



Recycling von Einwegfeuerzeugen
Deutsche Bundesstiftung Umwelt AZ 34829/01

Abschlussbericht

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften
Institut für Recycling
Zentrum für Additive Fertigung
Robert-Koch-Platz 8 a
38440 Wolfsburg

Achim Schmiemann, Sylvia Waschke

Wolfsburg, im September 2023

34829/0106/02

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	34829/01	Referat	31	Fördersumme	390.508,00 €
-----------	-----------------	----------------	-----------	--------------------	---------------------

Antragstitel	Recycling von Einwegfeuerzeugen
---------------------	--

Stichworte	Recycling, Abfall Einweg, Mikroplastik, Rezyklat, Restabfall, Sammelstation
-------------------	--

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
36 Monate	01.04.2020 (01.07.2020)	31.03.2023	Abschlussbericht

Zwischenbericht	31.03.2021
Abschlussbericht	30.09.2023

Bewilligungsempfängerin	Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften Institut für Recycling Zentrum für Additive Fertigung Robert-Koch-Platz 8 a 38440 Wolfsburg	Tel 05361892222120 Fax 05361892222122 Projektleitung Prof. Dr. A. Schmiemann Bearbeiterin Sylvia Waschke
--------------------------------	---	---

Kooperationspartner	LRD Löschmittel-Recycling und Umweltdienste GmbH & Co. KG Friedrich-Huth-Straße 26 21698 Harsefeld
----------------------------	--

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Zielsetzung des Projektes ist, zu klären, ob und wie die in Einwegfeuerzeugen eingesetzten Materialien einschließlich des enthaltenen Restgases technisch und wirtschaftlich in die entsprechenden Materialkreisläufe zurückgeführt werden können.

Anlass ist, dass einerseits durch unsachgemäße Entsorgung von Einwegfeuerzeugen das Austreten von Restmengen an ozonschädigendem Brenngas (Propan, Butan) und andererseits hochwertige Komponenten wie der Kunststoff, die verschiedenen Metalle für immer verloren sind.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Das Projekt gliedert sich in mehrere Arbeitspakete und –schritte. Jeder Partner hat die Aufgabe die Arbeitspakete durchzuarbeiten und dem Projektpartner mitzuteilen. Zur Gewährleistung finden regelmäßige Projekttreffen sowie Überprüfungen der erreichten Teilziele bzw. Meilensteine statt.

Ergebnisse und Diskussion

Erste Ergebnisse sind durchweg positiv zu bewerten, die Resonanz auf die Pressemitteilungen und die daraus entstandenen Anfragen verschiedener Kommunen und Firmen sind hoch. Die eigene Webseite ist öffentlich und wird für die Dauer des Projektes von Seiten der Ostfalia geführt. Danach wird sie von der LRD Umwelttechnik weitergepflegt, da die LRD die dieses Projekt weiterführt.

In diesem Projekt wurden fünf Forschungs- und sieben Bachelorarbeiten geschrieben und mit gut bis sehr gut abgeschlossen. Das Arbeitspaket AP 1 ist zeitplanmäßig erarbeitet und die Erfolge sprechen für sich.

Auf Grund der Pandemie sind mögliche Sammelstellen schlecht zu akquirieren. Des Weiteren wollen die Sammelstellen ihren mit der Sammlung verbundenen Aufwand bezahlt bekommen, da die Personalkosten und der Logistikaufwand steigen. Zudem haben die Betriebe Bedenken, dass der Umgang wie beim Batteriesystem erfolgen wird, dem gegenüber sie eher negativ eingestellt sind, da z. B. die Entleerungen zu unregelmäßig stattfinden und die Brandgefahr durch Tiefenentladung der Zellen sehr hoch ist. Anders ist es bei den Kommunen, sie sind bereit, sofort Sammelboxen aufzustellen, um dem öffentlichem Interesse Folge zu leisten und etwas für die Umwelt zu tun. Aufgrund dieser Situation gestaltete sich das AP 2 der LRD zäher als erwartet.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Öffentlichkeitsarbeit ist mit Erfolg angelaufen. Es gab daraufhin mehrere Anfragen von Kommunen und Gemeinden.

Es wurde eine Präsentationsmappe erstellt sowie eine eigene Webseite: <https://www.feuerzeugrecycling.de/>
Projektergebnisse wurden publiziert, für den Projektpartner wurde für weitere Werbemaßnahmen ein Flyer erstellt.

Fazit

Der Kooperationspartner konnte ab dem 01.04.2020 in die Projektphase eintreten (AP 2), der Bewilligungsempfänger hingegen zum 01.07.2020. Dennoch wurde aufgrund der Pressearbeit der DBU und der Ostfalia in der Öffentlichkeit große Resonanz erzeugt.

Das AP 1 ist mit Erfolg angelaufen und wird im angegebenen Zeitrahmen fertig gestellt. Die Untersuchungen zeigten, dass es mehrere Kunststoffe für die Gehäuse von Feuerzeugen gibt und sich dadurch zwei große Mengenströme aus SAN und POM sowie zwei kleine aus PC und PA bestimmen lassen.

Durch die zurückhaltende Einstellung der Betriebe, ausgediente Feuerzeuge anzunehmen, sollte die Notwendigkeit des Umweltschutzes weiter in den Fokus gerückt werden, um die Annahmefähigkeit zu erhöhen. An weiteren Maßnahmen wie das Einführen eines Pfand- oder Belohnungssystems wird gearbeitet.

Inhalt

Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	II
Diagrammverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	III
1 Zusammenfassung	1
1.1 Aufgabenstellung, Themenbereich, Betreuung	1
2 Bericht	4
2.1 Einführung/Motivation	4
2.2 Methodik/Vorgehensweise/Projektverlauf.....	4
2.3 Projektergebnisse	5
2.4 Öffentlichkeitsarbeit/Veröffentlichungen/Vorträge.....	33
2.5 Fazit.....	33
2.6 Ausblick	34
3 Literaturverzeichnis	35
4 Anhang	36
A 1 Bachelorthesis Die Bedeutung des Entschichtens von Einwegfeuerzeugen im Recyclingprozess	36
A 2 Forschungsarbeit Beschichtungen auf Einwegfeuerzeugen und ihre Bedeutung für das Recycling	40
A 3 Bachelorthesis Werkstoffliche Aufbereitung von Einwegfeuerzeugen	43
A 4 Prüfprotokoll Schwimm-Sink-Trennung	49
A 5 Bachelorthesis Optische Sortierung von Einwegfeuerzeugen	50
A 6 Forschungsarbeit Werkstoffliches Recycling von Einwegfeuerzeugen – Sortierverfahren für die Kunststoffgehäuse-Fraktion	54
A 7 Bachelorthesis Herstellung und Prüfung additiv gefertigter Prüfkörper aus Einwegfeuerzeug-Kunststoff	56
A 8 Forschungsarbeit Filamentherstellung und 3D-Druck von SAN und POM	60
A 9 Bachelorthesis Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Einwegfeuerzeug-Rezyklat	63
A 10 Forschungsarbeit Feuerzeugrecycling – Untersuchung von Stabfeuerzeugen	66

A 11 Bachelorthesis Feuerzeugrecyclinganlage: Von der Patentrecherche bis zum Prozessablauf.....	68
A 12 Forschungsarbeit Feuerzeugrecycling; Auffangen und Speichern der Restgase	72
A 13 Auswahl Zeitungen über das DBU-Projekt.....	75
A 14 Artikel im Recycling Magazin.....	76
A 15 Artikel Wolfsburger Allgemeine Zeitung	78
A 16 Flyer für Werbemaßnahmen.....	79

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mix aus Feuerzeugen	5
Abb. 2: Zerkleinerte Feuerzeuge	6
Abbildung 3: Prüfkörper aus Feuerzeugmaterial gemäß DIN EN ISO 527-1.....	6
Abbildung 4: Verträglichkeitsmatrix für thermoplastische Kunststoffe [2]	9
Abbildung 5: Massenanteile der unterschiedlich beschichteten SAN-Feuerzeuge in Prozent	10
Abbildung 6: Massenanteile der unterschiedlich beschichteten POM-Feuerzeuge in Prozent	10
Abbildung 7: Gemisch POM-SAN-Feuerzeug-Flakes	14
Abbildung 8: Massenbilanz Optischen Sortierung zur Erzeugung eines SAN-Produktes (Auszug aus dem Testbericht) [3].....	15
Abbildung 9: Gemisch von POM-SAN-Einwegfeuerzeugen zur Sortierung.....	15
Abbildung 10: Aussortierte POM-Feuerzeug	16
Abbildung 11: Aussortierte SAN-Feuerzeuge	16
Abbildung 12: Metallfraktion aus SAN-POM-Feuerzeugflakes.....	16
Abbildung 13: Haftversuch POM-H auf verschiedenen Untergründen	19
Abbildung 14: 70:30-Material haftet auf TPU-Matte, Druckschichten lösen sich	19
Abbildung 15: Aufbereitungsprozess vom Feuerzeug zum Regranulat.....	20
Abbildung 16: Feuerzeug-SAN-Filamente mit verschiedenen Anteilen ABS	20
Abbildung 17: 3D-gedruckter Flaschenöffner aus 100 % Feuerzeugmaterial.....	21
Abbildung 18: Probekörper aus SAN (Tyrl) ABS (Terluran) - Mischungen	21
Abbildung 19: "Kopfteil" Einwegfeuerzeug li. , Abbildung 20: "Kopfteil" Gasbehälter der Stabfeuerzeuge re. Abbildung 21: POM-Tankmaterial aus Gasbehälter Stabfeuerzeuge und Einwegfeuerzeuge	24

Abbildung 22: Vorgang Schwimm-Sink-Verfahren (SAN-Rezyklat).....	25
Abbildung 23: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von SAN-Neuware, SAN-Rezyklat und SAN-Neues-Feuerzeugmaterial.....	26
Abbildung 24: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von POM-Neuware und POM-Rezyklat	27
Abbildung 25: Dampfdrücke für Propan und Butan.....	29
Abbildung 26: Skizze Prozessablauf.....	30
Abbildung 27: Fließbild einer Pilotanlage für das Feuerzeugrecycling	31
Abbildung 28: Entworfenene Sammelbox des Kooperationspartner LRD	32

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Gesamtmenge Feuerzeuge mit unterschiedlichen Beschichtungen.....	7
Diagramm 2: Massenanteile der Einwegfeuerzeuge mit unterschiedlichen Beschichtungen .	8

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausschnitt aus dem Arbeits- und Zeitplan (AP 1 Ostfalia)	1
Tabelle 2: Ausschnitt aus dem Arbeits- und Zeitplan (AP 2 LRD)	2
Tabelle 3: Ausschnitt aus dem Arbeits- und Zeitplan (AP 3 Ostfalia und LRD)	3
Tabelle 4: Ausschnitt aus dem Arbeits- und Zeitplan (AP 4 Ostfalia)	3
Tabelle 5: Ausschnitt aus dem Arbeits- und Zeitplan (AP 5 Ostfalia und LRD)	4
Tabelle 6: Screening-Ergebnis der SAN-Proben mit Barcode-Etiketten.....	12
Tabelle 7: Screening-Ergebnis der POM-Proben mit Haftklebefolien.....	13
Tabelle 9: Gehäusematerial ausgewählter Stabfeuerzeuge.....	23

1 Zusammenfassung

Das Projekt ist von allen Seiten mit großem Engagement angelaufen. Allein durch die anfangs seitens der DBU und Ostfalia lancierten Pressemitteilungen während des ersten pandemiebedingten „Lockdowns“ wurde großes Interesse geweckt. Aus diesem Grund ist als erste Maßnahme eine eigene Webseite erstellt worden. Einige Kommunen haben spontan erklärt, in ihren eigenen Gebäuden Sammelstellen einrichten zu wollen. Firma Thees Kunststoffverarbeitung GmbH aus Dinklage hat sich direkt gemeldet und angeboten, die erzeugten Kunststofffraktionen aufkaufen zu wollen.

Das Thema spricht auch in großem Maße die Studierenden an. Es gibt zahlreiche Anfragen von studentischer Seite mitzuhelfen. So konnten fünf Studien- (bzw. Forschungsarbeiten) und sieben Bachelorarbeiten zum Erfolg des Projekts beitragen. Alle Arbeiten sind mit gut bis sehr gut abgeschlossen worden. Durch wöchentliche Online-Treffen ist der Austausch während und unmittelbar nach der Pandemie sehr eng und die jeweiligen Aufgaben können zielgerichtet bearbeitet werden.

Über den Verband Europäischer Feuerzeugimporteure (ELIAS) konnte der Kontakt zu einem der Weltmarktführer bei Feuerzeugen, der Firma BIC® aufgebaut werden.

Inhaltlich wurden die Projektbeteiligten zunehmend mit zwei entscheidenden Punkten konfrontiert:

- a) Die Behandlung der Feuerzeuge bedeutet im industriellen Maßstab, dass Explosionsschutzmaßnahmen getroffen werden müssen, da die Feuerzeuge nach Gebrauch Restgase enthalten.
- b) Die logistischen Herausforderungen sind grundsätzlich beherrschbar, jedoch hält sich bei potenziellen Sammelstellen die Bereitschaft, Sammelboxen aufzustellen in Grenzen.

1.1 Aufgabenstellung, Themenbereich, Betreuung

Tabelle 1: Ausschnitt aus dem Arbeits- und Zeitplan (AP 1 Ostfalia)

Arbeitspakete	2020			2021	
	II	III	IV	I	II
AP 1 Verfahrenstechnische Grundlagen					M
1.1 Vertiefte Markt- und Mengenrecherche					
1.2 Grundlagen "Aufbrechen der Feuerzeuge"					
1.3 Rückführung Restgase					
1.4 Grundlage "Sortieren der Bestandteile"					
1.5 Zusammenführen der Ergebnisse					

Das Arbeitspaket AP 1 „Verfahrenstechnische Grundlagen“ ist im vorgegebenen Zeitrahmen abgearbeitet worden. Die vertiefte Markt- und Mengenrecherche (1.1) ergab, dass es weit mehr Einwegfeuerzeuge auf dem Markt gibt als angenommen. Auch das Aufbrechen der Feuerzeuge (1.2) sowie das Sortieren der Bestandteile (1.4) bringt neue Ergebnisse. Für die Rückführung der Restgase (1.3) gibt es eine konkrete Lösung, welche sich im Laufe der Zeit herauskristallisiert hat sowie einen zweiten vielversprechenden Ansatz.

Tabelle 2: Ausschnitt aus dem Arbeits- und Zeitplan (AP 2 LRD)

Arbeitspakete	2020			2021				2022	
	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II
AP 2 Logistik und Lagerung								M2	M
2.1 Austausch mit SuperDrecksKesch® und anderen Sammelorganisationen									
2.2 Analyse und Erarbeitung der Maßnahmen, die bzgl. Logistik und Lagerung getroffen werden									
2.3 Auswahl und Verhandlungen mit potentiellen „Sammelorganisationen“									
2.4 Vorbereiten der Sammelstellen									
2.5 Schulung der Annahmestellen									
2.6 Organisation der Logistik									
2.7 Schulung der Logistik- und Lagermitarbeiter der									

Das Arbeitspaket AP 2 Logistik und Lagerung ist vom Kooperationspartner bearbeitet worden. Der Austausch mit der Firma SuperDrecksKesch® (2.1) wird kontinuierlich geführt und es werden weiterhin Feuerzeuglieferungen für Versuchszwecke erfolgen. Die Analyse und Erarbeitung der Maßnahmen, die bzgl. der Logistik und Lagerung durchgeführt werden müssen (2.2), sind erarbeitet worden und erste geeignete Sammelkartonagen nach dem Vorbild von SuperDrecksKesch® liegen vor und können bereits im kleinen Kreis verteilt und getestet werden. Lagerfläche für die Feuerzeuglieferungen sind vorhanden und die logistische Ausarbeitung mit geeigneten Fahrzeugen liegt vor. Die Auswahl von potenziellen „Sammelorganisationen“ (2.3) ist erfolgt und wird auch nach Beendigung der Förderphase mit Nachdruck vom Kooperationspartner weiterbetrieben. Damit unmittelbar hängen Vorbereitung und Schulung der Sammelstellen zusammen (2.4, 2.5). Aufgrund der Pandemie in 2020 und 2021 konnten diese beiden Punkte noch nicht umgesetzt werden. Die Organisation der Logistik (2.6) ist von Seiten der LRD erarbeitet und einsetzbar. Die Mitarbeiter des Kooperationspartners sind durch die verarbeiteten Mustermengen mit der Materie vertraut und geschult (2.7).

Tabelle 3: Ausschnitt aus dem Arbeits- und Zeitplan (AP 3 Ostfalia und LRD)

Arbeitspakete	2020			2021				2022	
	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II
AP 3 Technikumsanlage									
3.1 Maschinelle Umsetzung der in AP 1 erzielten Ergebnisse									
3.2 Aufbau und Test im Labor der Ostfalia									
3.3 Umbau/Erweiterung Labor- bzw. Technikumsanlage beim Industriepartner LRD									
3.4 Integration der Labor- bzw. Technikumsanlage in den betrieblichen Ablauf bei LRD									

Eine Umsetzung der im Arbeitspaket 1 erzielten Ergebnisse konnte mithilfe der studentischen Abschlussarbeiten weit über das geplante Maß hinaus erzielt werden. Zahlreiche Laboraufbauten, Varianten und Erweiterungen haben gezeigt, dass der Aufschluss der Feuerzeuge grundsätzlich machbar ist und weitgehend sortenreine Stoffströme erreichbar sind.

Nach Absprache sind – wie vereinbart – einzelne Anlagenelemente wie z.B. ein Zweiwellenzerkleinerer von LRD übernommen worden und bilden das Grundgerüst einer Technikumsanlage beim Kooperationspartner. Jedoch stellte sich im Laufe des Projekts heraus, dass aufwändige Explosionsschutzmaßnahmen für einen industriellen Betrieb aus Umwelt- und Arbeitssicherheitsgründen erforderlich sein werden. Eine solche Maßnahme bedeutet einen Kostenaufwand > 400 Tsd. € und konnte im Rahmen des Projekts nicht umgesetzt werden.

Tabelle 4: Ausschnitt aus dem Arbeits- und Zeitplan (AP 4 Ostfalia)

Arbeitspakete	2020			2021				2022	
	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II
AP 4 Innovative Produktideen									
4.1 Qualitätsuntersuchung und -optimierung des Kunststoffrezyklats									
4.2 Extrusionsversuche mit dem rückgewonnen SAN-Rezyklat									
4.3 Erzeugen von Filamenten für den 3D-Druck									
4.4 3D-Druck mit SAN-Rezyklat									

Bei den Arbeiten zum Arbeitspaket 4 konnte bestätigt werden, dass in den Einwegfeuerzeugen im Wesentlichen 2 Kunststoffe als Bodymaterial eingesetzt werden. Das sind zum einen Polyoxymethylen (POM) und zum anderen Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat (SAN). Der Weltmarktführer BIC setzt dabei auf POM. In diesem Projekt wird das Hauptaugenmerk auf SAN gelegt. Mit Hilfe zahlreicher Materialuntersuchungen und darauf basierender Materialoptimierungen (4.1) konnten das SAN-Rezyklat „fit gemacht“ werden zur Herstellung von Filamenten für den 3D-Druck (4.2 – 4.4).

Tabelle 5: Ausschnitt aus dem Arbeits- und Zeitplan (AP 5 Ostfalia und LRD)

Arbeitspakete	2020			2021				2022	
	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II
AP 5 Projektmanagement									
5.1 Austausch regelmäßige Treffen									
5.2 Statusreport, Berichterstattung									
5.3 Öffentlichkeitsarbeit									

Die Pandemie stellte auch besondere Herausforderungen an das Projektmanagement. Ein regelmäßiger, wöchentlicher Online-Austausch (AP 5.1) konnte etabliert werden. Immer wieder waren Externe eingeladen wie z.B. die Fa. Erdwich: Herr Gutmayr, Fa. Saperatec: Herr Meisel und Herr Dr. Kernbaum, Fa. TOMRA: Herr Brändle, ELIAS: Herr Etehat.

Erforderliche Berichte (Zwischenbericht, Antrag auf kostenneutrale Verlängerung) (AP 5.2) wurden termingerecht eingereicht.

Die Öffentlichkeitsarbeit (AP 5.3) erfolgte über die eigene Webseite, Zeitungsartikel, und einem Bericht im Recyclingmagazin [1].

2 Bericht

2.1 Einführung/Motivation

Trotz der Umstände der Pandemie, und dem dadurch eingeschränkten Zugang zur Hochschule sowie der eingeschränkten Zusammenarbeit im Labor war die Motivation hoch, die Ziele zu erreichen. Durch die vielen neuen Kontakte und Ergebnisse gestaltete sich das Projekt weiterhin sehr interessant.

Auch auf Seiten des Kooperationspartners LRD war und ist die Motivation weiterhin sehr gut trotz der Schwierigkeit, Discounter, Drogeriemärkte, Tankstellen und andere in Frage kommende Stellen zur Einrichtung einer Sammelstelle für Feuerzeuge zu überzeugen.

2.2 Methodik/Vorgehensweise/Projektverlauf

Die Vorgehensweise im Rahmen von wöchentlichen Online-Treffen ermöglichte, dass die Aufgaben zielgerichtet und effizient bearbeitet werden konnten. Dies ermöglichte einen reibungslosen Projektverlauf. Auf aktuelle Fragen konnte schnell reagiert werden und somit wurden Lösungen schnell gefunden. Die Online-Treffen konnten sowohl für den Austausch von Ergebnissen und Informationen zwischen den Partnern und Studierenden genutzt werden als auch für Gespräche und Diskussionen mit Projektexternen. Da sich diese Form der Kommunikation bewährt hatte, wurde diese Methode bis zum Projektende genutzt.

