

Abschlussbericht

PMMA in der Circular Economy

Akronym: PACE

Aktenzeichen: AZ 38166/01

Projektlaufzeit: 01.02.2023 bis 31.01.2025

Autoren:

Hochschule Pforzheim: Jörg Woidasky, Maximilian Auer, Kiriaki Karatopi

Polysecure: Markus Reisacher, Reiner Just

Pekutherm: Heiko Pfister, Daniela Pfister

POLYVANTIS: Thomas Pfaff, Christian Roth, David Werner, Martin Berkenkopf



POLYVANTIS



Stand: 23.04.2025, Pforzheim

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	ii
Tabellenverzeichnis	iii
Abkürzungsverzeichnis	iv
Kurzfassung	v
1 Einleitung.....	1
2 Methodik/Vorgehensweise/Projekttablauf	1
3 Projektergebnisse.....	2
3.1 Sortier- und Recyclingpraxis bei PMMA [AP1]	2
3.1.1 Beschreibung der Sortierpraxis.....	2
3.1.2 Identifikationstechnologien für glasklare Polymere	5
3.2 Mengenabschätzung „PMMA-Rücklauf“ [AP1]	8
3.2.1 Einleitung	8
3.2.2 Methodik	9
3.2.3 Ergebnisse.....	9
3.2.4 Zusammenfassung und Ausblick.....	11
3.3 Sortieruntersuchungen [AP4].....	11
3.3.1 Methodik	11
3.3.2 Ergebnisse.....	12
3.4 Tracer-Additivierung in PMMA [AP3].....	15
3.4.1 PT234 – 2. Tracerversuch im Technikum, 28.-29.06.2023	15
3.4.2 PT244 – 3. Tracerversuch im Technikum, 03.08.2023	16
3.4.3 PT278 - 4. Tracerversuch im Technikum, 08.01.2024.....	17
3.4.4 Laborergebnisse der künstlichen Bewitterung – Xenontest	17
3.5 Tracer-Entwicklung und -Detektion [AP3].....	18
3.5.1 Auswahl von Markermaterialien.....	18
3.5.2 Detektionsversuche	19
3.5.3 Weiterentwicklung der Detektionstechnik	27
3.5.4 Anwendung von künstlicher Intelligenz zur PMMA-Identifizierung.....	29
3.6 Ökobilanz PMMA-Recycling [AP5]	32
3.6.1 Methoden.....	33
3.6.2 Ergebnisse der Sachbilanz	35
3.6.3 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung.....	40
3.6.4 Auswertung	43
3.7 Entwicklung eines Gesamtkonzeptes [AP2]	44
3.7.1 Kombinationszenarien zum Einsatz neuer Kennzeichnungstechnologien	44

3.7.2	Business Model Canvas	47
4	Transfer und Netzwerkbildung [AP6].....	49
5	Zusammenfassung.....	49
6	Literaturverzeichnis.....	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Systematisierung der PMMA-Halbzeug-Produktmerkmale und Sensorik-Optionen zur Produktdifferenzierung	vi
Abbildung 2:	Arbeitsschritte und Materialflüsse im Sortierprozess beim Projektpartner Pekutherm.....	3
Abbildung 3:	Absorptionsspektrum für PMMA-GS (blau) und PMMA-XT (rot).....	5
Abbildung 4:	Interferenzmuster der Polymere PVC, SAN, PET, und PC	6
Abbildung 5:	Interferenzmuster von PMMA-GS (links) und PMMA-XT (rechts).....	7
Abbildung 6:	Interferenzmuster von PMMA resist (links) und PMMA-XT (rechts) bei 45° und 90°7	
Abbildung 7:	Eingesetzte PMMA-Mengen nach Branche (Conversio GmbH 2022) und Produkten	9
Abbildung 8:	Prüfstand aufgebaut bei Pekutherm für die Erfassung von PMMA-Charakteristiken	12
Abbildung 9:	Werkstoff und Werkstoffmodifikation des Pekutherm-Materialeinganges	13
Abbildung 10:	Farbe und Transparenz des Pekutherm-Materialeinganges	13
Abbildung 11:	Alterungszustand und Geometrie des Pekutherm-Materialeinganges.....	13
Abbildung 12:	Probendicke des Pekutherm-Materialeinganges (anzahlbasiert)	14
Abbildung 13:	Hersteller des Pekutherm-Materialeinganges basierend auf dem Folienaufdruck	14
Abbildung 14:	Entscheidungsbaum mit Masseanteil zur Einordnung in die PMMA-Qualitäten ..	15
Abbildung 15:	Proben aus Versuchsreihe 1. PDMS-Plättchen (links) und PMMA-Scheiben (rechts)	20
Abbildung 16:	Signal-Rausch-Verhältnis in Abhängigkeit der Markerkonzentration in PDMS-Proben für Ho- (oben links), Er- (oben rechts) und Tm-Marker (unten).....	21
Abbildung 17:	Vergleich des Signal-Rausch-Verhältnisses für PDMS-Plättchen und PMMA-Scheiben.....	22
Abbildung 18:	Signal-Rausch-Verhältnis für PDMS-Proben in Abhängigkeit der Partikelgröße...22	
Abbildung 19:	Beispiel-Testplatte von POLYVANTIS. Größe ca. 10 mm x 10 mm	23
Abbildung 20:	Versuchsreihe 2, Fluoreszenzintensität in Abhängigkeit der Partikelgröße	23
Abbildung 21:	Messanordnung zum Vergleich von Flächen- (links) und Kantendetektion (rechts).	25
Abbildung 22:	Signalintensität bei Flächen- und Kantenanregung in Abhängigkeit der Markerkonzentration.....	25
Abbildung 23:	Signalintensität bei Flächen- und Kantenanregung für zwei verschiedene Markerkonzentrationen in Abhängigkeit der Pigmentierung.....	26
Abbildung 24:	Signalintensität bei Kantenmessung für verschiedene Kantenqualitäten	27
Abbildung 25:	Rendering der Sort4Circle-Versuchsanlage (mit optionaler Zuführung und Ablageeinheit) und Blick in die reale Anlage mit NIR-Messkammer (links) und Marker-Messkammer (rechts).....	28
Abbildung 26:	Laseroptik zur Kantenanregung in Rundlaufanlage (links). Der Strahlengang ist rot markiert. Fluoreszenz auf Marker-Etikett im Strahl (rechts oben).....	29

Abbildung 27: Formerkennung (links) und Auswertung der Dimensionen (rechts).....	30
Abbildung 28: Konfusions-Matrizen für verschiedene Klassifizierungsalgorithmen	31
Abbildung 29: Interface für Bild- und Datenverarbeitung	32
Abbildung 30: Systemgrenze des PMMA-Recyclingprozesses	34
Abbildung 31: Stoffströme des WR in Umberto LCA+	35
Abbildung 32: Stoffströme des CR in Umberto LCA+	37
Abbildung 33: Massenströme der Kombination aus WR und CR in Umberto LCA+	39
Abbildung 34: Darstellung des PCF von einem Kilogramm rPMMA im WR.....	41
Abbildung 35: Darstellung des PCF von einem Kilogramm rPMMA im CR	41
Abbildung 36: Darstellung des PCF von einem Kilogramm rPMMA (70 % WR und 30 % CR)	42
Abbildung 37: Vergleich des PCFs für ein Kilogramm rPMMA	43
Abbildung 38: Vergleich der PCFs von rPMMA mit den PCFs von PMMA	44
Abbildung 39: Status-Quo-Szenario	46
Abbildung 40: Nutzwertanalytischer Vergleich der Szenarien zum Einsatz neuer Kennzeichnungstechnologien	46
Abbildung 41: Businessmodel-Canvas des Unternehmens Pekutherm	47
Abbildung 42: Businessmodel-Canvas des Unternehmens Polysecure	48
Abbildung 43: Businessmodel-Canvas des Unternehmens Polyvantis	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeitspakete und Meilensteinplanung.....	2
Tabelle 2: Morphologischer Kasten zur Systematisierung des Produkteinganges bei Pekutherm.....	4
Tabelle 3: Identifikationstechnologien für glasklare Polymere	5
Tabelle 4: Xenontest - künstliche Bewitterung, optische und mechanische Eigenschaften (Masterbatch).....	18
Tabelle 5: Versuchsreihe 1 - Konzentrationsserien	20
Tabelle 6: Detektionsstatistik für transparente Proben bei Kantenanregung in Abhängigkeit des Laserstroms. Je 300 Messungen.....	29
Tabelle 7: Inputs des WR von PMMA.....	36
Tabelle 8: Inputs des CR von PMMA	37
Tabelle 9: Outputs des CR von PMMA.....	39
Tabelle 10: Inputs in der Kombination des WR und CR von PMMA	40
Tabelle 11: GWP der beitragenden Stoffströme im WR.....	41
Tabelle 12: GWP der beitragenden Stoffströme im CR	42
Tabelle 13: GWP der beitragenden Stoffströme in der Kombination aus WR und CR.....	43

Abkürzungsverzeichnis

AIBN	Azoisobuttersäurenitril
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalente
CR	chemisches Recycling
EPD	Environmental Product Declaration
GS	Guss
GWP	Global Warming Potential
LCA	Life Cycle Assessment
MMA	Methylmethacrylat
PA	Polyamid
PDMS	Polydimethylsiloxan
PCF	Product Carbon Footprint
PMMA	Polymethylmethacrylat
PVC	Polyvinylchlorid
rMMA	recyceltes Methylmethacrylat
SNR	Signal Noise Ratio, Signal-Rausch-Verhältnis
WR	werkstoffliches Recycling
XT	Extrusion

Kurzfassung

Das Projekt "PMMA in der Circular Economy" (Akronym PACE) zielt darauf ab, die werkstoffliche Verwertung von Polymethylmethacrylat (PMMA) oder Acrylglas in Deutschland zu optimieren. PMMA ist ein weit verbreiteter Kunststoff mit hervorragenden Eigenschaften wie Transparenz und Witterungsbeständigkeit. Allerdings stellt die Entsorgung und das Recycling von PMMA aufgrund kaum geschlossener Stoffkreisläufe eine Herausforderung dar.

Die Hauptziele des Projekts umfassen die Entwicklung und Validierung einer Kreislaufführung für PMMA-Halbzeuge, die sowohl Post-Industrial- als auch Post-Consumer-Qualitäten umfasst. Dabei werden innovative Identifikations- und Sortierverfahren eingesetzt, um die Machbarkeit der Lösungen im betrieblichen Umfeld zu demonstrieren. Zu den getesteten Technologien gehören Fluoreszenzmarker, Nahinfrarotspektroskopie (NIR) und Objekterkennung. Die Sortierherausforderung besteht nicht nur in der Differenzierung von PMMA und anderen glasklaren Polymeren, sondern auch zwischen PMMA-Ausführungen, bspw. aus dem Produktionsverfahren der Extrusion und des Gusses, welche sich derzeit mittels NIR-Sortierer nicht differenzieren lassen.

Das Projekt wurde in fünf wesentlichen Arbeitspaketen bearbeitet: der qualitativen Erfassung von Anfallmengen und von Sortierbedarfen (AP1), der Entwicklung eines Gesamtkonzepts zur umweltverträglichen Kreislaufschließung von PMMA (AP2), der Material- und Produktentwicklung mit der Additivierung von Tracern in PMMA-Halbzeugen (AP3), der Durchführung von Detektionstest und Sortierversuchen (AP4) und der ökobilanziellen Bewertung des Konzepts (AP5). Ergänzt wurden diese Arbeitspakete durch einen Ergebnistransfer und der öffentlichkeitswirksamen Außendarstellung des Projektkonsortiums (AP6) durch Pressemitteilungen, Vorträge und Tagungsbeiträge.

Die Hochschule Pforzheim übernimmt in dem Forschungsvorhaben PACE die wissenschaftliche Projektkoordination. Inhaltlich beschäftigt sich die Hochschule Pforzheim mit den abfallwirtschaftlichen Fragestellungen und der Entwicklung eines Gesamtkonzepts. Pekutherm ist für die Sortierprozesse verantwortlich, während Polysecure innovative Marker- und Sort4Circle-Technologien entwickelt und der assoziierte Partner Polyvantis als PMMA- und PC-Halbzeughersteller sich auf die Produktentwicklung und -kennzeichnung konzentriert.

Die Vorhabensergebnisse zeigten, dass eine einzelne Identifikations-Technologie voraussichtlich nicht ausreichend ist, um die PMMA-Halbzeuge in der gewünschten Reinheit zu sortieren. Vielmehr ist eine Kombination verschiedener Detektoren (Abbildung 1) notwendig, um die erforderlichen Informationen zu erhalten. So kann mittels NIR-Spektroskopie PMMA von anderen technischen Polymeren differenziert werden. Allerdings ist eine Differenzierung zwischen Extrusion- und Guss-PMMA sowie der Einsatz von Additiven, wie beispielsweise Schlagzähmodifikatoren, damit nicht möglich. Für die letztgenannte Differenzierung könnten Fluoreszenzmarker zum Einsatz kommen, während zur Erkennung der Farbe und Transparenz VIS-Farbmessungen geeignet sind. Zudem besteht die Möglichkeit, eine Vielzahl an Informationen (Hersteller, Extrusion vs. Guss, Additive) über die Schutzfolie mittels KI und Texterkennung auszulesen, vorausgesetzt, die Schutzfolie mit den Aufdrucken ist vorhanden. Während der Vorhabenslaufzeit wurde an den Produkten des Projektpartners Polyvantis eine recyclingverbessernde Modifikation der Schutzfolien-Bedruckung umgesetzt.

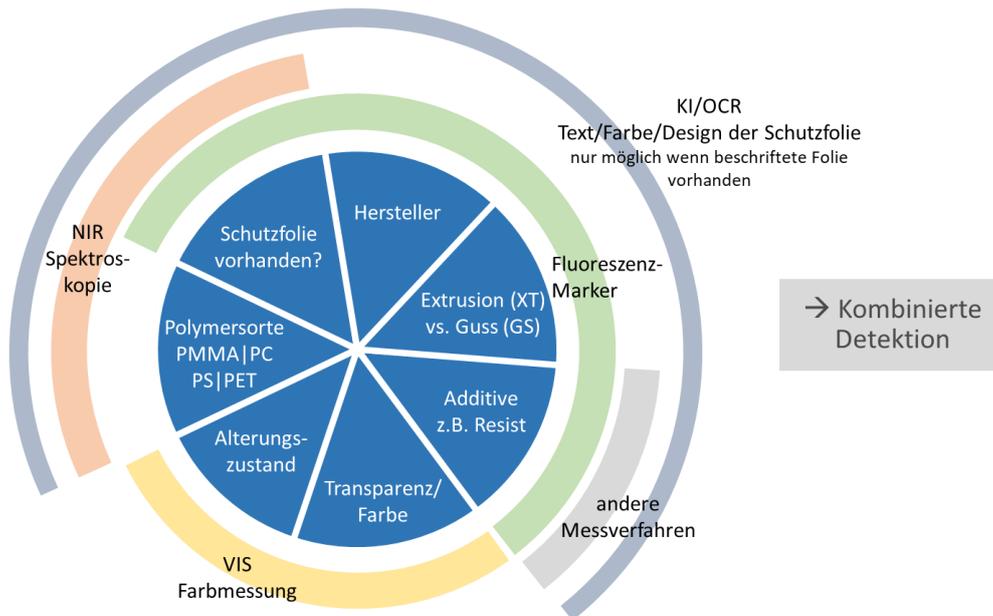


Abbildung 1: Systematisierung der PMMA-Halbzeug-Produktmerkmale und Sensorik-Optionen zur Produktdifferenzierung (KI/OCR = Künstliche Intelligenz/Optical Character Recognition, VIS = Messung im sichtbaren Spektralbereich, NIR = Nahinfrarot).

Ein wichtiger Teil der Arbeiten war die Weiterentwicklung der Tracer-Technologie und deren Erprobung. Zu diesem Zweck initiierten Polysecure und Polyvantis in enger Abstimmung mehrere Produktionskampagnen, in denen die Partikelgröße, die Konzentration sowie die Einbringungsart von Tracermaterialien bei der PMMA-Verarbeitung variiert wurden. Die Marker-Einarbeitungsversuche ergaben eine gute Verarbeitbarkeit und Witterungsbeständigkeit der PMMA-Halbzeuge. Zudem wiesen markerhaltige PMMA-Halbzeuge weiterhin spezifikationsgerechte mechanische und optische Eigenschaften auf. Auch die Marker-Detektion im Sub-ppm-Bereich in den Produkten stellte für Polysecure kein Nachweisproblem dar und ist so für einen industriellen Einsatz grundsätzlich geeignet.

Abfallwirtschaftliche Fragestellungen wurden von der Hochschule Pforzheim bearbeitet: Im Rahmen einer dreitägigen Sortierkampagne bei Pekutherm wurde der Eingangsstoffstrom detailliert charakterisiert. Die Ergebnisse zeigen, dass derzeit rund 30 % des Eingangsmaterials für ein hochwertiges mechanisches Recycling geeignet sind. Ein weiterer Anteil von 30 % besteht aus PMMA der Guss-Qualität, welches nicht mechanisch aufbereitet werden kann und daher chemisch recycelt wird. Ca. 23 % des Eingangsmaterials sind bei der Anlieferung verschmutzt, degradiert oder umgeformt und werden daher ebenfalls einer chemischen Verwertung zugeführt. Eine ökobilanzielle Analyse der verschiedenen Verwertungswege zeigt, dass bei der Herstellung von 1 kg PMMA-Halbzeug aus recyceltem Material in der mechanischen Aufbereitung rund 0,66 kg CO₂e verursacht werden, während bei der chemischen Verwertung diese Emissionen bei ca. 2,13 kg CO₂e liegen. Im Vergleich zu PMMA-Neuware (4,28 kg CO₂e) ist das Recycling demnach ökologisch vorteilhaft.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Projekt positive Ergebnisse für die Kreislaufführung von PMMA zeigt. Als erster Erfolg ist die Neugestaltung der Schutzfolie durch Polyvantis zu werten, wodurch recyclingrelevante Informationen auf die Schutzfolie aufgedruckt werden, und der Recycler (Pekutherm) daher besser sortieren kann. Die Verarbeitungs- und Detektionsversuche mit dem Tracer belegen zudem die Eignung der Technologie für den industriellen Einsatz.

1 Einleitung

Polymethylmethacrylat (PMMA), auch bekannt als Acrylglas, findet in vielen Anwendungen Verwendung und bietet zahlreiche Vorteile, wie Transparenz und Witterungsbeständigkeit. Allerdings gestaltet sich die Entsorgung und das Recycling von PMMA als Herausforderung, da derzeit kein vollständig geschlossener Stoffstrom für Acrylglas-Abfälle existiert. Das Projekt "PMMA in der Circular Economy" setzt an genau dieser Stelle an und verfolgt das Ziel, das werkstoffliche Verwertungspotential von PMMA-Abfällen in Deutschland vollständig zu erschließen. Die Implementierung effizienter Recyclingprozesse reduziert nicht nur die Umweltbelastung, sondern senkt auch den Bedarf an neuen Rohstoffen, was sich wiederum positiv auf die Wirtschaft und die Umwelt auswirkt.

In Deutschland werden jährlich etwa 300.000 Tonnen PMMA produziert, jedoch ist der Anteil des recycelten Materials im Vergleich zur Produktionsmenge verschwindend gering. Die Gründe hierfür sind einerseits fehlende effektive Sortier- und Identifikationsverfahren, die eine qualitativ hochwertige Rückgewinnung des Materials ermöglichen. Andererseits fehlt eine umfassende Infrastruktur, die das Recycling und die Wiederverwertung von PMMA in großem Maßstab unterstützt.

Das Ziel des Projekts besteht in der Entwicklung und Validierung einer Kreislaufführung für PMMA-Halbzeuge, die sowohl Post-Industrial- als auch Post-Consumer-Qualitäten umfasst. Zu diesem Zweck werden innovative Identifikations- und Sortierverfahren eingesetzt, um die Machbarkeit der Lösungen im betrieblichen Umfeld zu demonstrieren. Hierbei werden insbesondere Aspekte der branchenweiten Übertragbarkeit berücksichtigt. Eine bedeutende Herausforderung besteht in der effizienten Separation von PMMA von anderen Kunststoffen, die häufig in gemischten Abfallströmen vorkommen, und der Separation von unterschiedlichen PMMA-Ausführungen, wie Guss-, Extrusions- oder schlagzähmodifiziertem PMMA.

Die Hochschule Pforzheim übernimmt die wissenschaftliche Projektkoordination des Forschungsvorhabens. Inhaltlich beschäftigt sich die Hochschule Pforzheim mit den abfallwirtschaftlichen Fragestellungen und der Entwicklung eines Gesamtkonzepts. Pekutherm ist für die Sortierprozesse verantwortlich, während Polysecure innovative Marker- und Sort4Circle-Technologien entwickelt und der assoziierte Partner Polyvantis als PMMA- und PC-Halbzeughersteller sich auf die Produktentwicklung und -kennzeichnung konzentriert.

Während der Vorhabenslaufzeit erfolgte eine Umfirmierung des ursprünglich als Röhm Acrylic Products in das Vorhaben eingetretenen assoziierten Projektpartners Polyvantis. Diese Umfirmierung hatte keinen inhaltlichen Einfluß auf die Arbeiten.

2 Methodik/Vorgehensweise/Projekttablauf

Das Projekt hatte einen Bearbeitungszeitraum von 2 Jahren vom 01. Februar 2023 bis zum 31. Januar 2025. Es umfasste insgesamt 6 Arbeitspakete (vgl. Tabelle 1) sowie die Projektleitung in AP0. Die Arbeitspakete umfassen im Wesentlichen folgende Punkte: (1) die qualitative Erfassung von Anfallmengen und von Sortierbedarfen, (2) die Entwicklung eines Gesamtkonzepts zur umweltverträglichen Kreislaufschließung von PMMA, (3) die Material- und Produktentwicklung mit der Aditivierung von Tracern in PMMA-Halbzeugen, (4) die Durchführung von Detektionstests und Sortierversuchen sowie (5) die ökobilanzielle Bewertung des Konzepts. Ergänzend zu diesen Arbeitspaketen wurden (6) ein Ergebnis-Transfer und eine öffentlichkeitswirksame Außendarstellung des Projektkonsortiums durchgeführt. Darüber hinaus wurden drei Meilensteine definiert:

- M1: Die Anfallmengen und der Sortierbedarf sind definiert.
- M2: Das Gesamtkonzept liegt in abgestimmter Form vor.
- M3: Die Umweltbewertung ist abgeschlossen, Netzwerk-Workshop ist durchgeführt

Tabelle 1: Arbeitspakete und Meilensteinplanung

Fachliche Unterteilung		Laufzeit - Quartale							
Arbeitsplan		1	2	3	4	5	6	7	8
AP 0	Projektmanagement								
AP 1	Anfallmengen und Sortierbedarf								
AP 2	Konzeptentwicklung								
AP 3	Material- und Produktentwicklung								
AP 4	Sortierversuche								
AP 5	Umweltbewertung								
AP 6	Transfer und Netzwerkbildung								

Die Vorhabensergebnisse sind detailliert in den folgenden Kapiteln dargestellt. Im Rahmen von AP4 führte Polyvantis umfangreiche Versuchsreihen durch, in denen die Auswirkungen der Marker-Partikelgröße, -konzentration und des Einbringungsverfahrens auf die mechanischen und optischen Eigenschaften von PMMA-Halbzeugen untersucht wurden. Hierzu führte Polysecure umfangreiche Detektionstests mit diesen Probenmaterialien durch, um die Grenzen der Detektierbarkeit zu testen und die Detektionshardware weiterzuentwickeln. In einer gemeinsamen Sortierkampagne untersuchten die Hochschule Pforzheim und Pekutherm den Eingangsstrom des Unternehmens mit dem Ziel, diesen detailliert zu charakterisieren und zu analysieren. Alle Projektpartner erarbeiteten gemeinsam ein Gesamtkonzept (AP2) für die Kreislaufführung von PMMA, wobei verschiedene Methoden, wie beispielsweise der morphologische Kasten und die Business Model Canvas zum Einsatz kamen.

