

Einfluss der Anästhesiegase auf den Klimawandel

The impact of anaesthetic gases on climate change

S. Müller · H. Wulf



www.ai-online.info

► **Zitierweise:** Müller S, Wulf H: Einfluss der Anästhesiegase auf den Klimawandel. *Anästh Intensivmed* 2023;64:418–427. DOI: 10.19224/ai2023.418

Zusammenfassung

Der menschengemachte Klimawandel ist eine große Bedrohung für die globale Gesundheit. Auch wir Anästhesistinnen und Anästhesisten stehen in der Verantwortung, Maßnahmen zu ergreifen, um die globale Erderwärmung zu begrenzen. Der Gesundheitssektor ist ein relevanter Emittent von Treibhausgasen. Die Narkosegase Isofluran, Desfluran und Sevofluran gehören zur Gruppe der Fluorchlorkohlenwasserstoffe bzw. der Fluorkohlenwasserstoffe und werden genauso wie das Lachgas zu diesen Treibhausgasen gezählt. Insbesondere das Narkosegas Desfluran hat ausgeprägte negative Effekte auf das Klima.

Mit dem bevorzugten Einsatz des weniger schädlichen Sevoflurans kann die Klimabilanz einer Narkose deutlich verbessert werden. Zur Reduktion des Narkosegasverbrauchs sollte der Frischgasfluss so niedrig wie möglich gehalten werden. Total intravenöse Anästhesien mit Propofol bzw. Regionalanästhesieverfahren können zudem die Treibhausgasemissionen reduzieren. Narkosegasabsorbersysteme sollten erwogen werden.

Summary

Climate change is a major threat to global health. We anaesthesiologists also have a responsibility to take action to limit global warming. The healthcare sector is a relevant emitter of greenhouse gases. The anaesthetic gases isoflurane, desflurane and sevoflurane belong to

the group of chlorofluorocarbons or fluorocarbons and are counted among these greenhouse gases, just like nitrous oxide. The inhalation anaesthetic desflurane, in particular, has pronounced negative effects on the climate.

With the preferred use of the less harmful sevoflurane, the carbon footprint can be significantly improved. To reduce anaesthetic gas consumption, the fresh gas flow should be kept as low as possible. Total intravenous anaesthesia with propofol or regional anaesthesia can also reduce greenhouse gas emissions. Vapour capture technology should be considered.

Einleitung

Der menschengemachte Klimawandel stellt uns alle vor eine sehr große Aufgabe. Das Pariser Abkommen aus dem Jahr 2015, das von 195 Staaten verabschiedet wurde, sieht vor, die globale Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter zu begrenzen. Außerdem sollen Anstrengungen unternommen werden, den Temperaturanstieg möglichst auf 1,5 °C zu beschränken. Zum Erreichen dieses 1,5-Grad-Ziels ist es erforderlich, den Ausstoß von Treibhausgasen bis zum Jahr 2030 deutlich zu senken und bis zum Jahr 2050 auf netto Null zu reduzieren [1]. Wird dieses Ziel nicht erreicht, so drohen eine globale Erderwärmung mit vermehrten Extremwetterereignissen, ein Anstieg des Meeresspiegels, Zerstörung von Wohnraum, Verlust der

Klinik für Anästhesie und Intensivtherapie, Universitätsklinikum Gießen und Marburg, Standort Marburg
(Direktor: Prof. Dr. H. Wulf)

Interessenkonflikt

Die Autorinnen und Autoren geben an, dass keine Interessenkonflikte bestehen.

Schlüsselwörter

Inhalation Anesthetics – Sevoflurane – Desflurane – Climate Change – Carbon Footprint

Keywords

Inhalation Anaesthetics – Sevoflurane – Desflurane – Climate Change – Carbon Footprint

Biodiversität, eine Krise der globalen Gesundheit, Wasserknappheit, Hungersnöte, Massenmigration sowie eine geopolitische Destabilisierung [2,3]. Ab einer Erderwärmung von über 1,5°C steigt das Risiko, sogenannte Kippunkte (z. B. Auftauen der Permafrostböden, Schmelzen von großen Eismassen) zu überschreiten, deutlich [3].

Die Weltgesundheitsorganisation bezeichnet den Klimawandel als die größte Bedrohung für die globale Gesundheit und rechnet mit zusätzlich 250.000 Toten jährlich in Folge der Erderwärmung [4]. Es wird geschätzt, dass weltweit 150.000 Todesfälle pro Jahr auf Hitzewellen durch den Klimawandel zurückgeführt werden können [3]. Für Deutschland beträgt diese Zahl ca. 1.200 Tote pro Jahr.

Nicht zuletzt durch das Positionspapier unserer Fachgesellschaften zur ökologischen Nachhaltigkeit in der Anäs-

thesiologie und Intensivmedizin wird unsere besondere Verantwortung als Anästhesistinnen und Anästhesisten zur Begrenzung der globalen Erderwärmung deutlich [5]. In dieser selektiven Literaturübersicht soll betrachtet werden, welche Effekte Narkosegase auf das globale Klima ausüben und welche Strategien es gibt, die klimaschädliche Wirkung der Narkosegase zu begrenzen.

Treibhausgase und Treibhauseffekt

Ursächlich für die globale Erderwärmung ist die gesteigerte Emission von sogenannten Treibhausgasen und deren erhöhte Konzentration in der Atmosphäre [1]. Zu den Treibhausgasen zählen Kohlenstoffdioxid, Methan, Lachgas sowie die fluorierten Treibhausgase.

Für die Strahlung des Sonnenlichts ist die Erdatmosphäre weitestgehend transparent. Für die Wärmestrahlung der Erde

ist die Atmosphäre weniger durchlässig – und zwar umso weniger, je mehr Treibhausgase sich in der Atmosphäre befinden. Die Differenz zwischen eingehender und abgehender Strahlung wird Strahlungsantrieb genannt [6]. Die erhöhte Konzentration von Treibhausgasen führt durch Veränderung des Strahlungsantriebs zu einer globalen Erderwärmung – dem sogenannten Treibhauseffekt [7]. Das Ausmaß des Treibhauseffekts eines Gases wird bestimmt durch dessen atmosphärische Lebensdauer, die Fähigkeit zur Absorption von Wärmestrahlung und das Vorkommen von natürlichen Stoffen, die Wärmestrahlung im gleichen Wellenlängenbereich absorbieren [8].

