

Bewertung chirurgischer Rauchgase im Arbeitsschutz: Ein Blick in die Literatur und Vorstellung eines Forschungsprojektes von BGW und IFA

A.-K. Stoll, D. Köster, B. Thomas, J. Gerding, K. Pitzke

ZUSAMMENFASSUNG Chirurgische Rauchgase entstehen bei Eingriffen unter Verwendung von Elektrokautern oder Hochfrequenzchirurgiegeräten und können während der Operation deutlich olfaktorisch und visuell wahrgenommen werden. Daher scheint es angebracht, die aktuell gängigen Schutzmaßnahmen auf ausreichende Wirkung zu überprüfen. Eine Literaturrecherche legte offen, dass die Fachliteratur insbesondere zur chemischen Zusammensetzung chirurgischer Rauchgase lückenhaft ist und bisher keine optimale Grundlage für eine Gefährdungsbeurteilung bietet. Den dahingehenden Forschungsbedarf wird ein gemeinsames Projekt der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW) und des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) decken. Dafür werden anhand der Literaturrecherche Benzol, Formaldehyd, Benzo[a]pyren und Naphthalin als Leitkomponenten festgelegt. Für die Ermittlung der Exposition Beschäftigter und die Aufklärung der chemischen Zusammensetzung chirurgischer Rauchgase werden nachstellende Versuche anhand verschiedener Gewebearten vom Schwein durchgeführt. Vergleichend werden zudem Arbeitsplatzmessungen während unterschiedlicher Operationen und Pyrolyseversuche unter Laborbedingungen durchgeführt.

Assessment of surgical smoke in occupational health and safety: A review of the literature and conception of a research project by BGW and IFA

ABSTRACT Surgical smoke originates in the application of electrocautery or high-frequency surgical devices and can be perceived olfactorily as well as visually during operational procedures. Hence, it seems appropriate to verify the safety precautions currently in place are sufficiently protecting operating theatre staff. A literature review revealed that the subject literature, especially regarding the chemical composition of surgical smoke, is fragmentary and, so far, does not provide an optimal foundation for risk assessment. A joint project between BGW and IFA is intended to cover the need for further research. Based on the reviewed literature, benzene, formaldehyde, benzo[a]pyrene and naphthalene have been identified as lead components. In order to determine workers' exposure and clarify the chemical composition of surgical smoke, simulated surgeries using different types of porcine tissue are to be carried out. In addition, comparative workplace measurements during various surgical procedures and pyrolysis experiments under laboratory conditions are to be conducted.

1 Einleitung

Chirurgische Rauchgase entstehen bei medizinischen Eingriffen und Operationen unter Verwendung elektrochirurgischer Geräte. Dabei wird das Gewebe lokal erhitzt, wodurch es zu einer Rauchentwicklung kommt, die sowohl olfaktorisch als auch visuell wahrnehmbar ist.

Mögliche technische Verfahren umfassen das Elektrokautern, bei dem eine erhitzte metallene Oberfläche auf das Gewebe aufgebracht wird, sowie Arbeiten mit Hochfrequenzgeräten, die durch das Einbringen von hochfrequentem Wechselstrom ein blutungsarmes Schneiden oder Koagulieren ermöglichen. Darüber hinaus können Laser für Schnitte durch Photovaporisation oder zur Koagulation über schwächer ausgeprägte photothermische Effekte eingesetzt werden [1].

Ultraschall wird ebenfalls für die Zerstörung von verändertem Gewebe eingesetzt. Da es sich hierbei aber oft um nicht-invasive Eingriffe handelt, bei denen Gewebe sehr gezielt zerstört wird, sind dabei nur äußerst geringe Mengen chirurgischer Rauchgase zu erwarten [2].

Für die anderen genannten Verfahren gilt jedoch, dass insbesondere durch das Schneiden das betreffende Gewebe schnell stark erhitzt wird. Die daraus folgende rasche Volumenausdehnung der verdampfenden Zellflüssigkeit führt zu einer thermisch induzierten Fragmentierung der Zelle [3-6]. Die organischen Bestandteile können bei hohen Temperaturen pyrolysieren, was eine unvollständige Verbrennung des Gewebes zur Folge hat. Dabei entstehende Pyrolyseprodukte liegen dann zusammen mit der verdampften Zellflüssigkeit und Partikeln unverbrannten Materials in der Gasphase vor, wo sie als Rauch wahrgenommen werden können. Die Zusammensetzung dieses Stoffgemischs und entstehende Mengen sind bislang nicht abschließend geklärt. Es ist jedoch anzunehmen, dass es neben Wasserdampf, der den Hauptbestandteil des chirurgischen Rauchgases bildet, auch kanzerogene, mutagene und reproduktionstoxische Stoffe (KMR-Stoffe) enthält [7-9].

