

Ionenmobilitätsspektrometrie mit Gaschromatographie zur Bewertung von Narkoseabgasabsorbern bei Anästhesiegeräten ohne zentrale Narkosegasabsaugung

*Christian Thoben¹, Katja Nickel², Alexander Nitschke¹, Moritz Hitzemann¹,
Christiane Beck², Nils Dennhardt², Terence Krauß², Sebastian Heiderich² und
Stefan Zimmermann¹*

¹ Leibniz Universität Hannover, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik, Hannover

² Klinik für Anästhesiologie und Intensivmedizin, Medizinische Hochschule Hannover

Kontakt: thoben@geml.uni-hannover.de

Einleitung

Die Ionenmobilitätsspektrometrie (IMS) ist eine analytische Technik zur schnellen Detektion und Identifikation kleinster Konzentrationen flüchtiger organischer Verbindungen (VOCs). [1–3]

Die Funktionsweise basiert auf der Bewegung von Ionen in einem elektrischen Feld durch ein Driftgas, wobei die benötigte Zeit bis zum Erreichen des Detektors gemessen wird. Diese sog. Driftzeit ist dabei charakteristisch für den Kollisionsquerschnitt, die Masse und Ladung der Ionen und ermöglicht somit die Identifizierung der jeweiligen Substanzen. Die IMS ist aufgrund ihrer Schnelligkeit, Empfindlichkeit und Fähigkeit zur Analyse im Spurenbereich sowie des geringen instrumentellen Aufwandes in vielen Anwendungsgebieten besonders vorteilhaft, was sie zu einem wichtigen Werkzeug in der chemischen Analytik macht.

Typische Anwendungen liegen im Bereich der Sicherheitstechnik zur Detektion von Drogen, Explosivstoffen [4–6], Gefahrstoffen und chemischen Kampfstoffen [7–10]. Des Weiteren wird die IMS für die Überwachung medizinischer Biomarker [11–13], in die Lebensmittelsicherheit [14–16] sowie jüngst für die Analyse von Biogas genutzt [17]. Im medizinischen Bereich kommt die IMS auch zur Bestimmung der Arbeitsplatzkonzentration volatiler Anästhesiegase in Aufwächrräumen zum Einsatz [18; 19], hier insbesondere zur Quantifizierung der Restkonzentration volatiler Anästhetika bei „triggerfreier“ Allgemeinanästhesie [20–23].

Ein weiterer Anwendungsfall ergibt sich aus dem Aspekt, dass mit 4,4 % der Gesundheitssektor in den Industrieländern für einen hohen Anteil der Treibhausgasemissionen verantwortlich ist. Diese entstehen durch direkte CO₂-Emissionen (Scoop 1), indirekte Emissionen durch eingekaufte Energie (Scoop 2) und indirekte Emissionen, die nicht unter Scoop 2 fallen, wie Lieferketten und die Entsorgung von Medizinprodukten [24]. Zu den Treibhausgasen gehören auch volatile Anästhetika, von denen nur ein kleiner Teil im Körper verstoffwechselt wird (Desfluran 0,02%

[25], Sevofluran 5% [26], Isofluran 0,2% [27]). Ein großer Teil wird über zentrale Narkosegasabsaugungen direkt in die Atmosphäre abgeleitet.

In den letzten Jahren wurden Narkosegasabsorber entwickelt, die das Gas absorbieren, z. B. Contrafluran™ (Zeosys (Luckenwalde, Deutschland), Deltasorb® (Blue-Zone Technologies, Ontario, Kanada) oder SID-Dock/SID-Canisters® (SageTech Medical, Paignton, UK). Das Gas kann durch sterile Destillation zurückgewonnen und wiederverwendet werden [28]. So entsteht eine Kreislaufwirtschaft, die Herstellungsmaterial und CO₂ einspart. Das Ausmaß der Auswirkungen von Anästhesiegasen auf die globale Erwärmung wird derzeit von Klimaforschern diskutiert [29]. Als Instrument zum Vergleich der Wirkung einzelner Treibhausgase auf die globale Erwärmung dient das globale Erwärmungspotenzial (GWP).

