

Reduktion der inhalativen Exposition von Formaldehyd in der Anatomie unter Verwendung von Weitwurfdüsen und Polymerisation von Formaldehyd mit InfuTrace™

S. Pfeil, H. Hieke, P. Brohmann, M. Wimmer

ZUSAMMENFASSUNG Formaldehyd stellt weltweit das am meisten verwendete Fixativ zur Konservierung anatomischer und pathologischer Präparate in der Human- und Veterinärmedizin dar. Die Einführung des rechtsverbindlichen Arbeitsplatzgrenzwerts (AGW) von $0,37 \text{ mg/m}^3$ im Jahr 2015 erforderte umfangreiche Maßnahmen zur Reduktion hoher Expositionen. Am Anatomischen Institut der Universität Gießen wurden deshalb verschiedene organisatorische sowie Lüftungs- und präparationstechnische Maßnahmen zur Reduktion erprobt und deren Erfolg durch messtechnische Bestimmung der inhalativen Exposition gegenüber Formaldehyd überprüft. Sehr erfolgreich konnte der AGW durch die Kombination einer Nachbehandlung der fixierten Präparate mit dem formaldehydbindenden Reagenz InfuTrace™ und modifizierter Luftführung unter Verwendung von Weitwurfdüsen über den Präparierischen auch bei kritischen Präparationsschritten weit unterschritten werden. In diesem Beitrag werden die Effizienz der organisatorischen Maßnahmen diskutiert sowie die Konstruktion der Weitwurfdüsen und die optimierte präparative Nachbehandlung mit InfuTrace™ vorgestellt, die zur sicheren Einhaltung des AGW beitragen können.

Low cost and effective reduction of formaldehyde in gross anatomy: Formaldehyde destruction using InfuTrace™

ABSTRACT Formaldehyde is extraordinary effective for fixation of human bodies and routinely used in embalming solutions in anatomical dissection all over the world. High concentrations in vapours emitted from corpses embalmed with formaldehyde force the necessity to reduce the exposure for fulfilling Permissible Exposure Limits (PEL) worldwide. To monitor the emission more than fifty human corpses were examined at different dissection steps while skin was removed, subcutaneous fat and muscles were dissected, and during opening of the thorax and of the abdominal wall. Best results were achieved by a combination of post-embalming treatment with InfuTrace™ applied to 3% fixed corpses and a modified ventilation system with three long throw nozzles fixed over the length of the dissection table. The data generated clearly underline the necessity for a combination of different methods – chemical destruction combined with a modified ventilation system – to reduce formaldehyde loads in a dissection course when using conventionally formaldehyde fixed corpses.

1 Hintergrund

Bereits zehn Jahre vor Einführung des rechtsverbindlichen Arbeitsplatzgrenzwertes (AGW) für Formaldehyd wurden im deutschsprachigen Raum Konsequenzen und Schwierigkeiten diskutiert, die mit der Einhaltung des AGW in anatomischen Praktika verbunden sind [1; 2]. Formaldehydexpositionen in anatomischen Praktika ergeben erhebliche Spannbreiten der ermittelten Konzentrationen [3 bis 10] mit Spitzenwerten bis zu $9,1 \text{ ppm}$ [11]. Dies beruht zum Teil auf Lüftungstechnisch mangelhaft ausgestatteten Präparierischen sowie nicht optimierten Fixierverfahren. Die Vorgehensweise zur kurzfristigen Einführung effektiver Reduktionsmaßnahmen ist mühsam und erfordert individuelle Lösungen mit kostenintensiven messtechnischen Kontrollen.

Zur Erfassung der Formaldehydemissionen aus den Präparaten werden vielerorts direkt belüftete oder abgesaugte Sektionstische in unterschiedlichen Ausführungen (Schlitzabsaugung, Flächenabsaugung oder Lochplatten) eingesetzt [12 bis 14]. Eine weitere Alternative sind abgesaugte Tische mit Filtern, zum Beispiel Aktivkohle, im Umluftverfahren [15; 16]. Nach § 10 Abs. 5

der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) darf die abgesaugte Luft bei Tätigkeiten mit krebserzeugenden, keimzellmutagenen oder reproduktionstoxischen Gefahrstoffen der Kategorie 1A oder 1B nicht in den Arbeitsbereich zurückgeführt werden. Dies gilt nicht, wenn die Luft unter Anwendung von behördlich oder von den Trägern der gesetzlichen Unfallversicherung anerkannten Verfahren oder Geräten ausreichend von solchen Stoffen gereinigt ist. Die Luft muss dann so geführt oder gereinigt werden, dass krebserzeugende, keimzellmutagene oder reproduktionstoxische Stoffe nicht in die Atemluft anderer Beschäftigter gelangen [17].

Für den Ersatz von Formaldehyd als Fixativ sind zwar Substitute erhältlich, aber viele dieser Mittel scheinen zum gegenwärtigen Zeitpunkt entweder nicht für die Langzeitverwendung im anatomischen Praktikum geeignet [18] oder sind sehr aufwendig in ihrer Verwendung. Als Beispiele seien genannt: das Fixativ „Aminolipin“, das noch nicht zugelassen ist [19 bis 21], Alkohol-Glykol-Mischung [22] oder eine Perfusionslösung aus Ethanol und Glycerin, die explosionsgeschützte Räumlichkeiten erfordert [23], eine Seifen-Alkohol-basierte Lösung [24], eine Nitrit-Salzlösung [25] oder die Behandlung mit Schellack [26].



Bild 1. Einzeldüse, bestehend aus Weitwurfdüse, Rohrventilator, Volumenstrommesseinrichtung, Drosselklappe sowie Rohr- und Formteilen.

Aufgrund fehlender Alternativen ist die Verwendung von Formaldehyd als Fixativ derzeit aus der Anatomie nicht wegzudenken, da es das effektivste und langfristig antibakteriell wirksamste Mittel ist [27]. Formalinbasierte Fixierungen führen zu außerordentlich guter Erhaltung der Gestalt und Größe von Organen und Gefäßen [28].

Die Räumlichkeiten am Institut für Anatomie und Zellbiologie der Humanmedizin Gießen ließen eine Nachrüstung mit abgesaugten Präpariertischen nicht zu. Ein Neubau des Gebäudes stand aus verschiedenen Gründen nicht zur Diskussion. Deshalb mussten alternative Methoden entwickelt werden, um den Praktikumsbetrieb unter Einhaltung der Grenzwertvorgaben aufrechtzuerhalten.

Im Rahmen dieser Studie wurden zunächst die Immissionsvorgänge während des Präparierkurses näher untersucht und verschiedene, allgemeingültige organisatorische und präparations-technische Maßnahmen zur Formaldehydverminderung messtechnisch überprüft. Sowohl die Technik der Weitwurfdüsen, eine Eigenentwicklung der Universität Gießen (H. H.), als auch das Formaldehyd bindende Reagenz InfuTrace™ wurden auf ihre Wirksamkeit überprüft. Der Einsatz einer dieser beiden Maßnahmen ermöglicht bereits die Unterschreitung des AGW. Erst aus der Kombination beider Ansätze resultieren Expositionswerte unter $0,1 \text{ mg/m}^3$.

2 Material und Methoden

2.1 Spenderkörper

Jeder einzelne Körperspender hat zu Lebzeiten schriftlich versichert, seinen Körper freiwillig der Aus- und Weiterbildung der Ärzte sowohl zu Lehr- als auch zu Forschungszwecken zur Verfügung zu stellen. Nach Ableben werden die Spenderkörper innerhalb von 24 h perfundiert und nur in Einzelfällen zwischenzeitlich bei ca. $4 \text{ }^\circ\text{C}$ gelagert. Während des Projektes wurden die Präparate zwischen den einzelnen Messterminen mit formaldehydfreier Tuchflüssigkeit (45 % Phenoxyethanol, 6 % Glycerin, 4 % Thymol, 4 % Terralin®, deionisiertes Wasser) bei $17 \text{ }^\circ\text{C}$ im Präpariersaal gelagert.

2.2 Bauliche Voraussetzungen

Das Institut für Anatomie der Justus-Liebig-Universität verfügt über zwei baulich identische Sektionssäle – Größe: $17,3 \text{ m} \times 16,8 \text{ m} = 290 \text{ m}^2$, Saalhöhe: 5,5 m. Hallenvolumen: $1 595 \text{ m}^3$ – mit je zwölf Sektionstischen.

Die Sektionshallen werden mit etwa $13 000 \text{ m}^3/\text{h}$ Zuluft und $15 000 \text{ m}^3/\text{h}$ Abluft versorgt. Dies entspricht einem Luftwechsel

von $9,4/\text{h}$. Die Zuluft wird über die Raumdecke mit 13 Schlitzschienen (Druckdecke) eingebracht und die Abluft wird dem Saal über elf bodennahe Luftdurchlassgitter entnommen.

2.3 Ventilationsversuche

- Handelsüblicher Standventilator (Fa. Praktiker, Kirkel), Regulierung der Strömungsgeschwindigkeit und damit der Lüftungsintensität über Stufenschaltung.
- Reinraumzelt (Fa. MCRT, Heuchelheim) mit Clean-Flow-System. Abmessungen $2,3 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}$ mit vier Seitenwänden, Höhe 3,3 m, Lüftungsgerät mit H14-Filtern und Vorfilter G2, EC-Radialventilator, 230 V, ca. $2 500 \text{ m}^3/\text{h}$, Nylonschläuche zur Verbindung von Gebläse und Zelt waren an der Decke des Zeltes montiert. Die Luftwechselrate betrug $>140/\text{h}$. Während der Probenahme befanden sich neun Personen am Sektionstisch im Reinraumzelt.

2.4 Weitwurfdüsen

Material für die Einzeldüse (**Bild 1**) Rohrventilator RR125C (Fa. Helios Ventilatoren, Villingen-Schwenningen), Wickelfalzrohrsystem, Einlaufdüse, konzentrische Übergänge (DN 200, DN 125, DN 100) Rohrschellen, Montageschienen (Fa. Lindab, Bargteheide), Volumenstrommesseinrichtung VMR 100 (Fa. Trox, Neukirchen-Vluyn), Weitwurfdüse WDA-W 63 (Fa. Schako, Kolbing).

