

Abschlussbericht BWPLUS

Zirkularität von medizinischen Einmalgebrauchsprodukten – Machbarkeitsstudie am Beispiel eines Beatmungsbeutels

von

Marcel Kern, Gudrun Gräbe

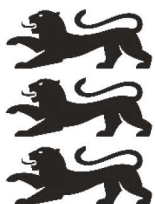
Fraunhofer Institut für Chemische Technologie ICT
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7
76327 Pfinztal

Förderkennzeichen: BWCE 24 104

Laufzeit: 01.01.24 – 31.08.2024

Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

September 2024



**Baden-Württemberg
Ministerium für Umwelt, Klima
und Energiewirtschaft**

Kurzfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes CircBreath wurde zunächst der Abfallfluss einer in Baden-Württemberg ansässigen Klinik untersucht, welcher durch Fragebögen ergänzt wurde. Anhand der Untersuchung wurde verdeutlicht, dass lediglich 2% der anfallenden Abfälle als infektiös galten und der Rest prinzipiell recycelt werden könnte. Einwegbeatmungsbeutel werden jedoch über den Restmüll entsorgt und der thermischen Verwertung zugeführt. Platzverhältnisse für zusätzliche Sammelsysteme sind in Kliniken nur geringfügig vorhanden.

Eine durchgeführte Demontagestudie und Materialcharakterisierung zeigte, dass die Beatmungsbeutel nur unter einem hohen Aufwand demontiert werden können und neben dem überwiegend eingesetzten PVC aus etlichen weiteren Materialien bestehen. Auf Basis der in der Abfallanalyse, der Demontagestudie und der Materialanalyse ermittelten Problemfelder wurden verschiedene Handlungsoptionen entwickelt und hinsichtlich der Machbarkeit gemäß der Medizinprodukteverordnung bewertet.

Als Vorschlag für ein neues Geschäftsfeld wurde die „PVC-Tonne“ entwickelt, in welcher alle PVC-haltigen Einwegmedizinprodukte gesammelt werden können. Zur einfacheren Sortierbarkeit sollen diese mit einem Farbcode versehen werden.

In einer durchgeführten Screening LCA ergaben sich ökologische Vorteile eines Recyclings gegenüber einer Verbrennung von PVC sowie der Nutzung von biobasiertem PVC gegenüber konventionellem PVC. Das Recycling bietet zudem Kostenvorteile gegenüber der Verbrennung.

Inhalt

Kurzfassung.....	ii
Inhalt.....	iii
Abbildungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	vi
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Vorgehen.....	4
2 Stand der Technik.....	6
2.1 Emissionen in Kliniken.....	6
2.2 Eingesetzte Materialien in Medizinprodukten.....	7
2.3 Vor- und Nachteile von medizinischen Einwegprodukten.....	9
3 Analyse des Abfallflusses.....	11
3.1 Umfrage via Fragebogen.....	11
3.2 Abfallaufkommen in Kliniken.....	13
3.3 Abfallfluss in Kliniken.....	14
3.4 Umgang mit klinischen Abfällen.....	16
3.5 Umgang mit infektiösen Abfällen.....	18
4 Demontagestudie und Materialanalyse.....	19
4.1 Demontagestudie.....	19
4.1.1 Beatmungsbeutel A.....	19
4.1.2 Beatmungsbeutel B.....	20
4.2 Materialanalyse.....	20
4.2.1 Beatmungsbeutel A.....	20
4.2.2 Beatmungsbeutel B.....	21
4.3 Auswertung.....	23
5 Entwicklung und Bewertung von Handlungsoptionen.....	24
5.1 Entwicklung von Handlungsoptionen.....	24
5.2 Bewertung hinsichtlich der Medizinproduktezulassung.....	25
5.3 Materialsubstitution.....	26
5.4 Entwicklung neuer Geschäftsfelder.....	27
5.5 Umweltwirkungen und Kostenbewertung.....	27
5.5.1 Screening LCA.....	27
5.5.2 Kostenbewertung.....	30
6 Zusammenfassung.....	33

7	Verwertung	35
8	Ausblick	36
	Literaturverzeichnis	A

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Einweg-Beatmungsbeutel, Foto: ICT	1
Abbildung 1.2: Ablaufplan.....	4
Abbildung 2.1: Greenhouse Gas Protocol Scopes 1, 2 and 3 (Parker, Ashby, Tuddenham, & Brady, S. 7)	6
Abbildung 2.2: Carbon dioxid emissions according to GHGP Scopes (Parker, Ashby, Tuddenham, & Brady, S. 8)	7
Abbildung 2.3: Healthcare's global emissions of Scope 3 (Parker, Ashby, Tuddenham, & Brady, S. 8)	7
Abbildung 3.1: Auszug der Abfallstatistik 2021 des Klinikums 1 (eigene Darstellung)	14
Abbildung 4.1 Zeit-Masse-Graph des Beatmungsbeckels A (Can, Jebari, & Walz, 2024)	19
Abbildung 4.2: Verbindungsarten des Beatmungsbeckels A (Can, Jebari, & Walz, 2024)	20
Abbildung 4.3 Demontagedauer des Beatmungsbeckels B (Schmid, Schuhmacher, & Skobowsky, 2024)	20
Abbildung 4.4 Materialcharakterisierung des Beatmungsbeckels B (Schmid, Schuhmacher, & Skobowsky, 2024).....	22
Abbildung 4.5 Werkstoffzusammensetzung des Beatmungsbeckels B (Schmid, Schuhmacher, & Skobowsky, 2024).....	22
Abbildung 5.1: Beatmungsbeutel A mit bestehendem Materialsystem (schwarz) und Materialvorschlägen (grün).....	26
Abbildung 5.2: Produktlebenszyklus eines Beatmungsbeckels.....	28
Abbildung 5.3: Modellierung des Beatmungsbeckels A mit anschließender Verbrennung.....	28
Abbildung 5.4: Modellierung des Verbrennungsprozesses von konventionellem PVC	28
Abbildung 5.5: Modellierung des Beatmungsbeckels A mit anschließendem Recycling	29
Abbildung 5.6: Ergebnisse der Bilanzierung für die Wirkungskategorien Klimawandel, fossiler Ressourcenverbrauch, Versauerung und Toxizitäten.....	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: In Medizinprodukten eingesetzte Polymere (Joseph, James, Kalarikkal, & Thomas, 2021, S. 200)	8
Tabelle 2.2 Vor- und Nachteile von medizinischen Einwegprodukten (eigene Darstellung nach (Kulp, Greiner, & Graf von der Schulenburg, 2003, S. 8; KS Medizintechnik Handels GmbH, kein Datum)).....	9
Tabelle 3.1: Abfallplan des Klinikums 1 mit Farbcodierung (eigene Darstellung)	15
Tabelle 3.2: Zuordnung der medizinischen Abfälle gemäß den jeweiligen Abfallschlüsseln des AVV (Bundesministerium der Justiz, 2020, S. 27).....	17
Tabelle 4.1: Materialzusammensetzung eines Beatmungsbeutels A mit der Gesamtmasse 489,28 g.....	21
Tabelle 5.1: Entwickelte Handlungsoptionen	24
Tabelle 5.2: Bewertung der Handlungsoptionen.....	25
Tabelle 5.3: Bewertung der Kosten entlang des Lebenszyklusses.....	30

1 Einleitung

In Bezug auf den voranschreitenden Klimawandel, den Biodiversitätsverlust sowie dem nachhaltigen Umgang mit Ressourcen stehen die Unternehmen in Baden-Württemberg vor einer großen Herausforderung. Laut neusten Hochrechnungen entfallen auf den Gesundheitssektor über 5% des CO₂-Ausstoßes in Deutschland (Bein & Brambrink, 2009). Hiervon machen die eingesetzten Medizinprodukte samt den damit verbundenen Lieferketten, mit 71% den Hauptanteil aus (Hecker & Brauer, 2022). Hierbei wird es jedoch nicht gelingen, mit bestehenden linearen Wirtschaftsmodellen der Problematik entgegenzutreten. Ein besonderes Handlungsfeld stellt der Umgang mit Ressourcen dar. Medizinische Einwegprodukte werden nach ihrer Nutzung, kontaminiert oder nicht, im medizinischen Mischabfall entsorgt. Insbesondere Kunststoffprodukte (wie bspw. Beatmungsbeutel) nehmen aufgrund ihrer kurzen Nutzungsdauer, komplexen Materialzusammenstellung und hohen Relevanz für die Lebensrettung eine herausragende Rolle ein.

1.1 Motivation

Es kann jede Minute passieren und jeden betreffen. Ein Mensch gleitet zu Boden und erleidet einen Kreislaufstillstand. Es zählt jede Sekunde. Ein Rettungsteam eilt herbei und leitet lebensrettende Maßnahmen ein. Im Rahmen der Therapie werden verschiedenste Medizinprodukte eingesetzt. Um eine ausreichende Sauerstoffanreicherung bei einem Patienten mit Atemstillstand oder insuffizienter Atmung zu ermöglichen, wird der Patient mittels eines Beatmungsbeutels beatmet. Das Einsatzgebiet von Beatmungsbeutel (siehe Abbildung 1.1) beschränkt sich jedoch nicht nur auf medizinische Notfälle. Auch im regulären Klinikalltag werden Beatmungsbeutel für geplante Eingriffe wie Operationen benötigt. Hier werden die Patienten nach der Narkoseeinleitung mittels eines Beatmungsbeutels beatmet, bevor weitere Maßnahmen zur Atemwegssicherung getroffen werden (Bein & Brambrink, 2009, S. 27).



Abbildung 1.1: Einweg-Beatmungsbeutel, Foto: ICT

Zur Vermeidung von Kreuzkontaminationen und zur schnelleren Einsatzbereitschaft werden in der Medizin vermehrt Einwegprodukte eingesetzt (Hecker & Brauer, 2022). Ökonomische und rechtliche Aspekte sind weitere Gründe für den steigenden Einsatz von Einwegprodukten. So fallen für die Anwendung eines Einwegproduktes definierte

Kosten in Form des Einkaufspreises an. Zudem ist die angegebene Haltbarkeitsdauer für Einwegprodukte mit bis zu 5 Jahren deutlich länger als die von Mehrwegprodukten, welche typischerweise nach 6 Monaten erneut einer aufwendigen Aufbereitung zugeführt werden müssen. Aus rechtlicher Sicht spielt die Haftung für die Sterilität eine große Rolle. Während bei Einwegprodukten der Hersteller haftet, haftet bei Mehrwegprodukten, welche typischerweise auch direkt in der Klinik aufbereitet werden, der Klinikbetreiber (KS Medizintechnik Handels GmbH). Durch den massiven Einsatz von Einmalprodukten beläuft sich das tägliche Abfallaufkommen pro Krankenhausbett und Patient auf 6 Kilogramm (Lange, 2011, S. 102). Hiervon sind 85% allgemeine, nicht gefährliche Abfälle und könnten prinzipiell recycelt werden (Georg Thieme Verlag KG, 2022).

Nach einer kurzen Nutzungsdauer, welche nach Erfahrungen im OP bei wenigen Minuten und bei Reanimationen bis zu einer Stunde, in Einzelfällen auch länger, beträgt, werden die Einweg-Beatmungsbeutel gemeinsam mit weiteren medizinischen Verbrauchsartikeln und deren Verpackungsabfällen entsorgt.

Die Art der Handhabung von medizinischen Abfällen, sowie deren Entsorgungsweg wird durch das Merkblatt LAGA M18 geregelt (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2021, S. 5). Beatmungsbeutel, welche bei keinem infektiös ansteckenden Patienten eingesetzt worden sind, gehören dem Abfallschlüssel AS 18 01 04 an. Dies sind Abfälle, an dessen Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2021, S. 11). Die Praxis zeigt jedoch, dass medizinische Abfälle nur in einem sehr geringen Umfang einem Recyclingprozess und stattdessen einer thermischen Verwertung zugeführt werden. Durch diese Praxis stehen die Ressourcen für eine stoffliche Verwertung und somit einen weiteren Produktlebenszyklus nicht mehr zur Verfügung und gelten somit als verloren. Die verbleibenden Reststoffe werden nur in einem geringen Umfang in Stahl und Bundmetalle sortiert.

Eine weitere Problematik besteht darin, dass viele Medizinprodukte einen Materialmix aufweisen und somit eine eindeutige Zuordnung zu einer Stoffklasse nicht möglich ist. Ebenfalls ist es oft nicht möglich, die verwendeten Werkstoffe von Medizinprodukten von außen zu erkennen.

Während jedoch bei der Entwicklung von neuen Produkten insbesondere die Benutzerfreundlichkeit und ökonomische Aspekte im Mittelpunkt stehen, werden die Aspekte des Produktlebenszyklus wie die Sortierbarkeit und Recyclingfähigkeit vernachlässigt (Ramos, Christensen, Oturai, & Syberg, 2023).

Schätzungen zu Folge steigt der branchenübergreifende CO₂-Ausstoß bei der Kunststoffnutzung bis 2023 auf 1,34 Gigatonnen und bis 2050 auf 2,8 Gigatonnen pro Jahr an (Shen, et al., 2020).

Durch das zunehmende Umweltbewusstsein hat die Europäische Union mehrere Rechtsvorschriften zur Eindämmung des CO₂-Ausstoßes und zur Bewirtschaftung des Plastikmülls verabschiedet. Neben der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG, welche unter anderem eine fünfstufige Abfallhierarchie einführt, wird mit dem Green Deal beschlossen, dass Europa bis 2050 der erste klimaneutrale Kontinent wird. Bereits bis 2030 sollen die Netto-Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um mindestens 55% verringert werden (Europäische Union, kein Datum; Europäische Union, 2018). Damit dies gelingen kann, muss der CO₂ Ausstoß in allen Sektoren reduziert werden. Eine Möglichkeit der CO₂ Reduktion stellt die Kreislaufführung dar. Diese sieht auch die Europäische Union in Ihrem Aktionsplan „Closing the loop“ vor. Durch ein angepasstes Produktdesign sollen diese langlebiger, reparierbar und letztlich recycelbar gestaltet werden (Europäische Kommission, 2015). Erste Anforderungen werden aktuell an

energiebetriebene Produkte durch die Ökodesign-Richtlinie gestellt (Europäische Union, 2022).

Im Sinne des Umweltschutzes und der politisch-rechtlichen Vorgaben werden die Medizintechnikhersteller mit der Frage beschäftigt sein, wie diese ihre medizinischen Einwegprodukte, welche im Sinne des Patientenschutzes eine gewisse Bedeutung haben, umwelt-freundlicher gestalten können. Zudem bedarf es bereits im Rahmen der Produktentwicklung angepasster End-of-Life Konzepte, sodass nicht kontaminierte Medizinprodukte nach der Nutzungsphase im Kreislauf geführt und die eingesetzten Materialien effizient genutzt werden können. Die hierfür benötigten Material- und Kreislaufkonzepte wurden in CircBreath am Beispiel eines Beatmungsbeutels entwickelt und Folgemaßnahmen abgeleitet.

1.2 Zielsetzung

In der Machbarkeitsstudie CircBreath sollte analysiert werden, wie Medizintechnik-Unternehmen in Baden-Württemberg ihre bisherigen linearen Geschäftsmodelle in Richtung einer circular economy umstellen können. Hierfür wurden Design for Recycling Prinzipien angewandt (bspw. Reduktion der Materialvielfalt), um die Kreislauffähigkeit der Produkte zu verbessern. Mittels Interviews sollten mögliche Kreislaufführungskonzepte mit Herstellern und organisatorische Optimierungen zur Sammlung von nicht-kontaminierten Einwegkunststoffprodukten mit Anwendern wie bspw. Krankenhäusern diskutiert werden. Als Beispielprodukt diente in CircBreath ein Einweg-Beatmungsbeutel, welcher aktuell nach seiner kurzen Nutzungsphase einer thermischen Verwertung zugeführt wird.