In den letzten Jahren gab es in der Klimaliteratur eine ausführliche und komplexe Debatte über die Relevanz einfacher Emissionsindikatoren, wie z. B. des GWP, für kurzlebige Klimaschadstoffe [30–32]. Emissionen von langlebigen (und daher kumulativen) Gasen haben eine grundlegend andere Auswirkung auf die planetarische Energiebilanz als kurzlebige Klimaschadstoffe. Aufgrund der selektiven Freisetzung von Narkosegasen in die Atmosphäre, ihrer kurzen Lebensdauer und der dadurch bedingten geringen Akkumulation in der Atmosphäre haben Narkosegase möglicherweise keine großen Auswirkungen auf die globale Erwärmung. Dennoch sind die Auswirkungen und das GWP über einen kürzeren Zeitraum (20 Jahre) erheblich höher (Sevofluran GWP₂₀ = 440, Desfluran GWP₂₀ = 6810, Isofluran GWP₂₀ = 1800) [33]. Außerdem wird in bestimmten Fällen postuliert, dass sich der Einfluss kurzlebiger Klimaschadstoffe im Laufe der Zeit verstärkt [34].

Slingo und Slingo gehen jedoch davon aus, dass eher die Herstellung, der Vertrieb und der Transport der Filter zur Destillation von flüchtigen Anästhetika zu zusätzlichen CO₂-Emissionen führen, die für die globale Erwärmung relevant sein könnten [35]. Eine Ökobilanz der einzelnen Anästhesieverfahren mit Narkosegasabsorbern könnte eine Aussage über den

CO₂-Fußabdruck liefern. Es gibt eine Ökobilanz von Hu et al. für Narkosegasabsorber, allerdings wurden nicht alle Aspekte untersucht [36].

Ein weiterer Vorteil von Narkosegasabsorbentern könnte darin bestehen, dass die zentrale Narkosegasabsaugung, die sehr viel Energie verbrauchen, nicht mehr benötigt werden. Der Narkosegasabsorber muss jedoch wirksam sein, um ein nachweisbares Austreten von flüchtigen Anästhetika zu verhindern. In dieser Studie soll ein Narkosegasabsorber bewertet werden. Hierfür kommt ein Ionenmobilitätsspektrometer in Kombination mit einer gaschromatographischen Vorabtrennung zum Einsatz, mit dem Sevofluran im ppb-Bereich nachgewiesen werden kann.

Methoden und Materialien

Narkoseabgasabsorbersystem

Ein Primus®-Narkosegerät (Dräger, Lübeck, Deutschland) wurde von der zentralen Narkosegasabsaugung abgekoppelt und an einen Narkosegasabsorber (CONTRAflurane™-System, Zeosys Medical GmbH, Luckenwalde, Deutschland) angeschlossen. Dieser Narkoseabgasabsorber besteht aus einer Kunststoffkartusche (Polypropylen), die mit Aktivkohle aus Kokosnussschalen gefüllt ist. Aufgrund der grobporigen Struktur strömt die Ausatemluft des Narkoseplatzes passiv durch den Narkoseabgasabsorber mit einem Auslass in die Raumluft. Die volatilen Anästhetika werden dabei physikalisch gebunden. Sobald der Absorber nahezu gesättigt ist und der Ausstoß flüchtiger Anästhetika in den Raum 1200 ppm übersteigt, soll eine gelbe LED-Warnung auf der Füllstandsanzeige des Narkoseabgasabsorbers (SENSOfurane™, Zeosys Medical GmbH, Luckenwalde, Deutschland) erscheinen. Wenn der Absorber voll ist (bei Überschreitung eines Ausstoßes von 2000 ppm flüchtigem Anästhetikum), wird der Anästhesist durch eine rote LED und eine akustische Warnung darauf hingewiesen, die Absorberkartusche zu wechseln. Später können die Anästhesiegase in einem automatisierten Prozess aus der Aktivkohlekartusche entnommen werden [28].