Zur Messung von Luftgeschwindigkeiten wurde ein thermisches Anemometer (TA5 Airflow, Rheinbach) verwendet, zur Strömungsverfolgung und Darstellung Dräger-Rauchröhrchen (Fa. Dräger, Unterhaching, Strömungsprüfer-Set CH216). Rastermessungen wurden mit einem 480-Klimamessgerät der Fa. Testo, Lenzkirch (Artikel-Nr.: 0563 4800) sowie einer Hitzedrahtsonde für Strömungsmessungen bis 5 m/s (Artikel-Nr.: 0635 1048) durchgeführt.

2.5 Fixierlösungen

Wenn nicht anders angegeben, wurden die Spenderkörper mit Fixierlösung 1 perfundiert. Die Perfusion wurde jeweils beendet, wenn der Druck im Präparat den hydrostatischen Druck der Perfusionslösung erreichte. Im Schnitt werden je Präparat ca. 20 l Fixierlösung verwendet.

- Fixierlösung 1: 3 % Formaldehyd, 5 % Phenoxyethanol, 4,28 % Glycerin, 62,9 % Ethanol, deionisiertes Wasser,
- Fixierlösung 2: 2,4 % Formaldehyd, 5 % Phenoxyethanol, 5 % Glycerin, 64 % Ethanol, deionisiertes Wasser,
- Fixierlösung 3: 1,85 % Formaldehyd, 0,83 % Thymol, 0,83 % Glycerin, 0,83 % Lysoformin® (Formaldehydanteil addiert 0,05 % zur Gesamtmenge), 0,83 % Diethylenglycol, 21,7 % Ethanol, deionisiertes Wasser,
- Fixierlösung 4: gesättigte Kochsalzlösung (NaCl) mit 1,48 % Formaldehyd, 2 % Glycerin, 16 % Ethanol, 10 kg Natriumchlorid, deionisiertes Wasser,
- Fixierlösung 5: 2,14 % Formaldehyd, 2,5 % Phenoxyethanol, 2,5 % Glycerin, 87 % Ethanol, deionisiertes Wasser,
- Fixierlösung 6: 1,83 % Formaldehyd, 0,83 % Phenol, 0,83 % Thymol, 0,83 % Glycerin, 0,83 % Lysoformin®, 0,83 % Diethylenglycol, 21,7 % Ethanol, deionisiertes Wasser.

Die Präparate werden entweder in Wannen gelagert in 2 % Terralin protect® [29] oder eingeschweißt mit einer kleinen Menge an 2 % Terralin®.

2.6 Formaldehydprobenahme und Analytik

Probenahme und Analytik erfolgten in Anlehnung an das Messverfahren „Aldehyde“ der IFA-Arbeitsmappe, Kennzahl 6045 [30]. Es wurden verschiedene Personal Sampler eingesetzt: GSA 2500ex, GSA 250 (Fa. GSA Gerätebau, Ratingen), GilAir Plus (Fa. Sensidyne, St. Petersburg, Florida, USA), Buck (Fa. A. P. BUCK INC, Orlando, USA), Flusskontrolle mit TSI Model 4199, 4100 Series (Fa. TSI, Aachen). DNPH-Kartuschen (Supelco DNPH S10, Sigma-Aldrich, jetzt Merck, Katalog-Nr.: 21026-U) wurden als Adsorbens verwendet. Der Volumenstrom variierte zwischen 0,33 und 1,5 l pro Minute. Die Beprobung der Raumluft erfolgte mit Personal Samplern (siehe oben) und dem Raumluftsammler BiVOC2 (Holbach-Company, Wadern). Als zweite Sammelmethode wurde der Radiello®-Passivsammler eingesetzt (Sigma-Aldrich, jetzt Merck, Katalog-Nr.: RAD165), Florisil® belegt mit DNPH und identischer Analytik. Hohe Konzentrationen von Ethanol in der Luft haben keine Auswirkungen auf den Messwert, wie von *Shiraishi* [31] überprüft.

Die Analyse der Luftproben erfolgte durch das ARGUK-Umweltlabor in Oberursel mittels Hochleistungsflüssigchromatographie (HPLC) und UV-Detektion nach Elution mit 3 ml Acetonitril [32]. Die Bestimmungsgrenze variierte in Abhängigkeit vom Sammelvolumen zwischen 0,001 und 0,005 mg/m³.

Der Probenahmeaufbau lehnte sich an das MGU-Messprogramm 9187 „Formaldehyd-Messungen in Anatomien“ [33] an: Je Präpariertisch wurden Dreifachbestimmungen durchgeführt. Zwei Personen wurden zeitgleich jeweils mit einem Personal Sampler ausgestattet. Zusätzlich wurde ein stationärer Messpunkt im Bereich des Thorax des Präparats in Arbeitshöhe angebracht, wobei auf einen schlanken Geräteaufbau geachtet wurde, der dicht gedrängtes Arbeiten der Personen am Tisch rund um den Messaufbau erlaubte. Die Passivsammler wurden aus praktischen Gründen am Kragen des Kittels unterhalb der Schulter befestigt. Im jeweiligen Messszenario waren die Präpariertische immer von acht Personen belegt. Die Sammeldauer betrug in der Erprobungsphase verschiedener Maßnahmen jeweils 15 Minuten pro Szenario, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. In Abhängigkeit vom Messszenario wurden Sammelzeiten zum Teil verlängert, z. B. für die Beprobung des Gehirns und des Rückenmarks im Neuroanatomiekurs oder Proben von Dauerpräparaten, die im Physikikum verwendet werden. In beiden Fällen wurden ausschließlich stationäre Messpunkte gewählt, aber reale Situationen nachgestellt. Die Raumluft des Präparierensaals wurde an zwei Stellen mittig zwischen vier Präpariertischen an jedem Messtag mit einer Sammelzeit über die gesamte Dauer des Präparierkurses (180 min) beprobt.

Die statistische Datenauswertung und Bestimmung der Standardabweichung SD erfolgte mit Graphpad Prism.

2.7 Anwendung von InfuTrace™

100 ml InfuTrace™ (American Bio-Safety, Inc., Rocklin, Kalifornien, USA), ein formaldehydbindendes Agens, wurde in Konzentrationen von 20 % zur Injektion gemäß Anwendungsvorschrift [34] in viszeralen Kavitäten sowie zusätzlich etwa 3 bis 5 l (11 %) für die subkutane Mehrfachinjektion und in Konzentrationen von 11 % zum Sprühen und Befeuchten der Präparate im Präparieraal eingesetzt.

Zur Überprüfung frischer Präparate nach InfuTrace™-Behandlung wurden direkt an der Oberfläche des Präparats Luftmessungen mit dem Dräger-Röhrchen Formaldehyd 0.2a und der

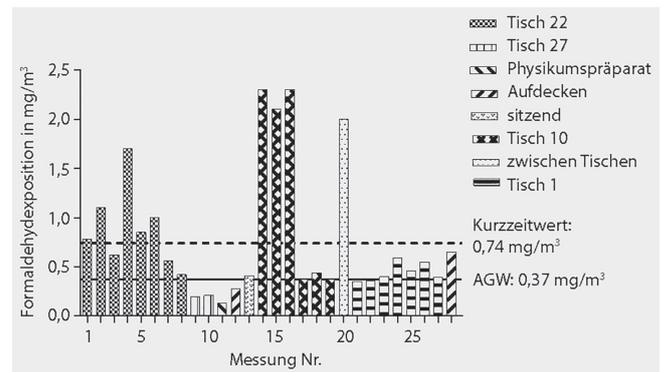


Bild 2. Formaldehydemission im anatomischen Praktikum vor Modifikationen der Lüftungstechnik und ohne Nachbehandlung des fixierten Präparats.

Accuro®-Handpumpe (Fa. Drägerwerk, Lübeck) während der ersten Hautöffnung durchgeführt. Der Messwert bei 20 Pumpenhuben sollte Konzentrationen oberhalb der Bestimmungsgrenze nicht übersteigen, anderenfalls ist zusätzliches Infutrace™ subkutan zu injizieren.

2.8 Kontrolle durch das Regierungspräsidium Kassel

Zur Absicherung der intern erzielten Daten wurden abschließend Beprobungen durch die unabhängige Hessische Landesmessstelle für Gefahrstoffe im Regierungspräsidium Kassel gemäß der NIOSH-Methode 2016 [35] mit einem Volumenstrom von 0,1 l/min und Analyse mittels HPLC-UV durchgeführt. Als Personal Sampler wurden Gilian LFS 113 (Fa. Sensidyne, St. Petersburg, Florida, USA) und S 205 (Ametek/Dupont) verwendet mit DNPH Typ 226-119 (Fa. SKC ANALYT-MTC Meßtechnik, Müllheim), Flusskontrolle mit Definer 220-L (Fa. Mesa Labs, Lakewood, Colorado, USA). Die Bestimmungsgrenze variierte in Abhängigkeit vom Sammelvolumen zwischen 0,014 und 0,028 mg/m³.

Nach jedem Präpariertag wurden zur Desinfektion möglicher mikrobieller Kontaminationen Incidin® liquid [36] und Freka®-NOL AF [37] für alle Präparate verwendet.

3 Ergebnisse der Statusmessung vor Verringerung der Formaldehydemission

Messungen im studentischen Praktikum vor Maßnahmen zur Minderung der Formaldehydemissionen erbrachten die in **Bild 2** dargestellten Ergebnisse.

Der überwiegende Teil der Messwerte ergab deutliche Überschreitungen des AGW von 0,37 mg/m³, aber auch sehr viele Überschreitungen des 15-Minuten-Kurzzeitwerts von 0,74 mg/m³ [38]. Die Messwerte erscheinen irregulär. Eine Gesetzmäßigkeit war noch nicht erkennbar. Eine genaue Betrachtung der Vorgänge während der Probenahme ergibt jedoch Folgendes:

- An Tisch 22 (Proben 1 bis 8) zeigt sich die übliche irreguläre Verteilung von Messwerten, wenn zwei Personen am Präpariertisch bei voller Tischbelegung (acht Personen) gegenüberstehen und im geöffneten Bauchraum tätig sind. Die Messwerte sind dabei nicht während der Öffnung des Bauchraums mit Expositionsspitzen entstanden, sondern einige Präparationsstunden danach.

