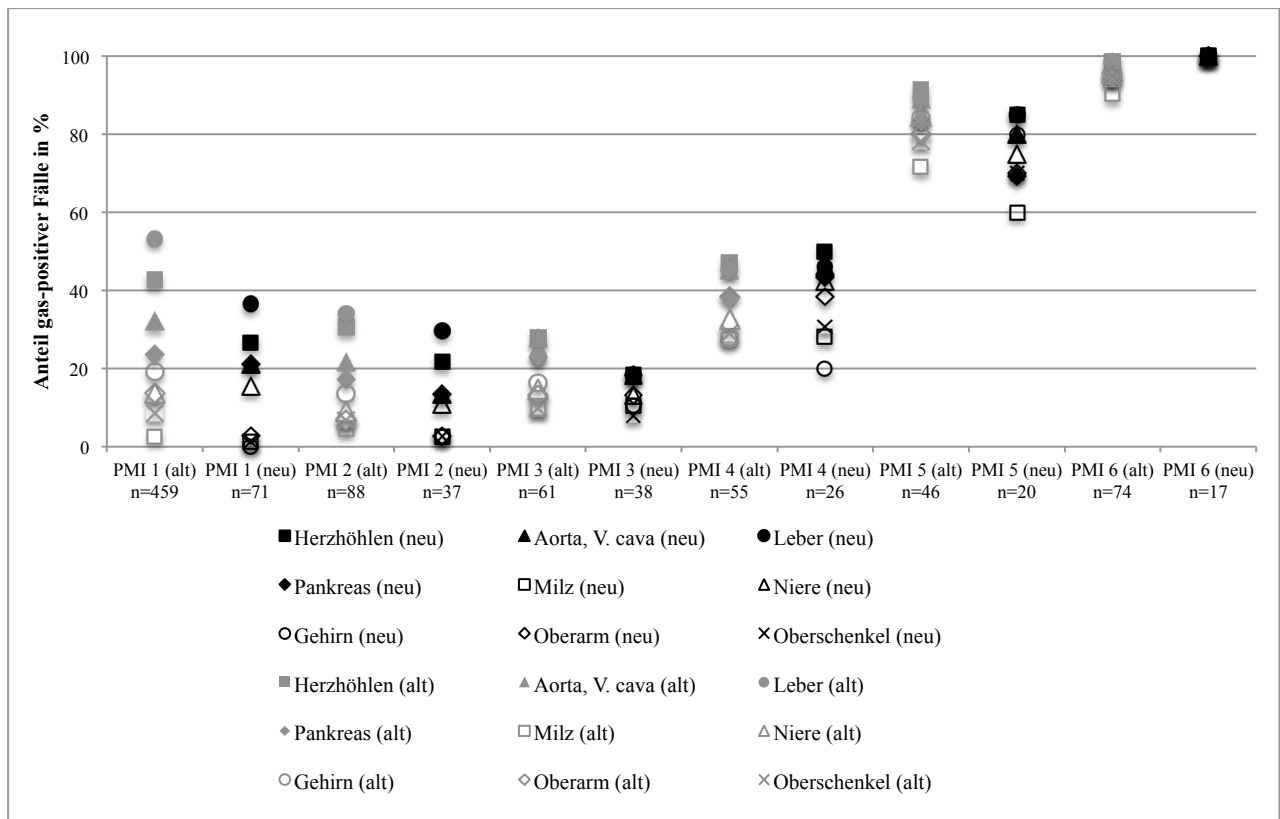
Zusätzlich dazu wurde auch untersucht, ob unterschiedliche Liegezeiten vom Auffinden des Leichnams bis zum pmCT das Auftreten von Gas beeinflussen, da diese nicht in der Berechnung des PMI (Zeitraum zwischen Eintritt des Todes und Fund der Leiche) berücksichtigt wurden. Hier konnte gezeigt werden, dass bei Fällen mit einem PMI von unter sechs Stunden eine längere Liegezeit, in etwa der Kühlzeit entsprechend, wahrscheinlich nicht zu einem erhöhten Vorkommen von Gas führte. Die festgestellte Abweichung in der Messregion Gefäße des Oberschenkels nach 1-2 Tagen Liegezeit bis zum pmCT war zwar signifikant, jedoch bei einer Fallzahl von n=1 in dieser Gruppe vermutlich zufälliger Natur. Auch der Einfluss auf das Fortschreiten der Fäulnisgasbildung bei bereits fäulnisveränderten Leichen wurde untersucht. Auch hierbei zeigte sich, dass die Länge der Kühlzeit vor dem pmCT keinen signifikanten Anstieg der Gasbildung verursachte. Lediglich im Knochenmark von Oberarm und Oberschenkel wurden hier signifikante Unterschiede festgestellt, die wie bereits oben beschrieben vermutlich durch eine äußerst geringe Fallzahl in der Gruppe mit einer Liegezeit von 1-2 Tagen bis zum pmCT zustande kamen.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich durch Ausschlussprinzip analog zu dem in Kapitel 3.2.2.1 dargestellten Diagramm zur prozentualen Häufigkeit gas-positiver Fälle ein „bereinigtes“ Diagramm erstellen (Diagramm 20). Hierfür wurden nun nur solche Fälle ausgewählt, die

- keine Thoraxdrainage,
- keine äußeren Verletzungen,

- keine traumatische Todesursache (Polytrauma, Schädel-Hirn-Trauma)
- und keine unklare Todesursache (da hierunter Einzelfälle mit ebenfalls traumatischer Todesursache (z.B. stumpfe Gewalt) fallen)

besaßen. Für diese Fallpopulation wurde erneut die prozentuale Wahrscheinlichkeit errechnet, dass in einer bestimmten PMI-Gruppe ein Leichnam mit irgendeiner Menge Gas (Wert > 0) vorhanden ist. Der Vergleich zwischen den beiden Datensätzen ist in Diagramm 20 dargestellt.



**Diagramm 20:** Prozentualer Anteil Gas-positiver Fälle in der gleichen PMI-Gruppe. Alt: Alle Fälle, siehe Diagramm 4. Neu: Nach Ausschluss von Thoraxdrainagen, äußeren Verletzungen und traumatischen Todesursachen (Polytrauma, Schädel-Hirn-Trauma) sowie bei unklarer Todesursache.

Vergleicht man die Daten miteinander, erkennt man, dass der maximale Anteil Gas-positiver Fälle in der Gruppe mit einem PMI von unter sechs Stunden (Gruppe 1) von über 50% auf unter 40% fiel. Wie in der ersten Auswertung auch, zeigten die Gefäße der Leber und die Herzhöhlen immer noch den höchsten Anteil Gas-positiver Fälle. Während die Werte der ersten drei PMI-Gruppen nun deutlich enger zusammen lagen und die Diskrepanz zwischen PMI-Gruppe 1 und Gruppe 3 gesunken war, schienen die Werte in Gruppe 4 nun weiter auseinander zu weichen und sich insgesamt sogar erhöht zu haben. Bei PMI-Gruppe 6 wird nun eine Wahrscheinlichkeit von 100% erreicht, dass ein Fall dieser Population Gas enthält. Insgesamt lässt sich also feststellen,

dass durch Ausschluss der zuvor ermittelten Einflussfaktoren zwar eine Reduzierung des Anteils Gas-positiver Fälle erreicht werden konnte, der Anteil an Fällen mit Gas in PMI-Gruppe 1 aber zum Teil immer noch höher liegt als in Gruppe 2 oder 3. Dies spricht dafür, dass es noch weitere, hier nicht untersuchte, Einflussfaktoren geben muss.