3 Projektergebnisse

3.1 Sortier- und Recyclingpraxis bei PMMA [AP1]

3.1.1 Beschreibung der Sortierpraxis

Bei Pekutherm werden jährlich rund 7.000 Mg Kunststoffe umgeschlagen, von denen mit rund 5.000 Mg PMMA den Großteil ausmacht. Im betrieblichen Alltag werden wöchentlich 300-500 Gitterboxen à 250-300 kg sowie 50-70 Paletten (200x100 cm) monatlich angeliefert. Jede Gitterbox wird zu Qualitätssicherungszwecken fotografiert und das Bild für zwei Jahre aufbewahrt. Dies geschieht bereits bei der Warenannahme durch einen Mitarbeiter, der jeweils die spezifischen Aufnahme Perspektiven festlegt. In der Warenannahme werden Gitterboxen mit Fremdpolymeren (Polymere, die nicht durch Pekutherm sortiert und als Mahlgut weiterverkauft werden) direkt für den Weiterverkauf an spezialisierte Partnerunternehmen vorbereitet (Abbildung 2).

Kunststoff-Recyclingprozess bei Pekutherm Kunststoffe GmbH

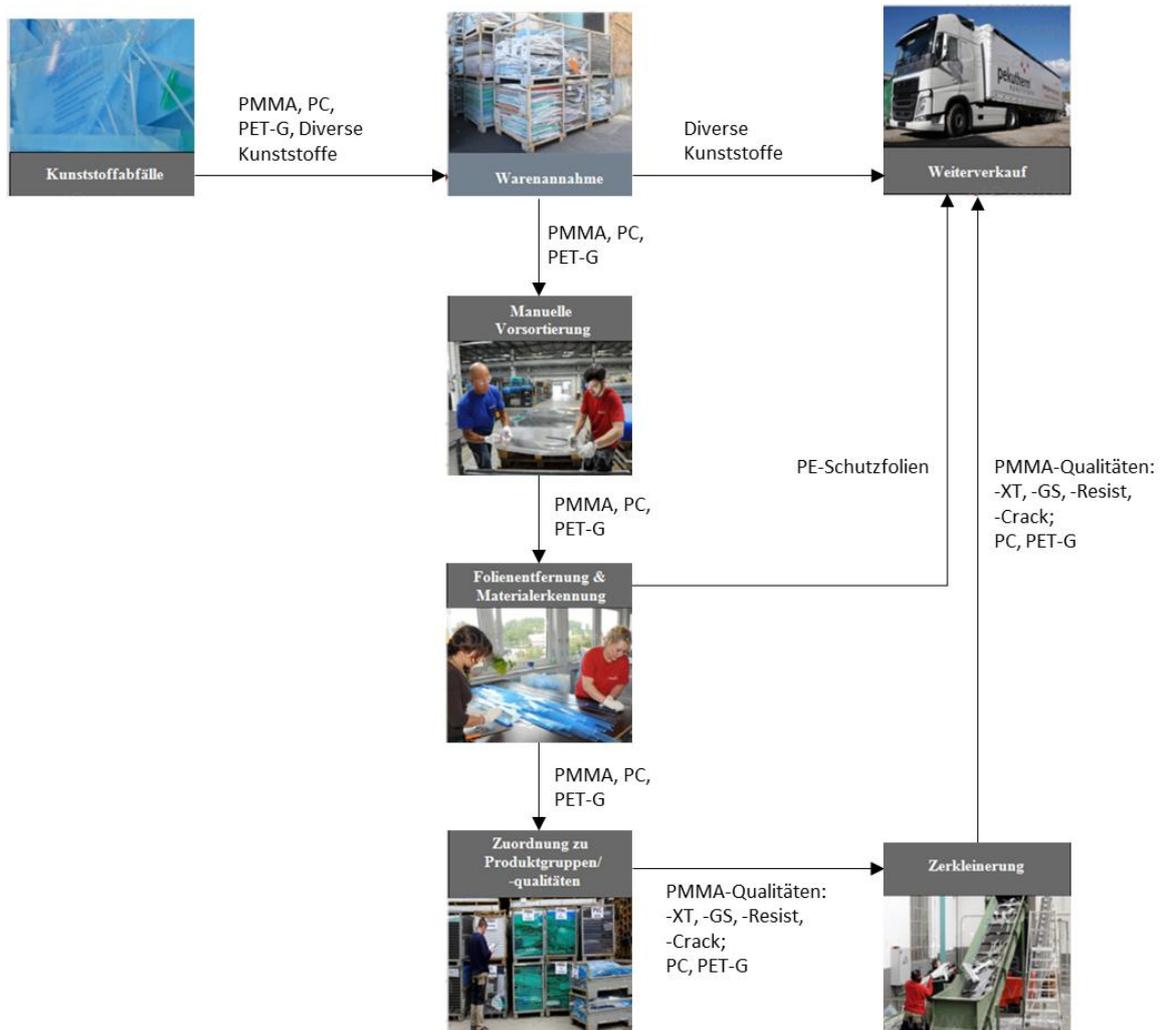


Abbildung 2: Arbeitsschritte und Materialflüsse im Sortierprozess beim Projektpartner Pekutherm (Karatopi 2023)

Die angelieferten Gitterboxen und Paletten werden nach dem Wareneingang einer ersten Vorsortierung unterzogen. Hierbei findet eine manuelle Sortierung anhand der aufgebrachten Schutzfolien statt. Im zweiten Sortierschritt wird die Schutzfolie entfernt und es findet eine erneute Materialprüfung statt. Die Materialprüfung erfolgt ebenfalls manuell und auf Basis der haptischen Eigenschaften, der Folienaufdrucke und -beschaffenheit und der Erfahrungswerte der Mitarbeiter. Eine Vielzahl an Informationen, welche der Folie entnommen werden, sind bereits im Morphologischen Kasten (Tabelle 2) dargestellt. Das PMMA wird typischerweise in die vier Ausführungen Extrusion, Guss, Resist (schlagzähmodifiziert) und Crack aufgetrennt. Ergänzend werden andere glasklare Polymere wie bspw. PC oder PET-G sortiert. Im letzten Schritt wird das Material zu Mahlgut zerkleinert und verkauft. Die Schutzfolien werden ebenfalls gesammelt und an einen spezialisierten Aufbereiter verkauft.

3.1.2 Identifikationstechnologien für glasklare Polymere

Ein relevanter Aspekt der Projektaktivitäten besteht in der Identifikation von Identifikationstechnologien für glasklare Polymere, insbesondere hinsichtlich der Differenzierung der PMMA-Varianten Guss- und Extrusionsqualität. Zur Bewertung des technologischen Reifegrads wird das Technology Readiness Level (TRL) herangezogen, wobei die Stufe 9 für Serientechnologie steht (Tabelle 3). Die nachfolgende Beschreibung konzentriert sich auf die Erläuterung der aus Konsortial-sicht am ehesten umsetzbaren Technologien (farbhinterlegte Felder in Tabelle 3).

Tabelle 3: Identifikationstechnologien für glasklare Polymere

Identifikations-Technologie	TRL	PMMA Qualitäten					Transparente Polymere				Andere opake Polymere
		PMMA	PMMA XT	PMMA GS	PMMA schlagzäh	PMMA kratzfest	PC	PVC	PET	SAN	
NIR: Reflexions Modul	9	✓	☒	☒	☒	☒	✓	✓	✓	✓	✓
NIR: ATR-Modul	9	✓	☒	☒	☒	☒	✓	✓	✓	✓	✓
Polarisationsfilter	5	✓	☒	☒	☒	✓	✓	✓	✓	✓	☒
Tracer	7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Optische Bemusterung (Mensch oder Objekterkennung)	9	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	✓
Ultraschallmessung	4										
Rauchgasprobe	4										
Brennprobe	5		✓	✓							
Dichteseperation	9	✓					✓	✓	✓	✓	
Duktilität/Klang	9	✓					✓				
Durchleuchtung	4				✓						
Punktlicht	5		✓	✓							

3.1.2.1 NIR-Spektrometrie

Die Differenzierung der PMMA-Ausführungen Extrusion (XT), Guss (GS), schlagzäh (resist) und kratzfest ist mittels aktueller NIR-Technologie bedingt bis gar nicht möglich. Beispielhaft zeigt Abbildung 3 den Vergleich der NIR-Signale von Guß- und Extrusions-PMMA. Die NIR-Technologie eignet sich nur für die Unterscheidung von PMMA von anderen Polymeren, wobei hier aufgrund von glasklaren Produkteigenschaften Fehlmessungen auftreten können. Grundsätzlich ist die NIR-Technologie jedoch dafür geeignet (Çalışkan 2024).

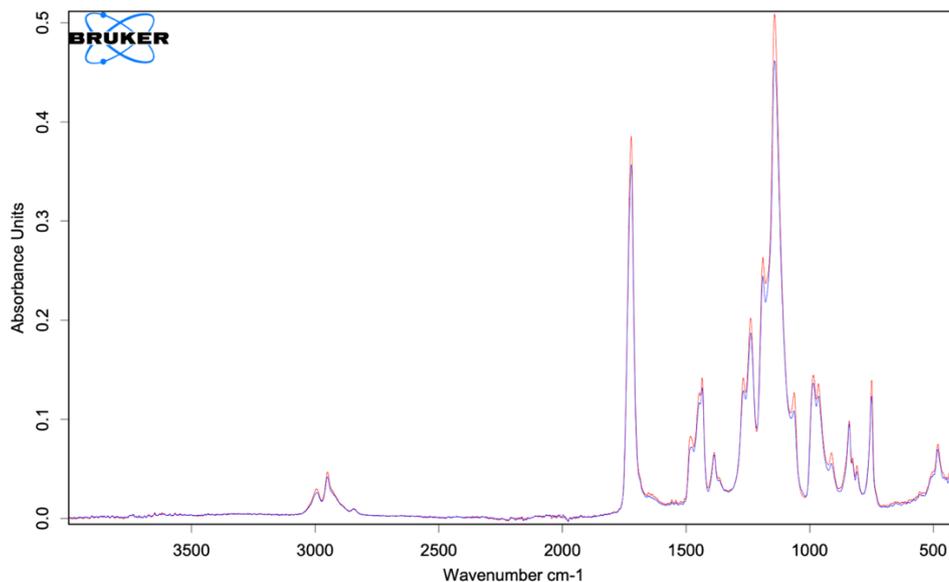


Abbildung 3: Absorptionsspektrum für PMMA-GS (blau) und PMMA-XT (rot)

3.1.2.2 *Optische Bemusterung*

Der gegenwärtige Stand der Technik für die Sortierung von PMMA-Ausführungen basiert auf der optischen Bemusterung durch qualifiziertes Personal bei Pekutherm. In diesem Prozess werden insbesondere Aufdrucke und Farben der Schutzfolien berücksichtigt. Mittels dieser Kriterien werden von den Mitarbeitern äußerst hohe Sortierreinheit von über 95 % für das mechanische Recycling erzielt. Produkte, bei denen sich ein Mitarbeiter aufgrund unzureichender Kennzeichnung oder fehlender Schutzfolie unsicher ist, werden in eine niedrigere Produktqualität sortiert oder im chemischen Recycling weiterverarbeitet. Die Ergebnisse der Abschlussarbeit von Dhibi (2024) zeigen, dass auch mittels automatisierter Objekterkennung und aufgedruckter Folieninformationen eine hohe Reinheit erzielt werden kann. Aufgrund der limitierten Prüfmöglichkeiten (ausschließlich optische Eigenschaften, keine Haptik) werden jedoch noch nicht die des mit menschlichem Sortierpersonal erzielbaren Reinheiten erreicht.

3.1.2.3 *Tracer*

Tracer können als unabhängiges Sortierkriterium, das dem Produkt beigefügt wird, verwendet werden, um weitergehende Sortieranforderungen zu erfüllen. So können sie zur Unterscheidung verschiedener PMMA-Typen oder auch zur herstellerspezifischen Kennzeichnung von Produkten eingesetzt werden. Die Weiterentwicklung dieser Tracer ist Bestandteil des Forschungsprojektes und wird im Kapitel 3.5 näher beschrieben.

3.1.2.4 *Polarisationsfilter*

Unter Verwendung von zwei Polarisationsfiltern und einer Lichtquelle erzeugen transparente Polymere unterschiedliche Interferenzmuster (vgl. Abbildung 4), die sich deutlich zwischen den Polymertypen unterscheiden. Unter den PMMA-Typen kann jedoch nur die kratzfeste Variante von den anderen PMMA-Typen unterschieden werden (vgl. Abbildung 5 und Abbildung 6). Das Interferenzmuster ist zudem vom Winkel der Polarisationsfilter abhängig, so dass eine Automatisierung mit erheblichem Aufwand verbunden wäre. Außerdem kann diese Technologie nur bei Produkten ohne Schutzfolie eingesetzt werden, da diese das Interferenzmuster verfälscht (Çalışkan 2024).

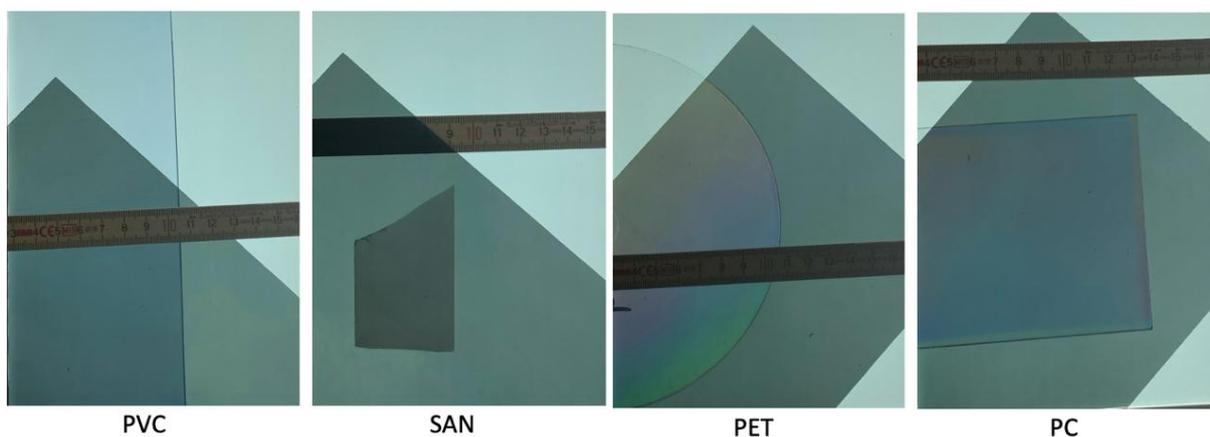


Abbildung 4: *Interferenzmuster der Polymere PVC, SAN, PET, und PC*

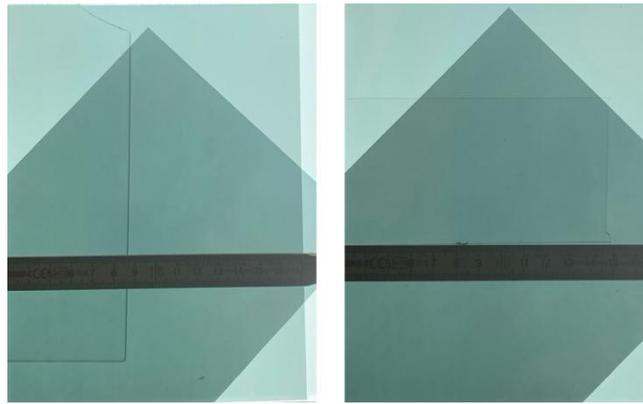


Abbildung 5: Interferenzmuster von PMMA-GS (links) und PMMA-XT (rechts)

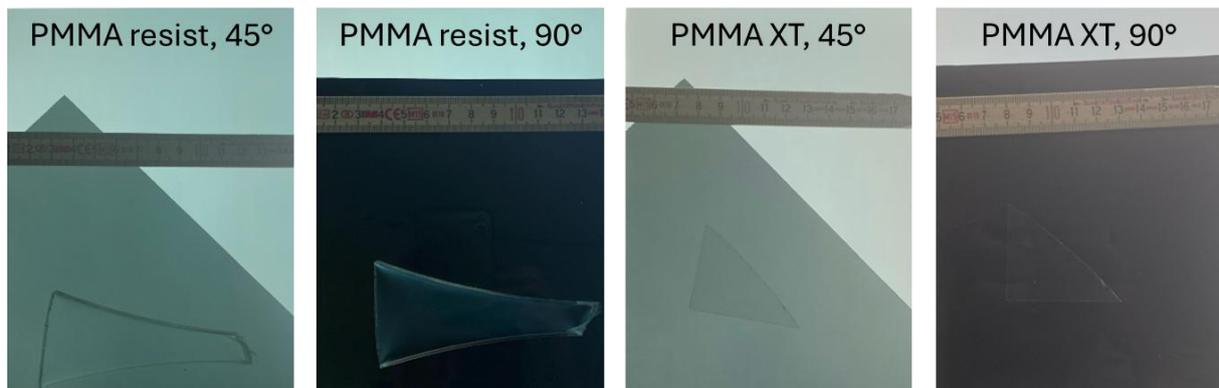


Abbildung 6: Interferenzmuster von PMMA resist (links) und PMMA-XT (rechts) bei 45° und 90°

3.1.2.5 Ultraschallmessung

Mit der Ultraschallmessung können verschiedene Polymere bei gleicher Wanddicke aufgrund ihrer unterschiedlichen Dichte bestimmt werden. Dabei wird ein Schallimpuls durch den Kunststoff gesendet und die Laufzeit durch das Material gemessen. Bei der Anwendung auf XT- und GS-Typen konnte jedoch keine Unterscheidbarkeit der beiden PMMA-Typen festgestellt werden. Dies kann sowohl an den geringen Dichteunterschieden als auch an den Messunsicherheiten bei der Bestimmung der Plattendicke liegen. Für eine Serienidentifikation ist dieser Ansatz ungeeignet, da für jede einzelne Probe eine Dickenkalibrierung erforderlich wäre.

3.1.2.6 Erwärmung

PMMA-resist trübt sich aufgrund von Erwärmung oder mechanischem Stress (Schlag) aufgrund des Kautschukanteils ein. Dies konnte experimentell mittels Laser und Halogenstrahlern nachgestellt werden. Der Ansatz wurde jedoch aufgrund der vergleichsweise langen Untersuchungsdauer nicht weiter verfolgt.

3.1.2.7 Punktlicht/Interferenzmuster

Bei punktförmiger Bestrahlung von PMMA-XT wird ein Interferenzmuster projiziert, das bei PMMA-GS nicht sichtbar ist. Der Abstand der Lichtquelle zur Probe beträgt ca. 1 m, der Abstand der Probe zur Projektionsfläche ca. 2 m. Experimentell können XT- und GS-Versionen unterschieden werden, jedoch wird der Einsatz dieser Technologie in der Serienanwendung als unrealistisch angesehen, da hierfür aufwendige Einrichtungen (abgedunkelter Raum, Punktlichtquelle) erforderlich sind und die Messung selbst als langwierig und schlecht automatisierbar angesehen wurde.

3.2 Mengenabschätzung „PMMA-Rücklauf“ [AP1]

Die Ausarbeitung zur Mengenabschätzung wurde als wissenschaftliches Poster sowie im Vorgriff auf den Abschlussbericht im Tagungsband des 13. Wissenschaftskongress Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft (textgleich zum folgenden Abschnitt) mit folgenden bibliographischen Angaben publiziert.

Auer, M.; Glaser, K.; Schmidt, J.; Woidasky, J. (2024): Was passiert mit den Hygiene-Schutzscheiben? PMMA-Stoffstromanalyse für Deutschland. In: Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V. (Hg.): 13. Wissenschaftskongress Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft. Innsbruck university press. Unter Mitarbeit von A. Bockreis, M. Faulstich, S. Flamme, M. Kranert, M. Mocker, M. Nelles et al. Technische Universität Wien, 15.-16.02.2024, S. 181–186.

"Autoren: Maximilian Auer, Kay Glaser, Jannick Schmidt, Jörg Woidasky

Was passiert mit den Hygiene-Schutzscheiben? PMMA-Stoffstromanalyse für Deutschland

Abstract: PMMA ist mit einem jährlichen Einsatz von etwa 61.000 Mg in Deutschland ein wichtiger Polymerwerkstoff in der Bau-, Fahrzeug-, Elektrik/Elektronik- und Verpackungsbranche. Derzeit werden jedoch europaweit nur etwa 10 % der Acrylglas-Abfälle verwertet. Um höhere Verwertungsquoten zu erreichen, wird eine genaue Kenntnis über PMMA-Anwendungen und damit verbundene Abfallströme benötigt. Ziel dieser Arbeit ist es, die aus vorliegenden Marktstudien bekannten Mengen je Branche auf Produktebene zu erweitern und somit den Detailgrad zu erhöhen. Hierzu wurden Internetrecherchen sowie Expertenfragebögen und –Interviews durchgeführt. Insgesamt konnte für rund 80 % der in Deutschland verarbeiteten PMMA-Mengen ein spezifischer Anwendungsfall identifiziert und quantifiziert werden. Auf Basis dieser Datengrundlage soll in einem nächsten Schritt eine Bewertung bezüglich der voraussichtlichen mechanischen Aufbereitungsfähigkeit durchgeführt und somit das in Deutschland verfügbare PMMA-Recyclingpotential bestimmt werden.

3.2.1 Einleitung

PMMA (Polymethylmethacrylat) ist im Bau-, KFZ- und im Innenausbaubereich ein wichtiger Polymerwerkstoff. Während der Covid19-Pandemie wurde darüber hinaus insbesondere PMMA in Form von Acrylglas flächendeckend für Hygiene-Schutzscheiben eingesetzt, die nach dem Ende der pandemischen Lage nun in großem Umfang als Abfälle anfallen (Breyer-Mayländer et al. 2022). Für die werkstoffliche Verwertung von Acrylglas gibt es seit Jahrzehnten industrielle Ansätze, welche technologisch jedoch kaum weiterentwickelt wurden (Dubois und Heijden 2023). Derzeit werden nur etwa 10 % der in Europa anfallenden Acrylglas-Abfälle verwertet (Dubois und Heijden 2023). Dies kann u. a. mit fehlenden Sammel- und Rücknahmesystemen begründet werden, doch auch die hohen Qualitätsanforderungen für eine mechanische Aufbereitung zur Wiederverwertung von Acrylglas tragen dazu bei. Eine grundlegende Problematik für die PMMA-Kreislaufwirtschaft stellt die unzureichende Datengrundlage bezüglich des Einsatzzweckes und der Einsatzdauer von Acrylglas dar. Zwar werden in aktuellen Marktstudien verarbeitete PMMA-Mengen nach Branchen publiziert (Conversio GmbH 2022), deren Detailgrade lassen jedoch nur begrenzte Prognosen über die Art, den Zeitpunkt und die daraus resultierende Qualität des zukünftigen PMMA-Abfalls zu.