Zu Beginn des Projektvorhabens erfolgte eine Bestandsaufnahme der bestehenden Abfallbehältnissen und des Abfallflusses in Kliniken bis hin zum jeweiligen Verwerter. Zudem wurden durch Experteninterviews und Beobachtungen die Behandlungsabläufe erfasst und hinsichtlich der Möglichkeit einer Materialtrennung bewertet. Auf Basis einer Demontagestudie einschließlich einer Materialanalyse sollten verschiedene Aspekte des Ökodesigns über den kompletten Produktlebenszyklus, beginnend bei der Materialauswahl und Herstellung, der Nutzung bis hin zum Produktlebenszyklus analysiert und hinsichtlich einer Umsetzbarkeit bewertet werden. Neben einem engen Austausch mit einem regionalen Hersteller von Beatmungsbeuteln war auch eine Abstimmung mit dem Kompetenzzentrum für regulatorische Anforderungen in der Medizintechnik an der Hochschule Pforzheim vorgesehen.

Im Rahmen von CircBreath sollten am Beispiel eines Beatmungsbeutels nachhaltige Verfahren und Werkstoffe diskutiert, mittels eines Life Cycle Assessment (LCA) Screenings und einer Kostenabschätzung angelehnt an eine LCC analysiert, und letztlich Empfehlungen für einen nachhaltigen und kreislaufgerechten Umgang gegeben werden. Die Neuartigkeit des Forschungsansatzes liegt in der Entwicklung eines kreislauffähigen Medizinproduktes basierend auf einer recyclinggerechten Produktgestaltung (Design for Recycling) bspw. unter Beachtung einer reduzierten Materialvielfalt sowie der Verwendung von nachhaltigen Materialien.

1.3 Vorgehen

Zur Erreichung der Zielsetzung wurden 4 Arbeitspakete mit folgenden Inhalten definiert (Abbildung 1.2):

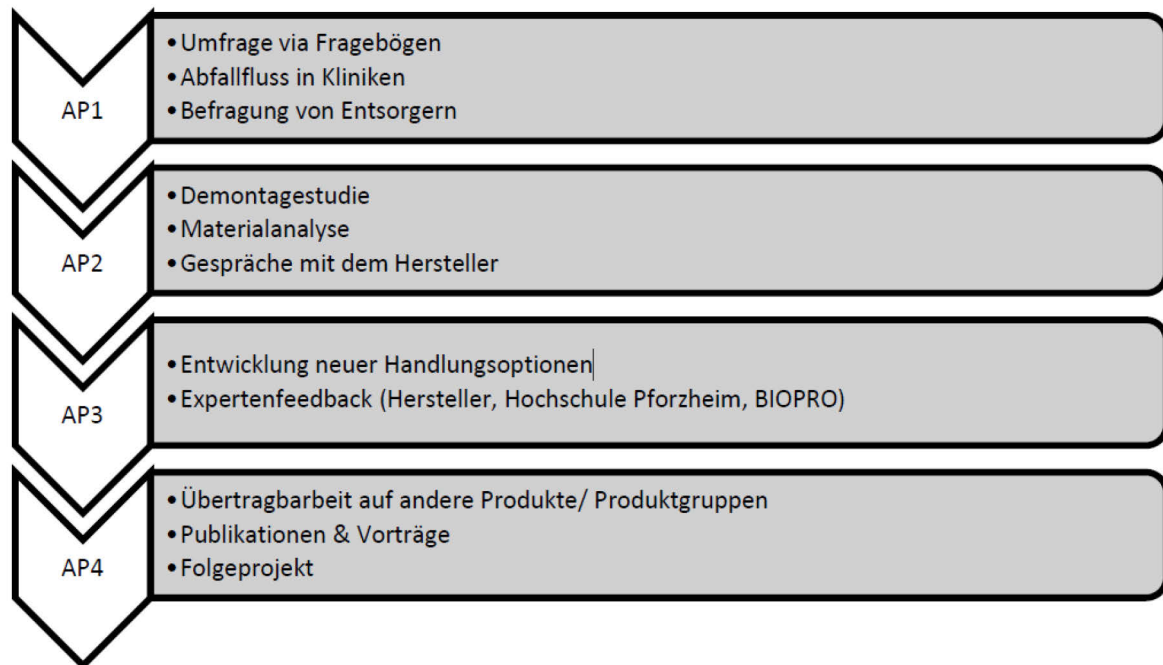


Abbildung 1.2: Ablaufplan

Im Rahmen der Machbarkeitsuntersuchung erfolgte zunächst in **Arbeitspaket 1** „Analyse des Abfallflusses“ eine Betrachtung hinsichtlich der aktuellen Verwertung der gebrauchten Beatmungsbeutel. Hierfür wurden zunächst Fragebögen an Kliniken in Baden-Württemberg gesendet. Leider ergab sich hier nur eine sehr geringe Rückläuferquote, sodass nur zwei Fragebögen in die Auswertung integriert werden konnten.

Zusätzlich war eine Begehung von fünf Kliniken geplant. Leider haben wir hierfür nur eine positive Rückmeldung erhalten, sodass nur eine Begehung in einem Klinikum (Bezeichnung: Klinikum 1) erfolgen konnte.

Hinsichtlich der weiteren Entsorgung von medizinischen Abfällen konnte über die Homepage von REMONDIS der aktuelle Stand der Technik analysiert werden.

In **Arbeitspaket 2** erfolgte im Rahmen eines Studierendenprojektes eine Demontagestudie und anschließende Materialanalyse der Einweg-Beatmungsbeutel. Für das Projekt standen zwei verschiedene Modelle zur Verfügung. Zum einen wurde das Modell eines in Baden-Württemberg ansässigen Unternehmens, im Folgenden als Firma A / Beatmungsbeutel A bezeichnet, analysiert und zum anderen das einer zweiten Firma, im Folgenden als B bezeichnet. In den Fragebogen Rückläufern werden darüber hinaus Beatmungsbeutel zwei weiterer Unternehmen, als C und D bezeichnet, erwähnt. Durch die zwei verschiedenen Modelle konnten bereits in einem sehr frühen Schritt mögliche Unterschiede herausgearbeitet werden, welche anschließend für einen Wissenstransfer relevant wären. Eine abschließende Diskussion mit dem Hersteller hinsichtlich der Materialeigenschaften gestaltete sich als schwierig. Das Unternehmen A sagte leider aufgrund mangelnder Ressourcen ab. Mitarbeitende der Firma B haben sich hierauf zu Gesprächen bereit erklärt, konnten uns jedoch ebenfalls keine detaillierten Informationen übermitteln.

In **Arbeitspaket 3** „Entwicklung und Erprobung neuer Handlungsoptionen“ wurden auf Basis der identifizierten Problemfelder aus den ersten beiden Arbeitspakete von der Studierendengruppe und dem Fachbereich Polymere Engineering des ICT verschiedene Handlungsoptionen entwickelt. Diese wurden gemeinsam mit der Firma B und der Hochschule Pforzheim diskutiert.

Im Hinblick auf einen Ergebnistransfer wurde in **Arbeitspaket 4** analysiert, auf welche Einwegmedizinprodukte sich die gewonnenen Erkenntnisse sich übertragen ließen. Die abschließende Veröffentlichung der Ergebnisse in einem Fachmagazin wird aktuell vorbereitet.

2 Stand der Technik

2.1 Emissionen in Kliniken

In der Gesundheitsversorgung entstehen in allen Bereichen Kohlenstoffemissionen. Sei es der Energieverbrauch der Gebäude, der Patiententransport oder Medizinprodukte, welche für die Patientenversorgung benötigt werden. Dabei lassen sich die Emissionen hinsichtlich der Kontrollierbarkeit unterteilen. Die Emissionskategorisierung nach dem Greenhouse Gas Protocol (GHGP), welche in Abbildung 2.1 dargestellt ist, unterteilt Emissionen in drei Bereiche, Scope 1-3. Es wird davon ausgegangen, dass die entstehenden Emissionen aus Scope 1 und 2 unter der Kontrolle der Klinik stehen, während jene aus Scope 3 nur in einem begrenzten Maße kontrolliert werden können und gegebenenfalls eine stärkere Berücksichtigung erfordern (Parker, Ashby, Tuddenham, & Brady, S. 7).

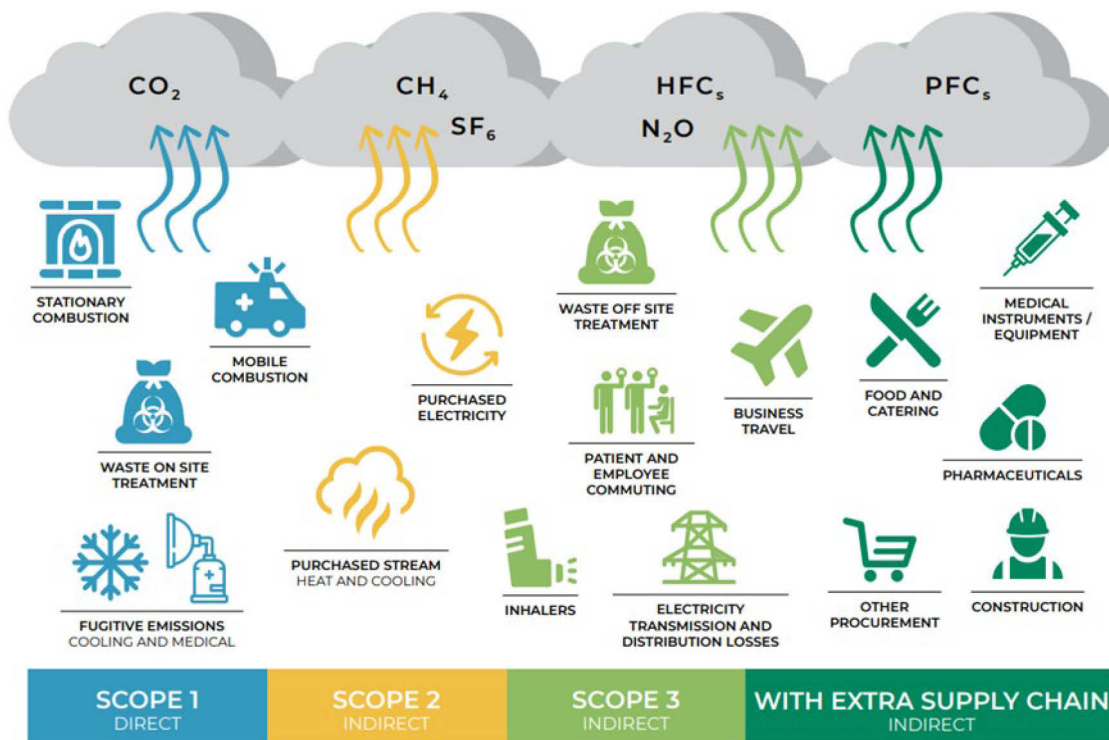


Abbildung 2.1: Greenhouse Gas Protocol Scopes 1, 2 and 3 (Parker, Ashby, Tuddenham, & Brady, S. 7)

Eine weitere Aufschlüsselung der durch das Gesundheitswesen verursachten Emissionen nach Treibhausgasemissionsbereichen zeigt Abbildung 2. Anhand dieser wird deutlich, dass Scope 1 lediglich für 17% und Scope 2 für 12% der verursachten Emissionen verantwortlich sind. Scope 3 einschließlich der dazugehörigen Lieferkette verursacht hingegen 71% der weltweiten Emissionen des Gesundheitswesens.

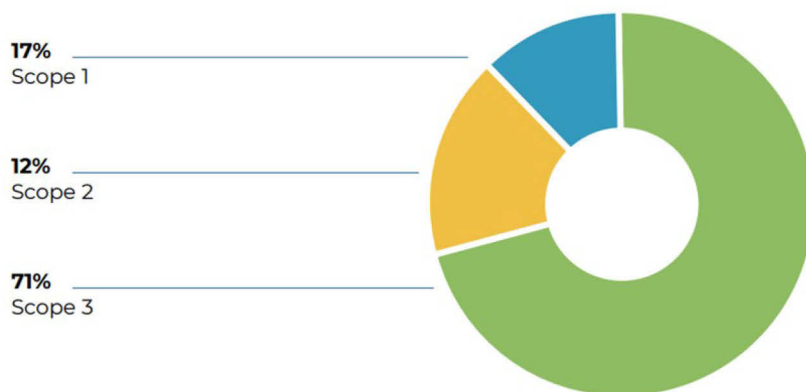


Abbildung 2.2: Carbon dioxide emissions according to GHGP Scopes (Parker, Ashby, Tuddenham, & Brady, S. 8)

Eine weitere Aufschlüsselung der Emissionen welche unter Scope 3 zusammengefasst sind zeigt Abbildung 2.3.

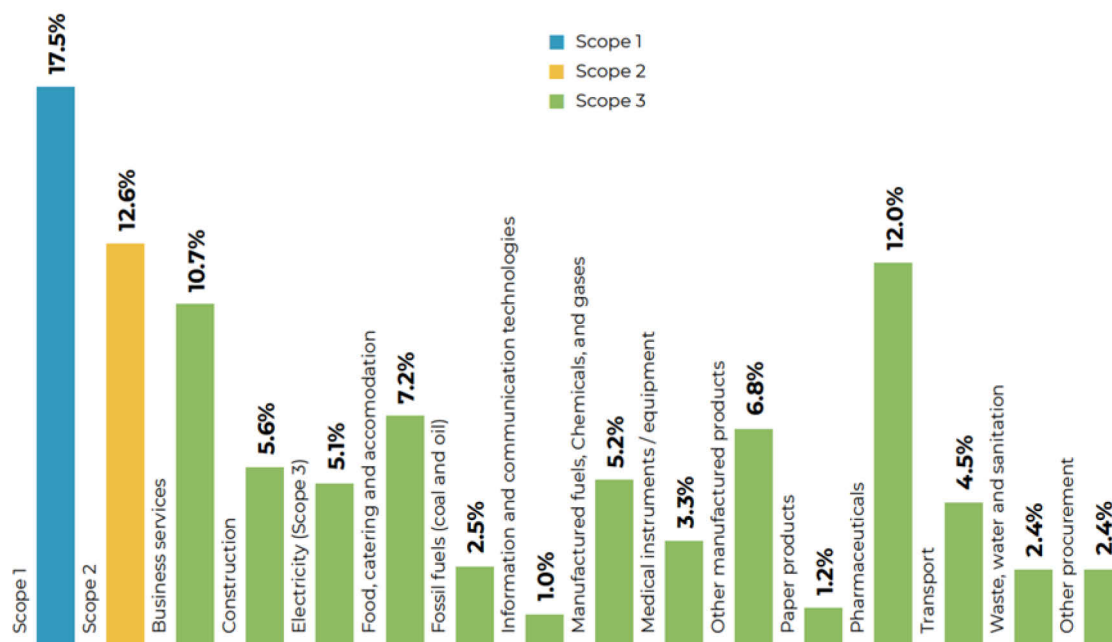


Abbildung 2.3: Healthcare's global emissions of Scope 3 (Parker, Ashby, Tuddenham, & Brady, S. 8)

Hierbei wird verdeutlicht, dass pharmazeutische Erzeugnisse mit 12% und unternehmensbezogene Dienstleistungen mit 10,7% die Haupttreiber darstellen. Aber auch medizinische Instrumente und Produkte sind für 3,3% der Emissionen verantwortlich.

2.2 Eingesetzte Materialien in Medizinprodukten

Aufgrund ihrer einfachen Sterilisierbarkeit werden Kunststoffe in der Medizintechnik gegenüber Metallen, Glas oder Keramiken bevorzugt eingesetzt. Während die letztgenannten Materialien unter anderem mit der Dampfsterilisation oder dem Autoklavieren sterilisiert werden, gelingt dies bei Kunststoffen auch mit neuen Technologien wie der Gammasterilisation.

