

Aus dem Fachbereich Medizin
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
Frankfurt am Main

betreut an der
Klinik für Anästhesiologie, Intensivmedizin und Schmerztherapie
Direktor: Prof. Dr. Dr. Kai Zacharowski

**Green Hospital – ökologischer und ökonomischer Vergleich von
Einweg- und Mehrwegartikeln in der Anästhesiologie**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
des Fachbereichs Medizin
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
Frankfurt am Main

vorgelegt von
Vanessa Maike Hettler

aus Lich

Frankfurt am Main, 2023

Dekan: Prof. Dr. Stefan Zeuzem
Referentin: Prof. Dr. Andrea Steinbicker
Korreferentin: Prof. Dr. Eileen Mabel Wanke
Tag der mündlichen Prüfung: 01.07.2024

Inhalt

1	Einleitung	7
1.1	Der Klimawandel	7
1.2	Die Bedeutung des Gesundheitssektors für den Klimawandel	9
1.3	Die Bedeutung der Anästhesiologie für den Klimawandel	9
1.4	Einweg- und Mehrwegartikel in der Anästhesiologie	10
1.5	Zielsetzung der Arbeit	11
2	Material und Methoden	12
2.1	Das Klinikum	12
2.2	Die untersuchten Sachartikel	12
2.2.1	Beatmungsschlauchsysteme	14
2.2.2	Beatmungsmasken	15
2.2.3	Laryngoskopspatel	15
2.3	Die Ermittlung der Kosten	16
2.4	Die Ermittlung der CO ₂ -Emissionen	21
2.4.1	Life Cycle Assessment	21
2.4.2	Prinzip der Kalkulation	22
2.4.3	CO ₂ -Emissionen der Produktion	24
2.4.4	CO ₂ -Emissionen der Entsorgung	26
2.4.5	CO ₂ -Emissionen der Aufbereitung	26
3	Ergebnisse	28
3.1	Ergebnisse der Kostenermittlung	28
3.1.1	Kosten der Einwegartikel	28
3.1.2	Kosten der Mehrwegartikel	30
3.1.3	Kostenvergleich	35
3.2	Ergebnisse der Ermittlung der CO ₂ -Emissionen	39
3.2.1	CO ₂ -Emissionen der Einwegartikel	39
3.2.2	CO ₂ -Emissionen der Mehrwegartikel	40
3.2.3	Vergleich der Umweltbilanz	42
3.3	Schlussfolgerung	47

4	Diskussion	49
4.1	Methodische Diskussion	49
4.1.2	Limitationen und methodische Einschränkungen.....	49
4.1.2.1	Limitationen der Kostenermittlung	50
4.1.2.2	Limitationen der Ermittlung der CO ₂ -Emissionen.....	51
4.2	Diskussion der Ergebnisse	54
4.3	Weitere Maßnahmen zur Senkung der Treibhausgasemissionen.....	59
5	Zusammenfassung und Ausblick	63
6	Zusammenfassung der Arbeit	65
7	Abstract	67
8	Literaturverzeichnis	69
9	Anhang	74
	Schriftliche Erklärung	75

Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die untersuchten Einwegmaterialien und ihre Eigenschaften.....	29
Tabelle 2: Gesamtkosten der Einwegmaterialien pro Nutzung in Euro	30
Tabelle 3: Komponenten des Mehrweg-Beatmungsschlauchsystems und ihre Kosten in Euro.....	31
Tabelle 4: Übersicht über die untersuchten Mehrwegmaterialien und ihre Eigenschaften.....	32
Tabelle 5: Kosten der Anschaffung und Entsorgung der Mehrwegartikel pro Nutzung in Euro	33
Tabelle 6: Gesamtkosten der Aufbereitung pro Reinigungszyklus in Euro.....	34
Tabelle 7: Gesamtkosten der Mehrwegartikel pro Nutzung in Euro.....	35
Tabelle 8: CO ₂ -Emissionen der Einwegartikel pro Nutzung in kg CO ₂ -Äquivalent.....	40
Tabelle 9: CO ₂ -Emissionen durch Materialproduktion und -entsorgung sowie Aufbereitung der Mehrwegartikel in kg CO ₂ -Äquivalent.....	41
Abbildung 1: Die Kosten eines Einweg- und eines Mehrweg-Beatmungsschlauchsystems der Länge 180 cm pro Nutzung in Euro	36
Abbildung 2: Die Kosten einer Einweg- und einer Mehrweg-Beatmungsmaske der Größe M und L pro Nutzung in Euro.....	37
Abbildung 3: Die Kosten eines Einweg- und eines Mehrweg-Laryngoskopspatels der Größe 3 und 4 pro Nutzung in Euro.....	38
Abbildung 4: Die Treibhausgasemissionen eines Einweg- und eines Mehrweg-Beatmungsschlauchsystems der Länge 180 cm pro Nutzung in kg CO ₂ -Äquivalent.....	44
Abbildung 5: Die Treibhausgasemissionen einer Einweg- und einer Mehrweg-Beatmungsmaske der Größe M und L pro Nutzung in kg CO ₂ -Äquivalent	45
Abbildung 6: Die Treibhausgasemissionen eines Einweg- und eines Mehrweg-Laryngoskopspatels der Größe 3 und 4 pro Nutzung in kg CO ₂ -Äquivalent	46

Abkürzungsverzeichnis

BDA	Berufsverband Deutscher Anästhesisten
BfArM	Bundesinstituts für Arzneimittel und Medizinprodukte
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DEFRA	Department for Environment, Food and Rural Affairs
DGAI	Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin
EU	Europäische Union
Gr.	Größe
GWP	Global warming potential
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KRINKO	Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
PP	Polypropylen
PSU	Polysulfon
PVC	Polyvinylchlorid
RKI	Robert Koch-Institut
TD	Thermische Desinfektion
VE	vollentsalzt
Zentral-OP	zentraler Operationsbereich

1 Einleitung

1.1 Der Klimawandel

Der Klimawandel und die damit verbundenen direkten und indirekten Folgen sind drängende Probleme des 21. Jahrhunderts. Es wird erwartet, dass es durch die globale Erderwärmung unter anderem zu einer Zunahme von Naturkatastrophen, Hitzewellen und Dürre, Nahrungsmittelknappheit, Artensterben und der Verbreitung von vektorübertragenen Krankheiten kommt.¹ Im Bericht des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) wird vor den unkontrollierbaren Folgen auf Mensch und Umwelt gewarnt, sollte die Klimaerwärmung das Ziel von maximal 1,5 Grad Celsius bezogen auf das vorindustrielle Level überschreiten.²

Auf der UN-Klimakonferenz 2015 erarbeiteten deshalb 195 Staaten das Pariser Abkommen, das die Begrenzung der Erderwärmung auf unter 2 Grad Celsius mit Bemühungen für eine Begrenzung auf 1,5 Grad Celsius bis zum Ende des Jahrhunderts zum Ziel hat.^{3,4} Um dies zu erreichen, wurde durch die *Europäische Union* (EU) das Europäische Klimagesetz verabschiedet, das eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um mindestens 55 % gegenüber 1990 bis zum Jahr 2030 vorsieht.³ Um die europäischen Zielvorgaben für den Klimaschutz zu erfüllen, wurde 2021 auch das Klimaschutzgesetz vom Bundestag verabschiedet. Dieses legt die Reduktion der Treibhausgase um 65 % bis 2030 gegenüber 1990 sowie das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 fest.⁵

Die Hauptursache des Klimawandels sind Treibhausgase, die natürlicherweise in der Atmosphäre vorkommen, jedoch anthropogen insbesondere durch die Nutzung fossiler Brennstoffe, Massentierhaltung und die intensive Landwirtschaft seit Beginn der Industrialisierung in großer Menge freigesetzt werden. Zu ihnen zählen Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan und Lachgas sowie die fluorierten Treibhausgase Schwefelhexafluorid, Stickstofftrifluorid und Fluorkohlenwasserstoffe.⁶ Der natürliche Treibhauseffekt ist für das Klima der Erde unerlässlich, jedoch wurden seit Beginn der Industrialisierung Treibhausgase in zuvor nicht gekannter Menge und Geschwindigkeit durch den Menschen freigesetzt. Diese haben bis zum Jahr 2017 zu einer globalen Erwärmung von 1 Grad Celsius bezogen auf das vorindustrielle Level

geführt und werden bei unverändertem Verlauf zwischen 2030 und 2052 wahrscheinlich zu einer Erderwärmung von 1,5 Grad Celsius führen.^{2,7} Die derzeitige Kohlenstoffdioxid Konzentration in der Atmosphäre ist die höchste seit mindestens 800.000 Jahren und trägt als Hauptfaktor zur Erwärmung der Erde bei.⁸⁻¹⁰ Um das Klimaziel von 1,5 Grad Celsius nicht zu überschreiten, wäre laut dem IPCC Report aus dem Jahr 2018 eine Reduktion der anthropogenen CO₂-Emissionen um 45% bezogen auf die Emissionen des Jahres 2010 notwendig.² Der Reduktion von Treibhausgasen kommt damit eine enorme Bedeutung bei der Bekämpfung des Klimawandels zu.²

Treibhausgase wirken erderwärmend durch die Absorption und Reflexion von Infrarotlicht, welches durch die Erdoberfläche abgestrahlt wird und normalerweise einen wichtigen Mechanismus zur Abkühlung darstellt.^{6,9} Der klimaerwärmende Effekt eines Gases über einen bestimmten Zeitraum (in der Regel 20, 100 oder 500 Jahre) im Vergleich zum Referenzgas CO₂ kann als *Global Warming Potential* (GWP) angegeben werden.¹¹ Damit kann der umweltschädliche Effekt für alle Treibhausgase in CO₂-Äquivalente umgerechnet und vergleichbar gemacht werden. Die Auswirkung auf das Klima berechnet sich aus dem GWP und der Masse des Gases. Dabei hat Kohlenstoffdioxid auf Grund des großen Anteils an den entstehenden Treibhausgasen eine besondere Bedeutung für den Klimawandel. Methan, Lachgas sowie die fluorierten Treibhausgase haben zwar ein deutlich höheres Erderwärmungspotenzial, sie sind jedoch auf Grund ihres geringeren Vorkommens in der Atmosphäre weniger bedeutsam.¹¹

Vor dem Hintergrund des Klimawandels spielen die Themen Nachhaltigkeit und Reduktion der Treibhausgasemissionen sowohl im öffentlichen Diskurs als auch in Wirtschaftsunternehmen sowie in privaten Haushalten inzwischen eine wichtige Rolle. Im medizinischen Bereich lag das Thema Nachhaltigkeit bisher weniger im Fokus, gewinnt jedoch auch dort in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung.

1.2 Die Bedeutung des Gesundheitssektors für den Klimawandel

Den Gesundheitssektor betreffen die Herausforderungen des Klimawandels in zweierlei Hinsicht. Zum einen wird das Gesundheitssystem durch die Zunahme von körperlichen und psychischen Erkrankungen in Folge von Hitzewellen, Dürre, Überschwemmungen, Mangelernährung, Zerstörung von Lebensraum, Migration und Ausbreitung von vektorübertragenen Krankheiten verstärkt belastet.¹² Zum anderen ist der Gesundheitssektor selbst Mitverursacher der globalen Erderwärmung. So waren 2014 rund 5 % der nationalen CO₂-Emissionen der Mitgliedsländer der *Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung* (OECD) sowie China und Indien auf den Gesundheitsbereich, insbesondere die Krankenhäuser, zurückzuführen.^{13,14} Bereits 2009 erschien im *Lancet* eine Serie unter dem Titel „*Health and Climate Change*“, in der auf die massive Gesundheitsbedrohung durch den Klimawandel hingewiesen wird und Medizinerinnen und Mediziner dazu aufgefordert werden, ihrer Vorbildfunktion gerecht zu werden und im Sinne der öffentlichen Gesundheit Lösungsansätze zum Klimaschutz im Gesundheitssektor zu erarbeiten.¹⁵

1.3 Die Bedeutung der Anästhesiologie für den Klimawandel

Auch die Anästhesiologie trägt in erheblichem Maß zu den Emissionen im Gesundheitswesen bei.¹² Die *Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin* (DGAI) und der *Berufsverband Deutscher Anästhesisten* (BDA) haben deshalb 2020 durch ihre gemeinsame Kommission „Nachhaltigkeit in der Anästhesiologie“ ein Positionspapier erstellt, in dem konkrete Handlungsempfehlungen zur Reduktion von CO₂-Emissionen gegeben werden.¹⁶ In diesem Positionspapier werden sechs Bereiche definiert, die im Hinblick auf Nachhaltigkeit in anästhesiologischen Abteilungen überprüft und optimiert werden sollen:

Medikamente, Sachartikel, Abfallmanagement, Mobilität, Energiewirtschaft sowie Forschung und Lehre.

Im Bereich Sachartikel wird aufgezeigt, dass Mehrwegartikel im anästhesiologischen Bereich eine nachhaltigere Alternative zu Einwegprodukten darstellen können.

1.4 Einweg- und Mehrwegartikel in der Anästhesiologie

Einwegartikel sind Artikel, die für den einmaligen Gebrauch bzw. den Gebrauch bei nur einem Patienten bestimmt sind. Mehrwegartikel können mehrmals bzw. bei mehreren Patienten genutzt werden, weshalb potenziell sowohl durch einen geringeren Ressourcenverbrauch als auch durch die Vermeidung von Abfall eine geringere Umweltbelastung entsteht. Diese Annahme kann allerdings nicht uneingeschränkt getroffen werden, da Mehrwegartikel zwischen den Benutzungen hygienisch aufbereitet werden müssen, wodurch Energie verbraucht wird und Kosten entstehen. Hersteller müssen für ihre angebotenen Mehrwegartikel Anleitungen für die sichere Aufbereitung zur Verfügung stellen. Bei Einwegartikeln ist dies nicht vorgesehen.

In den letzten 40 Jahren kam es zu einer zunehmenden Verwendung von Einwegartikeln in der Anästhesiologie.¹⁷ Die Herstellung von Medizinprodukten aus Plastik wurde populär, da sie unkompliziert und günstig war. Das Aufkommen von Infektionserkrankungen wie HIV führte Ende der 1980er Jahre zudem zu hygienischen Bedenken bei der Verwendung von Mehrwegmaterial.¹⁸ Weitere Argumente für die Umstellung von Mehrwegmaterial zu Einwegmaterial waren Kosten, Bequemlichkeit und nicht zuletzt die SARS-CoV2 Pandemie. Obwohl zahlreiche Übersichtsarbeiten die hygienische Sicherheit für wiederverwendbares Material betonen, werden in Deutschland inzwischen überwiegend Einwegartikel im operativen Bereich verwendet.^{19,20} Dies muss vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit hinterfragt werden. Besonders die Verwendung von Einwegartikeln aus Metall ist dabei kritisch zu sehen, da deren CO₂-Bilanz besonders schlecht ist.²¹

Es liegt also nahe, die alternative Verwendung von Mehrwegmaterial an Stelle von Einwegmaterial in Bezug auf den CO₂-Fußabdruck zu überprüfen. Gleichzeitig spielen für Kliniken aber neben Aspekten der Nachhaltigkeit besonders wirtschaftliche Kriterien bei der Beschaffung von Sachartikeln eine wichtige Rolle.

Um dieser Tatsache zu begegnen, wurden in den letzten Jahren Studien durchgeführt, die sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte von Mehrwegprodukten betrachteten und dabei in beiden Bereichen die Vorteilhaftigkeit von Mehrwegmaterial belegten.^{19,22–25} Mehrwegprodukte waren allerdings nicht immer die bessere Wahl. Ihre Vorteilhaftigkeit bezüglich ökonomischer als auch ökologischer Aspekte war abhängig von der Anzahl der Nutzungen, der Art der Reinigung und dem verwendeten Energiemix für die Aufbereitung.^{22,24} Eine Betrachtung der individuellen Situation vor Ort erscheint somit notwendig.

1.5 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Kosten sowie die CO₂-Emissionen von Einweg-Beatmungsschlauchsystemen, Einweg-Beatmungsmasken und Einweg-Laryngoskopspateln im Zentral-OP des Universitätsklinikums Frankfurt pro Nutzung zu ermitteln und diese mit den Kosten sowie den CO₂-Emissionen von Mehrweg-Beatmungsschlauchsystemen, Mehrweg-Beatmungsmasken und Mehrweg-Laryngoskopspateln pro Nutzung zu vergleichen. Aus den Ergebnissen soll eine Handlungsempfehlung für die künftige Verwendung von Mehrwegmaterial oder Einwegmaterial abgeleitet und ein Beitrag zur Nachhaltigkeit in der Anästhesiologie geleistet werden.

2 Material und Methoden

2.1 Das Klinikum

Das Universitätsklinikum Frankfurt ist ein Krankenhaus der Maximalversorgung mit rund 1279 Betten und damit eines der größten im Rhein-Main-Gebiet. Im Jahr 2021 wurden nach eigenen Angaben der Klinik 46.444 stationäre und 482.581 ambulante Patienten durch 33 medizinische Kliniken und Institute behandelt.²⁶ In der Klinik für Anästhesiologie, Intensivmedizin und Schmerztherapie waren im Jahr 2021 über 140 ärztliche und über 150 nichtärztliche Mitarbeiter beschäftigt, die jährlich mehr als 30.000 anästhesiologische Leistungen bei Patienten aller Altersgruppen erbringen.²⁷ In 14 Operationssälen und 14 Außenarbeitsplätzen werden im Haupthaus des Klinikums kardiochirurgische, thoraxchirurgische, allgemeinchirurgische, traumatologische, urologische, pädiatrische, gefäßchirurgische, dermatologische und Mund-Kiefer-Gesichtschirurgische Patienten versorgt. Diese anästhesiologischen Arbeitsplätze befinden sich im zentralen Operationsbereich (Zentral-OP) oder werden diesem organisatorisch zugeordnet und wurden in der vorliegenden Arbeit untersucht. Die Außenkliniken mit den Fachbereichen Hals-Nasen-Ohrenheilkunde, Ophthalmologie, Gynäkologie und Geburtshilfe sowie Neurologie und Neurochirurgie wurden für die vorliegende Arbeit nicht betrachtet.

2.2 Die untersuchten Sachartikel

An jedem anästhesiologischen Arbeitsplatz des Haupthauses des Universitätsklinikums wird mindestens ein Beatmungsschlauchsystem, ein Laryngoskopspatel der Größen 3 und 4 sowie eine Beatmungsmaske der Größen M und L vorgehalten. Da diese Artikel in großer Stückzahl verbraucht werden und sowohl Einweg- als auch Mehrweg-Alternativen im Handel verfügbar sind, eignen sie sich besonders für eine ökonomische und ökologische Betrachtung, welche Gegenstand dieser Arbeit ist.