Ziel dieser Arbeit ist es, die in (Conversio GmbH 2022) publizierten PMMA-Mengen je Branche im Detaillierungsgrad bis auf Produktebene zu spezifizieren und dadurch die Ableitung

abfallwirtschaftlicher Kennzahlen zu ermöglichen. Als Grundlage dient eine Recherche zu PMMA-Produkten sowie deren voraussichtlichen Lebensdauern.

3.2.2 Methodik

Die Studie "Stoffstrombild der Kunststoffe in Deutschland 2021" (Conversio GmbH 2022) stellt unter anderem die PMMA-Mengen dar, die im Jahr 2021 in den Branchen Fahrzeuge, Bau, Elektrik/Elektronik, Verpackungen und Sonstige in Deutschland verarbeitet wurden. Diese PMMA-Mengen bilden die Zielwerte für die nachfolgende Analyse und werden im Rahmen eines Bottom-Up-Ansatzes anhand von Studien, Marktdaten und Expertenwissen auf Produktebene erweitert.

Mithilfe einer Kombination aus Expertengesprächen und Internetrecherchen wird ein umfassendes Bild der PMMA-Produkte auf dem Markt gewonnen, woraus die eingesetzten PMMA-Mengen sowie Lebensdauern abgeleitet werden. Zur Quantifizierung werden u.a. öffentlich zugängliche Statistiken, z. B. zur PKW-Neuwagenproduktion in Deutschland, herangezogen und mit Marktdaten (z. B. Gewicht einer PMMA-Heckleuchte) kombiniert. Zusätzlich werden E-Mail-Fragebögen als Informationsquelle genutzt, die von Rohstoffversorgern, PMMA-Verarbeitern und -Verwertern ausgefüllt wurden. Die gesammelten Daten werden abschließend mittels weiterer Experteninterviews plausibilisiert und fehlende Daten durch Expertenabschätzungen ergänzt. Dies ermöglicht fundierte Aussagen über den PMMA-Massenstrom in den fünf Branchen Fahrzeuge, Bau, Elektrik/Elektronik, Verpackungen und Sonstige.

3.2.3 Ergebnisse

Im Jahr 2021 wurden in Deutschland insgesamt 61.000 Mg PMMA verarbeitet, von denen 14.000 Mg auf Fahrzeuge, 18.000 Mg auf den Bau-Sektor, 4.000 Mg auf Elektrik und Elektronik, 1.000 Mg auf Verpackungen und 24.000 Mg auf Sonstige Anwendungsfelder entfallen (Conversio GmbH 2022). Abbildung 7 gibt einen Überblick über die eingesetzten PMMA-Mengen nach Branche und Produkten.

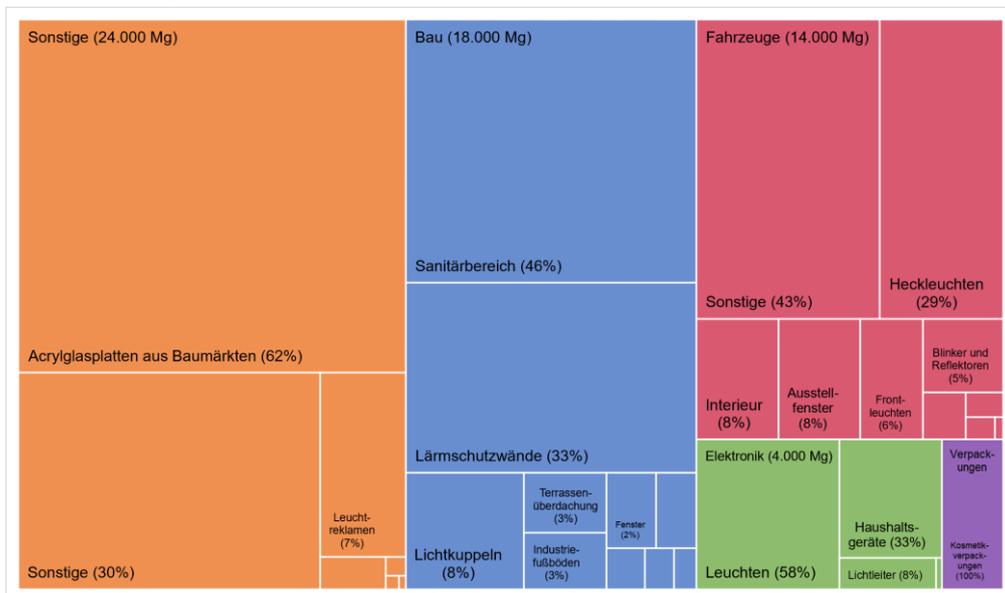


Abbildung 7: Eingesetzte PMMA-Mengen nach Branche (Conversio GmbH 2022) und Produkten (Auer et al. 2024)

Im **Fahrzeugbereich** wird PMMA insbesondere in der Lichttechnik sowie für Designelemente im innen und außen an Kraftfahrzeugen eingesetzt. So werden in PKW-Heckleuchten bei einem PMMA-Marktanteil von ca. 90 % und 3,4 Mio. jährlich in Deutschland produzierten Fahrzeugen (Verband der Automobilindustrie 04.01.2023) ca. 3.670 Mg PMMA eingesetzt. Hinzu kommen die

Heckleuchten von LKW, Bussen, PKW-Anhängern und LKW-Anhängern, sodass insgesamt ca. 4.010 Mg PMMA allein für Heckleuchten verwendet werden. Insbesondere im hochpreisigen Fahrzeugsegment (ca. 20 % aller Fahrzeuge) werden auch Frontscheinwerfer aus PMMA hergestellt (820 Mg). Weitere sicherheitsrelevante Anbauteile sind Blinker und Reflektoren, die für alle Kraftfahrzeuge ca. 640 Mg PMMA ausmachen. Kraftfahrzeuge haben in Deutschland eine Lebensdauer zwischen 10 und 20 Jahre (KBA 2022; Wirtschaftswoche 2014).

Im Interieur wird PMMA unter anderem für Lichtwellenleiter in der Ambientebeleuchtung (380 Mg), für transparente Instrumentenabdeckungen (410 Mg) und für Black-Panel-Displays (290 Mg) verwendet. Eine Masse von ca. 6.000 Mg kann keiner direkten Anwendung zugeordnet werden, da die Verwendung sehr vielfältig ist, aber in geringen Mengen erfolgt. So werden beispielsweise 40 Mg für den Joystick der Mercedes S-Klasse verwendet. Weitere Anwendungen im Interieur sind Dekorelemente mit Hochglanz- oder Klavierlackoptik wie Zierleisten, Mittelkonsoleabdeckungen oder Blenden für Türgriffe. Im Exterieur wird PMMA ähnlich vielseitig eingesetzt. So werden beispielsweise die A- und C-Säulen des Mini (40 Mg) oder das Logo der VW ID-Modelle (3 Mg) aus PMMA gefertigt (Bestenreiner et al. 2023). Auch der Kühlergrill oder das Außenspiegelgehäuse eines PKW können aus PMMA gefertigt sein. Eine Nischenanwendung sind zudem Leichtbauscheiben für Rennfahrzeuge, die sowohl aus PMMA als auch aus dem alternativ einsetzbaren Polycarbonat hergestellt werden.

Daneben wird PMMA auch im Boots- und Schiffbau (70 Mg) oder für Flugzeugfenster (20 Mg) verwendet. Auch die Windschutzscheibe von Motorrädern und Motorrollern kann aus PMMA gefertigt sein (100 Mg). Die Ausstellfenster von Caravans und Wohnmobilen bestehen meist ebenfalls aus PMMA (1.070 Mg).

In der **Bau-Branche** finden PMMA-Produkte mit Einsatzdauern von 20 Jahren oder mehr tendenziell ihren zeitlich längsten Einsatz. Die größte Menge der insgesamt 18.000 Mg PMMA wird hierbei im Sanitärbereich sowohl im Neubau als auch bei der Renovierung von Bestandsimmobilien verwendet (8.310 Mg): Etwa 30 % der neu eingebauten Dusch- und Badewannen bestehen aus PMMA mit einer Masse zwischen 10 kg und 30 kg. Hieraus ergibt sich eine Menge von etwa 5.860 Mg PMMA jährlich. Weiterhin werden im Sanitärbereich ebenfalls Duschkabinen und -Rückwände sowie WC-Sitze oder Waschbecken aus PMMA gefertigt.

Im öffentlichen Bereich wird PMMA in großen Mengen für Lärmschutzwände verwendet (6.000 Mg). Allein an Autobahnen (30 km) (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2021) und Bahnstrecken (125 km) (Deutsche Bahn AG o.J.) wurden rund 155 km Lärmschutzwände errichtet, für Landes- und Gemeindestraßen konnten keine Zahlen ermittelt werden. Reflektierende PMMA-Folie wird darüber hinaus auch für Verkehrszeichen verwendet (100 Mg).

Es verbleibt eine PMMA-Menge von ca. 330 Mg, die schätzungsweise hauptsächlich für Fassadenelemente, aber auch für kleinere Bauanwendungen wie z. B. Geländer und Treppen verwendet wird.

Im Bereich der **Elektrik und Elektronik** wird PMMA vor allem für Leuchtenabdeckungen verwendet, die je nach Anwendung eine geschätzte Lebensdauer von 10 bis 30 Jahren besitzen (2.330 Mg). Hierbei ist zu beachten, dass der Wechsel zu energiesparenden Leuchtmitteln derzeit zu einem erhöhten Abfallaufkommen von PMMA-Leuchtenabdeckungen führt. Darüber hinaus wird PMMA in Elektro-Haushaltsgeräten sowohl für Blenden-Elemente als auch für Black-Panel-Displays eingesetzt (1.320 Mg). Jährlich werden hiervon etwa 80 Millionen Geräte (braune und weiße Ware) verkauft (Statista Market Insights 2023). In der Telekommunikationstechnik werden Faser-Lichtleiter aus PMMA verwendet. Im Jahr 2021 wurden knapp 100.000 km neue "Glasfaser"-Leitungen verlegt (MPC Service GmbH 13.07.2022), was einer Masse von etwa 330 Mg PMMA

entspricht. Früher wurde PMMA auch häufig in Bildschirmen für Smartphones, TV-Geräte und Monitore eingesetzt (495 Mg), jedoch findet dies heutzutage kaum noch Anwendung (Clemm und Lang 2019). Stattdessen sind vor allem Altgeräte auf dem Markt, die nach und nach entsorgt werden.

Im **Verpackungssektor** konnte der gesamte PMMA-Einsatz vor allem für Kosmetikprodukte wie Cremes und Düfte identifiziert werden (1000 Mg). PMMA wird hierbei neben Glas und anderen glasklaren Kunststoffen insbesondere für höherpreisige Produkte eingesetzt. Weitere Anwendungen z. B. als Display Case für Spirituosen oder als Siegelkett bei Medikament-Verpackungen wurden durch Experten im Interview genannt, konnten in der Internetrecherche jedoch nur vereinzelt identifiziert und nicht quantifiziert werden, sodass hier davon auszugehen ist, dass keine nennenswerten PMMA-Mengen eingesetzt werden. Eine durch die Autoren durchgeführte Leichtverpackungsanalyse-Studie (Schmidt et al. 2021) mit mehr als 20.000 einzelnen Verpackungen enthielt keine Verpackungen aus PMMA. Im Verpackungssektor sind die Lebensdauern mit meist nur wenigen Tagen oder Wochen in der Regel sehr kurz (Kurth et al. 2018), bei sehr hochwertigen Produkten mit entsprechenden Packmitteln kann jedoch oft mit deutlich längeren Nutzungsdauern gerechnet werden.

Unter "**Sonstiges**" ist in den insgesamt 24.000 Mg PMMA insbesondere der Einmaleffekt der Corona-Hygieneschutzscheiben enthalten. Rund 14.880 Mg PMMA-Plattenware wurde 2021 in deutschen Baumärkten verkauft. PMMA-Plattenware wird aber auch außerhalb pandemischer Lagen vielseitig eingesetzt. Rund 1.710 Mg werden beispielsweise für Leuchtreklamen verwendet. Ein großer Masseanteil von etwa 7.000 Mg konnte keiner eindeutigen Verwendung zugeordnet werden, wird aber wohl ebenfalls überwiegend als Plattenware eingesetzt. Hierzu zählen Maschinenabdeckungen, Schutzverkleidungen, Bilderrahmen, Aquarien und Terrarien oder der Einsatz im Event- und Messebau. Darüber hinaus wird PMMA als Plattenware, aber auch in anderen Verarbeitungsformen, für Möbel und Vitrinen oder in Laborgeräten verwendet. Auch in der Medizintechnik wird PMMA eingesetzt, z. B. für Zahnprothesen (10 Mg) oder in Knochenzementen (20 Mg), z. B. zur Verankerung von Hüftprothesen. Weiterhin wird PMMA in der Augenoptik (230 Mg) für Brillengläser und Kontaktlinsen verwendet.

3.2.4 Zusammenfassung und Ausblick

Insgesamt konnten ca. 80 % der PMMA-Mengen aus (Conversio GmbH 2022) einem spezifischen Anwendungsfall zugeordnet und damit genauer quantifiziert und beschrieben werden. Insbesondere im Fahrzeugsektor wird PMMA sehr vielseitig eingesetzt, was eine produktspezifische Mengenbestimmung erschwert. Auch für Produkte, welche unter die Kategorie "Sonstiges" fallen, trifft das zu. Anhand der ermittelten Mengen für die einzelnen Produktarten soll im nächsten Schritt eine Bewertung bezüglich der voraussichtlichen mechanischen Aufbereitungsfähigkeit durchgeführt und damit das in Deutschland verfügbare PMMA-Recyclingpotential bestimmt werden.“

3.3 Sortieruntersuchungen [AP4]

3.3.1 Methodik

In einer dreitägigen Sortierstudie (06.-08.05.2024) wurde durch die Hochschule Pforzheim beim Projektpartner Pekutherm der PMMA-XT und -GS Mengenstrom erfasst. Parallel zum ersten Sortierschritt wurden aus insgesamt 40 von den Kunden von Pekutherm vorsortierten bzw. zielgerichtet mit Monochargen befüllten Gitterboxen 1100 Teile entnommen und charakterisiert. Neben PMMA-XT und -GS-Typen wurden ebenfalls resist- und kratzfeste Ausführungen sowie andere glasklare Polymere erfasst, welche sich in den Gitterboxen befanden. Die Sortierung von resist-

Qualitäten erfolgt in der Regel in einem separaten Stoffstrom neben dem hier untersuchten XT/GS-Stoffstrom, sodass diese Sortierstudie lediglich resist-Fehlwürfe beinhaltet.

Ein für die Untersuchung der bei Pekutherm eingehenden Halbzeuge konzipierter Prüfstand (siehe Abbildung 8) wurde für die Erfassung der Probengewichte und -dicke sowie der Bilddokumentation verwendet. Von jeder Probe wurde zusätzlich noch eine Rückstellprobe für eine weitere Charakterisierung erfasst. Insgesamt wurden 37 Parameter (vgl. Tabelle 2) aufgenommen, u.a. der Werkstoff, die Werkstoff-Ausführung, Dicke, Größe, Masse, Alterungszustand, Geometrie, Transparenz und Farbe, und Vorhandensein der Schutzfolien (ein- oder zweiseitig) inkl. Farbe, Transparenz, Aufdruck, Kennzeichnung und Hersteller. Abschließend erfolgte eine Zuordnung zu den Sortierqualitäten A+ (Werkstoff-Ausführung und Hersteller bekannt), A/B (Werkstoff-Ausführung bekannt), und Crack (keine Schutzfolie vorhanden, keine Information über Werkstoff-Ausführung vorhanden).



Abbildung 8: Prüfstand aufgebaut bei Pekutherm für die Erfassung von PMMA-Charakteristiken

3.3.2 Ergebnisse

In den Abbildung 9 bis Abbildung 13 werden die Ergebnisse aus der Sortierstudie dargestellt. Der überwiegende Teil der untersuchten Proben besteht aus PMMA-XT (58%) und PMMA-GS (37%). Bei 94% der Proben wurde keine Modifikation (resist, kratzfest) gefunden. Knapp 5% der untersuchten Proben haben eine kratz feste Beschichtung. 63% der Proben sind farblos, weitere 27% weiß und ca. 10% farbig. Ebenfalls 63% der Proben sind transparent und 36% opak. Der überwiegende Teil der Proben ist neuwertig (85%) und besteht aus Randstreifen und Verschnittresten (46%) oder Massivplatten (20%). Umgeformte (6%), geklebte (4%) und tiefgezogene (2%) Teile werden der Crack-Qualität zugeordnet. Bei 60% der Proben liegen keine Angaben zum Hersteller vor, 26% stammen von Röhm und 10% von 3A Composites.

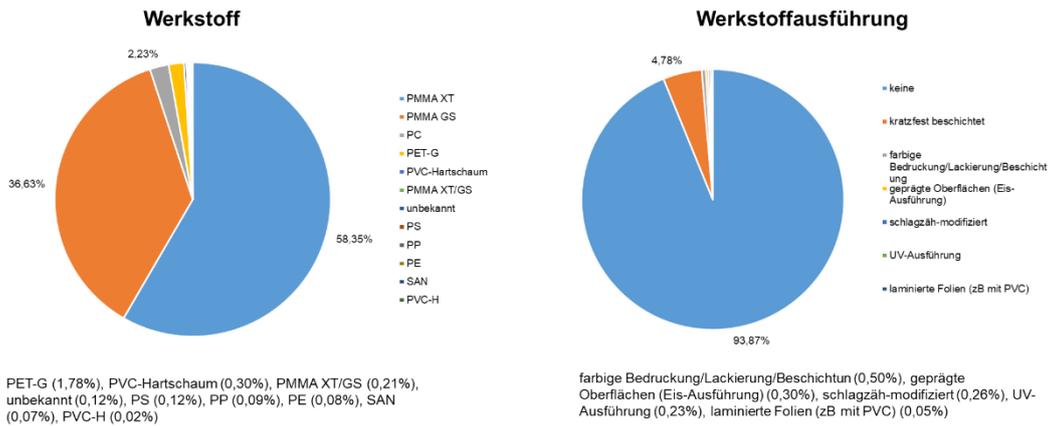


Abbildung 9: Werkstoff und Werkstoffmodifikation des Pekutherm-Materialeinganges

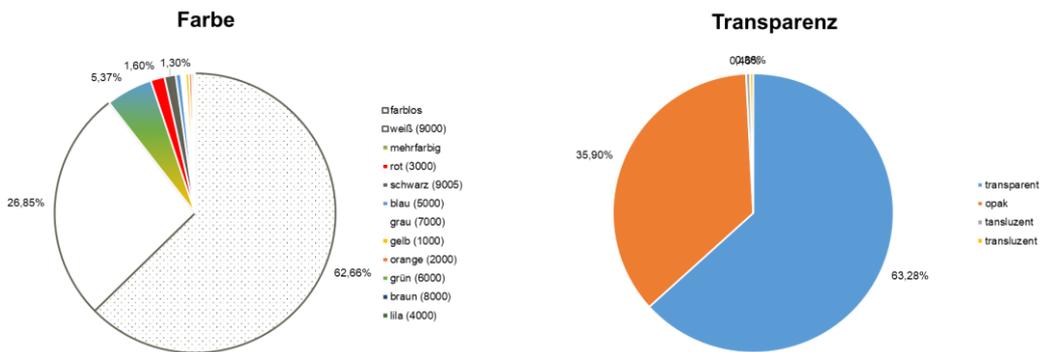


Abbildung 10: Farbe und Transparenz des Pekutherm-Materialeinganges

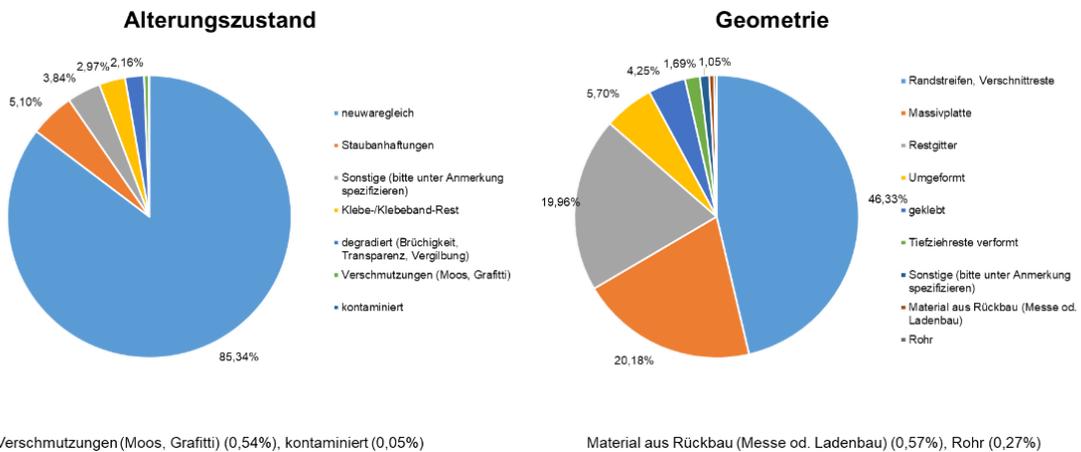


Abbildung 11: Alterungszustand und Geometrie des Pekutherm-Materialeinganges

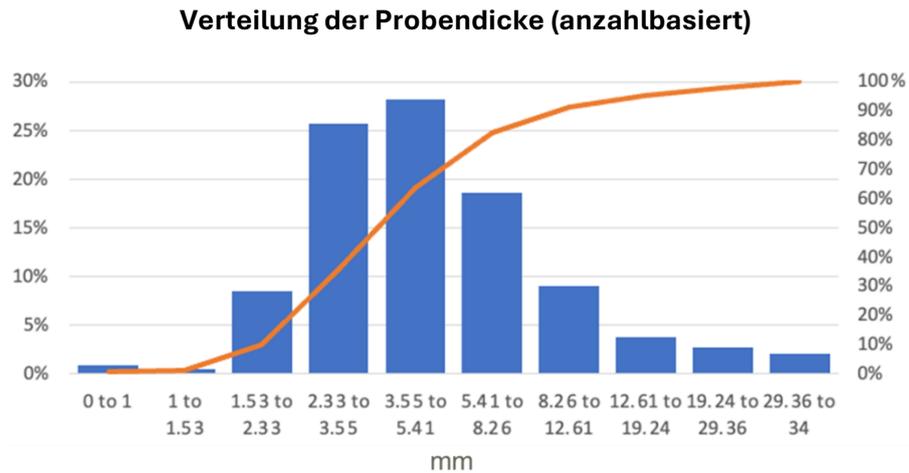


Abbildung 12: Probendicke des Pekutherm-Materialeinganges (anzahlbasiert)

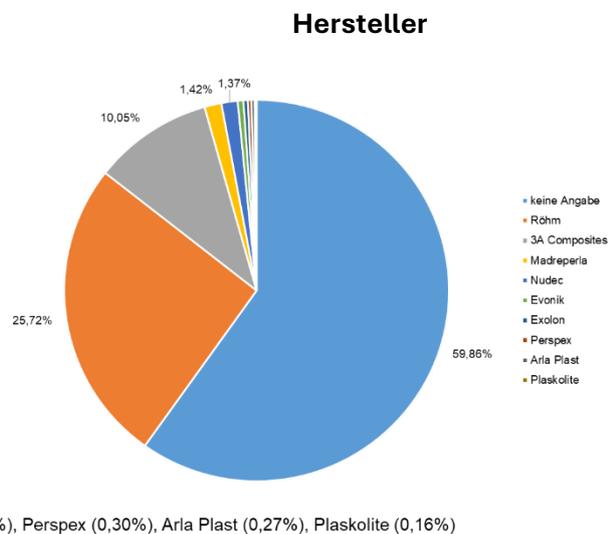


Abbildung 13: Hersteller des Pekutherm-Materialeinganges basierend auf dem Folienaufdruck

Die 1100 Proben werden aufgrund ihrer Charakteristik und in Absprache mit Pekutherm in die Qualitäten A+ (13,6%), A/B (16,5%) und Crack (69,6%) eingeteilt (Abbildung 14). Um eine hohe Qualität zu erreichen, muss das Sortiergut neuwertig und frei von Verschmutzungen und Degradation sein. Um wirtschaftlich zu sein, müssen die Partikel bzw. Probenstücke zudem ausreichend groß sein. Nur PMMA-XT kann werkstofflich verwertet werden, so dass alle PMMA-GS der Crack-Qualität zugeordnet werden. Darüber hinaus sollte das PMMA-XT-Sortiergut einfarbig oder farblos transparent sein. Ist eine Schutzfolie vorhanden, wird es der Qualität A/B zugeordnet. Ist zusätzlich der Hersteller bekannt, kann es der Qualität A+ zugeordnet werden. Abbildung 14 zeigt hierfür den Entscheidungsbaum zur Zuordnung der Partikeleigenschaften zu Produktqualitäten.

