

White Paper »ReMed«

Mit werkstofflichem Recycling zu
einer nachhaltigen Medizintechnik –
Herausforderungen und Lösungsansätze
für die Verarbeitung von Klinikabfällen

Vorwort

Krankenhäuser sind mit ca. 4,8 Millionen Tonnen Abfall jährlich der fünftgrößte Abfallproduzent in Deutschland [1]. Die Corona-Pandemie hat das Abfallaufkommen durch notwendig gewordene Schutzmaßnahmen zusätzlich erhöht [2] und eine generelle Problematik im Gesundheitswesen sichtbar gemacht. Schutzmasken, Testutensilien, aber auch Einweg-Operationskittel und Handschuhe werden zu großen Teilen nach einmaliger Benutzung weggeworfen und anschließend verbrannt. Cirka 60 Prozent aller Medizinprodukte sind als Einwegprodukte zugelassen, Tendenz steigend. Bei den Abfällen handelt es sich um potenziell kontaminierte oder sogar infektiöse Produkte, was den herkömmlichen Recyclingprozess erschwert. Gleichzeitig hat die Branche mit Personalmangel und großem Zeitdruck im klinischen Alltag zu kämpfen. Die Verantwortung sollte daher nicht auf die einzelnen Mitarbeitenden in den Krankenhäusern und Arztpraxen abgegeben werden.

Wie können diese Rohstoffe wieder sinnvoll in den Werkstoffkreislauf zurückgeführt werden und wo liegen die Potenziale im Lebenszyklus eines Medizinproduktes? Mit diesem White Paper möchten wir Antworten geben.

Die Rohstoffknappheit und auch der öffentliche Druck machen es unerlässlich, über neue Technologien und Methoden zur Rückführung der Rohstoffe in erneute Produktzyklen nachzudenken. 50 Prozent der Medizinprodukte bestehen aus Kunststoffen [3], wodurch diese den größten Anteil der Werkstoffe einnehmen. Für herkömmliche Recyclingprozesse existieren bereits Ansätze zur maschinellen Verarbeitung des Abfalls zu Kunststoffzyklaten, die dann mittels Spritzguss-Verfahren oder additiver Technologien weiterverarbeitet werden können.

In einem internen Projekt zum Thema ‚Nachhaltige Medizintechnik‘ hat das Fraunhofer IWU die Abfallentsorgung in Krankenhäusern betrachtet und bewertet. Dafür wurde zunächst eine Umfrage in sächsischen Krankenhäusern durchgeführt. Weiterhin ist dieses White Paper in Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Carl Gustav Carus an der Technischen Universität Dresden entstanden. Für die einzelnen Stakeholder konnten Potenziale im Produktlebenszyklus eines Medizinproduktes von der Herstellung bis zur finalen Entsorgung abgeleitet und der Forschungsbedarf beschrieben werden.

Bei den im White Paper beschriebenen Potenzialen (Kapitel 4 und 5) handelt es sich um Ideen, die aktuell zum Teil durch geltende Richtlinien und Vorschriften eingeschränkt werden. Die Umsetzbarkeit und Machbarkeit in dafür notwendigen, veränderten Abläufen und der Anlagentechnik muss erst noch in Pilot- oder Forschungsprojekten belegt werden, bevor diese Neuerungen tatsächlich in den Alltag integriert werden können. Dafür bedarf es dann auch einer Anpassung der Vorschriften.

Ziel ist es, dieses Wissen einer breiten Öffentlichkeit aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik zugänglich zu machen, um damit auch im Bereich der Medizintechnik Nachhaltigkeit weiter voranzutreiben.

Inhalt

1 Nachhaltigkeit	4
Begriffsdefinitionen	4
Bezug zur Medizintechnik	4
Eingrenzung	5
2 Abfallmanagement und Problemstellungen in gesundheitlichen Einrichtungen	7
Regulatorik	7
Kategorisierung der Abfälle	7
Dekontamination/Sterilisation	9
Stand in der Klinik	9
Kunststoffe in der Klinik	11
Umfrage zum klinischen Abfallaufkommen	11
3 Verfügbare Technologien für die mechanische Aufbereitung von Kunststoffen	14
Definition werkstoffliches Recycling	14
Prozess	14
Herausforderungen des Prozesses	15
Additive Fertigung und Spritzguss	15
Sortieranlagen	16
4 Potenziale für eine nachhaltige Werkstoffverwertung	17
Ansätze für Unternehmen zur Herstellung von Medizinprodukten	17
Ansätze für Krankenhäuser	18
Ansätze für Recyclingunternehmen/Entsorgungsunternehmen	18
5 Fazit/ Ausblick und Forschungsbedarf	19
Fazit	19
Forschungsbedarf und Empfehlungen	19
6 Literaturangaben	21
Impressum	23

Allgemein: Es wird von Werkstoffen gesprochen, aber im Entsorgungssystem wird von Wertstoffen gesprochen.

1 Nachhaltigkeit

Begriffsdefinitionen

Ein wichtiger Ausgangspunkt der Nachhaltigkeitsdebatte ist die 1983 gegründete Weltkommission für Umwelt und Entwicklung und der im Jahr 1987 veröffentlichte UN-Brundtland-Report, in dem erstmals das Konzept einer nachhaltigen Entwicklung beschrieben wurde.

»Sustainable development meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.« [4]

Nachhaltige Entwicklung bedeutet demnach, den Bedürfnissen der heutigen Generation zu entsprechen, ohne die zukünftigen Generationen und deren Bedürfnisse zu gefährden. Es sollen beständige und weltweit umsetzbare Lebens- und Wirtschaftsformen erreicht werden. [5]

Im Lauf der Zeit wurden diverse Konzepte und Modelle der Nachhaltigkeit erarbeitet. Das wohl bekannteste ist das Drei-Säulen-Modell, in dem ökologische, ökonomische und soziale Aspekte gleichwertig für eine nachhaltige Entwicklung berücksichtigt werden sollten. Anfänglich wurden diese

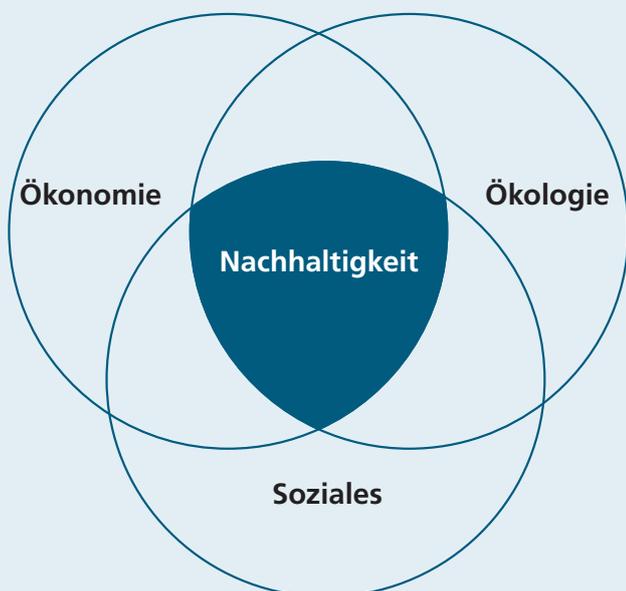
Säulen relativ isoliert betrachtet. Da sich diese Aspekte jedoch gegenseitig bedingen, hat sich daraus ein integratives Schnittmengen-Modell entwickelt. Es visualisiert die gegenseitigen Abhängigkeiten und Verbindungen. Die Schnittmenge der drei Säulen ergibt die nachhaltige Entwicklung. Dieses Modell wird unter anderem dafür kritisiert, dass Ökologie, Ökonomie und Soziales gleichwertig nebeneinandergestellt werden, obwohl die ökologische Säule die natürlichen Ressourcen beinhaltet und damit die Grundlage für die anderen beiden darstellt. [6]

Unter ökologischer Nachhaltigkeit wird der rücksichtsvolle Umgang mit den natürlichen Ressourcen verstanden, das bedeutet beispielsweise so zu wirtschaften, dass Rohstoffe nachwachsen können. [7]

Ökonomische Nachhaltigkeit beschreibt das Erwirtschaften von Gewinn, ohne Rohstoffe oder Waren (Ressourcen) langfristig zu schädigen. Die Profite stehen allerdings nicht im Mittelpunkt. [8]

Soziale Nachhaltigkeit adressiert die Grundbedürfnisse nach inter- und intragenerationaler Gleichberechtigung und versucht Verhaltensmuster zu ändern, um bspw. die ökologische Nachhaltigkeit anzutreiben. [9]

Abbildung 1: Drei-Säulen-Modell aus [1]



Bezug zur Medizintechnik

Mit der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung wurde 2015 von allen UN-Mitgliedstaaten ein Dekret verabschiedet, das mithilfe von 17 SDGs (Sustainable Development Goals) klare Ziele und Indikatoren formuliert, die bis zum Jahr 2030 erreicht werden sollen [10]. Darin sind auch das nachhaltige Management und eine effiziente industrielle Materialnutzung verankert.

Der Gesundheitssektor ist in Deutschland für 5,2 Prozent der Treibhausgasemissionen verantwortlich, wobei 66 Prozent davon allein durch den Einkauf von Waren und Dienstleistungen der Branche entstehen [1, 11]. Bereits 2017 ermittelte das statistische Bundesamt ein Abfallaufkommen in Kliniken von 4,8 Millionen Tonnen [12], das mit der Corona-Pandemie noch einmal drastisch gestiegen ist. Ein Faktor, der zu den hohen Emissionen im Einkauf und dem vermehrten Abfallaufkommen beiträgt, ist der Einsatz von Einwegprodukten (Einmalprodukten). Diese wurden in den 1970er Jahren erstmals bewusst eingesetzt [13] und sind mittlerweile ein unverzichtbarer Standard in medizinischen Einrichtungen. Gründe hierfür sind die hohe qualitative Absicherung, die hygienische Sicherheit, der geringere Arbeitsaufwand im klinischen Bereich durch die

ausbleibende Sterilisation bzw. Aufbereitung und der wirtschaftliche Umsatz durch den kontinuierlichen Verkauf der Einwegprodukte [14]. Aufgrund der gesetzlichen Vorgaben für die Entsorgung von medizinischen Abfällen – in Kombination mit dem Arbeitsschutz – müssen diese Abfälle in reißfesten, feuchtigkeitsbeständigen und dichten Behältnissen gesammelt werden. Die Abfälle dürfen nicht umgefüllt oder sortiert werden. Dies bedeutet, anschließend werden die Abfälle unsortiert thermisch verwertet (= verbrannt).

Dies widerspricht allerdings den Forderungen nach einer zirkulären Wirtschaft und einem nachhaltigen Ressourcenmanagement, was auch für den Gesundheitssektor bis 2030 und darüber hinaus vermehrt gefordert wird.

Eingrenzung

Im Projekt ‚Nachhaltige Medizintechnik‘ am Fraunhofer IWU werden vorrangig die Abläufe zur Entsorgung und das Aufkommen von Abfällen in Kliniken betrachtet. Diese Abläufe vereinen in der Regel verschiedene medizinische Spezialisierungsrichtungen und bilden mit ihren unterschiedlichen Abteilungen und Stationen ein breites Spektrum an Verbrauchsgütern und -produkten ab. Das Abfallaufkommen besteht sowohl aus medizinischen als auch aus den sogenannten Siedlungsabfällen. Untersuchungen bezüglich der Zusammensetzung von medizinischen Abfällen variieren stark, da zum einen unterschiedliche Definitionen medizinischen Abfalls (kontaminiert, infektiös, etc.) bestehen, aber auch der Ort in Bezug auf den jeweiligen Staat und die medizinische Spezialisierung der untersuchten Einrichtung Einfluss auf die Ergebnisse haben. Laut Untersuchungen in den USA entspricht der Gewichtsanteil der Kunststoffabfälle in Kliniken etwa 25 Prozent des Gesamt-Abfallaufkommens [15]. Vergleichbare Werte liefert eine Studie aus Australien, die den Abfall einer Intensivstation untersucht hat und deren Aussage zufolge etwa 30 Prozent des Abfalls aus recycelbaren Abfällen (enthält neben Kunststoff auch Papier und Pappe) besteht [16]. Dabei ist zu beachten, dass das Abfallaufkommen pro Tag in Ländern mit hohem Einkommen etwa doppelt so hoch ist wie in Entwicklungsländern [17]. Dies ist unter anderem mit einem höheren Verbrauch von Einwegmedizinprodukten zu begründen.

Die Statistik in Abbildung 2 oben zeigt den kontinuierlichen Anstieg der Rohstoffnachfrage für medizinische Einwegprodukte seit 2005 und eine Prognose bis 2025. Kunststoffe bilden hier den größten Anteil für medizinische Einwegprodukte.