Simulierte Anästhesieversuche

Eine Testlung wurde mit dem Primus®-Narkosegerät verbunden und mit 100% Sauerstoff und verschiedenen Konzentrationen von Sevofluran beatmet. Dazu erfolgte eine volumenkontrollierte Beatmung mit einer Atemfrequenz von 12 min⁻¹, einem positiven endexpiratorischen Druck von 5 mbar und einem Tidalvolumen von 500 mL. In einem 120-Sekunden-Intervall wurden Luftproben direkt am Auslass des Narkosegasabsorbers entnommen. Die Messung der Sevoflurankonzentration erfolgte dann mit Hilfe der Ionenmobilitätsspektrometrie mit gaschromatographischer Vorabtrennung (GC-IMS). Für jedes Experiment wurde eine neue Narkosegasabsorberkartusche verwendet. Insgesamt erfolgte eine Serie von 4

Experimenten: Versuch 1 war ein Stresstest, bei dem der Frischgasfluss (FGF) auf 18 L · min⁻¹ und der Vapor auf 8 Vol.% Sevofluran eingestellt waren. Nach Erscheinen der roten LED-Warnung wurde der FGF auf 2 L · min⁻¹ reduziert. Ziel dieses Experiments war es, ein Worst-Case-Szenario mit einer klinisch unrealistisch hohen Sevoflurankonzentration zu erzeugen, um so zu bewerten, ob der Narkosegasabsorber in der Lage ist, auch höchste Sevoflurankonzentrationen ausreichend zu absorbieren, und ob eine gesättigte Absorberkartusche zu einer klinisch relevanten Raumkontamination von Sevofluran führen kann. In den Experimenten 2-4 sollte ein möglicher Zusammenhang zwischen FGF und Durchbruchzeit der Absorberkartuschen (definiert als Zeit bis zum Aufleuchten der roten LED-Warnung) untersucht werden. Der FGF wurde hierfür jeweils auf 1 L · min⁻¹ (Versuch 2), 2 L · min⁻¹ (Versuch 3) und 4 L · min⁻¹ (Versuch 4) eingestellt. Die Einstellung des Vapors betrug 2 Vol.% Sevofluran.

Ionenmobilitätsspektrometrie

Zur Bestimmung der Sevofluran-Konzentration wurde ein kompaktes, hochauflösendes Ionenmobilitätsspektrometer (IMS) mit gaschromatographischer (GC) Vortrennung eingesetzt. Eine ausführliche Beschreibung des Systems ist an anderer Stelle zu finden [17]. Die Betriebsparameter des GC-IMS sind in Tab. 1 aufgeführt.

Tab. 1: Betriebsparameter des GC-IMS

Parameter	Wert
Dirftraumlänge	51 mm
Driftspannung	2720 V
Driftgasflussrate	150 ml/min
GC-Trägergasflussrate	10 ml/min
Probengasflussrate	110 ml/min
GC-Träger- und Driftgas	gereinigte trockene Luft
Ionisationsquelle	³ H (110 MBq)

Das IMS trennt verschiedene Substanzen anhand ihrer Ionenmobilität, die durch die Driftgeschwindigkeit ihrer jeweiligen Ionen durch ein Driftgas unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes bestimmt wird. Das verwendete IMS erreicht ein Auflösungsvermögen von R = 70 (Driftzeit/Halbwertsbreite). Betrieben wird das IMS durch eine selbstentwickelte Elektronik für die Driftspannungen, die Ionentor-Steuerung und die Datenaufnahme [37]. Im Gegensatz zu früheren Veröffentlichungen wird in dieser Studie für das IMS nur die negative Polarität verwendet. Eine 20 m lange Restek RTX volatiles GC-Trennsäule mit einem Innendurchmesser von ID = 530 µm und einer Schichtdicke der stationären Phase von df = 2 µm wird isotherm bei 40°C für die Vortrennung verwendet. Die Probenahme erfolgt über ein definiertes Probeneschleifenvolumen von 250 µL. Zu einem definierten

Zeitpunkt wird die Probe in den Trägergasstrom injiziert und der auf die GC-Trennsäule geleitet. Nach der zeitlichen Trennung der Probe im GC strömen die Probenkomponenten mit dem Trägergas in den IMS-Ionisationsbereich, wo die Analyten ionisiert und vom IMS nachgewiesen werden. Folglich können alle bei GC-IMS-Messungen beobachteten Peaks durch ihre Ionenmobilität, die GC-Retentionszeit und die Peakfläche charakterisiert werden, die mit der Konzentration des jeweiligen Stoffes in Beziehung steht.