## **4 Diskussion**

### **4.1 Interpretation der Ergebnisse**

#### **4.1.1 Gasbildung in Abhängigkeit vom PMI**

In den durchgeführten Untersuchungen konnten mehrere Feststellungen im Hinblick auf das Auftreten von Fäulnisgasbildung in Abhängigkeit vom PMI gemacht werden.

So konnte gezeigt werden, dass neu aufgetretenes Fäulnisgas bei den beiden untersuchten Schweinen erstmalig nach 25 und 28 Stunden im pmCT zu sehen und vor allem in den herznahen Gefäßabschnitten (Aorta, Vena cava und Gefäße der Leber) lokalisiert war. Abgesehen vom Spinalkanal, in dem sich bereits zu Versuchsbeginn vermutlich artifiziell injiziertes Gas befand, zeigten sämtliche untersuchten Körperhöhlen und peripheren Gefäße erst sehr spät einen Anstieg des Gasvorkommens. Dazu passt, dass sich in der retrospektiven Auswertung von menschlichen pmCT-Daten ein erstmaliger Anstieg des Gasgehalts bei einem PMI zwischen 24 und 48 Stunden beobachten ließ. Ein bevorzugtes Auftreten von fäulnisbedingtem Gas in herznahen Gefäßabschnitten konnte ebenfalls durch die retrospektive Analyse von menschlichen pmCT-Daten bestätigt werden: bis auf die Gefäße von Pankreas und Gehirn zeigten alle untersuchten Gefäßabschnitte einen signifikanten Anstieg des Gasgehalts bei einem PMI von 24 bis 48 Stunden, wohingegen Muskulatur, Knochenmark und Körperhöhlen erst ab einer Liegezeit von 48 bis 96 Stunden eine signifikante Änderung verzeichneten. Sowohl die prospektiven als auch retrospektiven Ergebnisse sprechen deshalb dafür, dass fäulnisbedingtes Gas erst ab einem postmortalen Intervall von frühestens 24 Stunden zu erwarten ist. In anderen Kompartimenten wie der Muskulatur oder in den Körperhöhlen ist es nach den vorliegenden Ergebnissen frühestens ab einem PMI von 48 Stunden zu erwarten.

Bemerkenswert ist, dass in knapp 53% der Fälle bereits in Gruppe 1 (PMI unter sechs Stunden) Gas in den Gefäßen der Leber festgestellt werden konnte. Durch Selektieren der Fälle ohne invasive Maßnahmen, offene Verletzungen und traumatische oder unklare Todesursachen konnte dieser Anteil immerhin auf etwa 37% gesenkt werden. Es bleibt trotzdem ein hoher Anteil derjenigen Fälle, die als Gruppe mit dem kleinsten PMI eigentlich auch den geringsten Anteil Gas-positiver Fälle stellen müsste. Dies weist darauf hin, dass es neben den hier untersuchten Kriterien noch weitere wichtige Einflussfaktoren auf intravasales Gas geben muss.



#### **4.1.2 Einfluss äußerer Faktoren für das Auftreten postmortalen Gases**

Die Untersuchung mehrerer Einflussfaktoren auf das Auftreten von postmortalem Gas hat gezeigt, dass nicht alle offensichtlich erscheinenden Faktoren auch tatsächlich eine Bedeutung für diese Fragestellung besitzen.

So verursachten Gefäßzugänge in der vorliegenden Studie keine signifikante Änderung im intravasalen Gasvorkommen, weder zentral liegende (z.B. V. subclavia, V. femoralis) noch periphere Zugänge (z.B. V. brachialis). Auch wenn für die Gefäße der Leber ein signifikantes Ergebnis im Vergleich zwischen keinen Gefäßzugängen und sowohl peripheren als auch zentralen Zugängen berechnet wurde, ist aufgrund des alleinstehenden Befunds und der Konstellation, dass laut diesem Ergebnis Fälle mit beider Arten Gefäßzugängen weniger Gas aufweisen als solche ohne, eher von einem Messfehler oder Artefakt auszugehen (Kapitel 4.3).

Bei der Untersuchung von unterschiedlichen Drainagen zeigte sich, dass Thoraxdrainagen mit einer signifikant erhöhten freien Gasmenge in der Brusthöhle assoziiert waren, wohingegen keine oder andere Drainagen kaum Einfluss auf das Gasvorkommen hatten, auch nicht an ihrer jeweiligen Lokalisation. Bei diesem Ergebnis stellt sich jedoch die Frage, ob eine Thoraxdrainage selbst zum Einschluss von Luft führt, was bei einer Verletzung der Lunge durchaus denkbar wäre, oder ein vorheriges Auftreten von freiem Gas, z.B. bei einem Pneumothorax, die Indikation für das Einführen einer solchen Drainage war. Eine offene Verletzung ist für die Herstellung eines Pneumothorax nicht zwingend erforderlich, dieser kann ebenso durch Aufprall der Thoraxwand bei einem Unfall und die durch Scherkräfte rupturierenden Lungenbläschen entstehen. Es lässt sich aus den vorliegenden Ergebnissen also nicht klären, was zuerst da war: die Drainage oder das freie Gas.

Beim Blick auf den Einfluss äußerer Verletzungen war zu sehen, dass das Vorkommen von Gas offensichtlich in Zusammenhang mit der Intensität der Verletzung stand. So führten grobe Zertrümmerungen, wie z.B. abgetrennte Extremitäten und Pfählungsverletzungen, zum Auftreten von Gas in nahezu jeder untersuchten Messregion. Ebenso waren bei Quetsch-Riss-Wunden gehäuft Gasansammlungen zu finden, wobei die Tiefe der Wunde hier nicht mit erfasst wurde. Stich- und Schnittverletzungen zeigten dagegen einen eher geringen Einfluss, wobei Stichverletzungen nur im Herz und den Lebergefäßen zu einer signifikanten Ansammlung von Gas führten und Schnittverletzungen in gar keiner Region einen signifikanten Wert erzielten. Schussverletzungen führten hauptsächlich zu freiem Gas in der Schädelhöhle, im Spinalkanal, in den Hirngefäßen sowie im zentralen Gefäßsystem in Herz, Lebergefäßen und Aorta bzw. V. cava., was mit einer Vielzahl von Suiziden durch Kopfschüsse im untersuchten Kollektiv und

einer perimortalen Fortleitung von Gas in zentrale Gefäßabschnitte zu vereinen wäre. Verbrennungen führten in der Untersuchung vor allem in den oberflächlichen Körperregionen wie dem M. pectoralis und in für Verbrennungen exponierten Arealen wie den Extremitäten (sowohl Gefäße als auch Muskulatur) zu einem Anstieg des Gasvorkommens. Zentral gelegene Gefäße und Muskeln wie der M. psoas blieben davon nicht beeinträchtigt.

Im Vergleich der Todesursachen zeigt sich ein sehr ähnliches Bild. Alle atraumatischen Todesursachen wie Herztod, Pneumonie oder Multiorganversagen führten nicht zu einer Erhöhung von Gasansammlungen, das Polytrauma mit erhöhtem Gasvorkommen in den Herzhöhlen und Hirngefäßen sowie in den Körperhöhlen, dem Spinalkanal und weiten Teilen der Muskulatur assoziiert war. Das Schädel-Hirn-Trauma führte außerdem isoliert zu signifikant erhöhten Gaswerten in den Hirngefäßen, der Schädelhöhle und dem Spinalkanal. Nicht-natürliche Todesursachen wie Ertrinken und Erhängen zeigten dagegen keinen Einfluss.