Im Montreal-Protokoll aus dem Jahr 1987 wurde zum Schutz der Ozonschicht beschlossen, den Verbrauch von Fluorchlorkohlenwasserstoffen zu reduzieren. Dies hatte eine vermehrte Verwendung von Fluorkohlenwasserstoffen, die keine ozonschädigende Wirkung aufweisen,

jedoch potente Treibhausgase sind, zur Folge. Ein Änderungsprotokoll aus dem Jahr 2016 führte zu einem weitestgehenden Verzicht auf Fluorkohlenwasserstoffe. Narkosegase wurden von diesen Beschlüssen ausgenommen [8].

Narkosegase und Treibhauseffekt

Weltweit verursacht der Gesundheitssektor 4,4–4,6 % der Treibhausgasemissionen [9]. In westlichen Ländern liegt dieser Anteil höher und wird mit ca. 5–10 % aller Treibhausgasemissionen angegeben [1]. In den USA beispielsweise beträgt er 10 % [10]. Die Nichtregierungsorganisation Health Care Without Harm gibt in ihrem Bericht aus dem Jahr 2019 für das Gesundheitssystem in Deutschland einen Anteil von 5,2 % an den nationalen Treibhausgasemissionen an [11]. Dies entspricht einem jährlichen Ausstoß von 58 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent.

Anästhesiegase gelangen aufgrund der geringen Metabolisierungsrate und zu meist fehlender Filtersysteme nahezu vollständig und unverändert in die Atmosphäre [4]. Dort können sie als Treibhausgase Effekte auf die globale Erderwärmung ausüben. Wieviel Narkosegas national und international verbraucht und ausgestoßen wird und welche Folgen dies auf den globalen Treibhauseffekt hat, wird nicht standardisiert und nur ungenau erhoben bzw. geschätzt. In Großbritannien können 5 % der Gesamtemissionen durch Krankenhäuser auf Narkosegase zurückgeführt werden [2]. Laut Health Care Without Harm sind die Narkosegase (inklusive Lachgas) verantwortlich für mindestens 0,6 % der globalen Treibhausgasemissionen des Gesundheitssektors [11]. In den USA werden 0,1 % der nationalen Treibhausgasemissionen bzw. 1 % derer des Gesundheitssektors durch die Freisetzung von Narkosegasen verursacht [4].

Die volatilen Anästhetika Isofluran, Desfluran und Sevofluran zählen zu den halogenierten Kohlenwasserstoffen [12]. Isofluran ist ein chlorierter und fluorierter Methyläthyläther – und gehört somit zur Gruppe der Fluorchlorkohlen-

wasserstoffe [8,12]. Bei Desfluran wurde das Chloratom des Isoflurans durch Fluor ersetzt. Desfluran ist folglich ein fluorierter Methyläthyläther. Genauso wie Desfluran enthält Sevofluran kein Chlor. Sevofluran ist ein mit 3 Fluoratomen fluorierter Methylpropyläther [12]. Desfluran und Sevofluran werden zur Gruppe der Fluorkohlenwasserstoffe gezählt [8].

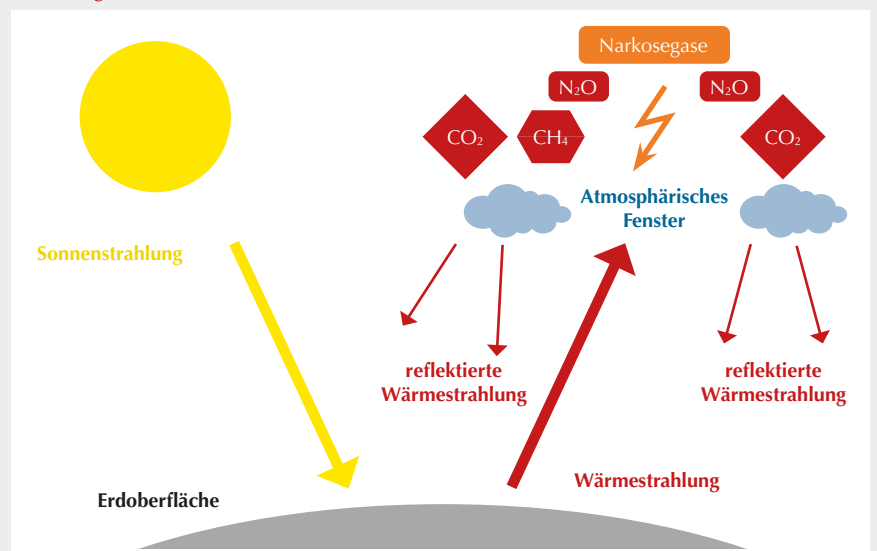
Als Fluorchlorkohlenwasserstoffe bzw. Fluorkohlenwasserstoffe zählen die volatilen Anästhetika Isofluran, Sevofluran und Desfluran zu den fluorierten Treibhausgasen [7]. Die Treibhauseffekte der volatilen Anästhetika sind insbesondere darauf zurückzuführen, dass diese Wärmestrahlung im sogenannten atmosphärischen Fenster absorbieren (Abb. 1). Das atmosphärische Fenster bezeichnet einen Wellenlängenbereich, in dem die Atmosphäre in besonderem Maße durchlässig für Strahlung ist [8].

Die Auswirkung eines Gases auf den Treibhauseffekt wird mit dem Global Warming Potential (GWP) beschrieben. Das GWP eines Treibhausgases entspricht der Masse an Kohlenstoffdioxid mit dem gleichen Effekt auf das Gleichgewicht der Strahlungsenergie der Erde über eine bestimmte Dauer [13]. Bei der

Bestimmung des GWP für die Narkosegase kommen verschiedene Autoren zu unterschiedlichen Ergebnissen [14–16]. Grund hierfür sind verschiedene Ausgangsdaten und Berechnungsmethoden [14]. In dieser Übersichtsarbeit beziehen wir uns auf die Daten aus einer Arbeit von Andersen et al. (Tab. 1) [16]. Insbesondere Desfluran weist ausgeprägte Treibhauseffekte auf. Das GWP₂₀ von Desfluran beträgt 6.810. 1 kg Desfluran hat folglich über einen Zeitraum von 20 Jahren die gleichen Auswirkungen wie 6.810 kg Kohlenstoffdioxid. Aufgrund einer atmosphärischen Lebensdauer von 14 Jahren ist das GWP₁₀₀ niedriger und liegt für Desfluran bei 2.540. Die Effekte von Sevofluran auf die Erderwärmung sind deutlich geringer. Für das GWP₂₀ von Sevofluran wird ein Wert von 440 angegeben. Aufgrund der vergleichsweise kurzen atmosphärischen Lebensdauer von 1,1 Jahren sind auch die langfristigen Treibhauseffekte von Sevofluran weniger stark ausgeprägt (GWP₁₀₀ beträgt 130). Eine Übersicht über die GWP der verschiedenen Anästhesiegase zeigt Tabelle 1.