Anforderungen, welche an eingesetzte Polymere gestellt werden, sind Biokompatibilität, Hämkompatibilität, Sterilisationsbeständigkeit, Stabilität, sowie eine ausreichende Haltbarkeit (Sastri, 2010, S. 33f). Ein weiterer Vorteil von Polymeren liegt in der flexiblen Modifikation der Oberfläche. So ist es Herstellern möglich, eine antimikrobielle Materialbeschichtung aufzutragen, welche potenzielle Bakterien abwehren oder abtöten kann, sodass Infektionen verringert und Kreuzkontaminationen vermieden werden (Joseph, James, Kalarikkal, & Thomas, 2021, S. 200). Tabelle 2.1 zeigt einen Auszug der typischerweise für Medizinprodukte verwendeten Polymere.

Tabelle 2.1: In Medizinprodukten eingesetzte Polymere (Joseph, James, Kalarikkal, & Thomas, 2021, S. 200)

Polymer	Abkürzung
Polyvinylchlorid	PVC
Polyethylen	PE
Polystyrol	PS
Polypropylen	PP
Polycarbonat	PC
Polyethylenterephthalat	PET
Polyamid	PA
Polyurethan	PUR
Acrylnitril-Butadien-Styrol	ABS

Das relativ preiswerte PVC ist gemessen am Gesamtverbrauch das meistverbreitete Polymer in der Medizintechnik. Es zeichnet sich besonders durch seine Eigenschaften wie Glanz, Transparenz, chemische Beständigkeit, Flexibilität und Beständigkeit gegen Flüssigkeiten aus. Halbstarke PVC findet unter anderem Anwendung in Tropfkammern, tiefgezogenen Schalen, Blisterverpackungen (Joseph, James, Kalarikkal, & Thomas, 2021, S. 200). Hochplastisches Weich-PVC hingegen wird beispielweise für Gesichtsmasken, Infusionsbeutel, Infusionsschläuchen, Beatmungsschläuchen und Beatmungsbeuteln verwendet (Joseph, James, Kalarikkal, & Thomas, 2021, S. 200). Für eine längere Anwendung im Körper ist PVC aufgrund der Weichmachermigration nicht geeignet (Himmel-Saar & Roth, 2020, S. 184).

PE ist ein teilkristalliner Thermoplast und wird gemäß seiner Dichte in HDPE bzw. PE-HD (höhere Dichte) und LDPE bzw. PE-LD (niedrige Dichte) unterteilt. Während LDPE für Folien, Filme, Behälter und Schläuche verwendet wird, wird für Anwendungen mit höheren mechanischen Eigenschaften, wie Schraubverschlüssen und Spritzen, HDPE eingesetzt (Himmel-Saar & Roth, 2020, S. 185).

PS zeigt als amorpher Thermoplast eine hohe Steifigkeit und zeitgleich eine geringe Bruchdehnung. Es ist klar, dimensionsstabil und findet Anwendung in Komponenten für medizinischen Einmalartikeln, wie Konnektoren oder Spikes (Himmel-Saar & Roth, 2020, S. 186).

PP ist ein teilkristalliner Thermoplast mit einer mittleren Festigkeit und erhöhter Temperaturbeständigkeit. Es ist ein weitverbreitetes Material für pharmazeutische Verpackungen und medizinische Einmalartikel wie Spritzen, Komponenten für Katheter und Filtergehäusen für die Dialyse (Himmel-Saar & Roth, 2020, S. 185).

Als amorpher Thermoplast wird PC insbesondere für Komponenten mit hohen Anforderungen an die Transparenz oder Schlagfestigkeit verwendet. Produktbeispiele sind unter anderem Gehäuseteile, Dialyseabdeckungen und Konnektoren (Himmel-Saar & Roth, 2020, S. 188).

PET ist ein teilkristalliner Thermoplast und gehört zu den am meisten verbreiteten Polyestern in der Medizin. Es wird insbesondere für künstliche Blutgefäße, Sehnen- und Bänderersatz und Nahtmaterial verwendet (Wintermantel & Ha, 2009, S. 232f).

Der teilkristalline Thermoplast PA findet aufgrund seiner guten mechanischen Eigenschaften zum Beispiel Anwendung in steifen Katheterschläuchen, Komponenten für Dialysegeräten, Spritzen, Herzmitralklappen sowie Dialysemembranklappen (Himmel-Saar & Roth, 2020, S. 189).

PUR ist ein thermoplastisches Elastomer und wird insbesondere für künstliche Blutgefäße und Blutgefäßbeschichtungen, Dialysemembrane, Infusionsschläuche, Herzschrittmacher, Wundabdeckungen und Gewebekleber verwendet (Himmel-Saar & Roth, 2020, S. 190).

Der amorphe Thermoplast ABS ist bei einer guten Steifigkeit und Schlagzähigkeit dimensionsstabil. Anwendung findet dieser in Bauteilkomponenten, Gehäusen, Komponenten in Einmalartikeln sowie Verpackungen (Himmel-Saar & Roth, 2020, S. 186).

2.3 Vor- und Nachteile von medizinischen Einwegprodukten

Auf dem Markt der Medizinprodukte ist es seit Mitte der 70er Jahre zu einer strukturellen Veränderung gekommen. Während bis zu diesem Zeitpunkt aufgrund der verwendeten Materialien und Bauweise Produkte zum mehrmaligen Gebrauch konzipiert wurden, wurden in den folgenden Jahren sukzessive immer mehr Einwegprodukte auf den Markt gebracht. Dieser Trend lässt sich auf mehrere Gründe zurückführen.

Durch den technischen Fortschritt sind Medizinprodukte in ihrer Funktion und Konstruktion immer komplexer geworden, was eine Aufbereitung erschwert hat. Ebenso führt die stetige Miniaturisierung dazu, dass durch die erschwerte Aufbereitung bei einem erneuten Patienteneinsatz eine Patientengefährdung nicht auszuschließen ist. Auch der Einsatz von thermolabilen Werkstoffen verhindert eine Sterilisation in den Kliniken, da hier oftmals ein Hitzesterilisationsverfahren zur Verfügung steht.

Tabelle 2.2 Vor- und Nachteile von medizinischen Einwegprodukten (eigene Darstellung nach (Kulp, Greiner, & Graf von der Schulenburg, 2003, S. 8; KS Medizintechnik Handels GmbH, kein Datum))

Vorteile	Nachteile
Niedrige Stückkosten	Hohe kumulative Kosten
Geringere Lagerkosten	Schlechte Umweltbilanz durch die Entsorgung des Medizinproduktes
Hohes Maß an Produktintegrität (nicht durch vormalige Anwendungen eingeschränkt)	keine
Keine Aufbereitung nötig (keine Haftung, eingesparte Personalkosten)	keine
Keine Gefahr durch Kreuzkontaminationen	keine
Längere Haltbarkeit	keine
Kein produktbezogener Ausfall durch Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten	keine
Keine Wartungs- und Instandhaltungskosten (keine Abnutzung)	keine
Einfachere Handhabung	keine

Neben den bereits aufgeführten produktspezifischen Faktoren spielen für den Anwender, beziehungsweise für die Klinik, noch weitere Faktoren eine bedeutende Rolle und sind in Tabelle 2.2 aufgeführt (Kulp, Greiner, & Graf von der Schulenburg, 2003, S. 7).

Zur Vermeidung von Kreuzkontaminationen und zur schnelleren Einsatzbereitschaft werden in der Medizin vermehrt Einwegprodukte eingesetzt (Hecker & Brauer, 2022). Ökonomische und rechtliche Aspekte sind weitere Gründe für den steigenden Einsatz von Einwegprodukten. So fallen für die Anwendung eines Einwegproduktes definierte Kosten in Form des günstigen Einkaufspreises an (KS Medizintechnik Handels GmbH, kein Datum). Auf Basis von individuellen Lieferungen an Verbrauchsmaterial kann auf große Lagerräume verzichtet werden, was wiederum Geld einspart (Kulp, Greiner, & Graf von der Schulenburg, 2003, S. 8). Zudem ist die angegebene Haltbarkeitsdauer für Einwegprodukte mit bis zu 5 Jahren deutlich länger als die von Mehrwegprodukten, welche typischerweise nach 6 Monaten erneut einer aufwendigen Aufbereitung zugeführt werden müssen. Aus rechtlicher Sicht spielt die Haftung für die Sterilität eine große Rolle. Während bei Einwegprodukten der Hersteller haftet, liegt diese bei Mehrwegprodukten typischerweise bei der Klinik (KS Medizintechnik Handels GmbH, kein Datum). Durch den Einsatz immer neuer Einwegprodukte muss der Klinikbetreiber mit keinem durch eine Aufbereitung bedingten Produktausfall planen. Zudem haben im Sinne der Patientensicherheit die Produkte keine Abnutzungserscheinungen und verfügen immer über eine gleichbleibende Qualität.

Auch praktische Gründe können für den Einsatz für Einmalprodukte sprechen. Diese sind im Vergleich zu der bei Mehrwegprodukten verwendeten kompakteren Bauweise, teilweise leichter zu bedienen.

Gegenüber den aufgeführten Vorteilen von medizinischen Einwegprodukten stehen zunächst hohe kumulative Kosten gegenüber. In einer Studie mit Einwegbiopsiezangen konnte gezeigt werden, dass das entsprechende Mehrwegprodukt nur 25 Prozent der Kosten im Vergleich zur Einweglösung verursacht (Deprez, Horsmans, & Hassel, 1998, S. 1). Mit der Nutzung von Einwegprodukten wird zudem eine höhere Müllproduktion und eine schlechtere Umweltbilanz verursacht. Die Kosten, welche durch eine höhere Umweltbelastung entstehen, sind jedoch externe Kosten und wurden in den vergangenen Jahren vernachlässigt (Kulp, Greiner, & Graf von der Schulenburg, 2003, S. 8).

3 Analyse des Abfallflusses

Zur Analyse des Abfallflusses in Kliniken wurde neben einer Datenerhebung via Fragebögen eine persönliche Begehung vorgenommen.

3.1 Umfrage via Fragebogen

Im Rahmen von CircBreath wurde eine Umfrage bei Kliniken in Baden-Württemberg durchgeführt. Hierfür wurde nachfolgender Fragebogen entworfen und per E-Mail an die Kliniken verschickt. Um eine Vergleichbarkeit erzielen zu können wurde neben den Fragen zum Produkt Beatmungsbeutel zudem die Bettenanzahl und die Auslastung der Klinik abgefragt. Die Kliniken wurden gebeten den Fragebogen bis spätestens 31.05.2024 ausgefüllt zurückzusenden.

Fragebogen Beatmungsbeutel
<i>Bettenanzahl:</i>
<i>Auslastung:</i>
<i>In welchen Bereichen (Stationen) werden Beatmungsbeutel eingesetzt?</i>
<i>Werden Einweg- bzw. Mehrweg-beatmungsbeutel eingesetzt?</i>
<i>Von welchem Hersteller stammen die Beatmungsbeutel?</i>
<i>Wurde auch schon der Einsatz von Mehrwegbeatmungsbeuteln geprüft?</i>
<i>Welche Vorteile zeigen sich durch den Einsatz von Einwegbeatmungsbeuteln?</i>
<i>Wie viele Beatmungsbeutel werden typischerweise vorgehalten?</i>
<i>Wie hoch ist der durchschnittliche Jahresverbrauch an Beatmungs-beuteln?</i>
<i>Wie lange ist die durchschnittliche Anwendungsdauer?</i>
<i>Wie erfolgt die Entsorgung nach der Nutzungsphase?</i>
<i>Welche Sammelbehälter stehen hierfür zur Verfügung? Ist eine Trennung der Abfälle in verschiedene Fraktionen gegeben?</i>
<i>Wären die Platzverhältnisse für ein zusätzliches Sammelsystem gegeben?</i>

Leider zeichnete sich im Rahmen der Umfrage nur ein sehr geringe Rückläuferquote aus, sodass für die Auswertung nur zwei Fragebögen vorlagen. Diese sind im Folgenden dargestellt.

Fragebogen Beatmungsbeutel Klinik 1
<i>Bettenanzahl: ca. 500</i>
<i>Auslastung:</i>
<i>In welchen Bereichen (Stationen) werden Beatmungsbeutel eingesetzt?</i> Alle Stationen; Anästhesie
<i>Werden Einweg- bzw. Mehrwegbeatmungsbeutel eingesetzt?</i> Auf den Stationen Einweg – Beatmungsbeutel In der Anästhesie an den Narkosebeatmungsgeräten Mehrweg - Beatmungsbeutel
<i>Von welchem Hersteller stammen die Beatmungsbeutel?</i> Station: Beatmungsbeutel der Firma B Anästhesie: Beatmungsbeutel der Firma Cr
<i>Wurde auch schon der Einsatz von Mehrwegbeatmungsbeuteln geprüft?</i> Ja wurden vor den Einweg beuteln verwendet.
<i>Welche Vorteile zeigen sich durch den Einsatz von Einwegbeatmungsbeuteln?</i>

Kostengünstiger, da es sich gezeigt hat das zur Reparatur der Mehrwegbeutel eine Vielzahl von einzelnen Ersatzteilen vorgehalten werden muss und noch dazu die Arbeitszeit der Techniker kommt um diese Instand zusetzen.

Wie viele Beatmungsbeutel werden typischerweise vorgehalten?

Ca. 100 Einwegbeutel

Wie hoch ist der durchschnittliche Jahresverbrauch an Beatmungsbeuteln?

370 Stück Einweg – Beatmungsbeutel

ca. 10 Mehrweg - Beatmungsbeutel

Wie lange ist die durchschnittliche Anwendungsdauer?

Einweg: Nach einem Patienteneinsatz

Mehrweg: ca. 12 Monate

Wie erfolgt die Entsorgung nach der Nutzungsphase?

Hausmüll

Welche Sammelbehälter stehen hierfür zur Verfügung? Ist eine Trennung der Abfälle in verschiedene Fraktionen gegeben?

Die Beatmungsbeutel werden als gesamtes mit dem Restmüll entsorgt.

Getrennt wird grundsätzlich in: Gelber Sack, Restmüll; Papier; Glas; Kanülen und Spritzenabwurf.

Wären die Platzverhältnisse für ein zusätzliches Sammelsystem gegeben?

Eher nicht.

Fragebogen Beatmungsbeutel Klinik 2

Bettenanzahl: ca. 1.500
Auslastung:

In welchen Bereichen (Stationen) werden Beatmungsbeutel eingesetzt

Primär auf Intensivstationen und in der Anästhesie, aber natürlich ansonsten auch im ganzen Haus (z.B. Notfallrucksäcke)

Werden Einweg- bzw. Mehrwegbeatmungsbeutel eingesetzt?

Es werden Einweg- und Mehrwegbeatmungsbeutel eingesetzt.

Von welchem Hersteller stammen die Beatmungsbeutel?

Mehrweg – Firma A

Einweg – Firma D

Wurde auch schon der Einsatz von Mehrwegbeatmungsbeuteln geprüft?

War früher Standard. Heute werden Mehrwegbeutel nur noch auf einer Intensivstation eingesetzt, so die Restbestände „aufgebraucht“ werden (so lange aufbereitet wie möglich)

Welche Vorteile zeigen sich durch den Einsatz von Einwegbeatmungsbeuteln?

Wegfall der Aufbereitung in der AEMP (u.a. problematisch bei unterschiedlichen Modellen)

Wegfall von Funktionstests der Aufbereiteten Produkte am Point of Care

Längere Haltbarkeit der Einwegprodukte, selbst aufbereitete Artikel nur 6 Monate

Wie viele Beatmungsbeutel werden typischerweise vorgehalten?

Im Zentrallager ca. 200 Stück (Erw., Kinder, Neonaten), dezentral liegen keine validen Daten vor

Wie hoch ist der durchschnittliche Jahresverbrauch an Beatmungsbeuteln?

Einwegbeutel ca. 2.300, Mehrwegbeutel ca. 30

Wie lange ist die durchschnittliche Anwendungsdauer?

Bleibt beim Patientenbett solange dieser auf einer Intensivstation liegt.