Des Weiteren können biologische Gefährdungen durch vitale Zellbestandteile (z. B. das Humane Papilloma Virus, HPV) bestehen, die beim Einatmen durch die Luft auf das Personal übertragen werden können [3, 10, 11]. Die biologischen Aspekte der

Gefährdung werden in dieser Arbeit nicht weiterverfolgt, da für aerosolgenerierende Tätigkeiten bereits die Verwendung mindestens einer FFP2-Maske vorgeschrieben ist. Weitere Informationen zu den zu ergreifenden Maßnahmen sind in der Technischen Regel für biologische Arbeitsstoffe (TRBA) 250 dokumentiert [12].

Eine reine, von der chemischen Wirkung unabhängige, Gefährdung durch Partikel (alveolengängiger bzw. einatembare Staub) ist aufgrund der im OP gegebenen Hygiene- und Lüftungsverhältnisse nicht zu erwarten und wurde in der Literatur bereits eingehend untersucht [13, 14]. Die Lüftungssituation „medizinisch genutzter Räume“ ist in DIN 1946-4 festgelegt, kann jedoch abhängig von der Zuordnung zu unterschiedlichen Raumklassen variieren [15]. Die für Operationsräume und baulich daran angebundene Räumlichkeiten geltende Raumklasse I ist dabei in die Unterkategorien Ia und Ib unterteilt. Selbst in der Klasse Ib, die im Vergleich zur Klasse Ia geringere Anforderungen aufweist, ist eine vergleichsweise hohe Mindestluftwechselrate von 20 h⁻¹ festgelegt [15]. Die rein partikuläre Gefährdung durch chirurgische Rauchgase wird daher im Zuge dieses Projektes nur am Rande verfolgt. Der Hauptfokus der Recherche liegt infolgedessen auf partikulär und gasförmig vorliegenden Gefahrstoffen, von denen eine chemische Gefährdung durch die inhalative Exposition ausgehen kann.

Trotz dieser normierten Lüftungssituation bleibt aber die bereits angesprochene olfaktorische Belastung bestehen und operierende und assistierende Personen sind aufgrund ihrer Nähe zur Emissionsquelle einer möglichen Gesundheitsgefährdung durch chirurgische Rauchgase ausgesetzt. Daher ist es notwendig, die Gefährdungsbeurteilung für diese Arbeitsplätze um Daten zur Exposition gegenüber chemischen Gefahrstoffen zu erweitern. Dabei stellt sich die Frage, inwiefern die Zusammensetzung der Rauchgase und damit die mögliche Gefährdung des Personals von der Lüftungssituation, der Art des Eingriffs und dem Gewebetyp abhängt. Patientinnen und Patienten sind in der Regel geringer exponiert, da viele operative Verfahren unter Vollnarkose durchgeführt werden, wobei für die Beatmung mittels Gesichtsmaske, Larynxmaske oder Endotrachealtubus oftmals extern zugeführte Luft zum Einsatz kommt, die bei Bedarf mit Sauerstoff angereichert werden kann [16].

Eine unter OP-Personal durchgeführte Studie von Michaelis, Nienhaus und Eickmann zeigt, dass häufig ein mangelndes Bewusstsein für die Gefährdung durch chirurgische Rauchgase vorliegt. 84 % der Teilnehmenden fühlten sich „schlecht informiert“ und 56 % hatten „keine Erfahrung mit [der] Einweisung in technische beziehungsweise persönliche Schutzmaßnahmen zur Vermeidung von Rauchgasen“ [17], obwohl die von chirurgischen Rauchgasen ausgehende Gefährdung für OP-Personal bereits in den 1990er-Jahren zunehmende Beachtung im Arbeitsschutz fand [18]. Dies unterstreicht den Bedarf an weiterer Forschung und auch Aufklärung zum Thema chirurgische Rauchgase. In der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 525 wird diesem Thema Kapitel 8.1 „Chirurgische Rauchgase“ gewidmet, in dem die möglichen Gefährdungen beim „Einsatz von Laser und elektrochirurgischen Verfahren“ aufgeführt sind [19]. Außerdem enthält es die Anforderungen an Schutzmaßnahmen im betroffenen Arbeitsbereich, die es aufgrund des in TRGS 400 [20] definierten Minimierungsgebotes zu ergreifen gilt.

Im Wesentlichen umfassen diese Schutzmaßnahmen:

- den Einsatz moderner Geräte, wenn möglich mit lokaler Absaugung,

- die Verwendung der Geräte in Räumlichkeiten mit „modernen raumlufttechnischen Anlagen“,
- die Aufklärung der Mitarbeitenden,
- Vorschläge für weitere und/oder persönliche Schutzmaßnahmen, wenn die ersten drei Maßnahmen im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung als unzureichend eingestuft werden [19].

Zur Beurteilung einer chemischen Gefährdung können in Deutschland Grenzwerte und Konzentrationen nach § 2 Absatz (8) bis (9) Gefahrstoffverordnung herangezogen werden. Diese beinhalten Arbeitsplatzgrenzwerte aus der TRGS 900 [21], Akzeptanz- (AK) und Toleranzkonzentrationen (TK) für krebserzeugende Gefahrstoffe aus der TRGS 910 [22] sowie Beurteilungsmaßstäbe aus stoffspezifischen TRGS. Im Folgenden wird dies unter dem Begriff Beurteilungsmaßstäbe zusammengefasst.