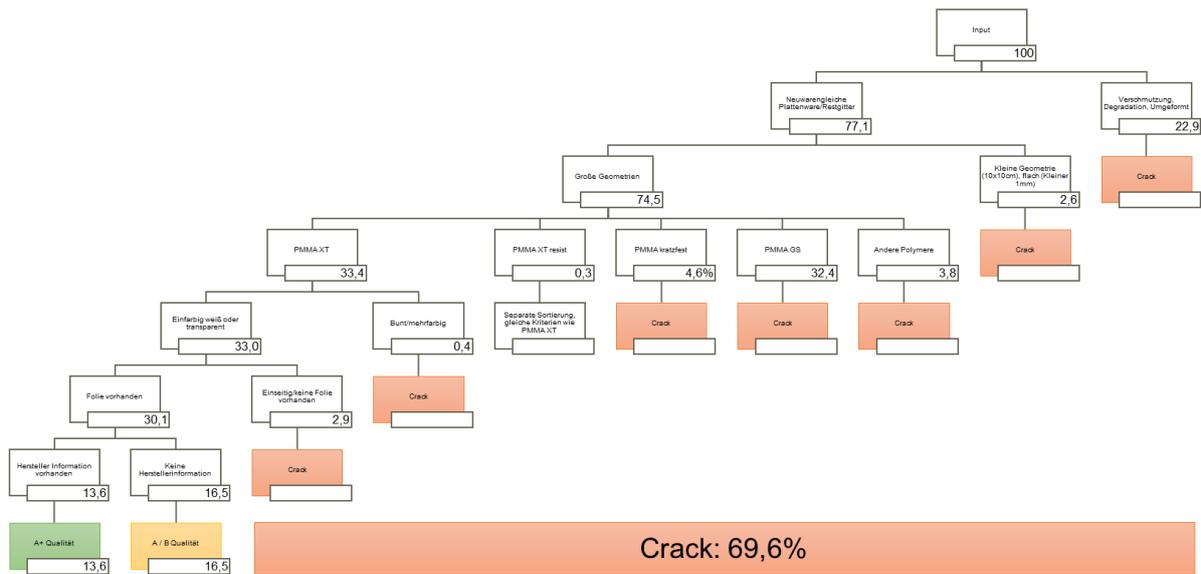


Abbildung 14: Entscheidungsbaum mit Masseanteil zur Einordnung in die PMMA-Qualitäten

3.4 Tracer-Additivierung in PMMA [AP3]

Das Unternehmen POYLVANTIS führt im Rahmen des PACE-Projekts eine Vielzahl von Tracerversuchen mit ihrer PMMA-Formmasse im hauseigenen Technikum durch. Ziel dieser Versuche ist die Auswahl des geeigneten Tracerpartikels, der Tracermenge sowie der Einarbeitungstechnik. Während der Projektlaufzeit wurden insgesamt vier Produktionsversuche (PT*) durchgeführt. Die POLYVANTIS führte optische und mechanische Untersuchungen an den in den Produktionsversuchen hergestellten Musterplatten durch. Darüber hinaus werden Polysecure Musterplatten für Detektionstests zur Verfügung gestellt. Die Detektionsversuche zu jedem Produktionsversuch sind in Abschnitt 3.5.2 beschrieben.

(*PT = Production Trial, eine vom System vorlaufend vergebene Nummerierung von Produktionsversuchen zu Dokumentationszwecken)

3.4.1 PT234 – 2. Tracerversuch im Technikum, 28.-29.06.2023

Nach einem ersten Tastversuch, der für den hier vorliegenden Bericht außer Betrachtung bleibt, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes "PACE" vereinbart, einen „zweiten“ Versuchsdurchlauf mit verschiedenen Tracern von Polysecure durchzuführen. Die fünf gelieferten Tracer unterscheiden sich zum einen in der Korngröße und zum anderen in der Basis des Tracermaterials. Nach Eingang des Materials sollen nun im Technikum Musterplatten zur Bewertung produziert werden. Es sollen von den fünf Tracern jeweils 10 Platten (1000 mm x Extrusionsbreite, beidseitig kaschiert) mit einem Traceranteil von 1, 3 und 10 ppm hergestellt werden. Weiter sind vom Anfang, der Mitte und vom Ende des Versuchsdurchlaufes je 1 Handmuster (A4) für die Fa. Polysecure zu entnehmen; in Summe 45 Handmuster.

Von jeder Einstellung geht eine Musterplatte zur anwendungstechnischen (AWT-)Prüfung. Hierbei sollen u.a. Haze, Gelbwert und das Streubild beurteilt werden. Die Ergebnisse werden im PACE-Treffen präsentiert.

Es werden insgesamt 15 Mischungen á 40 kg vorbereitet, die aus 100 % PLEXIGLAS®-Formmasse bestehen. Je Tracer 3 Mischungen mit folgenden Anteilen an Tracer: 1 ppm, 3 ppm und 10 ppm. Somit ergeben sich für 40 kg Mischung folgende Einarbeitungen:

- 1 ppm = 0,04 g
- 3 ppm = 0,12 g

- 10 ppm = 0,40 g

Folgende Tracer liegen vor:

1. 343-A69-9-2a (41,6 µm)
2. 343-K1-8-0 (26,7 µm)
3. 343-K1-8-1 (19,4 µm)
4. 343-K1-8-2 (15,0 µm)
5. 343-K1-8-4 (9,7 µm)

Ergebnis:

- Je Einstellung wurden 10 Musterplatten á 1000 mm x Extrusionsbreite hergestellt. Muster 100 x 100 mm und A4 wurden für die Projektpartner aus den Musterplatten herausgesägt. Übrige Muster im BE-Archiv.
- Das Ziel, eine verkaufsfähige Platte mit dem Tracer herzustellen, konnte nicht erreicht werden. Der kleinste Tracer mit 9,7 µm und 1 ppm Anteil in der Masse konnte über die Kanteneinleuchtung erkannt werden. Für diese Anwendung ist der Tracer nicht geeignet.
- Optisch zu erkennen ist, die gute und homogene Verteilung des Tracers in der Platte.
- Ohne die Kanteneinleuchtung liegt ein qualitativ hochwertiges i.O. Produkt vor, welches verkaufsfähig wäre.

3.4.2 PT244 – 3. Tracerversuch im Technikum, 03.08.2023

Im Rahmen des Forschungsprojektes "PACE" wurde vereinbart, einen erneuten Versuchsdurchlauf mit dem bekannten Tracer 343-K1-8-4 (d95 = 9,12 µm) von Polysecure durchzuführen. Es sollen von dem Tracern jeweils 10 Platten (1000 mm x Extrusionsbreite, beidseitig kaschiert) mit einem Traceranteil von 0,1 ppm, 0,3 ppm und 0,5 ppm hergestellt werden. Die Zwischenschritte 0,2 ppm und 0,4 ppm werden offengehalten und bei Bedarf produziert.

Weiter sind vom Anfang, der Mitte und vom Ende des Versuchsdurchlaufes je 2 Handmuster (100 x 100 mm) für die Fa. Polysecure zu entnehmen; in Summe 18 Handmuster. Je ein A4 Muster geht an die Hochschule Pforzheim. Von jeder Einstellung geht eine Musterplatte zur AWT-Prüfung. Hierbei sollen u.a. Haze, Gelbwert und das Streubild beurteilt werden. Die Ergebnisse werden im PACE-Treffen präsentiert.

Analog des PT234 werden die 3 (evtl. 5) Einarbeitungen vorbereitet.

1. Einwaage des Tracers in entsprechender Konzentration (0,1 ppm, 0,3 ppm, 0,5 ppm)
2. Abwiegen der 2 kg Vormischung
3. Zugabe des Tracers
4. definiertes Mischen auf dem Trommelmischer (8 min)
5. Abwiegen der 38 kg Mischung, Zugabe der Vormischung und definiertes Mischen auf dem Trommelmischer (8 min)

Anschließend auf den Extruder geben und Herstellung der Musterplatten. Beim Wechsel der Einarbeitung Spülen des Extruders mit Mahlgut oder PLEXIGLAS®-Formmasse für 15 min. Vor Ort können die Kanteneinleuchtungsversuche mit der Lichtschiene der AWT durchgeführt werden. Vor dem Versuch, die Mischbehälter waschen und mit Alkoholtuch auswischen.

Ergebnis:

- Es wurden von jeder Einstellung 10 Platten (1000 mm x Extrusionsbreite) produziert. Von den Platten 1, 5, und 10 wurden jeweils 2 Muster 100 x 100 mm für Fa. Polysecure gesägt und per Post versendet.

- Es konnte die Variante 0,1 ppm Tracer als "gut" bewertet werden. Diese Menge Tracer ist noch detektierbar. Weitere Versuche folgen.
- Die Versuchsreihe wird über den neuen Workflow PT278 weiter verfolgt.

3.4.3 PT278 - 4. Tracerversuch im Technikum, 08.01.2024

Im PT244 (3. Tracerversuch im Technikum, PACE) hat sich die Abmischung von 0,1 ppm des Tracers als geeignet und detektierbar herausgestellt. Nun soll der Tracer in der 0,1 ppm Abmischung in weiteren Produkten inkl. Farben getestet werden. Auch soll eine Standardplatte 0A000 in 6 mm hergestellt und untersucht werden.

Verwendeter Tracer: 343-K1-8-4 (d95 = 9,12 µm) von Polysecure

Folgende Produkte sollen hergestellt werden:

- 0A000 in 6 mm
- 0A000 in 3 mm
- 0RA65 in 3 mm, mit Schlagzähformmasse
- WN070 in 3 mm, mit MB-weiß
- WN297 in 3 mm, mit MB-weiß
- 6N570 in 3 mm, mit MB-grün
- 5N870 in 3 mm, mit MB-blau

Ergebnis:

Folgende Ziele konnten erreicht werden.

1. Der Tracer ist in keinem Muster mit dem bloßen Auge zu erkennen.
2. Bei Kanteneinleuchtung ist der Tracer bei den klaren Platten nicht zu erkennen.
3. Sowohl bei den Farben wie auch bei den klaren Platten konnte der Tracer von Polysecure detektiert werden.

3.4.4 Laborergebnisse der künstlichen Bewitterung – Xenontest

Die Ergebnisse der Xenontest zur künstlichen Bewitterung von PMMA-Proben für bis zu 10.000 Stunden sind in Tabelle 4 dargestellt. Ergänzend zur tabellarischen Darstellung sind folgende Hinweise zu geben:

X22-0193: Draufsicht: kaum merklich aufgehellt, merklicher Gelbstich. Draufsicht unter 45°: leicht bis merklich matt. Durchsicht: kaum merklich aufgehellt, leichter Gelbstich, leichte Trübung und merklich trüber Streifen rechts, kaum merklicher Blaustich Rückgang

X22-0194: Draufsicht: kaum merklich aufgehellt, merklicher Gelbstich. Draufsicht unter 45°: leicht matt. Durchsicht: kaum merklich aufgehellt, leichter Gelbstich, merkliche Trübung, kaum merklicher Blaustich Rückgang

X22-0195: Draufsicht: kaum merklich aufgehellt, starker Gelbstich, kaum merklicher Blaustich Rückgang. Draufsicht unter 45°: leicht matt. Durchsicht: kaum merklich aufgehellt, merklicher Gelbstich, merkliche Trübung, kaum merklicher Blaustich Rückgang.

X22-196: Draufsicht: kaum merklich aufgehellt, starker Gelbstich, kaum merklicher Blaustich Rückgang. Draufsicht unter 45°: leicht matt. Durchsicht: kaum merklich aufgehellt, merklicher Gelbstich, merkliche Trübung, kaum merklicher Blaustich Rückgang

X22-197: Draufsicht: leicht aufgehellt, leichter Gelbstich. Draufsicht unter 45°: leicht matt. Durchsicht: leicht aufgehellt, leichter Gelbstich, kaum merkliche Trübung

Tabelle 4: Xenontest - künstliche Bewitterung, optische und mechanische Eigenschaften (Masterbatch) [Polyvantis GmbH]

		Typ	X22-0193	X22-0194	X22-0195	X22-0196	X22-0197
Bewitterung [h]		Charge	Standard	1% Poly-secure	3% Poly-secure	10% Poly-secure	3% Pol white
0	Lighttransmission	%	92,13	91,80	90,73	87,53	72,02
1000	Lighttransmission	%	92,17	91,73	90,67	87,62	72,15
2500	Lighttransmission	%	92,18	91,71	90,69	87,51	72,07
5000	Lighttransmission	%	91,98	91,21	89,90	85,97	71,7
7500	Lighttransmission	%	91,16	90,4	89,11	84,57	72,13
10000	Lighttransmission	%	91,02	89,99	88,15	82,97	71,89
0	YI		0,64	0,35	0,40	0,33	4,10
1000	YI		0,76	0,86	0,99	1,26	4,13
2500	YI		1,25	1,44	1,66	1,95	4,59
5000	YI		2,00	2,86	3,75	4,83	4,96
7500	YI		3,21	3,96	3,84	5,69	4,91
10000	YI		3,20	4,34	4,67	7,17	5,19
0	E Modulus	MPa	3267	3288	3262	3290	3299
5000	E Modulus	MPa	3220	3270	3200	3110	3190
0	Tensile Strength	MPa	85,10	85,30	85,00	84,80	84,00
5000	Tensile Strength	MPa	93,60	83,30	83,30	83,90	85,20
0	Elongation at break	%	6,10	6,00	6,70	6,50	6,20
5000	Elongation at break	%	4,90	5,70	5,60	5,60	5,70

3.5 Tracer-Entwicklung und -Detektion [AP3]

3.5.1 Auswahl von Markermaterialien

Die technischen Randbedingungen für den Einsatz von Fluoreszenzmarkern in einem bestimmten Zielsystem werden von mehreren Faktoren bestimmt:

- Matrixmaterial (Vollmaterial, Folie, Druckfarbe, ...)
- Verarbeitungsmethode (Einmischung via Masterbatch, Druckverfahren)
- Messbedingungen (benötigte Ortsauflösung, spektrale Auflösung, Messgeschwindigkeit, Messung mit oder ohne Hintergrundhelligkeit, ...)
- gewünschte Anzahl Marker-Codes.

In Abhängigkeit von diesen Faktoren gilt es eine Lösung zu finden, bei der mit möglichst geringem Markereinsatz eine verlässliche Detektion erfolgen kann. Relevante zu ermittelnden Parameter hierfür sind bspw.

- Markersystem (Hostmaterial, Dotieratome, verwendete Fluoreszenzlinien)
- Markerkonzentration
- Partikelgröße
- Einbringungsverfahren, Verarbeitungsparameter
- Messoptik und Detektoren
- mechanische Realisierung des Messsystems.

Da die Ermittlung möglicher Einsatzszenarien für Marker in der PMMA-Sortierung selbst Teil des Projekts war, waren die obigen Randbedingungen zu Projektbeginn noch nicht vollständig spezifizierbar. Für die Evaluation im Rahmen des Projekts wurde deshalb eine möglichst breit einsetzbare Markerlösung bevorzugt.

Daher wurde das Polysecure-Markersystem auf Basis des Yttriumoxisulfid-(Y_2O_2S -)Hostmaterials verwendet, das bereits in mehreren Einsatzszenarien erprobt ist, dessen Fluoreszenzeigenschaften gut untersucht sind, das sich durch relativ kleine Partikelgrößen auszeichnet und für das bereits ein skalierbarer Produktionsprozess existiert. Auf Basis des Hostkristalls werden mittels Dotierung mit verschiedenen Seltenerdelementen unterschiedliche Markersubstanzen erzeugt, die sich in ihren Fluoreszenzspektren unterscheiden. Im YOS-System stehen drei, bei speziell angepasster Anregung auch vier Basis-Marker zur Verfügung. Mit diesen lassen sich in Binärkombination bis zu $2^3-1=7$ bzw. $2^4-1=15$ verschiedene Markercodes darstellen. Durch Mischung der Basis-Marker in verschiedenen Verhältnissen kann die Anzahl darstellbarer Codes noch weiter vergrößert werden. In PACE wurden drei auf den Elementen Holmium (Ho), Erbium (Er) und Thulium (Tm) basierende Marker eingesetzt. Für die Messung der Fluoreszenzemission stehen hochsensitive Detektoren zur Verfügung, die sowohl als Basis eines angepassten Handdetektors als auch einer Detektionseinheit in einer Sortiermaschine dienen können.

Als zu untersuchendes Einsatzszenario wurde die Einbringung der Marker in PMMA-Vollmaterial gewählt. Alternativ wäre auch eine Markierung der Schutzfolie mittels Bedruckung oder im Vollmaterial der Folie denkbar, jedoch wurden derartige Szenarien in anderen Projekten bereits gut untersucht (z. B. im BMBF-Forschungsvorhaben MaReK, Woidasky et al. 2021), sodass die erforderlichen Parameter gut bekannt sind. Ziel der Marker-Versuche im Projekt PACE war die Untersuchung des spezifischen Verhaltens von Markern im Material PMMA, und hierbei insbesondere in hochtransparentem Material.

3.5.2 Detektionsversuche

3.5.2.1 *Versuchsreihe 1 – Vorversuche*

Bevor mit der Probenherstellung in der Produktion bei Polyvantis begonnen wurde, wurden als Vorversuch Probenserien bei Polysecure hergestellt (Abbildung 15):

- Plättchen aus transparentem Polydimethylsiloxan (PDMS) (rechteckig, Maße ca. 80 mm x 40 mm x 2 mm). Diese Art von Proben dient bei PS als Standardprobe für die Qualitätssicherung in der Markerproduktion. Sie sind schnell und einfach im manuellen Gießverfahren herstellbar und dienen als Referenzproben für die Fluoreszenzintensität in transparentem Material. Es wurden Konzentrationsserien mit allen drei Basis-Markern und eine Partikelgrößenserie hergestellt und untersucht.
- Spritzgegossene PMMA-Scheiben (rund, Durchmesser 40 mm, Dicke 3 mm). Die Scheiben wurden aus glasklarem PMMA-Rohmaterial (PLEXIGLAS® 7H) von Polyvantis hergestellt. Es wurde eine Konzentrationsserie mit dem Holmium (Ho)-Marker hergestellt.



Abbildung 15: Proben aus Versuchsreihe 1. PDMS-Plättchen (links) und PMMA-Scheiben (rechts)

Diese Probenserien dienen dazu, eine erste Abschätzung der benötigten Markerkonzentration zu treffen, und zu untersuchen, ob diese Verfahren für die Herstellung einfacher Proben für das PMMA-System für schnelle Tests geeignet sind, ohne die großtechnische Produktionslinie bei Polyvantis in Anspruch nehmen zu müssen

Die verwendeten Marker, Konzentrationen und Partikelgrößen sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Versuchsreihe 1 - Konzentrationsserien

Konzentration / ppm	PDMS			PMMA
	Ho	Er	Tm	Ho
1	✓	✓	✓	✓
2,5	✓	✓	✓	
5	✓	✓	✓	✓
7,5	✓	✓	✓	
10	✓	✓	✓	✓
15	✓	✓	✓	
20	✓	✓	✓	
25	✓	✓	✓	

Die Proben wurden stationär auf einem definierten schwarzen Untergrund unter 100 W-Laseranregung vermessen. Es wurden die Intensitätssignale in drei spektralen Kanälen (grüner, roter und nahinfraroter Spektralbereich) aufgenommen und daraus wurde jeweils das Signal-Rausch-Verhältnis (Signal Noise Ratio, SNR) bestimmt (Abbildung 16 und Abbildung 17). Die Fluoreszenzemission des Ho-Markers liegt hauptsächlich im grünen Kanal (mit einer schwachen Nebenlinie im roten Kanal), die des Er-Markers sowohl im grünen als auch im roten Kanal und die Emission des Tm-Markers im infraroten Kanal.

Für eine sichere Detektion und die Messung von Binärkombinationen ist ein SNR von mindestens 3 erforderlich. Für eine quantitative Auswertung, die für die Darstellung von Codes auf Basis von Marker-Verhältnissen erforderlich ist, muss der SNR mindestens 10 betragen.

Es zeigt sich, dass bei den PDMS-Proben alle Signale bis zur niedrigsten Markerkonzentration von 1 ppm qualitativ auswertbar sind ($SNR > 3$). Eine quantitative Auswertung ist je nach Marker ab 2,5 bis 7,5 ppm möglich.

Der Vergleich der SNR-Werte zwischen PDMS- und PMMA-Proben ergibt, dass das SNR bei den PMMA-Scheiben höher ist als bei den PDMS-Proben. Bereits bei 1 ppm liegt der SNR bei 14,6 und erlaubt somit quantitative Auswertungen. Der höhere SNR-Level wird durch höhere Signalstärken bedingt. Die gemessenen Intensitäten bei den PMMA-Scheiben sind bei gleicher Konzentration um ca. einen Faktor 9 höher. Die höhere Signalintensität kommt zustande durch

- größere Dicke der PMMA-Plättchen, somit größeres durchstrahltes Volumen
- eine leichte Trübung/Gelbstich der Plättchen durch den Produktionsprozess. Diese führt zu erhöhter Streuung, die wiederum die effektive optische Weglänge erhöht und somit das Signal verstärkt.
- unterschiedliche Verluste durch interne Totalreflexion und Randauskopplung aufgrund unterschiedlicher Probengeometrien.