Wie erfolgt die Entsorgung nach der Nutzungsphase?

Restmüll

Welche Sammelbehälter stehen hierfür zur Verfügung? Ist eine Trennung der Abfälle in verschiedene Fraktionen gegeben?

Restmüllsack

Wären die Platzverhältnisse für ein zusätzliches Sammelsystem gegeben?

Ja, aber wenig. Allerdings scheinen die meisten „nachhaltigen“ Entsorgungssysteme auf eigene Sammelsysteme ausgelegt zu sein, was mittelfristig zu Platzproblemen führen würde.

Klinik 1 gibt an, dass in der Anästhesie auf Mehrweg-Beatmungsbeutel gesetzt wird. Diese werden nach ihrem Einsatz in der Klinik aufbereitet und ggf. vom technischen Personal gewartet und repariert. Auf den Normalstationen werden für medizinische Notfälle Einwegbeatmungsbeutel vorgehalten. Hier liegt der jährliche Verbrauch bei ca. 370 Stück. Im Anschluss werden diese über den Hausmüll entsorgt. Platz für ein zusätzliches Sammelsystem ist nicht gegeben. Trotz des Einsatzes der Mehrweglösung hat sich jedoch gezeigt, dass der Einsatz der Einwegprodukte günstiger wäre.

In der zweiten Klinik werden primär Einwegbeatmungsbeutel eingesetzt. Nur noch auf einer Intensivstation werden die Restbestände der Mehrweglösung verwendet. Vorteile für den Einsatz der Einwegbeatmungsbeutel liegen insbesondere am Wegfall der anschließenden Aufbereitung, dem Verzicht auf zusätzlichen Funktionstests, sowie an der längeren Haltbarkeit. Nach der Nutzung verbleibt der Beatmungsbeutel so lange am Patientenbett, wie sich dieser auf der Intensivstation befindet. Die Entsorgung erfolgt ebenfalls über den Restmüll. Platz für ein zusätzliches Rücknahmesystem wäre nur wenig vorhanden.

3.2 Abfallaufkommen in Kliniken

In Deutschland ist der Gesundheitssektor mit einem jährlichen Abfallvolumen von 1,2 Millionen Tonnen der fünftgrößte Abfallerzeuger. Diese Abfallmengen nehmen seit Jahrzehnten stetig zu und tragen somit zu einem deutlichen CO₂-Fußabdruck bei (Schmitz & Kopka, 2023, S. 186). Hauptursache hierfür ist insbesondere der verstärkte Einsatz von Einmalprodukten.

Die anfallenden Abfälle werden unterschiedlichen Fraktionen zugeordnet und unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und der enthaltenen Wert- und Gefahrenstoffe sehr (Schmitz & Kopka, 2023, S. 187). Jedoch weisen nicht nur die einzelnen Fraktionen einen hohen Mix an Wertstoffen auf. Selbst einzelne Medizinprodukte können aus einer Kombination mehrerer Polymere bestehen.

Eine Analyse des Umweltbundesamtes zeigt, dass in Kliniken zu ca. 60% überwiegend hausmüllähnliche Abfälle anfallen. Weitere 30 Prozent stellen klinikspezifische Abfälle aus dem Pflege- und Behandlungsbereich dar. Etwa 10% der Abfälle gelten als gefährlich und entsprechen zu 3% infektiösen und zu 7% schadstoffhaltigen Abfällen (Umweltbundesamt, 2018, S. 291).

Als Beispiel zeigt Abbildung 3.1 einen Auszug aus der Abfallstatistik des in Baden-Württemberg ansässigen Klinikums 1.

Im Jahr 2021 sind somit 278,56t an nicht infektiösen Abfällen, welche über den Restmüll entsorgt wurden, angefallen. Dies entspricht bezogen auf den ausgewählten Auszug ca. 67% der angefallenen Abfälle. Der Anteil an Papier und Kartonagen betrug

mit ca. 14% insgesamt 59,75t. Die Fraktion der gemischten Leichtverpackungen schlägt mit 9% zu 36,85t zugute. An Glas haben sich 7% insgesamt 29,53t ergeben. Anfallende Körper- & Organteile aus dem OP entsprachen 4,42t. Infektiöse Abfälle verzeichnen mit 8,1t lediglich 2% des entstandenen Abfallaufkommens. Hinzu kommen mit weiteren 1,39t an zytostatischen Arzneimitteln.

Die aufgeführte Grafik zeigt somit, dass im Jahr 2021 lediglich an ca. 2% der entstandenen Abfälle besondere Anforderungen zu stellen waren und der Großteil prinzipiell im Kreislauf geführt werden könnte.

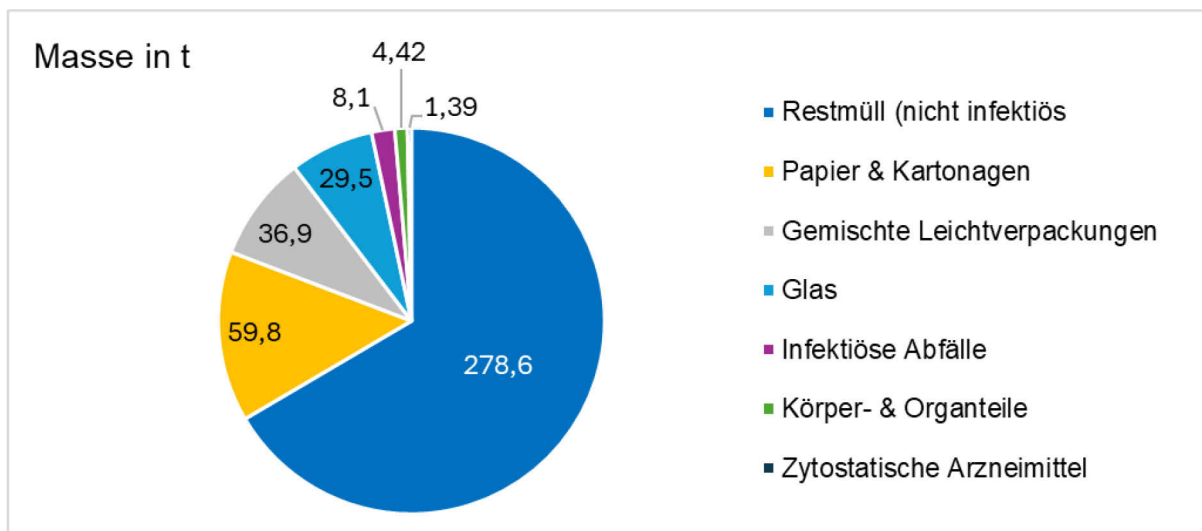


Abbildung 3.1: Auszug der Abfallstatistik 2021 des Klinikums 1 (eigene Darstellung)

3.3 Abfallfluss in Kliniken

Zum Verständnis des Abfallflusses in Kliniken wurde im Klinikum 1 ein Mitarbeiter während der Abfallsammlung begleitet.

Beginnend im „Arbeitsraum rein“, in dem die Beatmungsbeutel gelagert werden, werden die Beatmungsbeutel entweder in einem Notfallrucksack verstaut oder neben einem AED (Automatisierter externer Defibrillator) gelagert.

Nach der Anwendung werden diese gemäß des hausinternen Abfallplans, welcher in Tabelle 3.1 dargestellt ist, der entsprechenden Abfallfraktion zugeordnet. Im Falle des Einweg-Beatmungsbeutels erfolgt die Entsorgung über den Restmüll. Mit Hilfe eines Farbcodes (schwarz) wird den Mitarbeitenden die Zuordnung bei der Entsorgung erleichtert.

Im „Arbeitsraum unrein“ befinden sich die Sammelsysteme in den Farben entsprechend der Farbcodierung:

Während im gelben Sack Kunststoffe gesammelt werden, ist der schwarze Sack für Restmüll vorgesehen. In diesem werden neben Einweghandschuhen benutzte Bettunterlagen, Windeln, sowie Verbandsmaterial entsorgt. In mehreren roten Kunststoffkisten werden links Papier, in der Mitte Glas und rechts Infusionen bzw. das Infusionsbesteck gesammelt. Hintergrund für die getrennte Sammlung des Infusionsbestecks ist die Vermeidung einer Verletzungsgefahr, da sich die Dorne des Infusionsbestecks durch den Müllsack bohren könnte. Volle Müllsäcke werden im Regal unter den roten Kisten gesammelt.

Infektiöse Abfälle werden direkt in den Isolierzimmern gesammelt und mittels blauer Behälter mit einem dicht verschließbaren Deckel entsorgt.

Tabelle 3.1: Abfallplan des Klinikums 1 mit Farbcodierung (eigene Darstellung)

Was	Wohin	Bemerkungen
Glas: bunt (braun, grün, blau)	Arbeitsraum rote Kiste Buntglas	Ohne Infusionsbesteck
Glas: weiß	Arbeitsraum rote Kiste Weißglas	Ohne Infusionsbesteck
Papier	Arbeitsraum rote Kiste Papier	Kein verschmutztes und kein Datenschutzpapier
Spitze und scharfe Gegenstände, „Bruch“	Kanülen, Kanülenbehälter in rote Kiste Infusionsbesteck	Infusionsbesteck, Porzellanbruch usw.
Infektiöser Abfall (C-Müll)	Spezifische blaue Behälter mit rosa Deckel	Eingrenzung siehe Hygieneordner
Organabfälle	Spezifische blaue Behälter mit rosa Deckel	Behälter nur max. 2/3 befüllen
Redonflaschen und andere mit Körpersekreten gefüllte Behälter	Spezifische blaue Behälter mit rosa Deckel	Nicht entleerbare, ab ca. 50 ml Inhalt, keine Urinbeutel
Restmüll (hausmüllartiger Abfall)	Schwarzer Kunststoff sack	Schläuche, Verbandsmaterial, Handschuhe usw.
Spritzen (Tubus und Stempel)	Arbeitsraum, gelber Sack	Kunststoffabfall, Verpackung aus Kunststoff
Verpackungsabfall	Arbeitsraum, gelber Sack	Verpackungen aus Kunststoff, Tablettenblister, Milchkartons, Metall z.B. Infusionsbeutel, ...
Zytotoxische u. zytostatische Arzneimittel = „CMR-Arzneimittel“ (Zytostatika, Virustatika)	Verpackt in einem Abfallbeutel zurück in die rote Zytobox zurück zur Apotheke	Infusionsflaschen mit mehr als 20 ml Lösung
Zytostatika-Abfall, geringe Mengen	Arbeitsraum orangener Apothekeneimer	Diese Kiste wird vom Hol- und Bringedienst mit einem speziellen Abfallsack versehen (Arbeitsschutz), für leere Infusionssysteme und Flaschen, kontaminierte Handschuhe, etc
Batterien	Apothekenkiste	Apotheke nimmt Batterien zurück
Chemikalien	-	Chemikalienbeauftragten informieren

3.4 Umgang mit klinischen Abfällen

Die Bewirtschaftung der Abfälle aus Gesundheitseinrichtungen stellt für die Betreiber eine große Herausforderung dar. Nach den Regelungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) hat diese so zu erfolgen, dass natürliche Ressourcen geschont werden und der Schutz von Mensch und Umwelt sichergestellt ist (Bundesministerium der Justiz, 2023, S. 5).

Als zentraler Bestandteil des KrWG steht in §6 die Abfallhierarchie im Vordergrund, welche eine Reihenfolge an Maßnahmen zur Vermeidung und Abfallbewirtschaftung festlegt:

1. Vermeidung
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung
3. Recycling
4. Sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung
5. Beseitigung

Ausgehend von der Reihenfolge soll die Maßnahme gewählt werden, welche bei der Erzeugung und Bewirtschaftung der Abfälle den Schutz des Menschen und der Natur unter Berücksichtigung der Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzipien am besten gewährleistet (Bundesministerium der Justiz, 2023, S. 11).

Zudem ist zu berücksichtigen, ob aus infektionspräventiver Sicht besondere Anforderungen bei der Bewirtschaftung der Abfälle, sowohl innerhalb als auch außerhalb der Gesundheitseinrichtung, zu stellen sind (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2021, S. 3). Die Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 18 stellt eine Vollzugshilfe zur Entsorgung von Abfällen aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes dar.

Die anfallenden Abfälle werden hier je nach Herkunft, Art, Beschaffenheit und Zusammensetzung den einzelnen Abfallarten der Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (AVV) zugeordnet und nach ihrer jeweiligen Gefährlichkeit eingestuft. Die mit einem Sternchen (*) gekennzeichneten Abfallarten werden als gefährlich eingestuft, sodass bei der Entsorgung und der Stoffstromkontrolle besondere Anforderungen beachtet werden müssen.

Lediglich nicht gefährliche Abfälle aus kleinen Arztpraxen, Hauspflegestationen oder Apotheken mit einem geringen Abfallvolumen können im Rahmen der Entsorgung gemischter Siedlungsabfälle erfolgen und bedürfen keiner Zuordnung zu einem Abfallschlüssel (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2021, S. 5).

Tabelle 3.2 zeigt mit dem Abfallschlüssel 18 01 eine Aufschlüsselung der Abfälle aus der humanmedizinischen oder tierärztlichen Versorgung. Abfälle aus der Forschung wurden vernachlässigt.

Eine besondere Herausforderung bei der Abfallwirtschaft stellen die infektiösen Abfälle nach AS 18 01 03* dar. Als infektiös gilt ein Abfall, wenn dieser mit meldepflichtigen Krankheitserregern nach §§ 6 und 7, in Verbindung mit § 15 des Infektionsschutzgesetzes behaftet ist. Zudem muss neben der Kontamination auch durch den Abfall ein konkretes Infektionsrisiko möglich sein, sodass dieser als infektiös eingestuft werden kann (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2021, S. 7).

Typischerweise fallen in Kliniken die Abfälle in den Isoliereinheiten, in Dialysestationen bei bekannten Virusträgern, der Pathologie, sowie in Operationssälen an (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2021, S. 8).

Tabelle 3.2: Zuordnung der medizinischen Abfälle gemäß den jeweiligen Abfallschlüsseln des AVV (Bundesministerium der Justiz, 2020, S. 27)

Abfallschlüssel	Bedeutung
18 01	Abfälle aus der Geburtshilfe, Diagnose, Behandlung oder Vorbeugung von Krankheiten beim Menschen
18 01 01	Spitze oder scharfe Gegenstände (außer 18 01 03)
18 01 02	Körperteile und Organe, einschließlich Blutbeutel und Blutkonserven (außer 18 01 03)
18 01 03*	Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht besondere Anforderungen gestellt werden
18 01 04	Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden (z. B. Wund- und Gipsverbände, Wäsche, Einwegkleidung, Windeln)
18 01 06*	Chemikalien, die aus gefährlichen Stoffen bestehen oder solche enthalten
18 01 07	Chemikalien mit Ausnahme derjenigen, die unter 18 01 06 fallen
18 01 08*	zytotoxische und zytostatische Arzneimittel
18 01 09	Arzneimittel mit Ausnahme derjenigen, die unter 18 01 08 fallen
18 01 10*	Amalgamabfälle aus der Zahnmedizin

Folgende Eigenschaften stellen erhöhte Anforderungen an die Infektionsprävention:

- Ansteckungsgefährlichkeit
- Überlebensfähigkeit des Erregers
- Übertragungsweg
- Ausmaß und Art der Kontamination
- Menge des kontaminierten Abfalls
- Schwere der ggf. ausgelösten Erkrankung und deren Behandlung
(Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2021, S. 7)

Auf Basis der Eigenschaften lassen sich folgende Krankheiten identifizieren, welche nach ihrem jeweiligen Übertragungsweg geclustert sind.