Für die Beurteilung einer chemischen Gefährdung bedarf es jedoch einer systematischen Übersicht über die gefahrstoffspezifische Zusammensetzung chirurgischer Rauchgase. Zu diesem Zweck wurde von der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW) zusammen mit dem Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) ein Forschungsprojekt zur Ermittlung der Exposition Beschäftigter gegenüber chirurgischen Rauchgasen unter Zuhilfenahme von Leitkomponenten initiiert. Der erste Schritt innerhalb des Projektes war eine Literaturrecherche zu diesem Thema, mit dem Ziel, Leitkomponenten für die darauffolgenden Versuche zu identifizieren.

2 Literaturübersicht

Die grundlegende Recherche zu Publikationen wurde mit gängigen online verfügbaren wissenschaftlichen Datenbanken (PubMed, Google Scholar, Web of Science) durchgeführt. Dabei wurden relevante Publikationen im Zeitraum von 1996 [23] bis 2025 [17] identifiziert und ausgewertet. Diese Publikationsliste wurde anschließend um weitere, darin zitierte Quellen erweitert. Danach erfolgte eine KI-gestützte Ergänzungssuche über ResearchRabbit, um zusätzliche Veröffentlichungen zum Thema chirurgische Rauchgase zu identifizieren. Von den insgesamt etwa 100 ausgewerteten Publikationen beschäftigen sich etwas mehr als 20 primär mit der chemischen Zusammensetzung der Rauchgase, wovon 18 für die Erstellung einer Substanzliste herangezogen werden konnten. Die zur Analyse herangezogenen Methoden, die Art der untersuchten Eingriffe und die Vorgehensweise während der Probenahme unterscheiden sich zwischen den in der Literatur beschriebenen Studien jedoch stark. Einige Publikationen liefern quantitative Aussagen zu Gefahrstoffkonzentrationen, die aufgrund eines Bezugs zum Luftvolumen mit den deutschen Beurteilungsmaßstäben verglichen werden könnten, insbesondere wenn grundlegende Anforderungen der TRGS 402 [24] eingehalten wären. Viele Quellen können jedoch nur als qualitativer Hinweis für den Nachweis eines Gefahrstoffes genutzt werden. Direkte Rückschlüsse auf eine inhalative Exposition lassen sie aber aufgrund der verwendeten Verfahren nicht zu.

3 Auswahl der Leitkomponenten anhand der Literaturübersicht

Grundlegend lässt sich die verfügbare Literatur in zwei Gruppen einteilen; dabei wird die Expositionssituation entweder stoffgruppen- oder operationsspezifisch betrachtet. Beispielsweise ana-

Tabelle 1 Liste der Gefahrstoffe, deren höchster auf ein Luftvolumen bezogener Literaturwert sich mit dem jeweils stoffspezifischen Beurteilungsmaßstab (als Schichtmittelwert) vergleichen lässt. Die Literaturwerte wurden bei Bedarf zur besseren Vergleichbarkeit in mg/m³ umgerechnet (*) (ggf. unter Berücksichtigung von Standardbedingungen von 1013 hPa und 20 °C). Fett markiert sind die vier ausgewählten Leitkomponenten.

Gefahrstoff	Beurteilungsmaßstab ^[21, 22] Luft am Arbeitsplatz			Höchster vergleichbarer Literaturwert *
1,2-Dichlorethan ^[8, 31]	AK TK	0,8 4	mg/m³	0,195 mg/m³ ^[31] *
Acetaldehyd ^[30, 32-34]	AGW	91	mg/m³	5,55 mg/m³ ^[33]
Aceton ^[8, 28, 30, 31, 33-35]	AGW	1 200	mg/m³	0,852 mg/m³ ^[31] *
Acetonitril ^[30, 34]	AGW	17	mg/m³	0,57 mg/m³ ^[34] *
Benzen (Benzol) ^[8, 26, 28, 30-32, 34-39]	AK TK	0,2 1,9	mg/m³	0,56 mg/m³ ^[34] *
Benzo[a]pyren ^[25, 40]	AK TK	70 700	ng/m³	0,16 ng/m³ ^[25]
Butanol ^[33]	AGW	310	mg/m³	0,46 mg/m³ ^[33]
Butylacetat ^[8]	AGW	300	mg/m³	<0,02 mg/m³ ^[8]
Butyraldehyd ^[30, 32]	AGW	64	mg/m³	0,084 mg/m³ ^[32] *
Ethanol ^[29, 30, 34]	AGW	380	mg/m³	1,2 mg/m³ ^[34] *
Formaldehyd ^[8, 28, 30, 32, 33]	AGW	0,37	mg/m³	0,30 mg/m³ ^[33]
Isooctan ^[28]	MAK	470	mg/m³	0,0062 mg/m³ ^[28] *
Isopropanol ^[30, 34, 35]	AGW	500	mg/m³	14 mg/m³ ^[34] *
Kohlenstoffdisulfid ^[36]	AGW	30	mg/m³	0,0015 mg/m³ ^[36] *
Naphthalin ^[25, 30, 33, 39, 40]	AGW	2	mg/m³	0,031 mg/m³ ^[33] *
Pentanol ^[33]	AGW	73	mg/m³	0,03 mg/m³ ^[33]
Phenol ^[8]	AGW	8	mg/m³	<0,5 mg/m³ ^[8]
Styrol ^[8, 28, 31-34, 36, 38, 39]	AGW	86	mg/m³	0,091 mg/m³ ^[34] *
Toluol ^[8, 28, 30-36, 38, 39, 41, 42]	AGW	190	mg/m³	0,46 mg/m³ ^[31, 36] *
Xylen ^[8, 28, 30-35, 38, 42]	AGW	220	mg/m³	0,0295 mg/m³ ^[33] *

