

Aus der Klinik für Anästhesiologie
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Benedikt Pannen

Anesthetic Inhaled Retention Study (AIR)

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin der
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität
Düsseldorf

Vorgelegt von
Theresa Veronika Beffart
2026

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität
Düsseldorf

Gez.:

Dekan: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: Prof. Dr. med. Peter Kienbaum

Zweitgutachter: Prof. Dr. med. Günter Niegisch

Für meine Familie

Teile dieser Arbeit wurden veröffentlicht:

- (1) Hinterberg J, Beffart T, Gabriel A, Holzschneider M, Tartler TM, Schaefer MS, Kienbaum P. Efficiency of inhaled anaesthetic recapture in clinical practice. Br J Anaesth. 2022;129(4):e79-e81. doi:10.1016/j.bja.2022.04.009.

Zusammenfassung (deutsch)

Inhalative Anästhetika sind potente Treibhausgase und tragen wesentlich zur Klimabilanz von Krankenhäusern bei. Besonders Desfluran besitzt ein höheres Treibhauspotenzial als CO₂. Durch sein schnelles An- und Abfluten aufgrund des niedrigen Blut-Gas-Verteilungskoeffizienten ermöglicht Desfluran jedoch eine gute Steuerbarkeit der Narkose. Um die Klimabilanz der Krankenhäuser und der Anästhesie zu senken, wurde das CONTRAfluran™-Filtersystem der Firma ZeoSys Medical GmbH entwickelt. Es absorbiert die inhalativen Narkosegase Desfluran und Sevofluran und ermöglicht so eine Wiedergewinnung. Zu Beurteilung der Effektivität des CONTRAfluran™-Systems im klinischen Alltag –bezogen auf das inhalative Anästhetikum Desfluran –wurde 2021 in der Universitätsklinik Düsseldorf eine Studie mit 80 Filtern durchgeführt. Die Gewichts Differenz des verbrauchten Desfluran während der Narkose und dem wiedergewonnenen Desfluran nach Desorptionsprozess durch die Filtersysteme der Firma ZeoSys Medical GmbH diente zur Berechnung der Recovery.

Während des Studienzeitraums konnten 1727 g der insgesamt 6903 g des verwendeten Desflurans zurückgewonnen werden. Längere Operationszeiten ($p < 0,001$), höhere MAC-Werte ($p = 0,02$), höhere end-tidale Desflurankonzentrationen bei Extubation ($p = 0,01$) sowie höhere Beatmungsparameter (AMV, AF) waren signifikant mit einer geringeren Recovery assoziiert. In einem Operationssaal zeigten robotisch assistierte Eingriffe besonders niedrige Rückgewinnungsraten ($p < 0,001$). Patientenbezogene Faktoren, insbesondere die unvollständige pulmonale Elimination zum Zeitpunkt der Extubation, waren weitere Limitationen der Effektivität des Filters. Eine Recovery von Desfluran unter klinischen Bedingungen ist grundsätzlich möglich, wird jedoch durch technische, methodische und patientenbezogene Faktoren begrenzt.

Summary (English)

Inhaled anesthetics are potent greenhouse gases and contribute significantly to the climate footprint of hospitals. Desflurane, in particular, has a higher global warming potential than CO₂. However, its rapid onset and offset due to its low blood-gas partition coefficient allows for good control of anesthesia. To reduce the climate footprint of hospitals and anesthesia, the CONTRAfluran™ filter system from ZeoSys Medical GmbH was developed. It absorbs the inhaled anesthetic gases desflurane and sevoflurane, thus enabling their recovery. To assess the effectiveness of the CONTRAfluran™ system in everyday clinical practice – specifically with regard to the inhaled anesthetic desflurane – a study with 80 filters at Düsseldorf University Hospital in 2021 was conducted. The weight difference between desflurane consumed during anesthesia and the desflurane recovered after desorption by ZeoSys Medical GmbH was used to calculate recovery.

During the study period, 1727 g of the 6903 g of desflurane used were recovered. Longer operating times ($p < 0.001$), higher MAC values ($p = 0.02$), higher end-tidal desflurane concentrations at extubation ($p = 0.01$), and higher ventilation parameters (AMV, RR) were significantly associated with lower recovery. In one operating room, robot-assisted procedures showed particularly low recovery rates ($p < 0.001$). Patient-related factors, especially incomplete pulmonary elimination at the time of extubation, were further limitations on the filter's effectiveness. Desflurane recovery under clinical conditions is generally possible but is limited by technical, methodological, and patient-related factors.

Abkürzungen**Bedeutung**

AF

Atemfrequenz

AGFS

Anästhesiegasfortleit
ungssystem

AMV

Atem-Minuten-
Volumen

BMI

Body-Maß-Index

CO₂

Kohlendioxid

GMP

Good Manufacturing
Practice

GWP

Global Warming
PotentialGWP₁₀₀Global Warming
Potential über 100
Jahre

IRR

Incidence Rate Ratio
(Inzidenzratenverhäl
tnis)

KI

Künstliche
Intelligenz

MAC

Minimum Alveolar
Concentration
(minimale alveoläre
Konzentration)

PAF-Test

Pressure and Flow-
Tets

WHO

World Health
Organization

Inhaltsverzeichnis

1.0 Einleitung	1
1.1 Inhalative Anästhetika	4
1.2 Strategien zur Reduktion von inhalativen Anästhetika	5
1.3 Wirtschaftlichkeit	6
1.4 Ziel der Arbeit	6
2.0 Material und Methoden	8
2.1 Material	8
2.2 Studienprotokoll und Studiendesign	9
2.3 Messvariablen	11
2.3.1 Operationsdauer	11
2.3.2 Leckage	11
2.3.3 Atmungsparameter	11
2.3.4 Erhobene Parameter beim Patienten	12
2.4 Ein- und Ausschlusskriterien	12
2.5 Auswahl der eingeschlossenen Filter	12
2.6 Durchführung der Anästhesie	13
2.7 Narkosegasabsorption	14
2.7.1 Das CONTRAfluranTM Filtersystem der Firma ZeoSys Medical GmbH	14
2.7.2 Verfahren der Firma ZeoSys Medical GmbH	15
2.8 Statistik	16
2.9 Hinweis zur Nutzung von KI-gestützten Werkzeugen	16
3.0 Ergebnisse	18
3.1 Patienten und Narkose	18
3.2 Datengewinnung Desfluran	20
3.3 Datengewinnung CONTRAfluranTM Filter	20
3.4 Gewichtszunahme des nicht-desorbierten CONTRAfluranTM Filter	20
3.6 Multivariable Regressionsanalyse	22
4.0 Diskussion	26
4.1 Technische Limitationen des Filtersystems	26
4.2 Unvollständige Absorption während der Narkose	27
4.2.1 Geringere Desfluran-Rückgewinnung bei DaVinci-gestützten Operationen	27
4.2.2 Verluste durch Leckagen im Atemsystem	28
4.2.3 Einfluss der Narkosedauer und des Frischgasflows	29
4.3 Verluste durch unvollständige Elimination des Desflurans beim Patienten	30
4.4 Kritische Betrachtung der Methode	32

4.5 Fazit	33
5.0 Literaturverzeichnis	35
6.0 Anhang	39
7.0 Danksagung	40

1.0 Einleitung

Der Klimawandel gewinnt in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung. Im Vergleich zu dem sog. Referenz-Zeitraum, der vorindustriellen Episode, von 1850-1900 stieg die globale Oberflächentemperatur in den Jahren 2011-2019 um durchschnittlich 1,1 °C an (2).

Die steigende Temperatur hat direkten Einfluss auf die globale Gesundheit.

Die WHO berichtete im Jahr 2023 von der Zunahme extremer Wetterereignisse. Die Temperatur- und Niederschlagsveränderungen begünstigten die Ausbreitung vektorbasierter Krankheiten, was jährlich zu etwa 700.000 Todesfällen geführt hat –Tendenz steigend. Rund 37 Prozent der durch Hitze verursachten Todesfälle waren weltweit dem Klimawandel zuzuschreiben. Besonders betroffen war die ältere Bevölkerung. Der Klimawandel führte zu vermehrter Ernährungsarmut. 2020 waren 98 Millionen Menschen mehr hiervon betroffen als in dem Zeitraum von 1981 bis 2010 (3). Psychische Gesundheitsprobleme, die durch extreme Wetterereignisse und Klimafolgen verschärft wurden, stellten eine weitere, zunehmend wichtige Herausforderung dar. Die direkten Kosten für gesundheitliche Schäden durch den Klimawandel wurden auf 2 bis 4 Milliarden US-Dollar geschätzt (3).

Klimawissenschaftler prognostizierten, dass zwischen 2030 und 2050 durch Malaria, Durchfallerkrankungen und Hitzestress etwa 250.000 zusätzliche Todesfälle pro Jahr verursacht werden (3).

Die treibenden Kräfte des Klimawandels sind Treibhausgase, wie z.B. Kohlendioxid, Methan und Lachgas. Der natürliche Treibhauseffekt sorgt für ein Temperaturgleichgewicht von 15°C in der Erdatmosphäre. Ausschlaggebend dafür sind die Treibhausgase Wasserdampf, Kohlendioxid, Ozon, Lachgas und Methan, da sie die Wärmestrahlung der Erde absorbieren und einen Teil davon zurück zur Erdoberfläche reflektieren. Dadurch wird mehr Wärmeenergie gespeichert, als durch die direkte Sonneneinstrahlung allein (4).

Durch den menschlichen Einfluss, als anthropogenen Treibhausgaseffekt bezeichnet, stiegen in den vergangenen Jahrzehnten die Konzentrationen von Kohlendioxid, Lachgas und Methan in der Erdatmosphäre deutlich an. Dies hatte zur Folge, dass sich die zurückgeworfene Menge der Strahlung und somit folglich die Temperatur der Erdoberfläche erhöhten (4). Ein Ziel des Gesundheitswesens sollte es sein, den anthropogenen Treibhauseffekt zu quantifizieren und einzudämmen.