Im Folgenden wurde auch der Einfluss der Liegezeit vom Fund bis zum pmCT, also der ungefähren Kühlzeit, analysiert, sowohl für Leichname mit einem sehr kurzen PMI (unter sechs Stunden) als auch mit längerem PMI von mehr als 48 Stunden. Es zeigte sich, dass bis auf drei Ausnahmen auch lange Kühlzeiten nicht mit einer Erhöhung des Gasvorkommens assoziiert waren. Da sich die Ausnahmen als isoliert erhöhte Werte herausstellten, ist nicht davon auszugehen, dass diese einen wirklich signifikanten Einfluss darstellten. Im Großen und Ganzen zeigte diese Untersuchung, dass auch lange Kühlzeiten, sofern diese ordnungsgemäß eingehalten werden, von teilweise mehreren Tagen bis zum pmCT nicht zum vermehrten Auftreten von neuem Gas in Leichen mit kurzem PMI oder zum Fortschreiten von fäulnisbedingter Gasbildung in Leichnamen mit längerem PMI führten. Dies ist insgesamt als positiv zu bewerten, da eine Verfälschung der Gaswerte durch zu lange Liegezeiten bis zum pmCT fatal für den klinischen Alltag und die Bewertung von Gasembolien wären.

## **4.2 Vergleich mit anderen Studien**

Wie bereits in der Einleitung (siehe Kapitel 1.5) erwähnt, gibt es aktuell nur wenige vergleichbare Studien, die sich mit der Differenzierung von atmosphärischem und fäulnisbedingtem Gas im pmCT beschäftigen. Eine umfassende Untersuchung wie hier hat laut Studienlage bisher nicht stattgefunden.

### **Abhängigkeit vom postmortalen Intervall**

Bereits LEVY ET AL. (2010)<sup>40</sup> postulierten, dass im pmCT bei einem PMI zwischen 24 und 48 Stunden eine zerebrale Autolyse, insbesondere das Verschwinden der Mark-Rinden-Grenzen, zu beobachten ist und die Hirnmasse in späteren Stadien bei liegender Position des Leichnams in die posteriore Schädelhöhle einsinkt, während sich im vorderen Teil spiegelhaft Fäulnisgas bildet.

Eine mit dieser Arbeit ebenfalls vergleichbare Studie führten auch FISCHER ET AL. (2012)<sup>37</sup> durch. Sie untersuchten mittels pmCT von fünf Fällen das Gasvorkommen in der Leber in Abhängigkeit vom PMI, das in der Studie zwischen acht und 23 Stunden lag. Die Toten hatten keine traumatische Todesursache und wurden vor dem Tod nicht reanimiert. Die Menge des Gases wurde mit Hilfe eines vierstufigen Scores eingeschätzt. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Menge an intrahepatischem Gas in den ersten 29 Stunden nicht signifikant veränderte, auch wenn bereits geringe Mengen Gas zu Versuchsbeginn zu sehen waren. Ähnliche Beobachtungen wurden auch in der vorliegenden Arbeit gemacht: trotz vermutlich artifiziell vorhandenem Gas im Spinalkanal eines der beiden Schweine veränderte sich die Menge hier bis zu einem PMI von 28 Stunden nicht. Erst danach begann diese zuzunehmen, wonach von einem fäulnisbedingten Anstieg des Gasvolumens auszugehen wäre. Die Studie zeigt auch, dass nicht nur eine Reanimation mit Herzdruckmassage zu postmortalem Gas in der Leber führen kann, da diese explizit ausgeschlossen wurde.

In einer Studie von EGGER ET AL. (2012)<sup>38</sup> konnte durch Analyse von 119 pmCT mit unterschiedlichem PMI (drei Stunden bis zwölf Tage) und ohne offene Verletzungen gezeigt werden, dass Fäulnisgas zuerst in Leber und Herz auftritt und erst später in Gefäßen des Gastrointestinaltrakts zu sehen ist. Auch hier wurde ein vierstufiger Score verwendet, um die Gasmenge zu quantifizieren. In 44,2% der Fälle wurde Gas bei Toten mit einem PMI von weniger als 24 Stunden gefunden. Venen und Arterien waren in der Studie gleichermaßen betroffen, sowohl was Quantität des Gases als auch dessen Lokalisation angeht. Es wurde außerdem festgestellt, dass bei Toten in stehender Position bei Auffinden das Gas eher im unteren Körper und den distalen Extremitäten zu finden war. Ein Zusammenhang zwischen PMI und Gasvorkommen konnte in der Studie jedoch nicht ermittelt werden.

In einer aktuellen Studie von OKUMURA ET AL. (2017)<sup>39</sup> wurden 46 Leichen mit natürlicher oder nicht-natürlicher Todesursache und bekanntem PMI (9,5 bis 96 Stunden, durchschnittlich 34,03 Stunden) einer pmCT-Untersuchung unterzogen, um das Gasvorkommen in Lunge, Leber und Darm zu untersuchen. Ausschlusskriterien waren ein offenes Thoraxtrauma, Verletzung des Zwerchfells und ein vorbeschriebenes Lungenemphysem. Die Gasmenge wurde manuell an einer

Workstation für drei definierte Lokalisationen bestimmt (Lungenvolumen, intrahepatisches Gas und intrarektales Gas) und einer schrittweisen Regressionsanalyse zugeführt, mit der eine Schätzung des PMI vorgenommen wurde. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Menge an intrahepatischem Gas konkordant zum tatsächlichen PMI verhält. Eine Schätzung des PMI anhand des Gasvorkommens und weiterer Faktoren (Geschlecht, Alter, Größe, Gewicht usw.) wich im Durchschnitt etwa 16 Stunden vom tatsächlichen PMI ab. Das Gasvolumen von Lunge und Rektum konnte nicht eindeutig in Zusammenhang mit dem PMI gebracht werden. Die Studie umfasste eine erheblich kleinere Kohorte als die vorliegende Arbeit und erfasste dabei lediglich drei Lokalisationen von Gas. Dafür wurde eine manuelle Volumenbestimmung im pmCT durchgeführt, welche genauere Daten liefert als ein Score. Die Autoren führen an, dass eine manuelle Messung dennoch zu ungenau sein könnte und es notwendig bzw. wünschenswert sei, eine automatisierte Berechnung des Gasvolumens durch die Workstation durchführen zu lassen. Außerdem wurde eine kardiopulmonale Reanimation vor dem Tod wie auch in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt, was die Ergebnisse ebenfalls beeinflusst haben könnte (siehe Kapitel 4.2).

### **Einfluss äußerer Faktoren**

JACKOWSKI ET AL. (2007)<sup>32</sup> untersuchten 79 pmCT von Fällen ohne äußere wie radiologische Fäulniszeichen und ohne traumatische Verletzungen der Leber auf das Vorkommen von intrahepatischem Gas. Das mittlere PMI lag hier bei 29 Stunden. Es konnte gezeigt werden, dass zwischen offenem Trauma, hauptsächlich Schädel-Hirn-Trauma und Kopfschussverletzungen, und der Ansammlung von intrahepatischem Gas ein signifikanter Zusammenhang besteht. Da die Gasansammlung nicht durch direktes Trauma der Leber entstanden war, ist davon auszugehen, dass Gas, z.B. aus intrakraniellen Gefäßen durch einen geringen Reststrom des Blutes, während oder kurz nach dem Tod fortgeleitet wird und nicht dauerhaft an Ort und Stelle verbleibt.