Ergebnisse

In der Anfangsphase des Stresstests (Versuch 1) wurden die FGF auf $18 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ und der Vapor auf 8 Vol.% Sevofluran eingestellt. Diese Konfiguration wurde beibehalten, bis die erste gelbe LED-Warnung angezeigt wurde (nach 64 min). Diese Warnung wurde für einen Zeitraum von sechs Minuten angezeigt, bevor direkt die rote LED-Warnung ausgegeben wurde (nach 70 min). Daraufhin wurde die FGF auf $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ reduziert, um einen weiteren starken Konzentrationsanstieg zu verhindern. Dennoch wurde während der 15-minütigen Dauer des Testabschnitts weiterhin die rote LED-Warnung ausgegeben. Zum Zeitpunkt des Durchbruches des Narkosegasabsorbers konnten mit dem GC-IMS drei unbekannte Substanzen nachgewiesen werden, siehe Abb. 1, bei denen es sich um mögliche Reaktionsprodukte von Sevofluran handeln könnte [38].

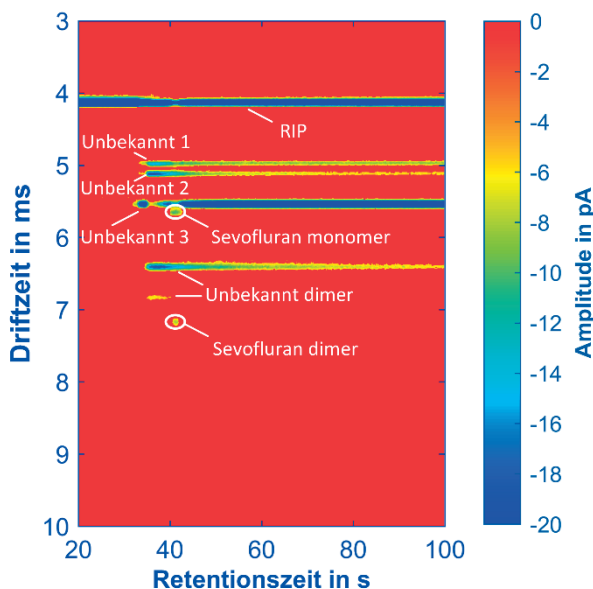


Abb. 1: Topographische Darstellung der GC-IMS-Messergebnisse (IMS-Driftzeit über GC-Retentionszeit) zum Zeitpunkt des Durchbruches des Narkosegasabsorbers

Unmittelbar nach Beendigung des Testabschnitts mit 15-minütigem Betrieb mit roter LED-Warnung wurde eine Raumluftmessung in 1 m Abstand vom Narkosegasabsorber durchgeführt, siehe Abb. 2. Die Konzentration betrug maximal $12,4 \text{ ppm}$ und ist innerhalb von vier Minuten auf unter 5 ppm gesunken.

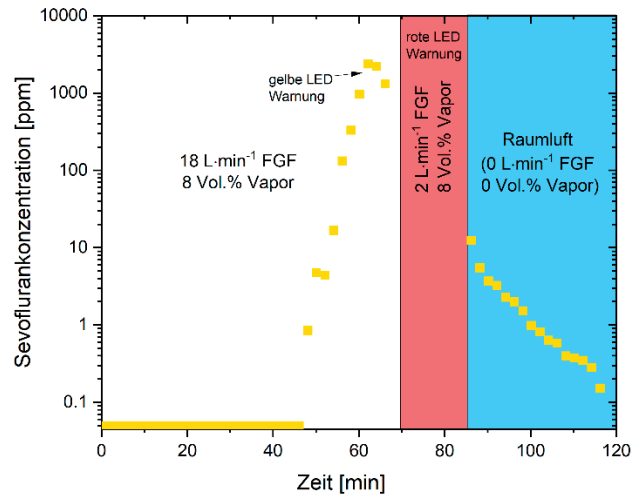


Abb. 2: Sevoflurankonzentration logarithmisch über die Zeit, gemessen am Auslass des Narkosegasabsorbers und anschließender Raumluftmessung in 1 m Entfernung vom Narkosegasabsorber.