Ein Blick auf die weltweiten Kohlendioxid-Emissionen im Jahr 2024 zeigte, dass die Energieindustrie mit 39,07 Prozent den größten Anteil an den Gesamtemissionen hatte (5). Eine Analyse aus dem Jahr 2019 von Health Care Without Harm ergab, dass der Gesundheitssektor 4,4 Prozent der globalen Nettoemission verursachte (6).

In einer englischen, US-amerikanischen und kanadischen Klinik wurden im Jahr 2011 durchschnittlich 188 Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente Emissionen pro Operationssaal produziert (7). Kohlendioxid-Äquivalente sind eine Maßeinheit, die die Klimawirkung verschiedener Treibhausgase auf eine gemeinsame Basis bringt, indem sie angibt, wie viel CO₂ dieselbe Wirkung hätte (8). So lassen sich die Emissionen und Wirkungen unterschiedlicher Treibhausgase miteinander vergleichen.

Die Klimabilanz der Kliniken wurde maßgeblich durch inhalative Anästhetika belastet.

In den letzten Jahrzehnten hat der Verbrauch inhalativer Anästhetika auf Grund steigender Operationszahlen stark zugenommen (9). 2012 wurde in Deutschland bei ca. 7 Mio. Operationen die Narkose mit inhalativen Anästhetika durchgeführt, ca. 35 Prozent davon mit Desfluran (10). 2014 lag die Emission bei 3 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent, 80 Prozent davon ließen sich auf Desfluran zurückführen (11).

Sevofluran und Desfluran gehören zur Gruppe der Fluorkohlenwasserstoffe. Sie sind potente Treibhausgase, mit einem höheren Treibhauspotential als Kohlendioxid. Desfluran ist ein besonders potentes Treibhausgas mit längerer atmosphärischer Lebensdauer als Sevofluran. Das Treibhauspotenzial liegt etwa zwanzigmal höher als das von Sevofluran und ungefähr fünfmal über dem von Isofluran (12). Dies zeigt sein Global Warming Potential (GWP) –ein Maß für den Beitrag eines Gases zur Erderwärmung im Vergleich zu Kohlendioxid (8). Ein Nachteil des GWP ist, dass es die komplexe, zeitabhängige Klimawirkung verschiedener Treibhausgase stark vereinfacht und dadurch kurzfristig besonders schädliche Gase wie Methan oft unterschätzt (13).

Während Desfluran ein GWP nach 100 Jahren von 2540 besitzt, liegt das von Sevofluran bei 130 (14). Desfluran trägt in einem Zeitraum von 100 Jahren ca. 2540-mal mehr zur globalen Erwärmung bei als die gleiche Masse an Kohlendioxid. Um die Klimaauswirkungen chirurgischer Interventionen zu senken, sind Emissionsreduktionsstrategien notwendig. Ein zentrales Problem besteht in der ungehinderten Ableitung der Anästhetika-haltigen Abluft in die Atmosphäre.

1.1 Inhalative Anästhetika

Inhalative Anästhetika sind flüchtige, gasförmige oder verdampfbare Substanzen, die zur Einleitung und Aufrechterhaltung einer Allgemeinanästhesie verwendet werden. Sie werden über die Atemwege verabreicht und wirken direkt auf das zentrale Nervensystem, um Bewusstlosigkeit, Schmerzfreiheit und Muskelentspannung zu erzeugen. Die inhalativen Anästhetika haben unterschiedliche Siedepunkte. Der wichtigste physikalisch-chemische Parameter zur Charakterisierung inhalativer Anästhetika ist der Blut-Gas-Verteilungskoeffizient, der die An- und Abflutungsgeschwindigkeit sowie die Potenz bedingt: Je niedriger die Blutlöslichkeit, desto besser ist die Steuerbarkeit der Anästhesietiefe. Desfluran weist unter den inhalativen Anästhetika den niedrigsten Blut-Gas-Verteilungskoeffizienten (ca. 0,42) auf, was eine besonders schnelle An- und Abflutung ermöglicht (15).

Das Abfluten von Desfluran ist 2- bis 2,5-mal schneller als das Abfluten von Sevofluran. Nach einer Desfluran-Anästhesie erholen sich Patientinnen und Patienten im Vergleich zu Isofluran und Sevofluran signifikant schneller. Sowohl das Aufwachen aus der Narkose, das Wiedererlangen von Schutz- und Schluckreflexen als auch die Wiederherstellung psychomotorischer und kognitiver Funktionen verlaufen in den ersten 45 bis 90 Minuten schneller. Subjektive Beschwerden wie Müdigkeit oder Verwirrtheit sind weniger ausgeprägt. Besonders ältere Menschen profitieren durch eine deutlich kürzere Aufenthaltsdauer im Aufwachraum (16).

Das schnelle An- und Abfluten ermöglicht zudem eine bessere Steuerbarkeit der Narkose.

Durch die kürzeren Ausleitungszeiten kann im Prozess kosteneffizienter gearbeitet werden.

Der Metabolismus von Desfluran ist mit unter 0,02 % äußerst gering, was es für Patienten mit Leber- oder Nierenerkrankungen besonders verträglich macht. Im Gegensatz dazu wird Sevofluran in höherem Maße (ca. 3 bis 5 %) metabolisiert. Im Atemkalk kann es bei Sevofluran zur Bildung von Abbauprodukten kommen. Dabei entsteht unter anderem Vinyläther und Fluoridionen, welcher nephrotoxisch wirken kann (15).

Desfluran wird nahezu unverändert über die Lunge wieder abgeatmet. Zum Zeitpunkt des Erwachens und der Extubation des Patienten ist das Desfluran jedoch nicht vollständig über die Lunge abgeatmet. Es ist noch in verschiedenen Kompartimenten des Körpers gelöst (17).

1.2 Strategien zur Reduktion von inhalativen Anästhetika

AnästhesistInnen waren sich schon länger ihrer Verantwortung und der Notwendigkeit einer Reduktion der klinisch produzierten CO₂-Äquivalente bewusst. 2020 entwarf die Deutsche Gesellschaft für Anästhesie und Intensivmedizin und der Berufsverband deutscher Anästhesisten erstmalig ein Positionspaper, in dem sie konkrete Handlungsempfehlungen für ein nachhaltigeres Arbeiten formulierten (18).

Durch eine Reduktion von Verbrauchsmaterialien- wie etwa Einmalprodukte und Verpackungsmaterialien- des Energieverbrauchs sowie der Freisetzung von inhalativen Anästhetika wurde versucht, die Klimabilanz des Gesundheitssektors nachhaltig zu verbessern. Um letzteres zu erreichen, wurde u.a. das Filtersystem der Firma ZeoSys eingesetzt. Die Reduktion der atmosphärischen Freisetzung inhalativer Anästhetika war Ziel der Anwendung eines Filtersystem der Firma ZeoSys Medical GmbH. Es absorbierte die inhalativen Anästhetika und verhinderte deren ungehinderte Freisetzung in die Atmosphäre.

Darüber hinaus ermöglichte es durch ein spezielles Recovery-Verfahren die Wiedergewinnung des in den Filtern aufgefangenen Desflurans und Sevoflurans.

1.3 Wirtschaftlichkeit

Durch Anwendung niedriger Frischgasflüsse konnte der Verbrauch inhalativer Anästhetika während der Narkose erheblich gesenkt werden. Durch diese Einsparung des Arzneimittels wurden auch die Kosten gesenkt. Durch die Rückgewinnung des inhalativen Anästhetikums und der anschließenden Wiederverwendung sollten ebenfalls Kosten eingespart werden.

Das inhalative Anästhetikum konnte nach dem Desorptionsprozess als wieder aufbereitetes Anästhetikum käuflich erworben werden. Ziel war es, dieses Anästhetikum zu besseren Konditionen zu erwerben und somit weitere Kosten einzusparen. Bei Sevofluran ist dies bereits möglich. Die Firma ZeoSys verkaufte seit 2024 wiederverwendetes Sevofluran in Österreich als Arzneimittel.

1.4 Ziel der Arbeit

Der CONTRAfluran™-Filter war in der Lage, selektiv inhalatives Anästhetikum zu absorbieren, sobald es den Absorber passierte. Nach Firmenangaben ermöglichte das anschließende Desorptionsverfahren in der Firma ZeoSys es, bis zu 99 % des über die Anästhesiegasfortleitungssysteme (AGFS) abgeleiteten Anästhetikums zurückzugewinnen (19). Gegenstand dieser Studie war die Quantifizierung der Differenz zwischen der Gesamtmenge des während einer Operation eingesetzten inhalativen Anästhetikums und der durch das CONTRAfluran™-System zurückgewonnenen Menge.

Ziel war es, die tatsächliche Effektivität des CONTRAfluran™-Systems im klinischen Alltag zu bewerten – sowohl im Hinblick auf sein Potenzial zur Reduktion klimaschädlicher Emissionen als auch in Bezug auf seine wirtschaftliche Rentabilität. Damit leistete die Arbeit einen Beitrag zur ökologischen und ökonomischen Bewertung von Rückgewinnungssystemen für Narkosegase in der Anästhesie.

2.0 Material und Methoden

Bei dieser Studie handelte es sich um eine medizinische Grundlagenforschung ohne Interventionen. Ein positives Votum der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Universität Düsseldorf lag vor (Studennummer 2021-1381 vom 24.02.2021)

Die Studie wurde in drei Operationsräumen in der Urologie in der Universitätsklinik Düsseldorf vom 07.04.2021 bis zum 07.07.2021 durchgeführt. Insgesamt wurden 107 Narkosen im Rahmen der Studie dokumentiert und ausgewertet. Von diesen wurden 80 Narkosen mit entsprechendem Filter in die Studie eingeschlossen.