In der Klinik für Anästhesiologie, Intensivmedizin und Schmerztherapie wurden im Jahr 2022 nahezu ausschließlich Einweg-Beatmungsschlauchsysteme der Marke Rüschi (Teleflex Medical Europe Ltd, Athlone, Irland), Einweg-Laryngoskopspatel der Firma Dahlhausen (P.J. Dahlhausen & Co. GmbH, Köln, Deutschland) sowie Einweg-Beatmungsmasken der Firmen Ambu (Ambu A/S, Ballerup, Dänemark) und Dahlhausen verwendet. Die Anzahl der verbrauchten Einweg-Artikel sowie die Bezugspreise wurden bei der zentralen Materialbeschaffung erfragt und stammen aus den Bestelllisten der Anästhesiologie für den Zentral-OP aus dem Jahr 2022. Insgesamt wurden über das Jahr 2022 3620 Einweg-Beatmungsschlauchsysteme der Länge 180 cm, 2735 Einweg-Laryngoskopspatel der Größe 3, 3220 Einweg-Laryngoskopspatel der Größe 4, 4200 Einweg-Beatmungsmasken der Größe M und 6270 Einweg-Beatmungsmasken der Größe L über die Abteilung Einkauf bezogen und somit näherungsweise auch verbraucht. Die Infrastruktur für die Nutzung von Mehrwegartikeln einschließlich der notwendigen Reinigungsmaschinen und die Erfahrung für die Verwendung und Aufbereitung ist jedoch aus vergangenen Jahren und Jahrzehnten noch vorhanden.

Um die verwendeten Einwegmaterialien mit Mehrwegmaterialien vergleichen zu können, wurden durch die Abteilung Einkauf im März 2023 Angebote zu Mehrwegartikeln bei zahlreichen Herstellern eingeholt. Dabei bot nur die Firma VBM (VBM Medizintechnik GmbH, Sulz a.N., Deutschland) Mehrweg-Beatmungsschläuche und Zubehör an. Wiederverwendbare Beatmungsmasken wurden sowohl vom Hersteller VBM als auch von der Firma Dahlhausen angeboten. Der einzige Anbieter für Mehrweg-Laryngoskopspatel war der Hersteller Dahlhausen. Die für die Kostenanalyse verwendeten Preise der Mehrwegartikel wurden den Angeboten der Hersteller entnommen. Alle Daten zur Produktbeschaffenheit und den Verpackungen sowohl der Einweg- als auch der Mehrwegartikel wurden entweder aus den Produktinformationsbroschüren der Hersteller entnommen oder direkt bei den Herstellern erfragt.

2.2.1 Beatmungsschlauchsysteme

Gegenstand der Betrachtung waren Beatmungsschlauchsysteme der Länge 180 cm, da diese Systeme im Zentral-OP des Universitätsklinikums Frankfurt im Jahr 2022 am häufigsten genutzt wurden. Die verwendeten Double D Einweg-Beatmungsschlauchsysteme der Marke Rüschi enthalten Inspirations- und Expirationsschenkel in einem Schlauch und bestehen neben dem Beatmungsschlauch der Länge 180 cm aus Ethylenvinylacetat aus einem 150 cm langen Zusatzschlauch für den Beatmungsbeutel, der 2 Liter Volumen umfasst und aus Neopren besteht, sowie aus Konnektoren aus Polyvinylchlorid (PVC) und einem Y-Stück aus Polypropylen (PP) mit Luer-Lock Anschluss für die Kapnographie. Jedes Schlauchsystem ist einzeln in einer Plastikfolie verpackt.

Als Alternative zu dem beschriebenen Einweg-Beatmungsschlauchsystem wurden Mehrweg-Beatmungsschläuche und Zubehör der Firma VBM betrachtet. Diese wurden ausgewählt, da sie die einzigen der Abteilung Einkauf angebotenen, wiederverwendbaren Beatmungsschläuche waren. Da ein komplettes Mehrweg-Beatmungsschlauchsystem nicht verfügbar war, musste ein System aus Einzelkomponenten zusammengestellt werden. Um beide Alternativen vergleichbar zu machen, wurde ein wiederverwendbarer Beatmungsschlauch der Länge 180 cm aus Silikon in zweifacher Ausführung als In- und Expirationsschenkel, ein 150 cm langer Silikon-Zusatzschlauch, ein Y-Stück aus Polyarylsulfon (PSU) sowie ein gerader Konnektor und ein rechtwinkliger Konnektor mit Luer Lock Anschluss für die Analyse ausgewählt. Beide Konnektoren bestehen ebenfalls aus PSU. Da ein Beatmungsbeutel mit einem Volumen von 2 Liter im VBM-Sortiment nicht verfügbar war, wurde auf einen Silikon-Beatmungsbeutel mit dem Volumen 2,3 Liter zurückgegriffen, welcher dem Beatmungsbeutel des Einweg-Beatmungsschlauchsystems am ähnlichsten war. Alle Produkte sind einzeln in Plastikfolie verpackt, die Konnektoren sowie das Y-Stück zusätzlich mit Papier auf der Vorder- und Rückseite.

2.2.2 Beatmungsmasken

Die im Universitätsklinikum Frankfurt verwendeten Einweg-Beatmungsmasken der Größe M wurden im Jahr 2022 von der Firma Ambu bezogen, Beatmungsmasken der Größe L wurde im selben Jahr bei dem Hersteller Dahlhausen erworben. Beide Masken weisen einen aufblasbaren Wulst aus PVC mit einem Ventil auf und enthalten einen Haltering aus PSU. Jede Maske ist einzeln in Plastikfolie aus PP verpackt. Das Produkt der Firma Dahlhausen enthält zudem ein Produktinformationsblatt aus Papier.

Angebote zu alternativen Mehrweg-Beatmungsmasken in beiden Größen erhielt die Abteilung Einkauf von den Firmen Dahlhausen und VBM. Der Anbieter Dahlhausen bietet Masken mit Kunststoffrahmen aus PSU, einem aufblasbarem Maskenwulst mit Ventil aus Silikongummi sowie einem Hakenring aus Edelstahl an. Die Mehrwegmasken der Firma VBM bestehen ebenfalls aus Silikon mit Kunststoffrahmen aus PSU, jedoch ohne aufblasbaren Wulst. Alle Masken sind einzeln in Plastikfolie verpackt und enthalten ein Produktinformationsheft aus Papier. Die Masken des Herstellers VBM waren zudem in einer Papierschachtel verpackt.

2.2.3 Laryngoskopspatel

Die im Zentral-OP des Universitätsklinikums verfügbaren Einweg-Kaltlicht Macintosh-Laryngoskopspatel der Größen 3 und 4 der Firma Dahlhausen bestehen aus rostfreiem Edelstahl und einem Lichtleiter aus Kunststoff. Sie sind einzeln in je zwei Plastikfolien verpackt. Die von Dahlhausen angebotenen Mehrweg-Laryngoskopspatel beider Größen sind ebenfalls aus Edelstahl gefertigt und mit einem Lichtleiter aus Kunststoff ausgestattet. Sie werden einzeln in einer mit Schaumstoff ausgekleideten Papierschachtel geliefert, die zusätzlich in einer Plastikfolie verpackt ist. Den Mehrweg-Laryngoskopspateln liegt zudem ein Produktinformationsblatt aus Papier bei.

2.3 Die Ermittlung der Kosten

Wie bereits beschrieben wurden die Preise aller Einwegprodukte aus dem Jahr 2022 bei der Abteilung Einkauf erfragt und für die Mehrwegartikel aus den Kostenvoranschlägen der Hersteller entnommen. Angelehnt an die Methode von Sherman, Raibley und Eckelman in 2018 wurden die Kosten pro Nutzung kalkuliert.²¹ Bei den Laryngoskopspateln und Beatmungsmasken entspricht eine Nutzung der Versorgung eines Patienten. Bei den Beatmungsschlauchsystemen hingegen entspricht die Nutzung im Zentral-OP des Universitätsklinikums Frankfurt einer Nutzungsdauer von etwa 24 Stunden und kann der Versorgung von mehr als einem Patienten dienen, da die Schläuche in den Operationssälen des Zentral-OPs nur einmal täglich gewechselt werden, sofern keine Kontamination auftritt.

Einwegartikel werden nach jeder Nutzung entsorgt, sodass sich die Kosten pro Nutzung aus der Summe der Anschaffungskosten und der Entsorgungskosten ergeben. Die Preise der Einwegartikel unterliegen Mengenrabatten, die durch Verhandlungen mehrerer Kliniken eines Klinikverbundes mit den Herstellern entstehen. Die Preise der Mehrwegartikel sind Listenpreise, die teilweise ebenfalls Mengenrabatte enthalten, die durch die Hersteller bei der Abnahme bestimmter Stückzahlen angeboten wurden. Die Preise der Mehrweg-Beatmungsmasken beider Größen sowie des Beatmungsbeutels des Herstellers VBM enthalten einen Rabatt von 10 % bei einer kalkulierten Abnahme von mehr als 50 Stück, für die Beatmungsschläuche der Längen 180 cm und 150 cm, die Konnektoren und das Y-Stück enthalten die Preise einen Rabatt von 5 % bei einer für das Universitätsklinikum realistischen Abnahme von mehr als 100 Stück. Die Mehrwegartikel der Firma Dahlhausen enthalten keine Rabatte, da keine Rabatte angeboten wurden.

Im Jahr 2022 entsorgte das Universitätsklinikum 1475,8 kg Restmüll. Enthalten sind dabei auch alle anästhesiologischen Abfälle wie Laryngoskopspatel, Beatmungsmasken, Schlauchsysteme sowie ihre Verpackungen. Eine Trennung des Abfalls ist zwar generell möglich, da die entsprechende Infrastruktur vorhanden ist, sie wird jedoch praktisch an den anästhesiologischen Arbeitsplätzen des Zentral-OPs

nicht durchgeführt. Die Kosten der Abfallentsorgung werden auf das Gewicht bezogen und beliefen sich im Jahr 2022 auf etwa 17,13 Cent pro kg für Restmüll. Andere Abfallarten sind zum Teil erheblich teurer, spielen aber für die Entsorgung der betrachteten Artikel keine Rolle. Alle Artikel inklusive ihrer Verpackungen wurden, wie im Kapitel „Ermittlung der CO₂-Bilanz“ beschrieben, gewogen, sodass sich damit die Entsorgungskosten pro Artikel inklusive der Verpackungen ergaben. Die Daten zu Abfallmenge und -kosten wurden durch die Host GmbH, dem für das Abfallmanagement des Universitätsklinikums zuständigen Unternehmen, zur Verfügung gestellt.

Für die Mehrwegprodukte musste für die Preiskalkulation pro Nutzung die Lebensdauer festgelegt werden. Die Firma VBM gab für die Beatmungsmasken sowie für das Beatmungsschlauchsystem inklusive Zubehörteile eine Lebensdauer von 100 Zyklen an, sodass für die Kosten pro Nutzung 1/100 der Anschaffungskosten und der Abfallentsorgungskosten angenommen wurden. Der Anbieter Dahlhausen konnte keine konkreten Aussagen zur Lebensdauer seiner Produkte treffen. Für die Beatmungsmasken wurde deshalb analog zu den Beatmungsmasken des Herstellers VBM eine Lebensdauer von 100 Zyklen angenommen und somit 1/100 der Kosten für die Anschaffung und Entsorgung pro Nutzung kalkuliert. Die Anzahl der möglichen Aufbereitungen von Mehrweg-Laryngoskopspateln wird in der Literatur üblicherweise mit 4000 angegeben²¹, sodass in dieser Arbeit gleiche Annahmen getroffen wurden und 1/4000 der Anschaffungs- und Entsorgungskosten pro Nutzung berechnet wurde.

Neben den Anschaffungs- und Entsorgungskosten mussten für die Mehrwegprodukte auch die Kosten der Aufbereitung nach jeder Nutzung mit einbezogen werden. Auf Empfehlung der *Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention* (KRINKO) beim *Robert Koch-Institut* (RKI) und des *Bundesinstituts für Arzneimittel und Medizinprodukte* (BfArM) wird zwischen unkritischen, semikritischen und kritischen Medizinprodukten unterschieden.²⁸ Diese Klassifizierung lehnt sich an eine Arbeit aus dem Jahr 1968 von Earle Spaulding an, der Medizinprodukte in Risikoklassen einteilte und dessen Klassifikation bis heute international genutzt wird.^{28,29} Unkritische Produkte kommen dabei nur mit intakter Haut in Berührung, semikritische Produkte mit Schleimhäuten oder krankhaft veränderter Haut und

kritische Produkte sind solche, die die Haut durchdringen und dabei in Kontakt mit Blut oder inneren Organen kommen. Je nach Zuordnung zu einer Risikogruppe müssen Medizinprodukte unterschiedlich aufbereitet werden. Unkritische Produkte werden mindestens gereinigt und desinfiziert, semikritische Produkte werden ebenfalls mindestens gereinigt und desinfiziert, optional zusätzlich sterilisiert und kritische Produkte müssen gereinigt und sterilisiert werden. Das Ziel ist die Vermeidung von Infektionen durch die Übertragung von Krankheitserregern. Die Verantwortung für die korrekte Zuordnung eines Produktes in die entsprechende Risikogruppe trägt der Betreiber des Produktes. Im Universitätsklinikum Frankfurt werden alle untersuchten Artikel als semikritisch eingestuft und demnach maschinell gereinigt und thermisch desinfiziert.

Die Aufbereitung aller Mehrwegprodukte des Universitätsklinikums erfolgt im Reinigungs- und Desinfektionsautomaten Miele G7828 professional (Miele & Cie. KG, Gütersloh, Deutschland). Die Informationen zum Reinigungsvorgang einschließlich dem Reinigungsmittel sowie der Maschinenbeladung wurden bei den erfahrenen Mitarbeitern der Materialaufbereitung und den Herstellern direkt erfragt sowie aus der Gebrauchsanweisung und dem Installationshandbuch des Reinigungsautomaten entnommen. Die Strom- und Wasserkosten wurden bei der Host GmbH, dem Technik- und Instandhaltungsunternehmen des Universitätsklinikums Frankfurt, eingeholt. Für alle Artikel wird das Reinigungsprogramm „Anästhesie TD“ verwendet, das eine maschinelle Reinigung mit thermischer Desinfektion beinhaltet. Die Reinigung erfolgt bei 55 Grad Celsius, gefolgt von einer thermischen Desinfektion bei 90 Grad Celsius (+ 5 Grad Celsius, - 0 Grad Celsius) und 5 Minuten Einwirkzeit gemäß EN ISO 15883-1.³⁰ Anschließend werden die Geräte mit vollentsalztem Wasser (VE-Wasser) gespült und mit 100 Grad Celsius heißer Luft getrocknet. Das VE-Wasser wird im Klinikum aus Leitungswasser hergestellt. Die Host GmbH als Hersteller des VE-Wassers konnte keine Angaben zu den Kosten der Herstellung machen. Da die notwendigen Geräte und Arbeitskräfte für die Aufbereitung des Wassers aber bereits im Haus vorhanden sind, wurde aus pragmatischen Gründen nur der Wasserpreis des Leitungswassers für die Berechnung der Kosten berücksichtigt. Dieser betrug im Jahr 2022 für das Universitätsklinikum 1,83 €/m³. Die Entsorgung des Wassers kostete im selben Jahr

1,45 €/m³. Dem Reinigungsprogramm wird das Reinigungsmittel thermosept X-tra der Firma Schülke (Schülke & Mayr GmbH, Norderstedt, Deutschland) zugefügt. Dieses besteht nach Herstellerangaben gemäß Verordnung (EG) Nr. 648/2004 aus 5-15 % anionischen Tensiden, <5 % nichtionischen Tensiden, <5 % Polycarboxylate und Enzymen. Weitere Inhaltsstoffe sind Lösungsvermittler und Korrosionsinhibitoren. Pro Spülgang werden durchschnittlich 215 ml des Mittels verwendet. Ein Kanister enthält 10 Liter und reicht damit aus für 46,51 Reinigungszyklen. Die Kosten pro Kanister betragen im Jahr 2022 für das Universitätsklinikum 46,45 €. Der gesamte Reinigungs- und Desinfektionszyklus dauert 90 Minuten und es werden 80 Liter Wasser verbraucht. Die Reinigungsmaschine verbraucht laut Hersteller im Reinigungsbetrieb etwa 10 kWh Strom. Bei jedem Reinigungszyklus werden somit etwa 15 kWh Strom verbraucht. Die durchschnittlichen Stromkosten des Universitätsklinikums Frankfurt lagen im Jahr 2022 bei 28,5 Cent/kWh brutto. Für die Kalkulation der Kosten wurde eine volle Auslastung der Maschine angenommen. Pro Reinigungsgang können 15 Beatmungsschläuche, 18 Y-Stücke, Konnektoren oder Beatmungsmasken, 10 Atembeutel sowie 25 Laryngoskopspatel aufbereitet werden. Um den Strom-, Wasser- und Reinigungsmittelverbrauch und damit die entsprechenden Kosten auf jeden Artikel umzurechnen, wurde die Anzahl der Artikel addiert und für jeden Artikel ein Verbrauch von 1/68 des Gesamtverbrauchs angenommen. Da ein Schlauchsystem aus 7 Komponenten besteht (3 Beatmungsschläuche, 2 Konnektoren, 1 Y-Stück sowie 1 Atembeutel) entfallen somit 7/68 des Gesamtverbrauchs pro Aufbereitung und damit pro Nutzung auf ein Beatmungsschlauchsystem.

Jeder Artikel wird nach der Aufbereitung gemäß DIN EN ISO 11607 in einen Einweg-Schutzbeutel aus Plastik verpackt, um eine Kontamination nach der Reinigung zu vermeiden.³¹ Beatmungsschlauchsysteme werden als komplette Systeme verpackt. Da es sich um Einwegprodukte handelt, mussten die Anschaffungskosten sowie die Kosten für die Entsorgung der Schutzbeutel für jede Nutzung der Mehrwegartikel berücksichtigt werden. Laut Angaben der Mitarbeiter des Materialmanagements beliefen sich die Kosten der großen Beutel für die Beatmungsschlauchsysteme im Jahr 2022 auf 0,11 € pro Stück, die der mittleren Beutel für die Beatmungsmasken

auf 0,08 € pro Stück und die Kosten der kleinen Beutel für Laryngoskopspatel betragen 0,03 € pro Stück. Um die Entsorgungskosten zu bestimmen, wurden die Schutzbeutel gewogen und die Kosten bezogen auf das Gewicht berechnet. Auf Grund ihres geringen Gewichts von maximal 0,018 kg für den großen Beutel waren die Entsorgungskosten pro Schutzbeutel mit maximal 0,31 Cent zu gering für eine sinnvolle Berechnung, sodass die Entsorgungskosten im Folgenden unberücksichtigt blieben und nur die Anschaffungskosten der Schutzbeutel in die Kostenkalkulation der Mehrwegartikel einbezogen wurden.

Die Anschaffungskosten für die Reinigungsmaschinen, die Personalkosten zum Transport und zur Aufbereitung der Mehrwegprodukte sowie Wartungskosten wurden in die Kostenkalkulationen der Mehrwegartikel nicht eingeschlossen, da sowohl die Reinigungsmaschinen als auch das notwendige Personal bereits vorhanden waren und die Wartungen der Maschinen unabhängig von der Aufbereitung der Mehrwegartikel regelmäßig erfolgte. Ebenso wurden Kosten für die Lagerhaltung der Artikel nicht berücksichtigt, da sowohl Mehrweg- als auch Einwegmaterial gelagert werden muss und die notwendigen Räumlichkeiten bereits vorhanden waren.