lysieren Näslund et al. [25] ausschließlich polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) als Bestandteil der chirurgischen Rauchgase, während Moot et al. [26] und Wang et al. [27] sich auf flüchtige organische Verbindungen (VOC) beschränken. Andere Arbeiten fokussieren sich auf bestimmte Operationen oder Operationsgruppen, wie endoskopische urologische Resektionen (Weston et al. [28]), zu denen auch die transurethrale Prostataresektionen (Chung et al. [29]) gehört oder die laparoskopische Entfernung der Gallenblase (Dobrogowski et al. [30]). Einige Studien schränken auch beide Aspekte ein und betrachten beispielsweise ausschließlich die PAK, die während einer operativen Entfernung des Bauchfells entstehen [25]. Eine Ausnahme bildet die Arbeit von Karjalainen et al. [13], in der systematisch die partikulären Bestandteile der chirurgischen Rauchgase an verschiedenen Typen von Schweinegewebe charakterisiert werden. In dieser Arbeit wurden jedoch keine gefahrstoffspezifischen Analysen durchgeführt. Insgesamt gestaltet sich eine Gefährdungsbeurteilung auf Grundlage der vorhandenen Literatur schwierig, da die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Studien aufgrund der hohen Spezifität kaum gegeben ist und die Literatur im Hinblick auf gefahrstoffspezifische Messungen deutliche Lücken aufweist.

Die nicht abschließende Übersicht oben fasst die Ergebnisse der Literaturrecherche zu gefahrstoffbezogenen Messwerten in alphabetischer Reihenfolge der Gefahrstoffe zusammen. **Tabelle 1** bezieht sich dabei auf Quellen, in denen eine quantitative Aussage zu einem auf ein Luftvolumen bezogenen Messwert getroffen wurde. Hier ist eine Vergleichbarkeit mit Beurteilungsmaßstäben zum Beispiel aus der TRGS 900 [21] oder TRGS 910 [22] möglich. Die Ergebnisse aus Quellen, die aufgrund des Studiendesigns nicht direkt zum Vergleich mit Beurteilungsmaßstäben für Luftgrenzwerte genutzt werden können, sich jedoch als qualitativer Hinweis auf das Vorkommen eines Stoffes in chirurgischen Rauchgasen eignen, sind in **Tabelle 2** zusammengefasst.

Die Auswertung der Literaturdaten zeigt, dass nur Benzol bei einer Messung eine Gefahrstoffkonzentration oberhalb des derzeit gültigen Beurteilungsmaßstabes aufweist und sich die Konzentration auch bei nahezu allen anderen Gefahrstoffen deutlich unterhalb der geltenden Beurteilungsmaßstäbe befindet. Benzol wurde durch Sisler et al. [34] in Höhe von 0,56 mg/m³ bestimmt. Hier erfolgte die Probenahme allerdings mit einem Kanister in 5 cm Entfernung von der Emissionsquelle und entspricht somit eher dem Vorgehen einer Emissionsmessung als dem einer Expo-

Tabelle 2 Liste der Gefahrstoffe inklusive der Literaturwerte, die sich zum jeweils stoffspezifischen Beurteilungsmaßstab (als Schichtmittelwert) nicht direkt in Zusammenhang bringen lassen. Die mit ** markierten Werte beziehen sich auf die Masse des pyrolysierten Gewebes. (qual. = nur qualitativ nachgewiesen).