2.1 Material

Die Firma ZeoSys Medical GmbH stellt das aus einem Filter und einem Sensor bestehende Filtersystem CONTRAfluran her, welches im Mittelpunkt dieser Studie stand. Die Firma war GMP-zertifiziert (Zertifikat-Nr. DE_BB_01_GMP_2021_0017). Eine Risikobewertung nach der Medical Device Regulation zur Kombination aus Narkosegerät und dem Filtersystem CONTRAfluran fand durch die Medizintechnik des Uniklinikums Düsseldorf statt.

Bei dem Narkosegerät handelte es sich um das Modell Primus der Firma Dräger (Primus, Dräger Lübeck, Deutschland).

Zur Aufbereitung des inhalativen Anästhetikums wurde der Vapor derselben Firma verwendet (Typ D-Vapor, Dräger Medical Deutschland GmbH, Lübeck).

Zur Aufrechterhaltung der Anästhesie wurde das inhalative Anästhetikum Desfluran der Firma Baxter (Baxter Deutschland GmbH, 85716 Unterschleißheim) mit der Zulassungserteilung bzw. Verlängerung der Zulassung vom 07.11.1994 bzw. 11.06.2008 eingesetzt.

Zum Wiegen wurde eine Präzisionswaage (Kern KB 10K0.05N, Kern & Sohn GmbH, Balingen-Frommern, Deutschland) genutzt.

2.2 Studienprotokoll und Studiendesign

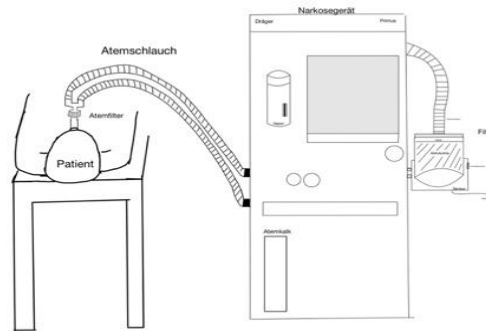


Abbildung 1: Versuchsaufbau (eigene Darstellung)

Der Studienablauf folgte einer festen Reihenfolge. Der Filter wurde mit Datum, OP-Saal und einer individuellen Nummer beschriftet. Der Vapor wurde mit Desfluran befüllt, bis die Füllstandanzeige keinen Luftspiegel mehr zeigte und damit die maximale Befüllung bestätigte. Anschließend wurden sowohl der leere Filter als auch der volle Vapor mit einer Präzisionswaage gewogen.

Nach Wiedermontage von Vapor und Filter am Narkosegerät wurde das Gerät neu gestartet und durchlief anschließend einen automatischen Leck-Test zur Überprüfung der Dichtheit des Atemsystems.

Zusätzlich zum Leck-Test wurde vor jeder Operation der PAF-Test durchgeführt, um eine Fehlfunktion des Narkosegerätes auszuschließen.



Abbildung 2: skizziertes Studienprotokoll (eigene Darstellung)

Die Narkose wurde im Operationsraum eingeleitet. Nach Beendigung der Operation und der Narkose, wurden der Filter und der Vapor erneut gewogen. Die Filter wurden vor und nach Verwendung trocken und lichtgeschützt in einem Lagerraum nahe der Operationsräume aufbewahrt.

Nach dem Transport zur Firma ZeoSys wurde der Inhalt der Filter einem Desorptionsverfahren unterzogen.

Die dabei zurückgewonnene Desfluranmenge wurde von der Firma rückgemeldet.



Bild 1 und 2: Anbringung des Filters am Narkosegerät (eigene Darstellung)

2.3 Messvariablen

2.3.1 Anästhesiedauer

Zur Erfassung der Anästhesiedauer wurden der Beginn und das Ende der Narkose manuell auf Papier dokumentiert. Der Anästhesiesbeginn war definiert als der Zeitpunkt nach erfolgreicher Intubation des Patienten, bei dem die Aufrechterhaltung der Narkose mit Desfluran begann. Das Anästhesiesende war definiert als der Zeitpunkt, an dem der Patient extubiert wurde. Die Zeitdauer wurde in Minuten angegeben.

2.3.2 Leckage

Die Leckage war die Differenz zwischen dem Volumen der Inspirationsluft und der Expirationsluft, angegeben in Liter pro Minute. (20) Diese Differenz wurde vom Narkosegerät erfasst und auf dem Monitor des Primus numerisch dargestellt. Die Leckage wurde zum Zeitpunkt des Hautschnitts und 30 Minuten nach dem Beginn der Operation durch die AnästhesistInnen erfasst und schriftlich dokumentiert.

2.3.3 Atmungsparameter

Der Frischgasfluss wurde 30 Minuten nach dem Hautschnitt abgelesen. Es war die Menge der Luft, die dem Kreisteil des Narkosegerätes neu zugeführt wurde. Der Parameter wird in Liter pro Minute angegeben.

Das Atem-Minuten-Volumen (AMV), die Atemfrequenz (AF) und der alterskorrigierte MAC wurden ebenfalls 30 Minuten nach Hautschnitt notiert. Das AMV war das Volumen in Litern, welches pro Minute eingeatmet wird. Die AF entsprach der Anzahl der Atemzüge pro Minute. Der MAC (Minimum Alveolar Concentration) beschrieb die alveoläre Konzentration eines inhalativen Anästhetikums, bei der 50 Prozent der Patienten bei Hautschnitt keine Abwehrbewegung zeigten. Der Wert wurde in Prozent angegeben. (21)

Die expiratorische Anästhesiegaskonzentration wurde zum Zeitpunkt 30 Minuten nach Hautschnitt und zum Zeitpunkt der Extubation erfasst. Sie gab prozentual an, wieviel inhalatives Anästhetikum sich in der Ausatemluft zum Ende der Expiration befand. Der Zeitpunkt der Extubation wurde nach den folgenden Kriterien gewählt: der Patient atmete spontan und zeigte eine ausreichende Atemfrequenz, er war ansprechbar und reagierte auf akustische Reize. Die Patienten zeigten nach der Anwendung von nicht-depolarisierenden Muskelrelaxanzien eine vollständige Wiederherstellung der neuromuskulären Funktion gemessen als Train of Four im neuromuskulären Monitoring von mehr als 95%.

2.3.4 Erhobene Parameter beim Patienten

Zur Ermittlung des Body-Mass-Index (BMI) der Patienten wurden die Angaben im Narkoseprotokoll zur Größe (in Zentimeter) und zum Gewicht (in Kilogramm) verwendet. Der BMI wurde mit der Formel Körpergewicht in Kilogramm/Körpergröße in Zentimeter zum Quadrat errechnet.

2.4 Ein- und Ausschlusskriterien

Eingeschlossen wurden alle Intubationsnarkosen bei erwachsenen Patienten, die durch die Applikation von Desfluran aufrechterhalten wurden.

Ausgeschlossen wurden alle Regionalanästhesien sowie rein intravenös aufrecht erhaltene Vollnarkosen.

2.5 Auswahl der eingeschlossenen Filter

Im Vorfeld wurden 27 der ursprünglichen 107 gesammelten Filter ausgeschlossen, da sie nicht den Einschlusskriterien der Studie entsprachen. Acht der Filter wurden aussortiert, da während der jeweiligen Operation nicht ausschließlich Desfluran zur Aufrechterhaltung der Narkose verwendet wurde.

Hier wurde während der Operation auf Sevofluran oder Propofol zurückgegriffen. Bei einer Operation musste der Vapor während der laufenden Narkose nachgefüllt werden, was auf eine besonders lange Operationsdauer zurückzuführen war. Bei sechs der aussortierten Filter wurde der Atemschlauch mehrmals vom Tubus diskonnektiert und somit große Verluste unabhängig vom Filtersystem und dem Patienten verzeichnet. Weitere zwölf Filter wurden ausgeschlossen, da anhaltende Undichtigkeiten im Atemsystem (Tubus oder Schlauchsystem) vorlagen, die auch nach 30 Minuten nicht behoben werden konnten.

2.6 Durchführung der Anästhesie

Die Operation fand in den Operationsräumen der Urologie in der Universitätsklinik Düsseldorf statt.

Der Operationsraum war ausgestattet mit dem Narkosegerät sowie dem Filtersystem und dem dazugehörigen Sensor der Firma ZeoSys.

Dem Patienten wurde einmalig zur Einleitung ein intravenöses Anästhetikum verabreicht. Dazu erhielt der Patient das Muskelrelaxans Rocuronium und das Analgetikum Sufentanil. Die Aufrechterhaltung der Narkose erfolgte ausschließlich mittels Desfluran und Sufentanil.

Die Intubation erfolgte oral mit einem Magill-Tubus. Der Cuff-Druck lag bei ca. 30 cm H₂O. Es wurde keine Larynxmaske verwendet.

Während der Operation wurden die Pleura und die Lunge weder manipuliert noch verletzt.

Die Narkose wurde unter Standardbedingungen nach klinikinterner Verfahrensanweisung durchgeführt. Die AnästhesistInnen erhielten keine spezifischen Anweisungen zur Durchführung der Narkose im Rahmen der Studie. Lediglich durch eine bestehende klinikinterne Verfahrensanweisung sind die Anästhesisten dazu angehalten, den Frischgasfluss im Sinne einer Niedrig-Fluss-Narkose einzustellen.

Die Niedrig-Fluss-Anästhesie wird in der Literatur durch einen Frischgasfluss von etwa 1 L/min definiert; die Minimale-Fluss-Technik entspricht etwa 0,5 L/min, während der metabolische Fluss bei rund 0,35 L/min liegt. (22)

2.7 Narkosegasabsorption

Die Studie fand unter enger Zusammenarbeit mit der Firma ZeoSys statt. Die Firma stellt den untersuchten Filter, führte das Desorptionsverfahren durch und übermittelte uns im Anschluss das Ergebnis des Desorptionsverfahrens. Im folgenden Teil wird es um den Filter und das System dahinter gehen.