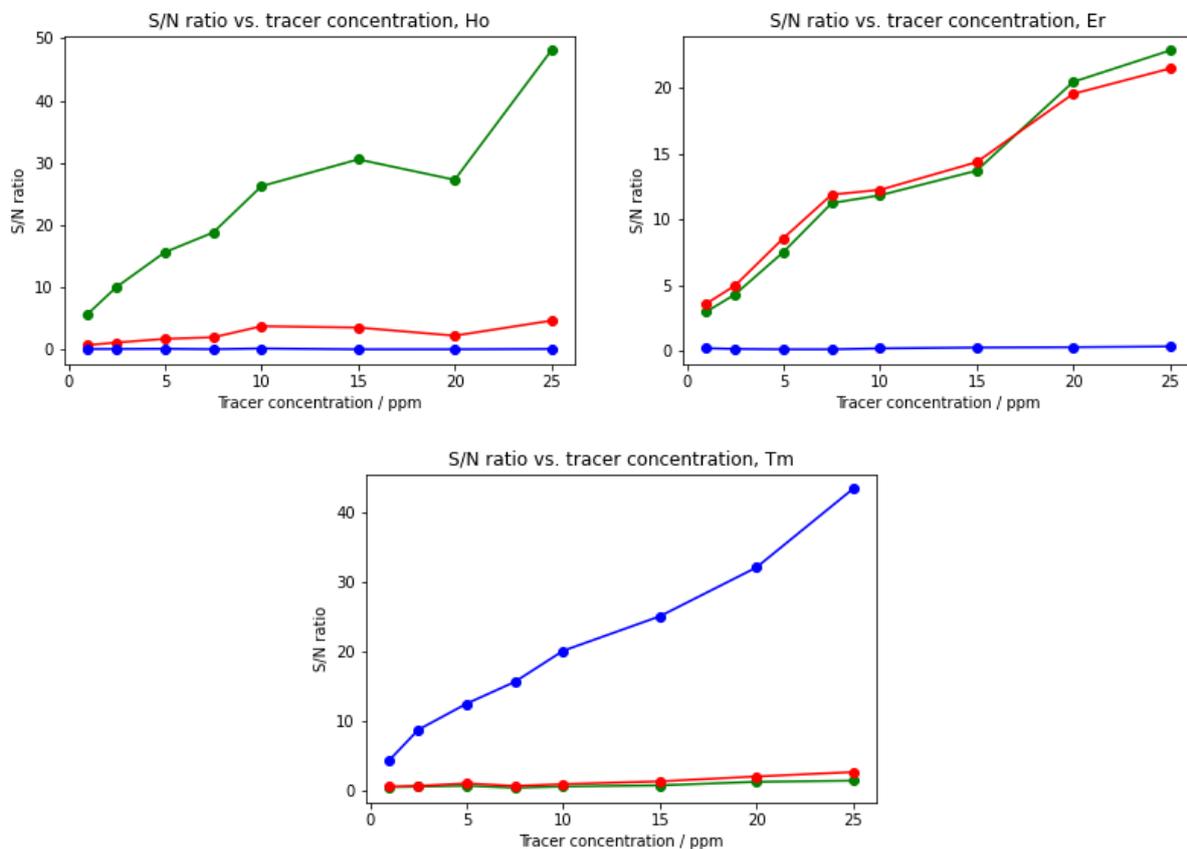


Abbildung 16: Signal-Rausch-Verhältnis in Abhängigkeit der Markerkonzentration in PDMS-Proben für Ho- (oben links), Er- (oben rechts) und Tm-Marker (unten). Die Farben der Datenpunkte bezeichnen die spektralen Kanäle grün, rot und infrarot (blau markiert)

Aus den Versuchsergebnissen lässt sich ableiten, dass in transparentem Material für das untersuchte Detektor-Setup sehr niedrige Markerkonzentrationen im Bereich von 1 ppm ausreichend sind. Dies gilt für eine Materialstärke von 2 mm, die als Untergrenze der zu erwartenden Materialstärken angenommen wird. Bei dickeren Platten kann mit höheren Signalen gerechnet werden.

Die optischen Eigenschaften des Materials und die Probengeometrie haben jedoch erheblichen Einfluss auf die Signale. Dieser Einfluss ist bei opaken Proben wesentlich geringer, da hier nicht das ganze Volumen zur Fluoreszenz beiträgt und die optischen Weglängen wesentlich kürzer sind. In hochtransparenten Materialien sind vergleichende Messungen zwischen Proben

verschiedenen Ursprungs somit nur mit geeigneter Probenpräparation und/oder der Einführung von Korrekturfaktoren möglich.

Die Proben für die weiteren Versuchsreihen wurden daher alle bei Polyvantis auf gleiche Weise gefertigt und auf die gleiche Größe zugesägt.

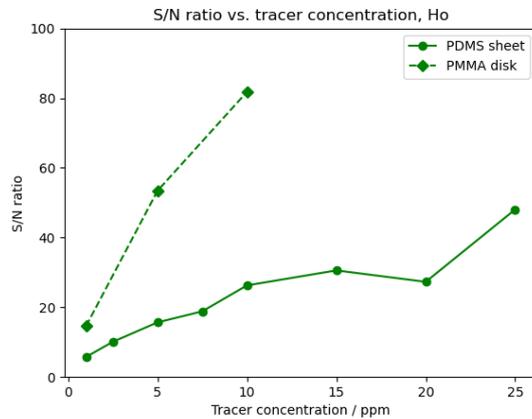


Abbildung 17: Vergleich des Signal-Rausch-Verhältnisses für PDMS-Plättchen und PMMA-Scheiben

In PDMS wurde außerdem eine Partikelgrößenserie angefertigt, bei der die Größe der Markerpartikel zwischen 2,0 μm und 21,0 μm variiert wurde (Abbildung 18). Es konnte keine wesentliche Abhängigkeit der Intensität und daraus folgend des SNR von der Partikelgröße festgestellt werden. Es gibt lediglich einen Ausreißer bei 6,5 μm , der auf eine Abweichung bei der Dosierung der Probe zurückzuführen sein könnte.

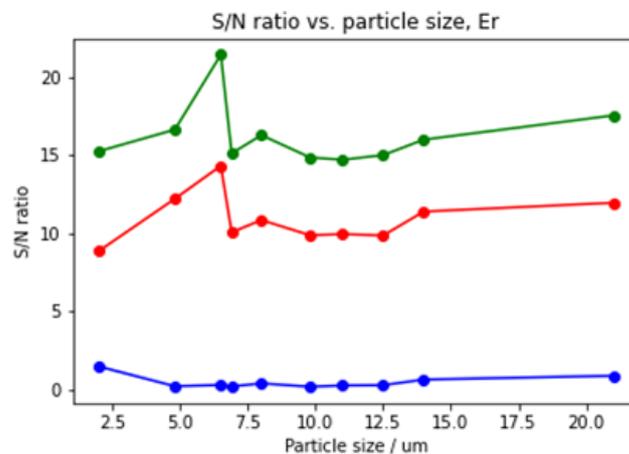


Abbildung 18: Signal-Rausch-Verhältnis für PDMS-Proben in Abhängigkeit der Partikelgröße

3.5.2.2 Versuchsreihe 2 – Probenherstellung bei Polyvantis, Konzentrationsserie, Partikelgrößenserie, Homogenität der Markerverteilung

Für die weiteren Versuchsreihen im Projekt wurde der Marker YOS:Yb,Er verwendet, da dieser von den in Frage kommenden Markern die niedrigste Quanteneffizienz aufweist. Somit bildet er für die Untersuchung der Detektionsschwelle das Worst-Case-Szenario. Bei Konzentrationen, die zur Detektion des Er-Markers ausreichen, sind auch die anderen Marker sicher messbar. Zudem emittiert Er auf zwei verschiedenen Wellenlängen, was die Untersuchung wellenlängenabhängiger Effekte ermöglicht. Für Bewertungen des mechanischen Verhaltens im Matrixmaterial (Verarbeitbarkeit, Homogenität der Verteilung) spielt das Dotieratom eine untergeordnete Rolle, da es hierbei primär auf das Hostmaterial ankommt. Ergebnisse hierzu gelten somit für alle Marker gleichermaßen. Die Verteilung der Partikelgrößen liegt beim Er-Marker generell bei größeren Werten als

bei den anderen, sodass er für Bewertungen des Streuverhaltens und von etwaiger Sedimentation in Lösung ebenfalls das Worst-Case-System darstellt.

In Versuchsreihe 2 wurde die Markierung von Polyvantis-Material untersucht. Es wurden Platten aus glasklarem PMMA mit 1, 3 und 10 ppm Markerkonzentration hergestellt, jeweils mit verschiedenen Partikelgrößen (siehe Abschnitt 3.4.1). Zur Verwendung in den Detektionsversuchen wurden aus dem extrudierten Material Plättchen der Größe 10 cm x 10 cm ausgesägt (Abbildung 19). Es wurden Proben von der 1., 5. und 10. (letzten) Platte im Produktionsprozess genommen, um die Homogenität der Markerverteilung im Prozess zu bewerten.

Die Analyse der optischen Eigenschaften bei Polyvantis ergab, dass die Partikel bei Kantenbeleuchtung als leichter Streueffekt (Haze) sichtbar sind (siehe Abschnitt 3.4.1). Dieser Effekt nimmt mit der Konzentration und der Partikelgröße zu, sodass die Konzentrationen 3 ppm und 10 ppm als nicht verwendbar eingeschätzt werden. Im Folgenden ist die Analyse der 1-ppm-Proben dargestellt.



Abbildung 19: Beispiel-Testplatte von POLYVANTIS. Größe ca. 10 mm x 10 mm

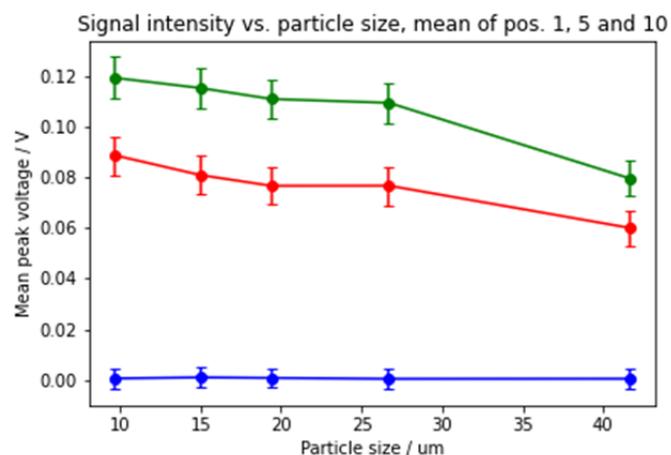


Abbildung 20: Versuchsreihe 2, Fluoreszenzintensität in Abhängigkeit der Partikelgröße (1-ppm-Proben). Das Signal des Er-Markers tritt im grünen und roten Messkanal auf.

Die Signalintensität beträgt ca. 100 mV und ist damit vergleichbar mit der Intensität der Vorversuche in PDMS.

Die Messungen zeigen, dass die Signalintensität und damit die Markerkonzentration mit zunehmender Partikelgröße nur leicht abnimmt (Abbildung 20). Daraus lässt sich schließen, dass keine nennenswerte Sedimentation der Markerpartikel oder sonstige größenabhängige Verluste auftreten. Lediglich bei sehr großen Partikeln deuten die Daten auf einen leicht reduzierten Transfer der Marker in die Probe hin. Da der Marker mit dieser Partikelgröße jedoch einem anderen Herstellungsprozess entstammt als die übrigen, ist auch eine etwas niedrigere Quanteneffizienz als Ursache möglich.

Die Variation der Intensität zwischen den Proben von Platte 1, 5 und 10 ist geringer als die Varianz der Einzelmessung. Somit kann eine sehr gute Homogenität der Markerverteilung im Material nachgewiesen werden. Dies bestätigt die Ergebnisse aus dem Kantenbeleuchtungsversuch in Abschnitt 3.4.1.

3.5.2.3 Versuchsreihe 3 – Sub-ppm-Markerkonzentrationen

In Folge der Erkenntnisse aus der vorherigen Produktionsserie wurde untersucht, ob das Phänomen des durch die Markerpartikel verursachten Haze (Streuung) bei Konzentrationen unter 1 ppm auf akzeptable Werte reduziert werden kann. Hierfür wurden von Polyvantis Proben mit 0,1 ppm, 0,3 ppm und 0,5 ppm hergestellt (siehe Abschnitt 3.4.2). Da derart niedrige Konzentrationen mit der bisherigen Messtechnik nicht aufgelöst werden können, wurden alle Komponenten der Messtechnik – Anregung, Detektionsoptik und Auswertung – speziell für die Messung extrem niedriger Signale optimiert.

In einem ersten Schritt wurden die Justage der Laseroptiken und der Detektionsoptik auf die spezifische Probengeometrie angepasst, um Laserleistungsdichte und Lichtstärke zu maximieren. Außerdem wurde der Auswertalgorithmus angepasst. Mit diesen Maßnahmen konnten die Signale bis 0,1 ppm bereits aufgelöst werden, jedoch nahe an der Auflösungsgrenze.

Im zweiten Schritt wurde die Messgeometrie angepasst. Anregung und Detektion erfolgen normalerweise von oben, da bei opaken Objekten diese Konfiguration im Allgemeinen die beste Signalstärke ergibt. Bei dünnen, transparenten Platten durchquert jedoch ein Großteil der Strahlungsleistung die Probe ohne Fluoreszenzanregung und wird dann von der Auflage (Förderband, Trägerplatte oder Strahlfalle) absorbiert. Die Anregungseffizienz kann somit maximiert werden, indem die Einstrahlung waagrecht durch die Kante erfolgt, sodass das Laserlicht die Platte längs durchquert.

Dies wurde zunächst umgesetzt, indem nicht die Messanordnung sondern die Probe gedreht wurde, um eine direkte Vergleichbarkeit mit der bisherigen Anordnung zu ermöglichen (Abbildung 21).

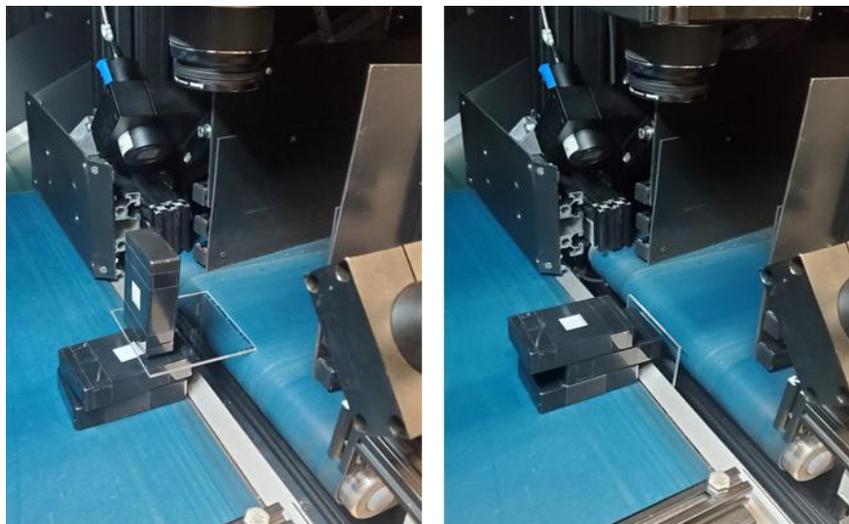


Abbildung 21: Messanordnung zum Vergleich von Flächen- (links) und Kantendetektion (rechts). Die Laseranregung erfolgt von schräg oben, das Objektiv des Detektors ist am oberen Bildrand sichtbar. Unter der Probe befindet sich die Laser-Strahlfalle, sodass kein Laserlicht von unten reflektiert wird.

Abbildung 22 zeigt die Signalintensität für Flächen- und Kantenanregung für die drei Markerkonzentrationen 0,1 ppm, 0,3 ppm und 0,5 ppm. Die Intensität bei Kantenbeleuchtung ist um ca. einen Faktor 13 höher als bei Flächenbeleuchtung. Somit ist mit diesem System in transparenten Platten auch eine Markerkonzentration von 0,1 ppm noch gut detektierbar.

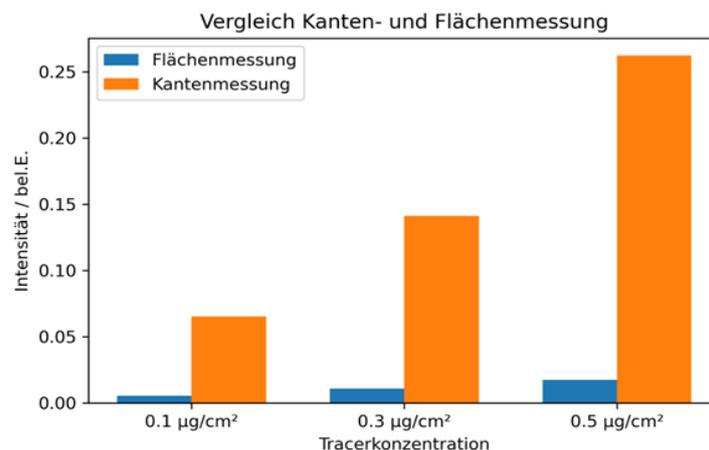


Abbildung 22: Signalintensität bei Flächen- und Kantenanregung in Abhängigkeit der Markerkonzentration. Er-Marker, Summe aus rotem und grünem Kanal.

Die Signalstärke im Einzelfall hängt von der Plattendicke, der durchstrahlten Länge (d. h. Breite der Platte) und der Kantenqualität ab.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde eine angepasste Laseroptik zur Kantenbeleuchtung entworfen und in einer der Versuchsanlagen bei Polysecure implementiert (siehe Abschnitt 3.5.3).

3.5.2.4 Versuchsreihe 4 – farbiges und schlagzähmodifiziertes Material, Variation der Dicke und Einfluss der Kantenqualität bei Kantenmessung

In einer weiteren Messreihe wurde untersucht, welche Markerkonzentrationen bei farbigen Materialien erforderlich sind und welchen Effekt die Kantenmessung hat. Es wurden blaue, grüne, weiß-transluzente und weiß-opaque Proben untersucht (Abbildung 23). In weißen Proben ist hauptsächlich Streuung wirksam, während grüne und blaue Pigmente eine wellenlängenabhängige Absorption zeigen.

Wie erwartet ist die Kantenmessung nur bei transparentem Material vorteilhaft. Bei absorbierenden oder stark streuenden Materialien ist die Eindringtiefe zu gering, sodass nur die oberste Schicht zur Fluoreszenz beiträgt. In diesem Fall ist eine größere bestrahlte Oberfläche von Vorteil. Dies ist auch bei weiß-transluzentem Material bereits der Fall.

Wie bereits gezeigt, ist bei transparentem Material eine Markerkonzentration von 0,1 ppm bei Kantenbeleuchtung ausreichend. Bei blauem und grünem Material sind 0,1 ppm an oder unter der Auflösungsgrenze, 5 ppm ergeben jedoch ein gutes Signal. Der Haze-Effekt ist bei eingefärbten Proben nicht sichtbar, sodass eine Markierung mit 5 ppm problemlos möglich ist. Bei den weißen Proben ist das Signal bei Flächenmessung stark erhöht, da durch Mehrfachstreuung in der Probe die optische freie Weglänge der Photonen vergrößert wird und dadurch die Wahrscheinlichkeit einer Markieranregung erhöht ist. 0,1 ppm sind für weiße Materialien daher ausreichend. Dies gilt insbesondere für Flächenbeleuchtung, doch auch bei Kantenbeleuchtung ist das Signal ausreichend.

Bei größerer Plattendicke ist bei transparentem Material und Flächenmessung erwartungsgemäß ein um ca. Faktor 2 erhöhtes Signal zu beobachten, da das durchstrahlte Volumen sich verdoppelt. Abweichungen vom Faktor 2 können durch unterschiedliche Einflüsse von Randeffekten (Rauheit der Kante, Verhältnis von Kante zu Oberfläche) bedingt sein.

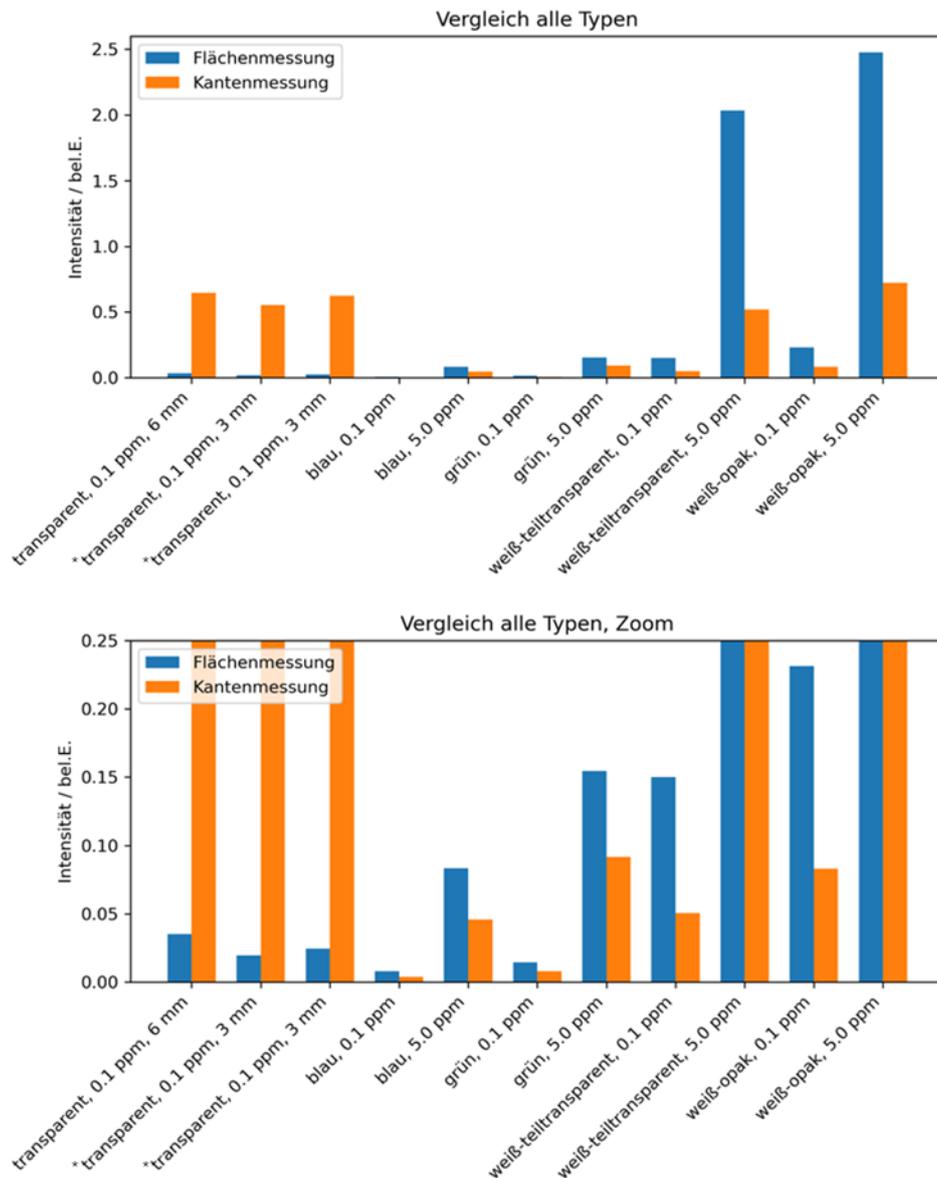


Abbildung 23: Signalintensität bei Flächen- und Kantenanregung für zwei verschiedene Markerkonzentrationen in Abhängigkeit der Pigmentierung, sowie bei transparenten Proben in Abhängigkeit der Dicke (1. und 2. Probe v. l.) und ohne und mit Resist-Additiv (*2. bzw. *3. Probe v. l.). Bild unten: Zoom der Y-Achse des oberen Graphen auf 0,25 zur besseren Erkennbarkeit der niedrigen Signale.