Zusammenfassend wurden die im Ergebnisteil dargestellten Kosten pro Nutzung folgendermaßen berechnet:

- Einwegartikel: Der Preis pro Nutzung ergab sich aus den Anschaffungskosten und den Entsorgungskosten, die auf das Produktgewicht bezogen wurden.
- Mehrwegartikel: Der Preis pro Nutzung ergab sich aus den auf die Anzahl der Nutzungen umgerechneten Anschaffungskosten sowie aus den Entsorgungskosten, die auf das Produktgewicht bezogen und dann ebenfalls auf die Anzahl der Nutzungen umgerechnet wurden. Hinzu kamen die Kosten der Aufbereitung, die sich aus den Reinigungskosten umgelegt auf die Anzahl der pro Reinigungszyklus aufbereiteten Artikel und den Anschaffungskosten der Schutzbeutel ergaben. Die Entsorgungskosten der Schutzbeutel waren, wie bereits beschrieben, so gering, dass sie nicht berücksichtigt wurden.

2.4 Die Ermittlung der CO₂-Emissionen

2.4.1 Life Cycle Assessment

Eine etablierte Methode, um den CO₂-Fußabdruck eines Produktes oder eines Prozesses zu ermitteln, ist ein Life Cycle Assessment. Dabei wird der vollständige Lebenszyklus eines Produktes analysiert und dessen Umweltauswirkungen von der Rohstoffgewinnung über Herstellung, Verpackung, Transport und Benutzung bis zur Entsorgung untersucht.³² Die Internationale Organisation für Standardisierung publizierte 2006 mit der ISO-14000 Serie internationale Standards für die Erstellung eines Life Cycle Assessment, welches demnach aus vier Phasen besteht.³³ Zu Beginn muss das untersuchte Produkt sowie die Systemgrenze und damit der Rahmen der Analyse definiert werden. So können die gesamten Umweltauswirkungen eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über die Fertigung bis zur Entsorgung untersucht und damit eine „cradle-to-grave“ Analyse durchgeführt werden.³⁴ Bei einer „cradle-to-cradle“ Betrachtung wird ein mögliches Recycling an Stelle der Entsorgung berücksichtigt.³⁵ Auch eine „cradle-to-gate“ Bewertung ist möglich, bei der die Untersuchung nach der Produktion endet und Umweltauswirkungen durch Transport zum Verbraucher, Nutzung und Entsorgung nicht berücksichtigt werden. Dieses Vorgehen kann die Komplexität der Lebenszyklusanalyse reduzieren.

Im zweiten Schritt werden die notwendigen Daten innerhalb des zuvor definierten Systems erfasst. Die meisten Umweltauswirkungen können nicht direkt gemessen werden. Dafür stehen umfangreiche Datenbanken wie die des in Zürich ansässigen gemeinnützigen Vereins *Ecoinvent* zur Verfügung, die durchschnittliche Industriedaten enthalten. Ein Beispiel für solche Daten sind die CO₂-Emissionen, die bei der Verbrennung von Kohle aus einer definierten Region oder bei dem Transport eines Rohstoffes vom Ort der Gewinnung zur Produktionsstelle entstehen.²⁵ Ziel dieser Phase ist es, die Umweltauswirkungen jedes Abschnitts innerhalb des Lebenszyklus eines Produktes zu erfassen und zu verstehen, an welcher Stelle die größten Umweltauswirkungen entstehen.³² Darüber hinaus muss definiert werden, welche Umweltauswirkungen analysiert werden. Neben den CO₂-Emissionen können

auch Emissionen der anderen Treibhausgase untersucht werden. Alle Treibhausgasemissionen können in CO₂-Äquivalente umgerechnet werden und entsprechen dann zusammengenommen dem Erderwärmungspotenzial des untersuchten Lebenszyklusabschnitts oder des gesamten Lebenszyklus. Darüber hinaus können aber auch beispielsweise der Wasserverbrauch, die Toxizität für den Menschen oder das Versauerungspotenzial von Böden und Gewässern von Interesse sein.³² Ein Produkt kann ein niedriges Erderwärmungspotenzial haben, aber dennoch über einen hohen Wasserverbrauch oder die Entstehung von toxischen Nebenprodukten die Umwelt schädigen. Die erhobenen Daten werden im letzten Schritt analysiert und können unter anderem dabei helfen, Produktionsschritte im Hinblick auf ihr Erderwärmungspotenzial oder die Toxizität zu optimieren oder verschiedene Produkte bezogen auf ihre Umweltauswirkungen zu vergleichen. Eine vollständige Lebenszyklusanalyse ist sehr aufwändig und häufig auf Grund fehlender Daten schwer umsetzbar. Eine näherungsweise Bestimmung des Erderwärmungspotenzials in CO₂-Äquivalenten ist jedoch auch mit Hilfe einer auf Lebenszyklusanalysen basierenden Methodik möglich und wurde für die vorliegende Arbeit verwendet.

2.4.2 Prinzip der Kalkulation

Die Begriffe „CO₂-Emissionen“, „CO₂-Fußabdruck“, „Treibhausgasemissionen“ und „CO₂-Äquivalente“ werden in dieser Arbeit synonym verwendet und beziehen sich stets auf die Emission aller Treibhausgase umgerechnet in CO₂-Äquivalente. Sie entsprechen damit dem Erderwärmungspotenzial. Für diese Arbeit erfolgte die Kalkulation der Emissionen in CO₂-Äquivalenten der Einweg- und Mehrwegartikel in Anlehnung an die Methode von MacNeill, Lillywhite und Brown, die 2017 die Treibhausgasemissionen der Operationssäle in drei großen Krankenhäusern in den USA (University of Minnesota Medical Center, UMMC), Kanada (Vancouver General Hospital, VGH) und Großbritannien (John Radcliffe Hospital, JRH) ermittelten.³⁶ Auch das gemeinsame Forum von BDA und DGAI „*Nachhaltigkeit in der Anästhesiologie*“ schlägt diesen pragmatischen Ansatz zur näherungsweisen Bestimmung der CO₂-Emissionen vor.²³ Der CO₂-Fußabdruck der Artikel wurde unter Anwendung der vom

Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA) in Großbritannien publizierten Umrechnungsfaktoren für das Jahr 2022 ermittelt.³⁷ Die Umrechnungsfaktoren stammen aus Daten, die von Handelsorganisationen, der *Ecoinvent* Datenbank sowie dem IPCC publiziert wurden. Bei bekanntem Materialgewicht ist mit Hilfe dieser Umrechnungsfaktoren eine Kalkulation der CO₂-Emissionen der Materialien über ein Lebenszyklus-Konzept möglich. Die DEFRA-Konversionsfaktoren schließen dem Kyoto-Protokoll von 1997 entsprechend neben den eigentlichen CO₂-Emissionen auch die Emissionen der anderen Treibhausgase Methan, Lachgas und der fluorierten Treibhausgase ein und werden als CO₂-Äquivalente angegeben.³⁸ Sie erlauben damit die Berechnung des Erderwärmungspotenzials eines Produktes bezogen auf einen Horizont von 100 Jahren. Andere Umweltschäden wie der Verbrauch von Wasser oder die Entstehung von toxischen Abfallprodukten können über die Konversionsfaktoren nicht abgebildet werden und wurden für die vorliegende Arbeit nicht analysiert. Die genutzten Umrechnungsfaktoren sind gültig für Aktivitäten, die das Jahr 2022 betreffen.

Durch die Konversionsfaktoren werden Emissionen abgebildet, die bei der Rohstoffgewinnung, dem Transport und der Produktion des Materials sowie der Verarbeitung bis zum Verkauf entstehen. Damit wird ein „cradle-to-gate“-Konzept verfolgt. Zusätzlich können über die Umrechnungsfaktoren die Emissionen, die bei der Entsorgung entstehen, berechnet werden. Allerdings werden dabei nur die Emissionen durch Transport vom Ort der Nutzung zur Entsorgungsstätte berücksichtigt und nicht solche, die durch die Entsorgung der Produkte selbst entstehen. Treibhausgasemissionen, die durch die Herstellung und Nutzung eines spezifischen Artikels, durch Verpackung und Transport entstehen, werden durch die Konversionsfaktoren ebenfalls nicht berücksichtigt.

Für die Kalkulation der CO₂-Emissionen pro Nutzung wurden somit die Emissionen der Produktion sowie der Entsorgung der Materialien der untersuchten Artikel ermittelt. Äquivalent zum Prinzip der Kostenberechnung wurden diese bei den Mehrweg-Artikeln auf die Anzahl der antizipierten Nutzungen umgelegt. Für die Mehrweg-Artikel wurden zusätzlich die Emissionen, die durch den Energie- und Wasserverbrauch bei der Aufbereitung sowie durch die Produktion und Entsorgung der Schutzbeutel entstehen, in die Kalkulation einbezogen.

2.4.3 CO₂-Emissionen der Produktion

Die Tabellen 1 und 4 im Ergebnisteil geben einen Überblick über die untersuchten Artikel und ihre Eigenschaften.

Für die Kalkulation wurde jeder Artikel inklusive Verpackung jedoch ohne Umkarton mit einer elektronischen Präzisionswaage mit einer Messgenauigkeit von ± 0.01 g gewogen (Wellish, Wuhan Ruobei Technology Co., Ltd). Das Gewicht wurde auf die volle Grammzahl gerundet. Da die Mehrwegartikel des Herstellers VBM nicht zur Verfügung standen, wurden die Gewichtsangaben des Herstellers verwendet. Alle Artikel wurden je nach Material den Materialklassen Mischplastik, Mischplastik + Papier/Pappe, Mischplastik + Papier + Edelstahl oder Plastikfolie zugeordnet und die entsprechenden Konversionsfaktoren mit dem Produktgewicht multipliziert, um die Treibhausgasemissionen der Materialherstellung zu berechnen. Da alle Artikel sowie ihre Verpackungen aus unterschiedlichen Plastikarten bestanden oder diese enthielten (u.a. PVC, PSU, PP, Neopren und Silikon), die Artikel jedoch nicht in alle Einzelkomponenten zerlegbar waren, durch die Hersteller nicht für alle Komponenten detaillierte Materialspezifikationen zur Verfügung gestellt werden konnten und keine Umrechnungsfaktoren für Silikon und Neopren vorlagen, wurden alle Plastikmaterialien inklusive ihrer Verpackungen als Mischplastik klassifiziert und für die Produktion ein CO₂-Äquivalent von 3116,29 kg pro Tonne (kg CO_{2e}/t) angenommen. Die Einweg- und Mehrweg-Beatmungsschlauchsysteme sowie die Einweg-Beatmungsmasken wurden vollständig als Mischplastik klassifiziert. Das Produktinformationsblatt, das den Einweg-Beatmungsmasken der Firma Dahlhausen beigelegt war, entsprach mit 1,3 g nur etwa 2 % des Produktgewichts und wurde deshalb vernachlässigt. Die Mehrweg-Beatmungsmasken der Firma Dahlhausen enthielten ein Produktinformationsheft, das mit 22,5 g einem Papieranteil von etwa 20 % am Gesamtproduktgewicht entsprach sowie einen Hakenring aus Edelstahl, der mit 5,7 g rund 5 % des Gesamtgewichts ausmachte. Analog zur Methode von Richter, Weixler und Schuster (2020) wurde deshalb für die Mehrweg-Beatmungsmasken des Herstellers Dahlhausen die Materialklasse Mischplastik + Papier + Edelstahl etabliert, die DEFRA-Umrechnungsfaktoren entsprechend der

Materialanteile gewichtet und ein Emissionsfaktor berechnet, der ein CO₂-Äquivalent aus 75 % Mischplastik, 20 % Papier und 5 % Edelstahl abbildete.¹² Damit ergab sich ein CO₂-Äquivalent von 2676,13 kg pro Tonne. Die Mehrweg-Beatmungsmasken des Herstellers VBM („Bi-Masken“) enthielten keinen Edelstahl-Anteil, waren aber zusätzlich in Pappe verpackt. Der Gewichtsanteil der Verpackung lag bei rund 30 %, sodass sich für diese Masken ein CO₂-Äquivalent von 2446,65 kg pro Tonne bestehend aus 70 % Mischplastik und 30 % Papier/Pappe ergab. Sowohl die Einweg- als auch die Mehrweg-Laryngoskopspatel bestanden aus Edelstahl und einem Lichtleiter aus Kunststoff. Die Einweg-Laryngoskopspatel waren in zwei Plastikbeutel verpackt, sodass für diese die Materialklasse Edelstahl + Mischplastik etabliert wurde. Durch das Herausnehmen und Wiegen des Lichtleiters aus einem Einweg-Laryngoskopspatel konnte zusammen mit der Plastikverpackung ein Gewichtsanteil des Mischplastiks von näherungsweise 10 % des Gesamtgewichts ermittelt werden. Es wurde deshalb ein Emissionsfaktor berechnet, der ein CO₂-Äquivalent aus 90 % primär hergestelltem Edelstahl und 10 % Mischplastik abbildete.¹² Damit ergab sich für die Materialproduktion der Einweg-Laryngoskopspatel ein CO₂-Äquivalent von 3102,21 kg CO₂e/t. Für die Mehrweg-Laryngoskopspatel wurde, ähnlich wie für die Mehrweg-Beatmungsmasken des Herstellers Dahlhausen, die Materialklasse Mischplastik + Papier + Edelstahl definiert, die allerdings eine andere Gewichtung der Materialien enthielt. Da die Lichtleiter der Mehrweg-Laryngoskope nicht herausnehmbar waren und der Hersteller keine Angaben zu ihrem Gewicht machen konnte, wurde der Mischplastik-Anteil analog zu den Einweg-Laryngoskopen auf 10 % geschätzt und beinhaltete den Lichtleiter und die Plastikanteile der Verpackung (Plastikbeutel und Schaumstoff). Auf die Papierschachtel sowie die Produktbeschreibung aus Papier entfielen etwa 25 % des Gesamtgewichts. Insgesamt ergab sich also für die Mehrweg-Laryngoskopspatel ein CO₂-Äquivalent von 2556,9 kg CO₂e/t, das sich zusammensetzte aus den CO₂-Äquivalenten von 65 % primär hergestelltem Edelstahl, 25 % Papier und 10 % Mischplastik. Da jedes Mehrweg-Beatmungsschlauchsystem sowie die Mehrweg-Beatmungsmasken und Mehrweg-Laryngoskopspatel nach ihrer Aufbereitung einzeln in Schutzbeutel aus Plastik

verpackt werden, wurden auch diese gewogen und von dem Emissionsfaktor von 2574,16 kg CO₂e/t für primär hergestellte Plastikfolie ausgegangen.

2.4.4 CO₂-Emissionen der Entsorgung

Alle Produkte werden am Ende ihrer Lebensdauer gemeinsam mit anderen Mischabfällen des Universitätsklinikums über das zentrale Abfallmanagement gesammelt und schließlich in einer Verbrennungsanlage thermisch verwertet. Die Verbrennung von Mischplastik und Plastikfolie generiert ebenso wie Papier, Pappe und Edelstahl ein CO₂-Äquivalent von 21,28 kg CO₂e/t. Dieser Konversionsfaktor wurde entsprechend für die Berechnung der CO₂-Emissionen der Entsorgung aller Einweg- und Mehrwegartikel genutzt, in dem er mit dem Materialgewicht multipliziert wurde. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nur der Transport zu einer Entsorgungsanlage durch diesen Emissionsfaktor abgebildet wird. Prinzipiell werden Emissionen, die bei der Entsorgung oder dem Recycling eines Materials entstehen, dem nachfolgenden Produkt zugeordnet. Emissionen, die bei der thermischen Entsorgung entstehen, werden somit der Energieerzeugung zugeschrieben.³⁷

2.4.5 CO₂-Emissionen der Aufbereitung

Um den ökologischen Fußabdruck der Mehrwegartikel zu bestimmen, müssen die CO₂-Emissionen des Energie- und Wasserverbrauchs der Aufbereitung kalkuliert werden. Die CO₂-Emissionen, die durch den Verbrauch von Energie entstehen, sind maßgeblich von den Energiequellen abhängig, die für die Energiegewinnung genutzt werden. In Europa wird der Strom überwiegend aus erneuerbaren Energien und Atomkraft gewonnen. Im Gegensatz dazu entsteht Energie in China und Australien hauptsächlich aus Kohle und in den USA aus einem Ressourcenmix.³² Ob Mehrwegprodukte einen Vorteil gegenüber Einwegprodukten bezogen auf die CO₂-Emission haben, hängt somit maßgeblich davon ab, wo energieaufwendige Prozesse wie die Aufbereitung stattfinden und wie die verbrauchte Energie produziert wurde.²²

Das Universitätsklinikum Frankfurt bezog im Jahr 2022 Strom über die Host Energy GmbH, die eine hundertprozentige Tochter des Universitätsklinikums ist. Der genutzte Energiemix entsprach dabei näherungsweise der Stromerzeugung in Deutschland. 44,3 % der Energie stammte aus erneuerbaren Energien, 29 % aus Kohle, 11,9 % aus Erdgas, 13,5 % aus Kernenergie und 1,3 % aus sonstigen fossilen Energieträgern. Damit betragen die durchschnittlichen CO₂-Emissionen 352 g/kWh. Die Daten wurden direkt beim Stromanbieter eingeholt. Bei einem durchschnittlichen Energieverbrauch von etwa 15 kWh pro Reinigungszyklus ergaben sich CO₂-Emissionen von 5280 g pro Reinigungszyklus. Diese wurden auf die pro Reinigungszyklus aufbereiteten Artikel umgelegt. Analog zum Vorgehen bei der Kostenermittlung wurde eine Vollbeladung des Reinigungsautomaten angenommen, sodass jedem Artikel 1/68 der Treibhausgasemissionen zugeschrieben wurde. Auf ein Beatmungsschlauchsystem entfielen entsprechend 7/68 der Emissionen.

Das CO₂-Äquivalent der Wasserkonsumption wurde ebenfalls über die Emissionsfaktoren des DEFRA ermittelt. Die Bereitstellung von einem Kubikmeter Leitungswasser generiert ein CO₂-Äquivalent von 0,149 kg CO₂e. Die Abwasseraufbereitung verursacht pro Kubikmeter einen ökologischen Fußabdruck von 0,272 kg CO₂e. Bei einem Verbrauch von 80 Litern Wasser, welche 0,08 Kubikmetern entsprechen, ergeben sich damit durch den Verbrauch und die Abwasseraufbereitung CO₂-Emissionen von insgesamt 0,034 kg CO₂e pro Reinigungszyklus, die ebenfalls auf alle pro Zyklus aufbereiteten Artikel umgelegt wurden und somit für jeden Artikel 1/68 bzw. 7/68 der Gesamtemissionen betragen.

Daten zur Berechnung der Umweltauswirkung durch das verwendete Reinigungsmittel waren nicht verfügbar. Somit wurde das Reinigungsmittel nur für die Kostenkalkulation, nicht aber für die Kalkulation der CO₂-Emissionen berücksichtigt.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Kostenermittlung

3.1.1 Kosten der Einwegartikel

Die Kosten pro Nutzung der Einwegartikel setzen sich zusammen aus ihren Anschaffungs- und Entsorgungskosten. Die Entsorgungskosten ergeben sich aus dem Artikelgewicht, welches Tabelle 1 entnommen werden kann. Die Gesamtkosten der Einwegmaterialien pro Nutzung werden in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht über die untersuchten Einwegmaterialien und ihre Eigenschaften

Produktbezeichnung	Art der Anwendung	Anzahl der Nutzungen	Hersteller	Anschaffungspreis (€)	Materialklasse	Gewicht inkl. Verpackung (kg)
Beatmungsschlauchsystem 180 cm	Einweg	1	Rüsch	6,36	Mischplastik	0,433
Beatmungsmaske Gr. M	Einweg	1	Ambu	0,85	Mischplastik	0,053
Beatmungsmaske Gr. L	Einweg	1	Dahlhausen	0,85	Mischplastik	0,045
Laryngoskopspatel Gr. 3	Einweg	1	Dahlhausen	2,65	Edelstahl + Mischplastik	0,060
Laryngoskopspatel Gr. 4	Einweg	1	Dahlhausen	2,65	Edelstahl + Mischplastik	0,073

Alle Preise wurden auf zwei Dezimalzahlen mathematisch korrekt gerundet, alle Gewichte wurden auf drei Dezimalzahlen mathematisch korrekt gerundet.