2.3 Projektergebnisse

Unterauftrag Fa. Saperatec: In einem Screening zum Entfernen der Beschichtungen bzw. Oberflächen auf Feuerzeugen wurde festgestellt, dass sich grundsätzlich verschiedene Flüssigkeiten eignen, um anhaftende Etiketten und/oder Folien entfernen zu können. Dies ist Voraussetzung dafür, dass der Gehäusekunststoff rein zurückgewonnen werden kann. Die Ergebnisse flossen in die Arbeit von Frau Puderbach ein (siehe Anhang 1).

Anfrage Firma Erdwich: Erdwich ist bekannt als Hersteller von Shreddern und Anlagen zur Behandlung von ausgedienten Kühlgeräten. Diese Anlagen arbeiten unter Unterdruck, um austretendes Kühlmedium aufzufangen. Es gibt also Erfahrungen mit dem Zerkleinern und gleichzeitigem Auffangen austretender Gase. Die Anfrage ergab, dass eine Anlage für Feuerzeuge planbar ist, die Kosten hierfür jedoch liegen im sechsstelligen Bereich.

Ohne die Mitarbeit engagierter Studierender in diesem Projekt wäre die ehrgeizigen Ziele nicht erreicht worden. Deshalb wird im Folgenden hier der Platz genutzt, um die Arbeiten im Einzelnen kurz vorzustellen. Dabei konnten alle wesentlichen wissenschaftlichen Aspekte des Projekts bearbeitet werden.

Bachelorarbeit Vincent Leib¹: Aufbrechen der Feuerzeuge, Sortieren der Bestandteile, Verarbeitung des Schredder-Materials, Aufarbeitung der Kunststoffe zur Weiterverarbeitung in Granulat. Verspritzen des Granulats zu Normprüfstäben und Ermitteln der mechanischen Eigenschaften (s. Anhang 4). Die Abbildung 1 zeigt einen Teil der gelieferten Feuerzeuge der Firma SuperDrecksKëscht®. In Abbildung 2 sind die zerkleinerten Feuerzeuge aus derselben Fraktion zu sehen.



Abbildung 1: Mix aus Feuerzeugen

¹ Im Anhang 3



Abb. 2: Zerkleinerte Feuerzeuge

Nach dem Zerkleinern folgte eine Schwimm-Sink-Trennung in Salzwasser, um eine Trennung der Kunststoffe SAN und POM zu erreichen. Aus der erhaltenen SAN-Trenn-Fraktion sind mit einem Campus – Normwerkzeug Prüfkörper spritzgegossen worden (Abbildung 3).



Abbildung 3: Prüfkörper aus Feuerzeugmaterial gemäß DIN EN ISO 527-1

Die dazugehörigen Kennwerte der Zugprüfungen können den Prüfprotokollen im Anhang 4 entnommen werden. Die ermittelten mechanischen Eigenschaften² sind mit den Eigenschaften entsprechender, herkömmlicher Materialien³ vergleichbar.

Bachelor⁴- und Forschungsarbeit⁵ Helena Puderbach: Im Rahmen dieser Arbeiten sollte geklärt werden wie sich eine Sammelfraktion zusammensetzt und welche Rolle die Aufdrucke

² Prüfprotokoll: E-Modul von SAN bei 3850 MPa und POM bei 2940 MPa.

³ Datenblatt: E-Modul von SAN 3900 MPa und POM im Bereich 2800 bis 3200 MPa, je nach Hersteller

⁴ Deckblatt und Inhaltsverzeichnis Anhang 1

⁵ Deckblatt und Inhaltsverzeichnis Anhang 2

und Beschichtungen im Hinblick auf das Recycling und die zu erwartenden Eigenschaften zurückgewonnener Kunststoffe aus alten Einwegfeuerzeugen auswirkt. Die Altfeuerzeuge sind eine Querschnittsfraktion und entstammten aus den Luxemburger Sammlungen der Firma SuperDrecksKëscht®. Dem Diagramm 1 kann entnommen werden, dass eine Gesamtmenge von knapp 39 Kg zur Verfügung gestellt wurde. Weiterhin zeigt das Diagramm 1 die verschiedenen Beschichtungen innerhalb der Gesamtmenge.

Für die Untersuchung werden die Metall-Stabfeuerzeuge, Kunststoff-Stabfeuerzeuge sowie die Metallfeuerzeuge zuvor händisch aussortiert. Zur weiteren Untersuchung werden die unbeschichteten Feuerzeuge mit 10,65 Kg und die beschichteten Feuerzeuge mit 12,14 Kg betrachtet.

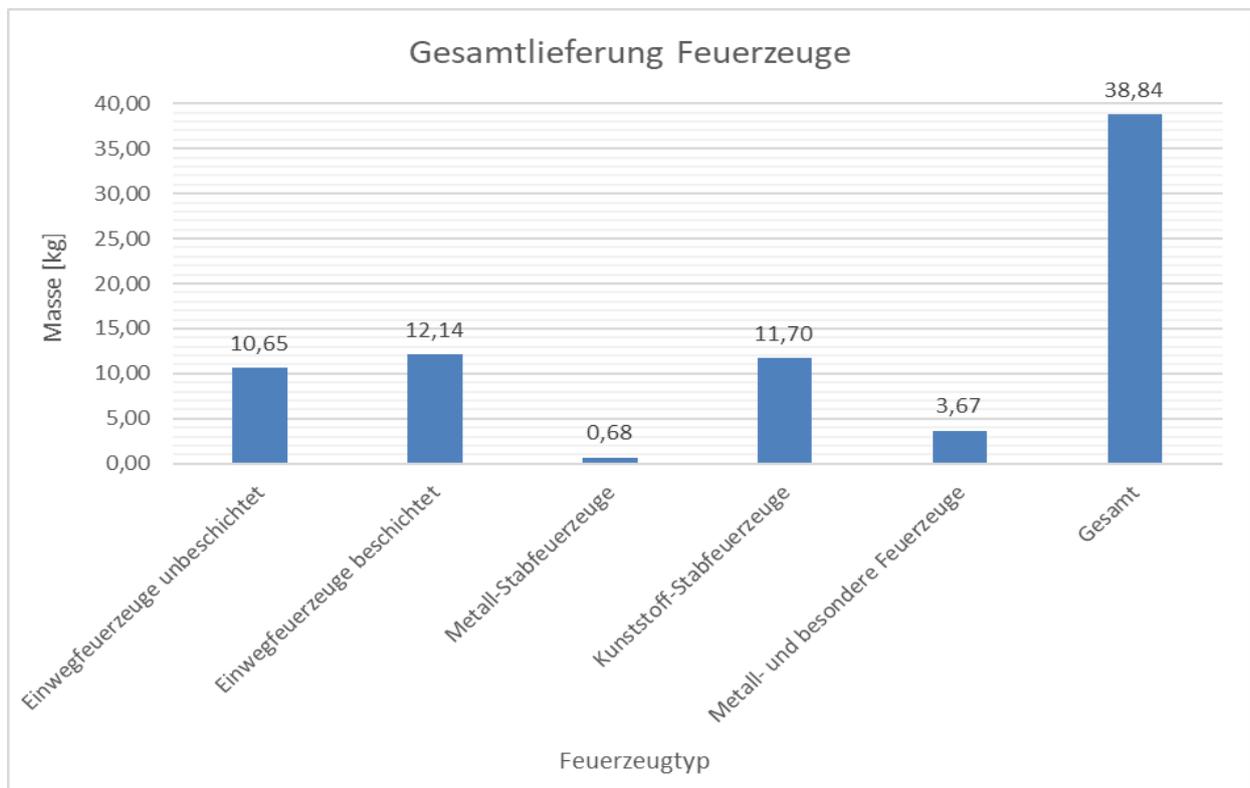


Diagramm 1: Gesamtmenge an Feuerzeugen mit unterschiedlichen Beschichtungen wie von SuperDrecksKëscht® geliefert

Im folgenden Diagramm 2 sind die Massenanteile der Feuerzeuge mit unterschiedlichen Beschichtungen in Prozent dargestellt. Unbeschichtete Feuerzeuge waren mit 47 % vertreten, bedruckte Feuerzeuge mit 26 %. 17 % der Feuerzeuge waren mit Haftklebefolien, an 4 % hafteten Barcode-Etiketten an, jeweils 3 % waren mit Schrumpf-Sleeve-Folien ausgestattet und waren mit zusätzlichem Etikett versehen.

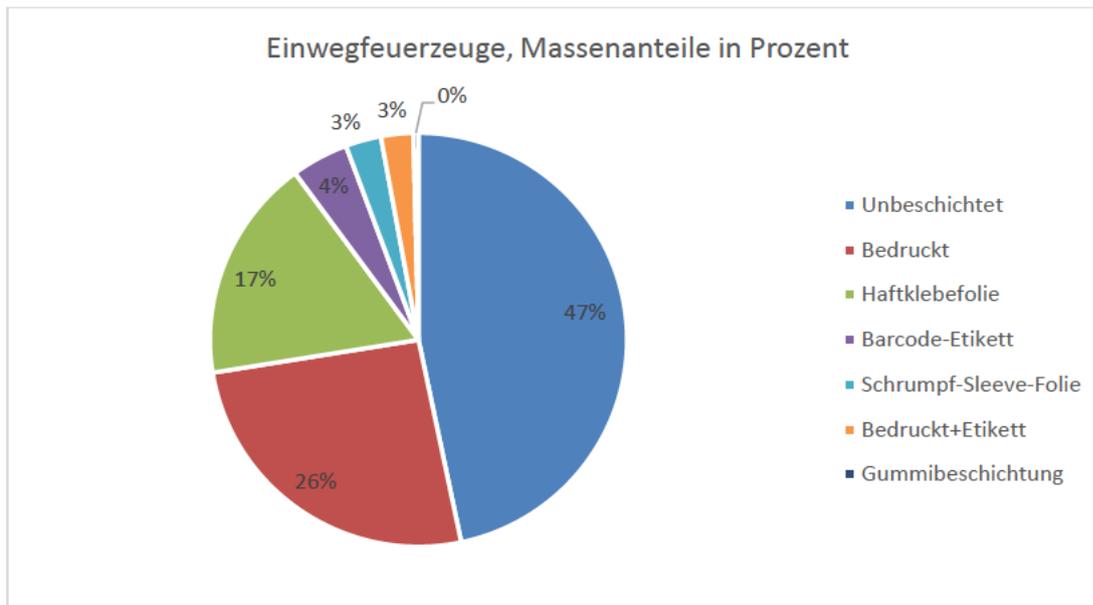


Diagramm 2: Massenanteile in Prozent der Einwegfeuerzeuge mit unterschiedlichen Beschichtungen

Mit Hilfe der IR-Spektroskopie wurden die verschiedenen Beschichtungen untersucht. Es zeigt sich, dass die Beschichtungen aus Kunststoff, Papier, Lacken und Kautschuken bestehen. Viele Feuerzeug-Beschichtungen sind zudem mehrschichtig aufgebaut und lassen sich nur mit hohem Aufwand entfernen.

Die Analysen der Beschichtungsmaterialien ergeben, dass die Haftklebefolien aus PP-Folien und Acrylat-Haftklebstoffen aufgebaut sind. Die Barcode-Etiketten bestehen aus Papier, welches z. T. mit PP-Folie laminiert ist. Bei den Haftklebstoffen der Barcode-Etiketten handelt es sich überwiegend um acrylatbasierte oder kautschukbasierte Klebstoffe. Das Material der Sleeve-Folien wurde bei der Analyse als PVC bzw. Vinylchlorid-Copolymer identifiziert. Die Bedruckungen bestehen aus diversen Druckfarbenarten, die u. a. Acrylharze, Aldehydharz oder Nitrocellulose als Basispolymer enthalten. Weiterhin wiesen die Ergebnisse der Analyse darauf hin, dass das Markenlogo auf den BIC®-Feuerzeugen keine Bedruckung ist, sondern ein In-Mould-Label aus PMMA. Die sogenannten Gummierungen (Soft Touch Oberfläche und Gummihülle) werden nicht weiter als Beschichtungsart berücksichtigt, da die Soft Touch Oberfläche eine Farbbeschichtung ist und sich unter der Hülle ein mit Haftklebefolie beschichtetes Feuerzeug befindet.

Laut Verträglichkeitsmatrix (vergl. Abbildung 4) sind die Beschichtungsmaterialien PMMA, PP und PVC unverträglich mit dem Gehäusekunststoff POM (rot umrandet). Mit dem Gehäusekunststoff SAN sind PVC und PMMA hingegen kompatibel (grün umrandet), PP jedoch ebenfalls nicht (rot umrandet).

		Zusatzwerkstoff																
		ABS	EP	HIPS	PA	PBTP	PC	PE	PETP	PMMA	POM	PP	PS	PUR	PVC	SAN	PC+ABS	PC+PBTP
Grundwerkstoff	ABS	●	⊖	○	○	⊖	●	○	⊖	●	⊖	○	○	○	○	○	●	○
	EP	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	HIPS	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	PA	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	PBTP	○	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●
	PC	●	⊖	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	●
	PE	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	PETP	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	PMMA	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	POM	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	PP	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	PS	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	PUR	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	PVC	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	SAN	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	PC+ABS	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
PC+PBTP	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

● verträglich
 ⊖ beschränkt verträglich
 ○ in kleinen Mengen verträglich
 ○ nicht verträglich

Abbildung 4: Verträglichkeitsmatrix für thermoplastische Kunststoffe [2]

Das Papier der Barcode-Etiketten sowie die Haftklebefolien stellen eine Herausforderung dar, da sie nicht mit den Gehäusekunststoffen aufgeschmolzen werden können. Für ein sortenreines Rezyklat ist es unerlässlich, diese Beschichtungen zu entfernen. Dies führt zu erhöhtem Reinigungsaufwand.

Der Anteil der Beschichtungsmaterialien an der Gesamtfeuerzeugmasse wurde ebenfalls an repräsentativen Stichproben von ausgedienten SAN- und POM-Feuerzeugen ermittelt. So zeigt Abbildung 5 den Anteil beschichteter SAN-Feuerzeuge sowie auch die Art der Beschichtungen. Rund 47 % der SAN-Feuerzeuge sind mit einer Beschichtung versehen, 17,95 % sind bedruckt, 15,62 % besitzen eine Haftklebefolie, 8,28 % haben ein Barcode-Etikett, 3,87 % sind mit einer Sleeve-Folie ummantelt und 0,95 % sind bedruckt mit zusätzlichem Etikett.

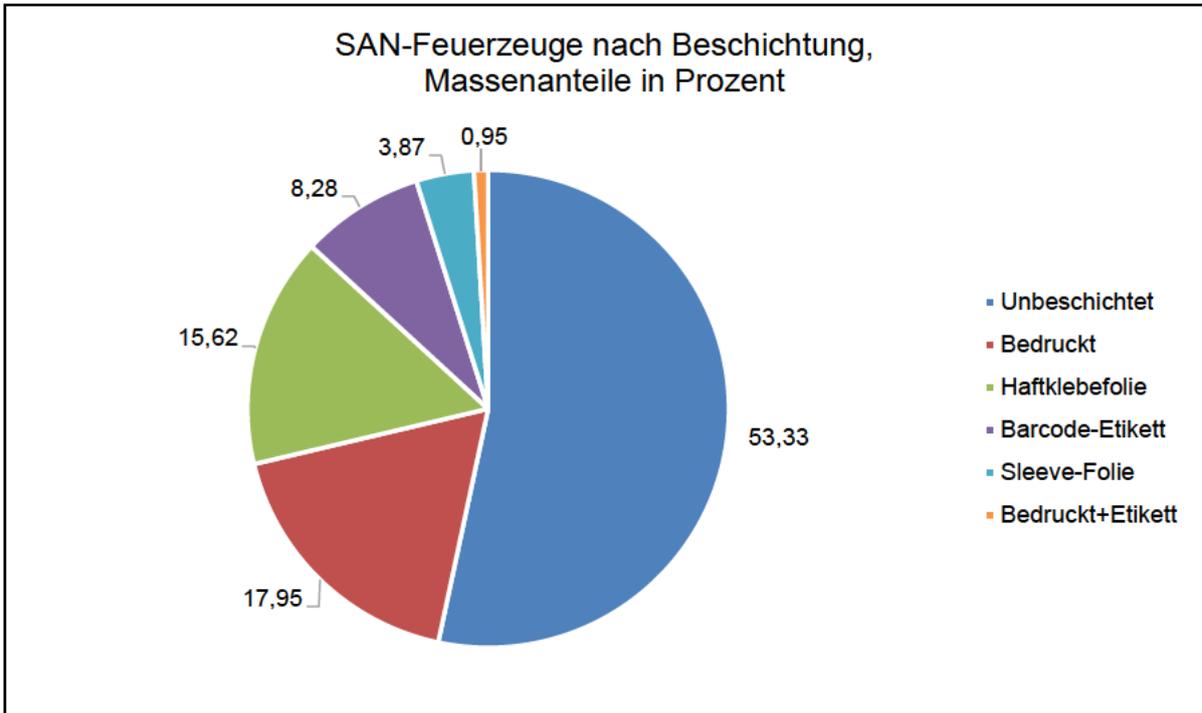


Abbildung 5: Massenanteile der unterschiedlich beschichteten SAN-Feuerzeuge in Prozent

Die POM-Feuerzeugfraktion bestand aus Feuerzeugen der Marken BIC® und DjEEP. In der POM-Fraktion weisen rund 90 % der Feuerzeuge eine Beschichtung auf (Abbildung 6). Dies ist darauf zurück zu führen, dass alle BIC®-Feuerzeuge mit dem BIC®-Logo gekennzeichnet sind.

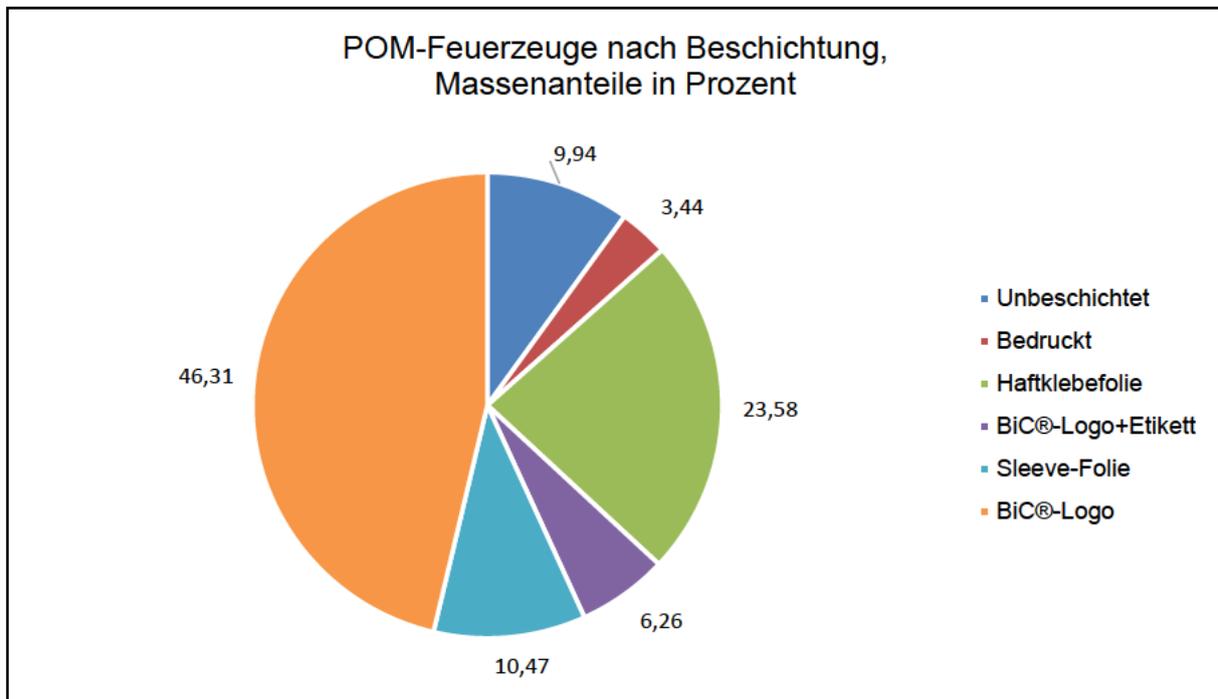


Abbildung 6: Massenanteile der unterschiedlich beschichteten POM-Feuerzeuge in Prozent

Der Anteil der Beschichtungsmaterialien setzt sich wie folgt zusammen. Die unbeschichteten POM-Feuerzeuge wurden mit 9,94 % ermittelt, 3,44 % waren bedruckt, 23,58

% besaßen eine Haftklebefolie, 6,26 % besaßen das BIC®-Logo und ein zusätzliches Etikett, 10,47 % waren mit einer Sleeve-Folie ummantelt und 46,31 % besaßen das BIC®-Logo.

An den ermittelten Beschichtungsanteile ist zu erkennen, dass die Haftklebefolien die häufigste Beschichtungsart in der SAN- und der POM-Fraktion darstellen, gefolgt von den Sleeve-Folien und den Barcode-Etiketten. Allein durch das Entfernen der Haftklebefolien könnte die Verunreinigung der SAN- und POM-Rezyklate erheblich reduziert werden.

Bei den durchgeführten Entschichtungsversuchen stellte sich heraus, dass sich die Sleeve-Folien und einige der Barcode-Etiketten ohne zusätzlichen Aufwand bereits bei der Zerkleinerung von den Einwegfeuerzeugen abgelöst wurden.

Weitere Barcode-Etiketten, die Haftklebefolien und die Bedruckungen können nur durch das Lösen der Klebstoffe und Druckfarben entfernt werden. Eine mögliche Methode dafür ist, die zerkleinerten Gehäusekunststoffe einer Wäsche in geeigneten Trennflüssigkeiten zu unterziehen. Die Eignung verschiedener Trennflüssigkeiten wurde in mehreren Laborversuchen geprüft.

Dabei zeigte sich, dass es nicht möglich ist, die Klebstoffe und Druckfarben mit einfachen Mitteln, wie beispielsweise Wasser oder Seifenlauge, zu lösen. Mit einer basisch eingestellten Mikroemulsion aus aromatischem Lösungsmittel der Firma Saperatec GmbH gelang es, die Haftklebefolien und Barcode-Etiketten vollständig und die Druckfarben teilweise von den Gehäusekunststoffen SAN und POM abzulösen.