Gefahrstoff	Beurteilungsmaßstab ^[21, 22] Luft am Arbeitsplatz			Beispielwert aus der Literatur
1,2,3-Trimethylbenzol ^[30, 35]	AGW	100	mg/m³	0,009±0,009 µg/g ^{[35]**}
1,3-Butadien ^[26, 29, 30, 35]	AK TK	0,5 5	mg/m³	8 652,44 ± 3 075,20 µg/g ^{[29]**}
2-Methylpropanol (iso-Butanol) ^[41]	AGW	310	mg/m³	qual. ^[41]
4-Methylphenol (p-Kresol) ^[41]	AGW	4,5	mg/m³	qual. ^[41]
Acrylnitril ^[8, 28-30, 35, 41]	AK TK	0,26 2,6	mg/m³	332,4±314,47 µg/g ^{[35]**}
Cumol (Isopropylbenzol) ^[30, 35]	AGW	50	mg/m³	0,026±0,026 µg/g ^{[35]**}
Cyclohexanon ^[42]	AGW	80	mg/m³	48,6 µg/mL ^[42]
Ethylbenzen (Phenylethan) ^[8, 28, 30-34, 36, 38, 39, 41, 42]	AGW	88	mg/m³	3,23 µg/mL ^[42]
Methylmercaptan ^[29]	AGW	1	mg/m³	qual. ^[29]
Tetrachlorethen (Perchloroethylen) ^[42]	AGW	69	mg/m³	0,35 µg/mL ^[42]
Trimethylbenzol (Mesitylen) ^[30]	AGW	100	mg/m³	qual. ^[30]

sitionsmessung. Solche Messungen beschreiben folglich eher eine Emission und keine personenbezogene Exposition zur inhalativen Belastung im Einatembereich. Es handelt sich um einen Maximalwert, der in einer von sechs Probenahmen auftrat. Er übersteigt die AK der festgelegten Expositions-Risiko-Beziehung (ERB) etwa um ihr 1,8-faches, weshalb Benzol bei zukünftigen Messungen besonders beachtet werden sollte.

Formaldehyd weist bei einer von sieben Messungen von Krones et al. [33] eine Konzentration von 0,30 mg/m³ auf, die bei Anwendung eines Hochfrequenzchirurgiegerätes im Koagulationsmodus während der Bearbeitung von Fettgewebe ermittelt wurde. Diese liegt zwar noch unterhalb des AGW, doch da bei Schnitteinstellungen aufgrund der höheren Temperaturen höhere Gefahrstoffkonzentrationen zu erwarten sind als im Koagulationsmodus, sollte Formaldehyd auch bei Folgemessungen mit einbezogen werden. Sowohl Formaldehyd als auch Benzol sind daher unter anderem als Leitkomponenten für das Projekt festgelegt worden.

Aufgrund der kanzerogenen, mutagenen und reproduktionstoxischen Einstufung von Benzo[a]pyren in der CLP-Verordnung [43] und der möglichen Entstehung von PAK bei der Pyrolyse organischen Materials wurde dieser Stoff ebenfalls als Leitkomponente ausgewählt. Naphthalin [33] ergänzt die Leitkomponenten in seiner Eigenschaft als leichtflüchtiger Vertreter der PAK und ist nach der CLP-Verordnung als krebserzeugend der Kategorie 2 eingestuft [43]. Für alle vier Gefahrstoffe gibt es bereits anerkannte Analysenverfahren im Arbeitsschutzbereich.

Wie Tabelle 2 zeigt, bezieht sich ein Teil der in der Literatur verfügbaren Werte nicht auf ein Luftvolumen. Gleichzeitig lassen sich die in der Literatur angegebenen Einheiten nicht immer auf untereinander vergleichbare Einheiten wie mg/m³ oder ml/m³ umrechnen. Dadurch wird der Vergleich verschiedener Gefahrstoffkonzentrationen aus unterschiedlichen Quellen miteinander oder mit dem Beurteilungsmaßstab aus TRGS 900 beziehungsweise TRGS 910 erschwert oder ist nicht möglich [21, 22]. Beispiele hierfür sind der Bezug auf ein Extraktionsvolumen (z. B.

Al Sahaf et al. [42]) und folglich eine Angabe in µg/ml oder eine Angabe in µg/g, bezogen auf ein Gramm des bearbeiteten Gewebes (z. B. Zhao et al. [35]).

Aufgrund der uneinheitlichen Datenlage, aus der sich für gefährstoffspezifische Fragestellungen schlecht ein einheitliches Bild zur Gefährdung durch chirurgische Rauchgase ableiten lässt, ergibt sich ein Forschungsbedarf, der zur Initiierung des BGW-/IFA-Forschungsprojektes zur systematischen Expositionsermittlung in Operationssälen führte.

4 Diskussion

Die Literatur zum Thema chirurgische Rauchgase ist vielfältig, wodurch sie viele verschiedene Aspekte bereits anspricht. Gleichzeitig ist die Betrachtung dadurch stellenweise eher oberflächlich. Ein großer Teil der Literatur besteht außerdem aus Review-Artikeln (z. B. [10, 44, 45]), deren Quellen sich teils stark überschneiden. Obwohl es also Literatur aus den letzten 30 Jahren gibt, sind inhaltlich nur wenige Neuerungen oder Ergänzungen aus den letzten fünf bis zehn Jahren darunter, die insbesondere auch neuere Daten zur chemischen Zusammensetzung der Rauchgase liefern würden. Wie bereits im vorigen Kapitel erwähnt, erschwert die hohe Spezifität der Literatur außerdem den Vergleich untereinander und die Übertragbarkeit auf allgemeine OP-Bedingungen.