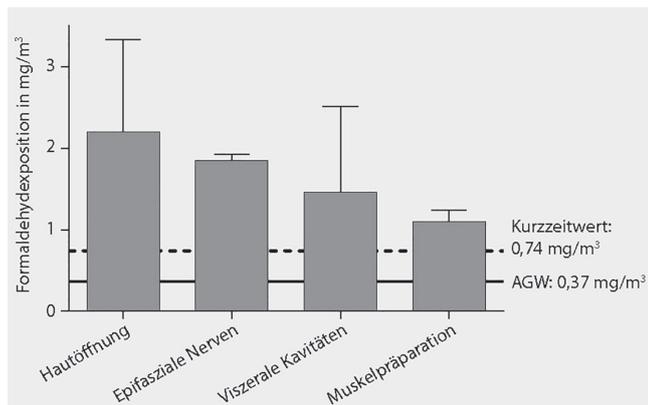


Bild 3. Exposition in Abhängigkeit des Präparationsfortschritts. Die höchste Emission erfolgte während der Hautöffnung. Die Messungen der Muskelpräparation und inneren Kavitäten wurden an Körpern vorgenommen, die bis zu einem halben Jahr länger in Verwendung waren und deren Emission insgesamt bereits abgenommen hatte ($n = 23$).

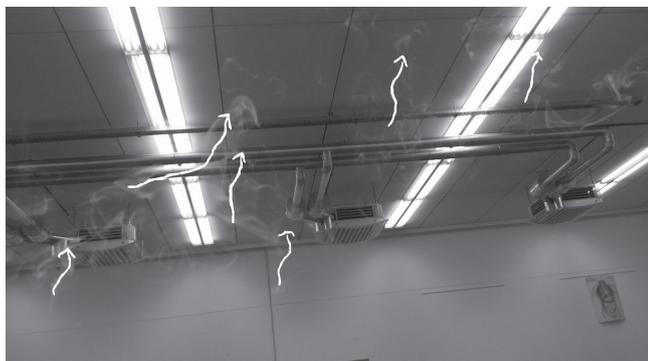


Bild 4. Strömungsdarstellung über Personen oder Personengruppen mittels Rauchfäden.

- An Tisch 10 (Proben 14 bis 16) ist der 15-Minuten-Kurzzeitwert bei voller Tischbelegung mit Messwerten von über 2 mg/m^3 weit überschritten. Sobald wenige Personen am Tisch arbeiten, wird der Grenzwert jedoch nur geringfügig überschritten oder sogar unterschritten (Proben 17 bis 19).
- Mit einem Messwert von 2 mg/m^3 (Probe 10) zeigt sich die Belastung einer Person, die sich zwischen zwei Präparations-tischen hin und her bewegt.
- An Tisch 1 (Proben 21 bis 27) ist der Einfluss von Weitwurf-düsen grafisch ersichtlich, da dieser Tisch zum Zeitpunkt der Probenahme bereits mit einem Prototyp ausgestattet war. Bei dem Präparat handelte es sich um einen Körper, der zuvor ein halbes Jahr im Präpariersaal auflag und deshalb eine geringere Basisemission aufwies.
- Insbesondere Messungen während des Aufdeckens durch den Präparator (Proben 28 und 12) belegen eine Abnahme der Emission im Laufe der Verwendung von Präparaten im Praktikum. Zu Beginn des Kurses wurde die Exposition des Präparators mit $0,65 \text{ mg/m}^3$ während des Aufdeckens von elf Präparaten ermittelt. Die Präparate waren seit etwa vier Wochen im Kurs in Verwendung (Muskelpräparation, Präpariersaal A, Probe 28). Eine weitere Messung erfolgte während des Aufdeckens von zwölf Präparaten, die ein halbes Jahr länger im Kurs in Verwendung waren (Präparation der inneren Organe, Präpariersaal B, Probe 12) und ergab einen Messwert von $0,28 \text{ mg/m}^3$. Daraus ist eine zeitbedingte Reduktion von ca.

55 % für Präparate abzuleiten, die sechs Monate länger im Präpariersaal exponiert waren. Weitere Versuche zur zeitabhängigen Reduktion der Formaldehydemission ergaben vergleichbare Werte. Die als Dauerpräparate schon seit mehreren Jahren verwendeten Physikumspräparate (Probe 11) liegen mit $0,13 \text{ mg/m}^3$ deutlich unterhalb des AGW, obwohl die Probenahme in einem ungelüfteten Nebenraum ohne Frischluftzufuhr unter Worst-case-Bedingungen erfolgte.

In Abhängigkeit vom Präparationsverlauf zeigt sich die Abnahme in **Bild 3**. Die Emission von Formaldehyd aus dem Präparat ist abhängig vom Fortschritt der Präparation. Höchste Emissionswerte treten am Anfang des Präparierkurses auf. Je länger die Präparate im Rahmen des Kurses exponiert sind, desto geringer sind deren Emissionen. Expositionsspitzen während der Eröffnung von Thorax oder Abdomen sind in dieser Grafik nicht erfasst.

Diese Ergebnisse werden auch belegt durch Untersuchungen von *Shiraishi* und Mitarbeitern [31], die eine zeitabhängige Abnahme um ca. 50 % innerhalb einer dreimonatigen Kursdauer nachweisen konnten. Diese Abnahme verläuft nicht linear mit der Zeit, sondern hängt zusätzlich vom Präparationsschritt ab. Präparation der Haut sowie die Öffnung von Thorax und Abdomen führen zu Expositionsspitzen.

4 Lüftungstechnik und Weitwurfdüsen

In einem ersten Schritt wurden strömungstechnische Versuche in den Präpariersälen mit unveränderter Ausrüstung durchgeführt. Aufgrund der Raumhöhe von etwa 5,5 m konnten in ca. 1,8 m (Höhenbereich stehender Personen) nur noch geringe Luftgeschwindigkeiten der Zuluft am Präpariertisch gemessen werden.

Im Bereich von Personen oder Personengruppen ergab sich durch deren thermischen Auftrieb sogar eine Strömungsumkehr (**Bild 4**). Hier konnten aufwärts gerichtete Luftströmungen festgestellt werden. Die ermittelten Geschwindigkeiten waren abhängig vom Messort sowie von der Personenanzahl. Sie lagen zwischen 0,09 und 0,15 m/s.

Am Körper sowie über den Körpern von Einzelpersonen oder Personengruppen wurde ebenfalls eine aufsteigende Luftströmung festgestellt. Für die am Präparationstisch tätigen Personen bedingt dies eine hohe Exposition gegenüber der Formaldehydemission des Präparats.

Erste Versuche, die Luftströmung mit einem handelsüblichen Standventilator in horizontaler Richtung zur Längsachse des Tisches umzulenken, ergaben eine nur geringe Reduktion der Formaldehydexposition um maximal 20 %: $1,50 \pm 0,56 \text{ mg/m}^3$ gegenüber von $1,85 \pm 0,07 \text{ mg/m}^3$ ohne Ventilator für Spenderkörper A und $1,55 \pm 0,21 \text{ mg/m}^3$ gegen $1,85 \pm 1,06 \text{ mg/m}^3$ für Spenderkörper B. Der sich einstellende Luftstrom erzeugte starkes Zugempfinden bei den am Tisch stehenden Personen.

Ein weiterer Versuch, einen sicheren Downflow von oben nach unten ohne Strömungsumkehr zu erzeugen, wurde mit einem Reinraumzelt mit 140-fachem Luftwechsel (15-Faches der normalen Hallenlüftung) erprobt. Die Formaldehydexposition wurde einmal bei Präparation durch neun Personen innerhalb des Reinraumzeltes und direkt danach außerhalb des Zeltes am gleichen Präparat ermittelt. In Relation zu Werten unter bestehender üblicher Hallenbelüftung betrug die Formaldehydreduzierung lediglich 20 bis 30 %: $1,56 \pm 0,63 \text{ mg/m}^3$ gegen $1,85 \pm 0,07$

mg/m³ im Präparationsaal für Spenderkörper A und 1,03 ± 0,23 mg/m³ gegen 1,85 ± 1,06 mg/m³ für Spenderkörper B. Die Werte lagen somit immer noch weit über dem Grenzwert.

Um einen sicheren Downflow von möglichst unbelasteter Luft zu erreichen, der möglichst exakt auf die Tischoberfläche abgestimmt werden kann, wurde ein spezielles Düsenblassystem entwickelt. Mittels Weitwurfdüsenkonstruktion wurden etwa 1 400 m³/h Luft (entnommen in 5,5 m Höhe der Sektionshalle) direkt auf die Oberfläche des Sektionstisches geleitet. Hierdurch wird die Anreicherung von Formaldehyd oberhalb des Präparates vermindert sowie der thermische Auftrieb der Luft in den Bereich von Mund und Nase der am Sektionstisch tätigen Personen verhindert. Die formaldehydbeladene Luft fällt zu Boden und wird mit der Hallenluft bodennah abgeführt.

Um die komplette Tischlänge abzudecken, wurde das Düsen-system pro Tisch auf drei Düsen erweitert und mit einem Ventilator mit elektronisch kommutiertem Motor (EC-Ventilator) optimiert (Bild 5).

Zur Sicherstellung der Düsenfunktion und zum Abgleich etwaiger ungleich belüfteter Bereiche des Tisches wurde der Tisch-downflow mit einem Raster von vier auf zehn Quadraten der Größe 20 cm x 20 cm jeweils in deren Mitte über dem Tisch gemessen. Ermittelte Downflowgeschwindigkeiten über dem Tisch liegen im Bereich von 0,1 und 0,5 m/s. Die mittlere Geschwindigkeit liegt im Bereich von 0,24 m/s. Höhere Geschwindigkeiten liegen in der Mitte, hier Brust-Bauch-Bereich des Präparates, der Bereich der vermutet höchsten Formaldehydemission, nach außen hin zu den Tischrändern abnehmend (Bild 6). Die Downflowgeschwindigkeit wurde so justiert, dass kein Zugluftempfinden bei den am Tisch tätigen Personen auftrat.