Abb. 3 zeigt den Zusammenhang zwischen der FGF und Nutzungsdauer des Narkoseabsorbers. Mit steigendem FGF nimmt die Durchbruchzeit des Narkosemittelabsorbers ab. Dies spiegelt sich auch in den Zeitabständen zwischen der ersten gelben und der anschließenden roten LED-Warnung wider. Bei einem FGF von $1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ vergehen zwischen den Warnungen 226 Minuten. Bei einem FGF von $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ verkürzt sich dieser Zeitraum auf 70 Minuten, bei einem FGF von $4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ weiter auf 63 Minuten. Darüber hinaus wurden niedrige, ansteigende Konzentrationen von Sevofluran im ppb-Bereich festgestellt, die nach 3080 Minuten ($1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ FGF), 1298 Minuten ($2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ FGF) und 574 Minuten ($4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ FGF) 1 ppm überschritten, bevor die erste gelbe LED-Warnung der SENSOflurane™-Füllstandsanzeige erschien. Zum Zeitpunkt (3204 min bei $1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ FGF, 1408 min bei $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ FGF und 660 min bei $4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ FGF) der ersten gelben LED-Warnung lagen die Konzentrationen bei 746 ppm , 1067 ppm bzw. 1365 ppm . Die Versuchsergebnisse sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Tab. 2: Versuchsergebnisse

Nr.	Zeit bis zum ersten Nachweis von Sevofluran* (min)	Zeit bis zur gelben LED-Warnung (min)	Sevoflurankonzentration bei gelber LED-Warnung (ppm)
1	46	64	2210
2	3080	3204	746
3	1298	1408	1067
4	574	660	1365

* Schwellwert: 1 ppm

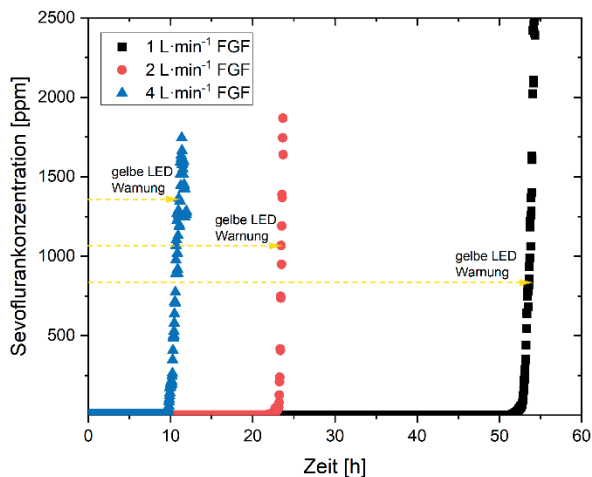


Abb. 3: Sevofluran-Konzentrationen über die Zeit für verschiedene FGF ($1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ schwarz, $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ rot, $4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ blau), gemessen am Auslass des Narkosegasabsorbers.

Zusammenfassung

In dieser Studie blieb die Sevofluran-Konzentration (gemessen direkt am Auslass der Narkosegasabsorberkartuschen) bis in den ppb-Bereich hinein nicht nachweisbar, solange die Kartuschen nicht gesättigt waren, selbst nicht während des Stresstests (Versuch 1), bei dem eine klinisch unrealistisch hohe Sevoflurankonzentration und ein maximaler FGF gewählt wurden. Sobald sich die Absorberkartuschen jedoch der Sättigung näherten, war eine steigende Sevoflurankonzentration nachweisbar, was von der SENSOflurane™-Füllstandsanzeige auch korrekt angezeigt wurde (gelbe und später rote LED-Warnung). Unter klinischen Bedingungen (Versuche 2-4) ist bereits eine steigende Sevoflurankonzentration vor der ersten gelben LED-Warnung messbar.

Auch nach 15 Minuten Betrieb bei roter LED-Warnung (Versuch 1) erreichte die Raumkontamination von Sevofluran (Arbeitsplatzkontamination) nur einen Wert im unteren ppm-Bereich. Daraus kann gefolgert werden, dass der Betrieb mit dem Narkoseabgasabsorber nicht zu einer relevanten Kontamination der Umgebung führt. Anzumerken ist, dass die Tests auf relativ engem Raum im OP-Trakt durchgeführt wurden. Dennoch blieben die Konzentrationswerte innerhalb des Bereichs, der in früheren Studien beobachtet wurde, wie eine kürzlich erschienene Übersicht über die Exposition von flüchtigen Anästhetika in Krankenhäusern zeigt [39]. Es ist zu berücksichtigen, dass die Sevoflurankonzentration in der Raumluft durch das Raumvolumen und die Luftaustauschrate stark beeinflusst wird und daher in verschiedenen Räumen aufgrund dieser Faktoren deutlich variieren kann.