Neben den oben genannten Punkten spielt auch die Herkunft der Daten aus internationalen Realmessungen von OP-Arbeitsplätzen eine Rolle, da die Lüftungssituation aufgrund unterschiedlicher Standards nicht direkt vergleichbar ist. Ergebnisse, die unter Verwendung unterschiedlicher Messverfahren erhalten wurden, sind unter Umständen ebenfalls nicht direkt übertragbar, wenn die Messverfahren nicht nach den einheitlichen internationalen Normen – z. B. DIN EN 482 [46], DIN EN ISO 22056 [47] und DIN 32645 [48] – validiert wurden.

Literaturdaten können folglich nur der Orientierung dienen, ersetzen aber keine betriebliche Messung nach TRGS 402 [24].

Hier setzt das Forschungsprojekt der BGW und des IFA an, um in einer praxisnahen Studie aussagekräftige Messwerte für unterschiedliche Operationsszenarien zu ermitteln und eine verlässliche Grundlage für die Gefährdungsbeurteilung zu bilden.

5 Weitere Projektkonzeption

Im Rahmen des Forschungsprojektes von BGW und IFA werden in Anlehnung an die Untersuchungen von Karjalainen et al. [13] zur Charakterisierung von Partikeln in chirurgischen Rauchgasen nachstellende Versuche durchgeführt, für die aufgrund der biologischen Ähnlichkeit mit dem Menschen (siehe z.B. die Transplantation von Herzklappen [49]) verschiedene Gewebearten vom Schwein herangezogen werden. Diese umfassen Haut, Fett, Muskel und Leber, wobei Leber aufgrund der Verfügbarkeit und der hohen Partikelemissionen in Versuchen von Karjalainen et al. [13] als Vertreter der inneren Organe dient. Dabei werden unter definierten Bedingungen in einer Prüfkammer am IFA ohne aktive Lüftung chirurgische Rauchgase erzeugt und diese auf ihre Gefahrstoffzusammensetzung hin untersucht. Hierzu wird ein Hochfrequenzchirurgiegerät in Schnitteinstellung an den unterschiedlichen Gewebetypen angewendet. Für die ausgewählten Leitkomponenten gibt es am IFA bereits etablierte Analysenverfahren für Arbeitsplatzmessungen, innerhalb derer die Analysen anhand ihrer chemischen Eigenschaften zu Analysengruppen (VOC, Aldehyde, PAK) zusammengefasst sind. Für die praktische Durchführung der Gefahrstoffmessungen in der Prüfkammer werden für die Analysengruppen spezifische Probenträger verwendet, die zur stationären Probenahme in unmittelbarer Nähe des nachgestellten Operationsbereichs befestigt sind. Die Probenträger sind dabei so angebracht, dass sie auch den potenziellen Einatembereich von Operierenden während eines Eingriffs abdecken.

Neben den nachstellenden Versuchen werden die gleichen Gewebearten unter kontrollierten Bedingungen im Labormaßstab pyrolysiert, um die Ergebnisse der nachstellenden Versuche zu bestätigen und gegebenenfalls weitere relevante Gefahrstoffe außerhalb der bei den Messungen in der Prüfkammer definierten Substanzen zu identifizieren.

Im letzten Schritt werden Expositionsmessungen während verschiedener realer Operationen, bei denen elektrochirurgische Geräte zum Einsatz kommen, messtechnisch begleitet. Dabei werden unter Zuhilfenahme der Expertise des medizinischen Fachpersonals primär Operationen mit eher starker Rauchentwicklung herangezogen. Dabei soll es sich hauptsächlich um offene Operationen handeln, bei denen viel mit einem Hochfrequenzchirurgiegerät vorrangig im Schnittmodus oder einem Elektrokoagulator gearbeitet wird. Beispiele hierfür sind das Einsetzen einer Totalendoprothese oder die Behandlung großflächiger Brandwunden. Im Gegensatz dazu werden keine Messungen bei endoskopischen oder laparoskopischen Eingriffen sowie bei überwiegender Anwendung im Koagulationsmodus durchgeführt, da die Rauchentwicklung bei diesen Operationstypen im Allgemeinen deutlich geringer ausfällt.

Zusammenfassend sollen die Erkenntnisse aus den nachstellenden Versuchen und den Praxismessungen dazu beitragen, die mögliche Gefährdung für OP-Personal besser zu verstehen und eine ausreichende Datengrundlage für eine Gefährdungsbeurteilung entsprechender Arbeitsplätze zu schaffen.

DANKSAGUNG

Für die nachstellenden Versuche in der Prüfkammer am IFA wurde freundlicherweise ein Leihgerät der Fa. Erbe Elektromedizin GmbH, Tübingen, zur Verfügung gestellt.