Eine ähnliche Studie wurde bereits 2012 von GEBHART ET AL.<sup>27</sup> durchgeführt, bei der retrospektiv 78 pmCT von Fällen mit sowohl natürlichen als auch traumatischen Todesursachen (Schuss- und Stichverletzungen, stumpfe Traumata), jedoch ohne äußere Fäulniszeichen, im Hinblick auf Gasbildung ausgewertet wurden. Das durchschnittliche PMI der natürlichen Todesfälle lag bei 31,5 Stunden, das der nicht-natürlichen Todesfälle bei 13,5 (stumpfe Traumata) bis 15 Stunden (Schussverletzungen). Bei 80% der natürlich verstorbenen Fälle wurde Gas gefunden, vorrangig im arteriellen und venösen Gefäßsystem und in der Leber, während kein freies Gas im Binde- und Weichgewebe und der Schädel- und Bauchhöhle gefunden wurde. Bei Tod durch Schussverletzungen wurde in allen Fällen Gas gefunden, insbesondere im

Gefäßsystem und der Schädelhöhle, dem Hirnparenchym und im Spinalkanal. Wie auch in der vorliegenden Arbeit lag der Anteil an Kopfschussverletzungen mit 52% deutlich vorne. Bei Stichverletzungen wurde in 92% der Fälle Gas gefunden, besonders im Gefäßsystem. Bei Toten mit stumpfem Trauma konnte in allen Fällen Gas detektiert werden, hier waren insbesondere die gastrointestinalen Gefäße und die Leber sowie auch das Weichgewebe von Gasbildung betroffen. Insgesamt ist diese Studie im Hinblick auf den Zusammenhang zwischen Verletzungsmustern und den Gasvorkommen am ehesten mit der vorliegenden Arbeit zu vergleichen, da sie dieser im retrospektiven Aufbau, der Zusammensetzung der Population aus natürlichen und nicht-natürlichen Todesfällen und der breit gestreuten Suche nach Gas in verschiedenen Organen und Gefäßen ähnlich ist. Im Unterschied zu dieser Arbeit wurde jedoch eine erheblich geringere Fallzahl untersucht und die Messungen nicht mit dem PMI in Verbindung gesetzt.

### **4.3 Limitationen der Arbeit**

Obwohl die Untersuchungen mit größter Sorgfalt durchgeführt wurden, unterliegen sie verschiedenen Einflussfaktoren, die zu einer Veränderung des Ergebnisses geführt haben können. Die Arbeit umfasste zwar sowohl eine prospektive als auch retrospektive Studie, jedoch bieten beide Teile potentielle Fehlerquellen.

Zum einen kann eine Untersuchung an Schweinen nicht vollständig die anatomischen und physiologischen Prozesse des menschlichen Körpers imitieren, zum anderen ist die Aussagekraft von einer sehr niedrigen Fallzahl deutlich begrenzt. Aus ethischen Gründen erfolgte die hier durchgeführte Untersuchung nur an zwei zuvor für andere Forschungszwecke verwendeten Schweinekadavern, die dementsprechend nicht gänzlich unversehrt waren, da sie unter anderem stark sedierenden Medikamenten ausgesetzt waren und mehrere Injektion u.a. in den Spinalkanal und in das axilläre Nervensystem durchgeführt wurden. Das Schwein wird in der medizinischen Forschung häufig als menschenähnliches Versuchsobjekt verwendet, da es in anatomischen wie physiologischen Prozessen dem Menschen sehr ähnlich erscheint und für viele medizinische Einsatzgebiete bessere Gegebenheiten bietet als andere ähnlich große Tiere. So ist das Schwein eines der wenigen Tiere, dessen Herz und Gefäße in Form und Größe nahezu identisch zum menschlichen Herz-Kreislauf-System sind.<sup>41</sup> Dennoch bestehen gerade für die vorliegende Fragestellung Unterschiede, die ein Schweinmodell nicht als perfekten Ersatz für eine menschliche Leiche erscheinen lassen. Die beiden verwendeten Schweine wogen bei ca. 40 kg,

was deutlich unter dem durchschnittlichen Gewicht eines erwachsenen Menschen liegt. Die Verteilung des Gewichts ist aufgrund der geringen Extremitätenlänge hauptsächlich auf Rumpf und Kopf konzentriert, was dazu führt, dass die Körperoberfläche im Vergleich zum Menschen reduziert wird. Eine geringere Körperoberfläche führt aufgrund von weniger Evaporation und anderer thermischer Eigenschaften auch zu einem anderen Fäulnisverhalten.

In der retrospektiven Studie konnte zwar eine viel höhere Fallzahl untersucht werden, jedoch kann es im retrospektiven Setting, v.a. durch die Aktenrecherche, zum Informationsverlust kommen. So sind z.B. Ermittlungen der genaueren Todesumstände teilweise nicht oder für die Anforderungen der vorliegenden Untersuchung nicht ausreichend dokumentiert und der Tod rein aus den Akteninformationen nicht rekonstruierbar. Im Hinblick auf die vorliegende Fragestellung wäre hier z.B. von Interesse gewesen, ob eine Reanimation mit Herzdruckmassage stattgefunden hat oder andere traumatische Ereignisse kurz vor dem Tod das Gasvorkommen beeinflusst haben könnten. In einer Studie von TAKAHASHI ET AL. (2009)<sup>26</sup> wurden 208 pmCT von Toten mit nicht-traumatischer Todesursache erstellt und im Hinblick auf Gasvorkommen und Leber und Gastrointestinaltrakt untersucht. Da die Toten aus umliegenden Kliniken stammten, lag das PMI nur zwischen 120 und 180 Min., in allen Fällen fand vor dem Tod eine Reanimation mit Herzdruckmassage statt. In 31% der Fälle wurde Gas in der Leber detektiert, bei jedem zweiten Fall war ein gasgeblähter Magen-Darm-Trakt zu sehen. Die Gasmenge in der Leber hing signifikant mit dem Gasvorkommen in Magen und Darm und der Zeit zwischen Reanimation und pmCT zusammen. Die Studie konnte zeigen, dass die Reanimation ein bedeutender Faktor für das postmortale Vorkommen von Gas insbesondere im Gastrointestinaltrakt und in der Leber ist. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass es durch die kurz nach dem Tod auftretende Ischämie des Darms zu kleinsten Schädigungen der Darmmukosa kommt, durch welche im Darm vorhandenes Gas (z.B. aufgrund von fehlerhafter Beatmung während einer Reanimation, erhöhter intrathorakaler Druck durch Herzdruckmassage) in das portalvenöse System der Leber gelangt. Zu einem ähnlichen Ergebnis kam auch eine Studie von SHIOTANI ET AL. (2005)<sup>23</sup>, in der 247 pmCT mit nicht-traumatischer Todesursache und einem PMI von max. zwei Stunden untersucht wurden. Während 19 nicht reanimierten Tote (aufgrund von bereits eingetretenen sicheren Todeszeichen wie Totenstarre oder -flecke bei Auffinden) frei von Gas waren, fand man bei 71% der Fälle mit Reanimation vor dem Tod Gas im Herz-Kreislauf-System, insbesondere im Herz, der Aorta und V. cava. Im Gegensatz dazu konnte in einer weiteren Untersuchung desselben Autors (SHIOTANI ET AL. (2010)<sup>42</sup>) mit 404 pmCT von Toten mit nicht-traumatischer Todesursache kein signifikanter Zusammenhang zwischen Gas in intrakraniellen Gefäßen und einer stattgehabten Reanimation gefunden werden.