2.7.1 Das CONTRAfluranTMFiltersystem der Firma ZeoSys Medical GmbH

Der CONTRAfluranTMFilter bestand aus einer Plastikhülle, einem Deckel, einer Platte aus Watte und Aktivkohle.

Die Aktivkohle absorbierte das inhalative Anästhetikum selektiv, basierend auf ihrer Oberflächenbeschaffenheit, Kornstruktur und Porosität. (19) Gleichzeitig wurde ein Teil des während der Beatmung entstehenden Kondenswassers in der Aktivkohle gespeichert.

Der Filter fasste ein Volumen von 2 Liter, hatte ein Gewicht von ca. 1000 g und die Speicherkapazität lag laut Herstellerangaben bei ca. 400 g Narkosegas. Der Fluss-Widerstand beträgt 0,15 mbar. (19)

Der CONTRAfluranTMFilter war über das Anästhesiegasfortleitungssystem mit dem Narkosegerät verbunden (siehe Abbildung 3) und seitlich auf den Sensor aufgesetzt.

Der Sensor war über eine Halterung in Bodennähe am Narkosegerät befestigt und wurde über ein externes Stecknetzteil mit Strom versorgt.

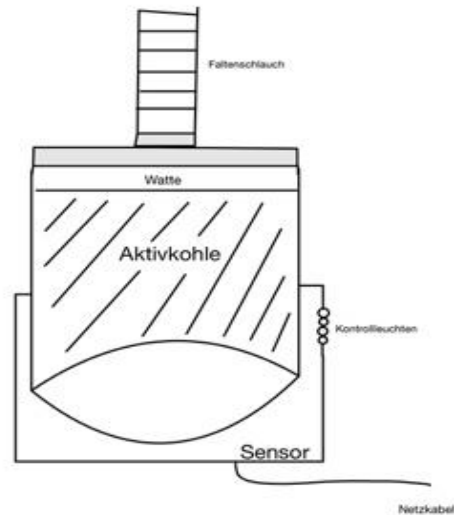


Abbildung 3: Aufbau des ZeoSys Filters (eigene Darstellung)

2.7.2 Verfahren der Firma ZeoSys Medical GmbH

Bis zum Transport zur Firma ZeoSys wurde die Filter in einem Lagerraum in der Uniklinik Düsseldorf aufbewahrt. Die Filter wurden postalisch an die Firma nach Luckenwalde gesendet. Nach dem Transport zur Firma ZeoSys Medical GmbH nach Luckenwalde wurden die Filter bis zum Desorptionsverfahren zwischengelagert.

Für die technische Durchführung des Desorptionsverfahrens – aufgrund von Vorgaben des Unternehmens – war eine Stückzahl von 80 Filtern erforderlich. Eine Einzel-Desorption von Filtern war technisch nicht möglich, da das Verfahren nur im Sammelprozess durchgeführt werden kann.

Beim Desorptionsverfahren wurde die in der Aktivkohle gebundene Menge an Desfluran durch Erhitzung freigesetzt und aufgefangen. Eine anschließende Chromatographie zeigte eine Reinheit des Desflurans von 99,845% (siehe Anhang).

2.8 Statistik

Zur statistischen Auswertung wurden die Daten von 80 Aktivkohlefiltern herangezogen. Die Fallzahl ergab sich aus der technischen Vorgabe der Firma ZeoSys Medical GmbH. Der primäre Endpunkt der Untersuchung war der prozentuale Anteil des rückgewonnenen Desflurans im Verhältnis zur insgesamt verdampften Menge, bestimmt durch die Gewichts differenzen der Vaporen und Filter vor und nach der Narkose. Die erfassten Variablen waren deskriptiv als Median, arithmetisches Mittel und Interquartilsabstand dargestellt. Ferner wurde eine multivariable negative binomiale Regressionsanalyse zur Identifikation von Einflussfaktoren auf die Rückgewinnung von Desfluran aufgestellt (1). Die Effektstärken wurde als Inzidenzratenverhältnisse (IRR) mit 95%-Konfidenzintervallen angegeben. Für signifikante Parameter wurden absolute Unterschiede mit dem margins-Befehl in Stata berechnet. Der Befehl zeigt, wie stark sich ein verändert, wenn sich eine Einflussgröße verändert. Die statistische Signifikanz wurde bei einem p-Wert $< 0,05$ angenommen. Für alle Berechnungen und Analysen wurde die statistischen Software Stata, Version 16.1 (StataCorp LLC, College Station, TX, USA) und Microsoft Excel 2016 (Microsoft Corporation, Redmond, USA) verwendet.

2.9 Hinweis zur Nutzung von KI-gestützten Werkzeugen

Im Rahmen der Texterstellung dieser Dissertation wurde das Sprachmodell ChatGPT (GPT-4, OpenAI) unterstützend eingesetzt. Die Nutzung beschränkte sich auf Hilfestellungen bei der sprachlichen Formulierung einzelner Textpassagen, dem Strukturieren von Inhalten sowie der Klärung methodischer und statistischer Begriffe. Eine automatische Texterzeugung ganzer Abschnitte erfolgte nicht. Alle Inhalte wurden von der Autorin eigenständig geprüft, wissenschaftlich eingeordnet und verantwortet.

Die Nutzung erfolgte unter Beachtung der Leitlinien zur
Verwendung generativer KI der Heinrich-Heine-Universität
Düsseldorf.

3.0 Ergebnisse

In Kooperation mit der Firma ZeoSys Medical GmbH fand am 03.08.2021 die Desorption von 80 ausgewählten CONTRAfluranTM-Filtern statt.

Die nachfolgenden Ergebnisse basierten auf den im Operationssaal erhobenen Messwerten, sowie den Analyseergebnissen der Firma ZeoSys Medical GmbH.

3.1 Patienten und Narkose

Die männlichen und weiblichen Patienten wogen durchschnittlich 85 kg und waren 177 cm groß. Der mittlere BMI lag bei 27,5 kg/m² (siehe Tabelle1 zur weiteren Einordnung).

Alle Patienten waren mind. 18 Jahre alt.

Während der Narkose wurden die Patienten mit einem durchschnittlichen AMV von 6,6 L/min. und einer AF von 13 Atemzügen pro Minute beatmet.

Im Mittel lag der alterskorrigierte MAC während der Operationen bei 0,8.

Die durchschnittliche Operationsdauer betrug 238 Min.

Zum Zeitpunkt des Hautschnitts lag die Leckage im Atemsystem im Mittel bei 0,07 L/min., nach 30 Minuten bei 0,2 L/min. Durchschnittlich lag der Frischgasfluss während den Operationen bei 0,7 L/min, was der Definition einer Niedrig-Fluss-Narkose entsprach.

Tabelle 1: BMI-Verteilung (eigene Darstellung)

	N
Untergewicht (BMI <18,5)	0
Normalgewicht (BMI 18,5-24,9)	26
Übergewicht (BMI 25-29,9)	40
Adipositas Grad I (BMI 30-34,9)	11
Adipositas Grad II (BMI 35-39,9)	0
Adipositas Grad III (BMI >40)	3

Tabelle 2: Patientenabhängige und -unabhängige Parameter

(eigene Darstellung)

	M(ST)	Max./Min
BMI kg/m ²	27,4 (± 6,2)	55 /19
Größe (cm)	177 (± 8,3)	198/158
Gewicht (kg)	85,6 (± 19)	170/59
AMV (L/min)	6,6 (± 6,6 L/min.)	10/4
AF	13 (± 2)	20/8
MAC	0,8 (± 0,11)	1,2/0,5
Leckage zum Schnitt (L/min)	0,06 (± 0,1)	0,4/0
Leckage nach 30 Min (L/Min.)	0,17 (± 0,2)	0,7/0
OP-Zeit (min.)	238 (± 141)	683/45
Frischgasfluss(L/Min.)	0,71 (± 0,2)	1,2/0,2
expir. Desflurankonzentration (%)	4,7 (± 0,6)	6,2/3,4

AMF (Atem-Minuten-Volum); AF (Atemfrequenz); MAC (Minimale alveoläre Konzentration); M (Mittelwert); ST (Standartabweichung)

3.2 Datengewinnung Desfluran

Im Rahmen dieser *AIR-Study* wurden insgesamt 6903 g flüssiges Desfluran verbraucht. Die geringste Menge Desfluran, die während einer Operation verwendet wurde, betrug 21 g, die größte Menge lag bei 341 g. Im Mittel belief sich der Verbrauch pro Narkose auf 86 g.

Die durchschnittlichen endexpiratorische Desflurankonzentration lag bei 4,6%. Zum Zeitpunkt der Extubation lag sie bei 0,8%. Der höchste gemessene Wert lag bei 1,5%, der niedrigste bei 0,2%.

Durch Leckagen im Atemsystem gingen bis zu 0,66 L/min. Atemgas verloren ($\emptyset = 0,171 \text{ L/min.}; \pm 0,198 \text{ L/min.}$),

3.3 Datengewinnung CONTRAfluranTMFilter

Die 80 analysierten Studienfilter zeigten – direkt nach Ende der Operation gewogen – eine kumulierte Gewichtszunahme von 2509g. Der Filter hat mindestens 4,8g an Gewicht zugenommen und maximal 232g ($\emptyset = 31,4\text{g}; \pm 32\text{g}$).

3.4 Gewichtszunahme des nicht-desorbierten CONTRAfluranTMFilter

Die Gewichtszunahme des Filters gab einen Hinweis darauf, wie viel Desfluran im späteren Wiedergewinnungsprozess tatsächlich zurückgewonnen werden konnte.

Während in der Zeitspanne vom 07.04.21 bis zum 07.07.21 insgesamt 6903g Desfluran verbraucht wurden, haben die Filter direkt nach der Operation 2509g Gewicht zugenommen. Die Gewichtszunahme der Absorber nach OP-Ende entsprach 36,4% des verwendeten Desflurans.

Anhand der Abbildung 4 ist zu erkennen, dass es deutliche Unterschiede zwischen dem verbrauchten Anästhetikum Desfluran und der Gewichtszunahme des Filters gab.