Eine eigene Gruppe unter den Treibhausgasen bildet das Lachgas [1]. Es entfaltet seine enormen Treibhauseffekte

Abbildung 1



Schematische Darstellung des Treibhauseffekts. Insbesondere dargestellt ist das sogenannte atmosphärische Fenster, in dem volatile Anästhetika Strahlung absorbieren.

Tabelle 1

Atmosphärische Verweildauer und Global Warming Potential der Narkosegase [16].

	Atmosphärische Verweildauer (Jahre)	GWP20	GWP100	GWP500	Ozon-schädigend
Isofluran	3,2	1.800	510	160	X
Sevofluran	1,1	440	130	40	
Desfluran	14	6.810	2.540	130	
Lachgas	114	289	298	153	X

GWP: Global Warming Potential.

hauptsächlich durch seine lange atmosphärische Lebensdauer [8]. Zusätzlich zu den beschriebenen Treibhauseffekten führen Lachgas und die chlorierten bzw. bromierten Narkosegase Isofluran und Halothan in der Atmosphäre zu einem Abbau der Ozonschicht [4]. Sevofluran und Desfluran enthalten weder Chlor- noch Bromatome und weisen daher keine ozonschädigende Wirkung auf [4]. Unter Verwendung des GWP100 entspricht der Inhalt einer Flasche Desfluran (240 ml) 886 kg Kohlenstoffdioxid; der Inhalt einer Flasche Sevofluran (250 ml) 49 kg Kohlenstoffdioxid [6]. Aufgrund der geringeren anästhetischen Potenz kommt hinzu, dass der Verbrauch von Desfluran pro Anästhesieminute etwa dreifach höher ist als der von Sevofluran (MAC50 von Desfluran 6,0 Vol.-%, von Sevofluran 2,04 Vol.-%) [17].

In Australien machte Desfluran in 2014 einen Anteil von 21 % an allen eingekauften Narkosegasen aus [4]. Allerdings war Desfluran für 81 % der Treibhausgasemissionen aller Narkosegase verantwortlich. [4] In Deutschland wurde im Jahr 2012 bevorzugt Sevofluran mit einem Anteil von 55 % eingesetzt [1]. Desfluran und Isofluran wurden bei 35 % bzw. 10 % der mit Anästhesiegasen geführten Narkosen verwendet.

Der jährliche Verbrauch an Narkosegasen weltweit wird mit ca. 12,5 Mio. Flaschen angegeben mit folgender Verteilung: 70 % Sevofluran, 20 % Desfluran und 10 % Isofluran [2]. Dies entspricht einem CO₂-Äquivalent von ca. 5 Mio. t CO₂ und somit einem Anteil von ca. 0,01 % an den globalen CO₂-Emissionen [2]. In Luftproben an verschiedenen

Orten weltweit konnten von 2000 bis 2014 steigende Konzentrationen von Isofluran, Desfluran und Sevofluran gemessen werden [18]. Aus diesen Daten wurden in einem Top-down-Modell die globalen Emissionen der Narkosegase bestimmt. Diese Berechnungen ergaben, dass die Emissionen von Isofluran, Desfluran und Sevofluran im Beobachtungszeitraum anstiegen. Nimmt man das GWP100 als Grundlage, entspricht dies in 2014 einem CO₂-Äquivalent von 3,1 ± 0,6 Millionen t CO₂. Hiervon sind ca. 80 % zurückzuführen auf Desfluran. Nebenbei ist anzumerken, dass im Untersuchungszeitraum die atmosphärische Halothankonzentration sank. Dies ist bedingt durch einen abnehmenden Verbrauch und zeigt, dass ein veränderter Einsatz von Narkosegasen Auswirkungen auf die Atmosphäre haben kann. Aus einer groben Hochrechnung, in der die Verbrauchszahlen der Universitätsklinik

Michigan (jährlicher Verbrauch in Michigan: 1081 l Isofluran, 6 l Desfluran, 505 l Sevofluran) zugrunde gelegt wurden, resultierte eine globale Emission von Narkosegasen entsprechend einem CO₂-Äquivalent von ca. 4,4 Mio t CO₂ [7].

Möchte man die klimaschädlichen Effekte der Narkosegase in der klinischen Anwendung vergleichbar machen, so ist es sinnvoll, das CO₂-Äquivalent einer Narkose zu betrachten. Hierzu berechnet man die Masse eines Narkosegases, die zur Aufrechterhaltung einer Narkose mit 1 MAC für die Dauer von einer Stunde (entsprechend einer MAC-Stunde) bei Verwendung eines bestimmten Frischgasflusses notwendig ist. Multipliziert man diese Masse mit dem GWP des Narkosegases, so erhält man das entsprechende CO₂-Äquivalent (CDE) (Tab. 2) [19].

In 2 Lebenszeitanalysen unter Beachtung von Herstellung, Transport, Applikation sowie Entsorgung bzw. Ausstoß in die Atmosphäre konnten bei der Verwendung von Desfluran deutlich höhere Treibhausgasemissionen im Vergleich zu Sevofluran bzw. Isofluran bestimmt werden [20,21]. Die errechneten Emissionen beim Einsatz von Propofol (1 MAC-Äquivalent) waren deutlich geringer (bis nahezu 10.000-fach) als diejenigen bei Verwendung von Desfluran. Auch im Vergleich zu Sevofluran war der CO₂-Fußabdruck von Propofol zumeist

Tabelle 2

Narkosegasverbrauch und CDE20 pro MAC-Stunde [19]. Ergänzt um eigene Berechnungen für einen Frischgasfluss von 1 l/min nach [14,19].

	Frischgasfluss	Verbrauch (g/h)	CDE20 (g/h)
Sevofluran	0,5 l/min	5	2.200
Sevofluran	1 l/min	10	4.400
Sevofluran	2 l/min	20	8.800
Isofluran	0,5 l/min	2,8	5.000
Isofluran	1 l/min	5,6	10.000
Isofluran	2 l/min	11,1	20.000
Desfluran	0,5 l/min	12,6	85.800
Desfluran	1 l/min	25,2	171.600
Desfluran	2 l/min	50,4	343.200

CDE: CO₂-Äquivalent; MAC: Minimale alveoläre Konzentration.

geringer. Wurde ein Narkosegasfiltersystem benutzt und das wiedergewonnene Sevofluran verwendet, so hatte Sevofluran die gleiche Treibhausbilanz wie Propofol [21]. Nimmt man die direkten Treibhauseffekte der Narkosegase in der Atmosphäre aus, so verursacht der Stromverbrauch für die Beheizung des Desfluranvapors einen relevanten Anteil der Treibhausgasemissionen. Weiterhin zeigen beide Studien, dass die Verwendung von Narkosegasen in einem Lachgas-Sauerstoff-Gemisch zu deutlich höheren Treibhausgasemissionen führt als in einem Luft-Sauerstoff-Gemisch.