Auch das Verhalten von markiertem schlagzähmodifiziertem PMMA wurde untersucht. Schlagzähes PMMA enthält ein spezielles Additiv, das die mechanischen Eigenschaften des Materials verbessert, aber optisch nicht sichtbar ist. Wie die Messungen zeigen (*2. und *3. Probe in Abbildung 23), hat es auch auf die Markerfluoreszenz keinen signifikanten Einfluss. Somit kann schlagzähmodifiziertes PMMA genauso markiert werden wie die Standard-Variante.

Bei Anregung und/oder Messung von Plattenware durch die Kante spielt die optische Kanten-Qualität eine relevante Rolle. Im Gegensatz zur Platten-Oberfläche, die meist bis auf Kratzer und leichte Verschmutzungen glatt ist, hängt die Beschaffenheit der Kante stark von der vorherigen

Bearbeitung ab. Dies beeinflusst sowohl die Einkopplung des Laserlichts als auch die Auskoppelung des Fluoreszenzlichts, da sich durch Aufrauen die statistische Winkelverteilung der an der Grenzfläche reflektierten und transmittierten Photonen ändert. Um diesen Effekt zu untersuchen, wurden aus Testplättchen mit 3 mm und 6 mm Dicke folgende Kantenqualitäten hergestellt und die Intensität gemessen (Abbildung 24):

- die abgerundete glatte Originalkante der extrudierten Platte
- sägerau
- mit grobem Schmirgelpapier geschmirgelt (nur 3 mm)
- mit feinem Schmirgelpapier geschmirgelt
- gebrochen

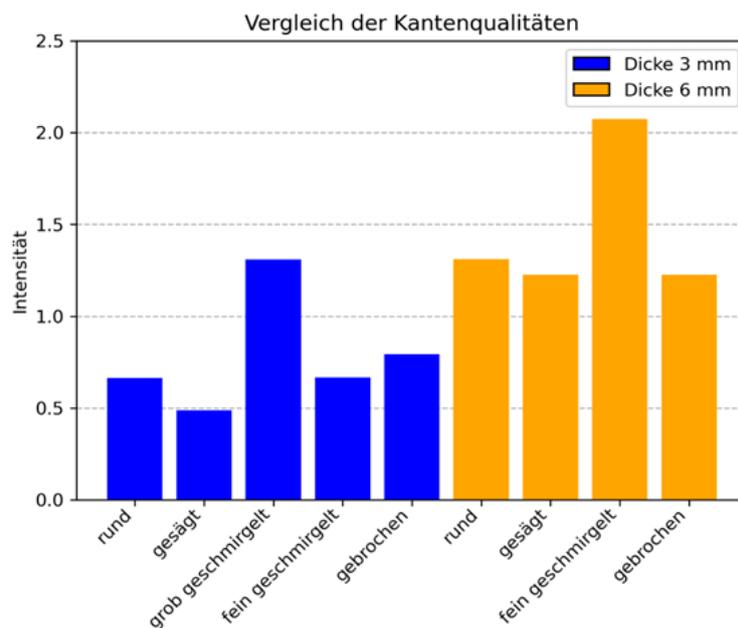


Abbildung 24: Signalintensität bei Kantenmessung für verschiedene Kantenqualitäten, für 3-mm- und 6-mm-Platten

Die Intensität innerhalb einer Dickenserie ist für alle Kantenqualitäten vergleichbar, mit Ausnahme der grob geschmirgelten Kante bei den 3-mm-Proben und der fein geschmirgelten bei den 6-mm-Proben. Daraus lässt sich schließen, dass Schmirgeln, d.h. das mikroskopische Aufrauen der gesamten Oberfläche, die Intensität signifikant steigern kann. Warum die fein geschmirgelte Kante bei der 3-mm-Probe keine Erhöhung zeigt, kann nur vermutet werden. Möglicherweise wurde nicht gründlich genug geschmirgelt, sodass ein erheblicher Teil der Oberfläche noch mikroskopisch glatt war. Andere Bearbeitungsarten haben offenbar keinen signifikanten Einfluss auf die Statistik der Photontrajektorien. In keinem Fall konnte eine Reduzierung der Intensität festgestellt werden. Das Messprinzip der Kantenmessung ist demnach unempfindlich gegenüber variablen Kantenqualitäten und kann zur Messung transparenter Platten eingesetzt werden.

3.5.3 Weiterentwicklung der Detektionstechnik

Im Rahmen der Evaluation möglicher Einsatzszenarien für Marker im Sortierprozess wurden auch die entsprechenden Anforderungen an ein angepasstes Detektionsgerät ermittelt.

Auf Grundlage von Gesprächen mit den Projektpartnern und einer Betriebsbesichtigung bei Pekutherm wurde untersucht, unter welchen Betriebsbedingungen ein TBS-Detektor im vorhandenen Sortierprozess voraussichtlich eingesetzt werden würde: Der Prozess bei Pekutherm verläuft üblicherweise entlang einer Abfolge festgelegter Stationen. Deren räumliche Anordnung in der Werkshalle kann zwar zum Teil einer gewissen Variation unterliegen – z.B. abhängig von der

Lagersituation –, ist aber im Wesentlichen stationär angelegt. Eine Station zur markergestützten Sortierung könnte somit ebenfalls (quasi-)stationär an passender Position in den Prozess integriert werden.

Die Nutzung eines portablen Handgerätes wäre hingegen selten von Vorteil, z.B. um noch im Eingangslager stichprobenweise Tests an Materiallieferungen direkt in der Gitterbox durchzuführen. Im Allgemeinen würde der Prozess vielmehr von einer Optimierung des Durchsatzes und somit Verkürzung von Prozesszeiten profitieren, was für eine Detektion im Durchlaufverfahren z. B. auf einem Förderband spricht. Da bei großen Teilen immer eine Vorzerkleinerung stattfindet, um die Teile auf ein geeignetes Maß für den Schredder zu bringen, ist die Maximalgröße der zu verarbeitenden Objekte beschränkt.

Die technischen Randbedingungen – extrem geringe Markerkonzentrationen, transparente Materialien und sehr hohe Anforderungen an die Reinheit und somit die Fehlerquote – machen eine sichere Messung mit einem Handgerät zu einer Herausforderung. Eine Durchlauf-Sortieranlage ermöglicht dagegen eine bessere Kontrolle der Messbedingungen und somit empfindlichere und exaktere Messungen.

Eine Materialzufuhr per Handauflage wäre voraussichtlich vorerst akzeptabel, da sie angesichts sowieso vorhandener manueller Bearbeitungsschritte wenig zusätzlichen Aufwand verursachen und den Prozess nicht verlangsamen würde. Die Option auf einen höheren Automatisierungsgrad durch robotergestützte oder fördertechnische Materialzufuhr wäre zusätzlich vorhanden. Die Entnahme und sortierte Ablage gemäß Detektionsergebnis kann ebenfalls per Hand erfolgen, oder bei Bedarf auf einen mechanischen Sorter umgestellt werden.

Demzufolge wurde in Abstimmung im Konsortium beschlossen, den Fokus statt auf die Entwicklung eines Handgerätes auf die Entwicklung einer auf den Einsatzzweck angepassten Durchlaufanlage zu legen. Polysecure hat bereits zwei Versuchsanlagen im Technikumsmaßstab in Betrieb – eine Anlage im Rundlaufverfahren, die Mehrfachmessungen für statistische Untersuchungen erlaubt (vgl. Abbildung 21), und eine weitere für Einzelmessungen mit manueller Aufgabe und Entnahme von Teilen, in der neben der Markerdetektion auch die Polymererkennung mittels Nahinfrarot-Spektroskopie implementiert ist (Abbildung 25). Eine Anlage für die PMMA-Sortierung könnte nach diesem Vorbild entworfen werden, lediglich mit einer größeren Bandbreite von ca. 80-100 cm.



Abbildung 25: Rendering der Sort4Circle-Versuchsanlage (mit optionaler Zuführung und Ablageeinheit) und Blick in die reale Anlage mit NIR-Messkammer (links) und Marker-Messkammer (rechts)

Im Projekt wurde der Fokus der Entwicklung auf die Verbesserung der Mess-Sensitivität gelegt, um Markerkonzentrationen im Sub-ppm-Bereich in transparenten Platten auflösen zu können. Auf Grundlage der in Abschnitt 3.5.2.3 und 3.5.2.4 beschriebenen Detektionsversuche wurde eine neue Laseroptik zur Kantenbeleuchtung designt (Abbildung 26), die einen kollimierten Strahl mit einem Durchmesser von 5 mm (anpassbar, optimiert für die Plattendicke von 3 mm und die

erforderliche Messbreite) erzeugt. Die Leistungsdichte dieses Strahls ist bei gleicher Laserleistung deutlich höher als die der vorherigen Linienoptik. Die Optik wurde in der Rundlauf-Versuchsanlage implementiert, um Statistikversuche durchführen zu können. Sie wäre jedoch mit geringem Aufwand auch in der Anlage zur Einzelmessung integrierbar.

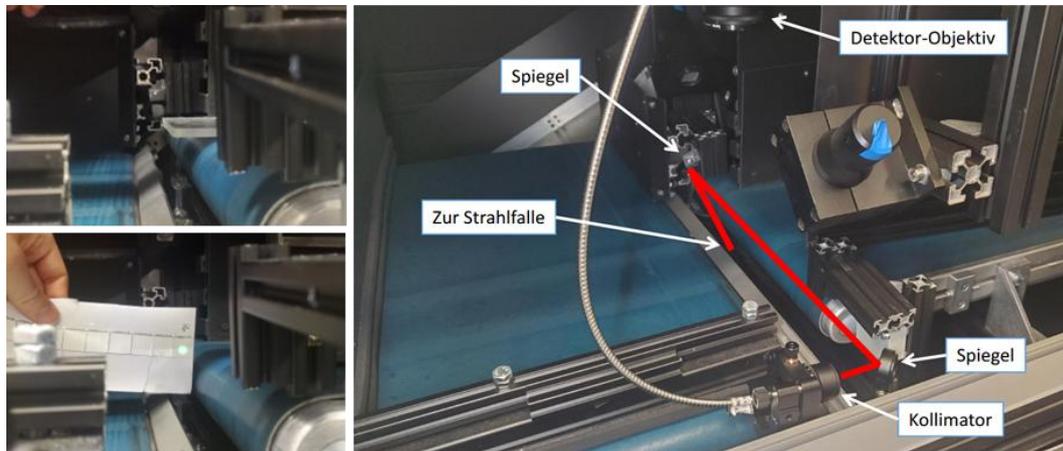


Abbildung 26: Laseroptik zur Kantenanregung in Rundlaufanlage (links). Der Strahlengang ist rot markiert. Fluoreszenz auf Marker-Etikett im Strahl (rechts oben). Testplättchen im Strahlengang (rechts unten)

Zur Bewertung der Detektionsgüte wurde mit transparenten Testplatten mit 0,1 ppm Markerkonzentration und 3 mm sowie 6 mm Dicke eine Detektionsstatistik erstellt (Tabelle 6). Es wurden für vier verschiedene Laserleistungen je 300 Messungen durchgeführt und die Detektionsquote gemessen. Der Laserstrom wurde zwischen 1,25 A und 2,00 A variiert. Die Probengeschwindigkeit betrug ca. 3 m/s.

Ab 2,00 A konnte eine Detektionsquote von 100% erreicht werden. Zur Flächenmessung werden in der Anlage üblicherweise zwei Laser bei einer Stromstärke von je 8,5 A verwendet. D.h. für diese Messung war deutlich weniger Laserleistung erforderlich, was mit entsprechend reduziertem Wärmeeintrag und geringerem Gefahrenpotential einhergeht. Bei der Nullmessung traten keine falsch positiven Ereignisse auf. Somit konnte gezeigt werden, dass auch bei dynamischer Messung eine verlässliche Detektion möglich ist. Der Streuung der Messwerte zufolge sind mindestens 5 unabhängige Marker-Codes realisierbar.

Tabelle 6: Detektionsstatistik für transparente Proben bei Kantenanregung in Abhängigkeit des Laserstroms. Je 300 Messungen

Laserstrom	Detektionsrate	
	Plattendicke 3mm	Plattendicke 6mm
1,25 A	91,7%	75,0%
1,50 A	99,7%	90,7%
1,75 A	99,3%	98,7%
2,00 A	100,0%	100,0%
Nullmessung		
2,00 A	0,0%	

3.5.4 Anwendung von künstlicher Intelligenz zur PMMA-Identifizierung

Die Abschlussarbeit von Dhibi (2024) untersuchte die Anwendung von künstlicher Intelligenz (KI) bei der Identifizierung, Klassifizierung und Sortierung von PMMA (Polymethylmethacrylat)-Folien untersucht, um Recyclingprozesse zu verbessern. Ziel ist es, ein System zu entwickeln, das die Erkennung von PMMA-Platten aus Bildern automatisiert und sie anhand von Schlüsselattributen

wie Größe, Farbe, Transparenz und Oberfläche klassifiziert. Diese Optimierung des Sortierprozesses soll die Effizienz des Materialrecyclings verbessern, insbesondere bei der Unterscheidung von PMMA-Materialien von anderen wie PET und Polycarbonat. Als Dateninput für diese Untersuchungen wurde die die Bilddaten und Charakteristiken aus den Sortieruntersuchungen (Kapitel 3.3) verwendet.

Aus diesen Bilddaten wurden in verschiedenen Schritten verschiedene Informationen extrahiert. Durch Texterkennung und den Texterkennungsmethoden wie Tesseract und EasyOCR wurden Beschriftungen auf den Materialien und Schutzfolien identifiziert. Durch Bildverarbeitungstechniken und unter der Verwendung von OpenCV wurden die Bilder und wesentliche Charakteristiken extrahiert. Zu diesen Charakteristiken gehörten die Formerkennung, die Vermessung der Dimensionen wie Fläche (Abbildung 27), minimalem und maximalem Feret-Durchmesser, und der Farbe der Objekte.

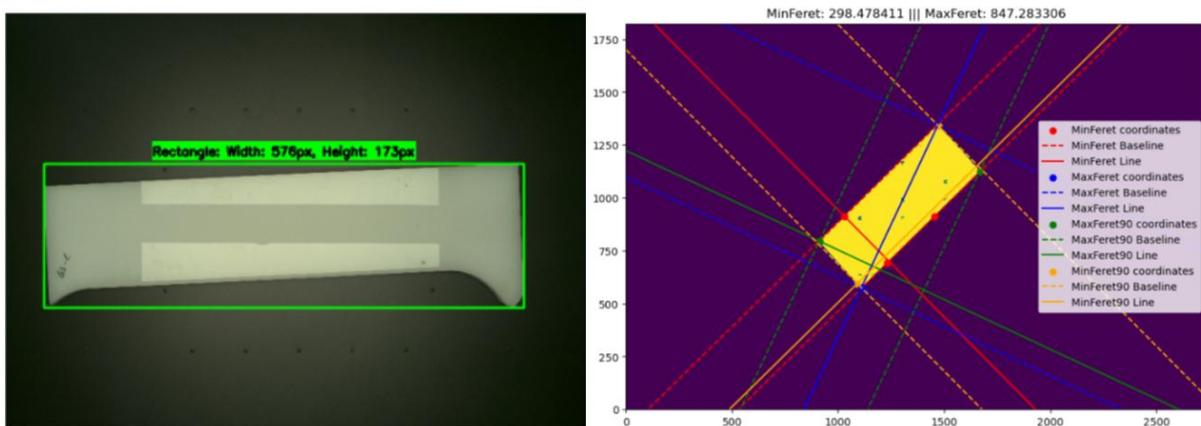


Abbildung 27: Formerkennung (links) und Auswertung der Dimensionen (rechts), (Dhibi 2024)

Während der KI-gestützten Analyse des Datensatzes traten verschiedene Probleme auf, wie beispielsweise eine unzureichende Bildauflösung, Diskrepanzen bei der Objektgröße und das Fehlen von Daten im Datensatz. Zur Lösung dieser Herausforderungen wurden Techniken zur Datenerweiterung eingesetzt und mehrere Modelliterationen getestet, um die Präzision des Systems zu optimieren. Die Entwicklung von Methoden zur Vorverarbeitung spielte dabei eine zentrale Rolle. Diese Maßnahmen umfassten die Standardisierung von Bilddaten, die sorgfältige Ausbalancierung des Datensatzes zur Kompensation von Klassenungleichgewichten sowie das Entfernen von Bildrauschen.

Die Modellwahl war eine zentrale Phase beim Aufbau dieses Systems, wobei verschiedene Modelle getestet und hinsichtlich ihrer einzigartigen Vorteile bei der Bewältigung der Komplexität unseres Datensatzes bewertet wurden. Es wurde das sogenannte Feature Engineering angewendet, um die relevantesten Attribute der Materialien zu isolieren, sodass die Modelle sich auf die Eigenschaften konzentrieren konnten, die am besten den Materialtyp und die Klassifikationsgenauigkeit vorhersagen. Vom logistischen Regressionsverfahren und Support-Vektor-Klassifikatoren bis hin zu fortschrittlichen neuronalen Netzarchitekturen zeigte jedes Modell spezifische Stärken (Abbildung 28). Durch systematisches Testen und Analysieren erwies sich Gradient Boosting als das effektivste Modell, das hohe Genauigkeit (>90%) erreichte und andere Algorithmen sowohl in Bezug auf Klassifikationspräzision als auch Verarbeitungseffizienz übertraf.

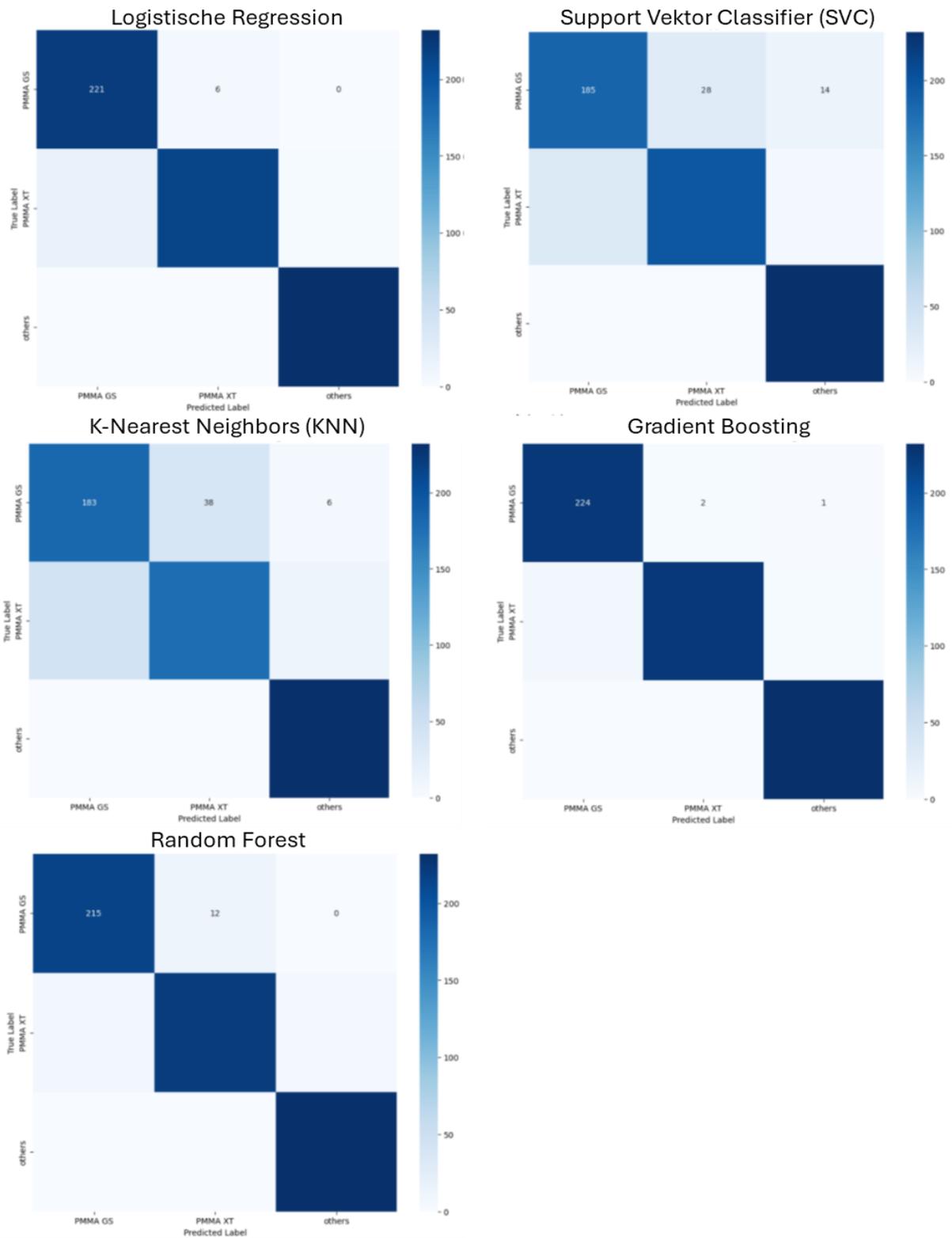


Abbildung 28: Konfusions-Matrizen für verschiedene Klassifizierungsalgorithmen (Dhibi 2024)

Die Abschlussarbeit umfasst auch die Entwicklung einer webbasierten Schnittstelle unter Verwendung von Django, welche es Benutzern ermöglicht, mit dem KI-System zu interagieren, um Identifizierungs- und Sortierungsaufgaben in Echtzeit durchzuführen (Abbildung 29). Die Integration der Klassifikationsmodelle in die Webanwendung gewährleistet eine benutzerfreundliche Gestaltung des Systems und dessen Skalierbarkeit für zukünftige Erweiterungen. Die Implementierung wesentlicher Module wie der Dateneingabeschnittstelle, der Anzeige der

Klassifikationsausgabe und des Visualisierungs-Dashboards führt zu einer Optimierung der Benutzererfahrung und einer Vereinfachung des Prozesses der Materialklassifikation. Ergänzend dazu sind ein interaktives Dashboard, eine PowerBI-Integration sowie Chatbot-Funktionalität zu nennen. Dies bildet die Grundlage für den praktischen Einsatz und die Informationsgewinnung.