Die folgende Tabelle 6 zeigt das Screening-Ergebnis zur Ablösung der SAN-Proben mit verschiedenen Trennflüssigkeiten. Die Haftklebefolien von SAN-Feuerzeugen ließen sich vollständig mit Reinigungsbenzin (rot umrandet) und teilweise mit Isopropanol (rot umrandet) oder Ethanol 96 % (rot umrandet) ablösen. Auch die Barcode-Etiketten können von SAN-Feuerzeugen größtenteils mit Reinigungsbenzin, Isopropanol und Ethanol (96 %) entfernt werden. Die Ergebnisse der Screening-Reihe mit SAN-Feuerzeugen werden nach den Beschichtungsarten in den Tabellen 27 bis 29 dargestellt.

Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt in den Tabellen mit:

- O = Die Beschichtung ist nach Einwirken des Lösungs-/Reinigungsmittels unverändert.
- + = Die Beschichtung ist nach Einwirken des Lösungs-/Reinigungsmittels leicht angelöst bzw. bei Papier-Etiketten leicht aufgeweicht.
- ++ = Die Beschichtung ist nach Einwirken des Lösungs-/Reinigungsmittels teilweise abgelöst bzw. bei Papier-Etiketten stark aufgeweicht.
- +++ = Die Beschichtung ist nach Einwirken des Lösungs-/Reinigungsmittels vollständig abgelöst bzw. bei Papier-Etiketten vollständig aufgelöst.

Grüne Felder geben die besten Ergebnisse wieder.

Tabelle 6: Screening-Ergebnis der SAN-Proben mit Barcode-Etiketten

Trennflüssigkeit		Raumtemperatur			50 °C		70 °C	
		2 h	4 h	24 h	2 h	4 h	2 h	4 h
1	Destilliertes Wasser	+	+ *	++	+	+	+	+
2	Isopropanol	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++ *
3	Verdünnte Natronlauge	+	+ *	++	++	++	++	+++
4	Kernseifenlösung	+	+ *	+	++	++	++	+++
5	Reinigungsbenzin	+++	+	+++	++	+++ *	++ *	+++ *
6	Ethanol 96 %	+	+	++	+++	+++	+++	++
7	Methanol	+ *	+ *	++	+	++	++	++
8	Konzentrierte Ammoniaklösung 25 %	++	++	++	++	++	++	++
9	Verdünnte Ammoniaklösung	+	++	++	+ *	++	++	+
10	Geschirrspülreiniger-Lösung 0,4 g/200 ml	+	++	++	++ *	++	+	++
11	Geschirrspülreiniger-Lösung 0,8 g/200 ml	+	++	++	++	++	++	++

Von POM-Feuerzeugen lassen sich die Haftklebefolien am besten mit Reinigungsbenzin, Ethylacetat, Toluol oder Xylol ablösen, siehe dazu Tabelle 7. Das Entfernen der Barcode-Etiketten von POM-Feuerzeugen gelang ebenfalls sehr gut mit Ethylacetat, Toluol oder Xylol. Die Bedruckungen konnten mit den getesteten Lösungsmitteln sowohl von SAN- als auch von POM-Feuerzeugen nur in geringem Maße abgelöst werden. Darüber hinaus wurde bei den Versuchen beobachtet, dass das Ablösen von Haftklebefolien und Barcode-Etiketten in den Lösungsmitteln bei Raumtemperatur z. T. mehr als vier Stunden dauert. Durch Erwärmen der Lösungsmittel und das Erzeugen von Reibung zwischen den Kunststoffteilchen durch Rühren kann der Trennprozess beschleunigt werden.

Tabelle 7: Screening-Ergebnis der POM-Proben mit Haftklebefolien

Trennflüssigkeit		Raumtemperatur			50 °C		70 °C	
		2 h	4 h	24 h	2 h	4 h	2 h	4 h
1	Destilliertes Wasser	○	○	○	○	○	○	○
2	Isopropanol	+	+	+	+	+++	++	++
3	Verdünnte Natronlauge	○	○	○	○	++	○	+
4	Ethylacetat	+++	+++	+++	+++	++	+++	+++
5	Reinigungsbenzin	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
6	Ethanol 96 %	○	+	+	+	○	++	+
7	Methanol	+	+	+	++	○	+++	++
8	Aceton	+	+++	++	+++	+++	++	+++
9	Toluol	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
10	Xylol	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
11	Geschirrspülreiniger-Lösung 0,8 g/200 ml	○	○	○	○	+	○	○
12	Kernseifenlösung	○	○	○	○	+	○	+

Am wichtigsten ist das Entfernen von Haftklebefolien, da diese den größten Anteil der Beschichtungsmasse ausmachen.

Die Ergebnisse der zeigen, dass das Entschichten von Einwegfeuerzeugen weitestgehend möglich ist. Das Entfernen von Sleeve-Folien wäre im Recyclingprozess ohne einen zusätzlichen Prozessschritt umsetzbar, da sich diese ohne Weiteres bei der Zerkleinerung der Feuerzeuge ablösen. Für das Entfernen von Haftklebefolien, Barcode-Etiketten und Bedruckungen wäre ein weiterer Prozessschritt erforderlich. Das bedeutet, dass mit dem Entfernen der Beschichtungen ein erheblicher Zeitaufwand, der Einsatz großer Mengen an Lösungsmitteln sowie ein erhöhter Energieverbrauch einhergehen würden. Der Lösungsmittel- und Energieverbrauch wäre zum einen ökologisch bedenklich, zum anderen würden dadurch zusätzliche Kosten entstehen.

Bachelor⁶- und Forschungsarbeit⁷ Alina Gase: Gegenstand dieser Arbeiten war die optische Sortierung von ganzen und zerkleinerten Feuerzeugen unter Nutzung der Nahinfrarottechnik.

⁶ Deckblatt und Inhaltsverzeichnis Anhang 5

⁷ Deckblatt und Inhaltsverzeichnis Anhang 6

Es wurden umfangreiche Untersuchungen z.B. im Technikum der Firma TOMRA Sorting GmbH an ganzen und zerkleinerten Feuerzeugen durchgeführt.

Abbildung 7 zeigt beispielhaft eine bei TOMRA im Technikum weiter sortierte Fraktion bestehend aus einem SAN-POM-Gemisch zerkleinerter Feuerzeuge. Das Ergebnis ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Stoffströme wurden zuerst magnetisch von FE-Metallen befreit sowie im mit Hilfe der Wirbelstromabscheidung von NE-Metallen (vergl. Abbildung 13). Danach folgte eine Siebung, um Partikel von 0 bis 2 mm zu entfernen, da die Kameras Partikel kleiner 2 mm nicht erfassen. Zur optischen Sortierung konnten auf diesem Weg 6 kg Material vorbereitet werden. Wie die Massenbilanz (Abbildung 8) zeigen konnte wurde nach zwei Sortierschritten ein SAN-Produkt im Umfang von 3 kg separiert. Weiterhin kann der Massenbilanz entnommen werden, dass nach fünf Sortierschritten ein POM-Produkt mit einem Gewicht von 0,5 kg separiert wurde. Insgesamt ergab sich eine Ausbeute von 58% Kunststoff. Aus Voruntersuchungen ist bekannt, dass rund 2/3 eines Feuerzeugs aus Kunststoff besteht (Tank). Insofern bestätigt das hier erzielte Ergebnis die Ausgangssituation.



Abbildung 7: Gemisch POM-SAN-Feuerzeug-Flakes

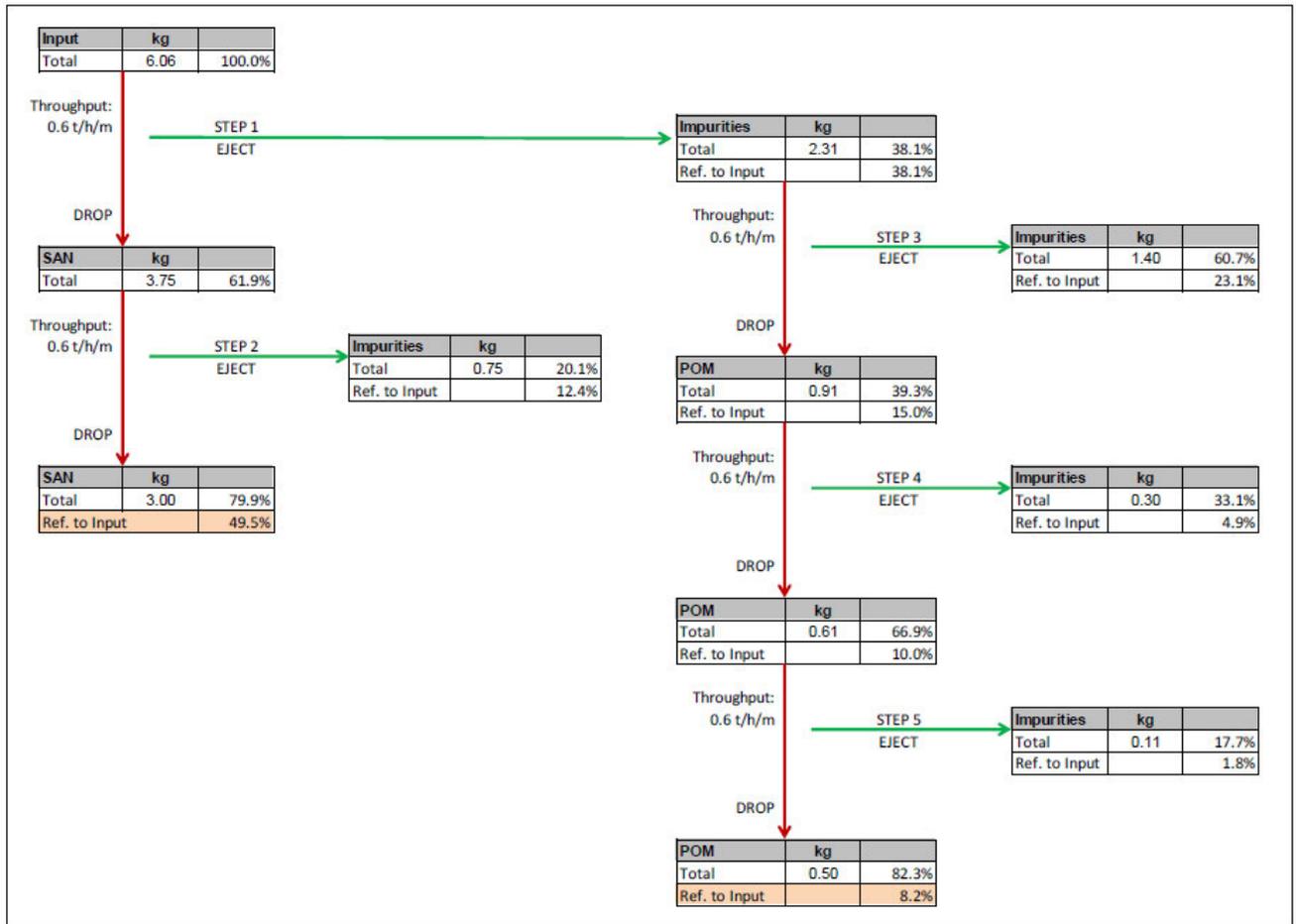


Abbildung 8: Massenbilanz Optischen Sortierung zur Erzeugung eines SAN-Produktes (Auszug aus dem Testbericht) [3]

Ähnlich aussichtsreiche Ergebnisse ergaben die Sortierungen ganzer Feuerzeuge (siehe Abbildungen 9 – 11). Detaillierte Ergebnisse findet man in [3].



Abbildung 9: Gemisch von POM-SAN-Einwegfeuerzeugen zur Sortierung

Abbildung 10: Aussortierte POM-Feuerzeug



Abbildung 11: Aussortierte SAN-Feuerzeuge



Interessant sind die Ergebnisse zur Sortierung ganzer, nicht zerkleinerter Feuerzeuge auch aus folgendem Gesichtspunkt: Am Ende des Projekts stellte sich heraus, dass der finanzielle Aufwand, der mit der Zerkleinerung nicht 100%ig entleerter Feuerzeuge einhergeht, aufgrund des Ex-Schutzes die Wirtschaftlichkeit des Feuerzeugrecyclings infrage stellen kann. Insofern kam die Überlegung zunächst komplette Feuerzeuge zu sortieren, dann zu vereinzeln und zu entleeren bevor zerkleinert und sortiert wird.



Abbildung 12: Metallfraktion aus SAN-POM-Feuerzeugflakes

In jedem Fall zeigt die Arbeit von A. Gase, dass eine Zuschaltung magnetischer und induktiver Metallabscheidern unerlässlich sind im Hinblick auf die Entfrachtung der in den Feuerzeugen enthaltenen Metalle (Abbildung 12).

Bachelor⁸- und Forschungsarbeit⁹ Uljana Möser: Filamentherstellung und 3D-Druck von SAN und POM, Qualitätsuntersuchungen, Herstellen von Filamenten und 3D-Druck, additiv gefertigte Normprüfstäbe.

POM und SAN werden hauptsächlich mittels Spritzgusses verarbeitet. Eine weitere Verarbeitungsmöglichkeit ist die Extrusion. Hier werden plastisch verformbare Werkstoffe unter Druck und meist mit hoher Temperatur kontinuierlich aus einer formgebenden Düse herausgepresst. Die Temperaturen für die Extrusion von POM und SAN liegen zwischen 180 °C und 230 °C. Für die Herstellung von Filamenten als Vormaterial für das FFF- bzw. FDM-Drucken werden ein Extruder, eine bzw. zwei Kühlwannen, ein Durchmesser-Messgerät, ein Abzugsgerät und ein Wickelautomat benötigt. Aus dem Zusammenspiel von Abzugsgerät und Einstellungen des Extruders wie zum Beispiel die Schneckendrehzahl ergibt sich der Filamentdurchmesser. Nur ein möglichst konstanter Filamentdurchmesser ermöglicht ein einwandfreies Drucken.

Die Recherchen von U. Möser zeigten, dass die Herstellung eines maßhaltigen POM-Filaments in der Literatur beschrieben ist. Auch eine Erzeugung von Filament aus SAN ist grundsätzlich realisierbar.

Bei dem FFF-Verfahren wird ein thermoplastisches Filament einer Düse zugeführt und über die Schmelztemperatur erhitzt. Anschließend wird der aufgeschmolzene Thermoplast auf einer Bauplattform schichtweise nach der vorgegebenen Bauteilkontur aufgetragen. Schwierigkeiten, die dabei auftreten könnten, sind Materialschumpfung, Warping, schlechte Haftung auf der Druckplatte (siehe dazu Abbildung 13), Unterextrusion, verstopfte Düse und Fadenbildung. Diese Probleme lassen sich im Allgemeinen durch Anpassungen der Temperatur und der Druckgeschwindigkeit sowie weiteren Maßnahmen verhindern.

Die Problematik der schlechten Druckbetthaftung zeigte sich bei den Untersuchungen auch bei dem 3D-Drucken mit POM. Der Einsatz spezieller Druckbettoberflächen sowie eine Druckplattenheizung von 120 °C bis 150 °C konnte der Problematik entgegenwirken. Die Drucktemperaturen befinden sich zwischen 190 °C und 230 °C, die Druckgeschwindigkeit lag bei 30 mm/s. Als 3D-Druckmaterial wird in der Praxis POM-Copolymerisat hinsichtlich seiner besseren Extrusionseigenschaften häufiger verwendet als das Homopolymerisat. Bei den Feuerzeugbody's handelt es sich um Homopolymerisat.

⁸ Deckblatt und Inhaltsverzeichnis siehe Anhang 7

⁹ Deckblatt und Inhaltsverzeichnis siehe Anhang 8

SAN wird oft mit ABS gleichgesetzt, da beide eng verwandt sind und ABS der geläufigere Filamentwerkstoff ist. Die Drucktemperatur von SAN Filament soll mit 230 °C bis 260 °C im Bereich von ABS liegen. Aufgrund der hohen Sprödigkeit von SAN sollte das Filament nicht über harte Umlenkungen geführt werden und neigt dazu, sich von der Spule abzuwickeln. Positiv hervorzuheben ist, dass die Haftung zwischen den Schichten gut ausgeprägt und auch die gedruckte Oberfläche sehr glatt ist.

Abschließend ist anhand der Recherchen festzuhalten, dass beide Materialien extrudier- und unter bestimmten Bedingungen verdruckbar sind. Dementsprechend ergibt sich ein starkes Aufwertungspotenzial für POM und SAN, da die additive Fertigung eine immer bedeutsamere Rolle in der Verarbeitung von Kunststoffen spielt. Anhand analytischer Untersuchungen von Feuerzeugtanks und praktischen Durchführungen zur Filament-Extrusion als auch zum 3D-Druck der beiden Kunststoffe konnte die Verdruckbarkeit in beiden Fällen untersucht werden. Die exakten Kunststofftypen, die in der Feuerzeugindustrie eingesetzt werden, konnten nicht ermittelt werden. Die Analyse der luxemburgischen Muster zeigen, dass SAN mit ca. 80 % das höchste Aufkommen an eingesammelten Feuerzeugen darstellt. POM-H mit ca. 12 % und PA 66 stellten 1 % der eingesammelten Kunststofffeuerzeuge dar. Aufgrund dieses Ergebnisses wurde SAN in den Fokus genommen.

Um die grundsätzliche Druckfähigkeit der beiden Kunststoffe zu untersuchen und eine Referenz zu aufgearbeiteten Feuerzeug-Kunststoffen zu erhalten, wurden die Neeware-Granulate Tyril™ 905 (SAN) und Delrin® 100 NC010 (POM-H) als mutmaßliche Vergleichstypen erworben. Damit die beiden Materialien verdruckt werden konnten, wurden sie über eine Extrusionsanlage zu Filament verarbeitet. Mit einer Extruder-Temperatur von 220 °C, einer Abzugsgeschwindigkeit zwischen 18 m/min und 20,5 m/min und einer Schneckendrehzahl von 50 U/min wurde ein in verdruckbares Filament hergestellt. Das erzeugte Filament wies eine hohe Steifigkeit und Sprödigkeit auf, was sich negativ auf den Druckprozess auswirkte. Bei zu geringen Biegeradien kam es zum Bruch des Halbzeugs. Für eine Minimierung der Steifigkeit wurden daher weitere Filamente aus SAN+ABS-Mischungen hergestellt. Hierfür wurden vorweg Blends mit einem 10%igen, 20%igen und 30%igen Anteil an Terluran® HI-10 (ABS) produziert. In der Handhabung zeigte sich das 70:30-Blend am biegsamsten, was die Einführung in den 3D-Drucker begünstigte.

Anschließend wurden die Filamente mittels der Fused Filament Fabrication (FFF) zu Normprüfkörpern verdruckt. Der 3D-Druck der Tyril-Blends konnte nach der Parameterfindung ohne Komplikationen durchgeführt werden. Nach Ermittlung der idealen Druckparameter konnten Prüfstäbe mit einer sauberen und lückenlosen Oberfläche erzeugt werden. Zusätzlich wurde eine BuildTak-Dauerdruckplatte verwendet, um die Haftung auf dem Drucktisch zu gewährleisten. Allein die Sprödigkeit und Steifigkeit des Materials erschwerte die 3D-

Druckprozesse, da die Filamente sich eigenständig von der Spule wickelten, sich verhakten und teilweise brachen.

Der 3D-Druck des POM-H erzielte keine qualitativ guten Druckergebnisse. Die erste Druckschicht des Kunststoffes weist auf keinem der verwendeten Untergründe siehe Abbildung 14 eine ausreichende Haftung auf.



Abbildung 13: Haftversuch POM-H auf verschiedenen Untergründen

Lediglich das 30:70-Blend haftete auf einer TPU-Dauerdruckmatte siehe Abbildung 14. Wiederrum haftete die zweite Druckschicht des Blends nicht vollständig auf der ersten. Infolge der unzureichenden Haftung zwischen den Druckschichten konnte kein 3D-Druckmodell aus Delrin mittels Ultimaker 3 erstellt werden.



Abbildung 14: 70:30-Material haftet auf TPU-Matte, Druckschichten lösen sich

Es folgte die Bestellung einer Monocharge an neuen Feuerzeugen mit SAN-Tanks, um das Original-Feuerzeug-Material auf Druckbarkeit zu überprüfen und die mechanischen Eigenschaften mit der Neuware (Tyril) zu vergleichen. Nach der Aufbereitung der

Feuerzeugcharge, die aus Entgasung, Demontage, Reinigung, Zerkleinerung und Granulierung bestand und in der Abbildung 15 dargestellt ist, wurde das Regranulat sowie die Neuware zu Filamenten extrudiert. Ebenso wurden aufgrund der Sprödigkeit Blends aus dem Feuerzeug-SAN mit ABS (Terluran) hergestellt.