Personenbezogene Messungen der Formaldehydexposition am Präparat bei vergleichbaren Präparationsschritten ohne Weitwurfdüsen ergaben starke Reduktionen im Bereich von 53 bis 69 % durch den Einsatz der Düsen, ohne Anwendung von InfuTrace™ (Tabelle).

Um die Exposition gegenüber Formaldehyd weiter zu reduzieren und den AGW auch langfristig sicher einzuhalten, wurden weitere Reduktionsmaßnahmen vorgenommen.

5 Weitere Maßnahmen zur Reduktion der inhalativen Exposition

Die weiteren Versuche wurden unter weitgehend reproduzierbaren Messbedingungen mit einer Anzahl von acht bis zehn Personen je Tisch während vergleichbarer Präparationsschritte und – soweit möglich – Präparaten vergleichbarer Dimensionierungen

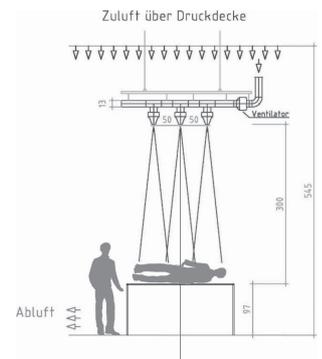


Bild 5. Oben: Dreierdüsenkonstruktion. Unten: Verwendung der Dreierdüsenkonstruktion im Sektionskurs.

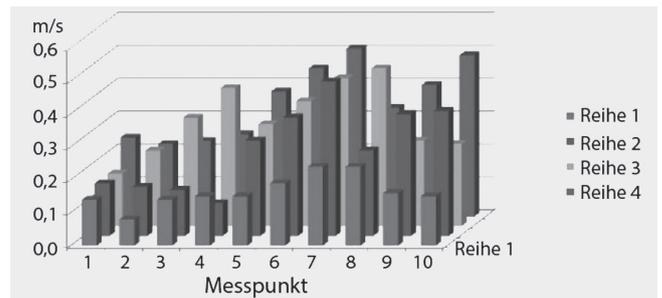


Bild 6. Strömungsverteilung (Downflow) über dem Sektionstisch 2. Höhere Geschwindigkeiten liegen meist im Bereich der Körpermitte.

Tabelle. Exposition bei Tätigkeiten an einem Präparat bei identischem Präparationsverfahren mit und ohne Verwendung von Weitwurfdüsen, n = 28.

Präparat	Formaldehydgehalt in Fixierung in %	Präparationsschritt	Zeit in Präparation*	Formaldehyd-exposition mit Düse in mg/m ³	Formaldehyd-exposition ohne Düse in mg/m ³	Formaldehyd-verminderung in %
I	3,0	Nervenpräparation	drei Wochen	1,15 ± 0,071	1,85 ± 0,071	38***
II	2,4	Nervenpräparation	drei Wochen	0,87 ± 0,028	1,85 ± 1,06	53***
III	3,0	Muskelpräparation	sechs Monate	0,25 ± 0,007	0,65 ± 0,14	62
IV	3,0	Muskelpräparation	sechs Monate	0,37 ± 0,014	1,03 ± 0,25	64
V**	3,0	Nervenpräparation	drei Wochen	0,15 ± 0,015	0,31 ± 0,21	52
Verwendung von Düsen vs. normale Hallenlüftung ohne Düsen mit Verwendung von InfuTrace™						
VI	3,0	Nervenpräparation	drei Wochen	0,072 ± 0,009	0,23 ± 0,07	69

* im Präparationskurs, ** adipöses Präparat, *** Düsen vor endgültiger Optimierung.

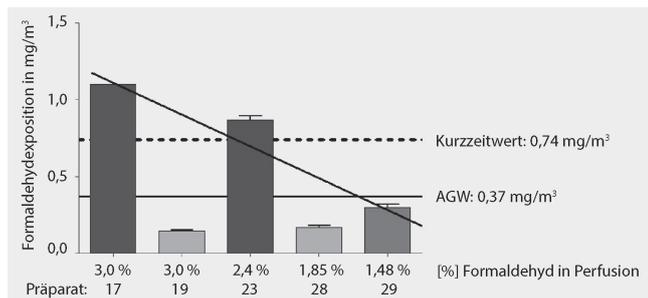


Bild 7. Formaldehydemission in Abhängigkeit vom Formaldehydgehalt in der Fixierung – jeweils während der Hautöffnung und mit Einsatz der Weitwurfdüse. Die Präparate 19 und 28 waren stark adipös und zeigten nur eine geringe Emission. Werden nur die normalgewichtigen Präparate 17, 23 und 29 berücksichtigt, ergibt sich eine lineare Abhängigkeit mit einem Korrelationskoeffizient $r = 0,99$.

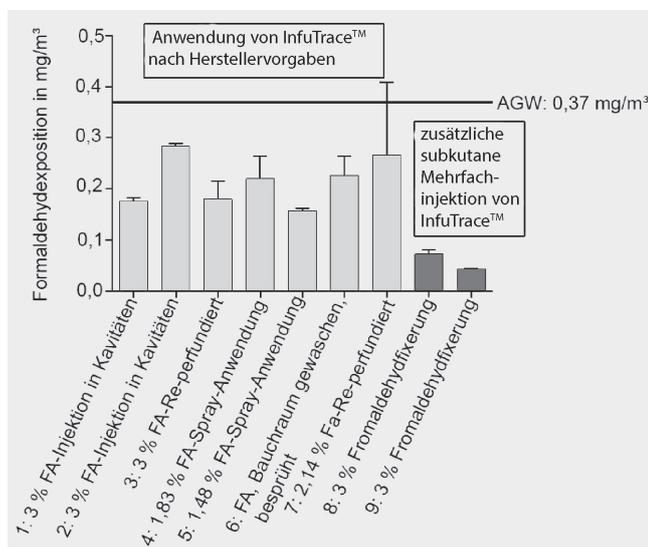


Bild 8. Entwicklung der InfuTrace™-Optimierung: Proben 1 und 2: Präparate ohne subkutanes Fettgewebe, Injektion in Kavitäten, Messung während Muskelpräparation; Probe 3: älteres Präparat reperfundiert; Proben 4 und 5: Reduktion von Formaldehyd in der Fixierung und ausschließlich äußerliche Anwendung von InfuTrace™; Probe 6: Bauchraum mit InfuTrace™ gewaschen und InfuTrace™ besprüht; Probe 7: mit reduziertem Gehalt an Formaldehyd frisch fixiertes Präparat und Reperfusion mit InfuTrace™; Proben 8 und 9: optimierte Anwendung mit Injektion in Kavitäten und subkutaner Multiinjektion. Messungen während der Hautöffnung. Mittelwerte, $n = 27$. FA: Formaldehyd.

vorgenommen. Die nachfolgenden Angaben stellen jeweils Befunde von ausschließlich personenbezogenen Messungen dar.

5.1 Reduktion von Formaldehyd in der Fixierlösung

Thullner et al. [10] kommen zum Ergebnis, dass die Emission eines Präparats abhängig ist vom absoluten Gehalt an Formaldehyd, den das Präparat bei der Fixierung, Lagerung und Befeuchtung aufgenommen hat. Diese Abhängigkeit wird nachfolgend näher untersucht (Bild 7).

Bei Betrachtung von Präparaten mit augenscheinlich vergleichbarem Body-Mass-Index (BMI) und normalem Gewicht zeigt sich eine hohe Linearität zwischen Formaldehydgehalt in der Fixierlösung und der Exposition mit $r = 0,99$. Dies gilt jedoch nicht für die adipösen Präparate 19 und 28. In unseren Untersuchungen zeigen stark adipöse Präparate gegenüber normalgewichtigen Präparaten während der Hautöffnung eine um 65 % geringere Emission an Formaldehyd.

Kachektische Präparate zeigen dagegen eine deutlich höhere Emission als normalgewichtige Präparate. Bei der Präparation des epifaszialen Nervengewebes werden am kachektischen Präparat Konzentrationen von $2,2 \pm 0,11 \text{ mg/m}^3$ gegenüber $0,73 \pm 0,16 \text{ mg/m}^3$ am normalgewichtigen Präparat gemessen. Bei der Hautöffnung eines kachektischen Präparates unter Weitwurfdüsen wurden Werte von $1,0 \pm 0,38 \text{ mg/m}^3$ gegenüber $0,21 \pm 0,0088 \text{ mg/m}^3$ eines normalgewichtigen Präparates festgestellt.

Der hohe Eintrag von Formaldehyd aus kachektischen Präparaten kann durch eine erhöhte Aufnahme von Formaldehyd aus der Fixierung und durch die Gewebestruktur bedingt sein. Bei untergewichtigen Personen nehmen die Fettvakuolen in den Adipozyten einen nur sehr kleinen Raum ein. Zu prüfen bleibt, ob Präparate, für die Formaldehyd in Abhängigkeit vom Körpergewicht zur Fixierung verwendet wird, ein vergleichbares Bild ergeben. Untersuchungen von Sugata et al. zeigten mit Konzentrationen von $0,49 \text{ mg/m}^3$ geringere Emissionen aus dem Fettgewebe im Vergleich zum Muskelgewebe mit $1,1 \text{ mg/m}^3$ [39].

5.2 Polymerisation von freiem Formaldehyd mittels InfuTrace™

In unseren Versuchsreihen wurden verschiedene Anwendungsvorschriften des Herstellers für die InfuTrace™-Behandlung an mit 3 % formaldehydfixierten Präparaten, aber auch mit formaldehydreduzierten Präparaten unternommen. Bei der Reperfusion an lange gelagerten Präparaten konnte aufgrund des hohen Gegendrucks nur wenig InfuTrace™ in den Körper reperfundiert werden. Allein mit den nach Herstellerangaben durchgeführten Nachbehandlungen konnte bereits eine Reduktion der Formaldehydemission unter den AGW erzielt werden. Mit zusätzlicher subkutaner Multiinjektion konnte diese noch deutlich weiter abgesenkt werden (Bild 8).