Die Studien zeigen, dass die kardiopulmonale Reanimation ein nicht zu unterschätzender Faktor für das Vorkommen von Gas im Herz-Kreislauf-System ist und die Kenntnis darüber, ob vor dem Tod ein Reanimationsversuch unternommen wurde, enorm wichtig ist. In dem vorliegenden retrospektiven Studiendesign war es aufgrund der Aktenlage leider nur in Einzelfällen möglich diese Information in die Studie mit einzubeziehen, so dass darauf verzichtet wurde. Für eine zukünftige Studie wäre es deshalb ratsam, auf die Todesumstände und eventuelle medizinische Versorgung vor dem Tod zu achten. In diesem Rahmen wären möglicher Weise auch Informationen über den Gesundheitsstatus einer Person vor ihrem Tod wichtig, da z.B. eine systemische Infektion oder gar Sepsis, eine chronische Darmerkrankung wie Morbus Crohn oder Voroperationen am Gastrointestinaltrakt einen solchen Gasübertritt theoretisch begünstigen würden. Die Erfassung der Krankengeschichte kann deshalb für eine neue, prospektiv angelegte Studie ebenfalls nützlich sein.

Ein weiterer Punkt, der bei der Aktenrecherche zwar berücksichtigt, aber in der Auswertung nicht thematisiert wurde, ist der Fundort der Leichen. In der Theorie kann der Fundort, z.B. in der Wohnung, auf der Straße oder im Wasser, auch den Fäulnisprozess beeinflussen, z.B. durch die Umgebungstemperatur oder die Luftzirkulation. Da diese aber nicht automatisch an einem Fundort festgemacht werden können, erwies sich der aus den Akten aufgenommene Fundort nicht als optimal, um seinen Einfluss auf die Fäulnis zu untersuchen. Zwar hätte man zusammen mit dem Datum des Funds auf eine bestimmte Jahreszeit schließen und damit eine Tendenz für eher warmes oder kaltes Klima ableiten können, jedoch wäre dies nach meiner Einschätzung zu ungenau für eine aussagekräftige Untersuchung gewesen. Für eine zukünftige Studie wäre es deshalb von Vorteil nicht nur den Fundort, sondern auch klimatische Bedingungen am Auffindeort wie Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit zu dokumentieren. Aus diesen Erkenntnissen ließe sich eher schließen, ob die Umgebung einen Fäulnisprozess eher beschleunigt oder verlangsamt haben könnte und das PMI entsprechend korrigiert werden müsste.

Ein weiteres Problem der retrospektiven Analyse ist die fehlende Kontrolle über Transport und Lagerung der Toten, da es kein genaues Protokoll gibt, wann eine Leiche vom Fundort abtransportiert und letztlich in der Kühlung des Instituts gelagert wurde, was diesen Prozess zumindest genauer hätte nachvollziehen lassen können. Stattdessen ist hier eine relativ hohe Spannweite an „Wartezeiten“ möglich, die im Nachhinein nicht mehr eruiert werden können. Zwar lässt sich anhand des Zeitpunkts des pmCT abschätzen, wann eine Leiche definitiv im Institut angekommen war, jedoch ist damit nicht automatisch überliefert, ob und wie lange sie vor dem pmCT gekühlt wurde. Zwar konnte in einem Vergleich der Zeiträume zwischen

Leichenfund und pmCT dargestellt werden, dass es wahrscheinlich keinen Zusammenhang zwischen einer langen Kühlzeit und erhöhtem Auftreten von intravasalem Gas gibt, jedoch ist auch nicht völlig auszuschließen, dass in Einzelfällen z.B. die Kühlung unterbrochen wurde, da dies retrospektiv nicht geprüft werden konnte.

Ein weiterer entscheidender Faktor, der die Genauigkeit der vorliegenden Arbeit mindert, ist der Todeszeitpunkt. Dieser war lediglich bei der Untersuchung der beiden Schweinekadaver bekannt, in der retrospektiven Fallanalyse ließ er sich meist nur auf ein Zeitfenster von mehreren Stunden, manchmal auch nur auf wenige Tage, eingrenzen. Eine zeitgenaue Bestimmung des PMI war damit in der Regel nicht möglich, lediglich bei Todesfällen aus Kliniken oder sofort aufgefundenen Unfalltoten war das PMI annähernd genau bestimmbar. Eine Einteilung des PMI in Gruppen mit einem nicht gleichbleibenden und stattdessen ansteigenden Zeitraum (sechs Stunden in Gruppe 1, unbegrenzt in Gruppe 6 (PMI über 96 Stunden)) erscheint auf den ersten Blick widersprüchlich, da sie zu einer ungleichen Verteilung der Fälle führen mag und die Gruppen dadurch weniger vergleichbar erscheinen. Berücksichtigt man jedoch die Dynamik der Fäulnisgasbildung, erfordert es im frühen PMI eine engmaschigere Einteilung als in höheren Fäulnisstadien nach mehreren Tagen. Je früher ein Leichnam gefunden wird, desto genauer ist der Todeszeitpunkt durch Zeugenbefragungen und die letzten Handlungen (Handykontakte, Telefonate, Kauf von Tageszeitungen usw.) bestimmbar. Liegt aber ein Leichnam z.B. über viele Tage oder Wochen in seiner Wohnung, so sind Erinnerungen von Nachbarn nur noch vage und Zeugenbefragungen entsprechend ungenau, das soziale Umfeld meist generell nicht sehr gefestigt, so dass eine Eingrenzung des Todeszeitpunkts immer schwieriger wird. Bei einem kleinen PMI ist die Tragweite des Unterschiedes größer, ob der Todeszeit sechs oder zwölf Stunden her ist, bei längeren Leichenliegezeiten ist es dagegen von untergeordneter Bedeutung, ob der Tod 48 oder 54 Stunden her ist.

Die hohe untersuchte Fallzahl (n=785) führte zwar auf der einen Seite dazu, dass kleinere Ungenauigkeiten in der Masse der Fälle ausgeglichen wurden, allerdings kam es deshalb auch dazu, dass Messungen im pmCT aus zeitlichen Gesichtspunkten in ihrer Qualität reduziert werden mussten. Eine volumetrische Bestimmung der Gasmenge wäre im pmCT zwar technisch möglich gewesen, sie hätte jedoch einen immens höheren Arbeitsaufwand bedeutet. Um eine rein subjektive Einordnung nach Kriterien wie „viel Gas“ bis „wenig Gas“ zu vermeiden wurde deshalb das in Kapitel 2.2.4 beschriebene Messverfahren etabliert, das zumindest einen Anhaltspunkt für die Menge des Gases geben kann, reproduzierbar ist und von verschiedenen Untersuchern nach diesen Regeln durchgeführt werden kann. Sicherlich wäre eine genaue Volumenbestimmung insbesondere in den Herzhöhlen, den großen herznahen Gefäßen und in



den Körperhöhlen von Interesse für das Studienergebnis gewesen, jedoch wäre eine volumetrische Messung in sehr kleinen Gefäßen ebenso ungenau wie die nun durchgeführte Methodik, da bei einer Schichtdicke von 10 mm im pmCT nur ein annähernd kalkulierter Wert entstehen würde. Auch eine Asymmetrie der Gasverteilung wurde durch das Verfahren nicht berücksichtigt, eine Aufteilung der Werte in links-, rechts- und beidseitig hätte den Arbeitsaufwand in Anbetracht der hohen Fallzahl enorm in die Höhe getrieben. Insofern schien dieses Verfahren das geeignetste für die vorliegende Fragestellung zu sein.