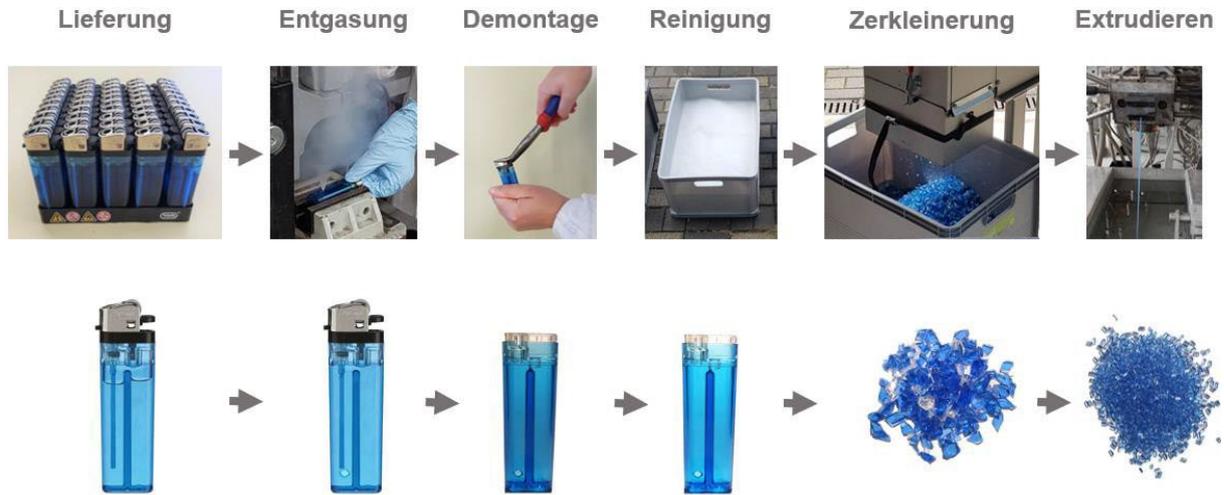


Abbildung 15: Aufbereitungsprozess vom Feuerzeug zum Regranulat

Die 3D-Drucke des aufbereiteten Kunststoffes erzielten qualitativ gute Probekörper. Die gedruckten Prüfkörper weisen eine sehr gute Druckqualität mit einer glatten und lückenlosen Oberfläche auf.

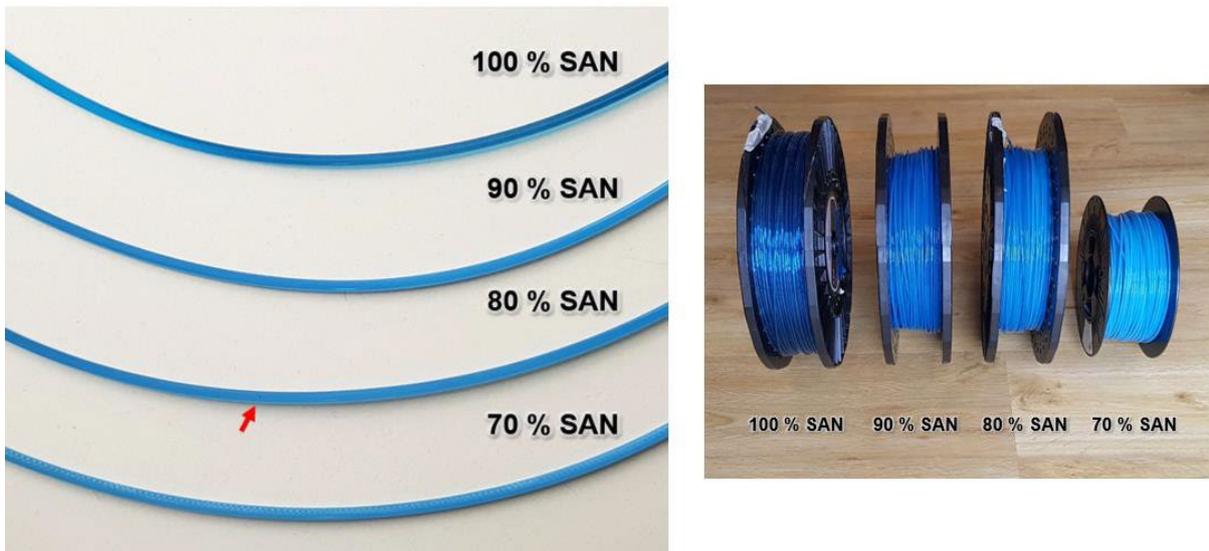


Abbildung 16: Feuerzeug-SAN-Filamente mit verschiedenen Anteilen ABS

Die Abbildung 16 zeigt Filamente aus Feuerzeug-SAN mit verschiedenen Anteilen von ABS. Deutlich ist zu erkennen, dass mit zunehmenden ABS-Anteil, das Filament heller und milchiger wird.

Neben der Herstellung von Prüfstäben ist zusätzlich ein Demonstrationsobjekt gedruckt worden (Flaschenöffner), um die Druckbarkeit des Feuerzeug-Kunststoffes auch bei einem veränderten Design zu testen. Siehe dazu die folgende Abbildung 17.

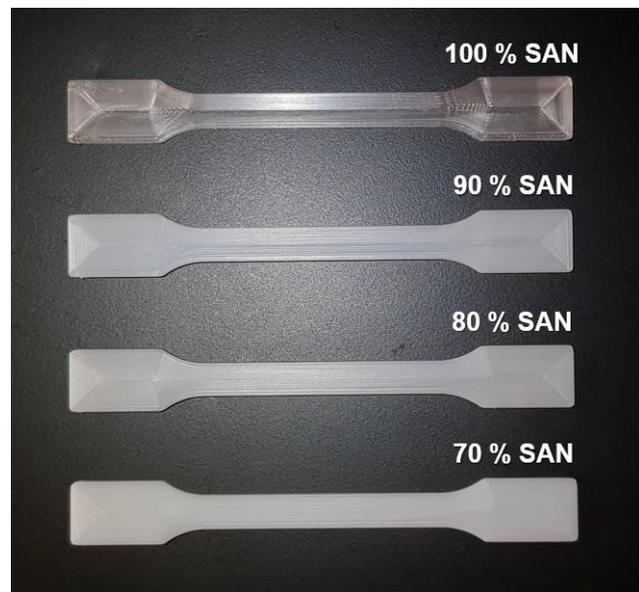


Abbildung 17: 3D-gedruckter Flaschenöffner aus 100 % Feuerzeugmaterial

Um die mechanischen Eigenschaften der Materialien zu vergleichen, wurden die verschiedenen Tyril- und Feuerzeug-SAN-Druckprobekörper einer mechanischen Werkstoffprüfung unterzogen. Es zeigte sich, dass die meisten Probekörper außerhalb der Messlänge im Schulterbereich versagten. Grund hierfür liegt in dem Fertigungsverfahren FFF, wobei sich an den Schulterbereichen Einkerbungen bildeten.

Abbildung 18: Probekörper aus SAN (Tyril) ABS (Terluran) - Mischungen

Die Auswertung der E-Moduln bestätigte die These, dass die Steifigkeit des SAN-Materials durch Zugabe von ABS verringert wird. Abbildung 18 zeigt jeweils einen Probekörper der jeweiligen SAN-ABS-Mischung. Je höher der Terluran-Gehalt im Feuerzeug-SAN gewählt wird, desto geringer fällt der E-Modul aus, was einen störungsfreien 3D-Druck begünstigt.



Insgesamt liegt der E-Modul des Tyril unterhalb desjenigen von Feuerzeug-SAN, was vermuten lässt, dass der Feuerzeugbody (bzw. Gastank) und das Tyril nicht identische SAN-Typen darstellen.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Kunststoffe SAN und POM-H sich prinzipiell zwar Filament extrudieren lassen, aber lediglich das in Feuerzeugen eingesetzte SAN mittels FFF verdruckbar ist. Da die Druckschichten des POM nicht aufeinander haften, konnte kein 3D-Druckergebnis erzielt werden. Grund hierfür ist die hohe Gleitfähigkeit des POM. Zudem erzeugt die teilkristalline Struktur hohe Verzugsspannungen im Druckteil und bedingt einen sehr präzisen Schmelzpunkt, was ein differenziertes Temperaturmanagement voraussetzt. Die Versuchsergebnisse ergeben die Fragestellung, ob das POM-H mithilfe eines anderen als den verwendeten Drucker Ultimaker 3 doch verdruckbar wäre, wenn dieser über höhere einstellbare Druckbetttemperaturen und einen beheizten Bauraum verfügt. Möglicherweise hilft auch eine Additivierung z.B. Zusatz eines Füllstoffs.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass sich ein Aufwertungspotenzial (Stichwort: „Upcycling“) für ausgediente Tanks von SAN-Feuerzeugen zu 3D-Druck-Filamenten ergibt. Das 70:30-Feuerzeug-SAN- ABS-Blend erzielte gute mechanische Kennwerte im Hinblick auf eine hohe Bruchspannung und geringe Steifigkeit. Für einen optimalen Recyclingprozess ist der 3D-Druck aus reinem SAN von Interesse, wozu eine Zusatz-Konstruktion von Nöten wäre, die die Steifigkeit und Sprödigkeit des Filaments ausgleicht und somit das eigenständige Abwickeln und Verhaken auf der Spule unterbindet. Die Entwicklung einer solchen Halterung könnte Bestandteil weiterführender Studien sein.

Ein weiterer Ansatz für eine Optimierung des Recyclingprozesses könnte die Einbringung von recyceltem ABS im Compound darstellen. Zuvor ergibt sich innerhalb des Projektes der Forschungsbedarf, zu überprüfen, ob sich Post-Consumer SAN-Feuerzeuge 3D-verdrucken lassen. Das Verdrucken der neuwertigen Feuerzeug-Monocharge gab keinen Aufschluss über den Einfluss von Verunreinigungen durch den Gebrauch der Feuerzeuge oder von Klebefolien auf den Druckprozess. Durch verunreinigtes Filament tritt die Problematik einer dauerhaft verstopften Druckerdüse in den Vordergrund, was den 3D-Druck behindern könnte.

Da die additive Fertigung eine immer bedeutsamere Rolle in der Verarbeitung von Kunststoffen spielt, Knappheit von Ressourcen zunehmend im Fokus öffentlicher Debatten steht, Kunststoffpreise in die Höhe steigen und dadurch die Nachfrage nach Recyclingprodukten steigt, sind weiterführende Forschungen hinsichtlich von Filamenten aus recykliertem Material von wachsender Bedeutung.

Bachelor¹⁰- und Forschungsarbeit¹¹ Hamdiya Örek: Untersuchung und Analyse der Materialien aus Stabfeuerzeugen.

Aus der vom Kooperationspartner zur Verfügung gestellten Gesamtmenge von 469 Stabfeuerzeugen konnten versuchsweise eine Gesamtmasse von 26,33 kg Feuerzeuge für die Untersuchungen verwendet werden. Eine differenzierte Untersuchung der verschiedenen Materialien ergab Massenanteile von 65,30 % Kunststoffe, 26,32 % Metalle, 5,08 % Anteile der Piezozündung, 1,13 % Kabel und 1,13 % Rest-Gas.

Das Gehäuse stellte wie erwartet bei dieser Feuerzeugkategorie das größte wie auch schwerste Teil dar. Die untersuchten Gehäuse bestehen zu 75 % aus ABS, 16,67 % aus PMMA und zu 8,33 % aus SAN. Eine typische Auswahl zeigt die folgende Tabelle (Tabelle 9).

Tabelle 8: Gehäusematerial ausgewählter Stabfeuerzeuge

Gruppe	Werkstoff	Handels-/ Herstellerbezeichnung
Transparentes Kunststoff-Stabfeuerzeug - rot	Polymethylmethacrylate	PMMA / -
Transparentes Kunststoff-Stabfeuerzeug - grau	Polymethylmethacrylate	PMMA / -
Glattes Kunststoff-Stabfeuerzeug - dunkelblau	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer	ABS / -
Glattes Kunststoff-Stabfeuerzeug - rot	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer	ABS / -
Raues Kunststoff-Stabfeuerzeug - dunkelblau	Styrol-Acrylnitril-Copolymere	SAN / -
Raues Kunststoff-Stabfeuerzeug - rot	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer	ABS / -
BIC®-Kunststoff-Stabfeuerzeug – schwarz	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer	ABS / -
BIC®-Kunststoff-Stabfeuerzeug – türkis	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer	ABS / -
Kunststoff-Stabfeuerzeuge mit kurzem Stab - grün	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer	ABS / -

¹⁰ Deckblatt und Inhaltsverzeichnis siehe Anhang 9

¹¹ Deckblatt und Inhaltsverzeichnis siehe Anhang 10

Kunststoff-Stabfeuerzeuge mit kurzem Stab - weiß	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer	ABS / -
Mini-Stabfeuerzeuge mit zusätzlichem Gehäuse - grün	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer	ABS / -
Mini-Stabfeuerzeuge mit zusätzlichem Gehäuse - grau	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer	ABS / -

Die innenliegenden Gasbehälter der Stabfeuerzeuge bestehen aus SAN (außer diejenigen des Herstellers BIC®) und lassen sich leicht entnehmen. Da bekannt ist, dass die Gehäusekörper der BIC®-Einwegfeuerzeuge, aus POM bestehen, wurden diese zunächst händisch aussortiert und für weitere Untersuchungen vorbereitet (Abbildungen 19 - 21).



Abbildung 19: "Kopfteil" Einwegfeuerzeug li., Abbildung 20: "Kopfteil" Gasbehälter der Stabfeuerzeuge re. Abbildung 21: POM-Tankmaterial aus Gasbehälter Stabfeuerzeuge und Einwegfeuerzeuge

Alle weiteren Stabfeuerzeuge müssen aufgebrochen werden, um an den Gasbehälter zu gelangen und diesen auf sein Material zu untersuchen. Für die Komponenten innerhalb diverser Stabfeuerzeuge, die stichprobenartig und beliebig ausgewählt wurden, werden weitere Kunststoffe wie PS, PP und PE eingesetzt.

Stabfeuerzeuge können also verschiedenste Kunststoffe enthalten. Gehäuse bzw. Gasbehälter stellen dabei den größten Kunststoff-Anteil dar und wären gut verwertbar, da diese überwiegend aus ABS bzw. SAN bestehen.

Um möglichst sortenreines SAN-Produkt zu erhalten, wurden bei weiteren Untersuchungen zerkleinerter Stabfeuerzeuge im Labor mit Hilfe der bereits bewährten Schwimm-Sink-Methode SAN-Partikel als Schwimmfraktion abgeschöpft (Abbildung 22).

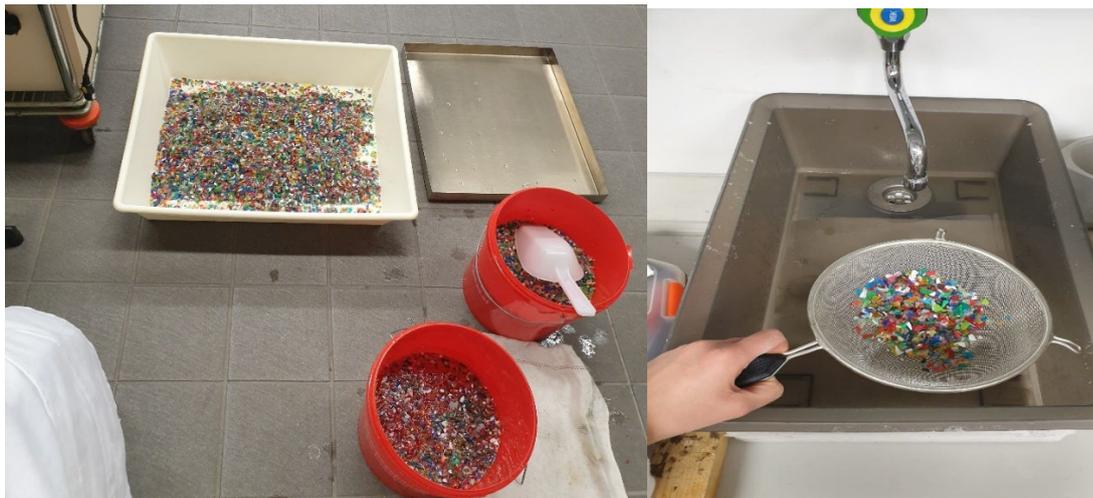


Abbildung 22: Vorgang Schwimm-Sink-Verfahren (SAN-Rezyklat)

Um die mechanischen Eigenschaften von Einwegfeuerzeug-Rezyklat, hierbei SAN- und POM-Rezyklat, zu untersuchen wird altes und auch neues Recyclingmaterial (SAN) sowie die entsprechende Neuware zu Prüfkörpern verarbeitet und die mechanischen Kennwerte wie Zug-, 3-Punkt-Biege-, Durchstoßversuchs sowie der Kerbschlagbiegeprüfung dieser Materialien ermittelt und verglichen. Die Ergebnisse wurden im Rahmen der Bachelorarbeit analysiert und beurteilt.

Die Frage, ob das Recyclingmaterial genauso wie die Neuware eingesetzt werden kann, kann auf Basis dieser Arbeit positiv beantwortet werden, denn das Recyclingmaterial weist teilweise sogar hohe Qualitätsmerkmale auf und bietet damit ungenutztes Potenzial dieser Kunststoffe. Die Untersuchungen konnten zeigen, dass die mechanischen Eigenschaften der SAN- und POM-Rezyklate in mehrfacher Hinsicht das Potenzial der Neuware erreichen und diese sogar teilweise übertreffen. So weist das SAN-Rezyklat höhere Festigkeit und Zähigkeit gegenüber einer vergleichbaren Neuware auf und lässt sich dementsprechend stärker mechanisch belasten (vergl. Abbildungen 23 und 24).

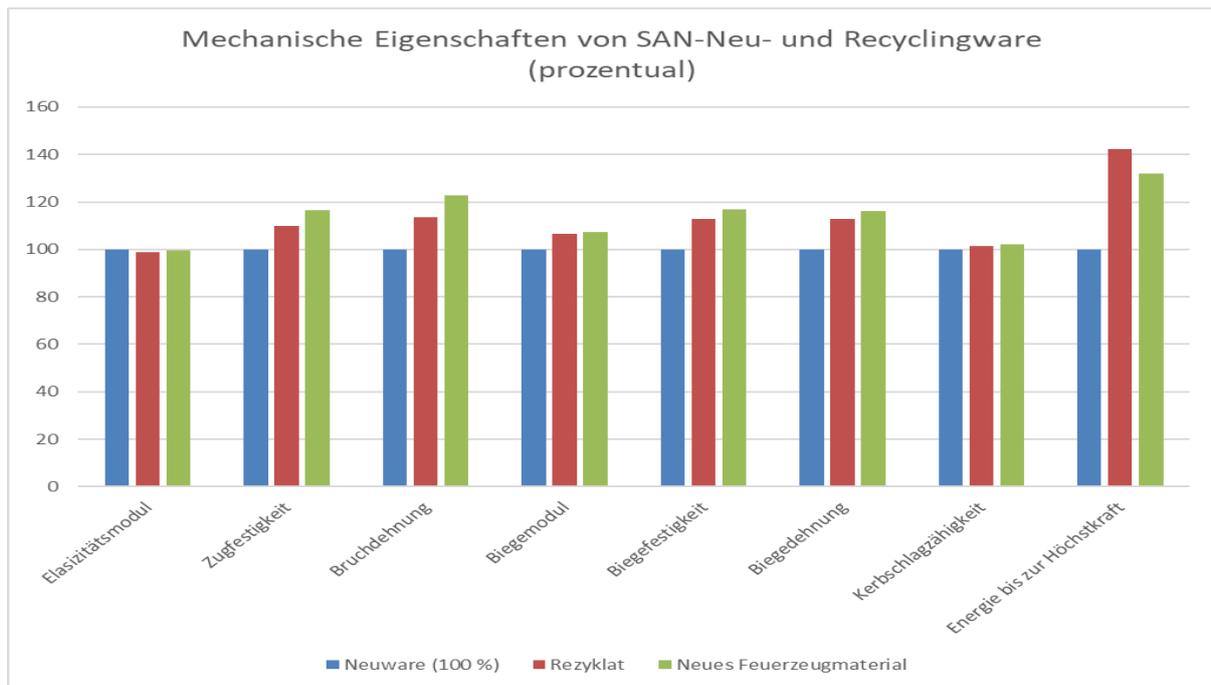


Abbildung 23: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von SAN-Neuware, SAN-Rezyklat und SAN-Neues-Feuerzeugmaterial

Anhand der Abbildung 23 wird deutlich, dass das SAN-Rezyklat in etlichen Aspekten ein ähnliches, auch besseres Niveau erreicht als die entsprechende Neuware. Somit wird in keinem überschaubaren Maße das Niveau der Neuware verfehlt. Bezüglich des Elastizitätsmoduls erreichen das Rezyklat und das neue Feuerzeugmaterial beinahe identische Werte wie die Neuware. Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Biegemodul, Biegefestigkeit und Biegedehnung des Rezyklats und des neuen Feuerzeugmaterials übersteigen das Niveau der Neuware um etwa 8 bis hin zu 20 %. Die Kerbschlagzähigkeit der betrachteten Materialien sind hingegen nahezu identisch und übertreffen das Niveau der Neuware um etwa 1-2 %. Werden ausschließlich die Eigenschaften des Rezyklats und des neuen Feuerzeugmaterials betrachtet, hierbei Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Biegemodul, Biegefestigkeit und Biegedehnung, so wird deutlich, dass die Werte durchschnittlich um lediglich 5 Prozentpunkten voneinander abweichen. Hier besteht somit kein gravierender Unterschied. Die Kerbschlagzähigkeit beider Materialien sind auch hier nur geringfügig abweichend (< 1 %). Bei der Betrachtung des Durchstoßversuchs wird deutlich, dass das Rezyklat um rund 40 %, das neue Feuerzeugmaterial um etwa 33 %, das Niveau der Neuware übertrifft. Somit muss für diese beiden Materialien wesentlich mehr Energie bis zur Höchstkraft aufgebracht werden als für die Neuware und erscheinen diesbezüglich stabiler als die Neuware.

Das POM-Rezyklat kommt ebenfalls an das Niveau der Neuware heran und weist hinsichtlich aller untersuchten mechanischen Eigenschaften bessere Kennwerte als die Neuware und überwiegend auch als die Angabe im Datenblatt der Neuware auf.