Die Statistik in Abbildung 2 unten schlüsselt die Gruppen der Einwegprodukte und deren Nachfrage auf, wobei die chirurgischen Instrumente, Infusions-/Injektionsgeräte und Diagnostik- bzw. Labormaterialien die drei Gruppen mit der höchsten Nachfrage abbilden.

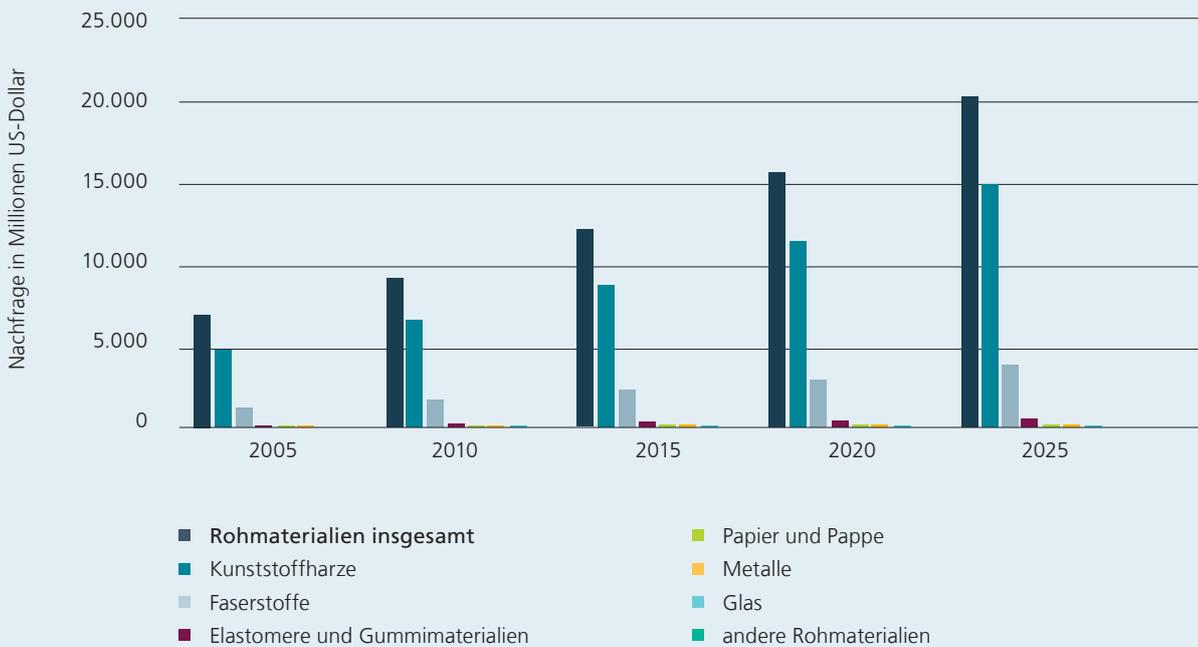
Zielsetzung des White Papers »ReMed«

Zielsetzung dieses White Papers ist, die Herausforderungen bei der Überführung von Kunststoffen aus der Medizintechnik-Branche in den Recyclingkreislauf zu erkennen und Potenziale für Kliniken, Medizinproduktehersteller und Recyclingunternehmen abzuleiten. Dies soll anhand der folgenden zwei Thesen geprüft werden:

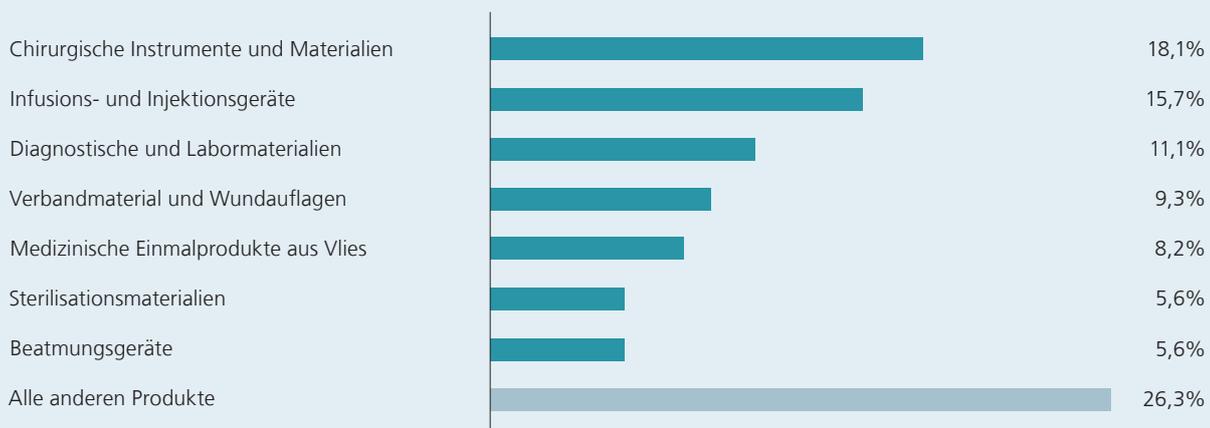
- Eine Teilmenge des Abfallaufkommens aus Kliniken kann zu (Misch-)Rezyklaten verarbeitet werden, die wiederum in Prozesse wie den Spritzguss oder die additive Fertigung zur Herstellung neuer Medizinprodukte zugeführt werden können.
- Das Recycling von Kunststoffen aus Kliniken erfolgt nicht, da die Abfälle potenziell infektiös sind und daher die gesundheitliche Gefährdung während der Verarbeitung zu Rezyklaten zu groß ist.

Abbildung 2: Rohstoffnachfrage [18] und Produktgruppen [19] für medizinische Einwegprodukte

Weltweite Nachfrage ausgewählter Rohmaterialien für medizinische Einmalprodukte in den Jahren 2005 bis 2025
(in Millionen US-Dollar) (Quelle: Freedonia ©Statista 2022)



Verteilung der weltweiten Nachfrage nach medizinischen Einmalprodukten nach Produktgruppe im Jahr 2015
(Quelle: Freedonia ©Statista 2022)



2 Abfallmanagement und Problemstellungen in gesundheitlichen Einrichtungen

Regulatorik

Werkstoffe für Medizinprodukte unterliegen strengen regulatorischen Anforderungen. Ihre chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften müssen die grundlegenden Sicherheits- und Leistungsanforderungen des Anhang 1 der Medizinprodukteverordnung (Verordnung (EU) 2017/745 MDR) erfüllen. Dabei spielen die Sicherheit, Verträglichkeit, Kompatibilität und mechanische Stabilität der Werkstoffe eine wichtige Rolle, um die Sicherheit für Patienten, Anwender und Dritte bei bestimmungsgemäßer Verwendung zu gewährleisten. Unter dem Abschnitt ‚10. Chemische, physikalische und biologische Eigenschaften‘ sind die spezifischen Anforderungen für die in Medizinprodukten eingesetzten Werkstoffe und Stoffe beschrieben. Zusätzlich sind aber auch andere Anforderungen aus weiterer EU-Gesetzgebung zu beachten. Dazu zählen z. B. die EU-Chemikalienverordnung (EG) 1907/2006 (REACH), die Richtlinie 2011/65/EU (RoHS 2) zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten und die Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle. Der Hersteller muss die Einhaltung dieser Anforderungen für sein Produkt in einem Konformitätsnachweis bestätigen, um ein Zertifikat für sein Produkt zu erhalten. Änderungen an bestehenden Produkten und/oder der Verpackung sind laut Verordnung Designänderungen, die eine Neuzertifizierung ggf. durch eine benannte Stelle erforderlich machen.

Jedes in Medizinprodukten eingesetzte Material muss hinsichtlich der Verträglichkeit mit dem Körper bewertet werden. Dazu legt die Normenreihe EN ISO 10993 Anforderungen und Prüfmethoden zur biologischen Beurteilung von Medizinprodukten in Abhängigkeit von der Klassifizierung und Anwendung des Produkts fest.

Auch für recycelte Kunststoffe, die in Medizinprodukten verwendet werden sollen, ist ein Biokompatibilitätsnachweis laut Medizinprodukteverordnung notwendig. Bei externen Werkstoffkreisläufen fehlt dieser Nachweis oftmals, wodurch ein aufwendiges Genehmigungsverfahren für die Eignung für Medizinprodukte notwendig wird. Der Prozess ist zeitintensiv und bedeutet einen hohen finanziellen Aufwand. Anders ist dies bei abgeschlossenen internen Recyclingkreisläufen. Durch eine klare Trennung, Kennzeichnung und Verfolgung der Produktionsabfälle inklusive einer dazugehörigen Überwachung und Dokumentation können diese wieder der Produktion zugeführt werden.

Kategorisierung der Abfälle

Laut der Weltgesundheitsorganisation (WHO) kann der Abfall im Gesundheitswesen in ‚non hazardous waste‘ (75 – 90%) und ‚hazardous waste‘ (10 – 25%) unterteilt werden, wobei es beim kontaminierten Abfall nochmal sechs weitere Unterkategorien gibt (infectious waste, sharps waste, pathological waste, pharmaceutical waste, cytotoxic waste, chemical waste, radioactive waste). [20]

Die Abfälle in deutschen Kliniken werden nach den vorgeschriebenen Abfallschlüsselnummern des europäischen Abfallverzeichnisses (AVV) eingeteilt – gesetzliche Grundlage ist die Abfallrahmenrichtlinie (EU). Als Vollzugshilfe gibt es die LAGA-Mitteilung 18 zum Thema ‚Einstufung und Entsorgung von Abfällen aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes‘.

Auszug aus LAGA 18 [22]

»Abfälle nach AS 18 01 04 sind getrennt von gemischten Siedlungsabfällen zu halten und in dafür zugelassenen Anlagen zu entsorgen. Aus Gründen des Arbeitsschutzes sind diese Abfälle ohne jegliche außerbetriebliche Vorbehandlung (Sortierung, Siebung, Zerkleinerung, usw.) der thermischen Behandlung zuzuführen. Bei gemeinsamer Entsorgung mit gemischten Siedlungsabfällen ist der AS 18 01 04 zu verwenden. Eine Sortierung oder stoffliche Verwertung von Abfällen des AS 18 01 04 ist unter hygienischen Gesichtspunkten grundsätzlich zu untersagen. Eine Ausnahme wäre allenfalls möglich, wenn die zuständige Behörde ausdrücklich bestätigt, dass die Anforderungen des Arbeitsschutzes beachtet werden und allen mit Blut und menschlichen Ausscheidungen verbundenen Gesundheitsrisiken Rechnung getragen wird.«

Tabelle 1: Vergleich der ehemaligen LAGA-Abfallgruppen und des gültigen AVV-Abfallschlüssels

Bezeichnung der Abfallkategorien (Buchstabe: ALT)	Seit 2002 Bezeichnung der Abfallkategorien Abfallschlüsselnummern nach AVV
A Wertstoffe, haushaltsübliche Abfälle, Siedlungsabfall	150101 Papier und Pappe
	150102 Kunststoff
	150103 Holz
	150104 Metall
	150105 Verbundverpackungen
	150106 Gemischte Verpackungen
	150107 Verpackungen aus Glas
	200102 Glas
	200108 Küchen- und Kantinenabfälle
	200301 Gemischte Siedlungsabfälle
B Krankenhausabfall	180101 Spitze und scharfe Gegenstände
	180201 Spitze und scharfe Gegenstände, Veterinärmedizin
	180104 Abfälle, ohne infektiöse Anforderungen
C Infektiöser Abfall nach Infektionsschutzgesetz	180203 Abfälle, ohne infektiöse Anforderungen, Veterinärmedizin
	180103* Abfälle, mit besonderen infektiösen Anforderungen
D Sonderabfall	180202* Abfälle, mit besonderen infektiösen Anforderungen, Veterinärmedizin
	180106* Chemikalien (gefährliche Stoffe)
	180107 Chemikalien ohne gefährliche Inhaltsstoffe
	180108* Zytotoxische und zytostatische Arzneimittel
	180109 Arzneimittel
	180110* Amalgamabfälle
	180205* Chemikalien (gefährliche Stoffe), Veterinärmedizin
	180206 Chemikalien ohne gefährliche Inhaltsstoffe, Veterinärmedizin
	180207* Zytotoxische und zytostatische Arzneimittel, Veterinärmedizin
180208 Arzneimittel, Veterinärmedizin	
E Ethischer Abfall	180102 Körperteile und Organe, einschließlich Blutbeutel und Blutkonserven

Die bereits 2002 abgelaufene Gruppierung der LAGA (Länderarbeitsgemeinschaft Abfall) besteht aus fünf Kategorien, die mit Buchstaben bezeichnet sind. In der Tabelle 1 sind diesen Kategorien in der ersten Spalte Bezeichnungen zugeordnet. Diesen werden in der zweiten Spalte die aktuellen Abfallschlüsselnummern der Abfallverzeichnisverordnung gegenübergestellt.