LITERATUR

- [1] Krasicka-Rohde, E.; Zgoda, F.: Lasersysteme, in Medizintechnik: Verfahren – Systeme – Informationsverarbeitung. Hrsg.: R. Kramme. Springer, Berlin 2011, S. 457-476.
- [2] Jenne, J. W. et al.: Fokussierte Ultraschallchirurgie. Der Radiologe, 2003. 43(10): S. 805-812.
- [3] Hill, D. S. et al.: Surgical smoke – A health hazard in the operating theatre: A study to quantify exposure and a survey of the use of smoke extractor systems in UK plastic surgery units. Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery, 2012. 65(7): p. 911-916.
- [4] Palanker, D.; Vankov, A.; Jayaraman, P.: On mechanisms of interaction in electrosurgery. New Journal of Physics, 2008. 10(12): p. 1-15.
- [5] Fastenmeier, K.: Physik und Technik der Hochfrequenzchirurgie. In: Endoskopische Urologie: Atlas und Lehrbuch. Hrsg.: R. Hofmann. Springer, Berlin 2009. S. 20-26.
- [6] Hug, B.; Haag, R.: Hochfrequenzchirurgie, in Medizintechnik: Verfahren – Systeme – Informationsverarbeitung. Hrsg.: R. Kramme. Springer, Berlin 2011. S. 565-587.
- [7] Merz, B. et al.: Chirurgische Rauchgase – Gefährdungen und Schutzmaßnahmen, A. Arbeitsmedizin, Editor. 2011, Schweizerische Unfallversicherungsanstalt Luzern.
- [8] Liu, Y. et al.: Chemical composition of surgical smoke produced during the loop electrosurgical excision procedure when treating cervical intraepithelial neoplasia. World Journal of Surgical Oncology, 2021. 19(1): p. 103.
- [9] Boeckelmann, I., Sammito, S.; Meyer, F.: Arbeitsbelastung durch Anästhesiegase und chirurgische Rauchgase und Schutzmaßnahmen im chirurgischen Operations(OP-)bereich – was der Chirurg wissen sollte. Zentralblatt für Chirurgie, 2013. 138(01): S. 94-103.
- [10] Robertson-More, C.; Wu, T.: A knowledge gap unmasked: viral transmission in surgical smoke: a systematic review. Surgical Endoscopy and Other Interventional Techniques, 2021. 35(6): p. 2428-2439.
- [11] Lewin, J. M.; Brauer, J. A.; Ostad, A.: Surgical smoke and the dermatologist. Journal of the American Academy of Dermatology, 2011. 65(3): p. 636-641.
- [12] TRBA 250 – Biologische Arbeitsstoffe im Gesundheitsdienst und in der Wohlfahrtspflege, ABAS, Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund 2025.
- [13] Karjalainen, M. et al.: The characterization of surgical smoke from various tissues and its implications for occupational safety. PLOS ONE, 2018. 13(4): p. 13.
- [14] Brüske-Hohfeld, I. et al.: Surgical smoke and ultrafine particles. Journal of Occupational Medicine and Toxicology, 2008. 3(1).
- [15] DIN 1946-4: Raumluftechnik – Teil 4: Raumluftechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens, DIN. Beuth, Berlin 2018.
- [16] Heyse, D. et al.: Technische Aspekte der Beatmungsmedizin. Pneumologie, 2014. 68(12): S. 811-820.
- [17] Michaelis, M.; Nienhaus, A.; Eickmann, U.: Chirurgischer Rauch im OP: Gesundheitsgefahren und Präventionsmöglichkeiten, in RiRe – Risiken und Ressourcen in Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege. ecomed-Storck GmbH, Landsberg am Lech 2025, S. 131-148.
- [18] Hunter, J. G.: Laser smoke evacuator: Effective removal of mutagenic cautery smoke. Aesthetic Plastic Surgery, 1996. 20(2): p. 177-178.
- [19] TRGS 525 – Gefahrstoffe in Einrichtungen der medizinischen Versorgung. GMBI. 2014. 09/2014(63): S. 1294-1307.
- [20] TRGS 400 – Gefährdungsbeteiligung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen. GMBI. 2017. 07/2017(36): S. 638.
- [21] TRGS 900 – Arbeitsplatzgrenzwerte. BAuA. 2006. 01/2006: S. 41-55.
- [22] TRGS 910 – Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen. GMBI. 2014. 02/2014(12): S. 258-270.
- [23] DesCôteaux, J. G. et al.: Preliminary study of electrocautery smoke particles produced in vitro and during laparoscopic procedures. Surgical Endoscopy, 1996. 10(2): p. 152-158.
- [24] TRGS 402 – Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition. GMBI. 2023. 09/2023(42): S. 898-920.