Die Reduktion des Formaldehydgehaltes in der Fixierlösung in Kombination mit der äußerlichen Anwendung von InfuTrace™ (Präparate 4 und 5) ergab Messwerte vergleichbar mit jenen herkömmlich fixierter (3 % Formaldehyd) Präparate nach Reperfusion mit InfuTrace™ (Präparat 3) oder nach Injektion in die Kavitäten (Präparate 1 und 2) (Bild 4). Die Messwerte lagen deutlich unterhalb des AGW von $0,37 \text{ mg/m}^3$. Durch die subkutane Multiinjektion wurden Expositionen weit unterhalb von $0,1 \text{ mg/m}^3$ erzielt.

Für einen abschließenden Befund „Schutzmaßnahmen ausreichend“ unter Einhaltung der Grenzwertbedingungen war in Vormessungen der Unfallkasse Hessen zusätzlich die Unterschreitung des Stoffindex unter 0,1 bzw. bei drei aufeinander folgenden Messtagen von weniger als 0,25 gefordert.

Um den Stoffindex von weniger als 0,1 zu erreichen, wurde unter Berücksichtigung der Expositionsdauer von Dozenten im Praktikum (sechs bis neun Stunden pro Woche) das Unterschreiten einer Konzentration von $0,1 \text{ mg/m}^3$ angestrebt. Für Studierende mit einer Expositionsdauer von 3,5 Stunden pro Woche dürfte die Exposition im Praktikum nicht mehr als $0,2 \text{ mg/m}^3$ betragen. Dies konnte mit zusätzlicher subkutaner Mehrfachinjektion sowie Injektion in Kavitäten und der Anwendung von InfuTrace™ als Spray erreicht werden (Bild 4, Proben 8 und 9), wie auch weitere Messungen bei Öffnung des Thorax und des Abdomens an Präparaten im zweiten Semester zeigen (Bild 9).

Parallel wurden Messungen mit dem Radiello®-Passivsammler durchgeführt. Dies erbrachte vergleichbare Ergebnisse (Bild 10). Der Passivsammler war etwa auf Herzhöhe der Probanden posi-

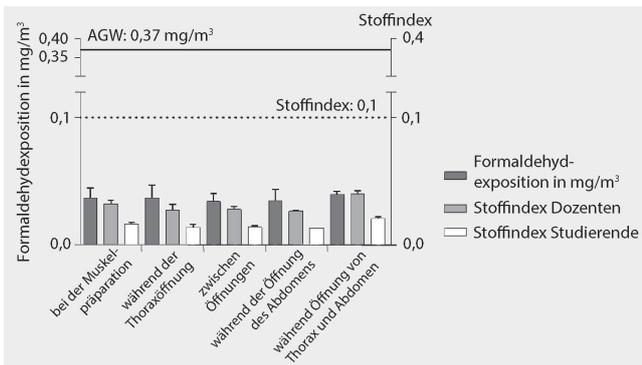


Bild 9. Formaldehydemission während der Öffnung von Kavitäten und Erwartung hoher Formaldehydfreisetzung, bei laufendem Betrieb der Weitwurfdüsen. Alle Präparate waren mit InfuTrace™ durch multiple Punktinjektion vorbehandelt. Alle Werte liegen unterhalb des AGW und des Stoffindex von 0,1.

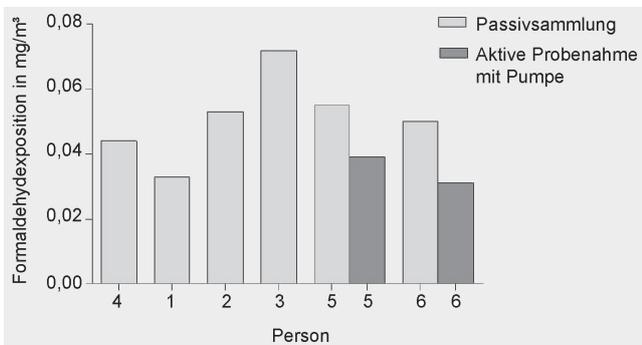


Bild 10. Inhalative Exposition an Formaldehyd von Dozenten, Probenahme mittels Radiello®-Passivsammler im Vergleich zur aktiven Probenahme.

tioniert und lieferte aufgrund des geringeren Abstandes zum Präparat etwas höhere Ergebnisse als jene, die bei der Aktivmessung erzielt wurden. Das Radiello®-Passivsammler-System eignet sich vor allem für die Langzeitüberwachung oder zur Eigenkontrolle der Formaldehydexposition. Der Passivsammler könnte als eine Art „Dosimeter“ auch über einen gesamten Kursverlauf eingesetzt werden, ohne dass aufwendige und personalintensive Messaufwendungen durch Fachpersonal notwendig wären.

5.3 Klimafaktoren

Die Raumlufttechnische Anlage der Präparationssäle ist auf eine stabile Betriebstemperatur von ca. 17 °C eingestellt. Abhängig vom Feuchtegehalt der Außenluft unterliegt die relative Luftfeuchte im Raum starken Schwankungen. Im Winter können etwa 30 % gemessen werden. An extrem heißen Sommertagen mit Außentemperaturen über 35 °C erhöht sich jedoch die Temperatur im Präparationssaal bis auf 20 °C und die relative Luftfeuchte steigt bis 80 % an. Neben dem temperaturabhängigen Dampfdruck erhöht sich mit der Temperatur kinetisch auch die Freisetzungsrates von bereits fixiertem Formaldehyd, wie aus Untersuchungen an mit Formaldehydharz gebundenen Holzwerkstoffen bekannt ist [40]. Wie unsere Versuche zeigten, bleiben die Immissionswerte selbst unter extremen Klimabedingungen auf einem sehr niedrigen Niveau weit unterhalb des Grenzwertes. Für die Präparate wurde nur eine geringe Erhöhung der Formaldehydemission im Vergleich zu einer Messung, die sieben Wo-

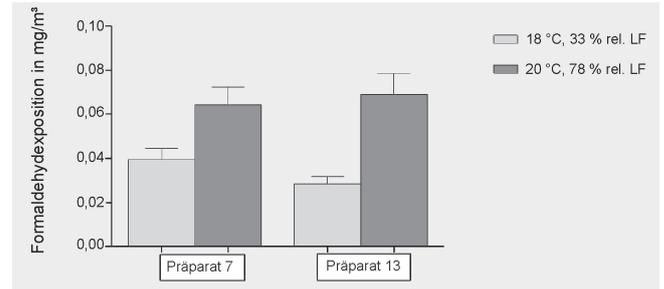


Bild 11. Zwei Präparate wurden an einem Tag bei üblichen Klimabedingungen bei 18 °C/22 % relativer Luftfeuchte (hellgrau) untersucht und sieben Wochen später bei 20 °C/78 % relative Luftfeuchte (dunkelgrau) bei vergleichbaren Präparationstätigkeiten. Die hochsommerlichen Klimabedingungen bewirken eine Erhöhung der Emission um den Faktor 1,6 respektive 2,5. Alle Messwerte liegen deutlich unterhalb des Arbeitsplatzgrenzwerts und dem Stoffindex von 0,1. Mittelwerte, n = 3 bis 12.

chen zuvor durchgeführt wurde, festgestellt – bei gleichzeitiger Einhaltung des Stoffindex von 0,1 für Dozenten und Studierende (Bild 11).

5.4 Externe Validierung durch das Regierungspräsidium Kassel

Durch die Messungen des Regierungspräsidiums Kassel – Fachzentrum für Produktsicherheit und Gefahrstoffe – wurden sowohl für 17 Präparate mit InfuTrace™ als auch ein Präparat als Referenz ohne Behandlung mit InfuTrace™ Konzentrationen in identischer Größenordnung ermittelt. Abschließend wurde damit die Wirksamkeit der getroffenen Arbeitsschutzmaßnahmen von offizieller und akkreditierter Stelle sowohl für Präparate aus dem zweiten Semester bei kritischen Präparationsschritten wie Öffnung von Thorax und Abdomen als auch bei der Haut- und Muskelpräparation im ersten Semester vollumfänglich bestätigt [41 bis 43].

6 Diskussion

Die Emission von Formaldehyd aus einem Präparat stellt einen hochdynamischen Prozess dar, der zwar auf den allgemeinen Grundregeln der Thermodynamik basiert, aber bezüglich des Emissionsverhaltens während der Präparation eines einzelnen Präparates erheblichen individuellen Abweichungen unterliegen kann.

In den wenigsten der gesichteten Datenerhebungen werden die jeweiligen Messbedingungen, die einen Messwert beeinflussen, vollständig beschrieben: Dies umfasst Angaben z. B. zur Anzahl der Personen am Präpariertisch, der Verwendungszeit im Praktikum und dem BMI der Präparate, den Lüftungsbedingungen, Temperatur und Luftfeuchte, Leistung und Position der Zu- und Abluft und vieles mehr. Die Gesamtheit dieser Rahmenbedingungen erweist sich basierend auf unseren Ergebnissen als maßgeblich verantwortlich für die Höhe der Exposition.

In unseren Untersuchungsreihen wurden die äußeren Messbedingungen deshalb – soweit möglich – jeweils für die einzelnen Szenarien immer vergleichbar gewählt. Schwankungen ergeben sich lediglich hinsichtlich des BMI der Präparate sowie der Klimabedingungen an heißen Hochsommertagen. Diese werden deshalb jeweils gesondert betrachtet.

Um zu vergleichbaren Ergebnissen bezüglich der Überwachung des AGW und der Höhe der inhalativen Exposition zu gelangen, werden bei Reihenuntersuchungen der Unfallkasse Hessen im Rahmen des MGU-Messprogramms 9187 [33] erstmals Vorgaben zum Zeitpunkt einer Probenahme – nämlich einmal bei der Präparation des Muskelgewebes (nach Abpräparation der Haut) sowie bei der Öffnung des Thorax – gemacht. Basierend auf den vorgelegten Ergebnissen sollte die Eröffnung der Haut ebenfalls in die Überwachung eingeschlossen werden, da dieser Präparationsschritt über mehrere Präparationseinheiten, insbesondere bei kritischen Klimabedingungen, zu erhöhten Belastungen führen kann.

6.1 Bisher von der Unfallkasse vorgeschlagene Maßnahmen zur Reduktion der Formaldehydemission

Thullner und Van Gelder [44] fassen einfache Möglichkeiten zur Emissionsminderung zusammen, die wir nachfolgend diskutieren.