Ein weiterer Punkt, der zur Verfälschung der Ergebnisse geführt haben könnte, ist die Auswahl des Untersuchungskollektivs. Für die Untersuchung konnten nur Fälle berücksichtigt werden, die in von Januar 2013 bis Dezember 2015 im Institut für Rechtsmedizin der Charité computertomographisch gescannt wurden. Dies sind, wie bereits in Kapitel 2.2.1 erwähnt, vor allem Tote mit traumatisch bedingter Todesursache (Polytrauma bei Verkehrsunfällen, Stich- und Schussverletzungen) oder solche, die im Zusammenhang mit medizinischen Eingriffen versterben. Pro Jahr versterben in Berlin rund 35 Tausend Personen (34.278 Verstorbene im Jahr 2015, Amt für Statistik Berlin-Brandenburg<sup>43</sup>), davon werden nur etwa drei bis vier Prozent im rechtsmedizinischen Institut der Charité obduziert, was etwa 1000 Fällen pro Jahr entspricht. Bei einem Drittel liegen hierzu pmCT-Daten vor, da nicht in allen Fällen eine ein pmCT rechtfertigende Fragestellung besteht. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass die hier untersuchte Population nur rund ein Prozent eines normalen Berliner Sterbejahres abbildet und keinen repräsentativen Querschnitt der verstorbenen Bevölkerung wiedergibt. Es sind im Untersuchungsgut überdurchschnittlich viele Traumata und andere nicht-natürliche Todesursachen vorhanden, die auch zu einem überdurchschnittlichen Auftreten von Gas geführt haben können. Für die vorliegende rechtsmedizinische Fragestellung sind die Ergebnisse jedoch von immanenter Bedeutung. Die Aussagegenauigkeit eines prospektiven Scannen von z.B. allen Sterbefällen eines Jahres wäre aber höher gewesen, insbesondere durch die hieraus resultierende abweichende Zusammensetzung der zu untersuchten Population.

Ein ebenfalls nicht zu unterschätzender Punkt ist die Tatsache, dass in der retrospektiven Auswertung keine Unterscheidung zwischen arteriellem und venösem Gefäßsystem getroffen werden konnte. Dies wäre im pmCT lediglich für die großen Gefäße wie Aorta und Vena cava möglich gewesen, da sie aufgrund ihrer Größe und herznahen Lage radiologisch sicher zu unterscheiden sind.

Letztendlich lässt sich auch auf Basis der hier dargestellten Untersuchungsergebnisse kein genauer Zeitraum angeben, in dem es sich sicher nicht um Fäulnisgas handelt, da eine Unterscheidung allein durch ein pmCT nach wie vor nicht möglich ist. Zwar deuten mehrere

Faktoren auf eher artifiziell oder eher fäulnisbedingt entstandenes Gas hin, genau differenzieren lassen sich die Gase aber weiterhin nur mit Hilfe von gaschromatographischer Verfahren.

Einen weiteren Ansatz zur Unterscheidung von Gas könnte die genaue Messung der HU-Dichtewerte im pmCT bieten, welche in der vorliegenden Arbeit nicht weiter berücksichtigt wurden. Zwar konnte in Studien bereits gezeigt werden, dass eine nahezu lineare postmortale Veränderung der HU-Werte, insb. des zerebrospinalen Liquors, stattfindet<sup>44</sup>, jedoch konnte dies noch nicht dazu genutzt werden Körperflüssigkeiten oder Gase sicher voneinander zu unterscheiden.<sup>45</sup>

DE QUIEROS ET AL. (2013)<sup>46</sup> führten eine Studie an 41 Kaninchen durch, von denen ein Teil durch Luftembolie (intravenöse Applikation von atmosphärischer Luft) getötet wurde, ein Teil an einem simulierten Barotrauma verstarb (Aufenthalt in Überdruckkammer bei 8,1 bar für 45 Min. und anschließende schnelle Dekompression zum atmosphärischen Luftdruck von ca. 1 bar) und ein weiterer Teil als Kontrollgruppe medikamentös euthanasiert wurde (intraperitoneale Applikation von Pentobarbital). Zu verschiedenen Zeitpunkten des PMI wurden dann Gasproben entnommen und im gaschromatographisch analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass bei einer Gasembolie die Zusammensetzung des Gases bis zu einem Zeitpunkt von 27 Stunden p.m. nahezu konstant bleibt und erst ab einem PMI von 42 Stunden ein signifikanter Anstieg des Wasserstoffgehalts zu verzeichnen ist. Dieses Ergebnis zeigt, dass zumindest in einem Tiermodell eine Unterscheidung zwischen Luftembolie und Fäulnisgas in einem gewissen Rahmen möglich ist. Da die angegebenen Zeiten für das PMI nicht automatisch auf den Menschen übertragbar sind, ist eine solche Untersuchung in der Zukunft wünschenswert. In einer Untersuchung von VARLET ET AL. (2015) wurden bereits 26 menschliche Tote ohne äußere Verletzungen und in unterschiedlichen Verwesungsstadien mittels Massenspektrometrie und Wärmeleitfähigkeitsdetektor im Hinblick auf die Zusammensetzung von intrakardialem Gas untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass in einem frühem Verwesungsstadium der Sauerstoffgehalt des Gases abnimmt, während die Konzentration von Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) im Verlauf ansteigt. In fortgeschrittenen Fäulnisstadien nehmen dann die von Bakterien aus H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> gebildeten Fäulnisgase Schwefelwasserstoff und Methan deutlich zu. Obwohl die Untersuchung bereits menschliche Tote einbezog, konnte ein genauer Zusammenhang zwischen PMI und der Gaszusammensetzung nicht hergestellt werden. Für die Zukunft ist daher eine genauere Analyse des intravasalen Gases zu bestimmten Zeitpunkten notwendig, um die vorhandenen pmCT-Daten durch molekularchemische Ergebnisse zu untermauern.

## 4.4 Fazit

Insgesamt lassen sich aus der hier durchgeführten Studie mehrere Schlüsse ziehen. Zum einen konnte sowohl durch die prospektive Untersuchung an den beiden Schweinen als auch durch die retrospektive Fallanalyse gezeigt werden, dass das Vorkommen fäulnisbedingten Gases in Gefäßen ab einem PMI von etwa 24 Stunden zu erwarten ist, in der Muskulatur, dem Knochenmark und den Körperhöhlen erst wesentlich später, hier ab etwa 48 Stunden p.m. In den Gefäßen der Leber, in den Herzhöhlen und den herznahen Abschnitten von Aorta und Vena cava waren in beiden Untersuchungen als erstes Gasansammlungen zu finden, insbesondere die Lebergefäße scheinen in diesem Zusammenhang eine tragende Rolle in der Bildung und Ausbreitung von postmortalem Gas zu spielen.<sup>47</sup> Im Hinblick auf die vorliegende Fragestellung konnte auch gezeigt werden, dass eine längere Leichenliegezeit bis zum pmCT unter entsprechender Kühlung keinen signifikanten beschleunigenden Einfluss auf das Entstehen oder Fortschreiten von Fäulnisgas hat.

Es konnte außerdem belegt werden, dass äußere Einflussfaktoren wie offene Verletzungen oder traumatische Todesursachen wie z.B. ein geschlossenes Schädel-Hirn- oder Polytrauma zu einem signifikant erhöhten Gasvorkommen führen, insbesondere in der jeweiligen Lokalisation des Traumas (Schädel-Hirn-Trauma → Gas in Schädelhöhle, Spinalkanal und Hirngefäßen). Medizinische Versorgung wie Gefäßzugänge oder Drainagen hatten keinen nachgewiesenen Einfluss auf die Gasmenge. Lediglich die Thoraxdrainage stand in engem Zusammenhang mit freiem Gas in der Brusthöhle, wobei jedoch nicht klar ist, ob die Drainage dort tatsächlich der auslösende Faktor ist.