Abbildung 4 Darstellung der Menge des verbrauchtem und wiederverwendbaren Desfluran in Gramm sowie die Gewichtszunahme des Filtergewichts (CONTRAfluran™Filter) in Gramm (eigene Darstellung)

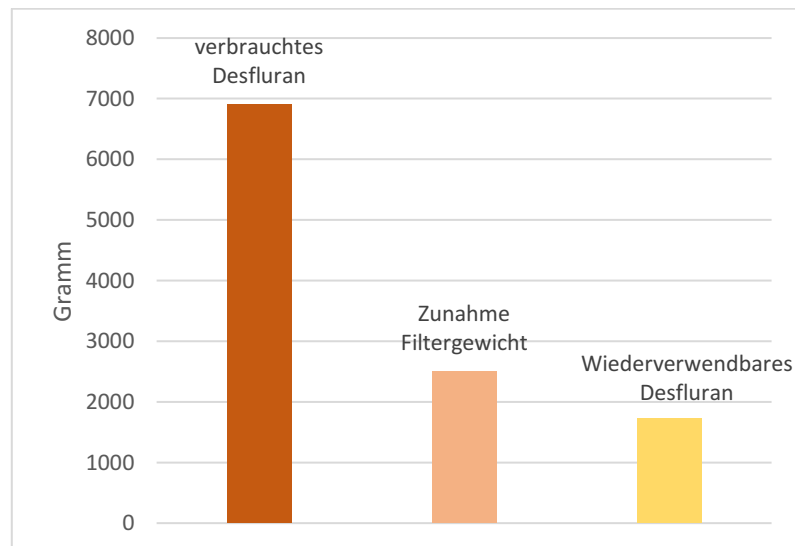
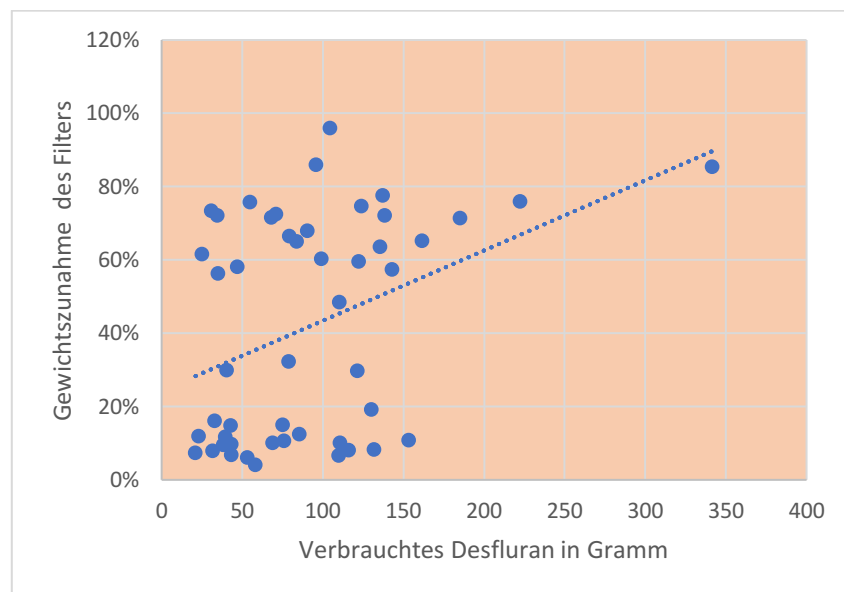


Abbildung 5 Prozentuale Gewichtszunahme des Filters bezogen auf die Menge an verbrauchtem Desfluran (eigene Darstellung)



3.5 Ergebnisse Desorption durch Firma ZeoSys Medical GmbH

Durch die Desorption der Filter bei der Firma ZeoSys Medical GmbH konnte 1727g Desfluran zurückgewonnen werden. Das gewonnene Desfluran wurde durch eine GC-Chromatographie nach Reinheitsmethode überprüft. Dort zeigte sich eine Reinheit von 99,845% bei der Retentionszeit von Desfluran (siehe Anhang).

Bei einer verwendeten Menge an Desfluran von 6903g und einer desorbierten Masse an Desfluran von 1727g ergab sich eine Recovery von ca. 25%. Die Recovery entsprach der prozentual wiederverwendbaren Menge an Desfluran nach der Desorption, gemessen an dem Gesamtanteil des verwendeten Desfluran.

3.6 Multivariable Regressionsanalyse

Die Recovery von Desfluran nach der Desorption lag bei insgesamt ca. 25%. Ein Viertel des ursprünglich verwendeten Desflurans konnten nach dem Rückgewinnungsprozess tatsächlich wiederverwendet werden.

Um zu verstehen, welche Faktoren die Wiedergewinnung des Desflurans beeinflusst haben, wurde zunächst die Gewichtszunahme des einzelnen Filters nach der Operation betrachtet.

Die prozentuale Gewichtszunahme der Filter nach jeder Operation lag durchschnittlich bei $43\% \pm 30\%$. Dies deutete bereits auf eine hohe Streuung zwischen den einzelnen Filtern und Operationen hin und bildete die Basis für eine multivariate Analyse. Dabei wurde angenommen, dass mehrere Einflussfaktoren die Rückgewinnungsrate von Desfluran bzw. die Zunahme des Filtergewichts beeinflusst haben.

Nachteil einer multivariaten negativen binomealen Regressionsanalyse ist seine Empfindlichkeit gegenüber Ausreißern.

Dies bedeutet, dass einzelne besonders hohe oder niedrige Werte die Ergebnisse deutlich beeinflussen können. Bei vielen Variablen kann es zudem zu einer Multikollinearität kommen. Dies meint, dass, wenn viele Einflussfaktoren gleichzeitig betrachtet werden, einige dieser Faktoren untereinander eng miteinander zusammenhängen und sich dadurch gegenseitig beeinflussen könnten. Hierdurch ist ihr jeweiliger einzelner Einfluss auf den eigentlich untersuchten Parameter schwerer eindeutig zuzuordnen. Die eingeschlossenen Daten in der multivariaten Analyse boten nur eine begrenzte Übertragbarkeit auf den klinischen Alltag. Die Ergebnisse galten für die untersuchten Bedingungen mit den entsprechenden Materialien. Unterschiedliche OP-Szenarien, -Geräte und -Abläufe wurden hier nicht abgebildet. Vorteilhaft war die objektive Datengrundlage. Die Gewichtszunahme lieferte eine einfach messbare, quantitative Messgröße, die direkt aus dem klinischen Alltag gewonnen werden konnte. Durch die gleichzeitige Betrachtung mehrerer Einflussfaktoren konnten Zusammenhänge erkannt werden, die mit einer einfachen Auswertung nicht gesehen worden wären. Dadurch konnten Einflussfaktoren identifiziert werden, die im klinischen Alltag angepasst werden könnten, um die Wiedergewinnung von Desfluran zu verbessern.

Eine solche multivariate negative binomiale Regressionsanalyse wurde auf Grundlage dieser Studie durchgeführt, um Einflussfaktoren auf die Rückgewinnungsrate von Desfluran zu identifizieren. Die daraus gewonnenen Ergebnisse werden hier im Folgenden dargestellt (1).

Tabelle 3 : Parameter für die Gesamtkohorte und Patienten mit einer niedrigen und hohen Rückgewinnungsrate an Desfluran in Prozent-basierend auf dem Median in der Kohorte. Dargestellt ist die Häufigkeit (Prävalenz in %) oder der Median (Interquartilbereich (25.-75-Perzentile)) (**eigene Darstellung nach (1)**)

	Total (n=80)	Zurückgewonnenen Desfluran ≤ 52,3% (n=40)	Zurückgewonnenes Desfluran ≥ 52,3% (n=40)	p- Wert
BMI (kg/m ²)	26,4 (24,6- 28,7)	26,4 (24,4-28,5)	26,2 (24,6 - 29,1)	0,54
Op-Dauer (min)	238 (105- 349)	340 (240-381,5)	112,5 (73,5-231,5)	< 0,001
Leckage zum Schnitt (L/min)	0 (0-0,1)	0 (0-0)	0 (0-0,2)	0,025
AMV (L/min)	6,5 (5,5- 7,5)	6,7 (5,8-8,1)	6,2 (4,9-7)	0,01
AF (Atemzug pro Minute)	12 (12-14)	13 (12-15)	12 (10,5-14)	0,012
Frischgassfluss (L/min)	0,8 (0,5- 0,8)	0,7 (0,5-0,8)	0,8 (0,7-0,9)	0,095
Endtidale Desflurankonzentration (%)	4,6 (4,2-5)	4,8 (4,3-5,3)	4,5 (4,1-4,8)	0,051
MAC	0,8 (0,8- 0,9)	0,9 (0,8-0,9)	0,8 (0,7-0,9)	0,002
endtidale Desflurankonzentration zum Extubation (%)	0,8 (0,6-1)	0,9 (0,8-1,1)	0,8 (0,6-0,9)	0,01
Operationsraum				<0,001
1	13 (16%)	1 (3%)	12 (30%)	
2	28 (35%)	1 (3%)	27 (68%)	
3	39 (49%)	38 (95%)	1 (3%)	

In die multivariaten Analyse wurden die Patienten- und Narkosegas-bezogenen Parameter für die dazugehörigen 80 Filter eingeschlossen. Zudem fand eine Trennung zwischen den Filtern mit einem niedrigen 50-Prozent Quartil ($\leq 52,3\%$) und ein 50-Prozent Quartil mit hohem ($> 52,3\%$) Anteil von zurückgewonnenem Desfluran statt. Durch die Zuteilung der einzelnen Filter in eine Gruppe mit niedrigerer und höherer Rückgewinnungsrate, konnten signifikante Aussagen bezüglich der jeweiligen Einflussfaktoren auf diese Rückgewinnungsrate getätigt werden.