Die Zuordnung nach dem AVV-Schlüssel ist deutlich detaillierter, aber nicht sonderlich einprägsam. Obwohl nicht alle Abfallkategorien in einem humanmedizinischen Krankenhaus anfallen, ist die Anzahl der Gruppen zu hoch, um jedem Schlüssel einen Abfallbehälter zuzuordnen. Der logistische und zeitliche Aufwand übersteigt die Kapazitäten der Krankenhäuser, sodass die ursprüngliche LAGA-Einteilung teilweise weiter als Grundbaustein für die Abfalltrennung verwendet wird und in Abhängigkeit der medizinischen Spezialisierung und Station vereinzelte

Abfallkategorien separat gesammelt werden (bspw. 180108 Zytotoxische und zytostatische Arzneimittel).

Zum einfachen Verständnis wird im laufenden Text, wie auch in einigen Gesundheitseinrichtungen zur besseren Handhabung, vorrangig die alte Gruppierung der Abfälle von A bis E verwendet. Die Abfallklassen C bis E der abgelaufenen LAGA-Verordnung vereinen vorwiegend Abfälle mit einem erhöhten Sicherheitsrisiko (in der Tabelle mit * versehen), da beispielsweise infektiöser Abfall oder Chemikalien darunter zusammengefasst werden. In der LAGA 18 heißt es z. B., dass infektiöse Abfälle »unmittelbar am Ort ihres Anfallens in geeigneten, reißfesten, feuchtigkeitsbeständigen und dichten Behältnissen (bauartgeprüfte Gefahrgutverpackungen) zu sammeln sind.« In der Regel muss dieser Abfall sterilisiert werden, bevor er unsortiert verbrannt wird.

Die Abfallklasse B (Krankenhausabfall) beschreibt kontaminierten, aber nicht infektiösen Abfall und stellt aus infektionspräventiver Sicht ein deutlich geringeres Sicherheitsrisiko dar als die Klassen C bis E. Da es sich dennoch um kontaminiertes Material handelt, findet auch hier keine Trennung nach Werkstoffen statt. Dieser Abfall wird verbrannt. Rund 90 Prozent des medizinischen Abfalls in Krankenhäusern fallen in die Abfallklasse B, was etwa 309 000 Tonnen jährlich entspricht. [21]

Die Abfallklasse A entspricht dem sogenannten Siedlungsabfall und unterliegt keinen gesonderten Vorgaben zur Verwahrung und dem Transport. Die Abfälle werden nach den bekannten Werkstoffgruppen sortiert und getrennt weiterverarbeitet.

Dekontamination / Sterilisation

Seitens der WHO bzw. dem Basler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung werden verschiedene Methoden zur Behandlung gefährlichen Abfalls empfohlen. Darunter fallen Technologien zur Dekontamination von infektiösen Abfällen mittels Dampf bzw. andere desinfizierende Behandlungsmethoden. Folgende Dampfbehandlungsmethoden können durchgeführt werden:

■ Autoklavieren

Der Abfall wird unter Druck bei 121°C bis 134°C dekontaminiert. Dabei wird die entstehende Abluft abgesaugt und gefiltert (HEPA-Filter). Der Abfall kann zusätzlich während des Prozesses zerkleinert werden.

■ Mikrowelle

Der aufkommende Abfall wird im ersten Schritt geschreddert, und diese Abfallpartikel werden in einer Förderschnecke Dampf ausgesetzt, der mittels Mikrowellen auf 100°C erhitzt wird. Die Luft wird ebenfalls mittels HEPA-Filter gereinigt.

■ Mechanische Wärmebehandlung

Durch Zerkleinerung und die dabei entstehende Reibung mittels Hochgeschwindigkeitsrotoren wird der Abfall in einer feuchten Umgebung auf bis zu 150°C erhitzt, bis die gesamte Flüssigkeit verdampft ist.

Alle Dampfbehandlungsmethoden können zusätzlich noch mit Zerkleinerungsmethoden kombiniert werden, was zum Teil die Wärmeübertragungsrates sowie die Zugänglichkeit und damit die Dekontamination verbessern kann. Die mechanischen Methoden sollten nicht vor der Desinfektion von spitzen Gegenständen oder für infektiöse Abfälle durchgeführt werden, außer es handelt sich um ein in sich geschlossenes System und die Luft wird vor der Abgabe an die Umwelt desinfiziert.

Weiterhin gibt es automatisierte chemische Behandlungsmethoden, die Desinfektionsmittel zur Dekontamination verwenden. Zu beachten ist allerdings, dass diese Verfahren giftige Abwässer erzeugen. Der Abfall kann mittels Ozon desinfiziert oder einer alkalischen Hydrolyse unterzogen werden. Hier kommen Natrium- und Alkalihydroxid unter hohen Temperaturen und Druck zum Einsatz, welche menschliches oder tierisches Gewebe, Formaldehyd und Chemikalien zerstören können.

Bei der Verbrennung von Abfällen nach dem Standardvorgehen für die Verwertung von Abfällen aus dem Krankenhaus entstehen Dioxine und Furane, die hochgiftig sind und u. a. das Immunsystem schädigen, Hormone beeinträchtigen und Krebs verursachen. Die beiden Giftstoffe entstehen beispielsweise bei der Verbrennung des Kunststoffes PVC, der z. B. in Handschuhen oder Blutbeuteln zum Einsatz kommt. [20]

Stand in der Klinik

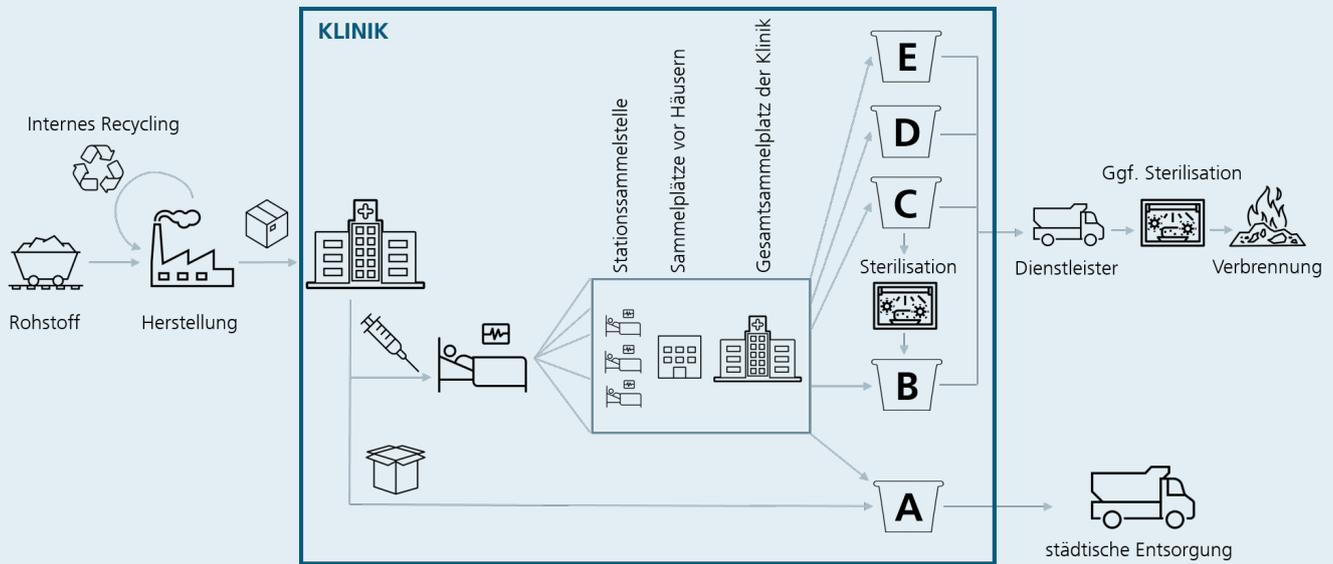
Das Universitätsklinikum Dresden vereint 26 Kliniken und Polikliniken, sechs Institute und 17 interdisziplinäre Zentren und ist mit 1 410 Betten und 6 546 Mitarbeitenden eine der größten Kliniken Sachsens [23]. Mit der Initiative Carus Green möchte das Klinikum einen umweltschonenden und ressourceneffizienten Betrieb vorantreiben.

In der Abbildung 3 ist schematisch die Abfallsammlung und Entsorgung am Uniklinikum Dresden dargestellt. Die bestellte Ware wird zunächst nach der Anlieferung zu den entsprechenden Stationen gebracht. Der anfallende Verpackungs- und Transportabfall wird nach den bekannten Werkstoffgruppen (Restmüll, Grüner Punkt, Papier, Glas und Biomüll) getrennt.

Die benutzte Ware wird zunächst in Abfallsammelbehältern gesammelt und in Entsorgungsräumen zusammengetragen. Dabei richten sich die zur Verfügung stehenden Abfallbehälter nach den medizinischen Spezialisierungen der Stationen. Die verschiedenen Abfallsammelbehälter auf den Stationen werden einerseits an den Wertstoffsammelplätzen vor den Häusern gesammelt, bevor sie zu einem der Recyclingsammelplätze des Klinikums gebracht werden. Hier werden einige Abfälle in Presscontainern komprimiert, bevor sie durch zertifizierte Entsorgungsfirmen abgeholt werden. Andererseits werden Behälter in den Entsorgungsräumen o. ä. gesammelt und von zertifizierten Entsorgungsunternehmen abgeholt. Aus Bereichen der Forschung müssen die Abfälle laut Gesetzesvorgaben wie der Gentechnik-Sicherheitsverordnung vor der Abholung im Bereich inaktiviert werden.

Die Abfallsammelbehälter der verschiedenen Klassen werden mithilfe eines Farbsystems und der entsprechenden Beschriftungen der Abfallschlüsselnummern gekennzeichnet. Das Farbsystem soll die Zuordnung des Abfalls zwischen den

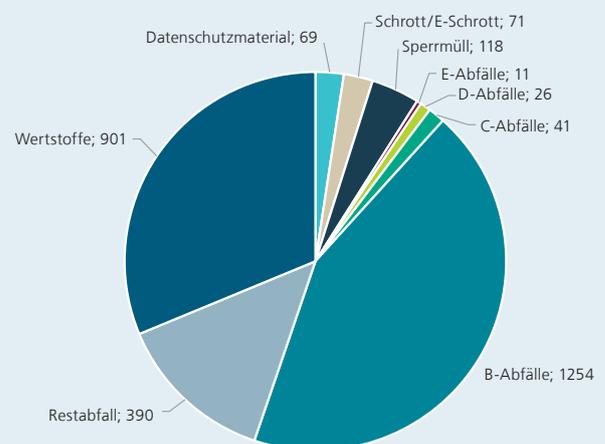
Abbildung 3: Übersicht über die Abfallsammlung am Uniklinikum Dresden



verschiedenen Sammelstellen erleichtern. Zudem befinden sich in den Entsorgungsräumen genaue Beschreibungen der Abfallschlüssel und Beispiele für die Zuordnung von verschiedenen Produkten und Werkstoffen. Zusätzlich gibt es neben einer Schulung für neue Mitarbeitende regelmäßige Auffrischungsangebote und einen dauerhaft zugänglichen Ratgeber für die Abfalltrennung. Dennoch kommt es aufgrund von Zeitmangel und Unsicherheiten zu fehlerhaften Zuordnungen. So werden beispielsweise nicht kontaminierte Abfälle eher der Abfallgruppe B zugeschrieben und kontaminierte, nicht infektiöse Abfälle in die Behälter der Gruppe C eingeordnet.

Das Abfallaufkommen der Gruppe B bildet die größte Menge der medizinischen Abfälle [21], wie auch die interne Abfallstatistik des Uniklinikum Dresden im Jahr 2021 bestätigt (s. Abbildung 4). Laut Umweltbundesamt kann nicht infektiöser Abfall mit entsprechender Sorgfalt gemeinsam mit Siedlungsabfällen entsorgt oder verwertet werden [24]. Dies würde zusätzlich personellen und organisatorischen Aufwand erfordern, der im Betrieb eines Krankenhauses in der Regel nicht abgedeckt werden kann. Aufgrund der potenziellen Kontamination können diese nicht ohne eine vorherige Dekontamination nach Werkstoffen getrennt und verwertet werden, weshalb sie häufig unsortiert thermisch verwertet (verbrannt) werden. Hier besteht ein sehr großes Potenzial wiederverwertbarer Rohstoffe, die einem alternativen Werkstoffkreislauf zugeführt werden könnten.