- **Niedrige Raumtemperatur**

Thermodynamisch bedeuten niedrige Umgebungstemperaturen eine geringere Emissionsrate. Ein Präparieren bei Raumtemperaturen von weniger als 17 °C ist jedoch nicht möglich, da dabei die Feinmotorik der Hände und das Wohlfühlen der Präparierenden beeinträchtigt werden. Niedrige Raumtemperaturen stellen zudem hohe Anforderungen an die Lüftungstechnik, die insbesondere in den Sommermonaten schwer einzuhalten sind. Nach unseren Untersuchungen steigt in den Sommermonaten die Exposition gegenüber Formaldehyd mit erhöhter Raumtemperatur und hoher relativer Luftfeuchte bis zu einem Faktor von 2,5 an. Bei geringer Grundbelastung stellt dies in der Praxis kein Problem dar, sehr wohl jedoch, wenn der Grenzwert bereits in den Wintermonaten nur knapp unterschritten werden kann. Geraten Institute hier an ihre technischen Grenzen, kann das studentische Praktikum nur in den Wintermonaten durchgeführt werden.

- **Niedrige Grundbelastung im Präpariersaal**

Um dies zu erreichen, kann entweder die Anzahl der Präparate im Saal oder der Formaldehydgehalt in den Präparaten reduziert werden. Um das Präparieren für alle Studierenden zu ermöglichen, bedeuten weniger Präparate im Saal entweder eine höhere Tischbelegung oder verlängerte Praktikumszeiten. Für Dozentinnen und Dozenten resultieren daraus sehr wahrscheinlich längere Arbeits- und Expositionszeiten und für das Institut deutlich höhere Kosten. Eine Reduktion der Formaldehydkonzentration im Präparat kann, wie nachgewiesen, auch mit optimierter Ventilation bei einem Gehalt von 1,48 % in der Rezeptur (entspricht ca. 0,042 l reinem Formaldehyd pro 10 kg Körpergewicht) nicht dauerhaft sicheres Arbeiten garantieren; zudem ist die Fixierung bei Gehalten unterhalb von 1,7 % unzureichend [45]. Weitere Versuche mit reduziertem Formaldehydgehalt in der Fixierung wurden deshalb nicht durchgeführt und sollten ohnehin aus Gründen des Infektionsschutzes vermieden werden [45].

- **Praktikumsvorbereitung (Wässern der Präparate unter fließendem Wasser nach Entnahme aus Lagerbehältnis)**

Gehirn- und Rückenmarkpräparate, die unter fließendem Wasser für 12 bis 24 h gewässert wurden, zeigten gleiche Emissionswerte wie ungewässerte Vergleichspräparate (gewässert 0,3 mg/m³, ungewässert 0,3 mg/m³). Ähnliche Beobachtungen

wurden in der Veterinär-anatomie Gießen gemacht. Bei sehr kleinen Präparaten mit relativ großer Oberfläche kann die Emission durch Wässern etwas reduziert werden. Wässern kann möglicherweise bei dauerhaftem Austausch des Wassers über einen längeren Zeitraum oberflächlich zu einer Reduktion führen. Bei großen Behältnissen ohne beständigen Wasseraustausch besteht die Gefahr der Schichtbildung unterschiedlich polarer Abschnitte. Hier sind Schichtverteilungen des Formaldehydgehaltes einzelner Präparate zu berücksichtigen.

- **Aufdecken der Präparate vor dem jeweiligen Praktikum – Ablüftzeit**

Damit kann zwar eine erste Spitzenbelastung von Studierenden abgefangen werden. Weitere Belastungen im Laufe der Präparation werden damit jedoch nicht verhindert, da mit jedem einzelnen Präparationsschritt beständig neue Emissionsflächen am Präparat freigelegt werden. Auch das Lagern der Präparate im Präparationssaal zwei bis drei Wochen vor Beginn des Kurses kann nur in geringem Umfang zu einer Reduktion beitragen, da die Emission erst mit dem Öffnen der Haut sprunghaft ansteigt [39].

- **Geringere Anzahl Studierender je Präpariertisch**

Um das Präparieren für alle Studierenden trotzdem zu ermöglichen, müssten auch hier die Praktikumszeiten verlängert werden. Damit erhöht sich die Aufenthaltsdauer für Dozenten am Präpariertisch und damit die Expositionszeit sowie die Arbeitszeit.

- **Theoretische Einführung außerhalb des Präpariersaals**

Das Lernen erfolgt vor allem während der Präparation anhand des dreidimensionalen und mit allen Sinnen erfassbaren Anschauungsmaterials „Präparat“ am Präparationstisch. Außerhalb des Präpariersaals können computergestützte Modelle wie „Visible Body“ (Fa. LWW) oder „anatomedia.com“, der Anatomage-Tisch [46] oder andere virtuelle Programme sowie klassische Anatomiemodelle als sinnvolle Ergänzung herangezogen werden [47; 48]. Ein wesentlicher Zeitgewinn im Praktikum ist mit deren Verwendung nicht verbunden.

- **Abstand zur Expositionsquelle, z. B. durch Stand-/Stirn-lupen**

Den am Präparat tätigen Personen sollte immer bewusst sein, dass hier mit einem Gefahrstoff emittierenden Körper gearbeitet wird und Präventivmaßnahmen zur Reduktion der Exposition oberstes Gebot sein müssen. Abstand zur Emissionsquelle ist hierbei eine geeignete Maßnahme, die unter anderem mit entsprechenden optischen Hilfsmitteln verbessert werden kann. Auch kann die Anpassung der Tischhöhe an die Körpergröße (Studierende nach Körpergröße zusammengefasst, um aufrechte Arbeitshaltung zu ermöglichen, notwendig bei nach unten gerichtetem Luftstrom) eine sinnvolle Option darstellen, da sich groß gewachsene Menschen immer tief herunterbeugen müssen, wenn sie an niedrigen Tischen mit kleineren Personen zusammenarbeiten.

- **Anpassung der absoluten Menge an Formaldehyd bezogen auf das Körpergewicht**

Davon ausgehend, dass die Körperspender in unserer Versuchsreihe geschätzt ein durchschnittliches Gewicht von ca. 70 kg mitbringen, resultiert im vorliegenden Versuchsaufbau eine Menge von ca. 0,086 l reinem Formaldehyd (entspricht 0,23 l Formalin, 37 %) pro 10 kg Körpergewicht. Eine höhere Menge an Formalin ist nach unserer Erfahrung für die Konser-

vierung in der Humanmedizin nicht notwendig und lässt die Verwendung der Präparate bis zu einem Jahr im Praktikum zu.

- **Strikte Anleitung zu präventivem Verhalten am Tisch durch Dozenten und Tischbetreuer**

Da diese Maßnahmen allein nicht ausreichen, um ein dauerhaft sicheres Arbeiten mit dem Gefahrstoff emittierenden Präparat zu gewährleisten, sind weitere Maßnahmen wie verbesserte Ventilation und Nachbehandlung, z. B. durch Injektion mit InfuTrace™, an mit Formaldehyd konservierten Präparaten unumgänglich, wie die vorgestellten Untersuchungen aufzeigen.

6.2 Formaldehyd „bindende“ Verfahren

Die bisherigen Verfahren zur Formaldehydbindung sind, den Ergebnissen nach zu urteilen, nicht in der Lage, eine ausreichend starke Reduktion der Emission zu erreichen, um ein sicheres Arbeiten entsprechend den Vorgaben der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) zu gewährleisten [16; 18; 49 bis 51].

6.3 Formaldehyd polymerisierendes Verfahren mit InfuTrace™

Das formaldehydbindende Reagenz InfuTrace™ ermöglicht eine optimale Reduktion der Formaldehydemission. Diese Rezeptur zur Reduktion von Formaldehyd- und Phenolemissionen wurde speziell für die Anwendung an entsprechend fixiertem menschlichem oder tierischem Gewebe und Spenderkörpern konzipiert [34]. Der Hersteller proklamiert eine Reduktion der Emission von Formaldehyd bis zu 95 %. InfuTrace™ stellt selbst kein Fixiermittel dar, kann aber nach vollständig vollzogener Fixierung angewendet werden, um freies Formaldehyd oder Phenol innerhalb von zehn bis 24 Stunden im Gewebe und in Gewebsflüssigkeiten direkt zu binden. Die vom Hersteller angegebene Reaktionszeit von zehn bis 24 Stunden erscheint in unseren Versuchen zu kurz. Wir haben deshalb eine Wartezeit von mindestens sieben Tagen bei Lagerung im Präpariersaal eingehalten. Niedrigere Lagertemperaturen der nachbehandelten Präparate erfordern bedeutend längere Reaktionszeiten (bei 7 °C z. B. vier Wochen). InfuTrace™ kann auch zur Befeuchtung der Präparate eingesetzt werden und soll die Schimmelbildung verhindern [34]. Der Wirksamkeitsnachweis des Herstellers bezieht sich allein auf eine Veröffentlichung der Gruppe um *Cauwenbergs* [52] und wird den Anforderungen nicht in jedem Fall gerecht. Bei niedrigem AGW oder zur Einhaltung des Stoffindex von 0,1 kann der Zielwert unterhalb der Bestimmungsgrenze des dort verwendeten Verfahrens liegen. Über das Wirkprinzip ist wenig bekannt, nach Herstellerangaben bildet sich ein Polymer. Eine Polymerisationsreaktion, ähnlich wie sie bei der Produktion von formaldehydgebundenen Harnstoffharzen zur Pressspanherstellung stattfindet, ist naheliegend. Harnstoff eignet sich als sehr kleines Molekül wahrscheinlich besonders gut für die Anwendung an konservierten Körpern. Eine Analyse von InfuTrace™ (aus Sicherheitsgründen) ergab eine Harnstoffkonzentration von etwa 35 %. Das Sicherheitsdatenblatt von InfuTrace™ enthält lediglich Angaben zu physikalischen Eigenschaften und zum pH-Wert von 2,5 [53]. Das Produkt enthält zusätzlich ein Fungizid. InfuTrace™ wird als Konzentrat bezogen und zur Anwendung für die Reperfusion, zur Injektion in Kavitäten als 20%ige Lösung oder 11%ig als Oberflächenspray eingesetzt [34].