Die Analyse zeigte, dass bei dem BMI ($p=0,54$) und dem Frischgasfluss ($p=0,095$) kein signifikanter Unterschied zwischen diesen beiden Gruppen existierte.

Eine längere OP-Zeit ($p < 0,001$), ein höherer MAC ($p=0,02$) und eine höhere end-tidale Desflurankonzentration bei Extubation ($p=0,01$) sind mit einer niedrigeren Rückgewinnung von Desfluran assoziiert. Die Beatmungsparameter AF ($p=0,012$) und AMV ($p=0,01$) beeinflussen ebenfalls die Rückgewinnung, höher eingestellte Parameter sind mit einer niedrigeren Rückgewinnung von Desfluran in Verbindung zu setzen.

Durch die multivariable negative binomiale Regressionsanalyse konnte ein zentrales Erkenntnis gewonnen werden. In OP-Saal 3 finden sich fast ausschließlich Filter mit einer niedrigen Rückgewinnung von Desfluran wieder ($p<0,001$). 95% der hier eingesetzten Filter zeigten eine Rückgewinnung von $\leq 52,3\%$ des verwendeten Desflurans. Dies hing mit längeren Operationszeiten, höheren MAC-Werten und höheren end-tidalen Desflurankonzentrationen bei Extubation zusammen. Fast 50% der in der Studie eingesetzten Filter, wurden im OP-Saal 3 verwendet.

Wenn die Filter aus OP-Saal 3 nicht berücksichtigt werden, zeigt sich bei einer Verwendung von 2861g Desfluran in OP-saal 1 und 2 und eine Gewichtszunahme der Filter von 1911g und damit eine prozentuale Zunahme von 68% in diesen beiden Sälen vor dem eigentlichen Desorptionsverfahren. Somit könnte die Recovery maximal 68% betragen.

4.0 Diskussion

In der Studie wurden insgesamt 6903g Desfluran zur Aufrechterhaltung der inhalativen Anästhesie verwendet. Direkt nach der Operation gewogen zeigt sich in den Filtern eine Gewichtszunahme von 2509g. Durch die Desorption konnten 1727g wiedergewonnen werden. Dies entspricht 25 Prozent des verwendeten Desflurans.

Ziel war es, die tatsächliche Effektivität des CONTRAfluran™-Systems im klinischen Alltag zu bewerten. Mithilfe dieser Studie konnte hierüber ein Einblick gewonnen werden.

4.1 Technische Limitationen des Filtersystems

Bei der Frage nach technischen Limitationen des Filtersystems musste sich mit zwei möglichen „Verlust“-Quellen auseinandersetzen werden: der Möglichkeit einer unvollständigen Desorption durch den Filter und dem Verlust beim Desorptionsverfahren selbst. Die zwei Punkte sollen im Folgenden kritisch diskutiert und eingeordnet werden.

In Studien der Firma ZeoSys konnte gezeigt werden, dass 99% des durch den Filter laufenden Sevoflurans oder Desflurans durch die sich im Filter befindende Aktivkohle absorbiert werden. Somit kann eine unvollständige Absorption als Hauptursache für eine geringe Rückgewinnungsrate weitestgehend ausgeschlossen werden.

Zwischen der kumulativen Filtergewichtszunahme direkt nach der Operation von 2509g und dem zurück gewonnenen Desfluran von 1727g gibt es eine Diskrepanz von 782g. Der Verlust von 11% nach dem Desorptionsverfahren lässt darauf schließen, dass ein wesentlicher Faktor für die niedrige Rückgewinnungsrate wahrscheinlich das verwendete Desorptionsverfahren war. Die Firma ZeoSys nutzte hierfür das Verfahren, das ursprünglich für Sevofluran entwickelt worden ist. Zur Desorption sind eine spezifische Erhitzung und

anschließende Abkühlung des jeweiligen Narkosegases notwendig gewesen. Da Desfluran einen deutlich niedrigeren Siedepunkt (23,5°C) als Sevofluran (58,5°C) hat, musste der Desorptionsprozess entsprechend daran angepasst werden. Die Studie von Mulier et al. (2024) untersuchte die Recovery von Sevofluran durch das CONTRAfluran™-Filtersystem. Hier zeigte sich eine deutlich höhere Recovery von durchschnittlich 45%, vermutlich durch die bessere Kondensation bei höherem Siedepunkt des Sevoflurans während des Desorptionsverfahrens mittels Kühlspirale. Damit verbunden ist die bessere Abstimmung des Desorptionsverfahrens auf die physikalischen Eigenschaften dieses inhalativen Anästhetikums (23).

Es ist anzunehmen, dass eine bessere Abstimmung des Desorptionsverfahrens an die physikalischen Eigenschaften des Desflurans das größte Potential zur Steigerung der Rückgewinnungsrate haben. Das Verfahren könnte durch eine möglichst vollständige Sättigung des Filters mit Narkosegas ebenfalls positiv beeinflusst werden (siehe Abbildung 1).

4.2 Unvollständige Absorption während der Narkose

4.2.1 Geringere Desfluran-Rückgewinnung bei DaVinci-gestützten Operationen

Ein wesentliches Ergebnis dieser Studie war die geringe Rückgewinnung von Desfluran im Operationsaal 3. In Diesem Saal fanden sich fast ausschließlich Filter mit einer Gewichtszunahme unter 52,3%. Ohne diesen Saal zeigte sich eine Gewichtszunahme der Filter um 68% direkt nach der Operation.

In der Uniklinik Düsseldorf fanden in diesem urologischen Saal überwiegend roboter-assistierte laparoskopische Eingriffe mit dem DaVinci-System statt. Bei diesen Eingriffen wurde ein Kapnoperitoneum erzeugt.

Dies geschah durch eine kontinuierliche Applikation von CO₂, was zu einem ständigen Gasfluss von bis zu 20 Litern pro Minute CO₂ im Bauchraum und einem intraperitonealen Druck von 12 bis 20 cm H₂O führte. In Kombination mit der steilen Trendelenburg-Position kam es zu erhöhten intrathorakalen Drücken und damit zu einer veränderten Atemmechanik mit einem höheren Atemwegsdruck. Beides waren Faktoren, die zu einer veränderten Gasverteilung im Atemsystem führten. Der erhöhte CO₂-Gehalt im Abdomen und folglich im Blut machten ein höheres Atemminutenvolumen nötig, um das Abatmen des CO₂ zu gewährleisten. Der erhöhte Atemwegsdruck führte außerdem zu größeren Leckagen am Cuff des Tubus. Mulier et al. (2024) beschrieben ebenfalls eine reduzierte Rückgewinnung bei vergleichbaren Operationsbedingungen (23). Somit lieferten die Ergebnisse einen Hinweis darauf, dass robotisch-assistierte laparoskopische Eingriffe mit einer intra-/retroperitonealen CO₂-Applikation und erhöhtem Beatmungsdruck ungünstige Voraussetzungen darstellten.

4.2.2 Verluste durch Leckagen im Atemsystem

Nicht zu vernachlässigen waren Leckagen im Atemsystem. Sie führten zu unkontrollierbaren Verlusten von Desfluran, welches dem Filtersystem nicht zur Absorption zur Verfügung stand. Die durchschnittliche Leckage 30 Minuten nach Schnitt lag bei 0,17L/min, mit einem Maximalwert bis 0,66 L/min. Leckagen traten durch Undichtigkeiten des Tubus und Atemschlauchsystems auf. Im Rahmen der Studie fand ausschließlich eine endotracheale Intubation mit einem Magill-Tubus statt. Diese Form der Atemwegssicherung verzeichnete, anders als bei der supraglottischen Atemwegssicherung, eine vergleichsweise geringe Leckage. Dennoch sollte zukünftig über eine Reduktion von Leckagen an dieser Stelle nachgedacht werden.

4.2.3 Einfluss der Narkosedauer und des Frischgasflows

In unserer Studie waren die AnästhesistInnen durch eine bestehende Verfahrensanweisung dazu angehalten, die Narkose im Sinne einer Niedrig-Fluss-Narkose einzustellen. Der durchschnittliche Frischgasfluss lag bei 0,7 L/min.

Eine externe Studie zeigte, dass durch die Reduktion des Frischgasflusses auf 1 L/min unter Simulationsbedingungen bei Desfluran und anderen inhalativen Anästhetika eine prognostizierte Kostenreduktion von 48 % erreicht werden konnte. Gleichzeitig sanken die Kohlendioxid-Äquivalent-Emissionen um etwa 42 Prozent (24).

Diese Technik der Niedrig-Fluss-Anästhesie reduziert den Narkosemittelverbrauch, schont Ressourcen und senkt gleichzeitig die Emission von Treibhausgasen.

Allerdings gab die Studie von Mulier et al. Hinweise darauf, dass genau diese Maßnahme die Effizienz der Absorption durch den CONTRAfluran™-Filter limitierten (23).

Ein niedriger Frischgasfluss führte zu einer stärkeren Zirkulation des inhalativen Anästhetikums wodurch weniger Atemgas kontinuierlich durch den Filter geführt wurde. Ein höherer Frischgasfluss hingegen erhöht den Gasaustausch und könnte somit die Effektivität der Absorption verbessern – dies allerdings zulasten des Narkosemittelverbrauchs und der Umweltbilanz. Hier zeigt sich ein Konflikt zwischen ökologischer Verantwortung und Verbesserung der Absorption des Filters. Zukünftige Studien müssten untersuchen, ob eine balancierte Strategie, z.B. durch die nur phasenweise Erhöhung des Frischgasflusses, praktikabel und nachhaltig umsetzbar ist. Wie auch der Frischgasfluss scheint die Dauer der Narkose Einfluss auf die Menge an absorbierten Desfluran gehabt zu haben. Es zeigte sich ein signifikanter Anstieg der absorbierten Menge an Desfluran bei einer kürzeren Narkosedauer als auch bei einem höheren Frischgasfluss, sowohl in unserer Studie als auch in der von Mulier et al. (23).