An 3 Krankenhäusern aus Nordamerika sowie Großbritannien wurden die Treibhausgasemissionen der jeweiligen OP-Bereiche untersucht [22]. In den beiden nordamerikanischen Kliniken waren Narkosegase für 63 % bzw. 51 % der Gesamtemissionen der OP-Bereiche verantwortlich (2.034.277 kg CO₂-Äquivalent pro Jahr bzw. 2.129.841 kg CO₂-Äquivalent pro Jahr). In der britischen Klinik machten Narkosegase trotz mehr Anästhesieleistungen (30.000 Leistungen pro Jahr gegenüber 18.000–20.000 Leistungen pro Jahr) lediglich 4 % der Gesamtemissionen des dortigen OP-Bereichs aus (211.212 kg CO₂-Äquivalent pro Jahr). Dieser Sachverhalt klärt sich beim Betrachten der Verbrauchszahlen der Narkosegase auf: Die Kliniken in Nordamerika setzen neben Isofluran und Sevofluran bevorzugt Desfluran ein (535,7 l pro Jahr bzw. 532,8 l pro Jahr Desfluran); in der britische Klinik findet Desfluran keine Verwendung. Über den Anteil an Regionalanästhesieverfahren bzw. den Einsatz einer TIVA gaben die Autoren keine Auskunft.

An einem Krankenhaus der erweiterten Grund- und Regelversorgung in Deutschland konnte gezeigt werden, dass die eingeschränkte Verwendung von Desfluran zu einem deutlich geringeren Ausstoß von Treibhausgasen führen kann [3]. Im Vergleichsjahr, in dem Desfluran und Sevofluran gleichberechtigt eingesetzt wurden, ermittelten die Autoren einen Verbrauch von 77,8 l Desfluran und 82,5 l Sevofluran. Im Folgejahr konnte der Verbrauch von Desfluran auf 4,3 l

reduziert werden. Entsprechend erhöhte sich der Verbrauch von Sevofluran auf 105 l. Dies führte zu einer Reduktion der Gesamtemission um 68 % der entsprechenden Anästhesieabteilung. Der Anteil der Narkosegase an den Gesamtemissionen konnte von 77 % auf 28,5 % gesenkt werden.

Strategien zur Reduktion der klimaschädlichen Wirkungen der Inhalationsanästhetika

Wie zuvor ausführlich beschrieben können mit der Verwendung von Sevofluran – insbesondere anstelle von Desfluran – die Auswirkungen einer Inhalationsanästhesie auf den Treibhauseffekt um ein Vielfaches reduziert werden. Dementsprechend empfiehlt die Kommission „Nachhaltigkeit in der Anästhesiologie“ von DGAI und BDA, den Einsatz von Desfluran auf solche Situationen zu beschränken, in denen dieser medizinisch dringend indiziert ist (Abb. 2) [5].

Weiterhin können durch den Verzicht auf Lachgas negative Folgen sowohl für den Klimawandel als auch für die Ozonschicht vermieden werden. Insbesondere in Kombination mit Isofluran oder Sevofluran verschlechtert Lachgas die Klimabilanz einer Inhalationsanästhesie deutlich [14].

Nicht nur die Wahl des Anästhesiegases hat einen Einfluss auf das Klima – auch die Höhe des Frischgasflusses entschei-

det über die Treibhauseffekte einer Inhalationsanästhesie. Die Menge des verbrauchten Anästhesiegases ist proportional zur Höhe des Frischgasflusses [14]. So führt beispielsweise die Reduzierung des Frischgasflusses von 1 l/min auf 0,5 l/min zu einer Halbierung des verbrauchten Anästhesiegases (bei gleicher Einstellung am Vapor). Wird am Vapor eine höhere Narkosegaskonzentration eingestellt, um bei niedrigerem Frischgasfluss die gleiche alveoläre Konzentration zu erzielen, so führt auch dies zu einem geringeren Narkosegasverbrauch [23]. Sind rasche Änderungen der Narkosetiefe notwendig, so lässt sich ein höherer Frischgasfluss kaum vermeiden. Jedoch sollte beachtet werden, dass – sofern die inspiratorisch gemessene Gaskonzentration der am Vapor eingestellten Konzentration entspricht – jede weitere Steigerung des Frischgasflusses zu keiner weiteren Veränderung der Narkosetiefe führen kann [23]. Bei der Narkoseausleitung wird die aufmerksame Anästhesistin bei niedrigem Frischgasfluss den Vapor frühzeitig abdrehen, um die PatientIn punktgenau zum Ende der Operation erwachen zu lassen. Sollten zur Ausleitung höhere Frischgasflüsse notwendig sein, so sollte dies nur bei verschlossenem Vapor erfolgen [5]. Nicht unerwähnt bleiben soll, dass es bei der Reaktion von Sevofluran mit Atemkalk zur Bildung von potenziell nephrotoxischem Compound A kommen kann, was in der Vergangenheit zu einem eingeschränkten Einsatz von Sevofluran bei Niedrigflussnarkosen führte. Diese Vorgabe gilt als überholt. Eine relevante Bildung von Compound A kann insbesondere bei der Verwendung von Kalziumchlorid-haltigem Atemkalk ausgeschlossen werden. Die Anwendung von Sevofluran mit minimalem Frischgasfluss wird heutzutage als sicher erachtet und kann diesbezüglich ohne Einschränkungen durchgeführt werden [24].

Auch eine automatische Steuerung der endtidalen Narkosegaskonzentration sowie die Verwendung eines Narkosetiefemonitorings können dabei helfen, den Verbrauch zu reduzieren [4,25,26].

Abbildung 2

Desfluran nur in Situationen verwenden, in denen es medizinisch dringend erforderlich ist

Lachgas vermeiden

Frischgasfluss so niedrig wie möglich halten

Narkosetiefemonitoring anwenden

Automatische Steuerung der endtidalen Narkosegaskonzentration einsetzen

Auffangsysteme erwägen

Prinzipien zum klimaschonenden Einsatz von Inhalationsanästhetika.