Tabelle 2: Gesamtkosten der Einwegmaterialien pro Nutzung in Euro

Produkt	Hersteller	Anschaffungs- kosten (€)	Entsorgungs- kosten (€)	Kosten pro Nutzung (€)
Beatmungsschlauch- system 180 cm	Rüsch	6,36	0,07	6,43
Beatmungsmaske Gr. M	Ambu	0,85	0,01	0,86
Beatmungsmaske Gr. L	Dahlhausen	0,85	0,01	0,86
Laryngoskopspatel Gr. 3	Dahlhausen	2,65	0,01	2,66
Laryngoskopspatel Gr. 4	Dahlhausen	2,65	0,01	2,66

Alle Preise wurden auf zwei Dezimalzahlen mathematisch korrekt gerundet.

3.1.2 Kosten der Mehrwegartikel

Die Kosten pro Nutzung der Mehrwegartikel setzen sich ebenfalls zusammen aus den Anschaffungs- und Entsorgungskosten, die auf die Anzahl der möglichen Aufbereitungen umgelegt werden sowie aus ihren Aufbereitungskosten. Die Entsorgungskosten der Mehrwegartikel sind pro Nutzung jedoch so gering, dass sie für die Kostenberechnung unerheblich sind und im Folgenden nicht berücksichtigt werden. Zur einfacheren Übersicht wird zunächst das Beatmungsschlauchsystem in Tabelle 3 definiert. Zu beachten ist, dass der Beatmungsschlauch in 180 cm Länge als Inspirations- und Expirationsschenkel für ein Beatmungssystem doppelt benötigt wird und die Anschaffungskosten somit in den Gesamtkosten für das Beatmungsschlauchsystem doppelt berücksichtigt werden. Eine Übersicht über die Kosten, das Gewicht und die Materialklasse der untersuchten Mehrwegmaterialien wird in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 3: Komponenten des Mehrweg-Beatmungsschlauchsystems und ihre Kosten in Euro

Produkt	Hersteller	Anschaffungs- kosten (€)	Kosten pro Nutzung (€)
Beatmungsschlauch 180 cm	VBM	75,91	0,76
Beatmungsschlauch 150 cm	VBM	66,14	0,66
Atembeutel Standard 2,3 Liter	VBM	40,82	0,41
Gerader Konnektor Standard	VBM	27,08	0,27
Gebogener Konnektor mit Luer Lock Anschluss	VBM	37,43	0,37
Gerader Y-Konnektor Standard	VBM	60,90	0,61
Beatmungsschlauchsystem	VBM	384,19 ¹	3,84

Alle Preise wurden auf zwei Dezimalzahlen mathematisch korrekt gerundet.

¹ *Die Anschaffungskosten des Beatmungsschlauchs 180cm ging zweifach in Kostenberechnung des Beatmungsschlauchsystems ein, da er für jedes Beatmungsschlauchsystem zweifach benötigt wird.*

Tabelle 4: Übersicht über die untersuchten Mehrwegmaterialien und ihre Eigenschaften

Produktbezeichnung	Art der Anwendung	Anzahl der Nutzungen	Hersteller	Anschaffungskosten (€)	Materialklasse	Gewicht inkl. Verpackung (kg)
Beatmungsschlauch 180 cm	Mehrweg	100	VBM	75,91	Mischplastik	0,555
Beatmungsschlauch 150 cm	Mehrweg	100	VBM	66,14	Mischplastik	0,444
Atembeutel Standard 2,3 l	Mehrweg	100	VBM	40,82	Mischplastik	0,172
Gerader Konnektor Standard	Mehrweg	100	VBM	27,08	Mischplastik	0,024
Gebogener Konnektor mit Luer Lock Anschluss	Mehrweg	100	VBM	37,43	Mischplastik	0,016
Gerade Y-Konnektoren Standard	Mehrweg	100	VBM	60,90	Mischplastik	0,041
Schutzbeutel groß	Einweg	1		0,11	Plastikfolie	0,018
Bi-Maske Gr. 5 (M)	Mehrweg	100	VBM	23,44	Mischplastik + Papier	0,154
Bi-Maske Gr. 6 (L)	Mehrweg	100	VBM	23,44	Mischplastik + Papier	0,158
Maske Silikon blau Gr. 4 (M)	Mehrweg	100	Dahlhausen	20,90	Mischplastik + Papier + Edelstahl	0,098
Maske Silikon blau Gr. 5 (L)	Mehrweg	100	Dahlhausen	19,90	Mischplastik + Papier + Edelstahl	0,115
Schutzbeutel mittel	Einweg	1		0,08	Plastikfolie	0,008
Laryngoskopspatel Gr. 3	Mehrweg	4000	Dahlhausen	48,50	Edelstahl + Mischplastik + Papier	0,156
Laryngoskopspatel Gr. 4	Mehrweg	4000	Dahlhausen	48,50	Edelstahl + Mischplastik + Papier	0,176
Schutzbeutel klein	Einweg	1		0,03	Plastikfolie	0,006

Da die Schutzbeutel inhaltlich zu den Mehrwegartikeln gehören, wurden sie mit diesen aufgeführt. Alle Preise wurden auf zwei Dezimalzahlen mathematisch korrekt gerundet, alle Gewichte wurden auf drei Dezimalzahlen mathematisch korrekt gerundet.

Die Anschaffungs- und Entsorgungskosten aller Mehrwegartikel werden in Tabelle 5 dargestellt. Dabei wird zunächst deutlich, dass ihre Kosten pro Nutzung niedriger sind als die Kosten der Einwegartikel bezogen auf die Nutzung. Dies trifft für jeden der untersuchten Artikel zu. Die Beatmungsmasken der Firma Dahlhausen waren in beiden Größen pro Nutzung etwas günstiger als die der Firma VBM. Hinzu kommen die Kosten der Aufbereitung, welche in Tabelle 6 zusammengefasst sind.

Tabelle 5: Kosten der Anschaffung und Entsorgung der Mehrwegartikel pro Nutzung in Euro

Produkt	Hersteller	Anschaffungskosten (€)	Anschaffungskosten pro Nutzung (€)
Beatmungsschlauchsystem 180 cm	VBM	384,19	3,84
Bi-Maske Gr. 5 (M)	VBM	23,44	0,23
Bi-Maske Gr. 6 (L)	VBM	23,44	0,23
Maske Silikon Gr. 4 (M)	Dahlhausen	20,90	0,21
Maske Silikon Gr. 5 (L)	Dahlhausen	19,90	0,20
Laryngoskopspatel Gr. 3	Dahlhausen	48,50	0,01
Laryngoskopspatel Gr. 4	Dahlhausen	48,50	0,01

Alle Preise wurden auf zwei Dezimalzahlen mathematisch korrekt gerundet.

Tabelle 6: Gesamtkosten der Aufbereitung pro Reinigungszyklus in Euro

Kosten pro Reinigungszyklus (€)

Wasser	0,15
Abwasser	0,12
Energie	4,28
Reinigungsmittel	1,00
<hr/>	
Gesamtkosten der Aufbereitung pro Reinigungszyklus	5,55

Alle Preise wurden auf zwei Dezimalzahlen mathematisch korrekt gerundet.

Die Kosten der Aufbereitung wurden auf die Materialien umgelegt, die pro Reinigungszyklus aufbereitet werden können. Wie bereits beschrieben, betragen die Aufbereitungskosten jedes Artikels mit Ausnahme des Beatmungsschlauchsystems $\frac{1}{68}$ der Gesamtkosten eines Reinigungszyklus und somit 0,08 €. Auf ein Beatmungsschlauchsystem entfallen $\frac{7}{68}$ der Gesamtkosten pro Reinigungszyklus, was 0,57 € entspricht. Da jeder Artikel nach der Aufbereitung in einen Schutzbeutel verpackt wird, werden auch diese Anschaffungskosten bei jeder Nutzung berücksichtigt. Die Gesamtkosten, die für jeden Mehrwegartikel pro Nutzung entstehen, werden in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Gesamtkosten der Mehrwegartikel pro Nutzung in Euro

Produkt	Hersteller	Anschaffungs- kosten pro Nutzung (€)	Kosten Aufbereitung (€)	Kosten Schutz- beutel (€)	Gesamt- kosten pro Nutzung (€)
Beatmungsschlauchsystem 180 cm	VBM	3,84	0,57	0,11	4,52
Bi-Maske Gr. 5 (M)	VBM	0,23	0,08	0,08	0,39
Bi-Maske Gr. 6 (L)	VBM	0,23	0,08	0,08	0,39
Maske Silikon Gr. 4 (M)	Dahlhausen	0,21	0,08	0,08	0,37
Maske Silikon Gr. 5 (L)	Dahlhausen	0,20	0,08	0,08	0,36
Laryngoskop- spatel Gr. 3	Dahlhausen	0,01	0,08	0,03	0,12
Laryngoskop- spatel Gr. 4	Dahlhausen	0,01	0,08	0,03	0,12

Alle Preise wurden auf zwei Dezimalzahlen mathematisch korrekt gerundet.

3.1.3 Kostenvergleich

Die Kalkulationen ergaben, dass die Kosten aller Einwegartikel pro Nutzung höher als die Kosten der Mehrwegartikel pro Nutzung sind. Die Abbildungen 1 bis 3 illustrieren die Kostenunterschiede zwischen den Einweg- und Mehrweg-Produkten. Der Kostenunterschied ist bei den Laryngoskopspateln am größten. Hier kosten die Einwegprodukte beider untersuchten Größen 2,66 € pro Nutzung, die Mehrweg-Alternativen hingegen 0,12 € pro Nutzung. Den geringsten Kostenunterschied haben die Beatmungsschlauchsysteme mit 6,43 € für das Einwegprodukt und 4,52 € für das Mehrweg-Beatmungsschlauchsystem.

Beatmungsschlauchsystem 180 cm

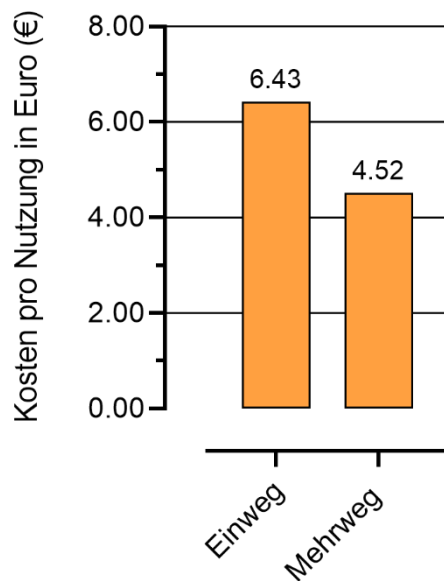


Abbildung 1: Die Kosten eines Einweg- und eines Mehrweg-Beatmungsschlauchsystems der Länge 180 cm pro Nutzung in Euro

Die Kosten pro Nutzung eines Einweg-Beatmungsschlauchsystems 180 cm belaufen sich auf 6,43 €. Die Kosten wurden berechnet aus den Anschaffungs- und Entsorgungskosten. Die Kosten pro Nutzung eines Mehrweg-Beatmungsschlauchsystems 180 cm belaufen sich auf 4,52 €. In die Kostenberechnung der Mehrwegartikel flossen die Anschaffungs- und Entsorgungskosten bezogen auf die Nutzung sowie die Kosten der Aufbereitung ein.

Beatmungsmasken Größe M und L

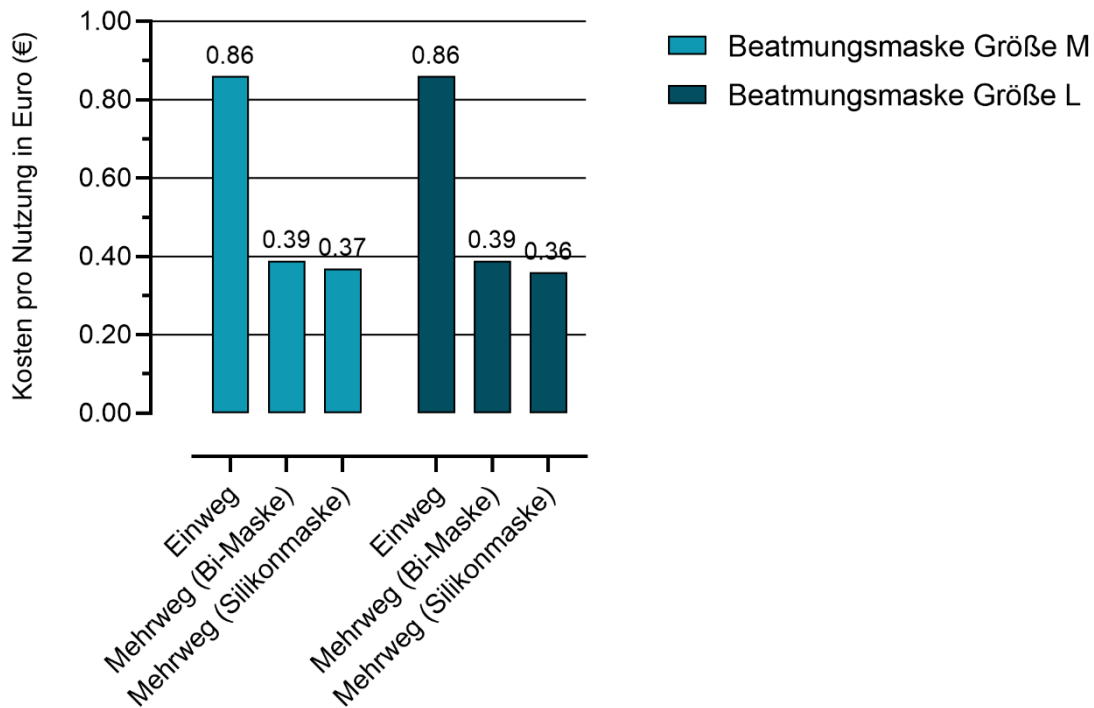


Abbildung 2: Die Kosten einer Einweg- und einer Mehrweg-Beatmungsmaske der Größe M und L pro Nutzung in Euro

Die Kosten pro Nutzung einer Einweg-Beatmungsmaske sowohl der Größe M als auch der Größe L belaufen sich auf 0,86 €. Die Kosten wurden berechnet aus den Anschaffungs- und Entsorgungskosten. Die Kosten pro Nutzung einer Mehrweg-Beatmungsmaske des Herstellers VBM (Bi-Maske) sowie des Herstellers Dahlhausen (Silikonmaske) der Größe M belaufen sich auf jeweils 0,39 €. Die Kosten pro Nutzung einer Mehrweg-Beatmungsmaske des Herstellers VBM (Bi-Maske) der Größe L belaufen sich auf 0,37 €, die des Herstellers Dahlhausen (Silikonmaske) der Größe L betragen 0,36 €. In die Kostenberechnung der Mehrwegartikel fließen die Anschaffungs- und Entsorgungskosten bezogen auf die Nutzung sowie die Kosten der Aufbereitung ein.

Laryngoskopspatel Größe 3 und 4

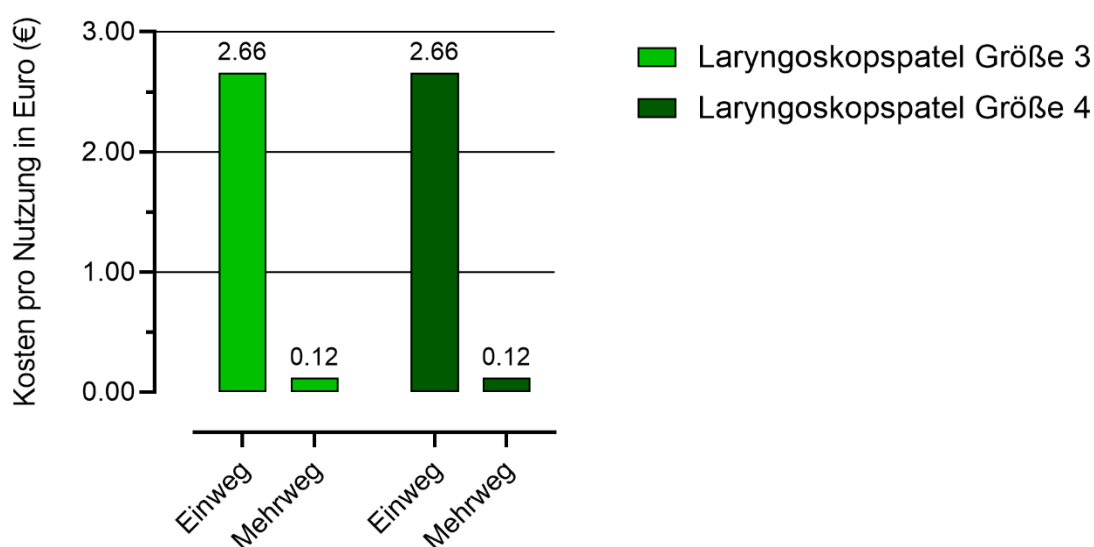


Abbildung 3: Die Kosten eines Einweg- und eines Mehrweg-Laryngoskopspatels der Größe 3 und 4 pro Nutzung in Euro

Die Kosten pro Nutzung eines Einweg-Laryngoskopspatels sowohl der Größe 3 als auch der Größe 4 belaufen sich auf 2,66 €. Die Kosten wurden berechnet aus den Anschaffungs- und Entsorgungskosten. Die Kosten pro Nutzung eines Mehrweg-Laryngoskopspatels sowohl der Größe 3 als auch der Größe 4 belaufen sich auf 0,12 €. In die Kostenberechnung der Mehrwegartikel flossen die Anschaffungs- und Entsorgungskosten bezogen auf die Nutzung sowie die Kosten der Aufbereitung ein.

Wird die Verteilung der Kosten der Mehrwegartikel auf Anschaffungs- und Aufbereitungskosten betrachtet, zeigt sich, dass bei den Beatmungsschlauchsystemen und bei den Beatmungsmasken die Anschaffungskosten den größten Anteil an den Kosten pro Nutzung haben. Dabei wurden die Kosten der Schutzbeutel zu den Kosten der Aufbereitung gezählt. Bei den Beatmungsschlauchsystemen liegt der Anteil der Anschaffungskosten bei über 80 % der Gesamtkosten pro Nutzung. Bei den Beatmungsmasken beider Hersteller beträgt der Anteil der Anschaffungskosten zwischen 55 und 59 %. Anders ist es bei den Laryngoskopspateln. Durch die angenommene Lebensdauer von 4000 Aufbereitungen reduziert sich der Anteil der Anschaffungskosten an den Gesamtkosten und die Aufbereitungskosten sind für 92 % der Kosten pro Nutzung verantwortlich. Die Schutzbeutel zum Verpacken der gereinigten Artikel kosten für

die Beatmungsmasken ebenso viel wie die gesamte Aufbereitung. Für die Laryngoskopspatel sind die Kosten eines Schutzbeutels höher als die Anschaffungskosten pro Nutzung.