Abbildung 4: Darstellung zur Zusammensetzung der Abfallmengen in Tonnen im Jahr 2021 am Uniklinikum in Dresden (Quelle: interner Umweltbericht)



Kunststoffe in der Klinik

Einwegprodukte in der Medizintechnik werden zu 70 Prozent aus Standardkunststoffen wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS) oder Polyvinylchlorid (PVC) hergestellt. Bei 20 Prozent der Produkte handelt es sich um technische Kunststoffe wie Polyamide (PA), Polyester oder zum Beispiel Polycarbonate (PC). Lediglich bei 10 Prozent kommen thermische Kunststoffe zum Einsatz, z. B. für High-End-Produkte wie Dentalimplantate. [17]

Joseph et al. gaben an, dass unter anderem Schläuche, Folien und Katheter aus Standardkunststoffen bestehen, Blutkonserven, Spritzen, chirurgische Instrumente aus technischen Kunststoffen und Implantate sowie Kanülen aus thermischen Kunststoffen hergestellt werden. Je nach Produkt und Hersteller variieren die eingesetzten Kunststoffe. [25]

Ivanović et al. führten in einer Studie in den Jahren 2018 und 2019 eine Materialflussanalyse von Einwegkunststoffen und deren Verpackungen in einem Klinikum in Halle durch. Im Schnitt kommen pro Patient*in täglich 531g Polymere zum Einsatz, was ca. 86 Prozent aller eingesetzten medizinischen Verbrauchsartikel entspricht. Zusätzlich fallen 16g Plastikverpackungen täglich pro Patient*in an. 45 Prozent der eingesetzten Polymere sind aus Polypropylen (PP), wobei diese vor allem für die persönliche Schutzausrüstung eingesetzt werden (83 Prozent Vliesstoffe, 17 Prozent Hartplastik). An zweiter Stelle mit 25 Prozent stehen Produkte aus Latex, z. B. Handschuhe. [26]

Umfrage zum klinischen Abfallaufkommen

Im Rahmen einer Umfrage, durchgeführt vom Fraunhofer IWU, wurden Kliniken in Sachsen nach ihrem Umgang mit medizinischen Abfällen befragt. Ziel der Umfrage war es, den Entsorgungsprozess von Abfällen in Kliniken besser zu verstehen und durch eine Selbsteinschätzung die Herausforderungen, aber auch Potenziale für ein Recycling von Kunststoffen herauszuarbeiten. Außerdem erhielten unsere Forschenden Einblick in erste Programme der Häuser für einen nachhaltigeren Klinikalltag.

Es wurden 77 Kliniken zunächst per E-Mail und anschließend telefonisch kontaktiert, 27 Kliniken nahmen an der Umfrage teil. 21 Kliniken sagten eine Teilnahme an der Umfrage aus verschiedenen Gründen ab, und neun Kliniken gaben keine Rückmeldung. Die Fragebögen wurden an Umwelt- und Abfallbeauftragte oder Mitarbeitende mit einem ähnlichen Zuständigkeitsbereich adressiert. Die Umfrage wurde online durchgeführt und die Daten anonym erhoben und gespeichert. Von den 27 eingegangenen Umfragebögen wurden drei von der Auswertung ausgeschlossen, da die Angaben unvollständig waren (enthielten lediglich allgemeine Angaben zur Klinik) und damit keine Auswertung der relevanten Daten möglich war.

Der Fragebogen ist in vier Themen untergliedert. Im ersten Themenbereich wurden zunächst allgemeine Informationen der Kliniken wie die Bettenzahl, die Zahl der Mitarbeitenden und die medizinischen Fachrichtungen erfragt. Der zweite Bereich betrifft das Umweltmanagement. Darunter zählen

Tabelle 2: Übersicht der Kunststoffe und Medizinprodukte aus der klinischen Anwendung [17, 25]

	Gebrauchskunststoffe	Technische Kunststoffe	Hochtemperaturkunststoffe
Anteil	70%	20%	10%
Kunststoffe	Polyethylen Polystyrol Polyvinylchlorid Polypropylen	Polyamid Polyester Polycarbonat Polyurethan Acryl Acetal Polymer	Polyimid Polyetherimide Polyphenylensulfid Polyetheretherketon Polysulfone
Medizinprodukte	Schläuche Infusionsbeutel Gehäuse Masken Verbindungselemente Spritzen Nahtmaterial Verpackungen Laborware	Chirurgische Instrumente Infusionszubehör für Blut Schalen Spritzen Luer Adapter Katheter	Chirurgische Instrumente Chirurgische Tablettens Hoch präzise Komponenten elektronische Komponenten Implantate Bioresorbierbares Nahtmaterial

Angaben zu bestehenden Zertifizierungen (bspw. EMAS Zertifikat) und beauftragte Strukturen und Personen, die sich mit dem Umweltmanagement der Klinik befassen. Neben den beauftragten Abteilungen wurde auch nach Eigeninitiativen in Form von Gruppen und Maßnahmen aus der Belegschaft und deren Themen gefragt um abzubilden, inwieweit Kliniken und deren Personal eine intrinsische Motivation für die Gestaltung einer nachhaltigeren Arbeitsweise im klinischen Alltag besitzen. Der dritte Themenblock befasst sich mit dem Abfallmanagement. Neben der Kategorisierung des Abfalls wurden auch interne Hilfs- und Schulungssysteme und eine Einschätzung zu Problemen bei der Abfalltrennung und deren Ursachen abgefragt. Der abschließende Themenblock befasst sich mit dem Abfallaufkommen und den Kunststoffanteilen des Abfalls, wobei nur wenige Kliniken eine differenzierte Erfassung der Abfälle angeben konnten.

Auswertung der Umfrage

62,5 Prozent der 24 betrachteten Kliniken beschäftigen mehr als 500 Mitarbeitende, wobei 58,3 Prozent der Kliniken 250 und mehr Betten in ihrer Einrichtung zur Verfügung stellen. Die Fachbereiche der Kliniken bilden ein weites Feld von Psychiatrischen Einrichtungen bis zur Inneren Medizin ab, wobei 54 Prozent angaben, einen chirurgischen Fachbereich abzudecken.

Die befragten Personen wurden gebeten anzugeben, ob ihre Einrichtung eine Abteilung oder Gruppe hat, die sich mit Umweltaspekten bzw. dem Thema Nachhaltigkeit beschäftigt, und ob es eine beauftragte Person für Umweltfragen gibt. 58,3 Prozent konnten diese Frage mit ‚Ja‘ beantworten, wobei kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Anzahl der Mitarbeitenden oder der Bettenzahl gefunden werden konnte. Ab dem Berichtsjahr 2023 sind laut europäischer Kommission alle Unternehmen mit mehr als 250 Mitarbeitenden und/oder einem Umsatz von über 40 Millionen Euro € und/oder einer Bilanzsumme von 20 Millionen Euro dazu verpflichtet, einen Nachhaltigkeitsbericht zu verfassen. Es ist davon auszugehen, dass bis dahin alle von der Regelung betroffenen Kliniken eine beauftragte Person im Bereich der Nachhaltigkeit einstellen werden. Aktuell ist die Erstellung eines Berichtes freiwillig. Initiativen wie Carus Green oder Green Hospital tragen dazu bei, mögliche Maßnahmen für einen nachhaltigeren Klinikbetrieb aufzuzeigen. Diese Initiativen haben sich bereits vor der Festlegung der politischen Zielstellungen für die Branche gebildet und zeigen die intrinsische Motivation der klinischen Einrichtungen. Neben den beauftragten Gruppen wurde auch nach Initiativen der Mitarbeitenden in den Kliniken gefragt. 30 Prozent gaben an, dass es keine Initiativen gibt, und weitere etwa 30 Prozent der Befragten wissen es nicht. 41 Prozent gaben allerdings an, dass es Initiativen gibt. In sieben von neun Fällen bestehen die Initiativen ergänzend zu einer beauftragten Gruppe oder Person zum Thema Nachhaltigkeit. Die beherrschenden Themen sind die Entsorgung und Trennung von Abfällen und Maßnahmen zur Energieeinsparung.

Im Bereich der Abfalltrennung wurden die teilnehmenden Kliniken zunächst gefragt, welche Kategorisierung der Abfälle als Vorlage für die Abfalltrennung im klinischen Alltag genutzt wird. Der überwiegende Anteil der Kliniken (83,3 Prozent) wendet die geltende Kategorisierung nach AVV mit den entsprechenden Abfallschlüsseln an. Fünf Kliniken gaben an, weiterhin die abgelaufene Kategorisierung nach LAGA für die Einteilung der Abfallbehälter zu nutzen. Diese ist mit fünf Abfallkategorien deutlich übersichtlicher als die neue AVV-Regelung, welche 25 Abfallkategorien vorgibt. Eine Klinik gab an, sowohl das alte LAGA-System als auch die neue AVV-Kategorisierung zu verwenden. 14 der 24 befragten Kliniken beschriften die Abfallbehälter mit den geltenden Abfallschlüsseln der AVV, darunter auch vier Kliniken, die eine Abfalltrennung nach der abgelaufenen LAGA-Verordnung vornehmen. 18 Kliniken nutzen eine alternative Kennzeichnung, wobei alle ein Farbsystem für die Zuordnung der Abfallbehälter anwenden. Die Zuordnung der Farben zu den entsprechenden Abfallgruppen variiert allerdings zwischen den Einrichtungen. Einige gaben an, dass die farbliche Codierung von den Entsorgungsunternehmen vorgegeben wird. Es ist aber davon auszugehen, dass die meisten Kliniken eine interne Zuordnung der Farben vornehmen. Ein Einrichtungswechsel des Personals birgt, aufgrund der verschiedenen Systeme der Abfalltrennung, ein hohes Risiko von fehlerhaften Abfallzuordnungen, da bestehende Routinen angepasst werden müssen. Entsprechende Schulungen und Anweisungen zur Abfalltrennung können dabei zur Fehlervermeidung beitragen. In Abbildung 5 ist das Ergebnis zur Befragung nach verschiedenen Formen der Anweisung zur Trennung des Abfalls dargestellt. Zwei der 24 Kliniken gaben an, keine zusätzlichen Anweisungen zu den Kennzeichnungen der Abfallbehälter zu verwenden. 18 der verbleibenden 22 Kliniken nutzen schriftliche Aushänge oder Aushänge, die sowohl Text als auch Bilder enthalten, wobei 10 dieser 18 Einrichtungen Aushänge mit Bildern verwenden. Zehn Kliniken gaben an, die Anweisungen in Form von Aufdrucken auf den Abfallbehältern vorzunehmen. Nur sechs Kliniken führen eine einmalige Einweisung zur Abfalltrennung durch. Aufgrund der geringen Anzahl ist davon auszugehen, dass die Einweisung während der Einarbeitung durch Kolleg*innen und Vorgesetzte nicht als ‚einmalige Einweisung‘ verstanden wurde. Insgesamt sieben Kliniken verfügen über einen Katalog mit ausführlicher Beschreibung oder haben entsprechende Anweisungen zur Abfalltrennung in Verordnungen wie der Hausordnung oder Hygieneordnung dokumentiert.