Eine weitere Möglichkeit, den Ausstoß von Narkosegasen in die Umwelt zu reduzieren, ist der Einsatz von Narkosegasabsorbersystemen [27]. In Deutschland steht seit 2011 ein solches System zur Verfügung (CONTRAfluran, ZeoSys Medical GmbH, Luckenwalde, Deutschland). Es wurde zunächst im Rahmen inhalativ geführter Sedierungen in der Intensivmedizin verwendet und wird seit 2020 in der Anästhesie eingesetzt [28]. Das Filtersystem wird an den Narkosegasausgang des Anästhesiegeräts angeschlossen und kann je nach Ausführung mit bzw. ohne ein Anästhesiegasfortleitungssystem (AGFS) betrieben werden. Es können die Narkosegase Isofluran, Desfluran und Sevofluran absorbiert werden. Ein Auffangen von Lachgas ist mit diesem System nicht möglich. Eine Medikamentenzulassung für das zurückgewonnene Sevofluran besteht seit 2017 [28]. Bisher kann das durch Recycling erzeugte Sevofluran nicht erworben werden [29]. Laut Hersteller konnte der Recyclingprozess begonnen werden und das Produkt soll noch in 2023 erhältlich sein. Eine entsprechende Zulassung für das aufbereitete Desfluran wird angestrebt. Eine Rückgewinnung von 90 % der gebundenen Anästhesiegasen ist möglich [28].

In einer Untersuchung an einer deutschen Universitätsklinik konnte vom verbrauchten, vaporisierten Desfluran nur ein Anteil von 25 % aufbereitet werden [30]. Eine Erklärung für diese niedrige Rate könnte sein, dass ein Großteil der Anästhesiegasen erst nach Extubation abgeatmet wird und somit einem Filtersystem am Anästhesiegerät nicht zugänglich ist [30]. Auch kann eine Leckage während der Beatmung zu Verlusten führen. Zudem wurde in dieser Studie für jede Patientin und jeden Patienten ein separater Aktivkohlefilter genutzt, was so vom Hersteller nicht vorgesehen ist.

Neben der reduzierten Emission von Anästhesiegasen kann die Verwendung eines Filtersystems einen weiteren Vorteil bieten. Wird bei Verwendung eines Narkosegasabsorbers das Anästhesiegerät ohne AGFS betrieben, so kann dies

zu einer bedeutenden Einsparung von Druckluft führen. Die Bereitstellung von Druckluft ist ein energieaufwändiger Prozess mit einem hohen Stromverbrauch. Untersuchungen an der Universitätsklinik Essen beziffern den jährlichen Stromverbrauch pro AGFS-Anschluss auf 11.738 kWh [31]. Dies entspricht einer jährlichen Emission von 5,7 t CO₂-Äquivalent pro AGFS-Anschluss. Zudem kann die Nichtnutzung des AGFS zu enormen Kosteneinsparungen führen [31].

Bei der Verwendung eines Narkosegasabsorbers sind rechtliche Aspekte zu beachten. So ist die Kombination zweier Medizinprodukte wie in diesem Fall (Anästhesiegerät mit Narkosegasabsorber) nicht vom Anästhesiegerätehersteller vorgesehen [28]. Zudem widerspricht der Betrieb eines Anästhesiegeräts mit Anästhesiegasen ohne AGFS und ohne eine entsprechende Betriebsbereitschaftsanzeige der DIN EN ISO 80601-2-13 [29,32]. Weiterhin gelten im Bereich der Arbeitssicherheit die Technischen Regeln für Gefahrstoffe, die eine Verhinderung einer Kontamination am Anästhesiearbeitsplatz zum Ziel haben [28]. Hieraus folgend bedarf die Anwendung des Filtersystems zuvor einer Risikobewertung durch den Anwender. Hier scheint eine nationale Lösung auf Ebene unserer Fachgesellschaft sicherlich sinnvoll zu sein.

Diskussion

Narkosegasen zählen zur Gruppe der Fluor(chlor)kohlenwasserstoffe und haben einen relevanten Einfluss auf die Treibhausgasemissionen des Gesundheitssektors. Das Narkosegas Desfluran weist äußerst klimaschädliche Effekte auf. Verschiedene Strategien, wie Reduzieren des Frischgasflusses, der Einsatz von Absorbersystemen oder Bevorzugen einer TIVA, können die Klimabilanz einer Narkose verbessern.

Der Klimawandel stellt ein allumfassendes Problem für die Menschheit dar. Eine konsequente Reduktion von Treibhausgasemissionen ist im Gesundheitssektor und in allen Lebensbereichen

notwendig. Nur so können die Folgen der globalen Erderwärmung abgemildert werden. Dies erkennt auch der Deutsche Ärztetag an und fordert eine Klimaneutralität im deutschen Gesundheitssektor bis 2030 [33].

Insbesondere mit dem Vermeiden von Desfluran können wir AnästhesistInnen einen positiven Beitrag für das Klima leisten. Entsprechende Forderungen werden auch politisch auf EU-Ebene diskutiert. In einem Entwurf schlägt die EU-Kommission vor, Desfluran ab 2026 als Narkosegas zu verbieten [29,34]. Desfluran soll dann nur noch, so der Vorschlag, verwendet werden dürfen, wenn der Einsatz unbedingt erforderlich ist und andere Anästhetika aus medizinischen Gründen nicht verabreicht werden dürfen. Zudem soll die ausnahmsweise Verwendung begründet werden.

Aufgrund des niedrigeren Blut-Gas-Verteilungskoeffizienten und des daraus resultierenden schnelleren An- und Abflutverhaltens ist zu erwarten, dass Patientinnen und Patienten nach einer Allgemeinanästhesie mit Desfluran (im Vergleich zu Sevofluran) früher erwachen. Tatsächlich konnte wiederholt nachgewiesen werden, dass mit Desfluran die Zeit bis zum Augenöffnen, bis zur Extubation, bis zum Befolgen von Befehlen und bis zur Reorientierung verkürzt werden kann [35–37]. Der Einsatz von Desfluran führt nicht nur zu einer verkürzten Zeit bis zur Extubation, sondern kann auch die Anzahl an verlängerten Extubationen (definiert als eine Dauer > 15 min bis zur Extubation) reduzieren [38]. Des Weiteren normalisieren sich der pH-Wert und der arterielle CO₂-Partialdruck nach einer Narkoseführung mit Desfluran früher [39]. Darüber hinaus können Patientinnen und Patienten früher Wasser trinken, ohne husten zu müssen [40]. Eine Gruppe, die von den pharmakologischen Eigenschaften von Desfluran besonders profitieren könnte, sind sicherlich die krankhaft adipösen Patientinnen und Patienten. In einer Metaanalyse aus dem Jahr 2017 konnte für Patientinnen und Patienten nach bariatrischer Chirurgie gezeigt werden, dass diese bei der Verwendung von

Desfluran im Vergleich zu Sevofluran 3,8 min früher die Augen öffneten und die Zeit bis zur Extubation um 4,97 min verringert werden konnte [41]. Auch war in dieser Untersuchung der Aldrete-Score bei Verlegung in den Aufwachraum in der Desfluran-Gruppe geringgradig höher.