Zusammengefasst zeigt diese Analyse, dass die Anschaffungs- und Entsorgungskosten pro Nutzung bei Mehrwegartikeln insgesamt deutlich unter denen der Einwegartikel liegen, sodass sich trotz der zu addierenden Aufbereitungskosten ein Kostenvorteil für die Mehrwegartikel ergibt.

3.2 Ergebnisse der Ermittlung der CO₂-Emissionen

3.2.1 CO₂-Emissionen der Einwegartikel

Tabelle 8 illustriert die CO₂-Emissionen, die pro Nutzung durch die jeweiligen Einwegartikel entstehen. Dabei zeigt sich, dass die Emissionen, die der Entsorgung zuzurechnen sind, einen geringen Einfluss auf die Gesamtemissionen haben und dass diese vielmehr durch die Emissionen der Materialherstellung bestimmt werden.

Tabelle 8: CO₂-Emissionen der Einwegartikel pro Nutzung in kg CO₂-Äquivalent

Produkt	Hersteller	Emissionen Produktion (kg CO₂e)	Emissionen Entsorgung (kg CO₂e)	Emissionen gesamt (kg CO₂e)
Beatmungsschlauchsystem 180 cm	Rüsch	1,349	0,009	1,358
Beatmungsmaske Gr. M	Ambu	0,165	0,001	0,166
Beatmungsmaske Gr. L	Dahlhausen	0,140	0,001	0,141
Laryngoskopspatel Gr. 3	Dahlhausen	0,186	0,001	0,187
Laryngoskopspatel Gr. 4	Dahlhausen	0,226	0,002	0,228

Die CO₂-Emissionen wurden auf drei Dezimalzahlen mathematisch korrekt gerundet.

3.2.2 CO₂-Emissionen der Mehrwegartikel

Die CO₂-Emissionen, die bei der Materialproduktion und bei der Aufbereitung der Mehrwegartikel pro Nutzung entstehen, werden in Tabelle 9 dargestellt. Das Gewicht des Beatmungsschlauchsystems ergab sich aus dem jeweiligen Gewicht der Einzelkomponenten inklusive der Verpackungen und betrug 1,807 kg. Auch hier ist der Beatmungsschlauch mit der Länge 180 cm doppelt enthalten. Die CO₂-Emissionen, die durch die Entsorgung entstehen, müssen prinzipiell berücksichtigt werden, waren aber bezogen auf die Nutzung so gering, dass sie vernachlässigt wurden.

Tabelle 9: CO₂-Emissionen durch Materialproduktion und -entsorgung sowie Aufbereitung der Mehrwegartikel in kg CO₂-Äquivalent

Produkt	Hersteller	Emissionen Produktion (kg CO₂e)	Emissionen Aufbereitung (kg CO₂e)	Emissionen gesamt (kg CO₂e)
Beatmungsschlauchsystem 180 cm	VBM	0,056	0,544	0,600
Schutzbeutel groß		0,046		0,046
Bi-Maske Gr. M (5)	VBM	0,004	0,078	0,082
Bi-Maske Gr. L (6)	VBM	0,004	0,078	0,082
Maske Silikon Gr. M (4)	Dahlhausen	0,003	0,078	0,081
Maske Silikon Gr. L (5)	Dahlhausen	0,003	0,078	0,081
Schutzbeutel mittel		0,021		0,021
Laryngoskopspatel Gr. 3	Dahlhausen	0,000	0,078	0,078
Laryngoskopspatel Gr. 4	Dahlhausen	0,000	0,078	0,078
Schutzbeutel klein		0,015		0,015

Die CO₂-Emissionen wurden auf drei Dezimalzahlen mathematisch korrekt gerundet.

Es wird deutlich, dass die Gesamtemissionen wesentlich durch die Aufbereitung bestimmt werden und die Emissionen der Materialproduktion, anders als bei den Einwegartikeln, nur eine untergeordnete Rolle spielen. Für die Mehrweg-Laryngoskopspatel sind sie insbesondere auf Grund der 4000 möglichen Aufbereitungszyklen auf die Nutzung betrachtet ohne Bedeutung.

Die Emissionen, die durch die Schutzbeutel entstehen, können den Emissionen der Aufbereitung zugeordnet werden, da ihre Verwendung unmittelbar mit der Aufbereitung verbunden ist. Mit dieser Annahme erhöht sich der Anteil, den die Emissionen der Aufbereitung an den Gesamtemissionen pro Nutzung haben, weiter. Bei den Beatmungsschlauchsystemen und den Beatmungsmasken sind es mehr als 90 %, bei den Laryngoskopspateln sind alle Emissionen pro Nutzung auf die Aufbereitung zurückzuführen.

3.2.3 Vergleich der Umweltbilanz

Alle untersuchten Mehrwegartikel verursachen niedrigere Treibhausgasemissionen gemessen in CO₂-Äquivalenten pro Nutzung als die untersuchten Einwegartikel. Ein Vergleich der Treibhausgasemissionen wird in den Abbildungen 4 bis 6 veranschaulicht. Der Unterschied in den CO₂-Emissionen ist bei den Laryngoskopspateln der Größe 4 am größten. Das Einweg-Produkt generiert 0,228 kg CO₂-Äquivalent pro Nutzung, die Mehrweg-Alternative 0,093 kg CO₂-Äquivalent und damit nur 41 % der Emissionen des Einweg-Laryngoskopspatels. Die Nutzung eines Einweg-Beatmungsschlauchsystems verursacht 1,358 kg CO₂-Äquivalent, wohingegen die Mehrweg-Alternative mit 0,646 kg CO₂-Äquivalent weniger als die Hälfte der Emissionen verursacht. Bei den Beatmungsmasken ist der Unterschied am geringsten. Eine Mehrweg-Beatmungsmaske der Größe M verursacht mit 0,082 kg CO₂-Äquivalent (Hersteller VBM) bzw. 0,081 kg CO₂-Äquivalent (Hersteller Dahlhausen) nur etwa 61 % der Emissionen einer entsprechenden Einweg-Beatmungsmaske. Bei den Mehrweg-Beatmungsmasken der Größe L entsprechen die Emissionen pro Nutzung nur rund 72% der Emissionen der Einweg-Alternativen. Bei den Einwegartikeln entstehen die Treibhausgasemissionen besonders bei der Materialproduktion, bei den Mehrwegartikeln hat die Aufbereitung den größten Effekt auf die Emissionen. Am Beispiel der Beatmungsschlauchsysteme werden die Ergebnisse illustriert: Über den gesamten Lebenszyklus eines Mehrweg-Beatmungsschlauchsystems, welcher 100 Aufbereitungen und damit Nutzungen entspricht, entstehen 64,6 kg CO₂-Emissionen. Bei der Nutzung von 100 Einweg-

Beatmungsschlauchsystemen entstehen im Vergleich dazu 134,9 kg CO₂-Emissionen. Dies entspricht einer Differenz von 70,3 kg CO₂-Äquivalent. Der durch die im April 2019 verabschiedete EU-Verordnung 2019/631 festgelegte Flottengrenzwert für den CO₂-Ausstoß neu zugelassener PKW liegt derzeit bei 95 g pro Kilometer.³⁹ Wird ein solcher PKW zum Vergleich herangezogen, entspricht die Differenz von 70,3 kg CO₂-Äquivalent einer Autofahrt von 740 Kilometern. Da im Jahr 2022 im Zentral-OP des Universitätsklinikums etwa 3620 Einweg-Beatmungsschlauchsysteme verbraucht wurden, entstanden damit Emissionen von 4883,38 kg CO₂-Äquivalent. Wären stattdessen ausschließlich Mehrweg-Beatmungsschlauchsysteme genutzt worden, wären 2022 nur 2338,52 kg CO₂-Äquivalent und damit weniger als die Hälfte der tatsächlichen CO₂-Emissionen entstanden. Somit hätten allein durch die Verwendung von Mehrweg-Beatmungsschlauchsystemen Emissionen von 2544,86 kg CO₂-Äquivalent eingespart werden können.

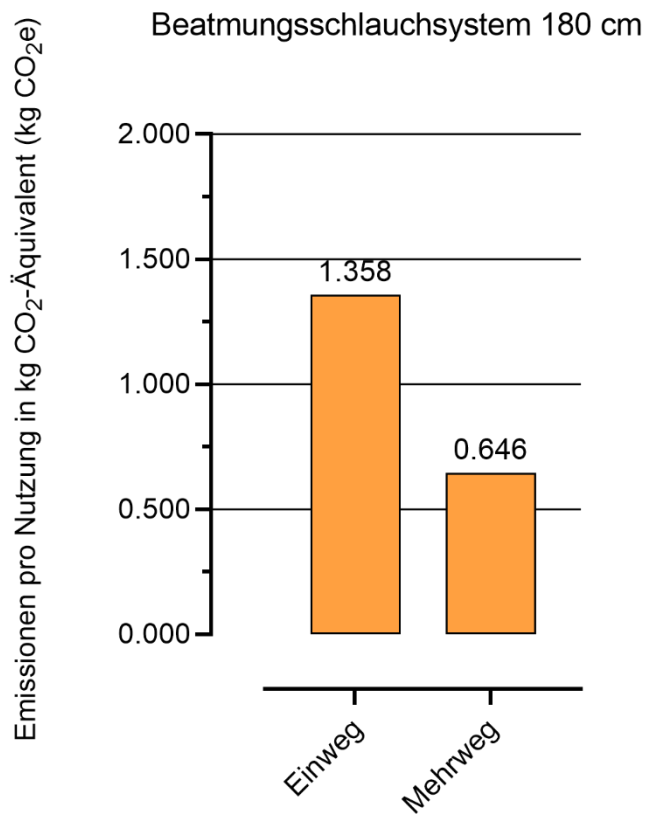


Abbildung 4: Die Treibhausgasemissionen eines Einweg- und eines Mehrweg-Beatmungsschlauchsystems der Länge 180 cm pro Nutzung in kg CO₂-Äquivalent

Die Treibhausgasemissionen in kg CO₂-Äquivalent eines Einweg-Beatmungsschlauchsystems der Länge 180 cm betragen pro Nutzung 1,358 kg CO₂e. Die Emissionen wurden berechnet aus dem Produktgewicht inklusive Verpackung und dem DEFRA-Konversionsfaktor für Mischplastik. Die Treibhausgasemissionen in kg CO₂-Äquivalent eines Mehrweg-Beatmungsschlauchsystems der gleichen Länge betragen pro Nutzung 0,646 kg CO₂e. Die Emissionen wurden bestimmt aus den Produktgewichten der Komponenten des Beatmungsschlauchsystems inklusive der Verpackungen und dem DEFRA-Konversionsfaktor für Mischplastik und wurden pro Nutzung berechnet. Addiert wurden die Emissionen pro Reinigungszyklus sowie die Emissionen durch Produktion und Entsorgung des großen Einweg-Schutzbeutels, in den das Schlauchsystem nach jeder Reinigung verpackt wird. Alle Werte wurden mathematisch korrekt auf drei Dezimalzahlen gerundet.

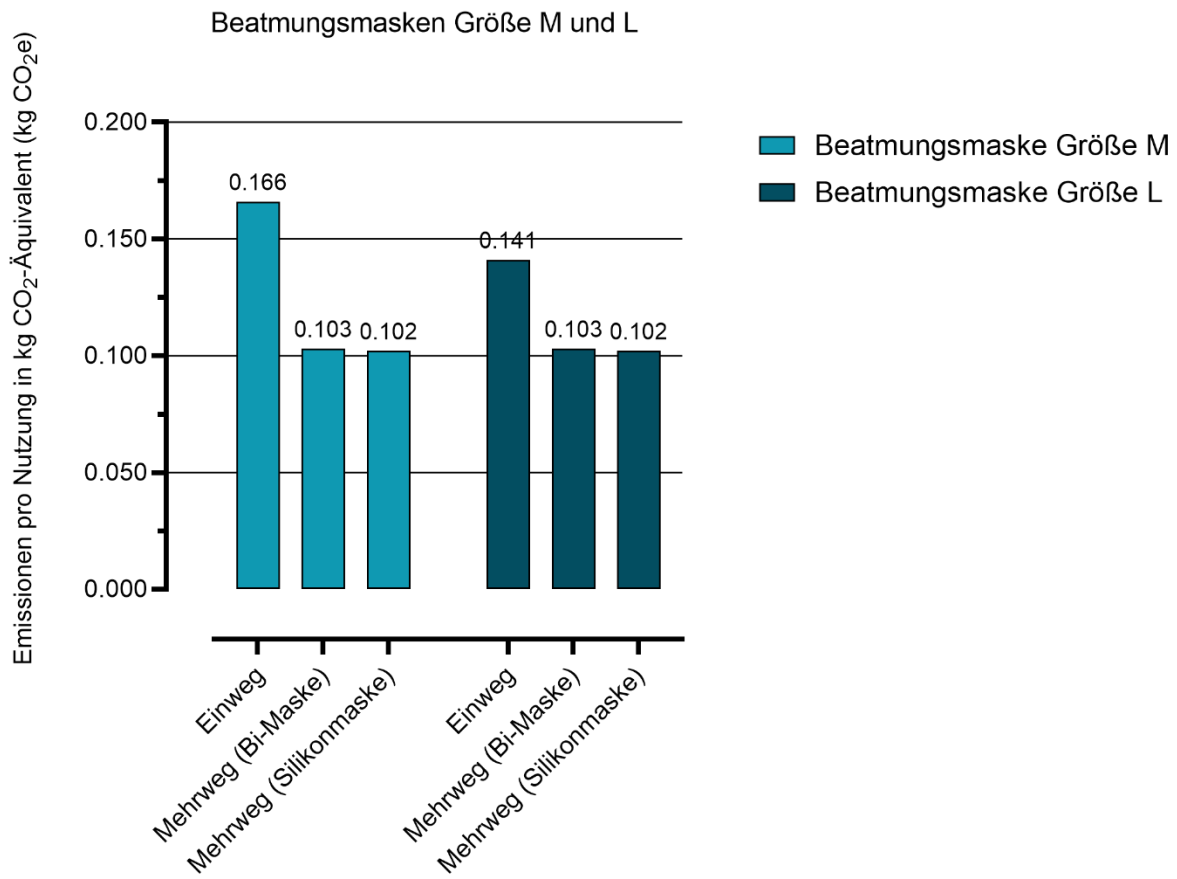


Abbildung 5: Die Treibhausgasemissionen einer Einweg- und einer Mehrweg-Beatmungsmaske der Größe M und L pro Nutzung in kg CO₂-Äquivalent

Die Treibhausgasemissionen in kg CO₂-Äquivalent einer Einweg-Beatmungsmaske der Größe M betragen pro Nutzung 0,166 kg CO₂e, die der Größe L betragen 0,141 kg CO₂e. Die Emissionen wurden berechnet aus dem Produktgewicht inklusive Verpackung und dem DEFRA-Konversionsfaktor für Mischplastik. Die Treibhausgasemissionen in kg CO₂-Äquivalent eines Mehrweg-Beatmungsmaske der Größe M betragen pro Nutzung sowohl für die Bi-Maske des Herstellers VBM als auch für die Silikonmaske des Herstellers Dahlhausen 0,103 kg CO₂e. Die Emissionen der Bi-Masken wurden bestimmt aus dem Produktgewicht inklusive der Verpackung und dem gewichteten DEFRA-Konversionsfaktor für Mischplastik + Papier/Pappe und wurden pro Nutzung berechnet. Die Emissionen der Silikonmasken wurden ebenfalls bestimmt aus dem Produktgewicht inklusive der Verpackung und dem gewichteten DEFRA Konversionsfaktor für Mischplastik + Edelstahl + Papier und wurde pro Nutzung berechnet. Addiert wurden für alle Mehrweg-Beatmungsmasken die Emissionen pro Reinigungszyklus sowie die Emissionen durch Produktion und Entsorgung des mittelgroßen Einweg-Schutzbeutels, in den eine Beatmungsmaske nach jeder Reinigung verpackt wird. Alle Werte wurden mathematisch korrekt auf drei Dezimalzahlen gerundet.

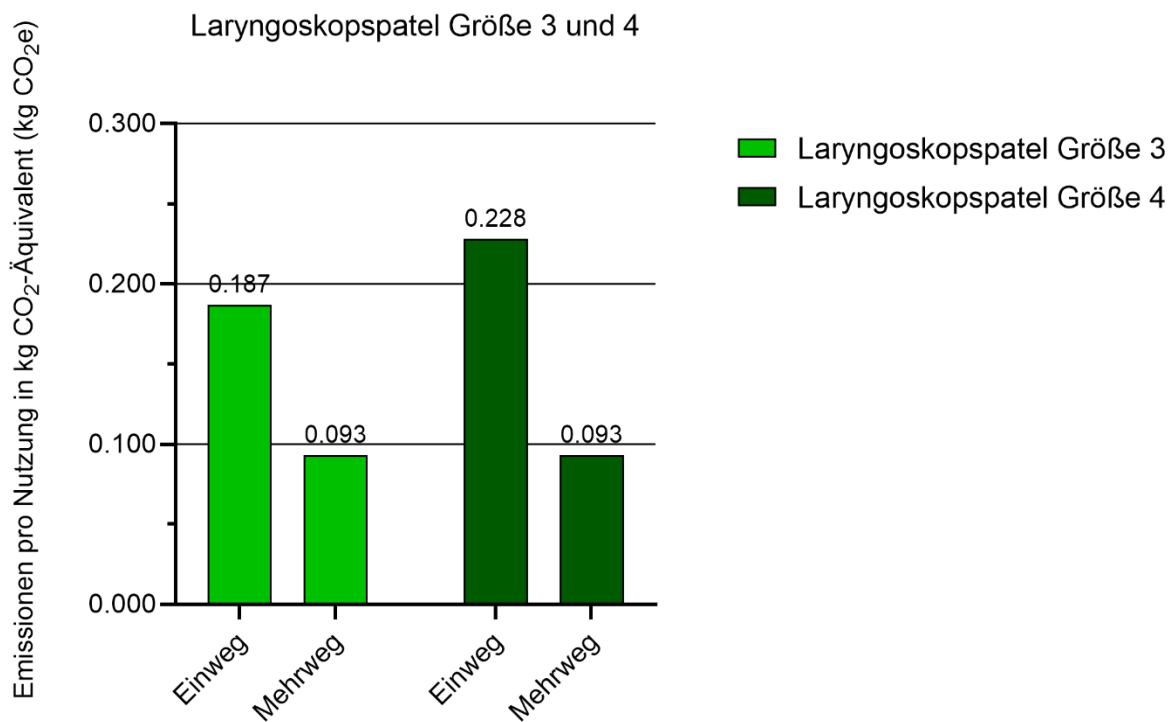


Abbildung 6: Die Treibhausgasemissionen eines Einweg- und eines Mehrweg-Laryngoskopspatels der Größe 3 und 4 pro Nutzung in kg CO₂-Äquivalent

Die Treibhausgasemissionen in kg CO₂-Äquivalent eines Einweg-Laryngoskopspatels der Größe 3 betragen pro Nutzung 0,187 kg CO₂e, die der Größe 4 betragen 0,228 kg CO₂e. Die Emissionen wurden berechnet aus dem Produktgewicht inklusive Verpackung und dem gewichteten DEFRA-Konversionsfaktor für Edelstahl + Mischplastik. Die Treibhausgasemissionen in kg CO₂-Äquivalent eines Mehrweg-Laryngoskopspatels betragen pro Nutzung sowohl für die Größe 3 als auch für die Größe 4 0,093 kg CO₂e. Die Emissionen der Mehrweg-Laryngoskopspatel wurden bestimmt aus dem Produktgewicht inklusive der Verpackung und dem gewichteten DEFRA-Konversionsfaktor für Edelstahl + Mischplastik + Papier und wurden pro Nutzung berechnet. Addiert wurden für alle Mehrweg-Laryngoskopspatel die Emissionen pro Reinigungszyklus sowie die Emissionen durch Produktion und Entsorgung des kleinen Einweg-Schutzbeutels, in den ein Laryngoskopspatel nach jeder Reinigung verpackt wird. Alle Werte wurden mathematisch korrekt auf drei Dezimalzahlen gerundet.