Im Vergleich mit anderen Studien stellt diese hier eine der größten und umfangreichsten dar, sowohl was die Anzahl der einbezogenen Fälle als auch die Diversität der erfassten Messregionen und die prospektive wie retrospektive Betrachtung angeht, wobei jedoch im Rahmen der Datenerhebung und -messung auch Ungenauigkeiten und Messfehler auftreten konnten, welche die vorliegenden Ergebnisse unbemerkt beeinflussen. Ein wichtiger Faktor in diesem Rahmen ist die nicht berücksichtigte Reanimation vor dem Tod, welche ebenfalls zum Auftreten von intravasalem Gas führen könnte. Auch körperliche Vorerkrankungen und Infektionen, die in dieser retrospektiven Studie ebenfalls nicht berücksichtigt wurden, können ein Grund für das Auftreten von Gas sein.

Abschließend lässt sich deshalb feststellen, dass die hier durchgeführte Studie zwar einen wichtigen Beitrag zum Erkennen und zeitlichen Einordnen von postmortaler Gasbildung im pmCT leistet und in diesem Zusammenhang einen guten Überblick über diverse Einflussfaktoren

gibt. Letztendlich lässt sich das PMI, ab dem mit fäulnisbedingter Gasbildung zu rechnen ist, zwar anhand der Ergebnisse auf einen gewissen Zeitraum eingrenzen, jedoch kann auch auf Basis dieser Studie nicht mit Sicherheit zwischen Fäulnisgas und einer Luftembolie unterschieden werden. Um einen genaueren Einblick zu bekommen, wäre in Zukunft sicherlich eine großangelegte prospektive Studie nötig, die die genannten Einflussfaktoren möglichst genau erfasst und bei der das PMI jedes einzelnen genau bekannt ist, um Ungenauigkeiten wie hier zu vermeiden. Letztlich wäre auch eine manuelle volumetrische Messung des Gases im pmCT möglich und deutlich genauer, jedoch ist dies mit steigender Fallzahl und bei mehreren Messregionen zeitlich kaum realisierbar. Eine möglichst einfache automatische Berechnung durch das verarbeitende Programm wäre in Zukunft deshalb hilfreich und wünschenswert.

Zusammenfassend bleibt die Unterscheidung zwischen fäulnisbedingtem Gas und einer Luftembolie nach wie vor von der Erfahrung des untersuchenden Rechtsmediziners abhängig und bedarf im Zweifelsfall einer genaueren Untersuchung, z.B. durch gaschromatographische Gasanalyse. Aufgrund des hohen zeitlichen wie finanziellen Aufwands einer solchen Untersuchung und der mittlerweile fortgeschrittenen Verbreitung von Computertomographen in rechtsmedizinischen Instituten erscheint der Nachweis von Gas im pmCT als Methode der Zukunft und bedarf weiterer intensiver Forschung.<sup>37,38</sup>

# Literaturverzeichnis

1. Friedland GW, Thurber BD. *The birth of CT*. AJR Am J Roentgenol. 1996;167(6):1365-1370.
2. Kauffmann G, Sauer R, Weber W. *Radiologie*. 4 ed. Munich, Germany: Elsevier; 2011:104-107.
3. Bücheler E, Lackner K-J, Thelen M. *Einführung in die Radiologie. Diagnostik und Interventionen*. 11 ed. Stuttgart, Germany: Thieme; 2006: 14-16.
4. Vogl T, Reith W, Rummeny E. *Diagnostische und interventionelle Radiologie*. Heidelberg, Germany: Springer; 2011: 30-33.
5. Reiser M, Kuhn F-P, Debus J. *Duale Reihe Radiologie*. 2 ed. Stuttgart, Germany: Thieme; 2006:79-80.
6. Schumacher M, Oehmichen M, König HG, Einighammer H. *Intravital and postmortal CT examinations in cerebral gunshot injuries*. Rofo. 1983;139(1):58-62.
7. Thali M. *Virtuelle Autopsie (Virtopsy) in der Forensik*. In: *Der Pathologe*. 2011;2(32):293-295.
8. Thali M, Jackowski C, Oesterhelweg L, Ross S, Dirnhofer R. *VIRTOPSY - The Swiss virtual autopsy approach*. In: *Leg Med*. 2011;9:100-104.
9. Thali MJ, Yen K, Schweitzer W, Vock P, Boesch C, Ozdoba C, Schroth G, Ith M, Sonnenschein M, Doernhoefer T, Scheurer E, Plattner T, Dirnhofer R. *Virtopsy, a new imaging horizon in forensic pathology: virtual autopsy by postmortem multislice computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI) - a feasibility study*. J Forensic Sci. 2003;48(2):386-403.
10. Thali MJ, Yen K, Schweitzer W, Vock P, Ozdoba C, Dirnhofer R. *Into the decomposed body-forensic digital autopsy using multislice-computed tomography*. Forensic Sci Int. 2003;134(2-3):109-114.

11. Christe A, Flach P, Ross S, Spendlove D, Bolliger S, Vock P, Thali MJ. *Clinical radiology and postmortem imaging (Virtopsy) are not the same: Specific and unspecific postmortem signs*. Leg Med (Tokyo). 2010;12(5):215-222.
12. Bolliger S, Thali M, Ross S, Buck U, Naether S, Vock P. *Virtual autopsy using imaging: bridging radiologic and forensic sciences. A review of the Virtopsy and similar projects*. In: *Eur Radiol*. 2008;18:273-282.
13. Pedal I, Moosmayer A, Mallach H-J, Oehmichen M. *Luftembolie oder Fäulnis? Gasanalytische Befunde und ihre Interpretation*. In: *Z Rechtsmed*. 1987:151-167.
14. Jackowski C, Thali M, Sonnenschein M, Aghayev E, Yen K, Dirnhofer R, Vock P. *Visualization and quantification of air embolism structure by processing postmortem MSCT data*. J Forensic Sci. 2004;49(6):1339-1342.
15. Madea B, Krause D, Jachau K. *Leichenerscheinungen und supravitale Reaktionen - Todeszeitbestimmung*. In: Madea, B (ed.) *Praxis Rechtsmedizin*. Vol 2. Heidelberg, Germany: Springer; 2007: 39-42.
16. Henßge C, Madea B. *Methoden zur Bestimmung der Todeszeit an Leichen*. Lübeck, Germany: Verlag Schmidt-Römhild; 1988: 98-126.
17. Madea B, Krause D, Jachau K. *Leichenerscheinungen und supravitale Reaktionen - Todeszeitbestimmung*. In: Madea, B (ed.) *Praxis Rechtsmedizin*. Vol 2. Heidelberg, Germany: Springer; 2007: 32-36.
18. Haglund W, Sorg M. *Forensic Taphonomy. The Postmortem Fate of Human Remains*. Vol 1. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press LLC; 1997: 93-105.
19. Naeve W. *Gerichtliche Medizin für Polizeibeamte*. Heidelberg, Germany: Kriminalistik Verlag; 1978: 10-17.
20. Dent B, Forbes D, Stuart B. *Review of human decomposition processes in soil*. *Env Geol*. 2004;45(4):576-585.