Übertragung durch unmittelbaren Kontakt mit verletzter oder nicht-aktiver Haut oder Schleimhaut:

- AIDS/HIV-Infektion
- Virushepatitis (Blut)
- TSE (Transmissible spongiforme Enzephalopathie)
- CJK (Creutzfeldt-Jakob-Krankheit)

Fäkal-orale Übertragung

- Cholera
- Ruhr, HUS
- Typhus/Paratyphus(enteropathisches hämolytisch-urämisches Syndrom)
- Virushepatitis (Stuhl)

Aerogene Übertragung/Tröpfcheninfektion

- Aktive Tuberkulose
- Meningitis/Enzephalitis

- Diphtherie
- Tollwut
- ... (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2021, S. 7 f.)

3.5 Umgang mit infektiösen Abfällen

Zur Bewirtschaftung von infektiösen Abfällen, welche unter den AS 18 01 03* fallen, hat das Entsorgungsunternehmen REMONDIS das Verfahren REKOMED an ihrem Standort in Lünen etabliert. Mittels einer vorgeschalteten Vakuum-Dampfdesinfektion können kontaminierte Stoffe, welche bisher zwingend in einer Sonderabfallverbrennung entsorgt werden mussten, als Energielieferant genutzt werden.

Das Verfahren gliedert sich in folgende Arbeitsschritte:

- Materialeingabe und -zerkleinerung in einem hermetisch abgeschlossenen System und anschließende Füllung des Prozessrohres.
- Anschließend 99,9%ige Luftentfernung, welche durch einen mehrfachen Wechsel von Vakuumphasen und Dampfstößen erzeugt wird.
- Aufheizung und Desinfektion des Materials mittels Direktdampf.
- Abschließend erfolgt eine Trocknung des desinfizierten Materials und Austragung aus dem Druckbehälter
- Das desinfizierte Material wird anschließend zur Strom- und Dampferzeugung eingesetzt (REMONDIS Medison GmbH, kein Datum).

4 Demontagestudie und Materialanalyse

Im Rahmen eines Studierendenprojektes mit der Hochschule Pforzheim wurden Einwegbeatmungsbeutel der Unternehmen A und B demontiert und hinsichtlich der verwendeten Verbindungen und Materialien analysiert. Die Beatmungsbeutel von Unternehmen B dienen als Vergleichsprodukt, sodass ggf. eine Übertragbarkeit auf andere Einwegbeatmungsbeutel gegeben ist.

4.1 Demontagestudie

Zunächst erfolgte eine Demontage der Beatmungsbeutel inklusive der beiliegenden Verbrauchsmaterialien.

4.1.1 Beatmungsbeutel A

Der Beatmungsbeutel A wird einem Zipp-Beutel geliefert. Dieser enthält neben dem eigentlichen Beatmungsbeutel eine Beatmungsmaske, einen Reservoirbeutel, sowie einen Sauerstoffschlauch.

Abbildung 4.1 zeigt den Zeit-Masse-Graph der Demontage. Während der Zerlegung wurde die Demontagezeit für die einzelnen Arbeitsschritte mittels einer Stoppuhr und das Gewicht mit den Waagen Kern ABT 200-5DM und Kern 573 gemessen. Die Zerlegung erfolgte durch einen unerfahrenen Demonteur manuell. Als Hilfsmittel standen ihm Handwerkzeuge zur Verfügung. Insgesamt erstreckte sich die Demontage über eine Zeitspanne von 1400 Sekunden, sodass sich Demontagekosten in Höhe von 11,68€ ergaben

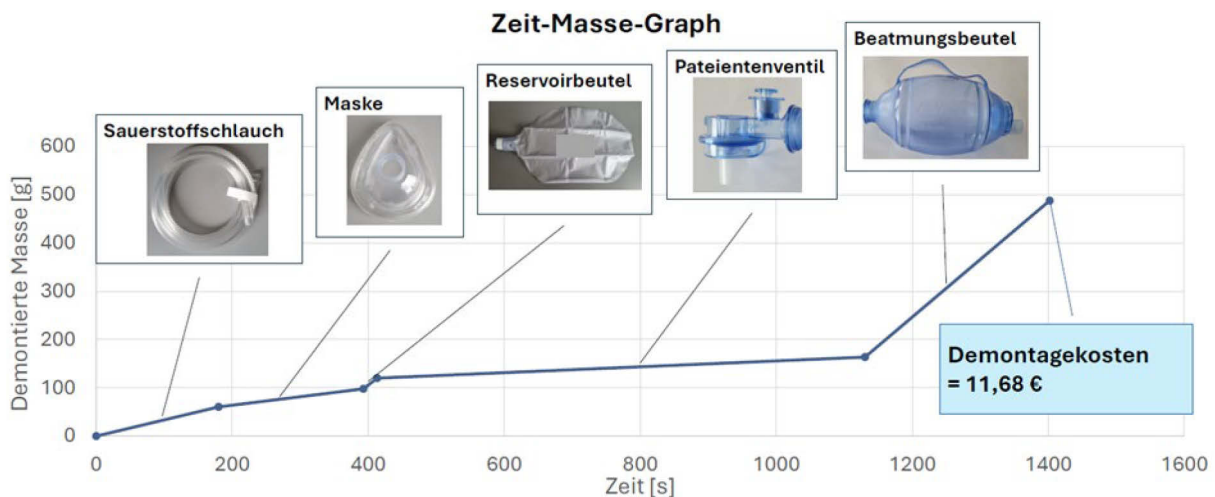


Abbildung 4.1 Zeit-Masse-Graph des Beatmungsbeutels A (Can, Jebari, & Walz, 2024)

Während der Demontage wurden zusätzlich die verwendeten Verbindungen analysiert.

Wie in Abbildung 4.2 dargestellt, konnten insgesamt zehn Steckverbindungen, fünf Klebeverbindungen, drei Schweißverbindungen, zwei Pressverbindungen und eine Verschraubung identifiziert werden. Die fünf Klebeverbindungen wurden mit einem Cuttermesser gelöst und für zwei Pressverbindungen kam eine Zange und Säge zum Einsatz (Can, Jebari, & Walz, 2024). Insgesamt wurden 23 Einzelteile identifiziert.

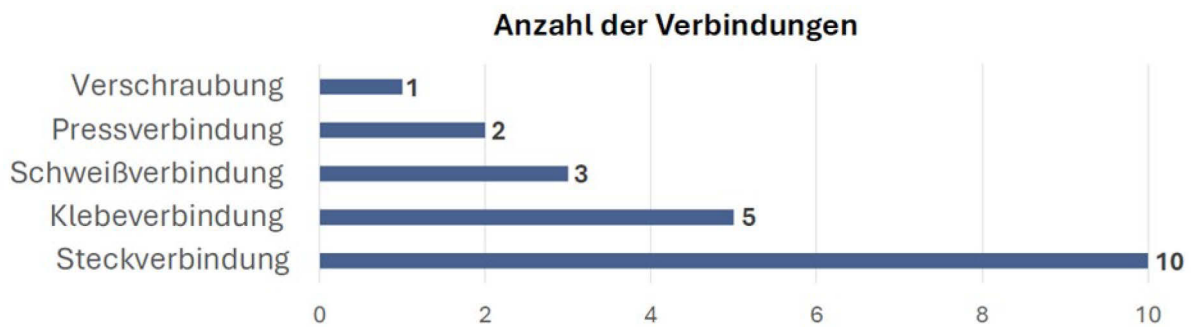


Abbildung 4.2: Verbindungsarten des Beatmungsbeutels A (Can, Jebari, & Walz, 2024)

4.1.2 Beatmungsbeutel B

Der Beatmungsbeutel B wird ebenfalls einem Zipp-Beutel geliefert. Dieser enthält neben dem eigentlichen Beatmungsbeutel zwei Beatmungsmasken in verschiedenen Größen, einen Reservoirbeutel, sowie einen Sauerstoffschlauch.

Abbildung 4.3 visualisiert die benötigte Demontagezeit für die einzelnen Produktbestandteile. Die Demontage erfolgte ebenfalls durch einen unerfahrenen Demonteur, welchem dieselben Handwerkzeuge und Messmittel zur Verfügung standen.

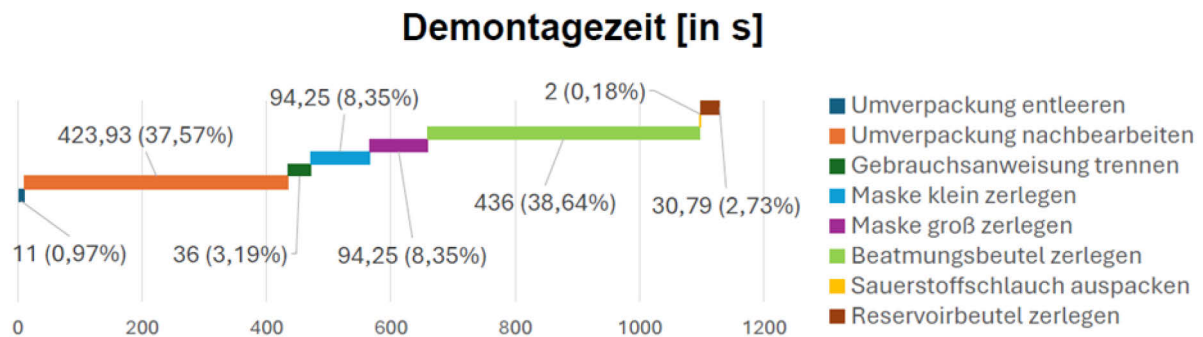


Abbildung 4.3 Demontagedauer des Beatmungsbeutels B (Schmid, Schuhmacher, & Skobowsky, 2024)

Die einzelnen Komponenten sind zudem in Abbildung 4.4 dargestellt.

4.2 Materialanalyse

Im nächsten Schritt erfolgte für beide Beatmungsbeutel eine Materialcharakterisierung.

4.2.1 Beatmungsbeutel A

Während der Demontage wurden die einzelnen Bestandteile mittels eines Bruker Alpha Platinum ATR Spektrometers bestimmt. Tabelle 4.1 zeigt die Materialien der einzelnen Komponenten des Beatmungsbeutels und deren Masse.

Tabelle 4.1: Materialzusammensetzung eines Beatmungsbeutels A mit der Gesamtmasse 489,28 g

Bauteil	Material	Masse (in g)
1	PP	4,246
2	PC	33,66
3	Silikon	2,044
4	PC	1,393
5	PC	2,438
6	Silikon	0,627
7	Edelstahl	0,306
8	Weich-PVC	294,8
9	Silikon	0,733
10	PC	12,69
11	Silikon	0,300
12	PC	16,54
13	PE	3,523
14	Weich-PVC	8,215
15	Hart-PVC	26,04
16	PE	1,427
17	PET + Klebstoff	0,186
18	Weich-PVC	16,15
19	PC	4,122
20	PE	2,625
21	Zellstoff + Klebstoff	0,118
22	Weich-PVC	40,72
23	PE	16,43

Hierbei konnte festgestellt werden, dass der Beatmungsbeutel zu 73,7% aus Weich-PVC (PVC-P) und 5,3% aus Hart-PVC (PVC-U), zu 14,5% aus PC, zu 4,9% aus PE, zu 0,9% aus PP und zu 0,6% aus Silikon besteht. 0,06% der Materialien sind mit Klebstoff verbunden und 0,06% entfällt auf Stahl.

4.2.2 Beatmungsbeutel B

Die Analyse des Beatmungsbeutels B erfolgte mit Hilfe eines Bruker Alpha FT-IR-Spektrometers. Zur Bestimmung der PVC-Komponenten stand die Datenbank-Bibliothek BPAD.S01 zur Verfügung.

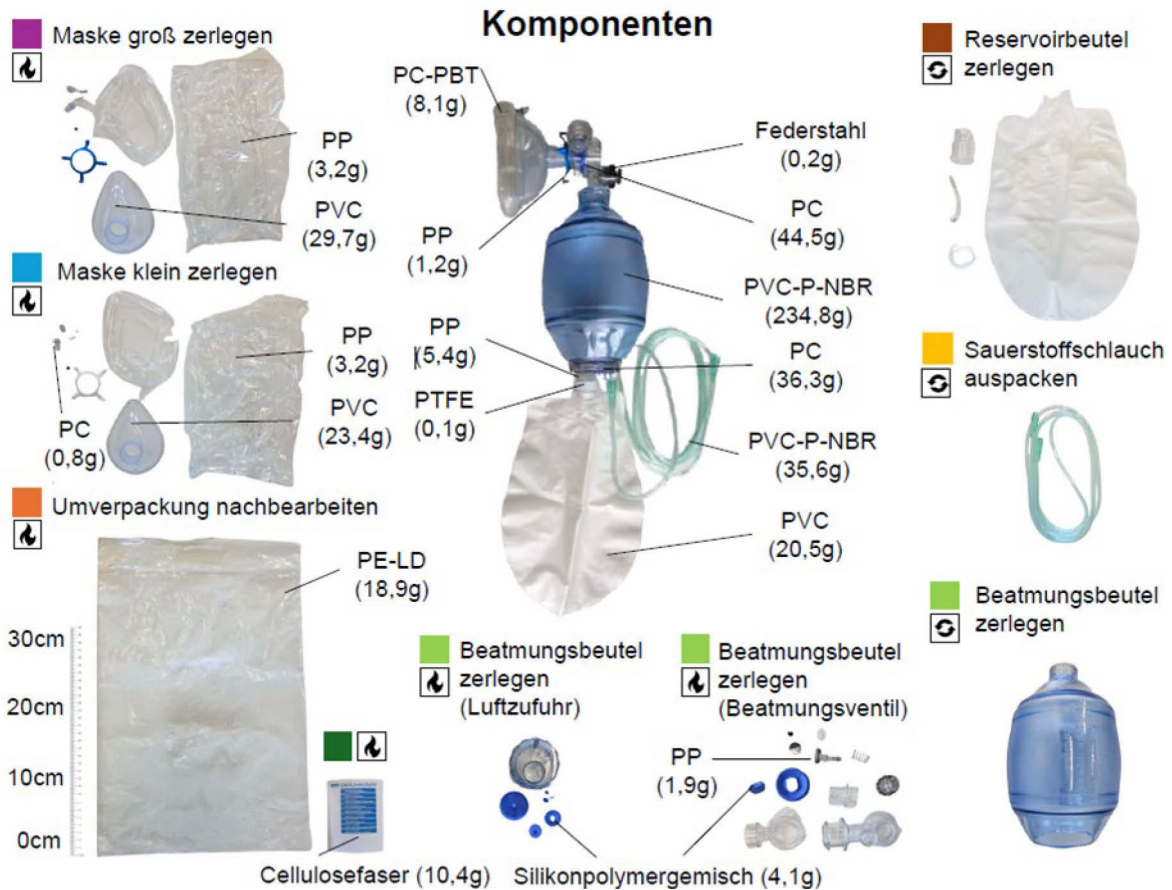


Abbildung 4.4 Materialcharakterisierung des Beatmungsbeutels B (Schmid, Schuhmacher, & Skobowsky, 2024)

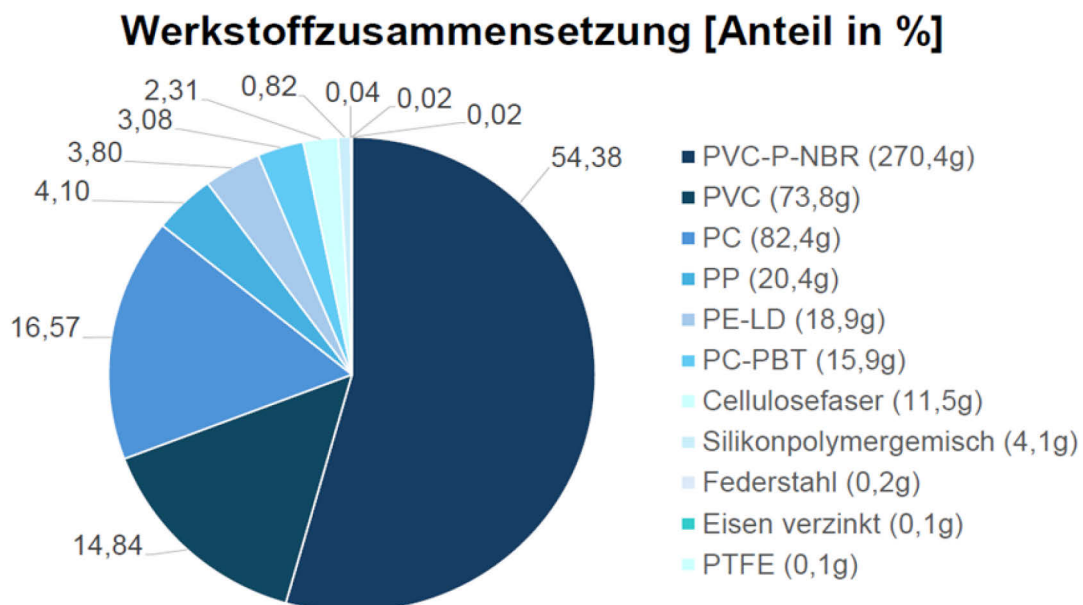


Abbildung 4.5 Werkstoffzusammensetzung des Beatmungsbeutels B (Schmid, Schuhmacher, & Skobowsky, 2024)

Der Einweg-Beatmungsbeutel B setzt sich damit aus 54,4% PVC-P-NBR, 14,8% PVC, 16,6% PC, 4,1% PP, 3,8% PE-LD, 3,1% PC-PBT, 2,3% Cellulosefasern, 0,8% Silikongemisch, 0,04% Federstahl, 0,02% Eisen verzinkt und 0,02% PTFE zusammen (Abbildung 4.5).