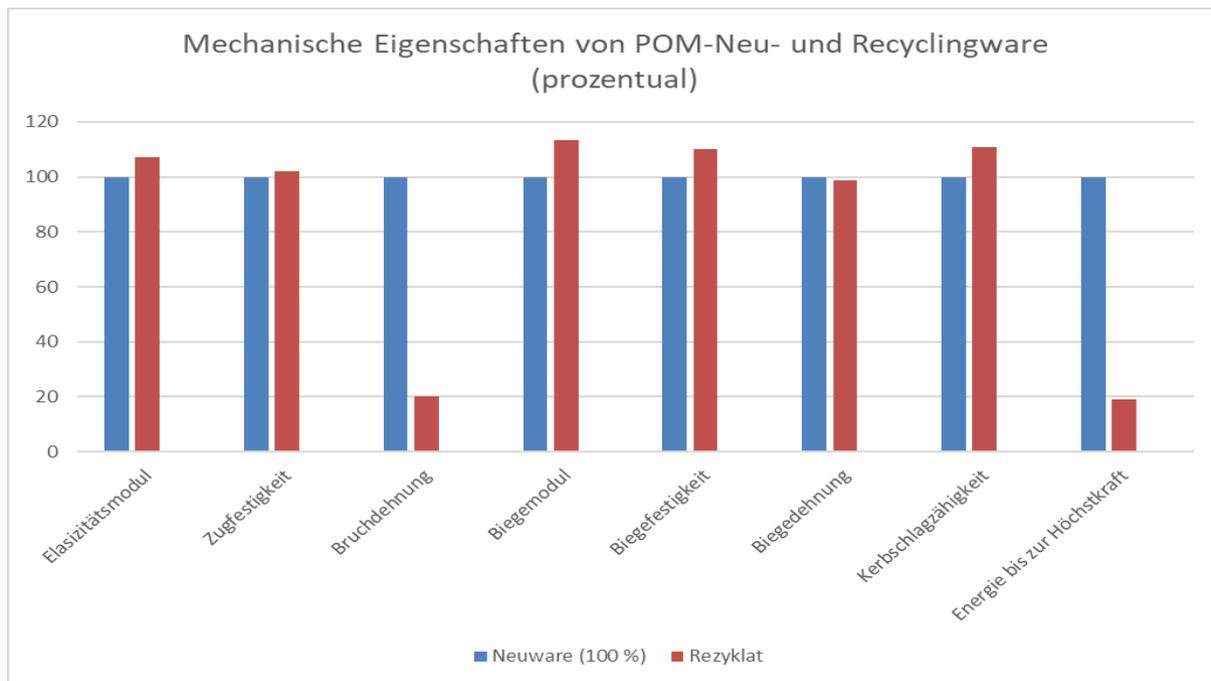


Abbildung 24: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von POM-Neuware und POM-Rezyklat

Die Abbildung 24 zeigt, dass mit dem POM-Rezyklat in vielen Bereichen an ein entsprechendes Niveau der Neuware herangekommen wird. Elastizitätsmodul, Biegemodul, Biegefestigkeit sowie Kerbschlagzähigkeit des POM-Rezyklats übertreffen die Neuware um rund 10 %. Die Zugfestigkeit des Rezyklats liegt um 2 % über dem Niveau der Neuware, die Biegedehnung verfehlt das Niveau der Neuware nur um etwa 1 %. Außerordentliche Verluste ergeben sich bezüglich der Bruchdehnungen und der Durchstoßenergien. Hierbei ergeben sich Duktilitätsverluste von rund 80 %. Auch hinsichtlich der Energien bis zur Höchstkraft sind eklatante Unterschiede wahrzunehmen. So wird hier im Gegensatz zum SAN für das Rezyklat eine enorm geringere Energie bis zur Höchstkraft aufgebracht als für die Neuware. Die Abweichung liegt hier bei etwa 81 %. Somit wird bis zur Verformung für das Rezyklat weniger Energie aufgebracht als für die Neuware.

Hervorzuheben ist, dass ein Vergleich der mechanischen Eigenschaften vom POM-Rezyklat mit der POM-Neuware kritisch zu betrachten ist, da sich hier die Herstellparameter der Probekörper stark voneinander unterscheiden und somit sehr unterschiedliche Herstellungsbedingungen vorliegen. Hier wäre ein Vergleich des Rezyklats mit neuem Feuerzeugmaterial sinnvoller gewesen, da nicht genau bekannt ist, welches POM-Material BIC® zur Herstellung ihrer Feuerzeuge verwendet. Die Herstellung der Probekörper aus SAN-Rezyklat, SAN-Neuem-Feuerzeugmaterial und SAN-Neuware erfolgte dagegen unter sehr ähnlichen Herstellparametern.

Abschließend können die erreichten mechanischen Eigenschaften bzw. die Qualität der Rezyklate als positiv beurteilt werden. Obwohl offenbleibt, wodurch der Anstieg bzw. die

Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Rezyklate verursacht wird? Eine Verbesserung von Eigenschaften ist grundsätzlich durch den Einsatz von Additiven oder durch höhere Molmassen zu begründen. Weitere Untersuchungen wie DSC- oder TGA-Messungen können mögliche Molekulargewichtsunterschiede zwischen Neuware und Rezyklat auszuschließen. Um einen möglichen Einfluss der Verarbeitungsbedingungen auszuschließen, sollten die aus Neuware hergestellten Prüfkörpern zerkleinert und erneut zu Probekörpern verarbeitet und bezüglich der mechanischen Eigenschaften erneut geprüft werden. Überdies stellt sich die Frage, ob die Feuerzeug-Gas-Reste Auswirkungen auf die Eigenschaften im Polymer bewirken.

Bachelor¹²- und Forschungsarbeit¹³ Linda Storm: Untersuchung der Gase Propan und Butan und deren Gemische, wie sie in Einwegfeuerzeugen vorkommen. Die Speicherung bzw. Aufbewahrung von Gasen. Möglicher Anlagenaufbau einer Feuerzeugrecyclinganlage unter Berücksichtigung der Patentlagen.

Beim Zerkleinerungsvorgang von Feuerzeugen müssen die entweichenden Gase zum Beispiel durch eine Absaugung in Behältern gespeichert werden. Da hier eine explosionsfähige Atmosphäre entstehen kann, müssen besonders bei diesem Schritt die Atex-Richtlinien und die Explosionsschutzmaßnahmen beachtet werden. Schon geringe Veränderungen der Temperatur oder des Druckes können den Aggregatzustand der Gase verändern. Allein der Temperaturunterschied von Sommer und Winter reichen aus, um den Druck in einem Propan-Butan-Gasbehälter stark zu verändern. Abbildung 25 zeigt wie sich der Dampfdruck verändert, wenn die Temperatur steigt. So beträgt bei einer Temperatur von 0° C der Dampfdruck für Butan (orangefarbene Kurve) 1 bar. Bei Propan (blaue Kurve) liegt der Dampfdruck bereits bei 5 bar. Steigt die Temperatur auf 20° C an, so steigen auch die Drücke von Butan auf ca. 2,5 bar und für Propan auf 9 bar an. Auch ändert sich die Zusammensetzung des Gas-Gemisches stetig mit der Entnahme von Gas.

¹² Deckblatt und Inhaltsverzeichnis siehe Anhang 11

¹³ Deckblatt und Inhaltsverzeichnis siehe Anhang 12

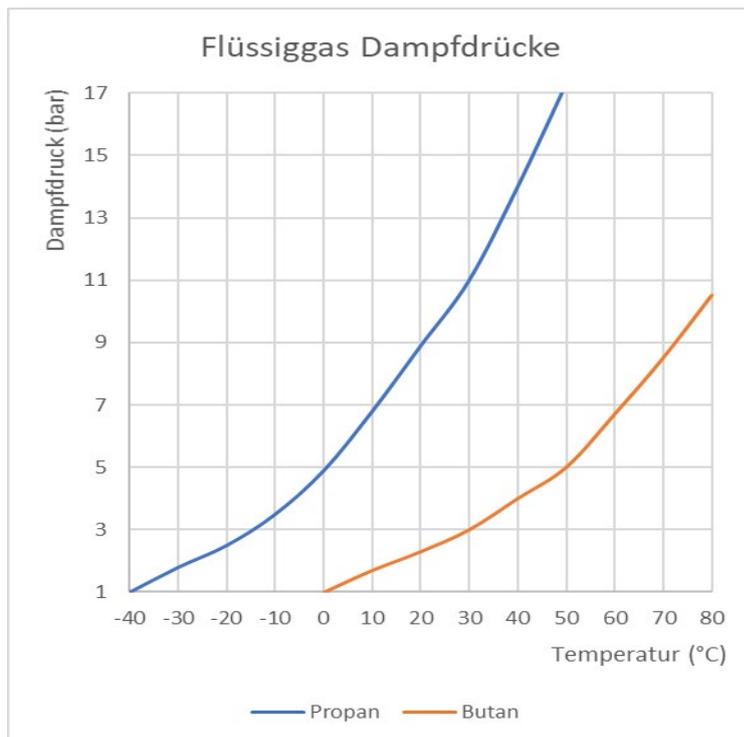


Abbildung 25: Dampfdrücke für Propan und Butan

Bei der Konzipierung einer Feuerzeugbehandlungsanlage müssen etliche Gesichtspunkte beachtet werden. Von bereits bestehenden Patenten bis hin zu behördlichen Genehmigungen. Je nach Anlagenaufbau müssen bestimmte Gerätekategorien aufgrund der explosionsgefährdeten Atmosphäre verwendet werden.

Im Folgenden wird eine Anlagenvariante beschrieben. Die Anlage umfasst den gasaustrittssicheren Raum. Dabei handelt es sich um einen (transportablen) Container mit einer Zerkleinerungsvorrichtung, und zwar einer Rotorschere. In dem Container befindet sich neben der Zerkleinerungsvorrichtung eine Gasverflüssigungsanlage, ein Stickstoffgenerator, ein Gasventilator sowie eine Abfüllstation. Außerhalb des Containers befindet sich die zugehörige Steuerungs- und Überwachungseinheit, um die Sauerstoff- und Gas-Werte kontrollieren zu können. Über die Steuerungseinheit kann der gesamte Vorgang zu jeder Zeit gestoppt oder abgebrochen werden.

Der Ablaufplan ist der Folgende (siehe Abbildung 26). Die Feuerzeuge werden in eine Ladevorrichtung (1) gegeben. Dies kann eine Art Trichter oder eine andere Form von Behältnis sein und befindet sich innerhalb des Containers. Beim Verlassen des Containers muss der/die Mitarbeiter/in einen Knopf (2) betätigen, um zu signalisieren das er/sie die letzte Person im Container war und sich nun niemand mehr im Container befindet. Als Alternative zu diesem Knopf kann auch ein Not-Ausschalter in der Anlage installiert werden. Anschließend kann der Vorgang, von der Steuerungseinheit aus, gestartet werden (3). Mit dem Starten des Vorgangs verriegelt die Tür automatisch (4).

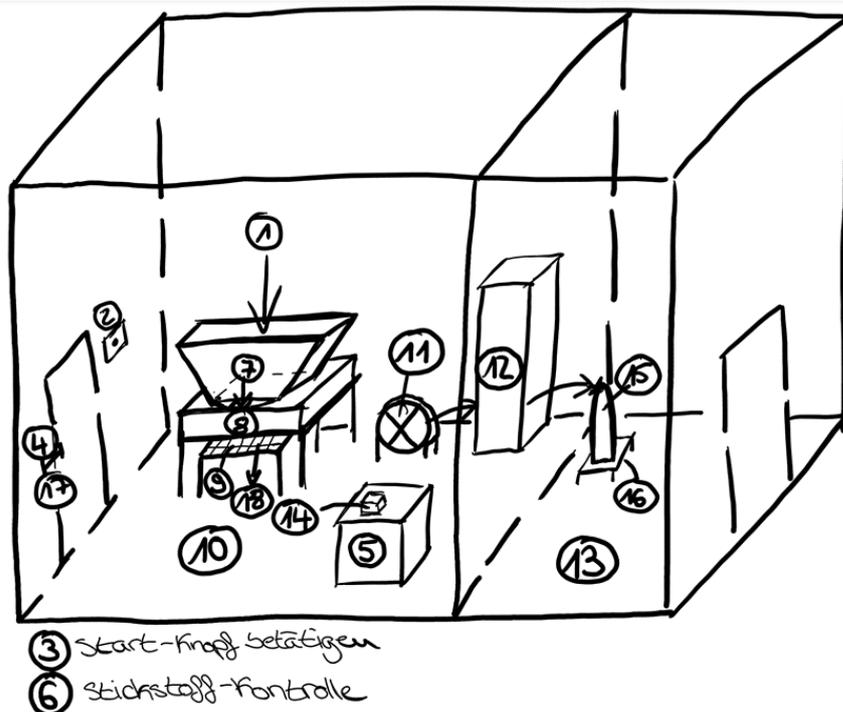


Abbildung 26: Skizze Prozessablauf

Im nächsten Schritt wird der Containerraum mit Stickstoff beaufschlagt (5). Nachdem der Stickstoffgehalt den erwünschten Wert erreicht hat (6), Kontrolle über die Steuerungseinheit, öffnet sich die Klappe (7) unterhalb der Ladevorrichtung. Die Feuerzeuge fallen in den Bereich des Zwei-Wellen-Zerkleinerers (8), in dem die Feuerzeuge zerstört beziehungsweise zerkleinert werden. Unterhalb des Zerkleinerers befindet sich eine Art Siebboden (9), auf dem sich die zerkleinerten Feuerzeugpartikel sammeln. Der Siebboden ist der Schneidscheibenbreite des Zerkleinerers angepasst, sodass die zerkleinerten Feuerzeugteile nicht durch den Siebboden fallen können. Das austretende Gas und eventuell auftretende Flüssigkeiten können durch den Siebboden nach unten sinken und sich am Boden des Containers ansammeln (10). Durch eine Gasabsauganlage/Gas-Ventilator (11) können die Gase vom Boden abgesaugt und in die Gasverflüssigungsvorrichtung (12) weitergeleitet werden. Die Gasverflüssigungsvorrichtung arbeitet mit minus Temperaturen. Dadurch ist es in einem Schritt möglich die Gase Butan und Propan zu verflüssigen und gleichzeitig vom Stickstoff zu trennen. Das verflüssigte Gasgemisch kann zur Abfüllstation (13) weitergeleitet werden. Die Abfüllstation befindet sich abgegrenzt mit in dem Container.

Während des gesamten Recyclingvorgangs wird über die Steuereinheit der Sauerstoffgehalt, der Stickstoffgehalt, sowie der Gehalt des Butan-Propan-Gemisches überwacht. Wenn aus Fehlergründen der Stickstoffgehalt sinkt, wird durch eine Gaswarneinrichtung (14) automatisch nachgefüllt. Der abgegrenzte Abfüllbereich darf nach dem Zerkleinerungsprozess betreten werden. Auch hier wird die Gaskonzentration kontinuierlich gemessen. Solange sich

ausschließlich Erdatmosphäre im Raum befindet, kann dieser bedenkenlos betreten werden. Wenn als Gasauffangbehälter ein Druckbehälter in Form einer Gasflasche (15) verwendet wird, muss dies ausgetauscht werden, wenn sich die Flasche zu 80 % gefüllt hat. Die Kontrolle für die Abfüllung geschieht mittels Waage (16). Diese ist wiederum mit der MSR-Einheit verbunden und stoppt bei 80% automatisch die Füllung. Ein akustisches Signal zeigt an, dass die Flasche getauscht werden muss. Nachdem das komplette Gas aus dem Container abgefüllt wurde, wird die Tür zum Öffnen wieder frei gegeben (17). Die zerkleinerten Feuerzeuge können entnommen werden (18). Nach der Entnahme kann der nächste Zyklus begonnen werden.

Mit dieser Vorgehensweise werden so die Verfahrensschritte Gasentnahme/Druckentlastung sowie Zerkleinerung 1 im Fließbildes erledigt (Abbildung 27).

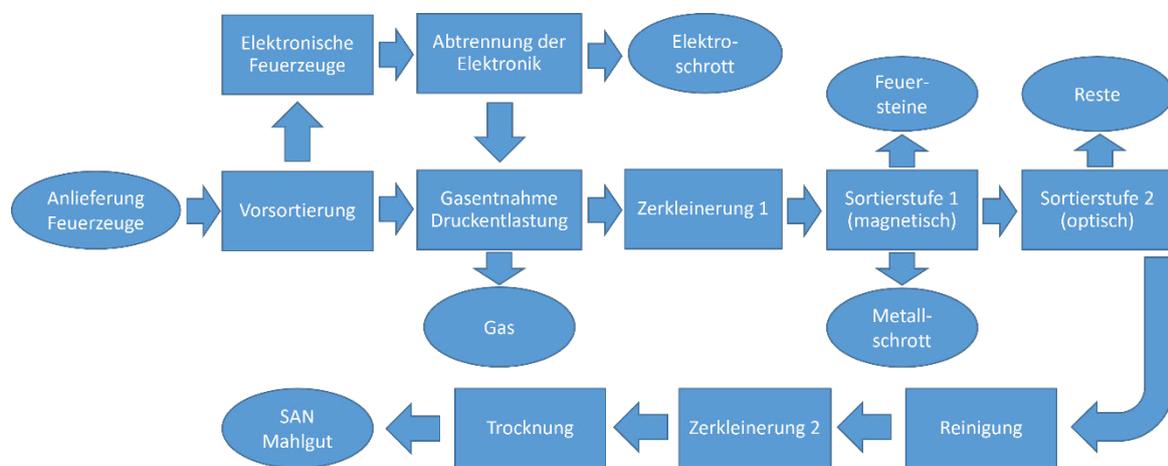


Abbildung 27: Fließbild einer Pilotanlage für das Feuerzeugrecycling

Die Beschreibung verdeutlicht jedoch, dass eine „sichere“ Vorgehensweise mit einem hohen Aufwand versehen ist, die den finanziellen Rahmen dieses Projekts übersteigt.

Marktaktivitäten:

Aufgrund der Pandemiesituation gestaltete sich die Akquise von möglichen Sammelstellen zäh, bedarf es doch in der Regel einer persönlichen Ansprache der Entscheider in den infrage kommenden Unternehmen. Dennoch entstanden durch umfangreiche Rechercharbeiten im Projekt einige sehr wertvolle Kontakte zu:

- Reza Etehad, c/o Next Tröber Europe GmbH & Co. KG und E.L.I.A.S. (European Lighter Importers' Association), www.troeber.com
- Udo Hohlfeld, Info+Daten e. K., www.infoplusdaten.net
- René D. Frigiore, Group Lighter R&D Director, www.bicworld.com

In diesem Zusammenhang von größter Wichtigkeit war die Kontaktaufnahme sowie die Bereitschaft bestimmter Unternehmen Sammelboxen, wie in Abbildung 28 dargestellt, aufzustellen. Die Sammelboxen wurden von dem Kooperationspartner Löschmittel-Recycling und Umweltdienste GmbH & Co. KG (LRD) entworfen.



Abbildung 28: Entworfene Sammelbox des Kooperationspartner LRD

Leider verzögerten sich Pandemie bedingt die Gespräche mit den Entscheidern der folgenden Unternehmen:

- EDEKA: Batteriesammelsystem ist vorhanden, die Organisation ist schwierig, Mehraufwand, welches nicht entlohnt wird.
- Lidl: noch im Gespräch.
- Rossmann: Persönlicher Brief an Dirk Rossmann: keine Reaktion/Antwort.
- DM: noch im Gespräch.

Mengenszenario:

Die Recherchen während des Projektes ergaben deutlich höhere Menge an in Europa konsumierten (Taschen-)Feuerzeugen als bei Antragstellung bekannt war. So wurden laut E.L.I.A.S. in 2020 1,78 Mrd. Stück importiert, 1,64 Mrd. Stück wurden exportiert. Zu vermuten ist, dass die Importe überwiegend die aus Fernost den Markt überschwemmenden Billigimporte mit SAN-Tanks. Die in Europa hergestellten Feuerzeuge sind in dieser Statistik nicht enthalten. Die Differenz zzgl. europäische Produktion stellt dann den Gesamtmarkt dar.

Insgesamt ergab sich damit eine deutlich höhere Menge an Feuerzeugen. 162.000.000 Stück war die Berechnungsgrundlage im Forschungsantrag. Jetzt liegt man bei 230.000.000.

2.4 Öffentlichkeitsarbeit/Veröffentlichungen/Vorträge

- Pressemitteilungen zu Beginn des Projektes (s. Anhang 13)
- Webseite seit 30.11.2020 öffentlich: <https://www.feuerzeugrecycling.de/>
- Kontinuierliche Kontakt mit verschiedenen Kommunen und Gemeinden per EMail
- Bericht im Recycling-Magazin (s. Anhang 14)
- Bericht in der Wolfsburger Tageszeitung WAZ vom 21. Februar 2022 (s. Anhang 15)
- Flyer für Werbemaßnahmen (Anhang 16)

Kontakte im Einzelnen:

- Fa. SuperDrecksKëscht® (Lieferant Feuerzeuge)
- Fa. Heinrich Thees GmbH & Co. KG (Kunststoffmahlbetrieb und Vermarktung von Schredderfraktion)
- Erdwich Zerkleinerungs-Systeme GmbH (Zweiwellenzerkleinerer und Gasabsaugung)
- saperatec GmbH (Trennverfahren durch Emulsion)
- BIC Group Frankreich
- Heinz Tröber GmbH & CO. KG (Mitglied im ELIAS - Verband Europäischer Feuerzeug-Importeure)
- FAS (Flüssiggasanlagen GmbH)
- REMONDIS Industrie Service GmbH & Co. KG (RESPRAY)
- PA Propan & Ammoniak Anlagen GmbH
- DeSpray Inviromental: Niederlande, Herr Eelco Osse
- ReSpray: Remondis Industrie Service GmbH & Co. KG: Aufbereitung von Spraydosen und Kartuschen
- Platal GmbH (Containerspeziellösungen)

2.5 Fazit

Es konnten die verschiedenen Kunststoffe der Feuerzeugtanks analysiert und erfasst werden. Es wurde schnell deutlich, dass ein höherer Sortieraufwand als im Antrag geplant aufgewendet werden muss.

Die Ergebnisse der Firma Saperatec GmbH sowie ergänzende Untersuchungen an der Ostfalia konnten zeigen, dass es generell für viele Beschichtungsarten der Feuerzeuge (bis auf Lackierungen) Trennflüssigkeiten gibt, mit der die Beschichtungen vollständig abgelöst

werden können. Bei einer Nassaufbereitung können grundsätzlich diese Agenzien dem Waschwasser zugegeben werden. Allerdings erfordert dieses Verfahren eine Wasseraufbereitungsanlage, welche wiederum die Investitionskosten erhöht.