21. Schoenen D, Albrecht M. *Die Verwesung aus hygienischer und bodenkundlicher Sicht - in zwei Teilen*. In: *Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene e.V.*, Berlin: Eigenverlag Verein WaBoLu; 2003:10-14.
22. Oehmichen M, Banaschak S, Madea B. *Sekundärfolgen mechanischer Gewalteinwirkungen, Todesursachen*. In: Madea B, ed. *Praxis Rechtsmedizin*. Vol 2. Heidelberg, Germany: Springer; 2007: 99-101.
23. Shiotani S, Mototsugu K, Ohashi N, Atake S, Yamazaki K, Nakayama H. *Cardiovascular Gas on Non-traumatic Postmortem Computed Tomography (PMCT): The Influence of Cardiopulmonary Resuscitation*. *Radiation Medicine*. 2005;23(4):225-229.
24. Shiotani S, Kohno M, Ohashi N, Yamazaki K, Nakayama H, Watanabe K. *Postmortem Computed Tomographic (PMCT) Demonstration of the Relation between Gastrointestinal (GI) Distension and Hepatic Portal Venous Gas (HPVG)*. *Radiation Medicine*. 2004;22(1):25-29.
25. Asamura H, Ito M, Takayanagi K, Kobayashi K, Ota M, Fukushima H. *Hepatic portal venous gas on postmortem CT scan*. *Leg Med (Tokyo)*. 2005;7(5):326-330.
26. Takahashi N, Higuchi T, Shiotani M, Maeda H, Hirose Y. *Intrahepatic gas at postmortem multislice computed tomography in cases of nontraumatic death*. *Jpn J Radiol*. 2009;27:264-268.
27. Gebhart FTF, Brogdon BG, Zech W-D, Thali M, Germerott T. *Gas at postmortem computed tomography - An evaluation of 73 non-putrefied trauma and non-trauma cases*. *Forensic Science International*. 2012;222:162-169.
28. Hou S-K, Chern C-H, How C-K, Chen J-D, Wang L-M, Lee C-H. *Hepatic Portal Venous Gas: Clinical Significance of Computed Tomography Findings*. *Am J Emerg Med*. 2004;22(3):214-218.
29. Okuda T, Shiotani S, Kobayashi T, Kohno M, Hayakawa H, Kikuchi K, Suwa K. *Immediate non-traumatic postmortem computed tomographic demonstration of myocardial intravascular gas of the left ventricle: effects from cardiopulmonary resuscitation*. *Springerplus*. 2013;2(1):86.

30. Laratta C, Cheung L. *Venous air embolism from blunt chest trauma*. Can Respir J. 2015;22(4):199-200.
31. Oehmichen M, Madea B. *Scharfe Gewalt*. In: Madea B, ed. *Praxis Rechtsmedizin*. Heidelberg, Germany: Springer; 2007: 129-130.
32. Jackowski C, Sonnenschein M, Thali M, Aghayev E, Yen K, Dirnhofer R, Vock P. *Intrahepatic Gas at Postmortem Computed Tomography: Forensic Experience as a Potential Guide for In Vivo Trauma Imaging*. J Trauma. 2005;62(4):979-988.
33. Lai C-C, Chuang C-H, Chao C-M, Liu W-L, Hou C-C. *Pulmonary artery air embolism after blunt trauma*. Resuscitation. 2011;82:369-370.
34. Milla F, Cahan M. *Lethal systemic air embolism in a multi-trauma patient*. J Am Coll Surg. 2008;206(3):591.
35. Almogy G, Rivkind AI. *Massive air embolism caused by blunt chest trauma*. Isr Med Assoc J. 2003;5(4):304.
36. Ho AM, Ling E. *Systemic air embolism after lung trauma*. Anesthesiology. 1999;90(2):564-575.
37. Fischer F, Grimm J, Kirchhoff C, Reiser MF, Graw M, Kirchhoff S. *Postmortem 24-h interval computed tomography findings on intrahepatic gas development and changes of liver parenchyma radiopacity*. Forensic Sci Int. 2012;214(1-3):118-123.
38. Egger C, Bize P, Vaucher P, Mosimann P, Schneider B, Dominguez A, Meuli R, Mangin P, Grabherr S. *Distribution of artifactual gas on post-mortem multidetector computed tomography (MDCT)*. Int J Legal Med. 2012;126(1):3-12.
39. Okumura M, Usumoto Y, Tsuji A, Kudo K, Ikeda N. *Analysis of postmortem changes in internal organs and gases using computed tomography data*. Leg Med (Tokyo). 2017;25:11-15.
40. Levy AD, Harcke HT, Mallak CT. *Postmortem imaging: MDCT features of postmortem change and decomposition*. Am J Forensic Med Pathol. 2010;31(1):12-17.



41. Swindle MM, Makin A, Herron AJ, Clubb FJ, Frazier KS. *Swine as models in biomedical research and toxicology testing*. Vet Pathol. 2012;49(2):344-356.
42. Shiotani S, Ueno Y, Atake S, Kohno M, Suzuki M, Kikuchi K, Hayakawa H. *Nontraumatic postmortem computed tomographic demonstration of cerebral gas embolism following cardiopulmonary resuscitation*. Jpn J Radiol. 2010;28(1):1-7.
43. Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, Potsdam. *Statistischer Bericht A IV 10-j/15. Sterbefälle in Berlin nach Todesursachen 2015*. April 2017. Abgerufen am 19. November 2017 unter [https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/publikationen/Stat\\_Berichte/2017/SB\\_A2004-2010-2000\\_2015j2001\\_BE.pdf](https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/publikationen/Stat_Berichte/2017/SB_A2004-2010-2000_2015j2001_BE.pdf).
44. Klein W, Kunz T, Hermans K, Bayat R, Koopmanschap D. *The common pattern of postmortem changes on whole body CT scans*. Journal of Forensic Radiology and Imaging. 2016;4:47-52.
45. Zech WD, Jackowski C, Buetikofer Y, Kara L. *Characterization and differentiation of body fluids, putrefaction fluid, and blood using Hounsfield unit in postmortem CT*. Int J Legal Med. 2014;128(5):795-802.
46. Bernaldo de Quirós Y, Saavedra P, Møllerløgken A, Brubakk AO, Jørgensen A, Gonzalez-Diaz O, Martin-Barrasa JL, Fernandez A. *Differentiation at necropsy between in vivo gas embolism and putrefaction using a gas score*. Res Vet Sci. 2016;106:48-55.
47. Sapienza D, Bottari A, Gualniera P, Asmundo A, Perri F, Gaeta M. *Post mortem CT of intrahepatic gas distribution in twenty-seven victims of a flood: Patterns and timing*. Leg Med (Tokyo). 2017;29:18-21.

## Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Lisa Schmidt, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Computertomographischer Nachweis von Gasbildung in menschlichen Leichen in Abhängigkeit vom postmortalen Intervall“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -[www.icmje.org](http://www.icmje.org)) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

# **Lebenslauf**

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.



## **Danksagung**

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. med. Michael Tsokos, Direktor des Instituts für Rechtsmedizin der Charité Universitätsmedizin Berlin und des Landesinstituts für gerichtliche Medizin, für die Überlassung des Themas und die Möglichkeit zur Arbeit an seinem Institut ganz herzlich bedanken.

Ein weiterer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Dr. med. Lars Oesterhelweg, stellvertretendem Institutsdirektor und leitendem Oberarzt des Instituts für Rechtsmedizin der Charité, für die freundliche und engagierte Betreuung dieser Arbeit.

Außerdem möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für die zuvorkommende Unterstützung während meiner Datenerhebung bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, deren Unterstützung ich mir nicht nur für das Gelingen dieser Arbeit, sondern für das Bewältigen des gesamten Studiums immer gewiss sein konnte.

Zuletzt möchte ich mich bei meinem Partner Robert bedanken, für alle aufbauenden Worte und Ratschläge und Deine Fähigkeit, riesige Probleme in winzige Hürden zu verwandeln.