4.3 Auswertung

Die Demontagestudie zeigt auf, dass beide Einwegbeatmungsbeutel in einem zeitaufwendigen Demontageprozess zerlegt werden müssen. Dieser wurde insbesondere durch die vorhandenen Klebe- und Schweißverbindungen erschwert. Aufgrund einer fehlenden Materialbeschriftung konnte die Materialbestimmung nur mit Hilfe von Messverfahren erfolgen. Hier zeigte sich, dass bei beiden Beatmungsbeuteln überwiegend PVC enthalten ist. Während beim Beatmungsbeutel A sieben verschiedene Materialien nachgewiesen wurden, werden beim Beatmungsbeutel B elf verschiedene Materialien eingesetzt.

5 Entwicklung und Bewertung von Handlungsoptionen

5.1 Entwicklung von Handlungsoptionen

Auf Basis der Demontagestudie und der Materialanalyse wurden im folgenden Schritt verschiedene Handlungsoptionen entwickelt und hinsichtlich der Machbarkeit überprüft (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Entwickelte Handlungsoptionen

Maßnahme	Beschreibung
Materialverbindungen	Der Einsatz von Steck- und Schraubverbindungen würde eine zerstörungsfreie Demontage ermöglichen. Zudem wäre für den Sauerstoff- und Patientenanschluss ein Bajonettverschluss denkbar. Der Reservoirbeutel könnte durch einen Haltering mit Clip am Beatmungsbeutel befestigt werden, sodass er nicht mehr an den Befestigungsring geklebt werden muss.
Materialkennzeichnung	Es erfolgt eine direkte Materialkennzeichnung auf den einzelnen Einzelteilen, sodass eine direkte Identifizierung gegeben ist.
Modularer Aufbau	Durch einen modularen Aufbau des Beatmungsbeutels könnten bestimmte Baugruppen nach einer Aufbereitung für eine gewisse Anzahl an Zyklen wiederverwendet werden.
Eingesetzte Materialien	Durch den Einsatz von Rezyklaten oder Biopolymeren könnten natürliche Ressourcen geschont werden. Zudem könnte die vorhandene Metallfeder gegen eine Kunststofffeder ausgetauscht werden. Ein aufgeklebtes Metallstück auf dem Überdruckventil könnte gegen einen Papieraufkleber oder einen direkten Aufdruck vermieden werden.
Reduktion der Materialvielfalt	Im Hinblick auf eine recyclinggerechte Produktgestaltung ist es nötig die vorhandene Materialvielfalt zu reduzieren. Denkbar wäre es, den Beutel weiterhin aus PVC, die Dichtungen aus Silikon und die Anschlüsse aus PP oder PE zu gestalten. Diese Materialien würden sich auch bei einem Recyclingprozess über eine vorgeschaltete Schwimm-Sink-Trennung gut trennen lassen.
Geschäftsmodelle	Etablierung eines Rücknahmesystem für Einweg-Beatmungsbeutel
Reinigung	Aufbereitung der verwendeten Einwegbeatmungsbeutel

Digitaler Produktpass	Informationen über die verwendeten Materialien, Verbindungen und Entsorgung (Recycling) bereitstellen
Produktverpackungen	Verzicht auf die zusätzlichen Folienverpackungen der Beatmungsmasken, des Reservoirbeutels und des O2-Schlauches

5.2 Bewertung hinsichtlich der Medizinproduktezulassung

Tabelle 5.2: Bewertung der Handlungsoptionen

Maßnahme	Bewertung
Materialverbindungen	Der Einsatz von alternativen Verbindungen ist möglich, allerdings darf hierbei die Patientensicherheit nicht gefährdet werden.
Materialkennzeichnung	Der Einsatz von Materialkennzeichnungen ist möglich.
Modularer Aufbau	Ein modularer Aufbau von Medizinprodukten ist durchaus möglich. Das kontaminierte System wird entsorgt und der Rest wird aufbereitet. Allerdings muss hierbei sichergestellt sein, dass das System für eine Aufbereitung ausgelegt und überprüft ist. Zudem sollte das Produkt mit einem Indikator versehen werden, sodass das Produkt nur für eine definierte Anzahl an Aufbereitungen verwendet werden kann.
Eingesetzte Materialien	Der Einsatz von alternativen Materialien muss immer kritisch bewertet werden. Verfügt ein Rezyklat immer über dieselben Zusammensetzungen? Alternativ müsste pro Charge kostenintensive Überprüfungen durchgeführt werden.
Reduktion der Materialvielfalt	Eine Reduktion der Materialvielfalt ist möglich, wenn die „neuen“ Materialien die Patientensicherheit nicht gefährden.
Reinigung	Die Aufbereitung eines Medizinproduktes ist möglich. Allerdings muss das Produkt für die Aufbereitungsverfahren ausgelegt und überprüft sein. Zudem darf es nur für eine gewisse Anzahl an Zyklen aufbereitet werden.
Produktverpackungen	Da die Produktverpackung ebenfalls Teil des Medizinproduktes ist, muss ein Verzicht darauf kritisch überprüft werden.

Hinsichtlich einer Zulassung gemäß der Medical Device Regulation (EU) 2017/745 der EU wurden die Konzepte gemeinsam mit dem Zentrum für Marktzugang und Zulassung von Medizinprodukten der Hochschule Pforzheim bewertet (Tabelle 5.2). Die Medical Device Regulation (EU) 2017/745 regelt das Inverkehrbringen, das Bereitstellen auf dem Markt, sowie die Inbetriebnahme von bestimmten Medizinprodukten sowie deren Zubehör in der EU, welche für den Gebrauch am

Menschen bestimmt sind. Des Weiteren regelt sie die in der EU durchgeführten klinischen Prüfungen, welche die Medizinprodukte, sowie deren Zubehör betreffen (Europäische Union, 2017, S. 13). Im Rahmen eines Zulassungsverfahrens muss hierbei in geeigneter Weise bewertet werden, ob das Medizinprodukt den grundlegenden Sicherheits- und Leistungsanforderungen entspricht (Europäische Union, 2017, S. 2).

Bei Modifikationen an einem bestehenden Medizinprodukt muss dieses eine erneute Zulassung durchlaufen. Zudem muss bei Veränderungen immer die Patientensicherheit beachtet werden.

5.3 Materialsubstitution

Als mögliche Handlungsoptionen wurde die Substitution der eingesetzten Materialien sowie eine Reduktion der Materialvielfalt identifiziert. Anhand des Beatmungsbeutels A wurden Alternativvorschläge für zu verwendende Materialien erarbeitet. Ziel sollte es sein, die aktuell verwendeten Materialien durch umweltfreundlichere, leichter rezyklierbare und/oder biobasierte Materialien zu ersetzen. Insbesondere PVC ist aus mehreren Gründen kein umweltfreundliches Material: durch den hohen Weichmacheranteil ist PVC nicht mechanisch rezyklierbar. Das Recycling von PVC ist mit Hilfe von Lösemitteln möglich. Dabei wird PVC gelöst, die weiteren enthaltenen Additive und Weichmacher abgetrennt und das PVC wieder gefällt. Diese Methode ist mit mehr Aufwand verbunden als ein mechanisches Recycling. Zudem enthält PVC Chlor, welches bei einer thermischen Verwertung zur Bildung von HCl und ggf. Dioxinen/Furanen führen kann, wodurch eine aufwändige Rauchgasreinigung erforderlich ist.

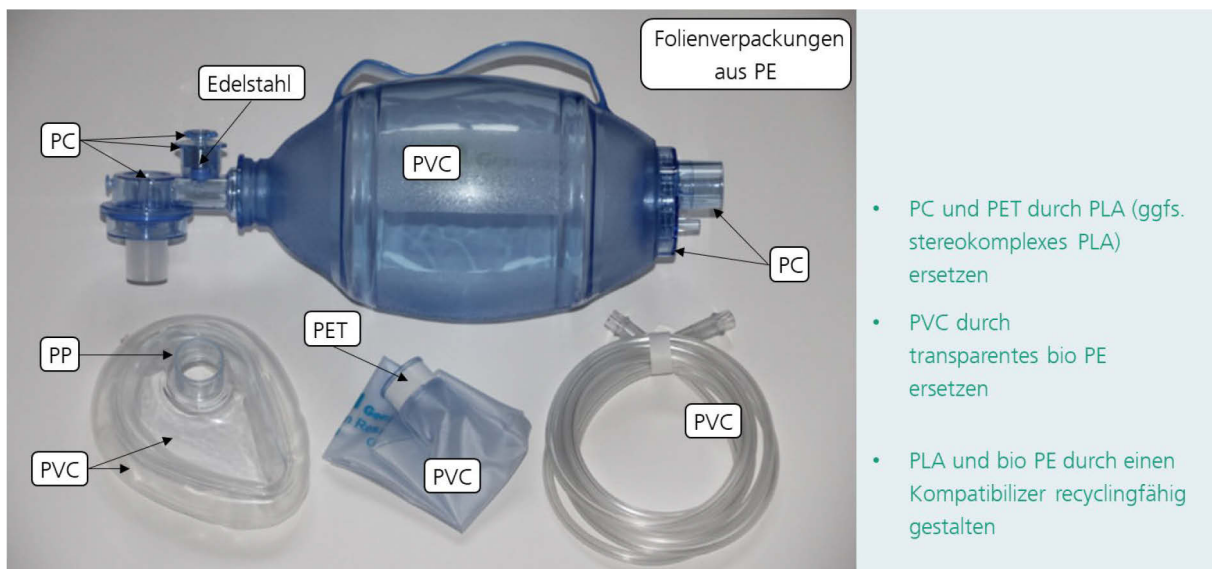


Abbildung 5.1: Beatmungsbeutel A mit bestehendem Materialsystem (schwarz) und Materialvorschlägen (grün)

Die Vorschläge für Alternativmaterialien sind wie folgt (Abbildung 5.1):

- Polycarbonat (PC) kann durch Polylactid (PLA), ggf. stereokomplexes PLA ersetzt werden. PLA wird aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen.
- Polyvinylchlorid (PVC) kann durch biobasiertes Polyethylen (bio PE) ersetzt werden
- Polyethylenterephthalat (PET) kann ebenso wie PC durch PLA, ggf. stereokomplexes PLA, ersetzt werden

- Sowohl PLA als auch bio PE können durch einen Kompatibilizer recyclingfähig gestaltet werden.

5.4 Entwicklung neuer Geschäftsfelder

Aktuell werden die verwendeten Einwegbeatmungsbeutel in den Kliniken über den Restmüll entsorgt und anschließend einer thermischen Verwertung zugeführt. Durch diese Praktik werden die verwendeten Ressourcen jedoch dem Stoffkreislauf entnommen und gehen für immer verloren. Um dem entgegenzuwirken, wäre die Etablierung eines Sammelsystems wünschenswert.

Hier hat die Befragung der Kliniken und eine Begehung jedoch gezeigt, dass die vorhandenen Platzverhältnisse sehr begrenzt sind und man nicht für jedes verwendete Medizinprodukt ein eigenes Sammelsystem etablieren kann.

Eine Analyse von verschiedenen medizinischen Einwegprodukten hat jedoch gezeigt, dass viele Medizinprodukte aus PVC bestehen, beziehungsweise einen gewissen Anteil hiervon haben. Hierzu gehören beispielsweise Produkte wie ein Infusionssystem, eine Sauerstoffmaske, ein Urinbeutel, ein Tubus, usw.

Denkbar wäre daher die Etablierung einer „PVC-Tonne“, in welcher alle PVC-haltigen Produkte gesammelt werden können. Zur vereinfachten Sammlung könnten diese Produkte mit einem speziellen Farbcode versehen werden.

5.5 Umweltwirkungen und Kostenbewertung

5.5.1 Screening LCA

Die Screening LCA wurde angelehnt an die Normenreihe ISO 14040 ff. mit den vier Hauptphasen Zieldefinition, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung sowie Auswertung durchgeführt. Da seitens des Herstellers keine Daten zur Verfügung gestellt wurden, mussten verschiedene Annahmen getroffen werden.

Der Lebenszyklus eines Beatmungsbeutels ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Basierend auf dem Vorschlag, die Beatmungsbeutel nach der Nutzung zu sammeln und einem Recycling zuzuführen wurden exemplarisch für den Beatmungsbeutel A die zwei Szenarien Verbrennung und Recycling am Lebensende verglichen. Zudem wurde zwischen konventionellem und biobasiertem PVC unterschieden. Der Produktionsprozess selbst wurde aufgrund nicht vorhandener Daten ausgeklammert. Ebenso wurde Prozessschritt des Lösens und Ausfällens von PVC zur Eliminierung des Weichmachers beim Recycling nicht berücksichtigt, da hierzu keine Daten vorliegen. Da aus der Nutzungsphase keine Wirkung zu erwarten ist (keine Energieverbräuche, keine Emissionen), konzentriert sich das Screening damit auf die Gewinnung der Ausgangsmaterialien und das Lebensende. Als funktionelle Einheit (fU) wurde „ein Beatmungsbeutel“ festgelegt. Im Fall des Beatmungsbeutels A hat dieser eine Masse von 489,28 g. Für die Berechnung wurde die SPHERA-Software „LCA for experts“ verwendet. Die Berechnung und Auswertung wurde mit der Environmental Footprint (EF) Methode EF3.1 durchgeführt. Diese wurde von der Europäischen Kommission zur Bewertung der Umweltleistung von Produkten und Organisationen entwickelt. Die EF3.1 Indikatoren umfassen eine breite Palette von Umweltaspekten, darunter Treibhausgasemissionen, Energieverbrauch, Wassernutzung und Abfallproduktion, und ermöglichen so eine umfassende Bewertung der ökologischen Auswirkungen.

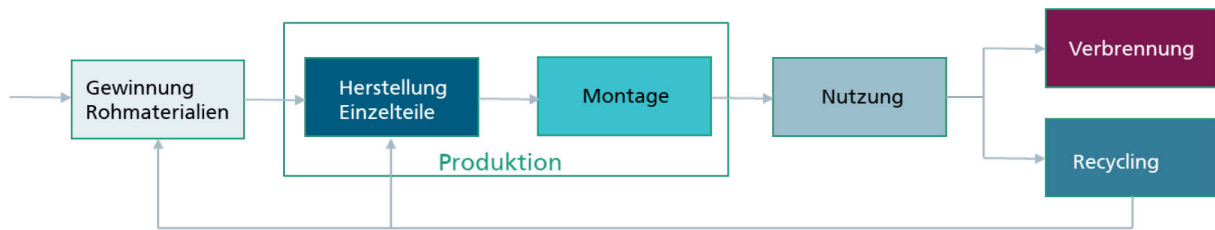


Abbildung 5.2: Produktlebenszyklus eines Beatmungsbeutels

Die Modelle für die Verbrennung und das Recycling von konventionellem PVC sind in den Abbildungen Abbildung 5.3, Abbildung 5.4 und Abbildung 5.5 dargestellt. Die Modelle für biobasiertes PVC wurden analog hierzu ausgeführt.