Danksagung

Die Autoren danken Julia Welker für die technische Unterstützung bei der Studie.

Literatur

- [1] A. T. Kirk, M. Allers, P. Cochems, J. Langejürgen, S. Zimmermann: A compact high resolution ion mobility spectrometer for fast trace gas analysis, *Analyst* 138 (2013), 5200–5207; DOI: 10.1039/c3an00231d
- [2] G. A. Eiceman, Z. Karpas, H. H. Hill: Ion mobility spectrometry, (2013)
- [3] H. Borsdorf, T. Mayer, M. Zarejousheghani, G. A. Eiceman: Recent Developments in Ion Mobility Spectrometry, *Appl. Spectrosc. Rev.* 46 (2011), 472–521; DOI: 10.1080/05704928.2011.582658
- [4] M. Tabrizchi, V. Ilbeigi: Detection of explosives by positive corona discharge ion mobility spectrometry, *J. Hazard. Mater.* 176 (2010), 692–696; DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.11.087
- [5] M. Tam, H. H. Hill: Secondary electrospray ionization-ion mobility spectrometry for explosive vapor detection, *Anal. Chem.* 76 (2004), 2741–2747; DOI: 10.1021/ac0354591
- [6] M. Mäkinen, M. Nousiainen, M. Sillanpää: Ion spectrometric detection technologies for ultra-traces of explosives: a review, *Mass Spectrom Rev* 30 (2011), 940–973; DOI: 10.1002/mas.20308
- [7] A. Ahrens, M. Allers, H. Bock, M. Hitzemann, A. Ficks, S. Zimmermann: Detection of Chemical Warfare Agents with a Miniaturized High-Performance Drift Tube Ion Mobility Spectrometer Using High-Energetic Photons for Ionization, *Anal. Chem.* 94 (2022), 15440–15447; DOI: 10.1021/acs.analchem.2c03422
- [8] M. Maziejuk, J. Puton, M. Szyposzynska, Z. Witkiewicz: Fragmentation of molecular ions in differential mobility spectrometry as a method for identification of chemical warfare agents, *Talanta* 144 (2015), 1201–1206; DOI: 10.1016/j.talanta.2015.07.039
- [9] C. Schaefer, M. Allers, M. Hitzemann, A. Nitschke, T. Kobelt, M. Mörtel, S. Schröder, A. Ficks, S. Zimmermann: Reliable Detection of Chemical Warfare Agents Using High Kinetic Energy Ion Mobility Spectrometry, *Journal of the American Society for Mass Spectrometry* 35 (2024), 2008–2019; DOI: 10.1021/jasms.4c00240
- [10] A. B. Kanu, P. E. Haigh, H. H. Hill: Surface detection of chemical warfare agent simulants and degradation products, *Anal. Chim. Acta* 553 (2005), 148–159; DOI: 10.1016/j.aca.2005.08.012
- [11] J. I. Baumbach: Ion mobility spectrometry coupled with multi-capillary columns for metabolic profiling of human breath, *Journal of breath research* 3 (2009), 34001; DOI: 10.1088/1752-7155/3/3/034001
- [12] V. Ruzsanyi: Ion mobility spectrometry for pharmacokinetic studies—exemplary application, *Journal of breath research* 7 (2013), 46008; DOI: 10.1088/1752-7155/7/4/046008
- [13] M. Westhoff, P. Litterst, S. Maddula, B. Bödeker, S. Rahmann, A. N. Davies, J. I. Baumbach: Differentiation of chronic obstructive pulmonary disease (COPD) including lung cancer from healthy control group by breath analysis using ion mobility spectrometry, *Int. J. Ion Mobility Spectrom.* 13 (2010), 131–139; DOI: 10.1007/s12127-010-0049-2
- [14] M. J. Aliaño-González, M. Ferreira-González, E. Espada-Bellido, M. Palma, G. F. Barbero: A Screening Method Based on Headspace-Ion Mobility Spectrometry to Identify Adulterated Honey, *Sensors* 19 (2019); DOI: 10.3390/s19071621