Abschließend soll zu diesem Punkt festgehalten werden, dass die Recyclingfähigkeit von Einwegfeuerzeugen durch die aufgetragenen Beschichtungen eingeschränkt wird. Für eine recyclinggerechte Produktgestaltung sollte seitens der Feuerzeughersteller und -händler zukünftig auf das Beschichten von Einwegfeuerzeugen verzichtet werden, vor allem mit Haftklebefolien, Barcodeetiketten und Bedruckungen (Lackierungen). Dadurch könnte das Recycling von Einwegfeuerzeugen erleichtert und somit ein Beitrag zur Nachhaltigkeit geleistet werden. Auf der anderen Seite sind die Massenanteile an Beschichtungen im Verhältnis zur Gesamtkunststoffmasse gering und durch einen Einsatz von Schmelzefilter bei der Extrusion können in gewissem Umfang Störstoffe entfernt werden.

Bei der Firma Erdwich Zerkleinerungs-Systeme GmbH wurden umfangreiche Zerkleinerungsversuche zunächst mit gasentleerten Feuerzeugen durchgeführt. Dabei konnten auch Möglichkeiten geprüft werden, die in Realität enthaltenen Restgase sicher zu beherrschen und aufzufangen. Die hohen Investitionskosten der aus diesen Versuchen abgeleiteten Ex-geschützten Zerkleinerungstechnik schreckten ab. Auch eine „Containerlösung“ ist zum jetzigen Stand der Entwicklungsarbeiten zu kostenintensiv.

Die in Frage kommenden Sammelstellen (Edeka, Rossmann, DM, ...) bedürfen weiterer Bearbeitung. Es werden auch nach Beendigung der Förderphase durch die DBU mit den kommunalen Stellen, die sich auf die eingangs erwähnten Pressemitteilungen gemeldet hatten, im Umfeld des Kooperationspartners Pilotsammelaktionen werbewirksam durchgeführt.

Abschließend kann gesagt werden, dass das Projekt aussichtsreiche Ergebnisse erzielt hat, auch wenn sich Sortieraufwand und Investitionskosten erhöhen. Die Menge an Feuerzeugen ist nach aktuellen Zahlen in D mit 230.000.000 Stück anzusetzen. Das ist deutlich mehr als eingangs vermutet und ein positiver Effekt im Hinblick auf einen möglichen zukünftigen wirtschaftlichen Betrieb einer Feuerzeugrecyclinganlage. Dies hat auch Auswirkungen auf die zu erwartenden Erlöse der Rezyklate. Allerdings sind die im Antrag angegebenen Investitionskosten wesentlich höher anzusetzen als zuvor angenommen. Es ist fraglich, ob mit diesen Zahlen bereits im 5. Jahr Gewinne erzielt werden können.

2.6 Ausblick

Während der Projektlaufzeit wurde im Laufe der Zeit bekannt, dass auch der weltweit führende Hersteller von Feuerzeugen, die Firma BIC sich des Themas annimmt [4]. BIC kommunizierte

in der französischen Presse, dass am 07.12.2021 in seinem Werk in Redon (Ille-et-Vilaine) Recycling seiner Einwegfeuerzeuge zu beginnen. Insgesamt fünf Maschinen wurden von der Technologieabteilung der Gruppe entwickelt, um die Feuerzeuge der Marke BIC zu sortieren, zu spülen (das verbleibende Gas zu sammeln), zu schleifen, zu zerlegen und wiederaufzubereiten. Wenig überraschend dabei ist, dass man sich ausschließlich auf Feuerzeuge der eigenen Marke zu konzentrieren scheint. Dies erschien zuerst ein bisschen weltfremd, denn wenn überhaupt jemals Feuerzeuge gesammelt werden sollte, wer sollte sie nach Hersteller sortieren. Dennoch ist der Ansatz im Nachhinein betrachtet vielleicht doch nicht so schlecht. BIC-Feuerzeuge haben mehrere Alleinstellungsmerkmale, die mit optischen Methoden in Verbindung mit dem Einsatz einfacher KI-Software als Sortierkriterium herangezogen werden könnten. Jedenfalls hat in den Gesprächen BIC sich grundsätzlich nicht geweigert, aussortierte Altfeuerzeuge der eigenen Marke zurückzunehmen.

Die Erkennung einzelner Feuerzeuge in einem Massenstrom konsequent weiter gedacht heißt eine Vereinzelung der Feuerzeuge ggf. inklusive einer einheitlichen Ausrichtung in einem Förderstrom. Die vereinzelt Feuerzeuge könnten dann einzeln pneumatisch zwischen 2 Haltegreifer geklemmt werden und mit einem Hohlbohrer angebohrt bzw. angestochen werden, um das Restgas über die Bohrer-Hohlröhre gezielt aufzufangen. Auf die aufwändige exgeschützte Massenstromvariante kann dann möglicherweise ganz verzichtet werden. Die weitere Aufbereitung erfolgt dann wie beschrieben mit der Technik z.B. von TOMRA.

3 Literaturverzeichnis

- [1] S. O.-W. Prof. Dr. Achim Schmiemann, „<https://www.recyclingmagazin.de/2022/10/20/kunststoffverwertung-aus-feuerzeugen/>,“ 20 Oktober 2022. [Online]. Available: <https://www.recyclingmagazin.de>.
- [2] R. Köhnlechner, „Recycling und Rohstoffe - Band 7,“ in *Erzeugung sauberer PS- und ABS-Fraktionen aus gemischten Elektronikschrott*, Neuruppin, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, pp. 380 - 399.
- [3] T. S. G. P. Linscheid, *Testbericht für Unternehmen Ostfalia*, Mülheim-Kärlich, 2021.
- [4] E. Ferey, „<https://www.ouest-france.fr/bretagne/redon-35600/a-redon-bic-va-recycler-ses-briquets-jetables-une-premiere-mondiale-673216ba-5764-11ec-98d9-226f24a3b94d>,“ 07 12 2021. [Online]. Available: <https://www.ouest-france.fr>. [Zugriff am 09 2023].

4 Anhang

A 1 Bachelorthesis Die Bedeutung des Entschichtens von Einwegfeuerzeugen im Recyclingprozess



Fakultät Fahrzeugtechnik

BACHELORTHESIS

Die Bedeutung des Entschichtens von
Einwegfeuerzeugen im Recyclingprozess

zum Erlangen des akademischen Grades

BACHELOR OF SCIENCE

im Studiengang

Material und Technisches Design

vorgelegt von: Helena Puderbach
Matrikelnummer: 70459882

Erstprüfer: Prof. Dr. Achim Schmiemann

Zweitprüferin: Dipl.-Ing. Sylvia Ott-Welke

Abgabedatum: 31.03.2022

Inhalt

Eidesstattliche Erklärung	
Sperrvermerk	
Kurzfassung	
Abstract	
Inhalt.....	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Geeignete Feuerzeuge für das Recycling	3
3 Beschichtungsarten auf Einwegfeuerzeugen	7
4 Analyse der Beschichtungsmaterialien.....	9
4.1 Infrarotspektroskopie der Beschichtungsmaterialien	9
4.1.1 Haftklebefolien	10
4.1.2 Barcode-Etiketten	13
4.1.3 Sleeve-Folien	15
4.1.4 Bedruckungen	17
4.1.5 Gummierungen	18
4.2 Dynamische Differenzkalorimetrie der Beschichtungsfolien	20
4.2.1 Haftklebefolien	21
4.2.2 Sleeve-Folien	22
5 Verträglichkeit der Beschichtungsmaterialien mit den Gehäusekunststoffen...25	
6 Beschichtungen auf SAN- und POM-Einwegfeuerzeugen.....27	
6.1 Beschichtungen auf SAN-Einwegfeuerzeugen	27
6.1.1 Häufigkeit der Beschichtungsarten in der SAN-Fraktion.....	27
6.1.2 Durchschnittliche Massenanteile der Beschichtungen pro SAN-Feuerzeug...29	
6.1.3 Anteile der Beschichtungsmaterialien an der Gesamtmasse der SAN-Feuerzeuge	31
6.2 Beschichtungen auf POM-Einwegfeuerzeugen	33
6.2.1 Häufigkeit der Beschichtungsarten in der POM-Fraktion.....	33

6.2.2	Durchschnittliche Massenanteile der Beschichtungen pro POM-Feuerzeug	35
6.2.3	Anteile der Beschichtungsmaterialien an der Gesamtmasse der POM-Feuerzeuge	37
7	Methoden für das Entfernen der Beschichtungen	39
7.1	Zerkleinerung der Einwegfeuerzeuge	39
7.2	Ablösen der Beschichtungen mit Trennflüssigkeiten der Saperatec GmbH	40
7.2.1	Screening	41
7.2.2	Upscaling	44
7.3	Ablösen der Beschichtungen mit herkömmlichen Lösungs- und Reinigungsmitteln	47
7.3.1	Versuch 1: Screening mit SAN-Feuerzeugen	48
7.3.2	Versuch 2: Screening mit POM-Feuerzeugen	57
7.3.3	Versuch 3: Entschichten von SAN-Feuerzeugen diverser Marken	64
8	Fazit	69
	Quellenverzeichnis	IX
	Anhang	XIII
A 1	IR-Spektren der Haftklebefolien	1
A 2	IR-Spektren der Barcode-Etiketten	9
A 3	IR-Spektren der Sleeve-Folien	14
A 4	IR-Spektren der Bedruckungen	16
A 5	IR-Spektren der Gummierungen	19
A 6	E-Mail von Tanja Ebel (Bic Group)	20
A 7	DSC-Aufheizkurven	21
A 8	Berechnungen für die SAN-Fraktion	25
A 9	Berechnungen für die POM-Fraktion	28
A 10	Fotos zu Versuch 3	31

Inhalt

Eidesstattliche Erklärung	
Sperrvermerk	
Kurzfassung	
Abstract	
Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Geeignete Feuerzeuge für das Recycling	3
3 Beschichtungsarten auf Einwegfeuerzeugen	7
4 Analyse der Beschichtungsmaterialien.....	9
4.1 Infrarotspektroskopie der Beschichtungsmaterialien	9
4.1.1 Haftklebefolien	10
4.1.2 Barcode-Etiketten	13
4.1.3 Sleeve-Folien	15
4.1.4 Bedruckungen	17
4.1.5 Gummierungen	18
4.2 Dynamische Differenzkalorimetrie der Beschichtungsfolien	20
4.2.1 Haftklebefolien	21
4.2.2 Sleeve-Folien	22
5 Verträglichkeit der Beschichtungsmaterialien mit den Gehäusekunststoffen...25	
6 Beschichtungen auf SAN- und POM-Einwegfeuerzeugen.....27	
6.1 Beschichtungen auf SAN-Einwegfeuerzeugen	27
6.1.1 Häufigkeit der Beschichtungsarten in der SAN-Fraktion.....	27
6.1.2 Durchschnittliche Massenanteile der Beschichtungen pro SAN-Feuerzeug...	29
6.1.3 Anteile der Beschichtungsmaterialien an der Gesamtmasse der SAN-Feuerzeuge	31
6.2 Beschichtungen auf POM-Einwegfeuerzeugen	33
6.2.1 Häufigkeit der Beschichtungsarten in der POM-Fraktion.....	33

A 2 Forschungsarbeit Beschichtungen auf Einwegfeuerzeugen und ihre Bedeutung für das Recycling

Fakultät Fahrzeugtechnik

FORSCHUNGSARBEIT

**Beschichtungen auf Einwegfeuerzeugen und
ihre Bedeutung für das Recycling**

im Studiengang

Material und technisches Design

vorgelegt von: Helena Puderbach
Matrikelnummer: 70459882

Erstprüfer: Prof. Dr. Achim Schmiemann
Zweitprüferin: Dipl.-Ing. Sylvia Ott-Welke

Abgabedatum: 07.07.2021

Inhalt

Eidesstattliche Erklärung	
Kurzfassung	
Abstract	
Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
2 Feuerzeuge	3
2.1 Definition und Normen	3
2.2 Feuerzeugtypen	3
3 Zusammensetzung der Feuerzeuglieferungen	8
4 Beschichtungen auf Einwegfeuerzeugen	12
4.1 Identifizierte Beschichtungsarten	12
4.1.1 Unbeschichtet	13
4.1.2 Haftklebefolien	13
4.1.3 Sleeve-Folien (auch Schlauch-Folien)	14
4.1.4 Etiketten mit Barcode und Gefahrenhinweisen	14
4.1.5 Bedruckung	15
4.1.6 Gummierung	15
4.2 Häufigkeitsverteilung der Beschichtungen	16
5 Grundlagen der Oberflächentechniken	20
5.1 Etikettieren	20
5.1.1 Etikettensysteme	20
5.1.1.1 Kaltleim-Etikettierung (auch Nassleim-Etikettierung)	20
5.1.1.2 Heißleim-Etikettierung (auch Schmelzklebe-Etikettierung oder Rundum-Etikettierung)	20
5.1.1.3 Sleeve-Etikettierung (auch Überzieh-Etikettierung)	21
5.1.1.4 Haftetikettierung	21
5.1.1.5 In-Mould-Labeling (IML)	22

5.1.2	Klebstoffe	23
5.1.2.1	Definitionen	23
5.1.2.2	Klassifizierung von Klebstoffen	24
5.1.2.3	Klebstoffe für die Etikettierung	27
5.2	Drucktechnik	33
5.2.1	Definitionen	33
5.2.2	Konventionelle (druckformgebundene) Druckverfahren	34
5.2.2.1	Hochdruck	35
5.2.2.2	Flachdruck	36
5.2.2.3	Tiefdruck	37
5.2.2.4	Durchdruck	38
5.2.3	Non-Impact-Printing-Verfahren (auch Digitaldruck)	39
5.2.3.1	Elektrofotografie	40
5.2.3.2	Magnetografie	40
5.2.3.3	Thermografie	41
5.2.3.4	InkJet	41
5.2.4	Druckfarben	42
5.2.4.1	Aufbau der Druckfarben	42
5.2.4.2	Trocknen und Härten der Druckfarben	43
5.2.4.3	Druckfarbencategorien	46
5.2.4.4	Wichtige Bindemittel für Druckfarben	48
5.3	Zuordnung der Feuerzeugbeschichtungen zu den beschriebenen Oberflächentechniken	51
6	Fazit und Ausblick	53
	Quellenverzeichnis	VII

A 3 Bachelorthesis Werkstoffliche Aufbereitung von Einwegfeuerzeugen

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften

Fakultät Wirtschaft

Werkstoffliche Aufbereitung von Einwegfeuerzeugen

Bachelorarbeit

zur Erlangung des Grades Bachelor of Engineering der Fakultät Wirtschaft
der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften

Eingereicht bei Prof. Dr.-Ing. Achim Schmiemann
Dipl.-Ing. Sylvia Ott-Welke

Vorgelegt von Vincent Leib
Friedrich-Ebert-Str. 19
38440 Wolfsburg
Matr.-Nr. 70451557

Wolfsburg, den 04.04.2021

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
1 Einleitung.....	1
2 Umwelteinflüsse durch Einwegfeuerzeuge.....	3
2.1 Quantitativer Konsum von Einwegfeuerzeugen.....	5
2.2 Eintrag von Kunststoffabfall in die Umwelt	6
2.3 Eintrag von Treibhausgas in die Umwelt	8
2.4 Nachhaltige Entwicklung in der Abfallwirtschaft	10
2.4.1 Entwicklung der Abfall- zur Kreislaufwirtschaft	11
2.4.2 Status Quo	13
3 Klassifizierung von Einwegfeuerzeugen.....	16
3.1 Materialcharakterisierung	18
3.1.1 Dichtebestimmung	19
3.1.2 Energiedispersive Röntgenspektroskopie.....	20
3.1.3 Fouriertransformierte Infrarot-Spektroskopie.....	21
3.2 Auswertung Massenanteile.....	23
4 Recyclingfähigkeit von Einwegfeuerzeugen	26
4.1 Entwicklungsansatz eines Aufbereitungsprozesses für Feuerzeuge.....	28
4.2 Bedarfsgerechte Zerkleinerung und Entstaubung von Einwegfeuerzeugen.....	29
4.2.1 Zerkleinerung mittels Einwellenzerkleinerers.....	30
4.2.2 Zerkleinerung mittels Bandsäge und Schneidmühle.....	32
4.3 Sortierung in Fraktionen	32
4.3.1 Magnetscheidung.....	35
4.3.2 SBS Induktion	36
4.3.3 Dichtesortierung.....	37
4.4 Werkstofflicher Output und erreichte Recyclingquoten.....	42
5 Werkstoffeigenschaften	46

+

5.1	Zugversuch	48
5.2	Kerbschlagbiegeversuch	48
5.3	Härteprüfung	49
5.4	Dynamische Differenzkalorimetrie	50
5.5	Viskositätsmessung	50
5.6	Wärmeformbeständigkeit	51
5.7	Neu- und Recyclingware im Vergleich	51
6	Wirtschaftlichkeit	55
6.1	Relevanz und Preisgestaltung der rückgewonnenen Materialien	55
6.2	Aufwertungsmöglichkeiten	56
7	Fazit	58
	Quellenverzeichnis	VII
	Anhang 1: Reza Etehad über die Verwendung von Regranulat in Einwegfeuerzeugen	X
	Anhang 2: EDX-Spektren CuAlZn	XI
	Anhang 3: FTIR-Spektren der Feuerzegttypen A, B und D	XV
	Anhang 4: Erdwich Testergebnisse Zerkleinerung von Feuerzeugen	XX
	Anhang 5: Berechnungen Recyclingquoten von Einwegfeuerzeugen	XXII
	Anhang 6: Herstellberichte Universalprobekörper	XXIV
	Anhang 7: Zugversuch Prüfberichte	XXVI
	Anhang 8: Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy Prüfberichte	XXXII
	Anhang 9: Shore-Härte Prüfberichte	XXXV
	Anhang 10: DSC Ergebnisse	XXXVII
	Anhang 11: MFR und MVR Prüfberichte	XL
	Anhang 12: VICAT-Erweichungstemperatur Prüfberichte	XLIV
	Anhang 13: Preiszusammenstellung Einwellenzerkleinerer	XLVI

Anhang 14: Einschätzung Marktpreis Fa. Thees.....	XLVII
Ehrenwörtliche Erklärung	XLVIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Utility Lighter (oben) und Pocket Lighter (unten) im Größenvergleich.....	6
Abbildung 2: Vermüllung durch Kunststoffabfälle am Motagua, Guatemala.....	8
Abbildung 3: Klima und Treibhauseffekt (Grobskizze).....	9
Abbildung 4: Linearität der Stoffflusswirtschaft (schematische Darstellung).....	12
Abbildung 5: Zirkulärer Ablauf der Stoffstromwirtschaft (schematische Darstellung).....	12
Abbildung 6: Einwegfeuerzeuge vom Typ A, verschiedene Hersteller.....	17
Abbildung 7: Einwegfeuerzeug vom Typ B.....	17
Abbildung 8: Einwegfeuerzeuge Typ D, Hersteller Bic Group.....	18
Abbildung 9: Gasleitende Düse in gold-gelblicher Farbe.....	21
Abbildung 10: Massenanteile Feuerzeug Typ A.....	23
Abbildung 11: Massenanteile Feuerzeug Typ B.....	24
Abbildung 12: Massenanteile Feuerzeug Typ D.....	25
Abbildung 13: Mahlgut Feuerzeuge Typ A nach Zerkleinerung, Korngröße ≤ 10 mm.....	31
Abbildung 14: Mit Bandsäge vorgenommene Zerteilung, Feuerzeuge Typ A.....	32
Abbildung 15: Mehrstufiger Sortierprozess für Feuerzeuge vom Typ A und Typ D.....	34
Abbildung 16: Magnetisch abgeschiedene Stofffraktionen Typ A (links) und Typ D (rechts).....	35
Abbildung 17: Induktiv abgeschiedene Stofffraktionen Typ A (links) und Typ D (rechts).....	37
Abbildung 18: Schwimm-Sink-Trennung SAN (bunt) + POM (weiß) in NCI-Lösung (links).....	38
Abbildung 19: Aus H ₂ O abgeschöpftes Leichtgut der Versuchsmasse Typ A.....	38
Abbildung 20: Aus Typ A erhaltenes Schwergut (links) und Leichtgut (rechts).....	39
Abbildung 21: Aus Typ D erhaltenes Schwergut und Leichtgut (rechts).....	40
Abbildung 22: Erreichte Fraktionierung der Versuchsmenge Typ A.....	42
Abbildung 23: Erreichte Fraktionierung der Versuchsmenge Typ D.....	42
Abbildung 24: Restkunststoffgehalte in Metallfraktionen der Feuerzeuge Typ A und Typ D.....	43
Abbildung 25: Probekörper aus SAN-Rezyklat, Feuerzeug Typ A.....	46
Abbildung 26: Probekörper aus POM-Rezyklat, Feuerzeug Typ D.....	46
Abbildung 27: Vergleich Werkstoffeigenschaften SAN, Neu- und Recyclingware.....	51
Abbildung 28: Vergleich Werkstoffeigenschaften POM, Neu- und Recyclingware.....	52
Abbildung 29: Fehlstelle in der Bruchfläche des POM-Probekörpers, Vergrößerung *100.....	52
Abbildung 30: Fehlstelle in der Bruchfläche des POM-Probekörpers, Vergrößerung *200.....	53