Im Szenario der Verbrennung wurden die entstehende Energie als Gutschrift berücksichtigt.

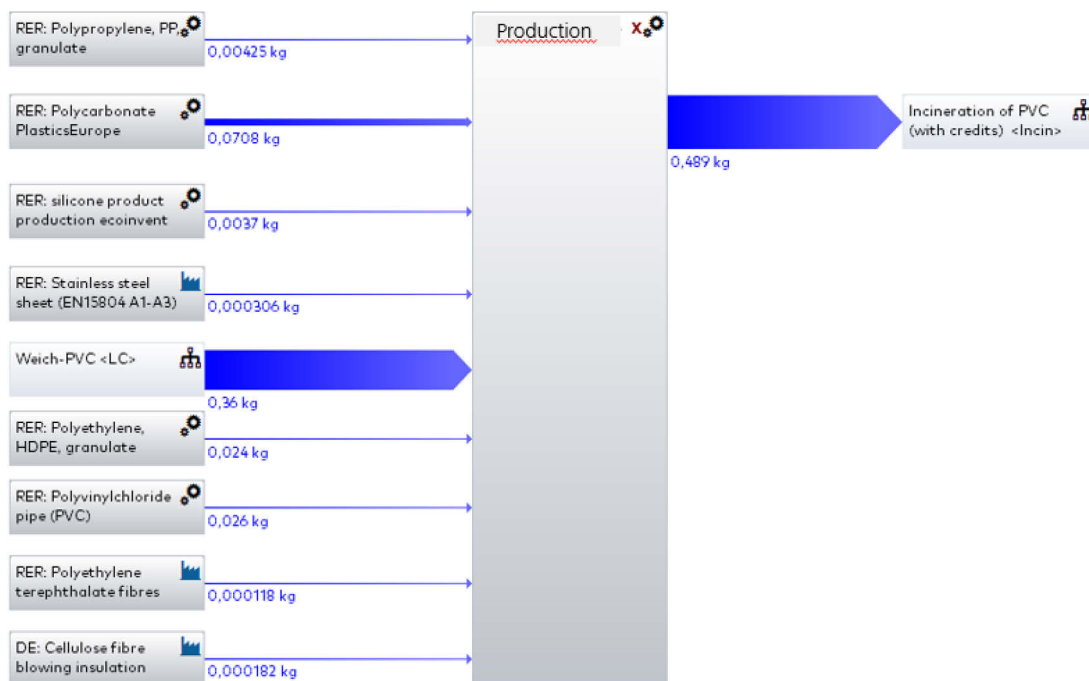


Abbildung 5.3: Modellierung des Beatmungsbeutels A mit anschließender Verbrennung.

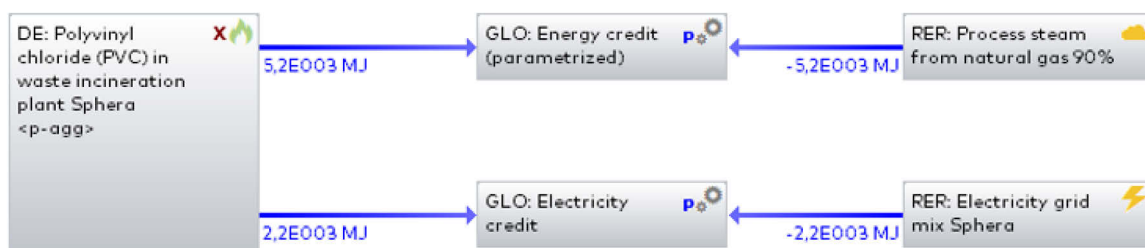


Abbildung 5.4: Modellierung des Verbrennungsprozesses von konventionellem PVC

Für das Szenario Recycling wurde zwischen Weich-PVC und anderen Polymeren unterschieden. Für Weich-PVC wurde angenommen, dass dieses einen Anteil von 30% an Weichmachern enthält. Während des Recyclingprozesses wird das PVC mittels eines Lösungsmittels in Lösung gebracht, der Weichmacher abgetrennt und das PVC wieder ausgefällt. Es wurde angenommen, dass ca. 15% des so recycelten PVC wieder in Neuware eingesetzt wird. Für die anderen Polymere, die sich mechanisch recyceln lassen, wurde ein Recyclinganteil von 50% angenommen.

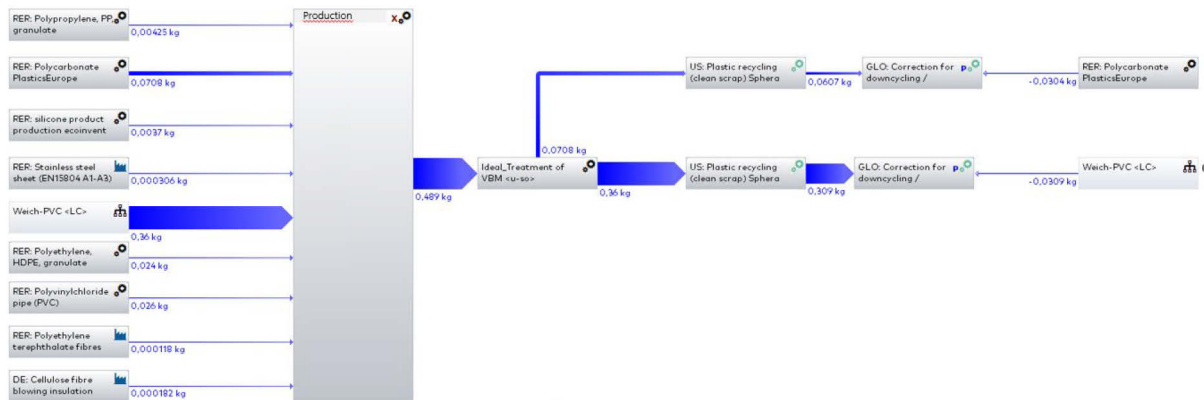


Abbildung 5.5: Modellierung des Beatmungsbeckens A mit anschließendem Recycling

Abbildung 5.6 zeigt die Ergebnisse der Bilanzierung für die Wirkungskategorien Klimawandel, Versauerung und verschiedene Toxizitäten

Für einen Großteil der Kategorien (Ausnahmen: fossiler Ressourcenverbrauch und Humantoxizität, Krebs für biobasiertes PVC) sind die Umweltwirkungen der für das Recycling-Szenario geringer als für die Verbrennung. Auch wenn der Effekt teilweise weniger als 10% beträgt und deshalb nicht als signifikant zu betrachten ist, kann das als Tendenz gewertet werden. Zudem sind die Wirkungen bei biobasiertem PVC tendenziell geringer als bei konventionellem PVC.

Ein großer Unterschied ergibt sich für die Kategorie Klimawandel. Hier reduzieren sich die Werte für die Klimagase eines Beatmungsbeckens (489 g) von $2,2 \text{ kg CO}_2\text{eq/fU}$ (Verbrennung) auf $1,43 \text{ kg CO}_2\text{eq/fU}$ (Recycling). Der Blick in die Literatur zeigt etwas Ähnliches: (Schwarz, et al., 2021). geben für das lösemittelbasierte Recycling ($1,5 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg PVC}$) gegenüber der thermischen Verwertung ($4,0 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg PVC}$) von PVC eine Einsparung von $2,5 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg PVC}$ an, die Größenordnung des Ergebnisses ist damit gleich. Es ist zu berücksichtigen, dass die Bilanzrahmen der Berechnungen nicht identisch sind, weshalb im Detail unterschiedliche Werte zu erwarten waren: im Fall der Literaturdaten wurde 1 kg PVC und im Projekt CircBreath ein Beatmungsbeutel von knapp 500 g und unterschiedlichen Bestandteilen betrachtet.

Für die Kategorie fossiler Ressourcenverbrauch ergibt sich kein Vorteil aus dem Recycling gegenüber der Verbrennung. Die Verwendung von biobasiertem PVC reduziert allerdings den Ressourcenverbrauch um etwa ein Drittel gegenüber konventionellem PVC.

Insgesamt zeigen die Berechnungen, dass aus Umweltsicht ein Recycling gegenüber der Verbrennung und die Nutzung von biobasiertem PVC gegenüber konventionellem PVC vorteilhaft sind.

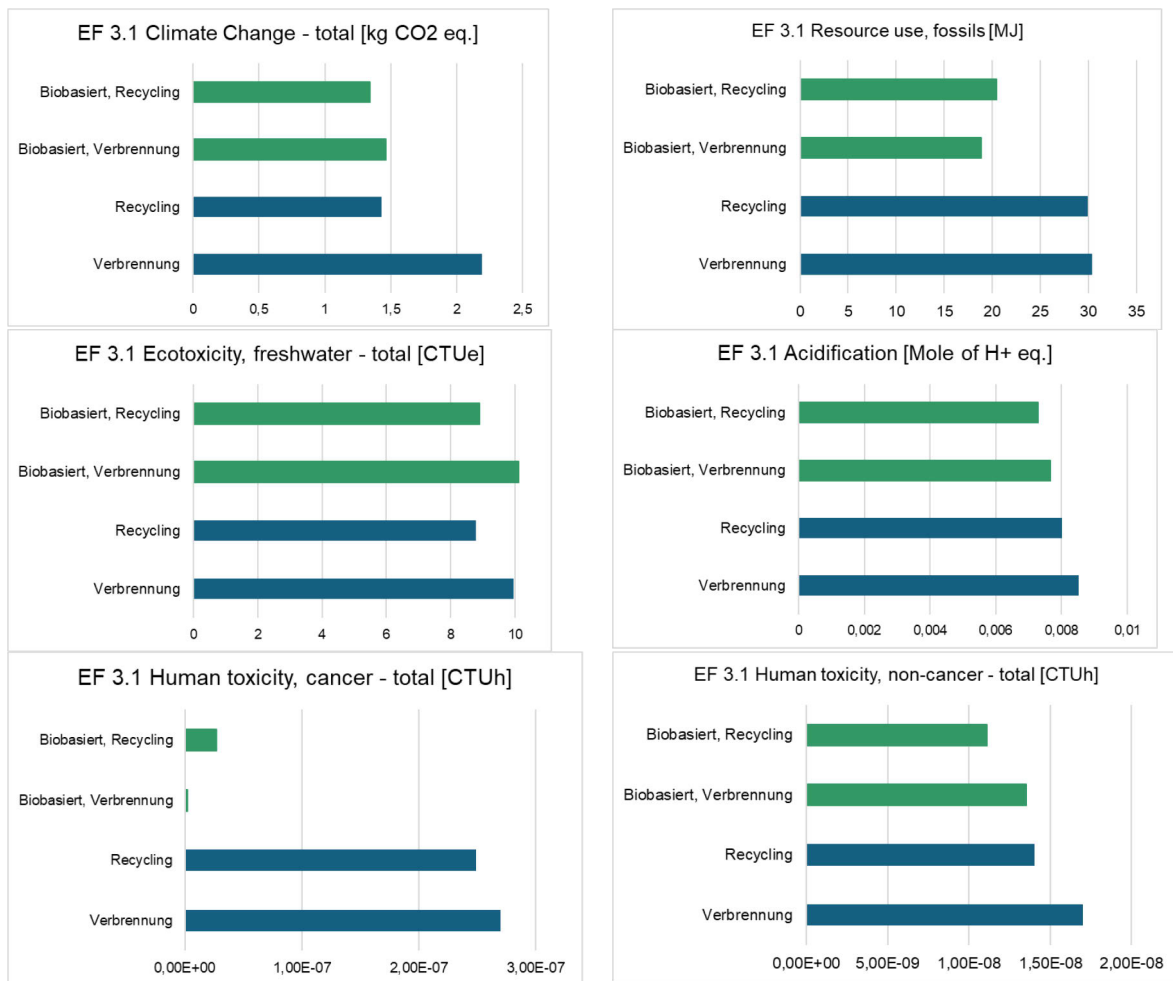


Abbildung 5.6: Ergebnisse der Bilanzierung für die Wirkungskategorien Klimawandel, fossiler Ressourcenverbrauch, Versauerung und Toxizitäten

5.5.2 Kostenbewertung

Die Kostenbewertung wurde angelehnt an eine Lebenszykluskostenanalyse (LCC) und die wichtigen Kostenpositionen qualitativ diskutiert. Seitens des Herstellers A wurden auch hier keine Daten zur Verfügung gestellt.

Die entlang des Lebenszyklusses eines Beatmungsbeutels grundsätzlich anfallenden Kosten sind in Tabelle 5.3 aufgeführt. Die Änderung einzelner dieser Kosten durch verschiedene Maßnahmen wird in der rechten Spalte zugehörig zu den Kostenpositionen qualitativ bewertet. Berücksichtigt werden folgende Maßnahmen: Verringerung der Anzahl an Materialien, Schraub- anstelle von Klebeverbindungen und Recycling anstelle von Verbrennung.

Tabelle 5.3: Bewertung der Kosten entlang des Lebenszyklusses

1. Anschaffungskosten	-
Investitionskosten Produktionsanlagen	<ul style="list-style-type: none"> - Eine Änderung der Eingangsmaterialien führt zu keinen Änderungen in den Investitionskosten - Sollen Schraub- anstelle von Klebeverbindungen umgesetzt werden, so werden Änderungen des Herstellungsprozesses notwendig, was zu erhöhten Investitionen führt.
Material	<ul style="list-style-type: none"> - Der Preis von Neuware Basis-PVC lag im Juli bei 1605 €/t (Kunststoff Information, 2024), die Kosten

	<p>für Recyclingware betragen 400 € (PVC-w) (Plasticker, 2024). Ein Einsatz von 10-20 % RC PVC in den Beatmungsbeuteln reduziert den Einkaufspreis für das PVC Material</p> <ul style="list-style-type: none"> - Eine Verringerung der Materialvielfalt ändert die Kosten nicht gravierend, da PVC den Hauptanteil im Produkt ausmacht und sich die Einkaufspreise der anderen Materialien nicht stark unterscheiden
Transportkosten	<ul style="list-style-type: none"> - Unabhängig von Maßnahme gleich
2. Betriebskosten	-
Energiekosten	<ul style="list-style-type: none"> - Abhängig vom eingesetzten Material und der Komplexität des Produktionsprozesses variiert der Energieverbrauch und damit die Energiekosten. Es wird angenommen, dass die Unterschiede nicht gravierend sind und damit die Kostenänderung keinen entscheidenden Faktor darstellt.
Verbrauchsmaterialien	<ul style="list-style-type: none"> - Für alle betrachteten Maßnahmen in etwa gleich
Arbeitskosten	<ul style="list-style-type: none"> - Mehr Handarbeit beim Zusammenbau vor Verpackung / oder Zusammenbau vor Ort im Krankenhaus?
3. Wartungs- und Instandhaltungskosten	-
Regelmäßige Wartung	<ul style="list-style-type: none"> - Unabhängig von Maßnahme gleich
Inspektionen	<ul style="list-style-type: none"> - Unabhängig von Maßnahme gleich
4. Nutzungskosten	-
Schulungen	<ul style="list-style-type: none"> - Das Personal muss für den Umgang mit Beatmungsbeuteln ohnehin geschult werden. Der Umgang mit dem Beutel nach Gebrauch (z.B. Sammlung in separater Tonne) kann in die Schulung integriert werden.
Lizenz- und Gebührenkosten	<ul style="list-style-type: none"> - Unabhängig von Maßnahme gleich
5. End-of-Life-Kosten	-
Entsorgungskosten	<ul style="list-style-type: none"> - Werden die Beutel einem Recycling zugeführt, so werden die Kosten geringer, da Kosten für Entsorgung durch Verbrennung gespart werden: Einwegbeatmungsbeutel zählen zu Abfällen, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden. Sie werden in der Regel zusammen mit Hausmüll verbrannt. Die Kosten für die Entsorgung durch thermische Verwertung sind unterschiedlich je nach Verbrennungsanlage und betragen im Mittel etwa 150 €/t. (Statista, 2024)
Recyclingkosten	<ul style="list-style-type: none"> - Kosten für Aufbereitung (Schreddern, Waschen, Schwimm-Sink-Trennung) müssen kleiner sein als der Neupreis von PVC. Der aktuelle Preis von Recycling-PVC-w 400 €/t ist deutlich geringer als der von Neuware mit ca. 1600 €/t (s.o.) und unterstreicht, dass ein kosteneffizientes Recycling möglich ist.