- [15] M. Beneito-Cambra, P. Pérez-Ortega, A. Molina-Díaz, J. F. García-Reyes: Rapid determination of multiclass fungicides in wine by low-temperature plasma (LTP) ambient ionization mass spectrometry, *Anal. Methods* 7 (2015), 7345–7351; DOI: 10.1039/C5AY00810G
- [16] N. Gerhardt, M. Birkenmeier, D. Sanders, S. Rohn, P. Weller: Resolution-optimized headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS) for non-targeted olive oil profiling, *Anal. Bioanal. Chem.* 409 (2017), 3933–3942; DOI: 10.1007/s00216-017-0338-2
- [17] A. Nitschke, M. Hitzemann, J. Winkelholz, T. Kobelt, C. Thoben, M. Lippmann, L. Stolpe, H. Plinke, S. Zimmermann: Ultra-fast polarity switching GC-IMS for the analysis of volatiles in biogas, *Renewable Energy* 231 (2024), 120941; DOI: 10.1016/j.renene.2024.120941
- [18] S. Heiderich, C. Thoben, N. Dennhardt, W. Koppert, T. Krauß, R. Sümpelmann, S. Zimmermann, W. Klingler: Low anaesthetic waste gas concentrations in post-anaesthesia care unit: A prospective observational study, *European journal of anaesthesiology* 35 (2018), 534–538; DOI: 10.1097/EJA.0000000000000785
- [19] N. Kunze, C. Weigel, W. Vautz, K. Schwerdtfeger, M. Jünger, M. Quintel, T. Perl: Multi-capillary column-ion mobility spectrometry (MCC-IMS) as a new method for the quantification of occupational exposure to sevoflurane in anaesthesia workplaces, *J Occup Med Toxicol* 10 (2015), 12; DOI: 10.1186/s12995-015-0056-7
- [20] L. M. Müller-Wirtz, C. Godsch, D. I. Sessler, T. Volk, S. Kreuer, T. Hüppe: Residual volatile anesthetics after workstation preparation and activated charcoal filtration, *Acta anaesthesiologica Scandinavica* 64 (2020), 759–765; DOI: 10.1111/aas.13571
- [21] C. Thoben, N. Dennhardt, T. Krauß, R. Sümpelmann, S. Zimmermann, H. Ruffert, S. Heiderich: Preparation of anaesthesia workstation for trigger-free anaesthesia, *European journal of anaesthesiology* 36 (2019), 851–856; DOI: 10.1097/EJA.0000000000001086
- [22] S. Heiderich, C. Thoben, N. Dennhardt, T. Krauß, R. Sümpelmann, S. Zimmermann, M. Reitz, H. Ruffert: Preparation of Dräger Atlan A350 and General Electric Healthcare Carestation 650 anesthesia workstations for malignant hyperthermia susceptible patients, *BMC anaesthesiology* 21 (2021), 315; DOI: 10.1186/s12871-021-01533-0
- [23] S. Zumsande, C. Thoben, N. Dennhardt, T. Krauß, R. Sümpelmann, S. Zimmermann, H. Ruffert, S. Heiderich: Rebounds of sevoflurane concentration during simulated trigger-free pediatric and adult anesthesia, *BMC Anesthesiol* 23 (2023); DOI: 10.1186/s12871-023-02148-3
- [24] Health Care Without Harm: Health care climate footprint report | Health Care Without Harm (Global). <https://global.noharm.org/focus/climate/health-care-climate-footprint-report>. 10.11.2024
- [25] E. I. Eger: New Inhaled Anesthetics, *International Anesthesiology Clinics* 33 (1995), 61
- [26] E. D. Kharasch, A. S. Armstrong, K. Gunn, A. Artru, K. Cox, M. D. Karol: Clinical sevoflurane metabolism and disposition. II. The role of cytochrome P450 2E1 in fluoride and hexafluoroisopropanol formation, *Anesthesiology* 82 (1995), 1379–1388; DOI: 10.1097/00000542-199506000-00009