Es ist anzunehmen, dass in Studiensituationen die Verabreichung des Narkosegases zu einem definierten Zeitpunkt (zum Beispiel zum Ende der chirurgischen Maßnahmen) beendet wird [39]. Eine frühere Erholung bei Verwendung von Desfluran erstaunt aufgrund der unterschiedlichen pharmakologischen Eigenschaften nicht sonderlich. In der klinischen Praxis mit einer frühzeitigen Anpassung der Narkosetiefe ist zu erwarten, dass dieser Unterschied zwischen Sevofluran und Desfluran wenig relevant sein wird. Auch ist es möglich, dass das allgemeine anästhesiologische Vorgehen einen größeren Einfluss auf die Erholung hat als alleinig die Entscheidung über das Narkosegas. Weitreichendere Variablen scheinen nicht von der Wahl zwischen Desfluran oder Sevofluran abzuhängen. Ob beispielsweise Patientinnen und Patienten nach einer inhalativen Anästhesie mit Desfluran früher den Aufwachraum verlassen können, ist nicht geklärt [35,36]. Auch die Inzidenz einer postoperativen kognitiven Dysfunktion unterscheidet sich nicht zwischen den beiden Narkosegasen [36].

Hilfreich erscheint der Einsatz eines Narkosetiefemonitorings. Hiermit kann die Zeit bis zum Augenöffnen, bis zur Reorientierung und bis zur Entlassung aus dem Aufwachraum verkürzt werden [26]. Eine angepasste und vorausschauende Narkoseführung sollte dann die pharmakologischen Unterschiede zwischen Desfluran und Sevofluran wettmachen, sodass bei der Verwendung von Sevofluran nicht mit Nachteilen für unsere Patientinnen und Patienten oder mit relevanten Verzögerungen in der OP-Planung zu rechnen ist. In der Debatte um das Für und Wider von Desfluran müssen schlussendlich die negativen globalen Folgen auf das Klima miteinbezogen werden, die bei der Betrachtung

einer einzelnen Patientin oder eines einzelnen Patienten oder des OP-Plans nicht festgestellt werden können.

Weiter drängt sich die Frage auf, ob die direkten atmosphärischen Effekte der Narkosegase durch andere Anästhesieverfahren vermieden werden können. Durch die Verwendung von Propofol im Rahmen einer TIVA können die Treibhausgasemissionen während einer Allgemeinanästhesie deutlich reduziert werden. Dies konnte in 2 Lebenszeitanalysen gezeigt werden [20,21]. In diesen Untersuchungen wurden die Emissionen aller Schritte von Produktion, Transport, Anwendung bis zur Entsorgung zusammengefasst. Solche Berechnungen können Ungenauigkeiten beinhalten und sind abhängig von lokalen Begebenheiten – zum Beispiel der Art der Stromerzeugung. Weitere Untersuchungen, auch aus Deutschland, sind vor diesem Hintergrund notwendig. Auch wenn die Verwendung von Propofol andere umweltbezogene Risiken wie die Wasserverschmutzung birgt, ist zu empfehlen, Propofol – sofern dies medizinisch sinnvoll ist – bevorzugt gegenüber Anästhesiegasen einzusetzen [42]. Wichtig ist hierbei zu erwähnen, dass in Kliniken etwa ein Drittel des Propofols verworfen wird [43]. Dies ist eine unnötige Umweltbelastung und sollte soweit wie möglich vermieden werden. Erzielt werden kann dies beispielsweise durch die Verwendung kleinerer Medikamentenbehältnisse [43]. Auch eine sorgfältige und vorausschauende Planung erscheint hier sinnvoll und kann zum Umweltschutz beitragen. Zu den Vorteilen einer TIVA mit Propofol gehört die geringere Inzidenz von postoperativer Übelkeit und die höhere Patientenzufriedenheit [44]. Auch kann die Gabe von Propofol im Vergleich zu Narkosegasen zu einer kürzeren Liegedauer im Aufwachraum führen [44].

Narkosegasabsorbersysteme stellen eine weitere Möglichkeit dar, die negativen Auswirkungen der Narkosegase zu kontrollieren. Die Ergebnisse von Hinterberg et al., in deren Studie nur 25 % des verbrauchten Desflurans wiedergewonnen werden konnten, stimmen

zunächst pessimistisch [30]. Doch bedeuten diese eben auch 25 % weniger Desfluranausstoß mit entsprechend weniger klimaschädlicher Wirkung. Genau genommen könnte der Anteil des absorbierten Desflurans höher sein, da in der Untersuchung nur das wiedergewonnene Desfluran bestimmt wurde und nicht das aufgefangene. Zwar könnten mit der Verwendung von Desfluran in Kombination mit einem Absorbersystem die meisten Emissionen eingespart werden [30]. Doch ist es unwahrscheinlich, dass mit Desfluran ebenso niedrige Treibhauseffekte wie mit Sevofluran erreicht werden können. Hierzu müssten – aufgrund der niedrigeren Potenz und des größeren Treibhauspotenzials – 98,5 % des Desflurans aufgefangen werden (im Vergleich zu Sevofluran ohne Filter) [45]. Narkosegasabsorbersysteme könnten folglich, wenn Desfluran unbedingt eingesetzt werden müsste, dessen klimaschädliche Effekte abmildern. Eine relevante Rolle können die Filter insbesondere in Kombinationen mit Sevofluran spielen. Unter Verwendung eines Absorbersystems, einem Frischgasfluss von 0,5 l/min und der nachfolgenden Verabreichung des recycelten Sevoflurans kann ein CO₂-Fußabdruck erreicht werden, der dem von Propofol entspricht [21].