A 4 Prüfprotokoll Schwimm-Sink-Trennung



Ostfalia
Hochschule für angewandte
Wissenschaften

26.01.21

Prüfprotokoll

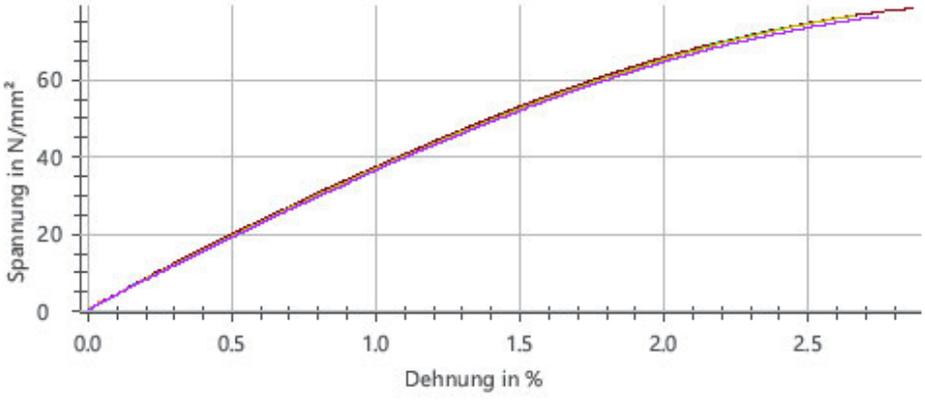
Kunde : Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften
 Prüfnorm : DIN EN ISO 527-1
 Werkstoff : SAN-Rezyklat Einwegfeuerzeuge aus Schwimm-Sink-Trennung
 Probenotyp : Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2
 Vorbehandlung : Min. 16h bei 23°C und 50% relativer Feuchte
 Prüfer : Vincent Leib
 Bemerkung : Dichte=1,0843g/cm³
 Maschinendaten : Zwick/Roell BZ1; Dehnungsaufnehmer Zwick/Roell VideoXtens
 TestXpert III V1.4; Zwick/Roell Werkskalibrierung bis 02/2021

Vorkraft : 20 N Beginn Zugmodulermittlung : 0,05 %
 Geschwindigkeit Zugmodul : 1 mm/min Ende Zugmodulermittlung : 0,25 %
 Prüfungsgeschwindigkeit : 5 mm/min

Prüfergebnisse:

	L ₀	E _t	σ _M	ε _a	h	b
Legende	Nr	mm	MPa	MPa	%	mm
●	1	74,74	3850	76,4	2,6	4,00
●	2	74,75	3970	73,2	2,4	4,00
●	3	74,75	3990	78,4	2,9	4,00
●	4	74,74	3880	76,5	2,7	4,00
●	5	74,74	3820	76,2	2,7	4,00

Seriengrafik:



A 5 Bachelorthesis Optische Sortierung von Einwegfeuerzeugen

Ostfalia
Hochschule für angewandte
Wissenschaften



Fakultät Fahrzeugtechnik

BACHELORTHESIS

Optische Sortierung von Einwegfeuerzeugen

zum Erlangen des akademischen Grades

BACHELOR OF SCIENCE

im Studiengang

Material und technisches Design

vorgelegt von:	Alena Gase 70464318
Erstprüfer:	Prof. Dr. Achim Schmiemann
Zweitprüfer:	Dipl.-Ing. Sylvia Ott-Welke
Abgabedatum:	15.11.2021

<u>Eidesstattliche Erklärung</u>	
<u>Danksagung</u>	
<u>Kurzbeschreibung</u>	
<u>Inhaltsverzeichnis</u>	I
<u>Abbildungsverzeichnis</u>	IV
<u>Tabellenverzeichnis</u>	VI
<u>Abkürzungsverzeichnis</u>	VI
<u>Symbolverzeichnis</u>	VII
<u>1. Einleitung</u>	1
<u>2. Grundlagen</u>	4
<u>2.1. Feuerzeuge</u>	4
<u>2.1.1. Verwendete Materialien</u>	5
<u>2.1.2. Mengenaufkommen Feuerzeuge</u>	6
<u>2.1.3. Entsorgung und Verwertung von Feuerzeugen</u>	7
<u>2.2. Optische Sortierung</u>	9
<u>2.2.1. Licht</u>	9
<u>2.2.2. Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie</u>	11
<u>2.2.3. Anregungsbedingungen</u>	12
<u>2.2.4. Schwingungsmodi in einem Molekül</u>	14
<u>2.2.5. Sensoren</u>	15
<u>2.2.5.1. Einteilung von Sensoren</u>	16
<u>2.2.5.2. Störgrößen</u>	16
<u>2.3. NIR-Sortieranlage</u>	17
<u>3. Optische Sortierbarkeit von Einwegfeuerzeugen</u>	20
<u>3.1. Feuerzeuge für die Sortiersuche</u>	20
<u>3.1.1. Nicht sortierte Feuerzeuge für die Zerkleinerung</u>	21
<u>3.1.2. Ganze Feuerzeuge für die Sortiersuche</u>	23

3.1.3.	<u>Vorsortierte Feuerzeuge für die Zerkleinerung</u>	24
3.2.	<u>In Feuerzeugen enthaltene Restgasmenge</u>	26
3.2.1.	<u>Lieferung 1 - nicht vorsortiert</u>	26
3.2.2.	<u>Ganze Feuerzeuge</u>	28
3.2.3.	<u>Lieferung 2 - vorsortiert</u>	28
3.3.	<u>Optische Sortieranlagen für praktischen Sortierversuche</u>	30
3.3.1.	<u>Optische Sortieranlage für die ganzen Feuerzeuge</u>	30
3.3.2.	<u>Optische Sortieranlage für die zerkleinerten Feuerzeuge</u>	31
3.4.	<u>Sortierversuche</u>	31
3.4.1.	<u>Ganze Feuerzeuge</u>	32
3.4.1.1.	<u>Vorbereitungen</u>	32
3.4.1.2.	<u>Praktische Sortierversuche ganze Feuerzeuge</u>	36
3.4.2.	<u>Zerkleinerte nicht vorsortierte Feuerzeuge</u>	39
3.4.2.1.	<u>Kalibrierung der AUTOSORT FLAKE</u>	39
3.4.2.2.	<u>Vorbereitungen</u>	41
3.4.2.3.	<u>Praktische Sortierversuche nicht vorsortierte Flakes</u>	45
3.4.2.4.	<u>Nachfolgende Untersuchungen nicht vorsortierter Flakes</u>	48
3.4.3.	<u>Zerkleinerte vorsortierte Feuerzeuge</u>	48
3.4.3.1.	<u>Vorbereitungen</u>	49
3.4.3.2.	<u>Praktische Sortierversuche vorsortierte Flakes</u>	53
3.4.3.3.	<u>Nachfolgende Untersuchungen vorsortierte Flakes</u>	57
3.5.	<u>Ergebnis der Sortierversuche</u>	57
4.	<u>Zusammenfassung</u>	58
5.	<u>Fazit</u>	61
6.	<u>Quellenverzeichnis</u>	VIII
7.	<u>Anhang</u>	X
A1	<u>Feuerzeuge</u>	X
A2	<u>Versuchsprotokoll der Firma Erdwich</u>	XI

<u>3.4.2.4.</u>	<u>Nachfolgende Untersuchungen nicht vorsortierter Flakes</u>	48
<u>3.4.3.</u>	<u>Zerkleinerte vorsortierte Feuerzeuge</u>	48
<u>3.4.3.1.</u>	<u>Vorbereitungen</u>	49
<u>3.4.3.2.</u>	<u>Praktische Sortierversuche vorsortierte Flakes</u>	53
<u>3.4.3.3.</u>	<u>Nachfolgende Untersuchungen vorsortierte Flakes</u>	57
<u>3.5.</u>	<u>Ergebnis der Sortierversuche</u>	57
<u>4.</u>	<u>Zusammenfassung</u>	58
<u>5.</u>	<u>Fazit</u>	61
<u>6.</u>	<u>Quellenverzeichnis</u>	VIII
<u>7.</u>	<u>Anhang</u>	X
	<u>A1 Feuerzeuge</u>	X
	<u>A2 Versuchsprotokoll der Firma Erdwich</u>	XI
	<u>A3 Technische Daten AUTOSORT-Anlage bei TOMRA</u>	XII
	<u>A4 Technische Daten AUTOSORT FLAKE-Anlage bei TOMRA</u>	XIII

A 6 Forschungsarbeit Werkstoffliches Recycling von Einwegfeuerzeugen – Sortierverfahren für die Kunststoffgehäuse-Fraktion

Fakultät Fahrzeugtechnik

Forschungsarbeit

Werkstoffliches Recycling von
Einwegfeuerzeugen - Sortierverfahren für die
Kunststoffgehäuse-Fraktionen

im Studiengang

Material und technisches Design

vorgelegt von:

Alena Gase
70464318

Prüfer:

Prof. Dr. Achim Schmiemann
Dipl.-Ing. Sylvia Ott-Welke

Abgabedatum:

03.06.2021

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Kurzbeschreibung/Abstrakt	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Symbolverzeichnis	VIII
1. Vorwort	1
2. Einleitung	2
3. Grundlagen	5
3.1. Sortieren	5
3.2. Verwertungsarten	6
3.2.1. Thermische Verwertung	7
3.2.2. Werkstoffliche Verwertung	7
3.2.3. Rohstoffliche Verwertung	9
3.3. Aufbau von Feuerzeugen	9
3.4. Zu trennende Stoffe	10
3.4.1. Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat (SAN)	11
3.4.2. Polyoxymethylen (POM)	11
4. Sortierverfahren für die Kunststoffgehäuse-Fractionen	12
4.1. Dichtesortierung	12
4.1.1. Trennflüssigkeit	14
4.1.2. Trennverfahren	14
4.1.2.1. Schwimm-Sink-Sortierung	14
4.1.2.2. Hydrozyklon	15
4.1.2.3. Sortierzentrifuge CENSOR	16

A 7 Bachelorthesis Herstellung und Prüfung additiv gefertigter Prüfkörper aus Einwegfeuerzeug-Kunststoff



Fakultät Fahrzeugtechnik

BACHELORTHESIS

Herstellung und Prüfung additiv gefertigter
Probekörper aus Einwegfeuerzeug-Kunststoffen

zum Erlangen des akademischen Grades

BACHELOR OF SCIENCE

im Studiengang

Material + Technisches Design

vorgelegt von:	Uljana Möser 70463743
Erstprüfer:	Prof. Dr. Achim <u>Schmiemann</u>
Zweitprüferin:	Dipl.-Ing. Sylvia Ott-Welke
Abgabedatum:	09.06.2022

Inhalt

Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Formelverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Symbolverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Einführung in das Projekt „Recycling von Feuerzeugen“	3
2.1.1 Einwegfeuerzeug	7
2.1.2 Wirtschaftlichkeit der Filamentherstellung	9
2.2 Kunststoffe.....	12
2.2.1 Styrol-Acrylnitril-Copolymer - SAN.....	12
2.2.2 Polyoxymethylen - POM	13
2.2.3 Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer – ABS.....	14
2.2.4 Thermoplastische Polyurethan-Elastomere – TPU.....	15
2.3 Analytische Methoden	16
2.3.1 FTIR-Spektroskopie.....	16
2.3.2 Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC).....	17
2.3.3 Feuchtigkeitsmessgeräte „Hydro Tracer“	19
2.3.4 Zugprüfung	20
2.4 Fertigungstechnik	22
2.4.1 Extrusion.....	22
2.4.2 3D-Druck - Fused Filament Fabrication.....	24
2.4.3 Werkstoffliche Aufbereitung und Verwertung	25
3 Tankmaterialbestimmungen	27
3.1 FTIR-Spektroskopie verschiedener Feuerzeugtanks	27
3.2 DSC verschiedener Feuerzeugtanks.....	30
3.3 Ergebnisse Materialbestimmung und Massenanteile	32
4 Verarbeitung der Neuware	36
4.1 Bestellung der Neuware	36
4.2 Analyse der Neuware	37

4.3	Filamentherstellung der Neuware	41
4.3.1	Filamentherstellung aus Tyril™ 905	43
4.3.2	Filamentherstellung aus Delrin® 100 NC010	49
4.4	3D-Druck der Neuware	53
4.4.1	Fused Filament Fabrication aus Tyril™ 905	56
4.4.2	Fused Filament Fabrication aus Delrin® 100 NC010	62
5	Verarbeitung des Feuerzeug-SANs	67
5.1	Bestellung und Analyse der SAN-Feuerzeuge	67
5.2	Aufbereitung: Vom SAN-Feuerzeug zum Regranulat	68
5.3	Filamentherstellung aus Feuerzeug-SAN	73
5.4	Fused Filament Fabrication aus Feuerzeug-SAN	77
6	Zugprüfung	80
6.1	Diskussion zu den Ergebnissen der Zugprüfung	86
7	Fazit	87
	Literaturverzeichnis	IX
	Anhang	XIV
A 1	Feuerzeugaufkommen	1
A 2	E-Mail von Reza Etehad zu Feuerzeug-Import	2
A 3	E-Mail von SuperDrecksKëscht zu gesammelten Feuerzeugen	2
A 4	FTIR-Spektren verschiedener Feuerzeugtanks	3
A 5	FTIR-Spektren von Feuerzeugtanks im Vergleich	9
A 6	DSC-Messkurven verschiedener Feuerzeugtanks	10
A 7	E-Mails der Kunststoff-Produzenten	12
A 8	E-Mails der ALBIS Distribution GmbH & Co. KG	13
A 9	E-Mail der Kunststoff-Kontor-Hamburg GmbH	15
A 10	E-Mail der PRO-plast Kunststoff GmbH	16
A 11	Datenblatt Tyril™ 905	17
A 12	Datenblatt Delrin® 100 NC010	18
A 13	DSC-Messkurven Neuware	22
A 14	Bericht Feuchtigkeitsmessung	23
A 15	Aufbau Kompaktextruder E 19/25 D [61]	24
A 16	Technische Daten Kompaktextruder E 19/25 D [61]	25

A 17	Datenblatt Terluran® HI-10	26
A 18	Mikroskopische Aufnahmen der Tyril-Filamente.....	28
A 19	Datenblatt Desmopan® 85085A DPS 055.....	29
A 20	Technische Daten Ultimaker 3	30
A 21	Cura-Einstellungen SAN.....	31
A 22	Skizze externe Spulenhalter	33
A 23	Berechnung Längenausdehnungskoeffizient [62]	34
A 24	FTIR-Spektrum von blauem TOM-Feuerzeugtank	35
A 25	DSC-Messkurve von blauem TOM-Feuerzeugtank.....	35
A 26	Technische Daten Doppelschneckenextruder.....	36
A 27	Technische Daten Zwick/Roell BZ1	38
A 28	Protokoll Zugprüfung Tyril™ 905.....	39
A 29	Protokoll Zugprüfung Feuerzeug-SAN	43
A 30	Geprüfte Zugstäbe - Bruchbilder	47

A 8 Forschungsarbeit Filamentherstellung und 3D-Druck von SAN und POM



Fakultät Fahrzeugtechnik

FORSCHUNGSARBEIT

Filamentherstellung und 3D-Druck
von SAN und POM

im Studiengang

Material + Technisches Design

vorgelegt von:

Uljana Möser
70463743

Prüfer:

Prof. Dr. Achim Schmiemann

Abgabedatum:

07.02.2022

Inhalt

Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
Symbolverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Polyoxymethylen	3
2.1 Eigenschaften POM.....	4
2.1.1 Eigenschaftsunterschiede zwischen POM-Homo- und Copolymerisaten.....	7
2.2 Verarbeitung POM.....	8
2.3 Anwendung POM.....	11
3 Styrol-Acrylnitril-Copolymer	13
3.1 Herstellung SAN	13
3.2 Eigenschaften SAN.....	14
3.3 Verarbeitung SAN.....	16
3.4 Anwendungen SAN	16
4 Extrusion	18
4.1 Extruder	19
4.1.1 Einschneckenextruder	20
4.1.2 Doppelschneckenextruder	23
4.2 Filamentherstellung	25
5 3D-Druck	30
5.1 Fused Filament Fabrication	34
5.2 FFF-Druckprobleme und deren Anpassungen zur Fehlerprävention	39
5.3 3D-Druck von POM.....	45
5.4 3D-Druck von SAN	47
5.5 Vor- und Nachteile additiver Fertigung	48
5.6 Aussichten	49
6 Fazit	52
Literaturverzeichnis	V

A 9 Bachelorthesis Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Einwegfeuerzeug-Rezyklat



Fakultät Fahrzeugtechnik

BACHELORTHESIS

**Untersuchung der mechanischen Eigenschaften
von Einwegfeuerzeug-Rezyklat**

zum Erlangen des akademischen Grades

BACHELOR OF SCIENCE

im Studiengang

Material + Technisches Design

vorgelegt von:	Hamdiya Örek Matrikelnummer: 70459906
Erstprüfer:	Prof. Dr. Achim Schmiemann
Zweitprüfer:	Dipl.-Ing. Sylvia Ott-Welke
Abgabedatum:	23.06.2022

Inhalt

Eidesstaatliche Erklärung	
Danksagung	
Kurzbeschreibung	
Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Probekörperherstellung	3
2.1 Aufbereitung der Recyclingmaterialien SAN und POM	3
2.1.1 Aufbereitung SAN	3
2.1.2 Aufbereitung POM	5
2.2 Herstellung der Probekörper im Spritzguss	10
2.3 Beurteilung der Ergebnisse der hergestellten Probekörper	14
3 Mechanische Prüfverfahren	20
3.1 Quasistatische Beanspruchung	21
3.2.1 Zugversuch	21
3.2.2 3-Punkt-Biegeversuch	22
3.2 Schlagartige Beanspruchung	23
3.2.1 Kerbschlagbiegeversuch - Charpy-Verfahren	23
3.2.2 Durchstoßprüfung (Fallbolzenversuch)	23
4 Ergebnisse der mechanischen Prüfungen	25
4.1 Ergebnisse des Zugversuchs	25
4.2 Ergebnisse des 3-Punkt-Biegeversuchs	26
4.3 Ergebnisse der Kerbschlagbiegeprüfung	27
4.4 Ergebnisse des Durchstoßversuchs	28
5 Beurteilung der Ergebnisse mechanischer Prüfungen - Neu- und Recyclingware im Vergleich	29
6 Zusammenfassung und Fazit	39
Quellenverzeichnis	VI

Anhang	VIII
A 1 Herstellberichte der Probekörper	1
A 2 Ergebnisse der DSC-Messung sowie FTIR-Spektrum von PA 66	16
A 3 Ergebnisse des Zugversuchs.....	18
A 4 Ergebnisse des 3-Punkt-Biegeversuchs	28
A 5 Ergebnisse der Kerbschlagbiegeprüfung	38
A 6 Ergebnisse des Durchstoßversuchs	44

A 10 Forschungsarbeit Feuerzeugrecycling – Untersuchung von Stabfeuerzeugen

Fakultät Fahrzeugtechnik

FORSCHUNGSARBEIT

Feuerzeugrecycling – Untersuchung von
Stabfeuerzeugen

im Studiengang

Material + technisches Design

vorgelegt von:	Hamdiya Örek Matrikelnummer: 70459906
Erstprüfer:	Prof. Dr. Achim Schmiemann
Zweitprüfer:	Dipl. - Ing. Sylvia Ott-Welke
Abgabedatum:	22.03.2022

Inhalt

Eidesstatliche Erklärung	
Inhalt.....	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Stabfeuerzeuge - Grundlagen.....	2
2.1 Definition.....	2
2.2 Stabfeuerzeug-Typen	2
2.2.1 Gas-Stabfeuerzeug.....	3
2.2.2 Gebogene Modelle	4
2.2.3 Lichtbogen-Stabfeuerzeug.....	5
2.2.4 Jetflamme-Stabfeuerzeug.....	5
2.3 Funktionsweise	7
2.4 Vor-und Nachteile von Stabfeuerzeugen.....	7
3 Untersuchung der Stabfeuerzeuglieferungen.....	8
3.1 Erfassung der Mengen	8
3.1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	12
3.2 Ermittlungen der verschiedenen Materialien	13
3.2.1 Mengen.....	15
3.2.1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	18
3.2.2 Materialarten	19
3.2.2.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	24
4 Fazit und Ausblick.....	27
Quellenverzeichnis.....	VI
Anhang	VIII
A 1 FTIR-Spektren der Gehäuse	1
A 2 FTIR-Spektren der Gaskörper	7
A 3 FTIR-Spektren ausgewählter Komponenten innerhalb des Gehäuses	9
A4 FTIR-Spektren von ABS- und SAN-Granulat.....	17

A 11 Bachelorthesis Feuerzeugrecyclinganlage: Von der Patentrecherche bis zum Prozessablauf



Fakultät Fahrzeugtechnik

BACHELORTHESIS

Feuerzeugrecyclinganlage: Von der Patentrecherche bis zum Prozessablauf

zum Erlangen des akademischen Grades

BACHELOR OF SCIENCE

im Studiengang

Material + technisches Design

vorgelegt von:	Linda Storm 70458316
Erstprüfer:	Prof. Dr. Achim Schmiemann
Zweitprüfer:	Dipl.-Ing. Sylvia Ott-Welke
Abgabedatum:	07.04.2022

Inhalt

Eidesstattliche Erklärung.....	
Danksagung	
Abstrakt	
Abstract	
Inhalt.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Diagrammverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VI
1 Einleitung	1
2 Definitionen	3
2.1 Flüssiggas.....	3
2.2 Batchprozess	3
2.3 Patent.....	3
2.4 IPC (International Patent Classification).....	3
2.5 Aerosol	3
2.6 Gaszentrifuge	4
3 Flüssiggas und deren Umwelteinflüsse.....	5
4 Patente.....	7
4.1 Aktuelle Patentsituation.....	10
4.1.1 Despray.....	10
4.1.2 US ecology	11
4.1.3 Colgate-Palmolive Company.....	13
4.1.4 AGR Abfallbeseitigung-Gesellschaft Ruhrgebiet	13
4.1.5 Weber, Franz Josef; Hallemeier, Rolf	13
4.1.6 Fuji Car Mfg. Co., Ltd.; Iwatani International Corporation	13
4.1.7 Cound, Cary Dean; Vivona, Joseph Anthony	14
4.1.8 CAMPBELL, Michael, C.; CAMPBELL, Katherine, C.	14
4.1.9 Erdmann, Rüdiger.....	14
4.2 Ab wann gilt ein Patent als verletzt?	15