4.3 Verluste durch unvollständige Elimination des Desflurans beim Patienten

Ein relevanter Anteil des während einer Narkose eingesetzten Desflurans verblieb zum Zeitpunkt der Extubation noch im Körper des Patienten und stand dem Filtersystem daher nicht zur Absorption zur Verfügung. Diese Verluste waren insbesondere in Anbetracht der eigentlich hohen Absorptionsfähigkeit des CONTRAfluran™-Filters von Bedeutung und stellten damit eine entscheidende Limitierung des Systems durch den Menschen dar.

Die Elimination von Desfluran erfolgte hauptsächlich über die Lunge, wobei sie durch verschiedene physiologische Faktoren beeinflusst wurde, dazu gehören die Löslichkeit im Blut, die Dauer der Anästhesie und die inspiratorische Anästhesiegaskonzentration (16).

Pharmakokinetische Untersuchungen zeigten, dass sich die Elimination von Desfluran in eine initial schnelle Phase und eine anschließende deutlich langsamere Phase unterteilen lässt. Die Studie von Lu et al. (2024) beschrieb diese Phasen anhand eines Zwei-Kompartimenten-Modells bei Untersuchungen an Ferkeln. Bei dem Zwei-Kompartiment-Modell wurde davon ausgegangen, dass der Körper aus zwei Bereichen besteht: einem zentralen Kompartiment, das vor allem Blut und gut durchblutete Organe umfasst, und einem peripheren Kompartiment, in dem das Gas langsamer verteilt wird. Direkt nach Beendigung der Narkose wurde Desfluran zunächst schnell aus dem zentralen Kompartiment eliminiert, was die erste, schnelle Phase der Ausscheidung darstellte.

Anschließend folgte eine zweite, deutlich langsamere Phase, in der das Desfluran aus den weniger gut durchbluteten Geweben des peripheren Kompartiments freigesetzt wurde. Diese biphasische Elimination erklärte, warum nach zwei Stunden in der Studie nur knapp ein Viertel des verabreichten Desflurans aus dem Körper eliminiert wurde (25).

Das Tiermodell hilft somit, die komplexe Verteilung und Ausscheidung von Desfluran über die Zeit zu erklären.

Im klinischen Alltag wurde die Zufuhr des inhalativen Anästhetikums in der Regel erst wenige Minuten vor der Extubation beendet. Auch in unserer Studie war dies der Fall, weshalb sich die Patienten zum Zeitpunkt der Extubation noch in der frühen Eliminationsphase befanden. Die expiratorische Desflurankonzentration zum Zeitpunkt der Extubation lag im Mittel bei 0,8 % und belegt, dass Desfluran zu diesem Zeitpunkt weiterhin im Körper gelöst war und abgeatmet wurde. Darüber hinaus blieb Desfluran nicht nur in der Lunge, sondern auch in Blut und Gewebe gespeichert. Wie aus dem Mamillar-Vier-Kompartiment-Modelle von G. Lockwood (2010) hervorging, verbleibt Desfluran nach einer vierstündigen Anästhesie in relevanten Restmengen im Körper und verteilt sich weiterhin in Blut und Gewebe. Selbst zu einem Zeitpunkt, an dem die Konzentration im Gehirn bereits um 99,9% reduziert ist (nach etwa 33 Stunden), befinden sich noch etwa 3 bis 14% der ursprünglich verwendeten Menge an Desfluran im übrigen Körper des Patienten (17).

Diese langsame Elimination erklärt, warum ein erheblicher Teil des Desflurans nach dem Ende der Narkose und der Entfernung des endotrachealen Tubus über längere Zeit hinweg abgeatmet wurde und somit dem Filtersystem nicht zur Absorption zur Verfügung stand.

Die pharmakokinetischen Eigenschaften des Desflurans passten zu der fehlenden Gewichtszunahme des Filters durch eine mangelnde Absorption von Narkosegas unmittelbar nach der Operation. Die Daten legten nahe, dass ein relevanter Anteil des Desflurans dem Filtersystem nicht zur Absorption zur Verfügung stand, weil es zum Zeitpunkt der Extubation noch im Körper des Patienten gespeichert war. Dieser Teil wurde nicht über die Lunge abgeatmet, sondern verblieb in gut durchbluteten Geweben und tieferen Kompartimenten. Damit wurde deutlich, dass nicht allein technische oder Leckage-bedingte Faktoren die Recovery begrenzten. Vielmehr war die unvollständige Elimination von Desfluran aus dem

menschlichen Körper ein maßgeblicher limitierender Faktor für die Effizienz des Filtersystems.

Da eine vollständige pulmonale Elimination des Desflurans zum Zeitpunkt der Extubation im klinischen Alltag nicht zu realisieren ist, kann auch das effizienteste Filtersystem nur den Teil des Desflurans zurückgewinnen, der auch tatsächlich das System durchläuft. Dieses Problem lässt sich nicht allein durch technische Verbesserungen am Filter und dem Desorptionsverfahren beheben.

Es erfordert ein gezieltes Narkosemanagement mit kürzeren OP-Zeiten, niedrigeren MAC-Werten sowie möglichst niedrigen AF und AMV. Denn je geringer die verwendete Menge an Desfluran während der Operation und damit im Patienten ist, desto weniger Desfluran verbleibt nach der Narkose im Patienten.

4.4 Kritische Betrachtung der Methode

Die Verluste, welche beim Wechsel des Atemkalks oder beim Diskonnektieren des Tubus auftraten, fanden in dieser Studie keine Berücksichtigung. Hier ist anzunehmen, dass es sich nur um geringe Verluste von Atemgas handelt, mit nur einer sehr geringen Auswirkung auf die Studie selbst.

Bei genauerer Betrachtung ergab sich die theoretische Möglichkeit eines Narkosegasresiduums im Applikationssystem des Narkosegerätes. Desfluran könnte in diesem Residuum enthalten sein und würde dadurch nicht vollständig in das angeschlossene Filtersystem geleitet werden. Dies könnte Einfluss auf die Recovery von Desfluran aus dem Filtersystem gehabt haben. Aufgrund des Fehlens einer Erfassungsmethode wurde dies jedoch vernachlässigt.

Nach der Absorption des Desflurans wurden die Filter bis zum Desorptionsverfahren mehrere Wochen trocken und lichtgeschützt gelagert. Potenzielle Veränderungen während dieser Lagerungszeit, wie eine Wechselwirkung der Aktivkohle mit Umgebungsfeuchtigkeit, wurden in dieser Studie nicht gesondert untersucht.

Unter den gewählten Lagerungsbedingungen erscheint ein wesentlicher Einfluss auf die Ergebnisse jedoch unwahrscheinlich.

Auch das klinische Setting verlangte eine kritische Einordnung. Ziel war es, den Filter unter Alltagsbedingungen zu prüfen. Der Versuchsaufbau entsprach diesem Anspruch jedoch nur teilweise. Eingeschlossen wurden ausschließlich Patienten mit endotrachealer Intubation. Narkosen mit supraglottischen Atemwegshilfen wurden ausgeschlossen, da hier höhere Leckagen und größere Gasverluste zu erwarten sind. Operationen an Lunge und Pleura fanden ebenfalls keine Berücksichtigung, da sie mit deutlichen pulmonalen Leckagen verbunden sind.

Weiterhin wurde der Filter nach jedem Einsatz gewechselt und nie vollständig mit Desfluran gesättigt, obwohl Hinweise vorliegen, dass eine vollständige Sättigung der Filter die Rückgewinnung von Desfluran steigern könnte (23). Auch Narkosen mit kombiniertem Einsatz intravenöser Anästhetika und Desfluran wurden ausgeschlossen.

Die Studie lieferte damit Daten zur Recovery von Desfluran und erlaubte Aussagen über den Einfluss der Narkoseführung auf diese. Eine Übertragung der Ergebnisse auf den gesamten klinischen Alltag ist jedoch nur eingeschränkt möglich. Diesbezüglich sind weitere Studien in einem Klinik-näheren Setting nötig, in denen verschiedene Intubationsverfahren und Narkoseführungen berücksichtigt werden.

4.5 Fazit

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass eine Recovery von Desfluran unter klinischen Bedingungen grundsätzlich möglich ist, jedoch durch technische, methodische und patientenbezogene Faktoren begrenzt wird. Besonders die unvollständige pulmonale Elimination zum Zeitpunkt der Extubation und die fehlende Anpassung des Desorptionsverfahrens durch den Hersteller an die physikalischen Eigenschaften von Desfluran

stellten eine Limitation dar. Die Studie verdeutlicht damit sowohl die Chancen als auch die Grenzen des CONTRAfluran™-Filters im klinischen Alltag. Künftige Untersuchungen sollten auf eine Optimierung des Desorptionsverfahrens, eine vollständige Sättigung der Filter und realitätsnähere klinische Settings fokussieren, um das volle Potenzial der Filter ausschöpfen zu können. Damit leistet die Arbeit einen Beitrag zur Weiterentwicklung nachhaltiger Anästhesieverfahren und unterstreicht die Verantwortung der Anästhesiologie im Kontext des Klimawandels.