Dennoch kommt es im Klinikalltag zu fehlerhaften Zuordnungen des Abfalls. Die Befragten wurden gebeten, eine Einschätzung dieser Fehlerquote abzugeben. 45,8 Prozent gehen von einer prozentualen Fehlerquote zwischen 5 – 25 Prozent aus und nochmal etwa 30 Prozent schätzen, dass weniger als 5 Prozent des Abfalls falsch zugeordnet werden. Die restlichen 25 Prozent haben keine Angabe gemacht oder die Frage nicht beantwortet. Trotz der niedrigen Schätzwerte der Fehlerquote gaben 12 der

24 Befragten an, dass sie schon einmal die Zuordnung von Abfall in eine höherklassige Kontaminationsstufe beobachtet haben. Hier ist davon auszugehen, dass aus Unsicherheit eher eine höherklassige Kontaminationsstufe gewählt wird, um eine mögliche Kontamination zu vermeiden und das damit einhergehende gesundheitliche Risiko zu reduzieren. Zudem werden kontaminierte und infektiöse Abfälle nicht nach der Materialklasse getrennt. Die möglichen Ursachen für eine fehlerhafte Abfalltrennung sind in Abbildung 6 dargestellt. Die Befragten gaben an, dass Zeitmangel, Materialmischungen innerhalb eines Produktes und Unwissenheit zu den häufigsten Gründen für Fehler bei der Abfalltrennung zählen. Aufgrund des Personalmangels im Gesundheitswesen liegt der Fokus auf der Behandlung und Versorgung von Patient*innen; Arbeitsschritte wie die Abfalltrennung können dabei in zeitkritischen

Abbildung 5: Darstellung der Anweisungsformen für die Abfalltrennung (Mehrfachnennungen möglich)

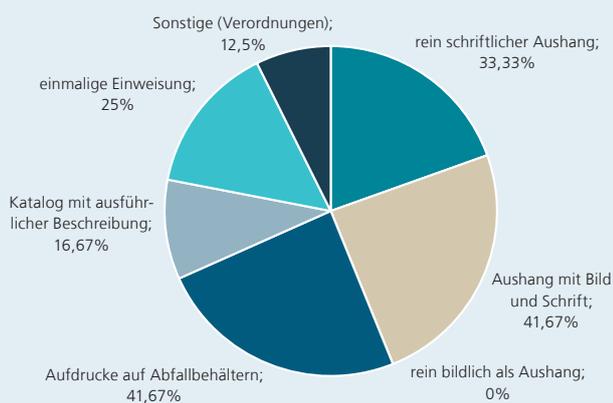
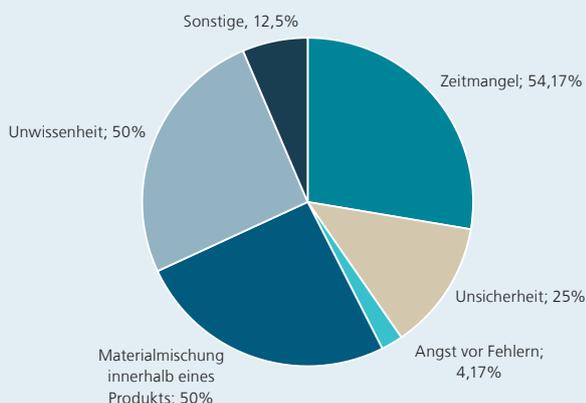


Abbildung 6: Mögliche Ursachen für eine fehlerhafte Abfalltrennung (Mehrfachnennungen möglich)



Situationen eher in den Hintergrund rücken, was vor allem bei nicht intuitiv zuzuordnenden Abfällen zu Fehlern führen kann. Hinzu kommen Materialkombinationen wie beispielsweise im Bereich der Verpackungen. Diese haben oft sowohl Papier- als auch Kunststoffanteile. Deren Trennung würde einen höheren Zeitaufwand bedeuten, und häufig ist nicht klar erkennbar, woraus die Produkte bestehen. Im Bereich der Siedlungsabfälle spricht man in solchen Fällen von einem Fehlwurf. Allein bei den Abfällen in den gelben Tonnen in Deutschland geht man von 30 – 40 Prozent Fehlwürfen aus [27, 28]. Einheitliche Systeme und Kennzeichnungen wie der 'Grüne Punkt' unterstützen bei der Zuordnung der Abfälle, wodurch im Jahr 2020 eine Recyclingquote von 67 Prozent aller Siedlungsabfälle erreicht werden konnte [29]. Die Frage nach dem Wunsch eines klinikunabhängigen, einheitlichen Trennsystems oder einer separaten Sammlung spezifisch gekennzeichnete Produkte (ähnlich dem Dualen System) wurde lediglich von 29,1 Prozent mit ‚Ja‘, jedoch von 25 Prozent mit ‚Nein‘ beantwortet. Die restlichen Teilnehmenden haben die Frage nicht beantwortet.

Der letzte Abschnitt des Fragebogens befasst sich mit der Zusammensetzung und Entsorgung des Abfalls. Eine Sterilisation der Abfälle wird lediglich von zwei der betrachteten Kliniken durchgeführt, und auch hier werden nicht alle Abfälle, sondern nur Metalle aus dem OP im Haus sterilisiert. Obwohl die Sterilisation der Abfälle eine Entsorgung in einer niedrigen und damit kostengünstigeren Kontaminationsstufe erlaubt, scheint der personelle und organisatorische Aufwand zu groß. Zur Zusammensetzung der Abfälle haben nur neun Kliniken Angaben gemacht. In den meisten Kliniken wird lediglich das Abfallaufkommen, nicht die Zusammensetzung einzelner Materialgruppen dokumentiert. Die Befragten wurden dennoch gebeten, die am häufigsten vorkommenden Kunststoffe im klinischen Alltag aufzulisten. Dabei wurden vorrangig Polyethylen, Polypropylen, Polyester und Polyvinylchlorid genannt. Drei von neun Kliniken gaben an, separat Styroporkisten für eine erneute interne Verwendung zu sammeln. Diese werden häufig als Transport- oder Verpackungsmaterial genutzt und fallen in großen Mengen an.

Abschließend wurden alle Kommentare und Anmerkungen der Befragten ausgewertet. Dabei war auffällig, dass in erster Linie die Menge des Verpackungsabfalls kritisiert wurde. Da die Hygienevorschriften vom Einsatz des Medizinproduktes abhängen, fallen für ein und dasselbe Produkt mehrere Verpackungen an, was für ein großes Abfallvolumen sorgt. Ebenfalls kritisch hervorgehoben wurde die Abfallmenge im OP. Hier fallen neben Verbrauchsmaterialien aus Kunststoff auch deutlich hochwertigere Materialien wie Metalle an, welche anschließend teilweise unbenutzt entsorgt werden müssen, da sie in sterilen Einwegsets vertrieben werden.

3 Verfügbare Technologien für die mechanische Aufbereitung von Kunststoffen

Kunststoffe werden aufgrund ihrer sehr großen Anwendungsbreite und ihrer vielfältigen Eigenschaften immer häufiger eingesetzt [30]. So zeichnen sie sich u. a. durch ihre sehr niedrige Dichte, gute Verarbeitbarkeit und sehr gute Wiederverarbeitbarkeit aus. Ihre mechanischen Eigenschaften sind in weiten Grenzen über die Zugabe von z. B. Additiven oder Füll- und Verstärkungsstoffen einstellbar.

In Deutschland gilt seit 1996 das ‚Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen‘. Das deutsche Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) wurde in den letzten Jahren immer wieder angepasst und behandelt die Vermeidung, die Verwertung und die Beseitigung von Abfällen. Dabei sollen Abfälle möglichst vermieden, aber zumindest stofflich oder energetisch verwertet werden. [31]

Das Recycling von Kunststoffen gewinnt seit Jahren immer mehr an Bedeutung [30]. Neben einem wachsenden Umweltbewusstsein und strengeren gesetzlichen Auflagen sorgen auch die steigenden Rohstoffkosten für eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Verfahren für die Wiederverwendung von Kunststoffen.

Beim Kunststoffrecycling werden im Allgemeinen drei Verwertungswege unterschieden. Dabei handelt es sich um das werkstoffliche Recycling (Rezyklat), das rohstoffliche Recycling (Monomere, Gase, Öle) und die energetische Verwertung. Die Auswahl eines geeigneten Verwertungsweges hängt unter anderem vom Zustand der Kunststoffabfallfraktionen (Sorten, Formen, Größen, Farben) ab. Entscheidend sind dabei der Verschmutzungsgrad sowie die Vermischung mit anderen Kunststoffen oder sonstigen Fremdstoffen. Je höher der Verschmutzungsgrad ist oder je stärker die Kunststoffabfälle als Mischfraktionen vorliegen, desto höher wird der Aufwand, bevor eine werkstoffliche Wiederverarbeitung möglich ist. Die werkstoffliche Aufbereitung wird überwiegend bei den thermoplastischen Kunststoffen angewendet, da diese wieder aufgeschmolzen werden können. [30, 32]

Definition werkstoffliches Recycling

Werkstoffliches Recycling beschreibt die Wiederverarbeitung von Kunststoffabfällen zu neuen Produkten, ohne dabei die Molekülstruktur der Polymermoleküle wesentlich zu verändern. Es wird also versucht, die Moleküle des polymeren Kunststoffs so unversehrt wie möglich zu lassen. Dies geschieht in der Regel durch Umschmelzen der Kunststoffe [30, 32]. Die aufbereiteten Materialien können einerseits direkt verarbeitet werden, z. B. im Extrusion- oder Spritzgussprozess. Andererseits können die Materialien vor der Verarbeitung einer Regranulierung unterzogen werden. Damit besteht die Möglichkeit, die Werkstoffeigenschaften der Rezyklate gezielt zu beeinflussen. Dies erfolgt meist durch die Beimischung von Additiven oder Verstärkungs- und Füllstoffen.

Prozess

Vor der Wiederverwertung der Kunststoffabfälle müssen diese einer Aufbereitung unterzogen werden. Dazu zählen u. a. die Sammlung der Altkunststoffe, die Reinigung und die Trennung, die Zerkleinerung sowie die Aufbereitung.

Kriterien für die Auswahl einer bestimmten Zerkleinerungsmaschine sind vor allem die Eigenschaften des zu zerteilenden Kunststoffs wie Härte, Wärmeempfindlichkeit und Elastizität, aber auch die gewünschte Korngröße. Dabei müssen die Zerkleinerungsmaschinen zusätzlich nach den für die Zerkleinerung verantwortlichen Hauptbeanspruchungsarten systematisiert werden, wobei die Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe, zu denen auch die Kunststoffe gehören, meist durch Scher- bzw. Schneidbeanspruchungen erfolgt. [33, 34]

Die Zerkleinerung von Kunststoffen gliedert sich von der Grobzerkleinerung (Vorzerkleinerung von großflächigen Formteilen $d = 100$ mm) über die Mittelzerkleinerung (Mahlung auf die gewünschte Korngröße $d = 100-5$ mm) bis hin zur Feinzerkleinerung ($d = 5-0,1$ mm). Eine der am häufigsten eingesetzten Maschinen zur Zerkleinerung von Kunststoffen ist die Schneidmühle. Sie hat eine zentrale Bedeutung erlangt und wird über ein breites Spektrum unterschiedlichster Abfälle wie Massivteile, Hohlkörper oder auch Folien eingesetzt. [33, 34]

Abbildung 7: Prozessschritte der Aufbereitung

(Eigene Darstellung nach Recyclingschema nach TecPart –
Verband Technische Kunststoff-Produkte e. V., Frankfurt am Main)



Abbildung 8: Recyclingzeichen nach DIN EN ISO 11469 bzw. VDA260 mit Darstellung der Werkstoffangaben [32]



Wird von Rezyklat gesprochen, ist dies ein Überbegriff. Es handelt sich dabei um eine Formmasse bzw. einen aufbereiteten Kunststoff mit definierten Eigenschaften. Im Allgemeinen hat ein Rezyklat in seinem Werdegang bereits einen Verarbeitungsprozess hinter sich. [32]

Werden Kunststoffabfälle zerkleinert (z. B. durch Mahlen), entsteht daraus Mahlgut. Dieses hat unterschiedliche und unregelmäßige Teilchengrößen und kann Staubanteile enthalten. Das Mahlgut kann in einem zusätzlichen Schritt weiter aufbereitet werden. Dabei entsteht Regranulat oder Regenerat. Diese werden aus Mahlgut über einen Schmelzprozess gewonnen. Regranulat und Regenerat haben eine gleichmäßige Korngröße und keinen Staubanteil. Regenerat enthält außerdem Zusätze (Additive) zur Eigenschaftsverbesserung. Additive werden hierbei gezielt eingesetzt, um definierte Eigenschaftswerte zu erhalten. [32]

Herausforderungen des Prozesses

Grundvoraussetzungen für die werkstoffliche Aufbereitung des Ausgangsmaterials ist, dass es in seinem 'ersten Leben' nicht zu stark durch Alterungseffekte geschädigt worden ist. Nur so können aus Kunststoffabfällen werthaltige Sekundär-Kunststoffe entstehen.

Herausforderungen beim werkstofflichen Recycling sind zudem eine meist auftretende Qualitätsveränderung durch verarbeitungsbedingte geringfügige Änderungen des molekularen Aufbaus, die Unverträglichkeit der meisten Kunststoffe bei deren Vermischung sowie die oft sehr unterschiedlichen Verarbeitungstemperaturen [30]. Darüber hinaus können auch im Material vorhandene Verschmutzungen (z. B. Aluminium, Papier, Fett, ...) zu Problemen führen.

Bezüglich der Reinheit und Verträglichkeit der Ausgangsmaterialien haben sich einige wichtige Begriffe beim Recycling durchgesetzt [32]:

- Sortenrein bedeutet, dass Kunststoffe mit gleicher Kennzeichnung nach DIN EN ISO 11469 bzw. VDA 260, ggf. verschiedener Rohstoffhersteller aufbereitet werden.
- Vermischt bedeutet, dass unterschiedliche Kunststoffe mit chemischer Verträglichkeit aufbereitet werden (z. B. ABS und PC).
- Verunreinigt bedeutet, dass die aufzubereitenden Kunststoffe aus dem Gebrauch noch Stoffe enthalten, die die Eigenschaften des aufbereiteten Kunststoffs beeinträchtigen.