4.3	Schadensansprüche.....	16
5	Atex-Richtlinien	17
6	Anlagenaufbau	18
6.1	Alternativer Aufbau.....	19
7	Komponenten.....	21
7.1	Gasbehälter	21
7.2	Zweiwellen-Zerkleinerer.....	23
7.3	Absauganlage/ Gas-Ventilator.....	24
7.4	Gasverflüssigungseinrichtung.....	25
7.5	Stickstoff-Erzeuger/ Stickstoff-Generator	25
7.6	Rohre/Schläuche	27
7.7	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik	27
8	Behördliche Genehmigungen, Beschlüsse und Regeln.....	30
8.1	Technische Regeln Flüssiggas (TRF 1988).....	30
8.2	Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS)/ Betriebssicherheit (TRBS)	30
8.3	Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) und Betriebssicherheits-verordnung (BetrSichV)	31
8.4	Anwendung auf das Feuerzeugrecycling-Projekt	32
9	Sicherheitsvorkehrungen	35
10	Prozessablauf/ Beschreibung.....	39
11	Mögliche Problematiken	41
12	Fazit/ Zusammenfassung	42
13	Ein Blick in die Zukunft	44
14	Quellenverzeichnis	IV
Anhang 1 Despray-Patent „DEVICE AND METHOD FOR IN BATCH PROCESSING OF SPRAY CANS“		X
Anhang 2 Despray-Patent „DEVICE AND METHOD FOR PROCESSING OF SPRAY CANS“		XI
Anhang 3 USecology-Patent „AEROSOL RECYCLING PROCESS AND SYSTEM“		XII
Anhang 4 Colgate-Palmolive Company-Patent „Apparatur for the emptying of spray cans“		XIII
Anhang 5 AGR-Patent „Anlage zur Beseitigung von Spraydosen und anderen unter Druck stehenden Behältern“		XIV

Anhang 6 Weber, Franz Josef; Hallemeier, Rolf-Patent „Verfahren und Vorrichtung zur Aufbereitung und Entsorgung von Spraydosen verschiedener Füllungsgrade“	XV
Anhang 7 Fuji Car Mfg. Co., Ltd.; Iwatani International Corporation-Patent „METHOD AND DEVICE FOR DISPOSING OF SCRAPPED GAS CONTAINER“	XVI
Anhang 8 Cound, Cary Dean; Vivona, Joseph Anthony-Patent „AEROSOL CAN EVACUATOR AND COMPACTOR“	XVII
Anhang 9 CAMPBELL, Michael, C.; CAMPBELL, Katherine, C.-Patent „PUNCTURING DEVICE FOR AEROSOL CONTAINERS“	XVIII
Anhang 10 Erdmann, Rüdiger-Patent „Vorrichtung zum Entleeren einer Gasflasche, deren Gasauslaßventil nicht mehr zu öffnen ist“	XIX
Anhang 11 Inhaltsverzeichnis der Gefahrstoffverordnung	XX
Anhang 12 Inhaltsverzeichnis der Betriebssicherheitsverordnung	XXI
Anhang 13 E-Mail von Herr Zander (Firma: ULT)	XXII
Anhang 14 E-Mail von Herr Balbach (Patentanwalt)	XXIII
Anhang 15 E-Mail von Herr Balbach	XXIV

A 12 Forschungsarbeit Feuerzeugrecycling; Auffangen und Speichern der Restgase



Fakultät Fahrzeugtechnik

Forschungsarbeit

**Feuerzeugrecycling; Auffangen und Speichern
der Restgase**

im Studiengang

Material + technisches Design

vorgelegt von:	Linda Storm 70458316
Erstprüfer:	Prof. Dr. Achim Schmiemann
Zweitprüfer:	Dipl.-Ing. Sylvia Ott-Welke
Abgabedatum:	16.11.2021

Inhalt

Eidesstattliche Erklärung.....	
Inhalt.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	I
Tabellenverzeichnis.....	IV
Diagrammverzeichnis.....	V
Formelverzeichnis.....	VI
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung.....	1
2 Feuerzeugarten.....	2
2.1 Benzinfeuerzeug.....	2
2.2 Luntenfeuerzeug.....	3
2.3 Sturmfeuerzeug.....	4
2.4 Elektrisches Feuerzeug.....	4
2.5 Tischfeuerzeug.....	5
2.6 Gasfeuerzeug.....	5
3 Funktionsweise eines Einwegfeuerzeuges.....	6
3.1 Entstehung der Flamme.....	6
3.1.1 Reibrad-Feuerzeug.....	6
3.1.2 Piezo-Zündung.....	6
4 Flüssiggas.....	7
4.1 Butan.....	7
4.2 Propan.....	8
4.3 Gemische.....	10
4.3.1 Siedediagramm.....	11
4.4 Aufbewahrung/ Speicherung.....	13
4.5 Zusammensetzung von Flüssiggasgemischen.....	13

I

4.6	Änderung der Zusammensetzung durch Entnahme aus der Gasphase.....	15
4.7	Verdampfungsenthalpie	15
4.7.1	Gleichgewichtsverdampfungsenthalpie	16
4.7.2	Integrale isobare Verdampfungsenthalpie	16
4.8	Verflüssigung des Gases	17
4.8.1	Druckmethode	19
4.8.2	Abkühlmethode	20
5	Atex-Leitlinien.....	22
5.1	Ziel der Leitlinien.....	22
5.2	Bestimmung des Schutzgrades	22
6	Fazit	25
7	Quellenverzeichnis.....	26

A 13 Auswahl Zeitungen über das DBU-Projekt

Auswahl an Zeitungen, die über das DBU-Projekt berichtet haben.



A 14 Artikel im Recycling Magazin



Kunststoffverwertung aus Feuerzeugen

Gebrauchsgegenstände wie Zahnbürsten, Kugelschreiber oder Einwegfeuerzeuge aus Kunststoffen sind aus unserem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Was passiert mit diesen Kunststoffprodukten nach ihrer Nutzung? Worin besteht eine „fachgerechte“ Entsorgung dieser Produkte? Gehören sie in den Gelben Sack, die gelbe Tonne oder in den Restmüll? Gleichgültig wohin, jede Art der Entsorgung ist immer noch besser als Feuerzeuge bedenkenlos einfach an den Straßenrand oder sonst wohin zu werfen. Das ist klar.



Vom Kooperationspartner LRD entwickelte Sammelbox für Feuerzeuge

Quelle: LRD 2022

Es ist bekannt, dass viele Produkte und deren Komponenten nicht aus dem Gelben Sack oder dem Restmüll aussortiert werden können. Dadurch kann ihr Recyclingpotenzial nicht ausgeschöpft werden. Unter Betrachtung des Umweltschutzes und der damit einhergehenden Nachhaltigkeit sollten wir fossile Ressourcen schonen und vermehrt rezyklierte Materialien einsetzen. Dazu hat das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) eine fünfstufige Abfallhierarchie festgelegt. Diese besagt unter anderem, dass das Recycling höher einzustufen ist als die „energetische“ Verwertung.

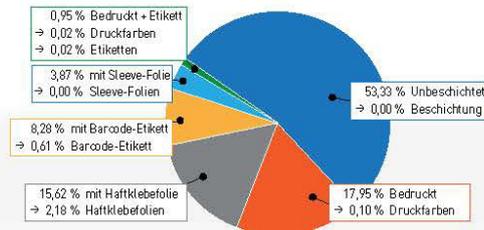
Massenprodukt Feuerzeug

Ein Produkt, das auf den ersten Blick recht unscheinbar erscheint, aber in großen Mengen vertrieben wird, ist das (Einweg-) Feuerzeug, wie es auf der Abb. 1 exemplarisch zu sehen ist.

In einem einzigartigen Projekt unterstützt seit geraumer Zeit die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) das Recycling von Feuerzeugen. Sie folgt damit einem Antrag der LRD Umweltdienste GmbH und der Ostfalia Hochschule, die gemeinsam das Recycling von Feuerzeugen aus der Taufe heben wollen. Die Idee ist nicht ganz neu; in Luxemburg wird schon gesammelt. Auch wiederbefüllbare Mehrwegfeuerzeuge werden betrachtet, da sie nach mehrmaligem Befüllen ebenfalls entsorgt werden.

Die Feuerzeuge müssen hohe Sicherheitsstandards erfüllen und werden trotz des geringen Preises aus hochwertigen Komponenten hergestellt. Im Jahr werden in Deutschland rund 162 Millionen Feuerzeuge verkauft. Die meisten dieser Feuerzeuge landen im Restmüll, bevor das enthaltene Gas vollständig verbraucht ist. Es besteht die Gefahr einer Verpuffung im Müllfahrzeug und/oder das Ausgasen von Restmengen an Brenngas in die Atmosphäre. Bei durchschnittlich 0,25 ml Restgas pro Feuerzeug entstehen jährlich etwa 40.500 Liter Butan mit großem Ozonschädigungspotenzial. Das kann verhindert werden, indem eine

Massenanteile unterschiedlich beschichteter SAN Feuerzeuge und der Beschichtungen je Feuerzeugkategorie.



Reine SAN Feuerzeugpartikel

Quelle: LRD 2022

Verfahrenstechnik entwickelt wird, mit der ein sicheres Entfernen und Speichern der Brenngase möglich wird und ihnen ein sinnvoller Zweck zur Weiterverwertung zugeordnet wird.

Bei unsachgemäß entsorgten Feuerzeugen zerfällt zudem im Laufe der Zeit der Torso Mikroplastik. Zielsetzung des Projektes im Sinne der Nachhaltigkeit, das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) mit rund 390.000 Euro finanziell gefördert wird, ist die Rückführung aller in den Einwegfeuerzeugen enthaltenen Materialien und Restgase in die entsprechenden Materialkreisläufe, einschließlich des Engineering einer Pilotanlage sowie die Entwicklung eines logistischen Konzepts für die Sammlung der Feuerzeuge.

Hochwertige Kunststoffe

Besonders die hochwertigen Gehäusekunststoffe sollen möglichst sortenrein zurückgewonnen werden. Eine Herausforderung dabei ist, dass ein Großteil der Feuerzeuge aus Marketinggründen mit diversen Beschichtungen versehen sind. Etwa die Hälfte der Einwegfeuerzeuge haben Beschichtungen aus Kunststoffen wie Haftklebefolien, Barcode-Etiketten, Sleeve-Folien, Bedruckungen und Gummierungen. Dies wird in der Abb. 2 als Diagramm verdeutlicht. Für eine sortenreine Rückgewinnung der Gehäusekunststoffe müssen diese Beschichtungen entfernt werden. Das Entfernen der Beschichtungen geht einher mit einem erheblichen Aufwand, gegebenenfalls mit dem Einsatz großer Mengen an Lösungsmitteln sowie einem erhöhten Energieeinsatz. Der Lösungsmittel- und Energieeinsatz wäre zum einen ökologisch bedenklich und zum anderen würden zusätzliche Kosten entstehen. Tatsächlich wird die Recyclingfähigkeit von Einwegfeuerzeugen durch die aufgetragenen Beschichtungen eingeschränkt.

Die optische Sortierung von Feuerzeugen wurde mit Nahinfrarot-Technologie untersucht. Es zeigt sich, dass sich die Feuerzeuge sowohl im Ganzen als auch zerkleinert, wie in der Abb. 3 zu erkennen ist, optisch sortieren lassen. Der Einsatz einer optischen Sortierung im Recyclingprozess von Feuerzeugen ist sehr gut einsetzbar.

Nach der vorgeschalteten optischen Sortierung erfolgt das Aufbrechen der sortenreinen Feuerzeuge bei gleichzeitiger Absaugung der Gase. Dies stellt eine weitere Herausforderung dar, da der Umgang mit Gasen unter hohen Sicherheitsbestimmungen (Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) und Betriebssicherheitsverordnungen (BetrSichV)) erfolgen muss. Dieser Prozess verlangt ein großes Maß an Knowhow im Bereich der Verfahrens-, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik. Es schließt

sich ein mechanisches Trennverfahren in Form von magnetischer und induktiver Metallabscheidung an. Die nachgeschaltete klassische Nassaufbereitung in Form von Schwimm-Sink-Trennung mit anschließender Trocknung separiert die verschiedenen Kunststoff- und Störfractionen.

Die getrockneten Kunststofffraktionen werden durch eine anschließende Extrusion mit Schmelzfiltration qualitativ verbessert und zu Regranulat verarbeitet. Um am Ende der Aufbereitungskette hochwertige Rohstoffe zu erhalten, werden die Regnulate und die im anschließenden Spritzgussverfahren hergestellten Normprüfkörper (Abb. 4) auf ihre Werkstoffkennwerte und -eigenschaften, wie Zugprüfung, Biegefestigkeit, Schlagzähigkeit geprüft und untersucht.

Sammelsystem aufbauen

Aus den Erkenntnissen lassen sich Rückschlüsse für die Konstruktion und den Aufbau umwelt- und recyclinggerechter Feuerzeuge ziehen. Beispielsweise sollte für eine recyclinggerechtere Produktgestaltung auf das Beschichten mit Haftklebefolien oder Barcode-Etiketten verzichtet und Sleeve-Folien den Vorzug gegeben werden.

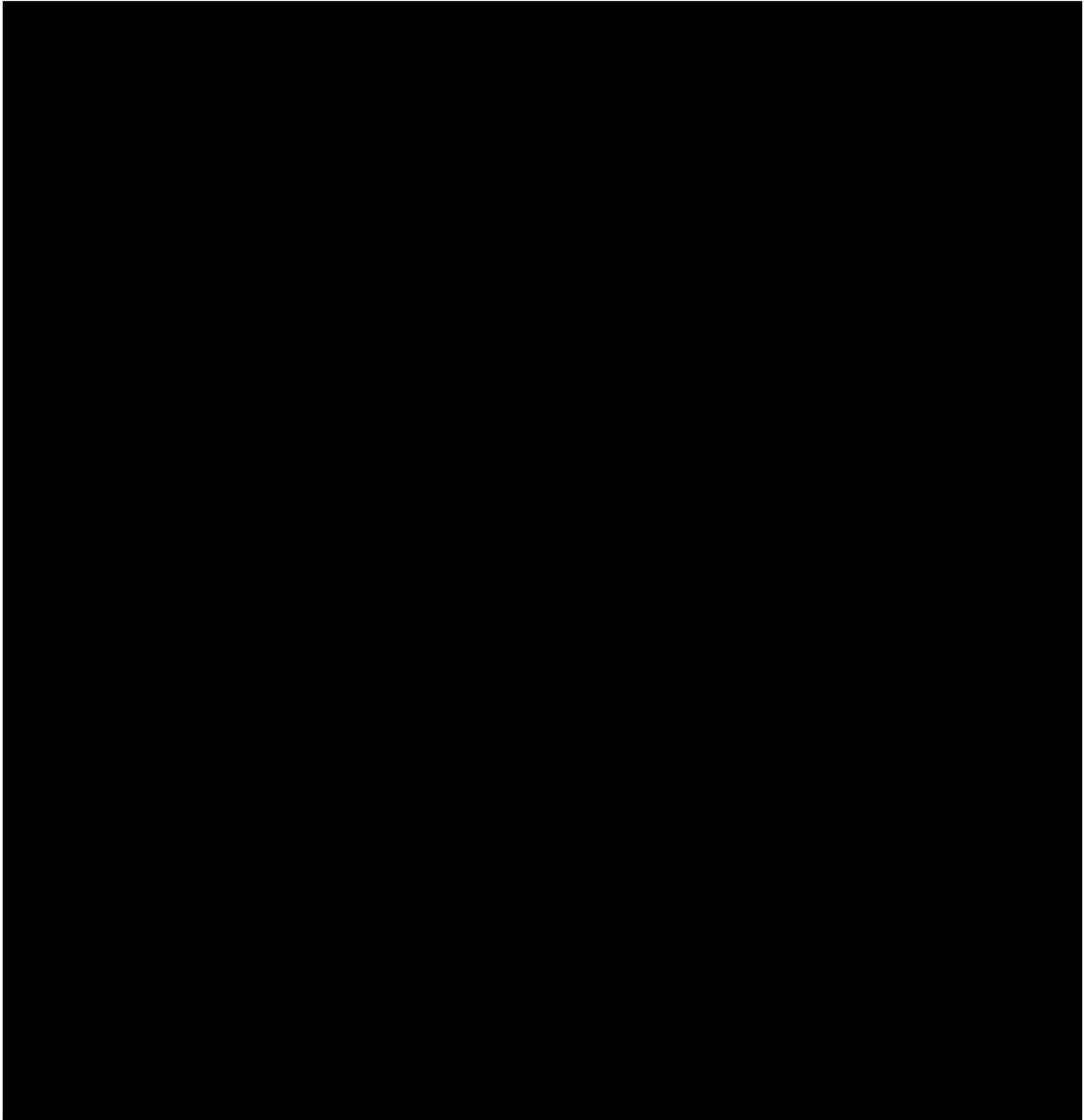
Zurückgewonnen werden in erster Linie hochwertige und nahezu sortenreine Kunststofffraktionen, vorwiegend SAN (Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat) und POM (Polyoxymethylen). Zwar sind die zurückgewonnenen Kunststoffe nicht qualifiziert für einen erneuten Einsatz im Feuerzeug, sodass ein „closed-loop“ entsteht, aber der Bedarf und die Nachfrage nach hochwertigen Kunststoffzyklen ist sehr groß.

Einer der zentralen Punkte in dem von der DBU unterstützten Projekt ist die Initiierung und der Aufbau eines Sammelsystems. LRD Umweltdienste und die Ostfalia stellen sich ein Sammelsystem vergleichbar mit dem etablierten Batteriesammelsystem vor. Allerdings zeigen erste Gespräche mit Tankstellenbetreibern und Handelsketten, dass das Aufstellen zusätzlicher Sammelboxen, wie in Abb. 5 dargestellt, nicht immer auf offene Ohren trifft. Das Handling ist immer mit einem zusätzlichen Aufwand verbunden.

Aber ohne ein funktionierendes Sammelsystem in Form von bereit gestellten Sammelboxen kann die beste Recyclinganlage ihre Arbeit nicht aufnehmen. Aktuell liegt das Augenmerk auf dem Aufbau eines Sammelsystems nach dem Vorbild des Luxemburger Feuerzeugsammelsystems von SuperDrecksKëscht (SDK).

Prof. Dr. Achim Schmiemamm und Sylvia Ott-Welke, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften; Gerhard Naujoks, LRD Löschmittel-Recycling und Umweltdienste GmbH & Co. KG

A 15 Artikel Wolfsburger Allgemeine Zeitung



Aus urheberrechtlichen Gründen geschwärzt.

A 16 Flyer für Werbemaßnahmen

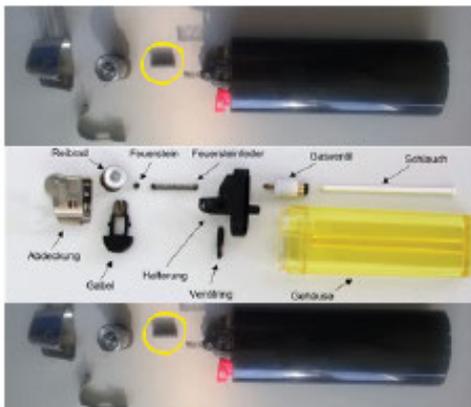


Recycling von (Einweg-) Feuerzeugen

1

Fakten:

In der EU werden jährlich etwa 1,6 Milliarden Feuerzeuge verkauft, weltweit sind es 10 Milliarden Feuerzeuge. Das Recyclingpotenzial beträgt mehr als 20.000 t Altfeuerzeuge in der EU.



2

Wertstoffe:

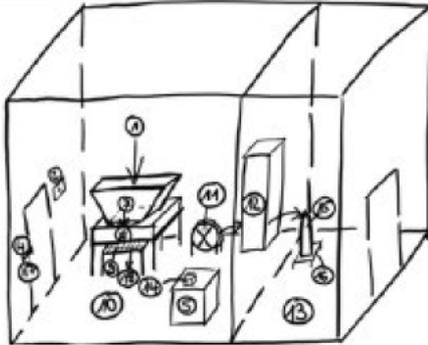
Zwischen 60 und 65% eines Feuerzeugs besteht aus Kunststoffen. Eingesetzt werden hauptsächlich SAN (Styrol-Acryl-Copolymerisat) und POM (Polyoxmethylen).

3

Sammelsystem:

Einbeziehung des Einzelhandels (Discounter, Tankstellen, Tabakgeschäfte, ...). Die Bereitstellung der Sammelboxen ist kostenfrei. Transport und Lagerung übernimmt die LRD.





4

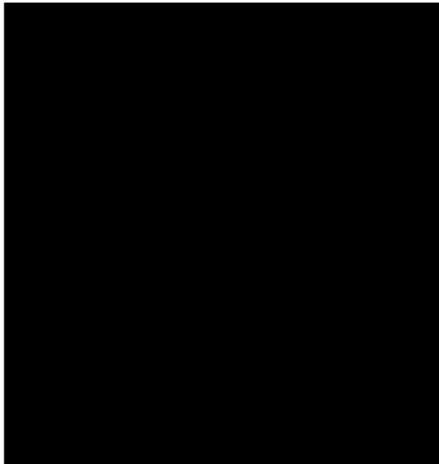
Aufbereitung:
Die Feuerzeuge enthalten **Metalle und Restgas**. Eine explosionsgeschützte Zerlegung ist erforderlich (an einer Alternative mit Vereinzelung und Gasentnahme durch Anbohren wird gearbeitet).

5

Stofffluss:
Nicht nur Kunststoffe sondern alle Materialien werden verwertet.
Das Litterpotenzial beträgt allein in D 3000t.



Das Fließbild zeigt die Verwertung bei einem Rücklauf von 33%.



Aus urheberrechtlichen Gründen geschwärzt.

6

Wertschöpfung:
Das Bodymaterial kann zum Teil (SAN) für 3-D-Druck-Anwendungen qualifiziert werden.
SAN-Rezyklat wird mit 1-3€/kg gehandelt. Druckfilamente kosten das zehnfache.