Nicht nur im Hinblick auf die Umweltbelastung scheinen Regionalanästhesieverfahren sinnvoll zu sein und werden daher im Positionspapier von DGA und BDA zur Vermeidung einer inhalativen Anästhesie empfohlen [5]. In einer Untersuchung an einer Klinik in Australien wurde der CO₂-Fußabdruck einer Allgemeinanästhesie mit dem einer Spinalanästhesie für die Implantation einer Kniegelenksendoprothese verglichen [46]. Wurde der Eingriff in Narkose durchgeführt (Aufrechterhaltung mit Sevofluran oder Propofol), wurden die CO₂-Emissionen berechnet auf 14,9 kg CO₂-Äquivalent. Wurde eine Spinalanästhesie angelegt, so ergab sich ein CO₂-Fußabdruck von 16,9 kg CO₂-Äquivalent. Dieses Ergebnis ist zunächst erstaunlich, hätte man doch bei einer Spinalanästhesie weniger Emissionen erwartet. Bei genauerer Betrachtung rela-

tiert sich dieser Befund. In der Untersuchung wurden alle Patientinnen und Patienten mit Spinalanästhesie mit Propofol sediert. Dies führte zu einem zusätzlichen Medikamentenverbrauch. Zusätzlich wurde diesen Patientinnen und Patienten Sauerstoff verabreicht (6–10 l/min). Der Sauerstoffverbrauch in der Regionalanästhesie-Gruppe war folglich deutlich höher als der in der Allgemeinanästhesie-Gruppe mit einem entsprechend gesteigerten Energieverbrauch. Weiter war die Anästhesiedauer in der Regionalanästhesiegruppe 39 min länger, was zusätzlich zu einem erhöhten Strom- und Sauerstoffverbrauch führte. Bemerkenswert war zudem, dass die Autoren der Studie ihre Ergebnisse an andere Regionen anpassten. Für die EU (größerer Anteil an Strom aus alternativen Energiequellen, weniger Kohleverstromung als in Australien) ergab sich für die Spinalanästhesie ein CO₂-Fußabdruck von 9,9 kg CO₂-Äquivalent, für die Allgemeinanästhesie einer von 11,9 kg CO₂-Äquivalent – ein Ergebnis, das man eher erwartet hätte.

Diese Übersichtsarbeit zeigt, dass Narkosegase eine Belastung für das Klima darstellen. Zudem wurden verschiedene Strategien und Techniken für eine umweltschonendere Narkose aufgeführt. Nun bleibt es an uns Anästhesistinnen und Anästhesisten, diese zu beherzigen und sie in unsere tägliche Arbeit zu integrieren. So können wir unseren Beitrag zu einem nachhaltigeren Gesundheitssektor leisten.

Abkürzungsverzeichnis

AGFS	Anästhesiegasfortleitungssystem
GWP	Global Warming Potential
CO₂	Kohlenstoffdioxid
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
FKW	Fluorkohlenwasserstoff
CDE	CO ₂ -Äquivalent
MAC	Minimale alveoläre Konzentration
DGAI	Deutsche Gesellschaft für Anästhesie und Intensivmedizin e. V.
BDA	Berufsverband deutscher Anästhesisten e. V.
TIVA	Total intravenöse Anästhesie

Literatur

- Koch S, Pecher S: Neue Herausforderungen für die Anästhesie durch den Klimawandel. *Anaesthesist* 2020;69:453–462
- White SM, Shelton CL: Abandoning inhalational anaesthesia. *Anaesthesia* 2020;75:451–454
- Richter H, Weixler S, Schuster M: Der CO₂-Fußabdruck der Anästhesie. Wie die Wahl volatiler Anästhetika die CO₂-Emissionen einer anästhesiologischen Klinik beeinflusst. *Anästh Intensivmed* 2020;154–161
- Varughese S, Ahmed R: Environmental and Occupational Considerations of Anesthesia: A Narrative Review and Update. *Anesth Analg* 2021;133:826–835
- Schuster M, Richter H, Pecher S, Koch S, Colburn M: Ökologische Nachhaltigkeit in Anästhesiologie und Intensivmedizin: Positionspapier mitkonkreten Handlungsempfehlungen der DGAI und des BDA. *Anästh Intensivmed* 2020;61:329–339. DOI: 10.19224/ai2020.329
- Campbell M, Tom Pierce JM: Atmospheric science, anaesthesia, and the environment. *BJA Education* 2015;15:173–179
- Sulbaek Andersen MP, Sander SP, Nielsen OJ, et al: Inhalation anaesthetics and climate change. *Br J Anaesth* 2010;105:760–766
- Özelsel TJ-P, Sondekoppam RV, Buro K: The future is now—it's time to rethink the application of the Global Warming Potential to anesthesia. *Can J Anesth* 2019;66:1291–1295
- Eckelman MJ, Huang K, Lagasse R, Senay E, Dubrow R, Sherman JD: Health Care Pollution And Public Health Damage In The United States: An Update. *Health affairs (Project Hope)* 2020;39:2071–2079
- Eckelman MJ, Jodi Sherman J: Environmental Impacts of the U.S. Health Care System and Effects on Public Health. *PLOS ONE* 2016;11:e0157014
- Health Care Without Harm. *Health care's climate footprint 2019*. <https://noharm-uscanada.org/content/global/health-care-climate-footprint-report> (Zugriffsdatum: 01.10.2023)
- Loscar M, Conzen P: Volatile Anästhetika. *Anaesthesist* 2004;53:183–198
- Chung JW, Meltzer DO: Estimate of the Carbon Footprint of the US Health Care Sector. *JAMA* 2009;302:1970–1972
- Ryan SM, Nielsen CJ: Global warming potential of inhaled anesthetics: Application to clinical use. *Anesthesia and analgesia* 2010;111:92–98
- Langbein T, Sonntag H, Trapp D, Hoffmann A, Malms W, Röth EP, et al: Volatile anaesthetics and the atmosphere: Atmospheric lifetimes and atmospheric effects of halothane, enflurane, isoflurane, desflurane and sevoflurane. *Br J Anaesth* 1999;82:66–73
- Andersen MPS, Nielsen OJ, Wallington TJ, Karpichev B, Sander SP: Assessing the Impact on Global Climate from General Anesthetic Gases. *Anesth Analg* 2012;114:1081
- Jedlicka J, Groene P, Linhart J, Raith E, Mustapha D, Conzen P: Inhalationsanästhetika. *Anaesthesist* 2021;70:343–355
- Vollmer MK, Rhee TS, Rigby M, Hofstetter D, Hill M, Schoenenberger F, et al: Modern inhalation anesthetics: Potent greenhouse gases in the global atmosphere. *Geophysical Research Letters* 2015;42:1606–1611
- Weber B, Weber J, Eberhart L, Knoth S: Fokus – NarCO₂se und Umwelt. *Anästhesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther* 2020;55:720–730
- Sherman J, Le C, Lamers V, Eckelman M: Life cycle greenhouse gas emissions of anesthetic drugs. *Anesthesia and analgesia* 2012;114:1086–1090
- Hu X, Pierce JT, Taylor T, Morrissey K: The carbon footprint of general anaesthetics: A case study in the UK. *Resources, Conservation and Recycling* 2021;167:105411
- MacNeill AJ, Lillywhite R, Brown CJ: The impact of surgery on global climate: A carbon footprinting study of operating theatres in three health systems. *The Lancet Planetary Health* 2017;1:e381–e388
- Feldman JM: Managing Fresh Gas Flow to Reduce Environmental Contamination. *Anesthesia & Analgesia* 2012;114:1093–1101
- Hönemann C: Atemkalk: Hinweise zu korrektem Umgang und fachgerechter Nutzung in Rückatemsystemen*. Stellungnahme der Kommission für Normung und technische Sicherheit der DGAI. *Anästh Intensivmed* 2019;60:29–34
- White PF, Ma H, Tang J, Wender RH, Sloninsky A, Kariger R: Does the Use of Electroencephalographic Bispectral Index or Auditory Evoked Potential Index Monitoring Facilitate Recovery after Desflurane Anesthesia in the Ambulatory Setting? *Anesthesiology* 2004;100:811–817