5.0 Literaturverzeichnis

1. Hinterberg J, Beffart T, Gabriel A, Holzschneider M, Tartler TM, Schaefer MS, Kienbaum P. Efficiency of inhaled anaesthetic recapture in clinical practice. Br J Anaesth. 2022;129(4):e79-e81. doi:10.1016/j.bja.2022.04.009.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change. Figure 2.1: The causal chain from emissions to resulting warming of the climate system. AR6 Synthesis Report. 2023. Verfügbar unter: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/figures/figure-2-1/>. Zugriff am 20. Nov 2025.
3. World Health Organization. Climate change and health. 2023. Verfügbar unter: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>. Zugriff am 20. Nov 2025.
4. Bakan, S, Raschke E. "Der natürliche Treibhauseffekt." Promet. 2002;28:85-94.
5. Statista. Verteilung der CO₂-Emissionen weltweit nach Sektor 2024. 2025. Verfügbar unter: <https://www.statista.com/>. Zugriff am 20. Nov 2025. Verteilung der Co2-Emission weltweit nach Sektor 2024, statista. Veröffentlicht 2025, Datum 20.11.2025.
6. Karliner J, Slotterback S, Boyd R, Ashby B, Steele K. Health care's climate footprint. How the health sector contributes to the global climate crisis and opportunities for action. European Journal of Public Health, 2020; 1101-1262
7. MacNeill AJ, Lillywhite R, Brown CJ. The impact of surgery on global climate: a carbon footprinting study of operating theatres in three health systems. Lancet Planet Health. 2017;1(9):e381-e388.
8. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment

Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
Cambridge: Cambridge University Press; 2021. Glossary

9. Koch, S., Pecher, S. New challenges for anesthesia due to the climate change. *Der Anaesthesist* 2020; 454

10. Gschrey B, Schwarz W, Kimmel T, Zeiger B, Reitz S. Implementierung der ab dem Berichtsjahr 2013 gültigen IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2006 in die Inventurerhebung fluorierter Treibhausgase (HFKW, FKW, SF6, NF3). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt; 2015.
Verfügbar unter:
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_17_2015_implementierung_der_ab_dem_berichtsjahr_2013.pdf. Zugriff am 23. März 2020.

11. Charlesworth M, Swinton F. Anaesthetic gases, climate change, and sustainable practice. *Lancet Planet Health* 2017; 1(6):e216–e217.

12. Rübsam ML, Kruse P, Dietzler Y, Kropf M, Bette B, Zarbock A, et al. A call for immediate climate action in anesthesiology: routine use of minimal or metabolic fresh gas flow reduces our ecological footprint. *Can J Anaesth.* 2023;70(3):301-12.

13. Myhre G, Shindell D, Bréon FM, Collins W, Fuglestad J, et al. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press; 2013. p. 659-740.

14. Wyssusek KH, Chan KL, Eames G, Whately Y. Greenhouse gas reduction in anaesthesia practice: a departmental environmental strategy. *BMJ Open Qual.* 2022;11(3):e001867. doi:10.1136/bmjopen-2022-001867.

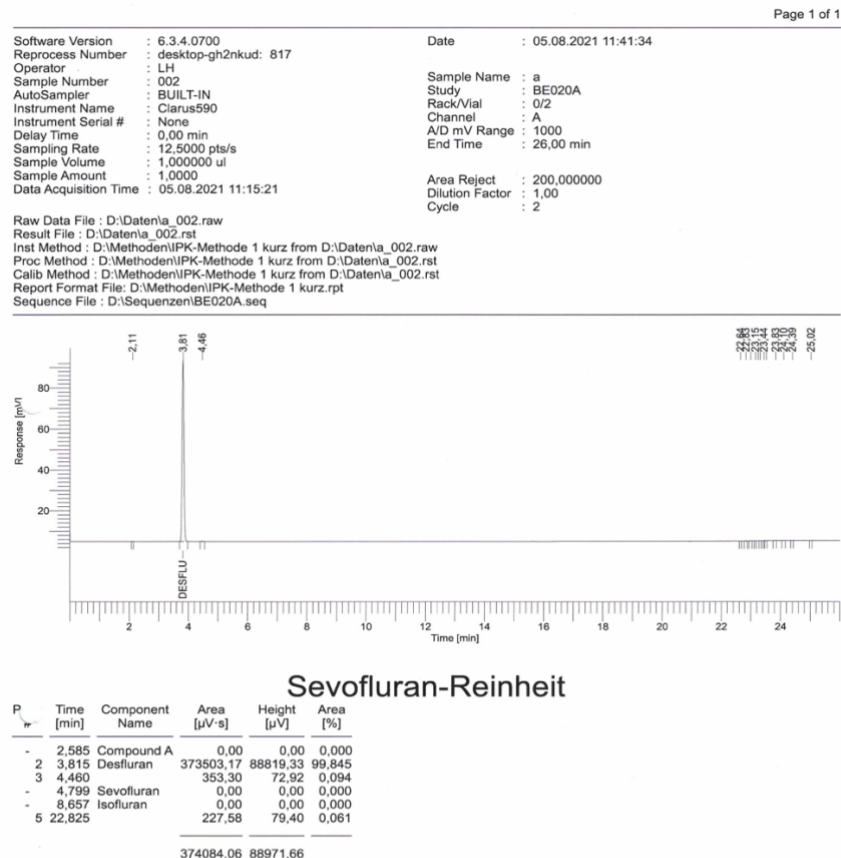
15. Larsen R. Inhalationsanästhesie. In: *Anästhesie und Intensivmedizin für die Fachpflege*. 9. Aufl. Berlin: Springer; 2016. p. 139-151.

16. Patel SS, Goa KL. Desflurane: a review of its pharmacodynamic and pharmacokinetic properties and its efficacy in general anaesthesia. *Drugs.* 1995;50(4):742-767.

17. Lockwood GG, White DC, Preston PG. Theoretical context-sensitive elimination times for inhalation anaesthetics. *Anaesthesia*. 2010;65(12):1225-1233. doi:10.1111/j.1365-2044.2010.06527.x.
18. Schuster M, Richter H, Pecher S, Koch S, Coburn M. Positionspapier mit konkreten Handlungsempfehlungen: ökologische Nachhaltigkeit in der Anästhesiologie und Intensivmedizin. *Anaesth Intensivmed*. 2020;61:329-339. doi:10.19224/ai2020.329.
19. Zeosys Medical GmbH
CONTRAfluran™ Instruction for Use / Gebrauchsanweisung 2021.
20. Drägerwerk AG & Co. KGaA. Mini-Handbuch Beatmung: Beatmungsmodi und Funktionen kurz erklärt. Version 1.1. Lübeck: Dräger; o.J.
21. Larsen R. Inhalationsanästhesie. In: *Anästhesie und Intensivmedizin für die Fachpflege*. 9. Aufl. Berlin: Springer; 2016. p. 139–151
22. Baum J, Aitkenhead AR. Inhalational anaesthesia with low fresh gas flow. *Br J Anaesth*. 1994;72(4):435–440.
23. Mulier, H., Struys, M.M.R.F., Vereecke, H., Rex, S., Teunkens, A. and Kalmar, A.F. (2024), Efficiency of CONTRAfluran™ in reducing sevoflurane pollution from maintenance anaesthesia in minimal flow end-tidal control mode for laparoscopic surgery. *Anaesthesia*, 79: 849-855. <https://doi.org/10.1111/anae.16289>
24. Edmonds A, Stambaugh H, Pettey S, Daratha KB. Evidence-Based Project: Cost Savings and Reduction in Environmental Release With Low-Flow Anesthesia. *AANA J*. 2021;89(1):27–33.

25. Lu C-C, Tsai C-S, Ho S-T, Hu OY-P, Lin T-C, Chiang JJ, et al. Pharmacokinetics of desflurane elimination from respiratory gas and blood during the 20 minutes after cardiac surgery. J Formos Med Assoc. 2013;112(4):185–192. doi:10.1016/j.jfma.2012.01.017.

6.0 Anhang



Quelle: Ewers, K. (2021): GC-Chromatographie nach SEVOfluran-Reinheitsmethode. Persönliche Mitteilung per E-Mail vom 19.08.2021, ZeoSys Medical GmbH, Luckenwalde

7.0 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich Danke sagen.

Zunächst möchte ich meinem Doktorvater danken, Professor Doktor Peter Kienbaum. Vielen Dank für die Vergabe des Promotionsthemas, für die Beantwortung meiner unzähligen Fragen, für Ihre konstruktive Kritik und vor allem für Ihre inspirierenden Ideen und das Ermutigen, „dran zu bleiben“.

Meine Zeit in der Anästhesie wäre nichts ohne Dich gewesen – Andi (Frau Doktor Andrea Gabriel). Andi, vielen Dank für Deine Unterstützung, Deinen Einsatz und für die tolle, daraus hervorgegangene Freundschaft.

Ein großer Dank geht an meine Familie. Die Zeit war lang und nicht immer leicht. Danke, dass Ihr mich trotzdem auf diesem Weg begleitet habt. Das geht an Euch: Michael, Martina, Robert, Charlotte, Josua, Engelbert, Veronika, Marianne, Watson, Noa – Danke!

Danke an meine Freunde, die meine Arbeit immer wieder gegenlesen mussten – Pia und Sina.

Ein Dank geht auch an Doktor Jonas Hinterberg für das Schreiben unseres Papers, die Einarbeitung und die anfängliche Betreuung.

Eidesstattliche Versicherung (gem. § 7 (2) PO)

Ich versichere an Eides Statt, dass die Dissertation von mir selbständig und

ohne unzulässige fremde Hilfe unter Beachtung der Grundsätze zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf sowie der Richtlinien der Medizinischen Fakultät zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis erstellt worden ist. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Inhalte wurden als solche kenntlich gemacht.

Ich bin mir darüber klar, dass der Bruch der obigen eidesstattlichen Versicherung in jedem Fall zum Nichtbestehen der betreffenden Promotionsleistung führt und die weitere Folge hat, dass die Fakultät über die Entziehung des Doktorgrades entscheidet (§ 16 Promotionsordnung). Die strafrechtlichen Konsequenzen einer falschen eidesstattlichen Versicherung sind mir bekannt (§156 StGB). Des Weiteren kann gemäß

§ 63 Absatz 5 HG eine Zuwiderhandlung mit einer Geldbuße von bis zu 50.000 € geahndet werden. Der/Die Antragsteller/in erklärt sich mit einer Überprüfung der Dissertationsschrift mittels einer Plagiatssoftware einverstanden.

Ich versichere weiterhin, dass alle von mir gemachten Angaben wahrheitsgemäß und vollständig sind.

17.03.2026

Theresa Veronika Beffart