Additive Fertigung und Spritzguss

Rezyklate und Mischungen aus Rezyklat und Neuware lassen sich in Form von Filamenten und Granulaten durchaus in der additiven Fertigung und als Granulat im Spritzguss verarbeiten. Dies ist für bestimmte Polymere Stand der Technik [35, 36]. Für die Herstellung von Filamenten sind weitere Produktionsschritte notwendig. Die filamentbasierte Verarbeitung erfolgt vorwiegend auf kleinen 3D-Druckern, die bspw. für private Zwecke genutzt werden. Standard-Kunststoffgranulat hingegen wird in gleicher Form für große industrielle 3D-Drucker und im Spritzguss verwendet. [35, 37]

Hier soll Granulat für die additive Fertigung und Spritzguss betrachtet werden. Für eine Mischung aus Neuware und Rezyklat ist der Aufwand relativ gering. Weitere Schritte zur Anwendung des Rezyklats sind die erneute Compoundierung, also ein Beimischen von Zuschlagstoffen, um ein gefordertes Eigenschaftsprofil zu erreichen [38]. Dabei wird sichergestellt, dass jedes Granulat Korn die gleiche Zusammensetzung hat. Es ist auch möglich, Polymerblends (Mischung aus zwei verschiedenen Polymeren) herzustellen. Es ist jedoch nicht möglich, alle

Abbildung 9: Mischbarkeit von Thermoplasten untereinander (nach [39])

		Zumischwerkstoffe						
		PA	PC	PE	PP	PS	PUR	PVC
Grundwerkstoffe	Polyamid – PA	●	○	○	○	○	◐	○
	Polycarbonat – PC	○	●	○	○	○	◐	○
	Polyethylen – PE	○	○	●	◐	○	◐	○
	Polypropylen – PP	○	○	◐	●	○	◐	○
	Polystyrol – PS	○	○	○	○	●	○	○
	Polyurethane – PUR	◐	◐	◐	◐	○	●	◐
	Polyvinylchlorid – PVC	○	○	○	○	○	◐	●
		PA	PC	PE	PP	PS	PUR	PVC

● verträglich
 ◐ beschränkt verträglich
 ◑ in kleinen Mengen verträglich
 ○ nicht verträglich

Polymere miteinander zu mischen. Eine gewisse Verträglichkeit der Polymere ist zu beachten (siehe Abbildung 9).

Bei der Compoundierung können noch weitere Zusatzstoffe eingebracht werden, die die Verarbeitung in der additiven Fertigung und im Spritzguss verbessern. Die Zusatzstoffe können Farbbatches, Fließhilfen, etc. sein. Die mechanischen Eigenschaften können verbessert werden, wenn der Fasergehalt durch die Beimischung von Glasfasern, Kohlenstofffasern oder anderen verstärkenden Materialien erhöht wird.

Nach der Compoundierung mit Rezyklatanteil kann das Granulat mittels Spritzguss und additiver Fertigung weiterverarbeitet werden. Im Compoundierungsprozess können Verarbeitungseigenschaften und mithilfe der Additive die mechanischen Eigenschaften eingestellt werden. Somit lässt sich das Rezyklat in reiner Form oder in neuer Compoundierung grundsätzlich für eine Vielzahl neuer Produkte einsetzen, ganz im Sinne eines geschlossenen Werkstoffkreislaufs. Eine praktische Prüfung der Verarbeitung ist allerdings erforderlich, gegebenenfalls sind erneute Compoundierungen durchzuführen.

Sortieranlagen

Wenn primäre Sammelprozesse und Zwischenlagerungen nicht werkstoffspezifisch erfolgen können, müssen die gemischten Feststoffe meist sortiert werden. Dafür stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, welche die verschiedenen physikalischen Eigenschaften der Stoffe ausnutzen. Beim Recycling von thermoplastischen Kunststoffen haben die Sortierverfahren zwei Aufgaben: zum einen die Abtrennung von Fremdstoffen wie Metalle, Glas, Holz, etc. und zum anderen die Sortierung der Kunststoffe nach verträglichen Werkstoffgruppen bzw. nach sortenreinen Fraktionen. [34]

Zu den gängigsten Methoden gehört die Dichtentrennung [34]. Dabei werden die Dichteunterschiede zwischen den verschiedenen Feststoffen und einem Fluid (Flüssigkeit oder Luft) ausgenutzt. Bei der Schwimm-Sink-Sortierung kommt meist eine ruhende Trennflüssigkeit (z. B. Wasser oder Salzlösung) zum Einsatz. Windsichter oder Zyklone arbeiten dagegen mit einer strömenden Trennflüssigkeit.

Die sensorgestützte Sortierung beruht auf der vollautomatischen und schnellen Erkennung von Einzelstücken, die stoffspezifisch ausgeblasen werden. Die gängigste Identifikationsmethode für Kunststoffe ist hierbei die Nahinfrarotspektroskopie [34]. Sie ermöglicht die Bestimmung von z. B. PE, PP, PS, PVC und noch weiteren Kunststoffen.

Wirbelstrom- und Magnetabscheider dienen im Rahmen des Kunststoffrecyclings zur Abtrennung von größeren Anteilen an metallischen Fremdstoffen und Verunreinigungen.

4 Potenziale für eine nachhaltige Werkstoffverwertung

Für das werkstoffliche Kunststoffrecycling von medizinischen Abfallströmen in Krankenhäusern und Kliniken können ausgehend vom aktuellen Stand des Abfallmanagements einige Potenziale abgeleitet werden. Zur Verbesserung des Entsorgungsprozesses muss dabei die gesamte Wertschöpfungskette der medizinischen Einwegprodukte betrachtet werden. Dies schließt sowohl das recyclinggerechte Design der Produkte, den strategischen Einkauf in Kliniken sowie die anschließende Sammlung, Trennung und Verwertung mit ein. Auf Basis des kontaminierten, nicht infektiösen Abfalls (ehemals Abfallklasse B – jetzt AVV-Schlüssel: 180101, 180201, 180104, 180203) werden in den folgenden Abschnitten Ansätze für ein nachhaltigeres Werkstoffrecycling im Gesundheitswesen aufgezeigt.

Ansätze für Unternehmen zur Herstellung von Medizinprodukten

Der deutsche Gesetzgeber hat mit dem Klimaschutzgesetz eine langfristige Agenda aufgestellt, wonach Deutschland bis 2045 treibhausgasneutral werden soll. Auch die Medizintechnikbranche wird zukünftig davon betroffen sein, Prozesse nachhaltiger zu gestalten. Eine frühzeitige Anpassung der Produkte und deren Produktion bringt also auch einen strategischen Vorteil für die Unternehmen.

Neben Zeitmangel und Unwissenheit wurden in der zuvor beschriebenen Umfrage Produkte, die aus mehreren Materialien

bestehen, als dritthäufigste Ursache für Fehlwürfe bei der Abfalltrennung angegeben. Viele Medizineinwegprodukte bestehen aus Materialkombinationen oder können nicht oder nur mit erhöhtem Aufwand in ihre modularen Einzelteile, die ggf. aus verschiedenen Materialgruppen bestehen, zerlegt werden. Das zeigt, dass der Aspekt der Entsorgung und des Recyclings nicht in den Entwicklungsprozess einbezogen wurde. Die Trennung komplexer Artikel ist aufwendig und dadurch ressourcen- und kostenintensiv. Die Kliniken stehen unter hohem Zeitdruck und haben nicht die räumlichen Ressourcen, um eine ausführliche Materialtrennung aller Produkte vorzunehmen. Um mittelfristig das Recyclingpotenzial für Einwegmedizinprodukte weiter ausschöpfen zu können, muss das Design der Produkte zukünftig auf einen Recyclingprozess ausgelegt werden. Nur durch ein innovatives ‚Design for Recycling‘ können Stoffkreisläufe geschlossen und eine hochwertige Wiederverwertung von Kunststoffen sichergestellt werden. Die Integration nicht nachverfolgbarer recycelter Werkstoffe in medizintechnische Produkte ist streng reglementiert, dennoch können die Werkstoffe für andere Industriezweige verwertet werden.

Für hochwertige Materialien und langlebige Produkte sollten Pfand- oder Rücknahmesysteme etabliert werden, um Werkstoffe zurückzugewinnen oder Produkte kontrolliert aufbereiten und erneut verwenden zu können. Im Bereich der Einwegkunststoffprodukte ist der Materialwert sehr gering, weshalb hier eine Aufbereitung durch werkstoffliches Recycling in Betracht gezogen

Abbildung 10: Darstellung der Potenziale für eine nachhaltige Werkstoffverwertung, untergliedert nach den Stakeholdern der Medizintechnik-Branche



werden kann. Die Kategorie der kontaminierten, nicht infektiösen Abfälle (ehemals Kategorie B) bildet das größte Abfallvolumen und kann potenziell nach einer Dekontamination recycelt werden. Um den zuvor aufgezeigten Anforderungen an das werkstoffliche Recycling gerecht zu werden, muss allerdings die Sammlung und Sortierung der Abfälle angepasst werden. Die Kategorisierung in Werkstoffgruppen, bestehend aus verschiedenen kompatiblen Kunststoffen, die separat gesammelt werden, bietet die Grundlage für die Herstellung von Mischrezyklaten. Die herstellenden Unternehmen können den Prozess unterstützen, indem sie beispielsweise ausschließlich Kunststoffe aus einer der recycelbaren Werkstoffgruppen innerhalb eines Produktes verwenden und die Werkstoffgruppe mit einem klar erkennbaren Symbol oder mit einem Farbsystem kenntlich machen. Auch hier muss ein unternehmensübergreifendes System etabliert werden.

Ansätze für Krankenhäuser

Der Gesundheitssektor setzt 4,4 Prozent der weltweiten Treibhausgasemissionen frei und liegt damit noch vor den Emissionsanteilen durch Schifffahrt und Flugbetrieb [40]. Ein wesentlicher Anteil entsteht durch den Einkauf und Transport von Waren. Mit dem neuen Lieferkettensorgfaltspflichten-gesetz wurde bereits ein erster Schritt zu mehr Nachhaltigkeit in der Beschaffung getan. Der strategische Einkauf einer Klinik rückt dabei ins Blickfeld. So können beispielsweise Produkte aus biologisch basierten Kunststoffen oder anderen nachhaltigen Merkmalen beschafft werden.

Im Gegensatz zu den Medizintechnikunternehmen scheint die Motivation der Mitarbeitenden in Kliniken höher auszufallen, wenn es um die Etablierung eines nachhaltigeren Arbeitsumfeldes geht. Eine Umfrage unter Medizintechnikunternehmen der Medtech Pharma im Jahr 2021 ergab, dass 50 Prozent der Unternehmen das Thema Nachhaltigkeit für Marketingzwecke nutzen, obwohl nur weniger als 25 Prozent von ihnen eine Person oder eine Abteilung (weniger als 10 Prozent) zum Thema Nachhaltigkeit beschäftigen [41]. In der hier durchgeführten Umfrage gab die Hälfte (12) der Kliniken an, eine beauftragte Person für Umwelt und Abfall zu beschäftigen, wobei drei weitere Kliniken eine Gruppe oder Abteilung in dem Bereich besitzen. Zusätzlich berichteten etwa 40 Prozent der Kliniken, dass es Initiativen von Mitarbeitenden gibt, die sich bspw. mit der Reduzierung von Abfällen im Arbeitsalltag beschäftigen.

Trotz der höheren intrinsischen Motivation bestehen Probleme bei der Sortierung und Entsorgung klinischer Abfälle. Ein einheitliches Entsorgungssystem, das klinikübergreifend angewandt wird, könnte für eine Verbesserung des Prozesses sorgen. **Unsicherheiten durch Einrichtungswechsel oder umständ-**

liche Anweisungen können vermieden werden, indem das System bereits in die Ausbildung des Klinikpersonals integriert wird. Die WHO empfiehlt beispielsweise eine landesweit einheitliche, standardisierte und farbliche Codierung [20]. Zudem können eindeutige Kennzeichnungen von Werkstoffgruppen für eine Verbesserung der Sortiergüte sorgen. Solche Strategien z. B. für Produkte aus PVC werden bereits in Ländern wie Australien [42] oder Großbritannien [43] umgesetzt. Neben einer recyclinggerechten Trennung des Abfalls sollte die Entlastung des Klinikpersonals berücksichtigt werden. Ein System, das noch mehr Trennmöglichkeiten etabliert und durch eine erhöhte Anzahl an Abfallbehältern auch räumliche Kapazitäten bindet (besonders kritisch in OP-Sälen), ist nicht praxistauglich. Kurzfristig werden durch die Einführung eines neuen Systems Mehrkosten entstehen. Allerdings werden Stoffströme von endlichen Materialgruppen in Zukunft immer wichtiger, wodurch mit der Aufbereitung von Werkstoffen ein neues wirtschaftliches Potenzial besteht. Beispielsweise könnte der Verkauf werthaltigen Abfalls einen Ausgleich für die höheren Beschaffungskosten schaffen.