3.3 Schlussfolgerung

Durch die Kostenkalkulationen und die Berechnung der Treibhausgasemissionen auf Basis eines Lebenszykluskonzepts konnte gezeigt werden, dass alle untersuchten Mehrwegartikel (Beatmungsschlauchsysteme der Länge 180 cm, Beatmungsmasken der Größen M und L sowie Macintosh-Laryngoskopspatel der Größen 3 und 4) im Kontext des Universitätsklinikums Frankfurt sowohl günstiger als auch umweltfreundlicher waren als die entsprechenden Einwegartikel.

Die mögliche Kostenersparnis war für Laryngoskopspatel am größten. Da 2022 durch den Zentral-OP des Universitätsklinikums Frankfurt 5955 Einweg-Laryngoskopspatel der Größen 3 und 4 bestellt wurden, ergaben sich dadurch Gesamtkosten von 15.840,30 €. Die Nutzung von Mehrweg-Laryngoskopspateln hätte stattdessen 714,60 € gekostet, was einer Kostenreduktion von über 95% entspricht. Mit dem zu Grunde gelegten Verbrauch des Jahres 2022 wäre die Verwendung von Mehrweg-Beatmungsschlauchsystemen 6914,20 € günstiger und durch die Verwendung von Mehrweg-Beatmungsmasken der Größen M und L hätten 5193 € gegenüber der Verwendung von Einweg-Beatmungsmasken eingespart werden können, wenn die günstigeren Dahlhausen-Modelle genutzt worden wären. Insgesamt wurden im Jahr 2022 Einweg-Beatmungsschlauchsysteme, Einweg-Beatmungsmasken und Einweg-Laryngoskopspatel für 48.121,10 € erworben und entsorgt. Bei einem dem Jahr 2022 entsprechenden Verbrauch kostet die Nutzung von entsprechenden Mehrwegartikeln 20.888,20 €. Durch den Ersatz aller untersuchten Artikel mit Mehrweg-Alternativen ist somit eine Einsparung von 27.232,90 € pro Jahr realisierbar. Dabei waren die Mehrweg-Beatmungsschlauchsysteme 30 %, die Mehrweg-Beatmungsmasken der Größe M 57 %, die der Größe L 58 % und die Mehrweg-Laryngoskopspatel 95 % günstiger.

Die Umweltbilanz war bei den Mehrwegartikeln ebenfalls vorteilhafter als bei den Einwegartikeln. Neben der Einsparung von Treibhausgasen durch die Verwendung von Mehrweg-Beatmungsschlauchsystemen, die bereits ausführlich beschrieben wurde, können bei einem dem Jahr 2022 äquivalenten Verbrauch durch die Verwendung von Mehrweg-Beatmungsmasken der Größe M des Herstellers VBM

260,4 kg CO₂-Emissionen bzw. des Herstellers Dahlhausen 264,6 kg CO₂-Emissionen eingespart werden. Für die Beatmungsmasken der Größe L des Herstellers VBM ergaben sich um 231,99 kg geringere bzw. für die Beatmungsmasken gleicher Größe der Firma Dahlhausen um 238,26 kg geringere Treibhausgasemissionen als durch die Verwendung der Einweg-Alternativen. Bei einem dem Jahr 2022 äquivalenten Verbrauch von Laryngoskopspateln der Größen 3 und 4 können bei der Verwendung der Mehrweg-Alternativen CO₂-Emissionen in Höhe von 691,79 kg eingespart werden. Insgesamt können die Treibhausgasemissionen bei einem dem Jahr 2022 entsprechenden Verbrauch durch die Umstellung aller untersuchten Einwegartikel auf Mehrwegartikel von 7699,79 kg CO₂-Äquivalent auf 3960,28 kg CO₂-Äquivalent reduziert werden, was einer Reduktion um 49% entspricht. Für diese Berechnung wurden die Mehrweg-Beatmungsmasken des Hersteller Dahlhausen herangezogen, da die CO₂-Emissionen bei diesem Produkt geringer waren.

4 Diskussion

4.1 Methodische Diskussion

Vor dem Hintergrund des Klimawandels ist es auch im Gesundheitswesen notwendig, Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Mehrere Studien der letzten Jahre belegen, dass unter bestimmten Bedingungen die Nutzung von Mehrweg-Artikeln zu geringeren Treibhausgasemissionen führt als die Nutzung von Einweg-Artikeln. Ob eine Umstellung von Einwegmaterial auf Mehrwegmaterial auch in der Klinik für Anästhesiologie, Intensivmedizin und Schmerztherapie des Universitätsklinikums Frankfurt zu geringeren Treibhausgasemissionen führt, wurde in dieser Arbeit untersucht. Dazu wurden für den zentralen OP-Bereich des Klinikums die Treibhausgasemissionen pro Nutzung von Einweg-Beatmungsschlauchsystemen, Einweg-Beatmungsmasken und Einweg-Laryngoskopspateln über ein Lebenszykluskonzept ermittelt und mit entsprechenden Mehrweg-Alternativen verglichen. Zudem wurden die Kosten der untersuchten Produkte pro Nutzung berechnet und verglichen. Es zeigte sich sowohl für die Treibhausgasemissionen als auch für die Kosten ein eindeutiger Vorteil für die untersuchten Mehrwegprodukte. Die Ergebnisse werden im Folgenden zunächst methodisch diskutiert und anschließend in den aktuellen Stand der Forschung eingebettet.

4.1.2 Limitationen und methodische Einschränkungen

Die durchgeführte Untersuchung hatte zum Ziel, in möglichst kurzer Zeit eine effektive Möglichkeit zur Reduktion der CO₂-Emissionen in der Klinik für Anästhesiologie, Intensivmedizin und Schmerztherapie des Universitätsklinikums Frankfurt aufzuzeigen, um zeitnah emissionsparende Maßnahmen einleiten zu können. Aus diesem Grund wurde ein pragmatischer Ansatz zur Ermittlung der CO₂-Emissionen und der Kosten gewählt. Es handelt sich um eine Untersuchung aus nur einer Klinik, in welcher nur der zentrale OP-Bereich berücksichtigt wurde. In anderen

OP-Bereichen und anderen Kliniken findet sich zum Teil eine deutlich andere Infrastruktur, sodass die Ergebnisse nicht universell übertragbar sind. Die gewählte Methode kann jedoch als Piloterhebung für Analysen in anderen OP-Bereichen und anderen Kliniken dienen und dort in ähnlicher Weise unter Berücksichtigung der spezifischen Bedingungen vor Ort genutzt werden.

4.1.2.1 Limitationen der Kostenermittlung

Die angenommenen Kosten waren die für die Einwegartikel realen Preise aus dem Jahr 2022, die durch Verhandlungen und der Abnahme hoher Stückzahlen, wie sie im Verbund mehrerer Kliniken üblich sind, entstanden sind. Die Preise der Mehrwegprodukte waren Listenpreise, die lediglich um die durch den Hersteller bei der Abnahme von für das Universitätsklinikum üblichen Stückzahlen angebotenen Rabatte von 5 bis 10 % reduziert wurden. Vor einer praktischen Umstellung auf Mehrwegartikel erfolgen für diese Produkte ebenfalls Preisverhandlungen mit den Herstellern, die möglicherweise zu niedrigeren Kosten führen und den kalkulierten Kostenvorteil der Mehrwegartikel weiter vergrößern können. Für andere Kliniken, die eine geringere Menge an Verbrauchsmaterial benötigen als das Universitätsklinikum Frankfurt, können die Preise sowohl für die Einweg- als auch für die Mehrweg-Artikel höher liegen.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Annahme getroffen, dass die Arbeitszeit durch die Nutzung und Aufbereitung von Mehrwegartikeln nicht zunimmt und somit auch die Personalkosten konstant bleiben. Diese Annahme begründet sich auf der eigenen Einschätzung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Materialaufbereitung, die aus früheren Jahren Erfahrung mit der Aufbereitung von Beatmungsmasken, Beatmungsschlauchsystemen und Laryngoskopspateln haben und in deren Aufgabenbereich auch zukünftig die Aufbereitung von Mehrwegmaterial fiele. Ob diese Einschätzung in der Praxis Bestand hätte, ist unklar. Sollten sich die Personalkosten durch die Umstellung auf Mehrwegartikel auf Grund einer größeren Arbeitsbelastung erhöhen, müssen die Kosten erneut evaluiert werden.

Ein Aspekt, der die praktische Umstellung zu Mehrwegartikeln erschwert, ist die Dokumentationspflicht der einzelnen Aufbereitungsschritte nach Anforderungen der KRINKO und des BfArM.²⁸ Die Messwerte der Prozessparameter der Aufbereitung müssen chargenkonform dokumentiert und mindestens fünf Jahre lang aufbewahrt werden. Für jeden aufbereiteten Artikel muss die Dokumentation nachvollziehbar erfolgen. Ein technisches System, mit dem die Kennzeichnung der Artikel möglich wäre, ist im Universitätsklinikum Frankfurt nicht vorhanden. Die Anschaffungs- und Wartungskosten eines solchen Systems wurden nicht in die Kostenberechnung der Mehrwegartikel einbezogen, könnten aber den Kostenvorteil der Mehrwegartikel mindern.

4.1.2.2 Limitationen der Ermittlung der CO₂-Emissionen

Die ermittelten CO₂-Äquivalente sind systematisch unterschätzt, da die DEFRA Umrechnungsfaktoren lediglich die CO₂-Emissionen abbilden, die bei der Produktion der Fertigungsmaterialien entstehen, nicht aber die Emissionen, die bei der Herstellung der Endprodukte entstehen. Berücksichtigt werden die Gewinnung der Rohstoffe, der Transport zur Produktionsstätte und die Fertigung der Materialien bis zum Verlassen des Werkstores. Die Produktion und Verpackung der Endprodukte, der Transport zum Endverbraucher und die Nutzung des fertigen Artikels werden nicht berücksichtigt. Dieser systematische Fehler gilt jedoch gleichermaßen für Einweg- und Mehrwegartikel, sodass das Verhältnis des CO₂-Fußabdrucks zwischen Einweg- und Mehrwegartikeln trotz absoluter systematischer Unterschätzung dennoch als zuverlässig angenommen werden kann.

Die Verwendung der DEFRA-Konversionsfaktoren erlaubt zudem nur eine näherungsweise Bestimmung der Treibhausgasemissionen der untersuchten Produkte und der Aufbereitung der Mehrwegartikel, da sie für britische Unternehmen oder solche, die in Großbritannien operieren, bestimmt sind. Sie sind somit nicht uneingeschränkt auf andere Länder übertragbar. Für Deutschland sind solche Umrechnungsfaktoren jedoch nicht verfügbar. Auch andere Publikationen verwenden die Konversionsfaktoren des DEFRA für ihre Kalkulationen¹². Es kann zudem davon

ausgegangen werden, dass sich die Treibhausgasemissionen für in Europa operierende Unternehmen nicht maßgeblich unterscheiden, sodass die Konversionsfaktoren des DEFRA näherungsweise auch für in Deutschland operierende Unternehmen gelten können. Auch das gemeinsame Forum von DGAI und BDA „Nachhaltigkeit in der Anästhesiologie“ schlägt dieses Vorgehen zur Bestimmung der CO₂-Emissionen vor.¹⁶

Um die Konversionsfaktoren möglichst exakt anwenden zu können, muss die genaue Zusammensetzung des Materials eines Produktes bekannt sein. Beispielsweise erzeugen unterschiedliche Plastiksarten unterschiedliche Emissionen. Die genaue Zusammensetzung war jedoch bei einigen Artikeln, wie etwa den Einweg-Beatmungsschlauchsystemen oder den Verpackungsmaterialien, nicht zu ermitteln, da die Hersteller keine Angaben darüber machen konnten. Bei anderen Artikeln, wie den Einweg-Beatmungsmasken sowie den Mehrweg-Laryngoskopspateln, war die Zerlegung in die einzelnen Komponenten nicht sinnvoll möglich. Da sich die errechneten Emissionen aber trotz unterschiedlicher Konversionsfaktoren für die verschiedenen Plastiksarten auf Grund der geringen Gewichte der Artikel und ihrer Verpackungen kaum unterscheiden, wurde aus pragmatischen Gründen für alle Plastikkomponenten der Umrechnungsfaktor für Mischplastik verwendet. Das Ziel dieser Arbeit war letztlich eine vergleichende Betrachtung der CO₂-Emissionen zwischen Einweg- und Mehrwegartikeln und nicht die exakte Bestimmung der Emissionen. Dazu wäre eine aufwändige Lebenszyklusanalyse notwendig, die auf Grund der Unzugänglichkeit notwendiger Daten, zum Beispiel wegen Vertraulichkeit von internen Herstellerinformationen oder dem Fehlen notwendiger Daten nicht möglich war. Prinzipiell ist die Ermittlung der CO₂-Emissionen über die Nutzung durchschnittlicher Industriedaten, die in Datenbanken wie Ecoinvent³⁴ oder durch das DEFRA³⁷ zur Verfügung gestellt werden, mit einer höheren Unsicherheit verbunden, als über eine direkte Messung der Emissionen auf allen Produktionsstufen. Dies wäre allerdings mit einem extrem hohen Aufwand verbunden und nicht praktikabel.²⁵ Um zuverlässigere Daten zum Fußabdruck bestimmter Produkte zu erhalten, müssten Hersteller ihre gesamten Produktionsketten offenlegen oder selbst Lebenszyklusanalysen für ihre Produkte erstellen. Eine Verpflichtung für die Hersteller zur Erstellung und Veröffentlichung vollständiger Lebenszyklusanalysen

für alle Medizinprodukte fordert deshalb auch die Kommission „Nachhaltigkeit in der Anästhesiologie“ der DGAI und des BDA.¹⁶

4.2 Diskussion der Ergebnisse

Trotz der beschriebenen Limitationen sind die Ergebnisse dieser Arbeit konsistent mit zahlreichen Studien der letzten Jahre. Sherman, Raibley und Eckelman verglichen 2018 die Treibhausgasemissionen und Kosten von Einweg- und Mehrweg-Laryngoskopen unter unterschiedlichen Aufbereitungsszenarien am Yale-New Haven Hospital in den USA und kamen zu dem Ergebnis, dass Einweg-Laryngoskopgriffe einen 16- bis 18-fach höheren CO₂-Fußabdruck generierten als Mehrweg-Laryngoskopgriffe, die einer einfachen Wischdesinfektion zugeführt wurden.²¹ Einweg-Laryngoskopspatel aus Plastik führten zu 5- bis 6-fach höheren CO₂-Emissionen als Mehrweg-Laryngoskopspatel aus Edelstahl, die nach jeder Benutzung mit einer hochwirksamen Desinfektion („high level disinfection“) behandelt wurden. Auch die Kosten waren bei den Einwegartikeln unabhängig vom Reinigungsverfahren der Mehrweg-Alternativen höher. 2012 zeigten Eckelman und Kollegen, dass durch die Verwendung von Mehrweg-Larynxmasken 1/3 weniger CO₂-Äquivalente als bei der Verwendung von Einweg-Larynxmasken entstehen. Gleichzeitig waren die Kosten über einen Lebenszyklus gesehen bei Mehrweg-Larynxmasken 20 % niedriger als bei Einweg-Larynxmasken.⁴⁰ In einer Arbeit von Sanchez, Eckelman und Sherman aus dem Jahr 2020 konnte ein geringerer ökologischer Fußabdruck von Mehrweg-Blutdruckmanschetten im Vergleich zu Einweg-Alternativen unabhängig von der Art der Reinigung gezeigt werden.^{21,23} Übereinstimmend mit der vorliegenden Arbeit konnten Sanchez und Kollegen die Emissionen der Einwegprodukte hauptsächlich auf die Materialproduktion zurückführen, wohingegen die Emissionen der Mehrwegartikel vorwiegend durch die Produktion der Desinfektionstücher und damit durch die Aufbereitung bestimmt wurden. Die Kosten der Einweg-Blutdruckmanschetten waren im stationären Bereich interessanterweise etwas niedriger als die der Mehrweg-Blutdruckmanschetten. Dies war auf die regelmäßigen Wischdesinfektionen der Mehrwegartikel zurückzuführen. In einem Szenario, in dem die Blutdruckmanschetten patientenbezogen über die Dauer des stationären Aufenthalts weiter genutzt wurden, erwiesen sich hingegen die Mehrwegartikel pro Tag und pro Nutzung als günstiger. Keil und Kollegen publizierten 2022 einen Übersichtsartikel, in dem sie den Umwelteffekt, der durch die

Umstellung von medizinischen Einwegprodukten auf Mehrwegprodukte entsteht, untersuchten.⁴¹ 27 Studien wurden eingeschlossen, wobei zehn Studien invasive Materialien wie Laryngoskopspatel und Larynxmasken untersuchten. In der Subgruppe der invasiven Medizinprodukte konnte gezeigt werden, dass es durch den Wechsel auf Mehrwegprodukte zu einer durchschnittlichen Reduktion der Treibhausgasemissionen um 47 % kam. Dies ist konsistent mit den hier vorliegenden Daten, die eine durchschnittliche Reduktion um 49 % ergaben. Nur zwei der untersuchten Studien analysierten den Effekt auf den Wasserverbrauch, der in beiden Fällen bei der Verwendung von Mehrwegmaterialien deutlich höher lag.^{22,42} In der vorliegenden Arbeit wurde der Wasserverbrauch nicht untersucht. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass der Wasserverbrauch bezogen auf das Universitätsklinikum Frankfurt durch die Umstellung auf Mehrwegartikel auf Grund der notwendigen Aufbereitung ansteigen würde. Ob der Wasserverbrauch global gesehen ebenfalls ansteigen oder durch die geringere Produktion und Entsorgung von Einwegartikeln unverändert bleiben oder sogar sinken würde, lässt sich mit den vorliegenden Daten nicht beantworten. Keil und Kollegen zeigten außerdem auf, dass der ökologische Fußabdruck der Mehrwegprodukte stark von der Anzahl der Nutzungen und der Art der Aufbereitung abhängt. Wird die Reinigungsmaschine beispielsweise mit nur einer Larynxmaske bestückt statt vollständig gefüllt, kommt es statt zu einer Reduktion des CO₂-Äquivalents um 35 % zu einem Anstieg um 227 % verglichen mit der Nutzung einer Einweg-Larynxmaske.⁴⁰ Ebenso führt die zehnmalige Nutzung einer Mehrweg-Larynxmaske zu einem Anstieg der Treibhausgasemission um 0,8 % gegenüber dem Einwegprodukt, wohingegen 40 Nutzungen zu einer Reduktion von 34,5 % führten.⁴⁰