Demontagekosten	- Aufgrund der im Vergleich zu den anderen enthaltenen Kunststoffe höheren Dichte von PVC wird angenommen, dass das PVC durch die Aufbereitungsschritte Mahlen, Waschen und Schwimm-Sink-Trennung sortenrein zurückgewonnen werden kann. Eine händische Demontage ist nicht notwendig, da aufgrund von möglichen Fehlwürfen in die PVC-Tonne auf die maschinelle Aufbereitung nicht verzichtet werden kann.
Restwert	- Werden das PVC und auch andere enthaltene Kunststoffe recycelt anstatt verbrannt, so hat der Beatmungsbeutel am Ende der Nutzung einen Restwert. Ziel ist die Rückführung in Krankenhausprodukte, ein RC-Anteil von 10-20% PVC im Produkt ist realistisch
Transport	- Der Transportweg zu einem Aufbereiter und anschließend zum Hersteller wird als ähnlich angenommen, wie der Transportweg zu einer Verbrennungsanlage
6. Indirekte Kosten	-
Umweltkosten	- Die betriebsinternen Kosten zur Vermeidung von Emissionen und Abfall in der Produktionsanlage bleiben unabhängig von der Maßnahme in etwa gleich
Versicherungskosten	- Für die Produktionsanlage gleich - Zusätzliche Versicherungskosten für Reecyclinganlage
Finanzierungskosten	-
7. Externe Faktoren	-
Inflation	- Nicht bewertet
Diskontsatz	- Nicht bewertet
Nutzungsdauer	- Unabhängig von Maßnahme gleich
Preisschwankungen	- Der Kunststoffmarkt ist relativ volatil. Sowohl die Preise für Neukunststoffe als auch die für Recyclingkunststoffen schwanken. Eine Prognose des zukünftigen Marktes kann an dieser Stelle nicht gemacht werden

Insgesamt werden durch das Recycling Kosten entlang des Lebenszyklusses eingespart.

Der Krankenhausbetreiber kann mit der getrennten Sammlung von PVC hohe Entsorgungskosten für die thermische Verwertung einsparen.

Der Hersteller der Beatmungsbeutel kann mit dem Einsatz von 10-20% RC-PVC in den Beatmungsbeuteln Kosten sparen.

6 Zusammenfassung

In Deutschland produziert der Gesundheitssektor jährlich 1,2 Millionen Tonnen Abfall, wobei etwa 60% hausmüllähnliche Abfälle sind. Eine umfassende Verbesserung der Abfallbewirtschaftung in Kliniken ist notwendig, um zur Schonung von Ressourcen beizutragen sowie die Umweltauswirkungen des Abfallmanagements im Gesundheitssektor zu reduzieren.

Im Rahmen des Forschungsprojektes CircBreath wurde zunächst der Abfallfluss einer in Baden-Württemberg ansässigen Klinik untersucht. Ergänzend hierzu wurden Kliniken in Baden-Württemberg zur Beantwortung eines Fragebogens angeschrieben, wobei nur zwei Kliniken den Fragebogen ausfüllten und zurücksandten.

Die Analyse ergab, dass lediglich 2% der anfallenden Abfälle als infektiös gelten und der Rest prinzipiell recycelt werden könnte.

Die höheren Kosten für die Aufbereitung von Mehrwegbeatmungsbeutel haben dazu geführt, dass zunehmend Einwegbeatmungsbeutel verwendet werden. Klinik 1 verwendet Mehrwegbeatmungsbeutel in der Anästhesie, in Klinik 2 werden nur noch auf der Intensivstation Restbestände von Mehrwegbeuteln eingesetzt. Einwegbeatmungsbeutel werden jedoch, wie viele andere gebrauchte Medizinprodukte, über den Restmüll entsorgt und damit der thermischen Verwertung zugeführt.

Eine Herausforderung in beiden Kliniken ist der stark begrenzte Platz für zusätzliche Sammelsysteme.

In einem Studierendenprojekt der Hochschule Pforzheim wurden zwei unterschiedliche Einwegbeatmungsbeutel demontiert und hinsichtlich der verwendeten Verbindungen und Materialien analysiert. Ziel war es, die Demontageprozesse und Materialzusammensetzungen der beiden Produkte zu vergleichen. Es zeigte sich, dass beide Beatmungsbeutel zeitaufwändige Demontageprozesse erforderten, insbesondere aufgrund der Klebe- und Schweißverbindungen. Die fehlende Materialbeschriftung erforderte den Einsatz spezieller Messverfahren zur Materialbestimmung.

Die Materialanalyse ergab, dass der Beatmungsbeutel A zu 73,7 % aus Weich-PVC und 5,3 % aus Hart-PVC besteht, ergänzt durch PC, PE, PP und Silikon. Insgesamt wurden sieben verschiedene Materialien nachgewiesen. Im Vergleich dazu wurden im Beatmungsbeutel B 54,4 % PVC-P-NBR, 14,8 % PVC, 16,6 % PC und insgesamt elf verschiedene weitere Materialien nachgewiesen.

Auf Basis der ermittelten Problemfelder wurden verschiedene Handlungsoptionen entwickelt und hinsichtlich der Machbarkeit gemäß der Medizinprodukteverordnung bewertet.

Die entwickelten Maßnahmen beinhalten:

- **Materialverbindungen:** Verwendung von Steck- und Schraubverbindungen für eine zerstörungsfreie Demontage.
- **Materialkennzeichnung:** Direkte Kennzeichnung der Materialien zur einfachen Identifizierung.
- **Modularer Aufbau:** Wiederverwendbarkeit bestimmter Komponenten nach Aufbereitung.
- **Eingesetzte Materialien:** Einsatz von Rezyklaten oder Biopolymeren zur Schonung natürlicher Ressourcen.
- **Reduktion der Materialvielfalt** zur Verbesserung des Recyclings.

- **Rücknahmesysteme**
- **Digitaler Produktpass**
- Verzicht auf zusätzliche **Produktverpackungen**

Die Bewertung der Maßnahmen im Hinblick auf die Medical Device Regulation (EU) 2017/745 ergab:

- Materialkennzeichnungen sind umsetzbar.
- Ein modularer Aufbau und Aufbereitung der Komponenten sind möglich, sofern das System für mehrmalige Verwendung ausgelegt ist.
- Alternative Materialverbindungen, der Einsatz alternativer Materialien sowie eine Reduktion der Materialvielfalt sind möglich, solange die Funktionalität und Sicherheit gewährleistet bleiben.

Der Ansatz zur Substitution von Materialien und Reduktion der Materialvielfalt wurde vertieft ausgearbeitet. So könnte beispielsweise das in großen Anteilen enthaltene PVC, das schwer zu recyceln ist, durch nachhaltigere Alternativen wie Polylactid oder biobasiertes Polyethylen ersetzt werden.

Als neues Geschäftsfeld konnte die „PVC-Tonne“ entwickelt werden, in welcher alle PVC-haltigen Einwegmedizinprodukte gesammelt werden können. Zur einfacheren Sortierbarkeit sollten diese mit einem Farbcode versehen werden.

Mittels einer Screening LCA wurde das Recycling von vorher getrennt gesammelten Beatmungsbeuteln gegenüber der Verbrennung sowie die Verwendung von biobasiertem gegenüber konventionellem PVC bewertet. Es ergab sich, dass durch Recycling insbesondere in der Wirkungskategorie Klimawandel (Treibhausgase) Umweltwirkungen reduziert werden können, während biobasiertes PVC Vorteile gegenüber konventionellem PVC bietet.

Eine überschlägige Kostenbewertung angelehnt an eine LCC ergab zudem, dass durch ein Recycling Kosten reduziert werden können.

7 Verwertung

Die Analyse von weiteren Einweg-Beatmungsbeuteln und Einwegmedizinprodukten wie bspw. einem Infusionssystem (Venenverweilkanüle, Infusionsbesteck), O2-Schläuchen, O2-Masken und einem Urinbeutel hat gezeigt, dass diese ebenfalls einen hohen Anteil an PVC sowie viele verschiedene weitere Materialien enthalten, sodass eine Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse auch auf weitere Produkte und Produktgruppen gegeben ist.

Eine Veröffentlichung der Ergebnisse des mit der Hochschule Pforzheim durchgeführten Studentenprojektes in der Zeitschrift *medizin&technik* wird aktuell vorbereitet.

8 Ausblick

Die in CircBreath durchgeführte Analyse am Beispiel der Beatmungsbeutel hat gezeigt, dass Potenzial sowohl

- für das Recycling als auch
- für eine Substitution von Materialien oder
- den Einsatz von Rezyklaten in neue Produkte

und damit für die Entwicklung von nachhaltigeren Medizinprodukten vorhanden ist. Weitere Forschung ist allerdings notwendig, um die Ergebnisse abzusichern und die Umsetzbarkeit in die Praxis sicherzustellen. So müssen neue Materialien und Recyclingwege in praktischen Versuchen getestet werden.

Zudem muss bspw. dafür gesorgt werden, dass die Recyclingverfahrenskette sicher ist. Insbesondere muss ausgeschlossen werden, dass während der Aufbereitung eine (z.B. infektiöse) Gefahr von dem aufzubereitenden Altmaterial oder den Rezyklat ausgeht, ausgelöst bspw. durch Fehlwürfe in der Sammlung.

- Praxis*. Abgerufen am 25. Januar 2023 von <https://medteconline.de/info/magazine/blog/einweg-vs-mehrweg-aufbereitung-von-medizinischen-instrumenten-unter-nachhaltigkeitsaspekten-in-der-ambulanten-praxis?ref=/info/magazine/collection/nachhaltigkeit-in-der-medizintechnik>
- Himmel-Saar, M., & Roth, S. (2020). Steckbriefe für Kunststoffe in der Medizintechnik. In *Kunststoffe in der Medizintechnik* (S. 183-191). München: Carl Hanser Verlag.
- Joseph, B., James, J., Kalarikkal, N., & Thomas, S. (2021). *Recycling of medical plastics*. Abgerufen am 25. November 2023 von <https://pdf.sciencedirectassets.com/316810/1-s2.0-S2542504821X00048/1-s2.0-S2542504821000348/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEBsaCXVzLWVhc3QtMSJIMEYCIQDyqQi2%2Fu0xqroK%2F4LnEeSI7QPn%2BClr%2BwPh1C2aYDoSbAlhAllpRARwDK6nu%2B BjcSJDZB7F7qicZT206R>
- KS Medizintechnik Handels GmbH. (kein Datum). *Medizinische Instrumente: Einweginstrumente oder Mehrweginstrumente einsetzen?* Abgerufen am 4. Juni 2023 von <https://www.ksmedizintechnik.de/medizinische-instrumente-einweginstrumente-oder-mehrweginstrumente-einsetzen/>
- Kulp, W., Greiner, W., & Graf von der Schulenburg, J. (2003). *Bewertung der Möglichkeiten und Verfahren zur Aufbereitung medizinischer Einwegprodukte*. Abgerufen am 17. November 2023 von https://portal.dimdi.de/de/hta/hta_berichte/hta032_bericht_de.pdf
- Kunststoff Information. (2024). Abgerufen am 05. August 2024 von <https://www.kiweb.de/>
- Lange, J. (2011). Grünes Ressourcenmanagement. In *Alles grün auch im Krankenhaus - Green Hospital - Wege zur effektiven Nachhaltigkeit* (S. 102-104). Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG.
- Parker, Z., Ashby, B., Tuddenham, A., & Brady, S. (kein Datum). *Designing a net zero Roadmap for Healthcare - Technical Methodology and Guidance*. Abgerufen am 16. November 2023 von <https://noharm-europe.org/sites/default/files/documents-files/7186/2022-08-HCWH-Europe-Designing-a-Net-Zero-Road-Map-for-Healthcare.pdf>
- Plasticker. (2024). *plasticker - the home of plastics*. Abgerufen am 05. August 2024 von <https://plasticker.de/preise/pms.php?show=ok&make=ok&aog=A&kat=Regranulat>
- Ramos, T., Christensen, T. B., Oturai, N., & Syberg, K. (10. Januar 2023). *Reducing plastic in the operating theatre: Towards a more circular economy for medical products and packaging*. Abgerufen am 6. Juni 2023 von https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622049538?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7d305b2e689e2c0f
- REMONDIS Medison GmbH. (kein Datum). *Hochinfektiöse Krankenhausabfälle desinfizieren. Und somit verwertbar machen*. Abgerufen am 23. Juli 2024 von <https://www.remondismedison.de/technik/verwertungsverfahren-rekomed/#c420535>
- Sastri, V. R. (2010). *Plastics in Medical Devices: Properties, Requirements and Applications*. Elsevier.
- Schmid, F., Schuhmacher, F., & Skobowsky, S. (2024). *Beatmungsbeutel: Zirkularität eines medizinischen Einwegproduktes*. Pforzheim: Hochschule Pforzheim.

- Schmitz, M., & Kopka, J.-P. (2023). Nachhaltiges und ressourcenschonendes Entsorgungsmanagement. In *Green Health - Nachhaltiges Wirtschaften im Gesundheitswesen* (S. 186-192). Berlin: Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.
- Schwarz, A., Lighthart, T., Godoi Bizarro, D., De Wild, P., Vreugdenhil, B., & van Harmelen, T. (15. Februar 2021). Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach. *Waste Management*, S. Volume 232, 331-342. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.020>
- Shen, M., Huang, W., Chen, M., Song, B., Zeng, G., & Zhang, Y. (1. Mai 2020). *(Micro)plastic crisis: Un-ignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change*. Abgerufen am 6. Juni 2023 von <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620301852?via%3Dihub>
- Siloah St. Trudpert Klinikum. (2022). *Abfallstatistik 2021*. Pforzheim: Siloah St. Trudpert Klinikum.
- Siloah St. Trudpert Klinikum. (2024). *Über uns – das Siloah St. Trudpert Klinikum*. Abgerufen am 30. Januar 2024 von <https://www.siloah.de/ueber-uns/zahlen-und-fakten/>
- Statista. (2024). *Statista*. Abgerufen am 05. August 2024 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/219745/umfrage/kosten-und-guebuehren-der-muellverbrennung-in-deutschland-nach-unternehmen/>
- Umweltbundesamt. (2018). *Bewährte Verfahren zur kommunalen Abfallbewirtschaftung - Informationen über Ansätze zur nachhaltigen Gestaltung der kommunalen Abfallbewirtschaftung und dafür geeignete Technologien und Ausrüstungen - Texte 39/2018*. Abgerufen am 28. Januar 2024 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-30_texte_39-2018-verfahren-kommunale-abfallwirtschaft_0.pdf
- VBM Medizintechnik GmbH. (2023). *Beatmungsbeutel*. Abgerufen am 24. Januar 2023 von <https://www.vbm-medical.de/produkte/airway-management/beatmungsbeutel/>
- Wintermantel, E., & Ha, S.-W. (2009). *Medizintechnik: Life Science Engineering*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.