- [25] Näslund Andréasson, S. et al.: Polycyclic aromatic hydrocarbons in electrocautery smoke during peritonectomy procedures. *Journal of Environmental and Public Health*, 2012. 2012.
- [26] Moot, A. R. et al.: Composition of Volatile Organic Compounds in Diathermy Plume as Detected by Selected Ion Flow Tube Mass Spectrometry. *ANZ Journal of Surgery*, 2007. 77(1-2): p. 20-23.
- [27] Wang, B.-L. et al.: Unmetabolized VOCs in Urine as Biomarkers of Low Level Exposure in Indoor Environments. *Journal of Occupational Health*, 2007. 49(2): p. 104-110.
- [28] Weston, R. et al.: Chemical Composition of Gases Surgeons Are Exposed to During Endoscopic Urological Resections. *International Journal of Urology*, 2009. 74(5): p. 1152-1154.
- [29] Chung, Y. J. et al.: Harmful gases including carcinogens produced during transurethral resection of the prostate and vaporization. *International Journal of Urology*, 2010. 17(11): p. 944-949.
- [30] Dobrogowski, M. et al.: Chemical composition of surgical smoke formed in the abdominal cavity during laparoscopic cholecystectomy – Assessment of the risk to the patient. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 2014. 27(2): p. 314-325.
- [31] Choi, S. H. et al.: Activated carbon fiber filters could reduce the risk of surgical smoke exposure during laparoscopic surgery: application of volatile organic compounds. *Surgical Endoscopy*, 2018. 32(10): p. 4290-4298.
- [32] Ha, H. I. et al.: Chemicals in Surgical Smoke and the Efficiency of Built-in-Filter Ports. *Journal of the Society of Laparoscopic & Robotic Surgeons*, 2019. 23(4).
- [33] Krones, C. J. et al.: Chemical composition of surgical smoke produced by electrocautery, harmonic scalpel and argon beaming – a short study. *European Surgery*, 2007. 39(2): p. 118-121.
- [34] Sisler, J. D. et al.: In vitro toxicological evaluation of surgical smoke from human tissue. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 2018. 13(1): p. 12.
- [35] Zhao, C. et al.: Comparative Safety Analysis of Surgical Smoke From Transurethral Resection of the Bladder Tumors and Transurethral Resection of the Prostate. *Urology*, 2013. 82(3): p. 744.e9-744.e14.
- [36] Sagar, P. M. et al.: Chemical composition and potential hazards of electrocautery smoke. *British Journal of Surgery*, 2005. 83(12): p. 1792-1792.
- [37] Gianella, M. et al.: Quantitative Chemical Analysis of Surgical Smoke Generated During Laparoscopic Surgery With a Vessel-Sealing Device. *Surgical Innovation*, 2014. 21(2): p. 170-179.
- [38] Choi, D. H.; Choi, S. H.; Kang, D. H.: Influence of surgical smoke on indoor air quality in hospital operating rooms. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017. 17(3): p. 821-830.
- [39] Van Gestel, E. A. F. et al.: Assessment of the absorbed dose after exposure to surgical smoke in an operating room. *Toxicology Letters*, 2020. 328: p. 45-51.
- [40] Tseng, H.-S. et al.: Cancer risk of incremental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in electrocautery smoke for mastectomy personnel. *World Journal of Surgical Oncology*, 2014. 12(1): p. 31.
- [41] Hensman, C. et al.: Chemical composition of smoke produced by high-frequency electrosurgery in a closed gaseous environment. *Surgical Endoscopy*, 1998. 12(8): p. 1017-1019.
- [42] Al Sahaf, O. S. et al.: Chemical composition of smoke produced by high-frequency electrosurgery. *Irish Journal of Medical Science*, 2007. 176(3): p. 229-232.
- [43] Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (1). *Amtsblatt der Europäischen Union*, 2008. 51(L 353).
- [44] Barrett, W. L.; Garber, S. M.: Surgical smoke: a review of the literature. *Surgical Endoscopy*, 2003. 17(6): p. 979-987.
- [45] Mowbray, N. et al.: Is surgical smoke harmful to theater staff? a systematic review. *Surgical Endoscopy*, 2013. 27(9): p. 3100-3107.
- [46] DIN EN 482:2021-05: Exposition am Arbeitsplatz – Verfahren zur Bestimmung der Konzentration von chemischen Arbeitsstoffen – Grundlegende Anforderungen an die Leistungsfähigkeit; Deutsche Fassung DIN. Beuth, Berlin 2021.
- [47] DIN EN ISO 22056:2021-02: Luft am Arbeitsplatz – Gase und Dämpfe – Anforderungen an die Evaluierung von Messverfahren mit pumpenbetriebenen Probenahmeeinrichtungen (ISO 22065:2020); Deutsche Fassung, DIN. Beuth, Berlin 2021.
- [48] DIN 32645:2008-11: Chemische Analytik – Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenze unter Wiederholbedingungen – Begriffe, Verfahren, Auswertung, DIN. Beuth, Berlin 2008.
- [49] Hoffmann, G.; Lutter, G.; Cremer, J.: Verbesserte Haltbarkeit von biologischen Herzklappen. *Deutsches Ärzteblatt*, 2008. Jg. 105(Heft 8): S. 143-148.

Anna-Katharina Stoll,

Dr. rer. nat. Daniel Köster,

Katrin Pitzke

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.

Dr. rer. nat. Benedikt Thomas,

Dr. rer. nat. Johannes Gerding

Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW), Köln.