Die eigenen Ergebnisse gründen sich auf die Annahmen einer voll beladenen Reinigungsmaschine sowie einer Nutzung der Mehrwegartikel bis zum Ende ihrer Lebenszeit nach Herstellerangaben. Diese Annahmen wurden getroffen, da die notwendigen Daten verfügbar waren und eine Vollbeladung des Reinigungsautomaten bzw. die Nutzung der Artikel bis zum Ende ihrer Lebenszeit durch die Mitarbeiter der anästhesiologischen Abteilung und der Materialaufbereitung angestrebt würde. Wird hingegen jeweils nur eine Beatmungsmaske, ein Laryngoskopspatel oder ein Beatmungsschlauchsystem aufbereitet, müssen die

Kosten der Reinigung von 5,55 € pro Reinigungsgang vollständig auf einen Artikel umgelegt werden. Damit erhöhen sich die Kosten für jeden Artikel pro Nutzung erheblich. Die Beatmungsschlauchsysteme kosten unter dieser Annahme mit 9,50 € mehr als doppelt so viel pro Nutzung, die Beatmungsmasken im Durchschnitt 5,76 € statt 0,37 € und die Kosten eines Laryngoskopspatels steigen von 0,12 € auf 5,67 €. Pro Nutzung wären die Mehrwegartikel damit deutlich teurer als die Einwegartikel. Auch die Treibhausgasemissionen stiegen in diesem Fall pro Artikel deutlich, da die entstehenden CO₂-Emissionen von 5,28 kg pro Reinigungsgang einem einzigen Artikel zugerechnet würden. Damit stiegen die Emissionen pro Artikel und pro Nutzung etwa um den Faktor 10 für das Beatmungsschlauchsystem und etwa um den Faktor 65 für die anderen Artikel, sodass in diesem Szenario die Einwegartikel sowohl günstiger als auch umweltfreundlicher als die Mehrwegartikel wären. Üblicherweise wurden die Reinigungsmaschinen in der Vergangenheit im alltäglichen Gebrauch voll beladen, es kam jedoch gelegentlich durch ineffiziente Beladung oder der dringlichen Aufbereitung einzelner Artikel zu einer etwas geringeren durchschnittlichen Auslastung von schätzungsweise 90 %. Wird für die vorausgegangen Kalkulationen entsprechend eine Maschinenbeladung von 90 % angenommen, müssen auf einen Artikel 1/61 bzw. für das Beatmungsschlauchsystem 7/61 der Kosten sowie der Emissionen pro Reinigungsgang umgelegt werden. Damit stiegen die Treibhausgasemissionen um 0,01 kg CO₂-Äquivalent pro Artikel bzw. um 0,61 kg CO₂-Äquivalent pro Beatmungsschlauchsystem gegenüber der Annahme einer voll beladenen Maschine. Die Kosten stiegen in diesem Fall um 0,01 € pro Artikel bzw. 0,64 € pro Beatmungsschlauchsystem. Damit blieben alle Mehrwegartikel dennoch günstiger und umweltfreundlicher als die Einwegartikel. Erst bei einer Maschinenbeladung von etwa 50 % gleichen sich die Kosten und die CO₂-Emissionen der Mehrwegartikel denen der Einwegartikel pro Nutzung an.

In Bezug auf die Nutzungsdauer der Mehrwegartikel kann in der praktischen Anwendung möglicherweise von einer höheren Nutzungsdauer als der durch den Hersteller vorgegebenen ausgegangen werden. Zahlreiche Kollegen der Anästhesiepflege, die jahrelange Erfahrung mit der Nutzung von Mehrwegartikeln haben, bestätigen deutlich längere Lebensdauern der Artikel als 100 bzw. 4000

Aufbereitungen. Ein Artikel muss zwar bei Beschädigung entsorgt werden, darüber hinaus gibt es aber keine festgelegte Einschränkung der Nutzungsdauer. Die Herstellerangaben sind als Empfehlung zu werten. Es kann also davon ausgegangen werden, dass zwar einige Artikel durch Beschädigung oder Verlust für weniger als 100 bzw. 4000 Reinigungszyklen genutzt werden können, dass dies aber durch die längere Nutzung anderer Artikel mindestens ausgeglichen oder sogar überkompensiert werden kann. Die realistische Nutzungsdauer könnte also in der durchgeführten Kosten- und CO₂-Emissions-Analyse unterschätzt worden sein. Die vorliegenden Ergebnisse würden in diesem Fall die Vorteilhaftigkeit der Mehrwegprodukte weiter untermauern, da bei einer längeren Nutzungsdauer sowohl die Kosten- als auch die Treibhausgasemissionen pro Nutzung der Mehrwegartikel niedriger wären als in dieser Arbeit beschrieben.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind auch durch regionale Gegebenheiten beeinflusst. McGain und Kollegen zeigten 2012, dass die CO₂-Emissionen von Mehrwegartikeln wesentlich von dem für die Aufbereitung genutzten Energiemix abhängen. Sie verglichen Einweg- und Mehrweg-Legesets für zentralvenöse Katheter in Bezug auf die verursachten Treibhausgasemissionen und kamen zu dem Ergebnis, dass die Mehrwegartikel in Australien höhere Emissionen verursachen als die Einweg-Alternative.⁴² Ursächlich hierfür war der hohe Energieverbrauch für die Sterilisation der Produkte und die in Australien genutzte Energie, die ebenso wie in China hauptsächlich aus Braunkohle gewonnen wird.³² Eine weitere Publikation von McGain aus dem Jahr 2017 untersuchte die finanziellen und ökologischen Kosten, die bei der Umstellung von Einweg- auf Mehrwegmaterial in der Anästhesiologie in einem australischen Krankenhaus mit sechs Operationssälen entstehen.²² Dabei konnte gezeigt werden, dass die finanziellen Kosten durch die Umstellung auf Mehrwegartikel um 46 % sinken, die CO₂-Emissionen jedoch bei Nutzung des australischen Energiemix um 9 % steigen. Unter der Annahme eines europäischen Energiemix sanken die CO₂-Emissionen hingegen um 84 % durch die Umstellung von Einweg- auf Mehrwegartikel. McGain und Kollegen untersuchten in dieser Arbeit neben den CO₂-Emissionen unter anderem auch den Wasserverbrauch und die Toxizität für Menschen und Gewässer durch die Nutzung von Einwegmaterial im Vergleich zur Nutzung von Mehrwegmaterial. Dabei zeigte sich außer bei den CO₂-

Emissionen und dem Wasserverbrauch ein geringer Unterschied für alle untersuchten Bereiche. In der vorliegenden Arbeit wurden außer den Treibhausgasemissionen keine weiteren Umweltauswirkungen ermittelt.

Die vorliegenden Daten bestätigen, dass die CO₂-Emissionen der Mehrwegartikel wesentlich durch die Aufbereitung bestimmt werden. Anders als in der australischen Studie zeigte sich hier jedoch, dass durch die Nutzung von Mehrwegartikeln weniger Treibhausgasemissionen entstehen, was auch auf den durch das Universitätsklinikum Frankfurt genutzten Energiemix zurückzuführen ist und damit nicht ohne weiteres auf andere Kliniken übertragen werden kann.

Insgesamt sind die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit konsistent mit der aktuellen Studienlage. Verschiedene Ein- und Mehrwegartikel wurden in den letzten Jahren verglichen und die meisten Untersuchungen zeigten bezüglich der Kosten und der Treibhausgasemissionen einen Vorteil der Mehrwegartikel gegenüber Einwegartikeln. Einwegartikel waren nur dann vorteilhaft, wenn die Aufbereitung der Mehrwegartikel sehr energieintensiv war oder dafür Energie aus Quellen mit hohen CO₂-Emissionen genutzt wurde.

Bei den scheinbar eindeutigen Ergebnissen stellt sich die Frage, warum die überwiegende Mehrheit der Kliniken weiterhin Einwegartikel bevorzugt. Es gibt einige praktische Gründe, die die Nutzung von Mehrwegmaterial erschweren. Bereits beschrieben wurde die Dokumentationspflicht der Aufbereitung jedes semikritischen oder kritischen Artikels, die Kliniken vor Herausforderungen stellt. Durch ein EDV-System, das die rechtssichere Dokumentation des Aufbereitungsprozesses jedes Artikels gewährleistet, entstehen Anschaffungs-, Instandhaltungs- und Wartungskosten sowie Personalkosten, die die Nutzung von Mehrwegmaterial verteuern. Zudem liegt die Verantwortung über die ordnungsgemäße Reinigung und Einsatzfähigkeit für Mehrwegartikel bei der Einrichtung, die die Artikel verwendet. Für Einwegartikel haftet hingegen der Hersteller. Dieser Umstand lässt Mehrwegartikel aus Sicht des Anwenders weniger attraktiv erscheinen als Einwegartikel. Sind die notwendigen Reinigungsmaschinen oder das Personal für die Aufbereitung nicht bereits vorhanden, müssen auch diese Kosten zu den Kosten der Mehrwegartikel addiert werden. Für die Aufbereitung und Lagerung der Mehrwegprodukte müssen

adäquate Räumlichkeiten vorhanden sein, die möglicherweise nicht in jeder Einrichtung vorzufinden sind. Schließlich sind die Investitionskosten für Mehrwegartikel höher als die für Einwegartikel, da die Kapitalbindung höher ist. Eine Umstellung auf Mehrwegartikel scheint auch deshalb nicht unproblematisch zu sein, da das Angebot begrenzt ist. Obwohl im Rahmen dieser Arbeit zahlreiche Hersteller und Vertrieber von Medizinprodukten um Angebote zu Mehrwegartikeln gebeten wurden, war der Rücklauf begrenzt. Viele Hersteller bieten keine oder nur eine geringe Auswahl an Mehrwegartikeln an. Als Grund für das geringe Angebot wurde von den Herstellern die fehlende Nachfrage genannt. Denkbar ist auch, dass der Verkauf von Einwegartikeln für die Hersteller aus wirtschaftlicher Sicht vorteilhafter ist und somit ein Interesse daran besteht, primär diese herzustellen und zu vertreiben.

Alle genannten Gründe tragen dazu bei, dass Einwegartikel häufig gegenüber Mehrwegartikeln bevorzugt werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen jedoch, dass das untersuchte Mehrwegmaterial unter den Rahmenbedingungen des Universitätsklinikums Frankfurt sowohl bei den Kosten als auch in der CO₂-Bilanz den Einwegartikeln überlegen ist und dass sich ein Vergleich der beiden Alternativen auch für andere Einrichtungen lohnen kann.

4.3 Weitere Maßnahmen zur Senkung der Treibhausgasemissionen

Um Treibhausgasemissionen zu reduzieren und das angestrebte Klimaziel von einer Begrenzung der Erderwärmung auf maximal 1,5 Grad Celsius zu erreichen, müssen gesamtgesellschaftlich erhebliche Anstrengungen unternommen werden. Auch der Gesundheitssektor bleibt davon nicht ausgenommen. In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Umstellung der untersuchten Verbrauchsmaterialien auf Mehrwegalternativen eine Möglichkeit ist, die CO₂-Emissionen der anästhesiologischen Abteilung des Universitätsklinikums Frankfurt im Bereich der Sachartikel zu reduzieren. Die Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen können aber nicht auf die Umstellung zu Mehrwegartikeln beschränkt bleiben. Es gibt zahlreiche weitere Möglichkeiten, den CO₂-Fußabdruck

in der Anästhesiologie in Bezug auf Sachartikel zu senken. Im Folgenden werden einige Maßnahmen aufgezeigt, die als Anregung für weitere Handlungsoptionen dienen können.

Ein Ansatz ist die Verwendung von recycelten Materialien. Beispielsweise führen aus recyceltem Metall hergestellte Laryngoskopspatel bei sonst äquivalenten Bedingungen zu Treibhausgasemissionen von nur etwa 40 % verglichen mit den Emissionen von Laryngoskopspateln, die aus primärer Metallproduktion stammen.³⁷ Eine gesteigerte Nachfrage nach Produkten, die aus recyceltem Material gefertigt werden, ein Dialog mit den Herstellern sowie entsprechende gesetzliche Rahmenbedingungen erscheinen sinnvoll, um die Verarbeitung von Recyclingmaterial zu fördern.

Neben der bevorzugten Verwendung von recycelten Materialien sollten Verbrauchsartikel nach Ende ihrer Nutzungsdauer dem Recycling zugeführt werden, um den Materialkreislauf zu schließen. McGain, Hendel und Story sammelten 2009 fünf Tage lang den Abfall aus sechs Operationssälen in einem Krankenhaus in Melbourne, Australien und zeigten, dass 25 % des gesamten Abfalls der Anästhesie zuzuordnen war und dass 60 % des anästhesiologischen Mischabfalls recycelbar war.⁴³ In einer ähnlichen Untersuchung aus England zeigten Hutchins und White, dass im Royal Sussex County Hospital in Brighton, Vereinigtes Königreich, im Jahr 2008 etwa 2300 kg anästhesiologischer Abfall pro Jahr pro Operationssaal produziert wurde und 40 % davon recycelbar war.⁴⁴ Das Trennen und Recyclen des Abfalls ist im Zentral-OP des Universitätsklinikums Frankfurt zwar prinzipiell möglich, wird aber aus Bequemlichkeit und fehlender praktischer Trennmöglichkeiten kaum durchgeführt. Hierfür müssten Abfalleimer etabliert werden, die eine Trennung und Kennzeichnung des Abfalls erlauben. Kontaminierter Abfall muss von nicht kontaminiertem Abfall getrennt werden. Um eine sichere Abfalltrennung zu gewährleisten, wären zudem Schulungen der Mitarbeiter notwendig.⁴³

Neben der Nutzung klassischer Einweg- und Mehrwegartikel gibt es die Möglichkeit, bestimmte Einwegartikel aufzubereiten und diese wiederzuverwenden. Dabei bleiben Sicherheit und Funktionalität des Produkts erhalten. In einer Studie des Fraunhofer-Instituts wurde 2020 der CO₂-Fußabdruck der Neuproduktion mit der

Wiederaufbereitung von Einweg-Kathetern für elektrophysiologische Untersuchungen verglichen. Dabei konnte gezeigt werden, dass ein neu produzierter Katheter mehr als doppelt so viele CO₂-Emissionen verursacht als ein Katheter, der aufbereitet wurde.⁴⁵ Diese Aufbereitung von eigentlich für den Einmalgebrauch bestimmten Produkten wird in Deutschland bisher kaum praktiziert, ist jedoch rechtlich möglich und in den USA eine gängige Praxis, um Kosten und Abfall zu reduzieren. Im Jahr 2010 nutzten bereits mehr als 25 % der US-amerikanischen Krankenhäuser aufbereitete Einwegartikel.⁴⁶ Im Sinne der Nachhaltigkeit könnte diese Praxis auch hierzulande als Möglichkeit in Betracht gezogen werden. In einer gemeinsamen Stellungnahme des Vorstands der *Deutschen Gesellschaft für Krankenhaushygiene* und der *Zentralstelle der Länder für Gesundheitsschutz bei Arzneimitteln und Medizinprodukte* wird die Möglichkeit der Aufbereitung von für den Einmalgebrauch bestimmten Produkten unter bestimmten Voraussetzungen betont.⁴⁷ Es ist jedoch aufwändig, infektiologisch und rechtlich sichere Aufbereitungsprozesse zu definieren und zu überwachen, da für Einwegartikel keine Herstellerangaben zur sicheren Aufbereitung existieren. Die Verantwortung für die Sicherheit des Artikels und damit die Haftung geht nach Aufbereitung vom Hersteller auf den Anwender über.

Eine weitere Möglichkeit den ökologischen Fußabdruck der Anästhesiologie zu senken, ist es, den Wechsel der Beatmungsschlauchsysteme nur einmal wöchentlich durchzuführen. Dies reduziert die Häufigkeit der Aufbereitungen, die bei Mehrwegartikeln den größten Effekt auf die CO₂-Emissionen haben und es reduziert den Verschleiß der Beatmungsschlauchsysteme durch die Aufbereitung. Die Beatmungsschläuche werden in den OP-Sälen des Zentral-OPs des Frankfurter Universitätsklinikums ohne Kontamination regelhaft alle 24 Stunden gewechselt. An weniger frequentierten Außenarbeitsplätzen erfolgt der Wechsel einmal wöchentlich. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Keimbelastung der Schläuche nach 24 Stunden Nutzungsdauer im Vergleich zu einer siebentägigen Nutzungsdauer nicht unterscheidet, wenn individuelle Atemsystemfilter genutzt werden, die in der klinischen Praxis regelhaft verwendet werden.⁴⁸

Die dargestellten Beispiele zeigen nur einige der zahlreichen Möglichkeiten zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Bereich der Sachartikel in der Anästhesiologie. Eine Kombination möglichst vieler Maßnahmen wäre

wünschenswert, um die Umweltauswirkungen durch anästhesiologisches Handeln zu reduzieren. Gelegentlich stehen diese Maßnahmen jedoch in Konkurrenz mit wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Aspekten, die eine Implementierung erschweren können.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Um die drohende Klimakatastrophe abzuwenden, verpflichteten sich 195 Nationen im Rahmen des Pariser Abkommens im Jahr 2015 zu einer umfassenden Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen mit dem Ziel, die Erderwärmung auf 1,5 Grad Celsius bezogen auf das präindustrielle Level zu begrenzen. Obwohl der Gesundheitssektor in Deutschland für 6,7 % der nationalen Treibhausgasemissionen verantwortlich ist, spielen notwendige Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen im klinischen Alltag bisher nur eine untergeordnete Rolle.⁴⁹ Um dieser Problematik zu begegnen, wurde im Jahr 2020 durch die gemeinsame Kommission von DGAI und BDA „Nachhaltigkeit in der Anästhesiologie“ ein Positionspapier mit konkreten Handlungsempfehlungen für die Anästhesiologie veröffentlicht. Das Ziel war, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und die negativen ökologischen Effekte des Fachgebiets zu mindern.¹⁶ Eine der Empfehlungen war, die Umstellung von verwendeten Einmalartikel auf Mehrwegartikel zu prüfen. Um dieser Empfehlung nachzukommen, wurden in der vorliegenden Arbeit die Treibhausgasemissionen pro Nutzung von den aktuell im Zentral-OP des Universitätsklinikums Frankfurt genutzten Einweg-Beatmungsschlauchsystemen, Einweg-Beatmungsmasken der Größen 3 und 4 sowie den Einweg-Laryngoskopspateln der Größen 3 und 4 ermittelt und mit den Emissionen der Mehrweg-Alternativen pro Nutzung verglichen. Dabei wurden die Emissionen der Materialproduktion und -entsorgung sowie die Emissionen, die bei der Aufbereitung der Mehrwegartikel entstehen, berücksichtigt. Die Berechnung erfolgte pro Nutzung mit Hilfe der Konversionsfaktoren des DEFRA bezogen auf das Materialgewicht sowie bei den Mehrwegmaterialien zusätzlich unter Einbeziehung des Wasser- und Stromverbrauchs der Aufbereitung sowie der Verpackung in Schutzbeutel. Zusätzlich wurden die Kosten pro Nutzung sowohl der Einweg-Beatmungsschlauchsysteme, Einweg-Beatmungsmasken der Größen 3 und 4 und der Einweg-Laryngoskopspatel der Größen 3 und 4 ermittelt und mit den Kosten der entsprechenden Mehrweg-Artikel verglichen. Dabei wurden die realen Einkaufspreise des Universitätsklinikums Frankfurt aus dem Jahr 2022, die Herstellerangebote für Mehrwegartikel sowie die gewichtsbezogenen Kosten der Entsorgung aus dem Jahr

2022 herangezogen. Für die Mehrwegartikel wurden die Kosten der Aufbereitung addiert.