Ansätze für Recyclingunternehmen / Entsorgungsunternehmen

Für alle werkstofflichen Verwertungswege der medizinischen Einwegprodukte ist eine funktionsfähige und nachhaltige Sterilisation/Dekontaminierung der anfallenden Abfälle essenziell. Hierfür müssen validierte Prozesse, wie sie u. a. bereits durch die Deutsche Gesellschaft für Krankenhaushygiene (DGKH), die Deutsche Gesellschaft für Sterilgutversorgung (DGSV) und die Richtlinie für die Außerklinische Intensivpflege (AKI) für Mehrweg-Medizinprodukte vorliegen, entwickelt werden.

Die Übertragung und Weiterentwicklung von vorhandenen Trenn- und Sortierkonzepten (Dichtentrennverfahren, Infrarotspektroskopie etc.) nach der gemischten Sammlung der Kunststoffabfälle bietet ebenfalls Potenzial. Hierbei müsste die Eignung für medizinische Einwegprodukte nachgewiesen werden. Um die Wiederverwertung von klinischen Kunststoffabfällen zu fördern, steht auch die Untersuchung der Möglichkeiten für den Einsatz von Mischrezyklaten im Fokus. **Dazu muss es künftig gelingen, aus normalerweise nicht kompatiblen Polymeren, wie z. B. PP und PE, über die Zugabe von Haftvermittlern oder Verträglichmachern Blends herzustellen.**

Für Recyclingunternehmen und Kunststoffverarbeiter bildet die werkstoffliche Verwertung von klinischen Kunststoffabfällen einen neuen Eingangsmaterialstrom. Die Verfügbarkeit von Rohstoffen und die Forderung nach Rezyklatquoten in neuen Produkten werden zukünftig große Herausforderungen mit sich bringen, so dass bisher unergründete Materialströme in Betracht gezogen werden müssen.

5 Fazit/Ausblick und Forschungsbedarf

Fazit

Aufgrund der voraussichtlich steigenden Rohstoffknappheit und dem immer größer werdenden öffentlichen Druck, die Gesundheitsbranche nachhaltiger zu gestalten und Emissionen zu reduzieren, sollte langfristig gesehen ein geschlossener Materialkreislauf innerhalb der Branche erzielt werden. Ein Zwischenziel könnte dabei sein, das aufbereitete Material aus benutzten Gütern anderen Branchen zugänglich zu machen, die weniger stark reguliert sind. Eine Möglichkeit stellt dabei das mechanische Recycling von verwendeten Kunststoffen hin zu Kunststoffrezyklaten dar.

Auch wenn es bislang keine Vorschriften zur Erreichung der CO₂-Neutralität für den Medizinprodukte(sektor) gibt, sollte jetzt mit Forschung und Entwicklung begonnen werden – als Fundament für künftige Profitabilitätssteigerungen bei den beteiligten Stakeholdern. Bislang existieren vor allem Eigeninitiativen in Krankenhäusern und Arztpraxen (wie Carus Green oder Green Hospitals) mit konkreten Ansätzen, wie z. B. der Sammlung von Styropor-Verpackungsmaterialien für den innerklinischen Versand. Bestehende Vorgaben für den Einkauf wie Vergabeverfahren und Rahmenverträge erschweren nachhaltiges Handeln. Auch die Verwendung von Rezyklaten bei der Herstellung neuer Produkte ist heute stark eingeschränkt. Laut Medizinprodukteverordnung muss die Rückverfolgbarkeit für die verwendeten Materialien gegeben sein, um sie wieder in der Medizintechnik-Branche einsetzen zu können, was das Ziel eines geschlossenen Materialkreislaufs in weite Ferne rücken lässt. Die Einführung des europäischen AVV-Abfallschlüssels hat für mehr Sortenreinheit gesorgt, da der Abfall feingliedriger getrennt werden muss. Vielfach nutzen Krankenhäuser eigeninitiativ zusätzlich ein vereinfachtes (z. B. durch Farben) oder das alte System (LAGA) zur Beschriftung der Abfallbehälter. Eine Umfrage an sächsischen Kliniken hat ergeben, dass verunsichertes Personal zu (höherklassifizierten) Fehlzuordnungen neigt. Das wiederum führt zu unnötig höheren Preisen bei der Entsorgung.

Die verarbeitende Industrie wünscht sich sortenrein getrennte Kunststoffabfälle, um eine werterhaltende Aufbereitung der Materialien zu ermöglichen. Die Umsetzung erfordert einen deutlichen Mehraufwand für die Trennung und Sortierung des Abfalls in den Krankenhäusern. Dies ist sowohl aus Platzgründen als auch aufgrund des Personalmangels nicht zielführend.

Der größte Anteil an aufkommendem Abfall in deutschen Kliniken ist der kontaminierte und nicht infektiöse Abfall (ehemals Abfallklasse B). Dieser bietet, aufgrund der Menge und auch

weil er potenziell nicht gesundheitsgefährdend ist, das größte Potenzial für die Rückführung in einen Werkstoffkreislauf. Für hochwertige Materialien wie Metalle (z. B. Instrumente aus dem OP) wird teilweise eine Sterilisation in den Kliniken durchgeführt, um das Material anschließend verkaufen und einschmelzen lassen zu können. Die Mengen und damit die Aufwände sind hier jedoch deutlich geringer.

Forschungsbedarf und Empfehlungen

Ein mittelfristiger Ansatz zur Rücküberführung einiger Kunststoffe könnte die Erarbeitung eines Systems ähnlich dem ‚Grünen Punkt‘ sein. Hierfür könnten Materialien aus einer Kunststoffgruppe, die gemeinsam weiterverarbeitet werden können, gesondert gesammelt werden. Der Vorteil wäre, dass lediglich ein zusätzlicher Abfallbehälter aufgestellt werden müsste, welcher bspw. durch ein eindeutiges Symbol auch produktseitig gekennzeichnet werden könnte. Die Trennung erfolgt weiterhin händisch in den Kliniken. Diese sollten sich auf die am häufigsten vorkommenden Kunststoffe (z. B. PE oder PP) konzentrieren. Voraussetzung hierbei besteht in der detaillierten Analyse der Zusammensetzung des B-Abfalls, damit die Herstellung von Mischrezyklaten weiterentwickelt werden kann. Alternativ können auch Kunststoffe in einer Entsorgungsgruppe vereint werden, die im Aufbereitungsprozess besonders gut trennbar sind. Dazu müssten die Hersteller allerdings ihre Produkte bereits im ‚Design for Recycling‘ anpassen. Mit der Konsequenz, dass diese Produkte eine erneute Zulassung durchlaufen müssten, was also erst auf lange Sicht zur Reduzierung des Müllaufkommens beiträgt.

Ein weiterer kurz- bis mittelfristiger Ansatz zur Reduzierung von CO₂ ist die Beimischung biobasierter Kunststoffe zur Aufbereitung von Mischrezyklaten. Dank ihrer biogenen Quellen wie stärke- und zuckerhaltige Pflanzen gelten Biokunststoff-Compounds als Kohlenstoffsenke, da sie bei der Müllverbrennung kaum fossilen Kohlenstoff ausstoßen. Firmen wie die BIOVOX GmbH stellen bereits zertifizierte Medical Grade Biokunststoffe her, die beispielsweise für Verpackungen, Schläuche und Anschlüsse verwendet werden können. Gegenüber herkömmlichen PP können mit diesen Produkten bis zu 66 Prozent CO₂ eingespart werden. [44]

Der Prozess der sicheren Dekontamination von großen Mengen des Abfalls muss ebenfalls noch besser erforscht werden. So gilt es beispielsweise zu klären, ob die Verfahren zur Dekontamination von Mehrwegprodukten auch für Einwegprodukte

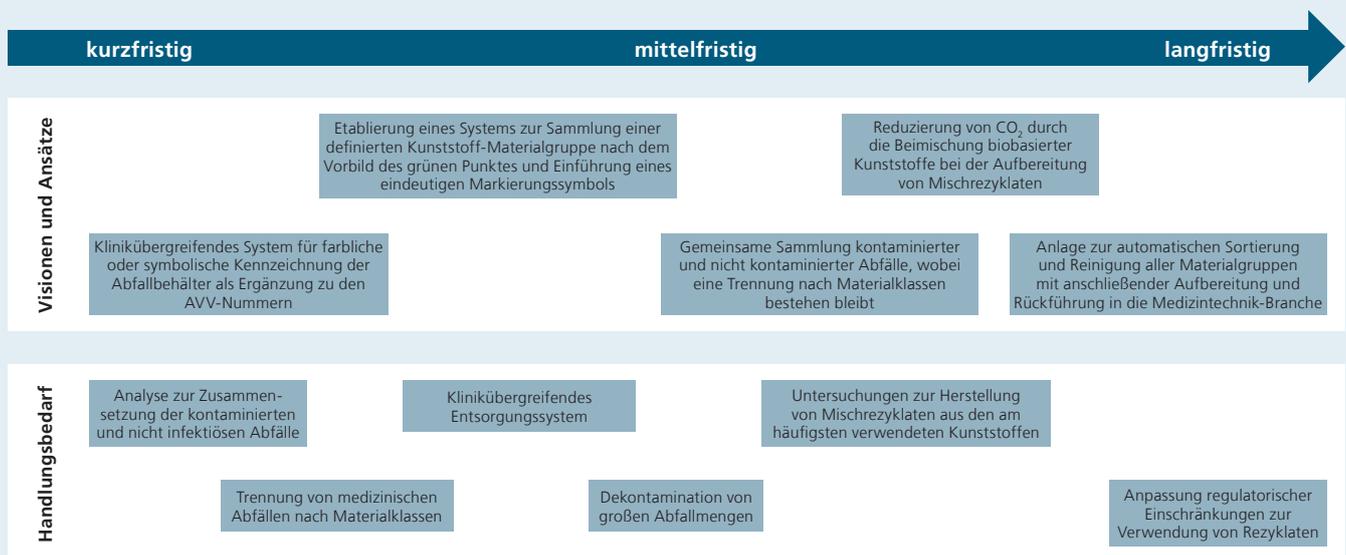
anwendbar sind und welchen Einfluss diese Verfahren auf die Materialeigenschaften haben. Sobald eine gesicherte Prozesskette besteht, können neue Dienstleistungsanbieter die Sterilisation von großen Abfallmengen übernehmen, da dies in der Klinik zum aktuellen Zeitpunkt nicht möglich erscheint. Mittelfristig gesehen ermöglicht der Prozess einer sicheren Dekontamination auch die Reduzierung der Abfallklassen. So könnten zukünftig bspw. kontaminierte und nicht kontaminierte Abfälle (ehemals Klasse A und B) und Wertstoffabfälle gemeinsam und entsprechend der bestehenden Materialgruppen (Papier, Restmüll, Verpackung, etc.) gesammelt werden. Nach der Dekontamination können die Materialien im gleichen Rahmen wie Siedlungsabfälle weiterverwertet oder aufbereitet werden. Langfristig könnten automatisierte Trennverfahren für weitere Kunststoffe oder Kunststoffgruppen erarbeitet werden. Neu entwickelte Anlagen sollten dann in einer geschlossenen Prozesskette den Abfall in seine Bestandteile trennen und dekontaminieren. Diese Anlagen könnten bspw. auf dem Klinikgelände stehen und die händische Sortierung des Abfalls übernehmen. Dem Weiterverkauf der aus dem Prozess generierten Rezyklate stünde nichts im Wege. Auch dieser Ansatz setzt Weiterentwicklungen im Bereich der Werkstoffforschung voraus. Ein kurzfristiger Ansatz, der die Fehler bei der Sortierung des Abfalls in Krankenhäusern reduzieren könnte, ist die Einführung eines einheitlichen, klinikunabhängigen Systems für die Kennzeichnung der Abfallbehälter. Hierfür könnten Farben oder Symbole verwendet werden, die es dem Personal erleichtern, den Abfall der richtigen Kategorie zuzuordnen.

Neben dem mechanischen Recycling können gebrauchte Kunststoffe auch mittels rohstofflicher (chemischer) Recyclingverfahren in den Werkstoffkreislauf zurückgeführt werden.

Beim chemischen Recycling wird der Kunststoff in seine einzelnen Bestandteile zerlegt, wodurch die Monomere bzw. Basischemikalien der Kunststoffe in Form von Pyrolyseölen vorliegen und aufbereitet werden können. Daraus können wiederum Kunststoffe hergestellt werden, die zur Herstellung eines neuen Produkts verwendet werden können. Für den Einsatz in einem Medizinprodukt unterliegen diese Materialien einer erneuten Zulassung. Sowohl der mechanische als auch der chemische Recyclingprozess sollten in einer Ökobilanzierung (z. B. DIN EN ISO 14040) hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen miteinander verglichen werden.