In der Literatur finden sich nur wenige Vergleichsmessungen für die Formaldehydemission nach InfuTrace™-Behandlung.

Whitehead und *Savoia* [54] vergleichen zwei Verfahren der InfuTrace™-Nachbehandlung mit einem alternativen Fixativ namens „Carolina Perfect Solution“, das jedoch 2,5 % Phenol sowie geringe Mengen an Formaldehyd enthält und somit keine echte Alternative darstellt. Die Re-Injektion mit InfuTrace™ ergab nach diesen Untersuchungen eine Reduktion der Exposition von mehr als 50 %.

An verschiedenen amerikanischen Universitäten, wie etwa dem Daemen College oder der University of Virginia, wird InfuTrace™ routinemäßig im Praktikum unter anderem auch als Befeuchtungsmittel eingesetzt [55 bis 57].

Goldman [58] berichtet über eine massive Reduzierung von Formaldehyd durch die Verwendung von InfuTrace™, nennt aber keine Zahlen. Er bemängelt Schimmelpilzbildung. In unseren Versuchen wurde dies verhindert durch präventive Anwendung von InfuTrace™ und Incidine®liquid jeweils im täglichen Wechsel als Spray am Ende des Kurstages vor dem Zudecken der Präparate. *Burkell* et al. beobachteten die Bildung von Präzipitaten, die in unseren Versuchen mit Wasser entfernt werden konnten [59]. *Cope* et al. berichten über deutliche Reduktion der Formaldehydexposition nach Re-Perfusion mit InfuTrace™ [60]. Eine Untersuchung durch die australische Regierung im Jahr 2006 nennt Messwerte nach Beprobung mittels Passivsammler von 1,66 und 3,15 ppm vor InfuTrace™-Anwendung und von 0,46 ppm nach InfuTrace™-Behandlung [61]. Dies entspricht einer Reduktion von 70 bis 85 % und stimmt mit den Ergebnissen unserer Untersuchung sehr gut überein.

7 Bedeutung für Anatomische Institute und staatliche Überwachungsbehörden

Unsere systematische Analyse zum Emissionsverhalten von Formaldehyd im anatomischen Praktikum belegt erstmals Ursachen für die große Variation von Messwertverteilungen der inhalativen Exposition. Insbesondere bei Messungen zur Überwachung des AGW dürfen Rahmenbedingungen für verwendete Präparate, Lagerzeiten und Präparationsschritte nicht unberücksichtigt bleiben.

Eine ausschließlich technische Lösung der Formaldehydreduktion durch veränderte Luftführung ist dauerhaft und kurzfristig nur in wenigen Fällen möglich und kann bei Verwendung von Formaldehyd in der Fixierung oder Lagerung nur in Kombination mit einer zusätzlichen chemisch-präparativen Nachbehandlung erreicht werden. Durch die Verwendung von InfuTrace™ können auch in bereits lüftungstechnisch optimierten Sälen Expositionsspitzen, die bei kritischen Präparationsschritten auftreten, abgefangen werden. Dies stellt damit eine sinnvolle Alternative oder Ergänzung auch zum Absaugtisch dar. Eine Anwendung allein als Spray kann bereits zu einer deutlichen Reduktion der Exposition beitragen.

Dieses System der ventilationstechnischen Optimierung mit kostengünstigen Weitwurfdüsen kombiniert mit der korrekt angewendeten Nachbehandlung mit InfuTrace™ ist eine äußerst effiziente Methode zur Minderung der Formaldehydexposition. Die Methode hat sich in der Anatomie in Gießen erfolgreich bewährt und ist auch in anderen Anatomien anwendbar. Allein mit dem Einsatz der Weitwurfdüsen kann eine Reduktion um bis zu 60 % erzielt werden. Abhängig vom Ausgangswert und der Lagerzeit der Präparate kann der AGW damit gegebenenfalls schon unter-

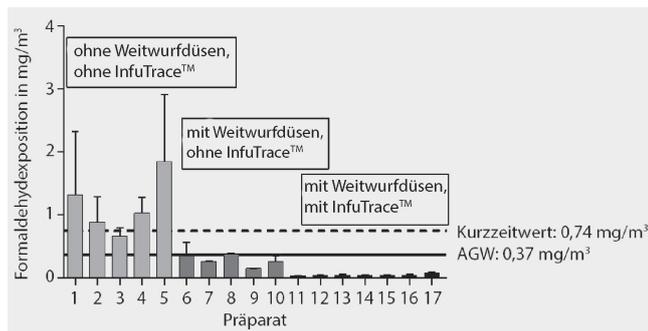


Bild 12. Verschiedene Schritte zur Reduktion der Formaldehydemission. Proben 1 bis 5: ohne jede Modifikation zur Reduktion der Formaldehydemission – der AGW wurde nicht eingehalten. Proben 6 bis 10: Einsatz der Weitwurfdüsen – der AGW konnte eingehalten werden. Proben 11 von 17: Einsatz von Weitwurfdüsen und InfuTrace™ (subkutane Multiinjektion) – alle Werte liegen weit unterhalb des AGW.

schritten werden. Eine weitere Reduktion bis zu 80 % kann durch die optimierte Anwendung von InfuTrace™ erreicht werden (Bild 12). Allein durch die Verwendung von InfuTrace™ ohne veränderte Ventilation beträgt die Reduktion geschätzt etwa 70 %. In der Summe bei Verwendung von 3 % Formaldehyd in der Fixierung ergibt sich daraus insgesamt eine Abnahme der inhalativen Exposition bis zu 90 % und garantiert damit sicheres Arbeiten sowohl für Dozenten wie auch für Studierende.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken allen Körperspendern. Den beteiligten Lehrenden, Studierenden und den Präparatoren des Institutes für Anatomie und Zellbiologie danken sie für die aktive Unterstützung der Arbeit und die kostbare zur Verfügung gestellte Zeit bei Simulationspräparationen.

Literatur

[1] Eickmann, U.: Modellierung der Formaldehydbelastung bei Arbeiten im Gesundheitsdienst. Hrsg.: Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW), Hamburg 2014.

[2] Eickmann, U.; Thullner, I.: Berufliche Exposition gegenüber Formaldehyd im Gesundheitsdienst. Umweltmed. Forsch. Praxis 11 (2006) Nr. 6, S. 363-368.

[3] Saowakon, N.; Ngernsoungnern, P.; Watcharavitoon, P. et al.: Formaldehyde exposure in gross anatomy laboratory of Suranaree University of Technology: A comparison of area and personal sampling. Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 22 (2015) Nr. 23, S. 19002-19012.

[4] Gurbuz, N.; Coskun, Z. K.; Liman, F. A. et al.: The evaluation of formaldehyde exposure in the anatomy laboratories and the preventive measures. GMJ 27 (2016) Nr. 2, S. 98-103.

[5] Keil, C. B.; Akbar-Khanzadeh, F.; Konecny, K. A.: Characterizing formaldehyde emission rates in a gross anatomy laboratory. Appl. Occup. Environ. Hyg. 16 (2001) Nr. 10, S. 967-972.

[6] Lakchayapakorn, K.; Watchalayarn, P.: Formaldehyde exposure of medical students and instructors and clinical symptoms during gross anatomy laboratory in Thammasat University. J. Med. Assoc. Thai 93 (2010) Nr. 7, S.92-98.

[7] Azari, M. R.; Asadi, P. et al.: Occupational exposure of a medical school staff to formaldehyde in Teheran. Tanaffos 11 (2012) Nr. 3, S. 36-41.

[8] Winkler, K. W.: Formaldehyde exposures in a university anatomy laboratory. Theses and Dissertations, University of Toledo, Toledo, USA, 2011.

[9] Opinion proposing harmonised classification and labelling at EU level of formaldehyd vom 10. September 2013. Risk Assessment Committee (RAC).

[10] Thullner, I.; Stockmann, R.; Hohenberger, L.: Formaldehyd in der vor-klinischen medizinischen Ausbildung (Anatomie). Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 6 (2015) Nr. 6, S. 219-228.

[11] Wright, S. J.: Student perceptions of an upper-level, undergraduate human anatomy laboratory course without cadavers. Anat. Sci. Educ. 5 (2012) Nr. 3, S. 146-157.

[12] King, C.; Labbie, P.; Klein, R.: 356. Controlling formaldehyde emissions in an academic gross anatomy lab. AIHce Conference, San Diego, Kalifornien, USA, Januar 2002.

[13] Yamato, H.; Nakashima, T.; Kikuta, A. et al.: A novel local ventilation system to reduce the levels of formaldehyde exposure during a gross anatomy dissection course and its evaluating using real-time monitoring. J. Occup. Health 47 (2005) Nr. 5, S. 450-453.

[14] Stockmann, R.: Gesamtkonzept zur Reduzierung der Formaldehydexposition im anatomischen Praktikum (Präsentation): Lüftungstechnik in 23 Präpariersälen in drei Fälle eingeteilt. DGUV Fachgespräch „Reduzierung der Formaldehydbelastung im anatomischen Praktikum – Lösungsansätze“, Berlin 2016.

[15] Kikuta, A.; Yamato, H.; Kunugita, N. et al.: Reducing the levels of formaldehyde exposure during a gross anatomy dissection course with a local ventilation system. Kaibogaku Zasshi 85 (2010) Nr. 1, S. 17-27.

[16] Ohmichi, K.; Matsuno, Y.; Miyaso, H. et al.: Pilot study of a dissection table for gross anatomy laboratory equipped with a photocatalytic device that decomposes formaldehyde. J. Occup. Health 49 (2007) Nr. 6, S. 499-503.

[17] Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV). Neufassung vom 26. November 2010. BGBl. I (2010), S. 1643-1690.

[18] Coskey, A.; Gest, T. R.: Effectiveness of various methods of formaldehyde neutralization using monoethanolamine. Clin. Anat. 28 (2015) Nr. 4, S. 449-454.