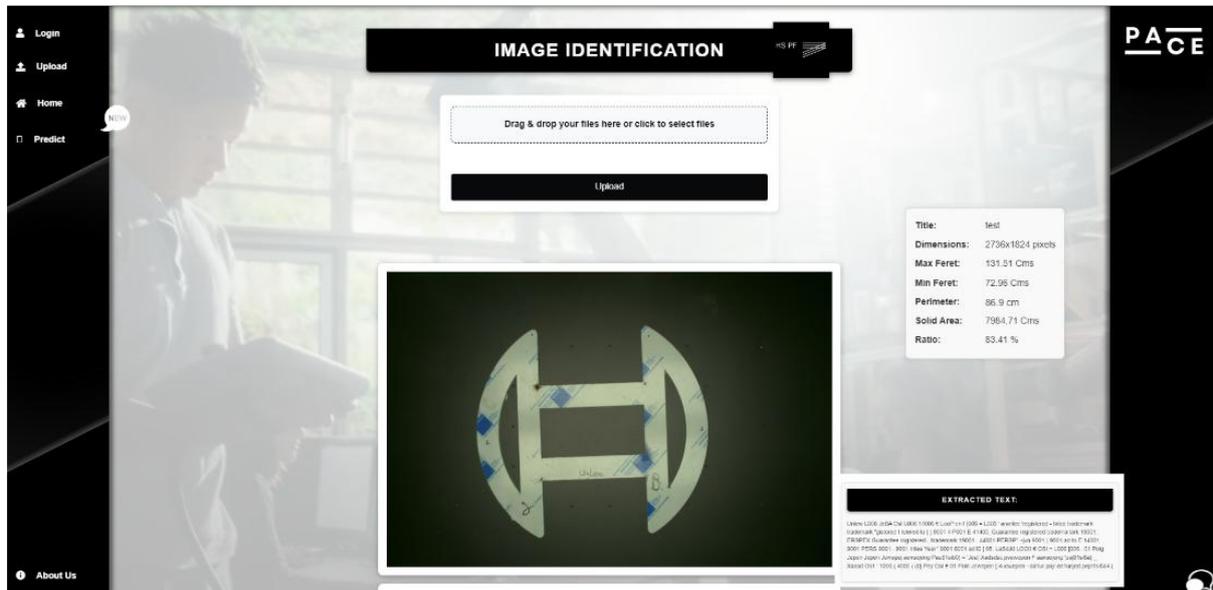


Abbildung 29: Interface für Bild- und Datenverarbeitung (Dhibi 2024)

Die Arbeit zeigt, dass sich durch den Einsatz von Objekterkennung bestimmte Sortierherausforderungen bereits lösen lassen. Es gibt dennoch Einschränkungen, welche weitere Forschung in diesem Ansatz erforderlich machen. So ist in Anbetracht der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Recyclinglandschaft eine Anpassung des Systems an neue Materialtypen, technologische Fortschritte und aktualisierte Industriestandards erforderlich. Künftige Optimierungen könnten die Erweiterung des Datensatzes beinhalten, um eine größere Anzahl von Polymertypen zu erfassen, die Anpassungsfähigkeit des Systems an unterschiedliche Materialqualitäten zu steigern und das Modell für kontinuierliche Lernfähigkeiten weiter zu verfeinern. Die Integration zusätzlicher Sensoren oder spezieller Hardware zur Optimierung der Datenerfassung sowie die Durchführung von Experimenten mit Echtzeitdatenverarbeitung könnten potenzielle Ansätze zur Steigerung der praktischen Anwendbarkeit des Systems darstellen.

3.6 Ökobilanz PMMA-Recycling [AP5]

Eine Ökobilanz zum PMMA-Recycling wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit mit dem Titel „Umweltauswirkungen bei der Nutzung und Recycling von Acrylglas“ durch Kirikai Karatopi verfasst (Karatopi 2023). In der Abschlussarbeit sollten die Umweltwirkungen verschiedener Recyclingansätze von Polymethylmethacrylat (PMMA) in Deutschland bewertet werden. Angesichts der geringen Quote des Kreislaufmaterialeinsatzes, insbesondere im Kunststoffsektor, gewinnt die Verwendung von Sekundärrohstoffen an Bedeutung. Während der überwiegende Teil des PMMA-Bedarfs auf Primärmaterial basiert, wird nur ein geringer Anteil der PMMA-Abfälle recycelt. Ziel der Arbeit war es daher, die Umweltauswirkungen von PMMA aus Neuware mit denen von PMMA mit hohem Rezyklatgehalt zu vergleichen. Dies erfolgt durch die Analyse verschiedener LCA-Datenbanken (Life Cycle Assessment) und wissenschaftlicher Quellen sowie durch die Einbeziehung von Informationen der Partner des PACE-Projekts, das auf die Verbesserung der Kreislaufführung von Acrylglas abzielt.

3.6.1 Methoden

Im Rahmen der Untersuchung der PMMA-Recyclingprozesse wurde zunächst eine umfassende systematische Literaturrecherche durchgeführt, um relevante LCA-Studien zu identifizieren. Dabei wurde die Methodik von Venkatachalam et al. (2022) angewendet, bei der eine Kombination von Schlüsselwörtern wie „LCA“, „PMMA“ und „Recycling“ in verschiedenen wissenschaftlichen Datenbanken genutzt wurde. Zu den verwendeten Datenbanken zählten Ecoinvent, Probas, SpringerLink, ScienceDirect (Elsevier), Wiley Online Library und Google Scholar. Zusätzlich wurden branchenspezifische Informationen von Plastics Europe sowie Daten aus Expertengesprächen berücksichtigt. Der PRISMA-Ansatz (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) half dabei, systematisch relevante Studien auszuwählen.

Nach der Sammlung der LCA-Daten wurden anhand von Filterkriterien insgesamt vier Studien ausgewählt, die sich besonders für die Ökobilanzanalyse von PMMA-Recyclingverfahren eignen. Diese Studien wurden detailliert hinsichtlich ihrer Methodik, geografischen Abgrenzung, funktionellen Einheit, Wirkungskategorien, Systemgrenzen und Datenqualität untersucht.

Zur Berechnung der Umweltauswirkungen wurde die Software Umberto LCA+ verwendet, unterstützt durch die Ecoinvent-Datenbank Version 3.9.1 (Stand 15.12.2022). Die Ökobilanzierung erfolgte gemäß den Vorgaben der ISO EN 14040 Norm.

Neben der Datenerhebung über LCA-Studien wurden Primärdaten durch Expertengespräche mit Herrn Pfister, Geschäftsführer der Pekutherm Kunststoffe GmbH, und Herrn Pfaff von der POLYVANTIS GmbH ermittelt. Diese Gespräche lieferten wichtige Informationen zu werkstofflichen Recyclingprozessen, insbesondere zur Aufbereitung von PMMA-Abfällen und zum Energieverbrauch bei der Zerkleinerung. Pekutherm stellte dabei Daten zur Qualität der PMMA-Abfälle und zum Stromverbrauch der Präzisionsschneidmühlen zur Verfügung, während die Gespräche mit POLYVANTIS der Validierung der Annahmen für das werkstoffliche Recycling dienten.

3.6.1.1 Zieldefinition und Untersuchungsschwerpunkte

Ziel der LCA-Untersuchung ist es, die Möglichkeiten zur Aufbereitung von Post-Industriellen und Post-Consumer PMMA-Abfällen zu Rezyklaten zu untersuchen, um eine Kreislaufwirtschaft für PMMA zu fördern. Der Fokus liegt dabei auf der Bewertung der Umweltauswirkungen zweier Recyclingmethoden: des werkstofflichen Recyclings (WR) und des chemischen Recyclings (CR) (Esmizadeh et al. 2018). Als funktionelle Einheit wird jeweils 1 kg rPMMA (rezyklathaltiges PMMA) gewählt.

Im WR werden gebrauchte PMMA-Produkte gesammelt, sortiert und zu Mahlgut verarbeitet, das anschließend weiterverarbeitet wird. Beim CR wird PMMA durch Pyrolyse depolymerisiert und in recyceltes Methylmethacrylat (rMMA) umgewandelt, das dann zur Herstellung von PMMA mit hohem Rezyklatanteil verwendet wird (Esmizadeh et al. 2018).

Im Rahmen des PACE-Projekts werden die Umweltauswirkungen dieser beiden Verfahren analysiert. Für das WR wird der Prozess der Pekutherm Kunststoffe GmbH als Modell herangezogen, die PMMA zu Mahlgut verarbeitet und in Zusammenarbeit mit der POLYVANTIS GmbH für die Coextrusion von recycelten PMMA-Platten unter dem Markennamen „PLEXIGLAS® proTerra“ verwendet. Diese Produkte bestehen zu 90% aus recyceltem PMMA und zu 10% aus Neuware (Röhm GmbH Acrylic Products 2023a). Für das CR wird angenommen, dass das PMMA vollständig aus Rezyklat hergestellt wird.

Da in der Praxis WR und CR oft miteinander kombiniert werden, wird auch eine Mischung aus beiden Prozessen untersucht. Dabei fließen 70% des PMMA in das werkstoffliche und 30% in das chemische Recycling ein (Pfister 2023). Die Untersuchung umfasst den gesamten

Recyclingprozess – von der Sammlung und Sortierung bis hin zur Aufbereitung und Verwertung – und bewertet die resultierenden Umweltauswirkungen.

Die Ergebnisse der Ökobilanz richten sich an das Industriekonsortium des PACE-Projekts, bestehend aus Pekutherm, Polysecure, POLYVANTIS und der Hochschule Pforzheim (Pfister et al. 2022). Es wurde keine externe Prüfung (critical review) durchgeführt. Ziel ist es, einen Beitrag zur Optimierung der PMMA-Kreislaufwirtschaft in Deutschland zu leisten und das werkstoffliche Verwertungspotential von PMMA-Abfällen bestmöglich zu erschließen.

3.6.1.2 Beschreibung des Produktsystems und der Abgrenzung zur Systemumgebung

Die hier betrachteten PMMA-Kreisläufe umfassen die Sammlung, Sortierung und mechanische Verarbeitung von Kunststoffabfällen, die Acrylglas enthalten, das durch WR oder CR in rPMMA umgewandelt werden soll. Eine Grundvoraussetzung für den LCA-Systemvergleich ist die Gleichwertigkeit der Nutzung. Entsprechend der Zieldefinition wurde das Recyclingverfahren für Kunststoffabfälle bei Pekutherm in Kombination mit verschiedenen Recyclingrouten unter Berücksichtigung mehrerer Szenarien bewertet:

1. Werkstofflicher Recyclingprozess (POLYVANTIS)
2. Chemischer Recyclingprozess
3. Kombination aus WR und CR (Massenverhältnis 70:30)

Das Systemfließbild in Abbildung 30 veranschaulicht den gesamten zu analysierenden Recyclingprozess innerhalb der Systemgrenze, der in zwei bzw. drei Phasen unterteilt ist: Sammlung, Sortierung und Aufbereitung (Pekutherm Kunststoffe GmbH) sowie CR und WR. Bei der Aufbereitung durch Pekutherm entstehen PMMA-Mahlgüter mit unterschiedlichen Produktqualitäten, die in Big-Bags die weiterverarbeitenden Unternehmen geliefert werden (Pfister 2023).

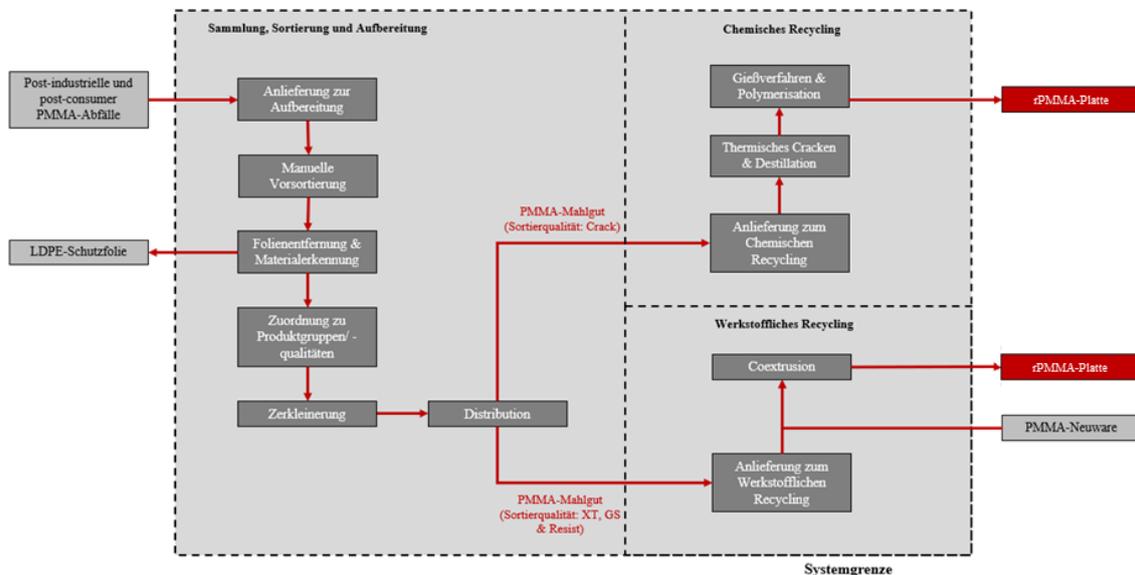


Abbildung 30: Systemgrenze des PMMA-Recyclingprozesses (Pfister 2023; Röhm GmbH Acrylic Products 2023a)

Als ersten Schritt des WR erhält der POLYVANTIS-Wareneingang Mahlgut aus PLEXIGLAS®-Reststoffen, die von Pekutherm aufbereitet wurden. In einem Coextrusionsverfahren werden daraus PLEXIGLAS® proTerra-Massivplatten hergestellt. Die Platten bestehen aus drei untrennbar miteinander verbundenen Schichten: Der Kern besteht aus Rezyklat, die zwischen zwei dünnen Deckschichten aus Neuware eingebettet ist (Röhm GmbH Acrylic Products 2023a).

Beim chemischen Recycling wird Mahlgut der Sortierqualität GS und Crack angeliefert, das dann durch thermisches Cracken bei kontrollierter Temperatur regeneriert und destilliert wird, um rPMMA zu erhalten. Dieses Zwischenprodukt wird in einem Gießverfahren zu rPMMA-Platten verarbeitet.

3.6.2 Ergebnisse der Sachbilanz

3.6.2.1 Werkstofflicher Recyclingprozess (POLYVANTIS)

Die im Folgenden dargestellte Abbildung 31 zeigt, dass das vollständig WR für PMMA die Sammlung, Sortierung und Aufbereitung bei Pekutherm umfasst, gefolgt vom WR bei POLYVANTIS. Zu den eingehenden Strömen gehören die bei Pekutherm eingehenden PMMA-Abfälle sowie die Transportleistungen und der für die Präzisionsschneidmühlen während der Zerkleinerung erforderliche Strom. Das PMMA-Mahlgut wird zu POLYVANTIS transportiert und dort zusammen mit PMMA-Neuware zu rPMMA (PLEXIGLAS® proTerra) coextrudiert. Für den Extruder wird eine Spannungsversorgung benötigt.

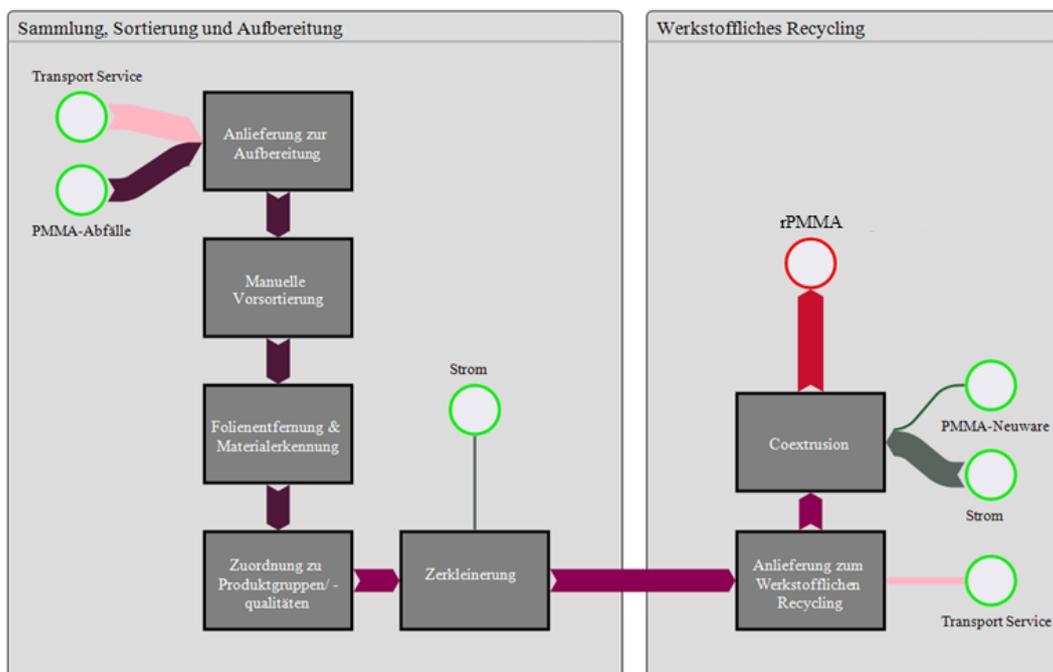


Abbildung 31: Stoffströme des WR in Umberto LCA+

In Tabelle 7 sind die Inputs für das betrachtete System zusammenfassend dargestellt. Die PLEXIGLAS® proTerra Massivplatten der Firma POLYVANTIS bestehen zu 90% aus recyceltem PMMA und zu 10% aus neuem PMMA. Pekutherm muss POLYVANTIS daher im letzten Zerkleinerungsschritt unter Vernachlässigung der Entstehung von Produktionsabfall bei POLYVANTIS für die Herstellung 900 g PMMA-Mahlgut in XT-Qualität liefern, weitere 100 g entfallen auf PMMA-Neuware, die zur Herstellung von rPMMA-Produkten verwendet wird (Röhm GmbH Acrylic Products 2023b). Da die meisten PMMA-Abfälle bei ihrer Anlieferung zur Aufbereitung noch mit einer LDPE-Schutzfolie versehen sind und diese etwa zwei Prozent der Gesamtmasse ausmacht, muss hier das zusätzliche Gewicht der im Prozessschritt Folienentfernung und Materialerkennung entfernten Folie mit eingerechnet werden. Diese fällt nicht als prozessbedingter Abfall an, sondern wird zur weiteren Verwertung verkauft. Zur Herstellung von einem Kilogramm rPMMA werden daher 918 g PMMA-Abfälle benötigt (Pfister 2023). Um die Transportleistung per LKW zu berechnen, werden in Umberto LCA+ die Menge der PMMA-Abfälle mit der Entfernung zwischen dem Standort des Händlers und der Anlieferung zum Verwerter multipliziert. Angaben von Pekutherm zufolge, legen die Post-Industrial- und Post-Consumer Abfälle bis zu ihrer Anlieferung eine durchschnittliche Entfernung

von 230 km zurück. Beim Transport des Mahlguts zum WR wird die Entfernung zwischen Pekutherm in Geisenheim und POLYVANTIS in Weiterstadt berücksichtigt, die laut Google Maps 62 km beträgt.

Der Zerkleinerungsprozess verbraucht laut Pekutherm 0,05 kW/kg Mahlgut. Nach dem Entfernen der Folie werden 900 g zerkleinert, was 0,045 kWh entspricht (Pfister 2023). Nach den getroffenen Annahmen zur Datenverfügbarkeit setzt POLYVANTIS für die Coextrusion den Doppelschneckenextruder ZSE 18 MAXX von Leistritz ein. Die Anlage hat einen Durchsatz von 40 kg/h und eine Motornennleistung von 10 kW (Leistritz Extrusionstechnik GmbH o. D.a, o. D.b). Da das technische Datenblatt keine Angaben zur Heizenergie macht, wird davon ausgegangen, dass 80% der für die Extrusion benötigten Wärme durch Reibung und Druck an der Extruderschnecke erzeugt werden. Geht man davon aus, dass die restlichen 20% zur Motorleistung der Anlage hinzukommen, wird eine Gesamtleistung von 12 kW angenommen (Ifland 2020). Daraus ergibt sich ein Stromverbrauch von 0,3 kW/kg rPMMA, das sich aus Neuware und Rezyklat zusammensetzt. Nach Rücksprache mit der POLYVANTIS GmbH verbrauchen die Extruder in der Praxis 0,4-0,5 kW/kg Mahlgut, einschließlich Belüftung, Beleuchtung und Düsen, weshalb 0,4 kW/kg rPMMA berechnet werden (Pfaff 2023).

Tabelle 7: Inputs des WR von PMMA

Input	Menge	Einheit
PMMA-Abfälle	0,918	kg
Transport Service _{gesamt}	0,267	t*km
Strom _{gesamt}	0,445	kWh
PMMA-Neuware	0,100	kg

Unter der Annahme, dass nachfolgende Prozesse wie die Formgebung der Platten durch Kalibrierung, das Aufbringen der Schutzfolie, das Schneiden und die Verpackung für alle Plattenprodukte identisch ablaufen, werden diese in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt (Röhm GmbH Acrylic Products 2013). Dies fußt in der Tatsache, dass in dieser Ausarbeitung lediglich das WR und CR fokussiert werden soll.

3.6.2.2 Chemischer Recyclingprozess

PMMA-Abfälle werden bei Pekutherm gesammelt, sortiert und verarbeitet sowie bei durch ein spezialisiertes Unternehmen im Rahmen des in Abbildung 32 dargestellten Recyclingprozesses chemisch recycelt. Die eingehenden Materialströme sind bei der Anlieferung zur Aufbereitung bei Pekutherm dieselben unter dem WR beschrieben. Das PMMA-Mahlgut in GS- und Crack-Qualität wird für die thermische Spaltung und Destillation zu rMMA in einem Batchreaktor zum weiteren CR transportiert. Für den Betrieb des Reaktors, einschließlich des Kühlkondensators, ist eine Stromversorgung erforderlich. Im Rahmen der thermischen Depolymerisation wird auch Stickstoff in den Reaktor eingeleitet, um eine inerte Atmosphäre zu schaffen. Wenn Stickstoff aus dem Gasauslass entweicht, bildet sich Lachgas (N₂O) (Gkaliou et al. 2023). Im Rahmen des Gießprozesses und der Polymerisation von rMMA zu Green Cast® rPMMA werden ein Hochgeschwindigkeitsmischer und ein Wasserbad verwendet, die beide mit elektrischer Energie betrieben werden müssen. Der im Polymerisationsprozess verwendete Initiator Azoisobuttersäurenitril (AIBN) wird in der für diese Arbeit erstellten schematische Darstellung der Massenströme in Umberto LCA+ nicht aufgenommen, da die Ecoinvent-Datenbank diesen und andere bei der Polymerisation zu PMMA verwendete Radikalbildner, einschließlich Benzoylperoxid, nicht enthält. Da AIBN in einem Verhältnis von 1:500 zu rMMA steht (Gkaliou et al. 2023), wurde es in die Berechnung einbezogen, jedoch können aufgrund des fehlenden Eintrags in Umberto LCA+ keine weiteren Aussagen zu den Umweltauswirkungen und dem Beitrag zum GWP (Global Warming Potential) gemacht werden.