Die im Rahmen des Projekts durchgeführte Umfrage an sächsischen Kliniken kann als eine Art ‚Pretest‘ angesehen werden, da im Rahmen der Durchführung und Auswertung wichtige Erkenntnisse zum Überarbeiten der Umfrage gesammelt werden konnten. Um eine möglichst aussagekräftige Auswertung zum aktuellen Stand, den Problemen und Wünschen der Kliniken in Bezug auf die Gestaltung eines nachhaltigeren Arbeitsumfeldes zu erlangen, sollte die Umfrage deutschlandweit durchgeführt werden. Hierfür ist auch die Unterstützung durch die Politik wünschenswert. Insbesondere das Bundesministerium für Gesundheit (BMG) und das Bundesumweltministerium (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, BMUV) sollten in die Erstellung und Verteilung der Umfragen mit einbezogen werden. Wir empfehlen, Nachhaltigkeitsaspekte der Medizintechnik in Industrie, Kliniken, Politik und Forschung weiter zu diskutieren und Netzwerke zu bilden. Die Debatte wird durch Vernetzungsaktivitäten und die Analyse von Querschnittsthemen aus anderen Branchen zum Thema Kreislaufwirtschaft bei Kunststoffen profitieren.

Abbildung 11: Darstellung kurz-, mittel- und langfristigen Visionen und Ansätze



6 Literaturangaben

- [1] abfallmanager-medizin.de: Zahlen und Fakten rund um Kliniken und Abfälle. <https://www.abfallmanager-medizin.de/zahl-des-monats/>, abgerufen am: 04.11.2022
- [2] Weltgesundheitsorganisation: Global analysis of healthcare waste in the context of COVID-19. Status, impacts and recommendations. Geneva: World Health Organization 2022
- [3] Sening, W. u. Leewe, J.: EINMALINSTRUMENTE AUF DEM VORMARSCH – Hochleistungskunststoffe mit Innovationspotenzial. *Plastverarbeiter* : neue Technologien, Kosteneffizienz, erhöhte Marktchancen. 2008 06/2008, S. 12–15
- [4] Brundtland, G. H. (Hrsg.): *Our common future*. Oxford paperbacks. Oxford, New York: Oxford University Press 1987
- [5] Braig, K. F.: Felix Ekardt, Theorie der Nachhaltigkeit: Ethische, rechtliche, politische und transformative Zugänge – am Beispiel von Klimawandel, Ressourcenknappheit und Welthandel. *Natur und Recht* 39 (2017) 7, S. 469–470
- [6] Batz, M.: *Nachhaltigkeit in der Sozialwirtschaft. Eine Einführung*. Lehrbuch. Wiesbaden, Heidelberg: Springer VS 2021
- [7] Brickwedde, F.: *Ökologische Nachhaltigkeit*. In: Krüger, W., Schubert, B. von u. Wittberg, V. (Hrsg.): *Die Zukunft gibt es nur einmal!* Wiesbaden: Gabler 2010, S. 47–60
- [8] Lexware.de: *Ökonomische Nachhaltigkeit einfach erklärt*, 2022. <https://www.buchhaltung-einfach-sicher.de/bwl/oekonomische-nachhaltigkeit#%C3%B6konomische-nachhaltigkeit-im-nachhaltigkeitsdreieck>, abgerufen am: 08.06.2023
- [9] Vallance, S., Perkins, H. C. u. Dixon, J. E.: What is social sustainability? A clarification of concepts. *Geoforum* 42 (2011) 3, S. 342–348
- [10] United Nations: THE 17 GOALS. <https://sdgs.un.org/goals>, abgerufen am: 15.12.202
- [11] Markus Loh: *Mehrweg versus Einweg im Gesundheitswesen*, 2021. <https://www.hcm-magazin.de/mehrweg-versus-einweg-im-gesundheitswesen-278434/>, abgerufen am: 04.11.2022
- [12] Safety Xperts: *Klinikabfälle: Abfallarten im Krankenhaus*, 2022. <https://www.safetyxperts.de/umweltschutz/entsorgung/klinikabfaelle-logistik/>, abgerufen am: 15.12.2022
- [13] Kane, G. M., Bakker, C. A. u. Balkenende, A. R.: Towards design strategies for circular medical products. *Resources, Conservation and Recycling* 135 (2018), S. 38–47
- [14] Manstein, C., Ostertag, K., Bratan, T., Gandenberger, C., Hüsing, B. u. Pfaff, M. (Hrsg.): *Ressourcenschonung im Gesundheitssektor - Erschließung von Synergien zwischen den Politikfeldern Ressourcenschonung und Gesundheit*. Abschlussbericht. Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2021, 15. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt 2021
- [15] Lee, B.-K., Ellenbecker, M. J. u. Moure-Eraso, R.: Analyses of the recycling potential of medical plastic wastes. *Waste Management* 22 (2002) 5, S. 461–470
- [16] McGain, F., Story, D. u. Hendel, S.: An audit of intensive care unit recyclable waste. *Anaesthesia* 64 (2009) 12, S. 1299–1302
- [17] Gill, Y. Q., Khurshid, M., Abid, U. u. Ijaz, M. W.: Review of hospital plastic waste management strategies for Pakistan. *Environmental science and pollution research international* 29 (2022) 7, S. 9408–9421
- [18] *PlasticsToday: Weltweite Nachfrage ausgewählter Rohmaterialien für medizinischer Einmalprodukten in den Jahren 2005 bis 2025 (in Millionen US-Dollar) [Graph]*, 2016. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/653575/umfrage/weltweite-nachfrage-ausgewaehlter-rohmateriale-fuer-medizinischer-einmalprodukten/>, abgerufen am: 15.12.2022
- [19] *PlasticsToday: Verteilung der weltweiten Nachfrage nach medizinischen Einmalprodukten nach Produktgruppe im Jahr 2015 [Graph]*, 2016. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/653542/umfrage/weltweite-nachfrage-nach-medizinischen-einmalprodukten-nach-produktgruppe/>, abgerufen am: 15.12.2022
- [20] Pieper U, Hayter A, Montgomery M: *Safe management of wastes from health-care activities: A summary WHO REFERENCE NUMBER: WHO/FWC/WSH/17.05*. 2017
- [21] abfallmanager-medizin.de: *Krankenhausabfälle. Abfälle aus der humanmedizinischen oder tierärztlichen Versorgung*, abfallmanager-medizin.de 2017. <https://www.abfallmanager-medizin.de/themen/krankenhausabfaelle-abfaelle-aus-der-humanmedizinischen-oder-tieraerztlichen-versorgung/>, abgerufen am: 04.11.2022
- [22] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 18: *Vollzugshilfe zur Entsorgung von Abfällen aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes*. 2021
- [23] Vorstand des Universitätsklinikums Carl Gustav Carus Dresden: *SYSTEMWECHSEL oder Augen zu und weiter so? Jahresbericht des Universitätsklinikums Carl Gustav Carus Dresden 2021/2022*. 2022

- [24] Umweltbundesamt: Thermische Behandlung, 2016. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/entsorgung/thermische-behandlung#entsorgung-von-krankenhausabfallen>, abgerufen am: 15.12.2022
- [25] Joseph, B., James, J., Kalarikkal, N. u. Thomas, S.: Recycling of medical plastics. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 4 (2021) 3, S. 199–208
- [26] Ivanović, T., Meisel, H.-J., Som, C. u. Nowack, B.: Material flow analysis of single-use plastics in healthcare: A case study of a surgical hospital in Germany. *Resources, Conservation and Recycling* 185 (2022), S. 106425
- [27] Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Kreislaufwirtschaft e.V.: BDE zum Tag der Mülltrennung: Fehlwürfe verringern, Kreisläufe schließen, 2021. <https://www.bde.de/presse/tag-der-muelltrennung-fehlwuerfe-verringern-kreislaeufe-schliessen/>, abgerufen am: 06.01.2023
- [28] Bundesverband Sekundärstoffe und Entsorgung: Knapp vorbei ist auch daneben: Wie Fehlwürfe in der gelben Tonne oder dem gelben Sack das Recycling behindern, 2022. <https://www.bvse.de/sachverstand-bvse-recycling/themen-ereignisse/8237-knapp-vorbei-ist-auch-daneben-wie-fehlwuerfe-in-der-gelben-tonne-oder-dem-gelben-sack-das-recycling-behindern.html#:~:text=Rund%202%2C6%20Millionen%20Tonnen,entsorgte%20Abf%C3%A4lle%20so%20genannte%20Fehl%C3%BCrfe.>, abgerufen am: 06.01.2023
- [29] Statistisches Bundesamt: Recyclingquoten der Hauptabfallströme in Deutschland im Jahr 2020, 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/197703/umfrage/recyclingquoten-der-hauptstroeme-von-abfaellen/>, abgerufen am: 06.01.2023
- [30] Hopmann, C.; Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung. München: Carl Hanser 2017
- [31] Bonten, C.: Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen. Hanser eLibrary. München: Carl Hanser 2020
- [32] Baur, E., Harsch, G. u. Moneke, M.: Werkstoff-Führer Kunststoffe. Eigenschaften – Prüfungen – Kennwerte. München: Carl Hanser 2019
- [33] Schubert, G.: Zerkleinerungstechnik für nicht-spröde Abfälle und Schrotte. *Aufbereitungs Technik* 43 (2003) 9, S. 6–23
- [34] Martens, H. u. Goldmann, D.: Recyclingtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
- [35] Myasoedova, V. V.: Graded Recycled Polymers Modified by Thermoelastoplasts: Composite Materials to Be Used for Injection Molding. *Polymer Science, Series D* 14 (2021) 3, S. 462–466
- [36] Kunststoffe.de: Recycling von Produktionsabfällen. <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/recycling-von-produktionsabfaellen-285268>, abgerufen am: 21.12.2022
- [37] Blase, J., John, C., Kausch, M. u. Witt, M.: Recycling von Produktionsabfällen. Additive High-Speed-Fertigung von Kunststoffbauteilen aus Standardgranulat. *Kunststoffe* 2019 11/2019
- [38] AURORA Kunststoffe GmbH: Compounding – Was ist das?, 2019. <https://www.aurora-kunststoffe.de/wp/compounding-was-ist-das/>, abgerufen am: 21.12.2022
- [39] Interessengemeinschaft Thermischer Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.: Stellungnahme der ITAD zum Entwurf einer Novelle der Gewerbeabfallverordnung. 2015
- [40] PricewaterhouseCoopers GmbH: Healthcare-Barometer 2022 zum Schwerpunkt Klimawandel. PwC-Studie 2022: Die Klimakrise entwickelt sich zum Gesundheitsrisiko. <https://www.pwc.de/de/gesundheitswesen-und-pharma/healthcare-barometer-2022-zum-schwerpunkt-klimawandel.html>, abgerufen am: 06.01.2023
- [41] MedTech Pharma e.V.: Ökologische Nachhaltigkeit von Medizinprodukten. Eine Bestandsaufnahme in Unternehmen und Kliniken, 2021. <https://medtech-pharma.de/wp-content/uploads/2022/03/Artikel-Oekologische-Nachhaltigkeit-Medizinprodukte.pdf>, abgerufen am: 06.01.2023
- [42] Vinyl Council Australia: PVC Recycling in Hospitals. <https://www.vinyl.org.au/pvc-recycling-in-hospitals>, abgerufen am: 15.12.2022
- [43] British Plastics Federation: RECOMED. Recycling PVC medical devices, 2022. <https://recomed.co.uk/>, abgerufen am: 15.12.2022
- [44] BIOVOX GmbH: Medical Grade Biokunststoffe. <https://www.biovox.systems/medizin/>, abgerufen am: 19.01.2023

Impressum

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik IWU
Reichenhainer Straße 88
09126 Chemnitz
www.iwu.fraunhofer.de

Gesamtkoordination (Fraunhofer IWU)

Prof. Dr.-Ing. Welf-Guntram Drossel
Geschäftsführender Institutsleiter

Autorinnen und Autoren (Fraunhofer IWU)

Sandra Hunger
Karoline Kemter-Esser
Marc Luginsland
Kerstin Funke
Susanne Kroll
Lysander Zechner
Susan Bremer

Ansprechpartnerinnen Universitätsklinikum Carl Gustav Carus an der TU Dresden

Gabriele Lang, Betriebsbeauftragte für Abfall
Grit Knoth, Gefahrgutbeauftragte
Universitätsklinikum Carl Gustav Carus
an der Technischen Universität Dresden
Anstalt des öffentlichen Rechts des Freistaates Sachsen
Fetscherstraße 74, 01307 Dresden
www.uniklinikum-dresden.de

Lektorat (Fraunhofer IWU)

Andreas Hemmerle
Julia Schellnock
Michael Werner

Gestaltung und Layout (Fraunhofer IWU)

Anja Schmieder

DOI

10.24406/publica-1547