[19] Braitmair, H.: Aminolipin: Formaldehyd-Ersatz für die Konservierung biologischer Gewebe. Hrsg.: BIOPRO Baden-Württemberg, Stuttgart 2018. www.gesundheitsindustrie-bw.de/de/fachbeitrag/aktuell/aminolipin-formaldehyd-ersatz-fuer-die-konservierung-biologischer-gewebe/

[20] Hirt, B.: Aminolipin. 112th Annual Meeting/32. Arbeitstagung of the Anatomical Society, Würzburg, 20.-22. September 2017.

[21] Neckel, P. H.; Gleiser, C.; Kramer, A. et al.: Aminolipin: a novel alternative for formalin in human cadaver embalming. 112th Annual Meeting/32. Arbeitstagung of the Anatomical Society, Würzburg, 20.-22. September 2017.

[22] Goyri-O'Neill, J.; Pais, D.; Freire de Andrade, F.; Ribeiro, P.; Belo, A.; O'Neill, A. et al.: Improvement of the embalming perfusion method – The innovation and the results by light and scanning electron microscopy. Acta Med. Port. 26 (2013) Nr. 3, S. 188-94.

[23] Hammer, N.; Löffler, S.; Feja, C. et al.: Ethanol-glycerin fixation with thymol conservation: A potential alternative to formaldehyde and phenol embalming. Anat. Sci. Educ. 5 (2012) Nr. 4, S. 225-233.

[24] Turan, E.; Gules, O.; Kilimci, F. S. et al.: The mixture of liquid foam soap, ethanol and citric acid as a new fixative-preservative solution in veterinary anatomy. Ann. Anat. 209 (2017) Nr. 1, S. 11-17.

[25] Janczyk, P.; Weigner, J.; Luebke-Becker, A. et al.: Nitrite pickling salt as an alternative to formaldehyde for embalming in veterinary anatomy – A study based on histo- and microbiological analyses. Ann. Anat. 193 (2011) Nr. 1, S. 71-75.

[26] Al-Hayani, A.; Hamdy Raid, M.; El-Aziz, G. S. A. et al.: Shellac: A non-toxic preservative for human embalming techniques. J. Anim. Vet. Adv. 10 (2011) Nr.12, S. 1561-1567.

[27] Balta, J. Y.; Cryan, J. F.; O'Mahony, S. M.: The antimicrobial capacity of embalming solutions: a comparative study. J. Appl. Microbiol. 126 (2018) Nr. 3, S. 764-770.

[28] Balta, J. Y.; Twomey, M.; Moloney, F. et al.: A comparison of embalming fluids on the structures and properties of tissue in human cadavers. Anat. Histol. Embryol. 48 (2018) Nr. 1, S. 64-73.

[29] Terralin Protect: DIN-safety data sheet. Hrsg.: Schülke & Mayr, Norderstedt, 22. Januar 2016. www.schuelke.com/media/products/docs/gb-en/zsdb_p_gb_-cgb_-len_terralin_protect.pdf

- [30] *Assenmacher-Maiworm, H.; Hahn, J. U.*: Aldehyde. In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. Lfg. 43/2009. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV), Berlin. Erich Schmidt, Berlin 1989 (Losebl.-Ausg). www.ifa-arbeitsmappedigital.de/6045
- [31] *Shiraishi, N.*: Levels of formaldehyde, phenol and ethanol in dissection room air and measures for reduction. *Jap. J. Occup. Med. Traumatol.* 54 (2006) Nr. 1, S. 1-10.
- [32] DIN ISO 16000-3: Innenraumluftverunreinigungen – Teil 3: Messen von Formaldehyd und anderen Carbonylverbindungen in der Innenraumluft und in Prüfkammern – Probenahme mit einer Pumpe. Berlin: Beuth 2013.
- [33] Messsystem Gefährdungsermittlung der UV-Träger (MGU): MGU-Messprogramm 9187. Formaldehyd-Messungen in Anatomien. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin 2016.
- [34] Fa. American Bio-Safety I Infutrace™. Rocklin, Kalifornien, USA. www.americanbiosafety.com/files/79978104.pdf
- [35] *Tucker, S. P.*: Manual of Analytical Methods (NMAM). Hrsg.: The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) of the Centers for Disease Control and Prevention (CDC), Washington D. C. 2003 (USA).
- [36] IncidinR Liquid. Ecolab Deutschland, Monheim am Rhein 2013.
- [37] Freka-NOL AF. Dr. Schumacher, Malsfeld 2017.
- [38] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900). BArbBl. (2006) Nr. 1, S. 41-55, zul. geänd. GMBI. (2015) Nr. 7, S. 139-140.
- [39] *Sugata, Y.; Miyaso, H.; Odaka, Y. et al.*: Levels of formaldehyde vapor released from embalmed cadavers in each dissection stage. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 23 (2016) Nr. 16, S. 16176-16182.
- [40] *Salthammer, T.; Mentese, S.; Marutzky, R.*: Formaldehyde in the indoor environment. *Chem. Rev.* 110 (2010) Nr. 4, S. 2536-2572.
- [41] *Brohmann, P.*: Über die Ermittlung und Beurteilung der Konzentrationen von Stoffen in der Luft in Arbeitsbereichen gemäß TRGS 402. Bericht Nr. 9/2017.
- [42] *Brohmann, P.*: Über die Ermittlung und Beurteilung der Konzentrationen von Stoffen in der Luft in Arbeitsbereichen gemäß TRGS 402. Bericht Nr. 13/2017
- [43] *Brohmann, P.*: Über die Ermittlung und Beurteilung der Konzentrationen von Stoffen in der Luft in Arbeitsbereichen gemäß TRGS 402. Bericht 8/2018.
- [44] *Thullner, I.; Van Gelder, R.*: Ergebnisse von Formaldehydmessungen: Verfahrenstechnische und organisatorische Optimierungsmöglichkeiten. DGUV Fachgespräch „Reduzierung der Formaldehydbelastung im anatomischen Praktikum – Lösungsansätze“. Berlin 2016.
- [45] *Spaethe, A.*: Anatomische Leichenfixation bei niedriger Formaldehydkonzentration. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 63 (2003) Nr. 7/8, S. 335-336.
- [46] AnatomageTable: 6. Anatomage Europe, 20125 Mailand, Italien.
- [47] *Brenner, E.*: Human body preservation – old and new techniques. *J. Anat.* 224 (2014) Nr.3, S. 316-344.
- [48] *Balta, J. Y.; Cronin, M.; Cryan, J. F. et al.*: The utility of cadaver-based approaches for the teaching of human anatomy: A survey of British and Irish anatomy teachers. *Anat. Sci. Educ.* 10 (2017) Nr. 2, S. 137-143.
- [49] *Kawamata, S.; Kadera, H.*: Reduction of formaldehyde concentrations in the air and cadaveric tissues by ammonium carbonate. *Anat. Sci. Int.* 79 (2004) Nr. 3, S. 152-157.
- [50] *Frølich, K. W. et al.*: Phenoxyethanol as a nontoxic substitute for formaldehyde in long-term preservation of human anatomical specimens for dissection and demonstration purposes. *Anat. Rec.* 208 (1984), S. 271-278.
- [51] *Becker, K. W.*: Minimierung der Gefahrstoffexposition in medizinischen Sektionskursen durch Einsatz von Phenoxyethanol. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 63 (2003) Nr. 7/8, S. 337-339.
- [52] *Cauwenbergs, P.; Jones, A.; Zabobonin, A.*: Post-embalming perfusion with INFUTRACE™: limits the exposure to hazardous vapours. Hrsg.: Canadian Memorial Chiropractic College, Department of Anatomy, Toronto, Kanada.
- [53] Infutrace MSDS: Sicherheitsdatenblatt. Hrsg.: Sasco Chemical group I, Albany, Georgia, USA, 2012. www.americanbiosafety.com/files/81188140.pdf
- [54] *Whitehead, M. C.; Savoia, M. C.*: Evaluation of methods to reduce formaldehyde levels of cadavers in the dissection laboratory. *Clin. Anat.* 21 (2008) Nr. 1, S. 75-81.
- [55] Styn (2014–2015) Human Anatomy Laboratory Rules, Regulations and Guidelines. www.daemen.edu/sites/default/files/documents/GROSS%20ANATOMY%20LAB%20POLICIES%202014–2015.pdf. Accessed 29 Jul 2017
- [56] Expected Safety Protocol and Procedures for Anatomy and Cadaver Labs. Hrsg.: Mt. San Antonio College, Walnut, Kalifornien, USA, 2014.
- [57] *Caler, C. R.; Ogle, B. R.; Zontek, T. L.*: Complete hazard assessment within a gross anatomy laboratory. Hrsg.: American Society of Safety Professionals, Park Ridge, Illinois, USA, 2011. www.asse.org/assets/1/7/2011_WesternCarolinaUniversity_OSSA.pdf
- [58] *Goldman, E.*: Building a low-cost gross anatomy laboratory: A big step for a small university. *Anat. Sci. Educ.* 3 (2010) Nr. 4, S. 195-201.
- [59] *Burkel, W. E.; Mueller D. A.; Follo, J.; Wessels, L. et al.*: Formaldehyde neutralization in embalmed cadavers using monoethanolamine. June 8-12, 1999, Iowa City, Iowa, USA. S. 8. https://clinical-anatomy.org/images/downloads/Past_Meeting_PDFs/iowa_program.pdf
- [60] *Cope, J. M.; Sanders, E.; Holt, S. M. et al.*: Comparison of personal formaldehyde levels in the anatomy laboratories of five physical therapy education programs. *FASEB J.* 23 (2009) Nr. 1.
- [61] Formaldehyde. Hrsg.: Australian government – Department of health and ageing, Canberra, Australien, November 2006.

Dr. biol. hom. Sonja Pfeil,
ARGUK-Umweltlabor, Oberursel.

Dr. biol. hom. Hans Hieke,
Dezernat E, Justus-Liebig-Universität, Gießen.

Petra Brohmann,
Hessische Ländermessstelle für Gefahrstoffe, Regierungspräsidium Kassel.

Prof. Dr. rer. nat. Monika Wimmer,
Institut für Anatomie und Zellbiologie Justus-Liebig-Universität, Gießen,
zurzeit Institut für Anatomie, Johannes-Kepler Universität, Linz, Österreich.