Insgesamt zeigte sich, dass unter den getroffenen Annahmen alle untersuchten Mehrwegartikel pro Nutzung sowohl deutlich niedrigere Kosten als auch niedrigere Treibhausgasemissionen als die untersuchten Einwegartikel erzeugen. Dieses Ergebnis ist konsistent mit der aktuellen Studienlage. Es ist allerdings nicht ohne Einschränkungen auf andere Einrichtungen übertragbar. Hier sind größere multizentrische Untersuchungen sowie umfangreiche Lebenszyklusanalysen der verwendeten Verbrauchsmaterialien und Medikamente in der Anästhesiologie notwendig, um valide Daten zu ihren Treibhausgasemissionen zu generieren und solide Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Traditionelle Kriterien für die Auswahl und die Anschaffung von Medizinprodukten, wie Kosten, Sicherheit und Komfort in der Anwendung, müssen vor dem Hintergrund des Klimawandels und den geänderten Anforderungen an Umweltschutz um Aspekte der ökologischen Verträglichkeit ergänzt werden. Mit der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Umstellung auf Mehrwegartikel einen Beitrag zur Nachhaltigkeit in der Anästhesiologie leisten kann, ohne dabei Kosten- oder Sicherheitsaspekte zu vernachlässigen. Bestehende Hindernisse für die praktische Umsetzung einer Umstellung auf Mehrwegartikel wurden identifiziert. Hier sind sowohl die Gesundheitseinrichtungen selbst als auch die gesetzlichen Rahmenbedingungen dafür verantwortlich, Hindernisse für die praktische Umsetzung abzubauen und die Implementierung umweltfreundlicher Maßnahmen voranzutreiben, um Krankenhäuser und das Gesundheitssystem „grüner“ zu machen.

6 Zusammenfassung der Arbeit

Angesichts der Bedrohung durch den Klimawandel sind Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen dringend notwendig. Obwohl auf den Gesundheitssektor 5 bis 10 % der nationalen Treibhausgasemissionen entfallen, spielt das Thema Nachhaltigkeit in deutschen Kliniken bisher nur eine untergeordnete Rolle.⁹ Studien der letzten Jahre haben gezeigt, dass die Nutzung von Mehrwegartikeln gegenüber der Nutzung von Einwegartikeln in der Anästhesiologie einen Vorteil in Bezug auf die CO₂-Emissionen bieten kann.^{19,21,22,42} Gleichzeitig stehen Kliniken vor der Herausforderung, kosteneffizient zu handeln. In der vorliegenden Promotionsarbeit werden deshalb die CO₂-Emissionen sowie die Kosten von Einweg-Beatmungsschlauchsystemen, Einweg-Beatmungsmasken und Einweg-Laryngoskopspateln im Zentral-OP des Universitätsklinikums Frankfurt pro Nutzung ermittelt und diese mit den Kosten sowie den CO₂-Emissionen von entsprechenden Mehrweg-Alternativen pro Nutzung verglichen. Daraus soll eine Handlungsempfehlung für die künftige Verwendung von Mehrwegmaterial oder Einwegmaterial abgeleitet und ein Beitrag zur Nachhaltigkeit in der Anästhesiologie geleistet werden.

Methodisch wurde eine deskriptive Untersuchung umgesetzt. Die Daten wurden anhand von Informationen, die von den Produktherstellern, der *Host Energie GmbH*, der Abteilung Einkauf und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Materialaufbereitung des Universitätsklinikums Frankfurt zur Verfügung gestellt wurden sowie durch eigene Erhebung gesammelt. Die Kosten pro Nutzung wurden anhand der realen Bezugspreise aus dem Jahr 2022 für die Einwegmaterialien bzw. der Angebote der Anbieter für die Mehrwegprodukte errechnet. Die Kosten der Entsorgung wurden gewichtsbezogen addiert. Für die Mehrwegartikel wurden zudem die Kosten der Aufbereitung berücksichtigt. Für die Kalkulationen der CO₂-Emissionen wurden die Konversionsfaktoren des DEFRA aus Großbritannien verwendet, die bei bekanntem Produktgewicht eine näherungsweise Bestimmung der Treibhausgasemissionen der Materialproduktion, der Entsorgung und der Aufbereitung erlauben. Patientendaten wurden nicht verwendet, so dass weder ein Ethikvotum noch ein Datenschutzvotum erforderlich waren.

Die Ergebnisse zeigen, dass alle untersuchten Mehrwegartikel pro Nutzung günstiger sind als die äquivalenten Einwegartikel, wobei der Preisunterschied bei den Laryngoskopspateln am größten ist. Diese kosten als Einwegartikel 2,66 € pro Nutzung, die Mehrweg-Alternative 0,12 € pro Nutzung. Gleichzeitig sind die Treibhausgasemissionen pro Nutzung für alle untersuchten Mehrwegartikel niedriger als für die entsprechenden Einwegartikel. Der Unterschied ist hier ebenfalls bei den Laryngoskopspateln am größten. Ein Einweg-Laryngoskopspatel der Größe 4 generiert pro Nutzung 0,228 kg CO₂-Äquivalent, wohingegen die Mehrweg-Alternative nur 0,093 kg CO₂-Äquivalent verursacht.

Im Fazit ergibt sich dadurch, dass die Verwendung von Mehrweg-Beatmungsschlauchsystemen, Mehrweg-Beatmungsmasken und Mehrweg-Laryngoskopspateln für das Universitätsklinikum Frankfurt einen sowohl ökonomischen als auch ökologischen Vorteil gegenüber der Verwendung der Einwegartikel bietet. Die Umstellung zu Mehrwegartikeln in der Anästhesiologie hat somit nicht nur das Potenzial Kosten einzusparen, sondern auch den CO₂-Fußabdruck im Gesundheitssektor zu senken.

7 Abstract

Climate change is one of the biggest threats of our time, demanding urgent action to reduce greenhouse gas emissions. While the health sector contributes to 5 to 10 % of national greenhouse gas emissions in Germany, national hospitals have not taken substantial action on this matter yet.⁹ Recent studies have shown that using reusable medical devices instead of single-use devices in anaesthesiology can decrease the carbon footprint of health care.^{19,21,22,42} At the same time cost pressure remains high for health care facilities. In this dissertation, I have conducted calculations to determine the economic costs and CO₂ emissions associated with single-use breathing circuits, single-use breathing masks, and single-use laryngoscope blades per use at the central surgical suites of Frankfurt University Hospital. These values were then compared with the economic costs and CO₂ emissions of reusable alternatives per use. The primary objective was to provide recommendations for future procurement decisions and contribute significantly to sustainability in anaesthesiology.

Methodically, I used a descriptive approach. Data was collected from manufacturers, the local energy provider, the procurement department, and the professionals responsible for reprocessing medical devices at Frankfurt University Hospital as well as by own data inquiry. Costs were calculated using real purchase prices from 2022 for single-use products and offers by manufacturers for reusable devices respectively. Waste disposal fees were added for every product as well as reprocessing costs including water and energy consumption for reusable products. Based on the products' materials and their weight CO₂ emissions for production, waste disposal and reprocessing were estimated by applying DEFRA greenhouse gas emission factors. No patient data were used so review by the ethics committee or a privacy statement was not required.

The results show that all reusable devices examined account for lower costs per use than single-use alternatives. The price difference is largest for laryngoscope blades where single-use blades cost 2,66 € per use and reusable ones 0,12 €, respectively. Additionally, greenhouse gas emissions in CO₂ equivalents per use are lower for reusable devices compared to single-use alternatives. Again, the difference is largest

for laryngoscope blades. A single-use laryngoscope blade size 4 generates a CO₂ equivalent of 0,228 kg per use, whereas the reusable alternative accounts for 0,093 kg CO₂ equivalents per use.

In summary, the findings of this study clearly indicate that reusable breathing circuits, reusable breathing masks, and reusable laryngoscope blades offer both ecological and economic benefits over their single-use counterparts at Frankfurt University Hospital. Emphasizing the use of reusable devices in anaesthesiology has the potential not only to yield cost savings but also to significantly reduce healthcare's carbon footprint.

8 Literaturverzeichnis

1. Watts N, Amann M, Arnell N, et al. The 2020 report of The Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises. *The Lancet*. 2021;397(10269):129-170.
2. Ippcc. *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. 1st ed. Cambridge University Press; 2022. doi:10.1017/9781009157940
3. Wilke S. Europäische Energie- und Klimaziele. Umweltbundesamt. Published July 16, 2013. Accessed June 18, 2023. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/europaeische-energie-klimaziele>
4. Übereinkommen von Paris. Published online December 12, 2015. Accessed June 18, 2023. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf
5. Schmid S. Deutscher Bundestag - Bundestag verschärft das Klimaschutzgesetz. Deutscher Bundestag. Accessed June 18, 2023. <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2021/kw25-de-klimaschutzgesetz-846922>
6. National Oceanic and Atmospheric Administration. Basics of the Carbon Cycle and the Greenhouse Effekt. Accessed February 11, 2023. https://gml.noaa.gov/education/carbon_toolkit/basics.html
7. Zeebe RE, Ridgwell A, Zachos JC. Anthropogenic carbon release rate unprecedented during the past 66 million years. *Nat Geosci*. 2016;9(4):325-329.
8. Brook EJ, Buizert C. Antarctic and global climate history viewed from ice cores. *Nature*. 2018;558(7709):200-208.
9. Koch S, Pecher S. Neue Herausforderungen für die Anästhesie durch den Klimawandel. *Anaesthesist*. 2020;69(7):453-462.
10. Feldman DR, Collins WD, Gero PJ, Torn MS, Mlawer EJ, Shippert TR. Observational determination of surface radiative forcing by CO₂ from 2000 to 2010. *Nature*. 2015;519(7543):339-343.
11. Andersen MPS, Nielsen OJ, Wallington TJ, Karpichev B, Sander SP. Assessing the Impact on Global Climate from General Anesthetic Gases. *Anesth Analg*. 2012;114(5):1081-1085.
12. Richter H, Weixler S, Schuster M. Der CO₂-Fußabdruck der Anästhesie. Wie die Wahl volatiler Anästhetika die CO₂-Emissionen einer anästhesiologischen Klinik beeinflusst. *Anästh Intensiv*. 2020;(05-2020):154-161.

13. HealthCaresClimateFootprint_092319.pdf. Accessed February 7, 2023. https://noharm-global.org/sites/default/files/documents-files/5961/HealthCaresClimateFootprint_092319.pdf
14. Pichler PP, Jaccard IS, Weisz U, Weisz H. International comparison of health care carbon footprints. *Environ Res Lett.* 2019;14(6):064004.
15. Costello A, Abbas M, Allen A, et al. Managing the health effects of climate change. *The Lancet.* 2009;373(9676):1693-1733.
16. Schuster M. Positionspapier mit konkreten Handlungsempfehlungen* der DGAI und des BDA: Ökologische Nachhaltigkeit in der Anästhesiologie und Intensivmedizin. *Schuster M Richter H Pecher Koch Coburn M Positionspapier Mit Konkreten Handl Ökol Nachhalt Anästhesiol Intensivmed.* 2020;(07/08-2020):329-339.
17. Kagoma Y, Stall N, Rubinstein E, Naudie D. People, planet and profits: the case for greening operating rooms. *Can Med Assoc J.* 2012;184(17):1905-1911.
18. European Commission. Directorate-General for Health and Consumers. *The Safety of Reprocessed Medical Devices Marketed for Single-Use.* European Commission; 2010. Accessed July 12, 2023. <https://data.europa.eu/doi/10.2772/2166>
19. Overcash M. A Comparison of Reusable and Disposable Perioperative Textiles: Sustainability State-of-the-Art 2012. *Anesth Analg.* 2012;114(5):1055.
20. Sherman JD, Hopf HW. Balancing Infection Control and Environmental Protection as a Matter of Patient Safety: The Case of Laryngoscope Handles. *Anesth Analg.* 2018;127(2):576-579.
21. Sherman JD, Raibley LA, Eckelman MJ. Life Cycle Assessment and Costing Methods for Device Procurement: Comparing Reusable and Single-Use Disposable Laryngoscopes. *Anesth Analg.* 2018;127(2):434-443.
22. McGain F, Story D, Lim T, McAlister S. Financial and environmental costs of reusable and single-use anaesthetic equipment. *Br J Anaesth.* 2017;118(6):862-869.
23. Sanchez SA, Eckelman MJ, Sherman JD. Environmental and economic comparison of reusable and disposable blood pressure cuffs in multiple clinical settings. *Resour Conserv Recycl.* 2020;155:104643.
24. McGain F, McAlister S, McGavin A, Story D. The Financial and Environmental Costs of Reusable and Single-Use Plastic Anaesthetic Drug Trays. *Anaesth Intensive Care.* 2010;38(3):538-544.
25. McGain F, Story D, Kayak E, Kashima Y, McAlister S. Workplace Sustainability: The “Cradle to Grave” View of What We Do. *Anesth Analg.* 2012;114(5):1134-1139.

26. Das Universitätsklinikum Frankfurt in Zahlen: Universitätsklinikum Frankfurt am Main. Accessed June 19, 2023. <https://www.kgu.de/ueber-uns/das-universitaetsklinikum-frankfurt-in-zahlen>
27. Anästhesiologie, Intensivmedizin und Schmerztherapie: Universitätsklinikum Frankfurt am Main. Accessed June 19, 2023. <https://www.kgu.de/einrichtungen/kliniken/anaesthesiologie-intensivmedizin-und-schmerztherapie>
28. Anforderungen an die Hygiene bei der Aufbereitung von Medizinprodukten. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*. 2012;55(10):1244-1310.
29. Spaulding EH (1968). *Chemical Disinfection of Medical and Surgical Materials. Disinfection, Sterilization, and Preservation*. Lawrence C, Block SS. Philadelphia (PA), Lea & Febiger: 517–531.
30. DIN EN ISO 15883-1:2014-10, *Reinigungs-Desinfektionsgeräte_ - Teil_1: Allgemeine Anforderungen, Begriffe Und Prüfverfahren (ISO_15883-1:2006_+ Amd_1:2014); Deutsche Fassung EN_ISO_15883-1:2009_+ A1:2014*. Beuth Verlag GmbH doi:10.31030/2076101
31. DIN EN ISO 11607-1/A11:2022-08, *Verpackungen Für in Der Endverpackung Zu Sterilisierende Medizinprodukte_ - Teil_1: Anforderungen an Materialien, Sterilbarrieresysteme Und Verpackungssysteme (ISO_11607-1:2019); Deutsche Fassung EN_ISO_11607-1:2020/A11:2022*. Beuth Verlag GmbH doi:10.31030/3367100
32. McGain F, Muret J, Lawson C, Sherman JD. Environmental sustainability in anaesthesia and critical care. *Br J Anaesth*. 2020;125(5):680-692.
33. International Organization for Standardization. ISO- 14040. 2006. Available from <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>. [Accessed 20 April 2023].
34. Althaus HJ, Doka G, Dones R, et al. Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Heck T., Hellweg S., Hischer R., Nemecek T., Rebitzer G., Spielmann M., Wernet G. (2007) Overview and Methodology. ecoinvent report No. 1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007. 2007;(1).
35. Bjørn A, Hauschild MZ. Cradle to Cradle and LCA. In: Hauschild MZ, Rosenbaum RK, Olsen SI, eds. *Life Cycle Assessment*. Springer International Publishing; 2018:605-631. Accessed May 23, 2023. http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-56475-3_25
36. 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.

37. 2022 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting: Methodology Paper for Emission Factors. Published online 2022.
38. United Nations. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Published online December 11, 1997. Accessed August 14, 2023. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
39. *Verordnung (EU) 2019/631 Des Europäischen Parlaments Und Des Rates Vom 17. April 2019 Zur Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen Für Neue Personenkraftwagen Und Für Neue Leichte Nutzfahrzeuge Und Zur Aufhebung Der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 Und (EU) Nr. 510/2011.* <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R0631&from=DE>
40. Eckelman M, Mosher M, Gonzalez A, Sherman J. Comparative Life Cycle Assessment of Disposable and Reusable Laryngeal Mask Airways. *Anesth Analg.* 2012;114(5):1067-1072.
41. Keil M, Viere T, Helms K, Rogowski W. The impact of switching from single-use to reusable healthcare products: a transparency checklist and systematic review of life-cycle assessments. *Eur J Public Health.* 2023;33(1):56-63.
42. McGain F, McAlister S, McGavin A, Story D. A Life Cycle Assessment of Reusable and Single-Use Central Venous Catheter Insertion Kits. *Anesth Analg.* 2012;114(5):1073-1080.
43. McGain F, Hendel SA, Story DA. An Audit of Potentially Recyclable Waste from Anaesthetic Practice. *Anaesth Intensive Care.* 2009;37(5):820-823.
44. Hutchins DCJ, White SM. Coming round to recycling. *BMJ.* 2009;338(mar10 2):b609-b609.
45. Schulte A, Maga D, Thonemann N. Combining Life Cycle Assessment and Circularity Assessment to Analyze Environmental Impacts of the Medical Remanufacturing of Electrophysiology Catheters. *Sustainability.* 2021;13(2):898.
46. Kwakye G, Pronovost PJ, Makary MA. Commentary: A Call to Go Green in Health Care by Reprocessing Medical Equipment: *Acad Med.* 2010;85(3):398-400.
47. Kramer, A., Exner, M., Schneider, A., Martiny, H., Zastrow, K.-D., Christiansen, B., Loczenski, B., Popp, W., Simon, A., Wolff, M., Soltau, U. Gemeinsame Stellungnahme des Vorstands der Deutschen Gesellschaft für Krankenhaushygiene (DGKH) und der Zentralstelle der Länder für Gesundheitsschutz bei Arzneimitteln und Medizinprodukten (ZLG). Ethische, hygienische und juristische Gesichtspunkte der Aufbereitung von Medizinprodukten (2006). Published online June 15, 2023. https://www.krankenhaushygiene.de/pdffdata/060915_dgkh_stellungnahme_aufbereitung.pdf

48. McGain F, Algie CM, O'Toole J, et al. The microbiological and sustainability effects of washing anaesthesia breathing circuits less frequently. *Anaesthesia*. 2014;69(4):337-342.
49. Quitmann C, Sauerborn R, Herrmann A. Gaps in Reporting Greenhouse Gas Emissions by German Hospitals—A Systematic Grey Literature Review. *Sustainability*. 2021;13(3):1430.

9 Anhang

Schriftliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die dem Fachbereich Medizin der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main zur Promotionsprüfung eingereichte Dissertation mit dem Titel

Green Hospital – ökologischer und ökonomischer Vergleich von Einweg- und Mehrwegartikeln in der Anästhesiologie

in der Klinik für Anästhesiologie, Intensivmedizin und Schmerztherapie unter Betreuung und Anleitung von Frau Prof. Dr. Andrea Ulrike Steinbicker ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation angeführten Hilfsmittel benutzt habe. Darüber hinaus versichere ich, nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsvermittlung in Anspruch genommen zu haben.

Ich habe bisher an keiner in- oder ausländischen Universität ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht. Die vorliegende Arbeit wurde bisher nicht als Dissertation eingereicht.

(Ort, Datum)

(Unterschrift)