- [27] R. L. Carpenter, E. I. Eger, B. H. Johnson, J. D. Unadkat, L. B. Sheiner: The extent of metabolism of inhaled anesthetics in humans, *Anesthesiology* 65 (1986), 201–205; DOI: 10.1097/00000542-198608000-00013
- [28] I.-M. Kochendörfer, P. Kienbaum, W. Großart, R. Rossaint, S. Snyder-Ramos, L. Grüßer: Umweltfreundliche Absorption von Narkosegasen : Erste Erfahrungen mit einem kommerziellen Narkosegasabsorbersystem, *Anaesthesiologie* 71 (2022), 824–833; DOI: 10.1007/s00101-022-01210-y
- [29] M. P. Sulbaek Andersen, O. J. Nielsen, J. D. Sherman: Assessing the potential climate impact of anaesthetic gases, *The Lancet Planetary Health* 7 (2023), e622–e629; DOI: 10.1016/S2542-5196(23)00084-0
- [30] M. R. Allen, J. S. Fuglestedt, K. P. Shine, A. Reisinger, R. T. Pierrehumbert, P. M. Forster: New use of global warming potentials to compare cumulative and short-lived climate pollutants, *Nature Clim Change* 6 (2016), 773–776; DOI: 10.1038/nclimate2998
- [31] P. Balcombe, J. F. Speirs, N. P. Brandon, A. D. Hawkes: Methane emissions: choosing the right climate metric and time horizon, *Environmental science. Processes & impacts* 20 (2018), 1323–1339; DOI: 10.1039/C8EM00414E
- [32] W. J. Collins, D. J. Frame, J. S. Fuglestedt, K. P. Shine: Stable climate metrics for emissions of short and long-lived species—combining steps and pulses, *Environ. Res. Lett.* 15 (2020), 24018; DOI: 10.1088/1748-9326/ab6039
- [33] M. P. Sulbaek Andersen, O. J. Nielsen, B. Karpichev, T. J. Wallington, S. P. Sander: Atmospheric chemistry of isoflurane, desflurane, and sevoflurane: kinetics and mechanisms of reactions with chlorine atoms and OH radicals and global warming potentials, *The journal of physical chemistry. A* 116 (2012), 5806–5820; DOI: 10.1021/jp2077598
- [34] S. M. Smith, J. A. Lowe, N. H. A. Bowerman, L. K. Gohar, C. Huntingford, M. R. Allen: Equivalence of greenhouse-gas emissions for peak temperature limits, *Nature Clim Change* 2 (2012), 535–538; DOI: 10.1038/nclimate1496
- [35] J. M. Slingo, M. E. Slingo: The science of climate change and the effect of anaesthetic gas emissions: a reply, *Anaesthesia* 79 (2024), 553–555; DOI: 10.1111/anae.16268
- [36] X. Hu, J. T. Pierce, T. Taylor, K. Morrissey: The carbon footprint of general anaesthetics: A case study in the UK, *Resources, Conservation and Recycling* 167 (2021), 105411; DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105411
- [37] M. Hitzemann, A. T. Kirk, M. Lippmann, A. Bohnhorst, S. Zimmermann: Miniaturized Drift Tube Ion Mobility Spectrometer with Ultra-Fast Polarity Switching, *Anal. Chem.* 94 (2022), 777–786; DOI: 10.1021/acs.analchem.1c03268
- [38] J. A. Ruzicka, J. C. Hidalgo, J. H. Tinker, M. T. Baker: Inhibition of volatile sevoflurane degradation product formation in an anesthesia circuit by a reduction in soda lime temperature, *Anesthesiology* 81 (1994), 238–244; DOI: 10.1097/00000542-199407000-00030
- [39] M. Keller, A. Cattaneo, A. Spinazzè, L. Carrozzo, D. Campagnolo, S. Rovelli, F. Borghi, G. Fanti, S. Fustinoni, M. Carrieri, A. Moretto, D. M. Cavallo: Occupational Exposure to Halogenated Anaesthetic Gases in Hospitals: A Systematic Review of Methods and Techniques to Assess Air Concentration Levels, *International journal of environmental research and public health* 20 (2023), 514; DOI: 10.3390/ijerph20010514