26. Sharon R Lewis, Michael W Pritchard, Lizzy J Fawcett, Yodying Punjasawadwong: Bispectral index for improving intraoperative awareness and early postoperative recovery in adults. *Cochrane Database of Systematic Reviews* 2019
27. Gaya da Costa M, Kalmar AF, Struys MMRF: Inhaled Anesthetics: Environmental Role, Occupational Risk, and Clinical Use. *JCM* 2021;10:1306
28. Kochendörfer I-M, Kienbaum P, Großart W, Rossaint R, Snyder-Ramos S, Grüßer L: Umweltfreundliche Absorption von Narkosegasen. *Anaesthesiologie* 2022;71:824–833
29. Schuster M, Coburn M: Auf dem Weg zum Einfangen und Recyceln von Narkosegasen. *Anaesthesiologie* 2022;71:821–82
30. Hinterberg J, Beffart T, Gabriel A, Holzschneider M, Tartler TM, Schaefer MS, et al: Efficiency of inhaled anaesthetic recapture in clinical practice. *Br J Anaesth* 2022;129:e79–e81
31. Schuster M, Kuster L, Arends S, Brenner T: Was ist neu ... beim Energieverbrauch der Atemgasfortleitungssysteme. *Anaesthesiologie* 2023;1–2
32. Mindestanforderungen an den anästhesiologischen Arbeitsplatz: Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin e. V. und des Berufsverbandes Deutscher Anästhesisten e. V. *Anästh Intensivmed* 2013;54:39–42
33. Deutsches Ärzteblatt: Beschlussprotokoll 2021b TOP II – Klimaschutz ist Gesundheitsschutz; 2023. <https://www.aerzteblatt.de/down.asp?id=28846> (Zugriffsdatum: 23.04.2023)
34. EUR-Lex – 52022PC0150 – EN – EUR-Lex; 2023. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022PC0150> (Zugriffsdatum: 23.04.2023)
35. Gupta A, Stierer T, Zuckerman R, Sakima N, Parker SD, Fleisher LA: Comparison of Recovery Profile After Ambulatory Anesthesia with Propofol, Isoflurane, Sevoflurane and Desflurane: A Systematic Review. *Anesth Analg* 2004;97:632–641
36. Chen G, Zhou Y, Shi Q, Zhou H: Comparison of early recovery and cognitive function after desflurane and sevoflurane anaesthesia in elderly patients: A meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of International Medical Research* 2015;43:619–628
37. Dexter F, Bayman EO, Epstein RH: Statistical Modeling of Average and Variability of Time to Extubation for Meta-Analysis Comparing Desflurane to Sevoflurane. *Anesth Analg* 2010;110:570
38. Meyer MJ: Desflurane Should Disappear: Global and Financial Rationale. *Anesth Analg* 2020;131:1317–1322
39. Bilotta F, Doronzio A, Cuzzone V, Caramia R, Rosa G, Group TPS: Early Postoperative Cognitive Recovery and Gas Exchange Patterns After Balanced Anesthesia With Sevoflurane or Desflurane in Overweight and Obese Patients Undergoing Craniotomy: A Prospective Randomized Trial. *Journal of Neurosurgical Anesthesiology* 2009;21:207
40. McKay RE, Large MJC, Balea MC, McKay WR: Airway Reflexes Return More Rapidly After Desflurane Anesthesia Than After Sevoflurane Anesthesia. *Anesth Analg* 2005;100:697
41. Singh PM, Borle A, McGavin J, Trikha A, Sinha A: Comparison of the Recovery Profile between Desflurane and Sevoflurane in Patients Undergoing Bariatric Surgery – a Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *OBES SURG* 2017;27:3031–3039
42. Kostrubiak MR, Johns ZR, Vatovec CM, Malgeri MP, Tsai MH: Environmental Externalities of Switching From Inhalational to Total Intravenous Anesthesia. *Anesth Analg* 2021;132:1489–1493
43. Mankes RF: Propofol Wastage in Anesthesia. *Anesth Analg* 2012;114:1091
44. Schraag S, Pradelli L, Alsaleh AJO, Bellone M, Ghetti G, Chung TL, et al: Propofol vs. inhalational agents to maintain general anaesthesia in ambulatory and in-patient surgery: A systematic review and meta-analysis. *BMC Anesthesiol* 2018;18:1–9
45. Shelton C, Barker K, Winter Beatty J: Efficiency of inhaled anaesthetic recapture in clinical practice. Comment on *Br J Anaesth* 2022; 129: E79–81. *Br J Anaesth* 2022;129:e114–e116
46. McGain F, Sheridan N, Wickramarachchi K, Yates S, Chan B, McAlister S: Carbon Footprint of General, Regional, and Combined Anesthesia for Total Knee Replacements. *Anesthesiol* 2021;135:976–991.

Korrespondenz- adresse



**Dr. med.
Stefan Müller**

Klinik für Anästhesie und Intensiv-
therapie, Universitätsklinikum
Gießen und Marburg,
Standort Marburg
Baldingerstraße
35033 Marburg, Deutschland
Tel.: 06421 58-65981
E-Mail:
stefan.mueller@uni-marburg.de
ORCID-ID: 0009-0008-2793-6411