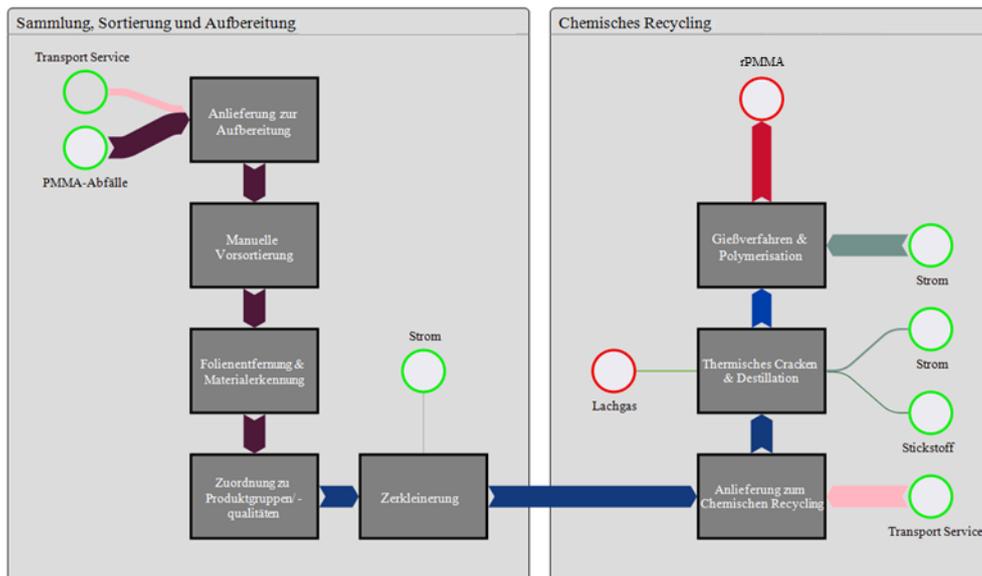


Abbildung 32: Stoffströme des CR in Umberto LCA+

Eingehende Stoffströme

Die rPMMA-Halbzeuge aus dem chemischen Recycling werden aus 99% recyceltem rMMA hergestellt, zusammen mit Katalysatoren, UV-Filtern, Antioxidantien und anderen. Aufgrund der Verwendung der Arbeit von Gkaliou et al. (2023) zur Bestimmung der beteiligten Massenströme, die sich mit recyceltem PMMA befasst, das direkt aus unverarbeitetem MMA und thermischer Depolymerisation von gemischten PMMA-Abfällen hergestellt wird, wird die EPD (Environmental Product Declaration) von Madreperla als Grundlage verwendet (Madreperla S.p.a. 2021). Folglich werden Additive und Füllstoffe nicht berücksichtigt. Zieht man den grundlegenden Prozess von Gkaliou et al. (2023) heran, so müssen für die Erzeugung von 1 kg rPMMA bei Pekutherm 1,148 kg PMMA-Abfälle (Tabelle 8) unter Berücksichtigung der Folienentfernung angeliefert werden, 1,259 kg zu Mahlgut zerkleinert und in der gewünschten Crack-Qualität zum CR ausgeliefert werden. Bei einer Menge von 1,259 kg werden für die Vermahlung 0,056 kWh elektrische Energie benötigt. Auch hier wird die Transportkapazität per LKW unter Berücksichtigung der veränderten Menge an PMMA-Abfällen berechnet. Das bedeutet, dass durch die größere Menge an angelieferten PMMA-Abfällen zur Aufbereitung der Transport Service entsprechend größer ausfällt. Dies gilt auch für die Auslieferung des PMMA-Mahlguts in GS- und Crack-Qualität zum CR. Für den Transport des Mahlguts von Pekutherm zu einem südeuropäischen Unternehmen wird eine Entfernung von etwa 700 km berücksichtigt, wohingegen die Entfernung für das WR bei POLYVANTIS nur 70 km beträgt (Pfister 2023).

Tabelle 8: Inputs des CR von PMMA

Input	Menge	Einheit
PMMA-Abfälle	1,148	kg
Transport Service _{gesamt}	1,136	t*km
Strom _{gesamt}	4,997	kWh
Stickstoff (N ₂)	0,05	kg

Gkaliou et al. (2023) untersuchten zunächst den Prozessschritt des thermischen Crackens und der Destillation durch Pyrolyse von industriellen PMMA-Abfällen bei verschiedenen Temperaturen in einem Laborreaktor. Der Laboraufbau enthielt einen elektrisch beheizten Semi-Batch-Reaktor, einen luftbetriebenen Mantelkühler, eine Kondensationsflasche, ein Baumwollzwirnfilter und einen Gasauslass. Während der Reaktor mit 70 g Probenmaterial gefüllt, verschlossen und mit

Stickstoff gespült wurde, traten die flüchtigen Gase durch das zentrale Ventil aus und wurden gekühlt. Der Pyrolysekoks und alle nichtflüchtigen Rückstände verblieben im Reaktorbehälter, während das PMMA bei etwa 160 °C schmolz. Ein Stickstoffstrom von 0,5 l/min wurde verwendet, um die Verweilzeit der flüchtigen Bestandteile im Reaktor auf etwa 25 s bis 40 s zu reduzieren. Die Pyrolyse wurde bei 350, 400, 450 und 600 °C und bei einer Heizrate von 10 K/min durchgeführt. Die Kühlluft wurde auf Raumtemperatur und der Kondensationskolben auf 5 °C gehalten. Das Material wurde gemahlen und vor der Pyrolyse mit einem Sieb mit einer Maschenweite von 8 mm gesiebt (Gkaliou et al. 2023). Ähnlich wie bei PMMA, das aus reinem Monomer hergestellt wird, wurden die rohen Pyrolyseöle durch Lösung, Emulsion und Gießen polymerisiert (Gkaliou et al. 2023). Da es sich bei Green Cast® um gegossenes Acryl handelt, wurde die Gießpolymerisation berücksichtigt.

Zur Herstellung von PMMA-Folien wurden 10 mm MMA mit 20 mg AIBN in einem Hochgeschwindigkeitsmischer 2 min bei 3500 min⁻¹ gemischt. Im zweiten Schritt wurde eine Gießpolymerisation durchgeführt, indem die Mischung in eine Aluminiumform gegossen wurde. Die Form wurde dann 5 h bei 60 °C auf eine Heizplatte gestellt, gefolgt von einer Nachhärtung bei 80 °C für 30 min. Die Form wurde dann langsam auf Raumtemperatur abgekühlt, bevor die PMMA-Platten entnommen werden konnten (Gkaliou et al. 2023). Das Verfahren in der Literatur bringt aufgrund der fehlenden Reinigung des Pyrolyseöls kein optimales Materialergebnis hervor. Die prinzipielle Vorgehensweise ist dennoch zur industriellen Anwendung nahezu identisch (Braidó et al. 2018).

Die im Laborprozess beschriebenen Informationen wurden zur Ermittlung der wesentlichen Sachbilanzparameter des CR angewendet. Aufgrund fehlender Informationen über den Energieverbrauch und den Durchsatz des Semi-Batch-Reaktors, des Kühlkondensators und der bei der Gießpolymerisation verwendeten Aluminiumform müssen externe Daten herangezogen werden, um die erforderlichen Informationen bezüglich der Massen- und Energieströme im CR ermitteln zu können.

Es wird angenommen, dass die Kunststoffpyrolyseanlage der Beston-Gruppe zum Einsatz kommt, welche eine Nennleistung von 16,65 kW hat und zwei Brenner, die eine Energie von 400.000 kcal benötigen. Während eines 17-stündigen Arbeitsprozesses (1 Arbeitstag) können 2 T Material produziert werden (Beston Group Co., Ltd. o. D.). Die Herstellung von 1 kg rPMMA dauert etwa 0,01 Stunden und benötigt 0,159 kWh elektrische Energie. Gleichzeitig werden in der Pyrolyseanlage durch die Brenner rund 0,262 kWh Energie für die Herstellung von 1 kg rPMMA benötigt. Addiert man die elektrische Energie von Pyrolyseanlage und Brenner, so ergibt sich ein Gesamtstromverbrauch von 0,421 kWh. Die Kühlluft wird auf Raumtemperatur gehalten und der Kondensationskolben in ein Bad von 5 °C gestellt. Das Kältethermostat CO-RIO CP-449F (Kühlkondensator) hat bei einer Temperatur von 5 °C eine Nennleistung von etwa 0,373 kW (JULABO GmbH o. D.a). Unter der Annahme, dass keine Verluste in der Kühlflüssigkeit auftreten, lässt sich die elektrische Arbeit aus dem Produkt der bereits errechneten Zeit von 0,01 h und der Nennleistung ermitteln und beträgt 0,004 kWh. Bei einer Heizrate von 10 K/min und einem Stickstofffluss von 0,5 l/min wird eine Stickstoffmenge von 21,25 l bzw. 0,049 kg unter Berücksichtigung des idealen Gasgesetzes benötigt.

Berücksichtigt man den während der Polymerisation zugesetzten Initiator AIBN, können 90,81 % des rMMA durch Pyrolyse gewonnen werden, was ein Verhältnis von 1:500 zu 1,02 kg ergibt. Für die Gießpolymerisation des rMMA wurde der Hausschild Engineering DAC 150 FVZ-K Hochgeschwindigkeitsmischer mit einer Nennleistung von 0,49 kW aus der Literatur verwendet, um das rMMA mit AIBN für 2 min bei maximaler Geschwindigkeit zu mischen (Hausschild Engineering 2020; Gkaliou et al. 2023). Gemäß der Formel für elektrische Energie ergibt sich für die Masse von 1,02 kg rMMA ein Stromverbrauch von 1,766 kWh. Es wird angenommen, dass das Gemisch in

einem Wasserbad mit einem Volumen von 2 l und einer Heizleistung von 0,5 kW für 5,5 h erhitzt wird, was einem Energiebedarf von 2,75 kWh entspricht (JULABO GmbH o. D.b).

Ausgehende Stoffströme

Die Tabelle 9 zeigt, dass unter Berücksichtigung des idealen Gasgesetzes sich aus der Oxidation von Stickstoff, nach Austreten aus dem Gasauslass des Pyrolysereaktor mit der Umgebungsluft 0,078 kg Lachgas ergeben. Da von gereinigtem PMMA-Abfall ausgegangen wird und Godiya et al. nachgewiesen haben, dass bei der Reinigung des PMMA keine Nebenprodukte oder Monomerückstände anfallen, wird dies vernachlässigt (Godiya et al. 2019).

Tabelle 9: Outputs des CR von PMMA

Output	Menge	Einheit
Lachgas (N ₂ O)	0,078	kg

3.6.2.3 Kombination aus WR und CR (Massenverhältnis 70:30)

Die im Folgenden aufgeführte Abbildung 33 zeigt die Kombination aus WR und CR. Aufgrund des Verhältnisses von 70:30 unterscheiden sich die ein- und ausgehenden Stoffströme von der Anlieferung zur Aufbereitung bis hin zur Anlieferung zum WR bzw. CR nur mengenmäßig, wobei 70% des aufbereiteten Mahlgutes der Sortierqualität XT und Resist, werkstofflich und 30% des Mahlgutes mit einer GS bzw. Crackqualität chemisch recycelt werden. Im Folgenden wird auf die Unterschiede zwischen den jeweiligen Verwertungswegen eingegangen.

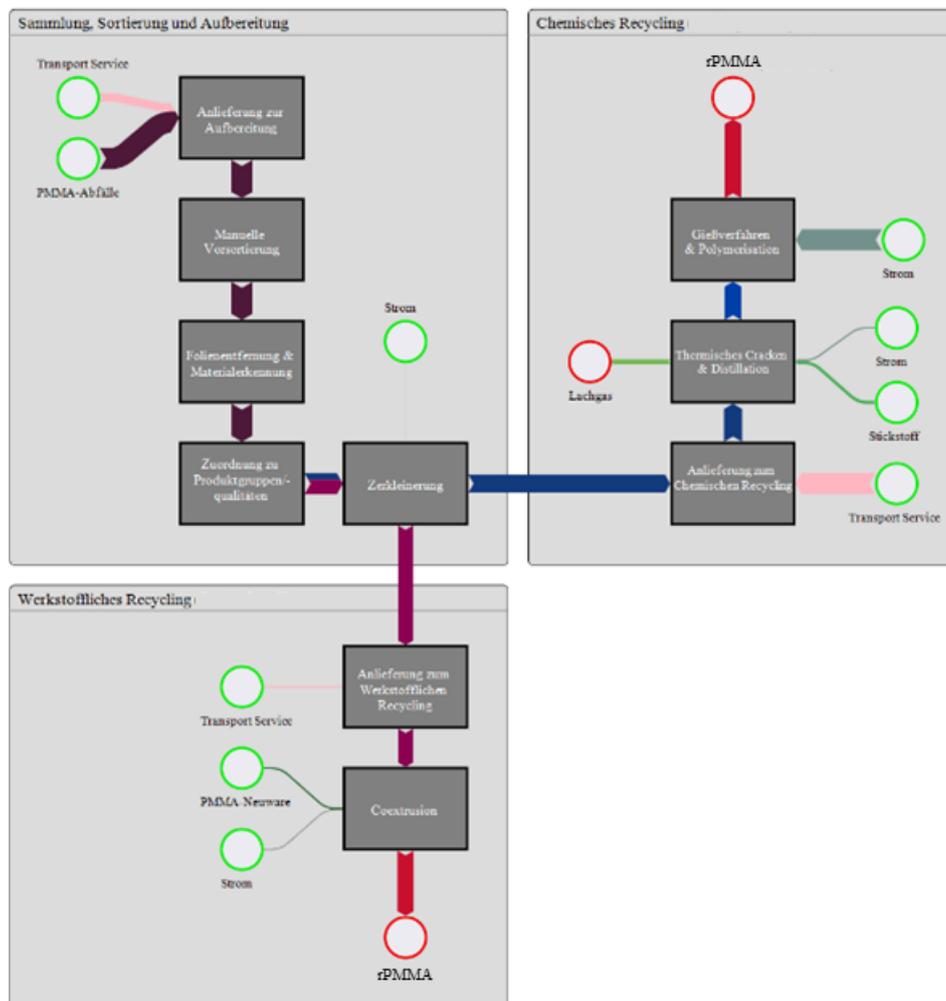


Abbildung 33: Massenströme der Kombination aus WR und CR in Umberto LCA+

Die Inputs für das betrachtete System sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Um die Menge an PMMA-Abfall zu bestimmen, die für die Herstellung von 1 kg rPMMA erforderlich ist, wurde dieses Szenario ebenfalls „rückwärts“ von den beiden Outputs bzw. rPMMA berechnet. Um insgesamt 1 kg rPMMA herzustellen, müssen 0,977 kg PMMA-Abfälle zur Aufbereitung angeliefert werden. 70% PMMA-Mahlgut mit der Sortierqualität XT und Resist werden in der Aufbereitung für das WR und weitere 30% PMMA-Mahlgut der Sortierqualität GS und Crack für das CR bereitgestellt. Zudem werden 0,074 kg PMMA-Neuware im Prozessschritt der Coextrusion im WR zugeführt. Nach Entfernen der LDPE-Schutzfolie werden 0,958 kg der PMMA-Abfälle zu Mahlgut zerkleinert, was 0,048 kWh entspricht. Von den 0,958 kg zu Mahlgut zerkleinerten PMMA-Abfällen entfallen 0,67 kg auf das WR und 0,287 kg auf das CR. Von den 0,465 Tonnenkilometer zur Verfügung stehenden Transportkapazität fallen 0,225 Tonnenkilometer auf die Anlieferung zur Aufbereitung, 0,042 Tonnenkilometer für die Anlieferung zum WR und 0,199 Tonnenkilometer für die Anlieferung zum CR. Der Gesamtstromverbrauch beträgt 3,776 kWh, wobei 3,43 kWh davon aus dem CR kommen. Beim WR kommen 0,074 kg PMMA-Neuware hinzu, um 0,745 kg rPMMA zu erhalten, die den 70% rPMMA entsprechen. Die Stickstoff- und Lachgasmenge entspricht den Werten aus dem CR.

Tabelle 10: Inputs in der Kombination des WR und CR von PMMA

Input	Menge	Einheit
PMMA-Abfälle	0,977	kg
Transport Service _{gesamt}	0,465	t*km
Strom _{gesamt}	3,776	kWh
PMMA-Neuware	0,074	kg
Stickstoff (N ₂)	0,05	kg

3.6.3 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung erfolgt anhand der emissionsbezogenen Wirkungskategorie der Klimaänderung bzw. der Verstärkung des Treibhauseffekts für den vollständig werkstofflichen und vollständig chemischen Recyclingprozess sowie für die Kombinationen aus beiden in einem Verhältnis von 70:30.

3.6.3.1 Werkstofflicher Recyclingprozess bei POLYVANTIS

Mit Hilfe der Software Umberto LCA+, die die GWP-Faktordaten aus der Ecoinvent 3.9.1 (15.12.2022) Datenbank bezieht, werden in einem Säulendiagramm der Abbildung 34 und Tabelle 11 alle Prozesse mit ihren jeweiligen CO₂e (CO₂-Äquivalente) dargestellt. Der PCF (Product Carbon Footprint) für die Herstellung von 1 kg rPMMA (PLEXIGLAS® proTerra) im WR beträgt 0,66 kg CO₂e. Aus Abbildung 34 geht hervor, dass das WR bei POLYVANTIS mit 0,606 kg CO₂e den größten Beitrag zum GWP leistet. Davon stammen bereits 0,417 kg CO₂e aus der Verwendung von PMMA-Neuware (Röhm GmbH Acrylic Products 2013, S. 4).

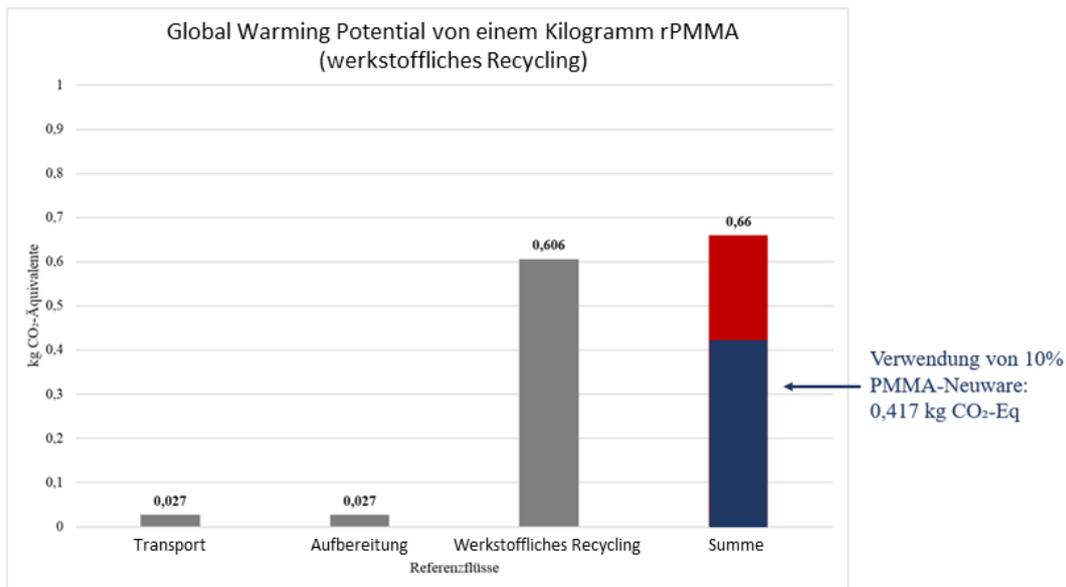


Abbildung 34: Darstellung des PCF von einem Kilogramm rPMMA im WR

Tabelle 11: GWP der beitragenden Stoffströme im WR

Beitragender Prozess bzw. Stoffstrom		Menge [kg CO ₂ e]	GWP-Anteil rPMMA [%]
Transport	Transport Service _{Aufb.}	0,021	3,18
	Transport Service _{WR}	0,006	0,91
Aufbereitung	Strom _{Zerkl.}	0,027	4,09
Werkstoffliches Recycling	PMMA-Neuware	0,417	63,18
	Strom _{Coextr.}	0,189	28,64
GWP_{gesamt}: 0,66 kg CO₂e.			

3.6.3.2 Chemischer Recyclingprozess

Das CR führt zu einem PCF-Ergebnis von 2,129 kg CO₂e für die Herstellung von 1 kg rPMMA (Abbildung 35). Das CR macht mit 2,006 kg CO₂e den größten Anteil des gesamten GWPs aus, wobei der Stromverbrauch im Gießverfahren und Polymerisation mit 85,30% am meisten zur Umweltbelastung von rPMMA beiträgt. Der Strom bzw. die elektrische Energie werden vor allem für die Kühlung und Mischung während des Gießens benötigt. Die Pyrolyseanlage mit den Prozessschritt des thermischen Crackens und Destillation verursacht etwa 7,48% des GWP (Tabelle 12).

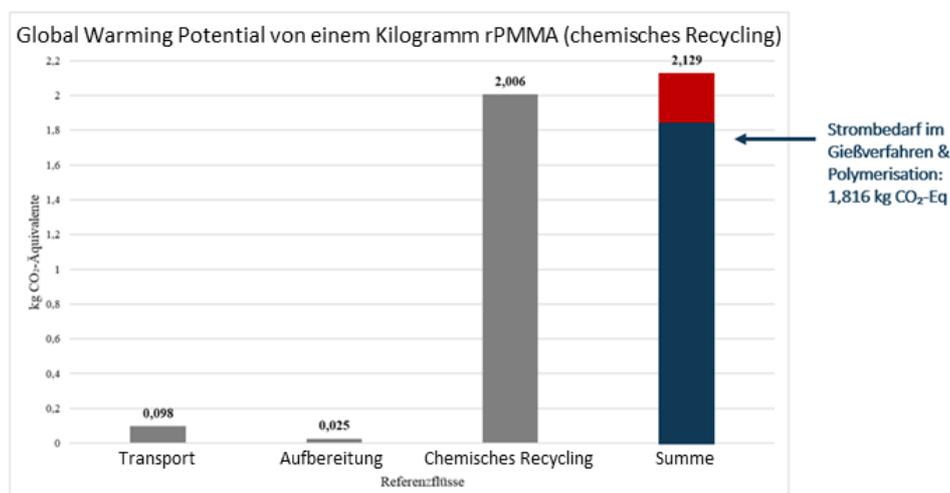


Abbildung 35: Darstellung des PCF von einem Kilogramm rPMMA im CR

Tabelle 12: GWP der beitragenden Stoffströme im CR

Beitragender Prozess bzw. Stoffstrom		Menge [kg CO ₂ e]	GWP-Anteil rPMMA [%]
Transport	Transport Service _{Aufb.}	0,025	1,17
	Transport Service _{CR}	0,073	3,43
Aufbereitung	Strom _{Zerkl.}	0,025	1,17
Chemisches Recycling	Stickstoff	0,009	0,42
	Lachgas	0,022	1,03
	Strom _{Therm. Cracken & Dest.}	0,159	7,48
	Strom _{Gießv. & Polym.}	1,816	85,30
GWP_{gesamt}: 2,129 kg CO₂e			

3.6.3.3 Kombination aus WR und CR (Massenverhältnis 70:30)

Abbildung 36 veranschaulicht das PCF-Ergebnis unter Verwendung der von Pekutherm praktizierten Kombination von WR und CR. Demnach liegt der PCF für die Herstellung von 1 kg rPMMA (70% PLEXIGLAS® proTerra und 30% Green Cast®) bei 1,148 kg CO₂e, wobei dem WR 0,449 kg CO₂e und dem CR 0,63 kg CO₂e zugeschrieben werden. Trotz der Tatsache, dass nur 30% des PMMA-Mahlguts im CR verwertet werden, macht dieses den Hauptanteil des gesamten GWP aus. Dies sind insbesondere auf den Prozessschritt des Gießverfahrens und Polymerisation zurückzuführen. Wie aus Tabelle 13 ersichtlich, stellt der Stromverbrauch zur Kühlung und Mischung von rMMA zu rPMMA mit 0,506 kg CO₂e mehr als die Hälfte des gesamten GWP dar. An zweiter Stelle steht mit 0,309 kg CO₂e und einem Anteil von 26,92% die PMMA-Neuware im Prozessschritt der Coextrusion des WR. Die Werte der einzelnen Wirkungsindikatoren weisen einen leichten Abwärtstrend auf, der auf das Verhältnis von 70% WR und 30% CR zurückzuführen ist, da im jeweiligen Prozess weniger PMMA-Mahlgut verwertet wird.

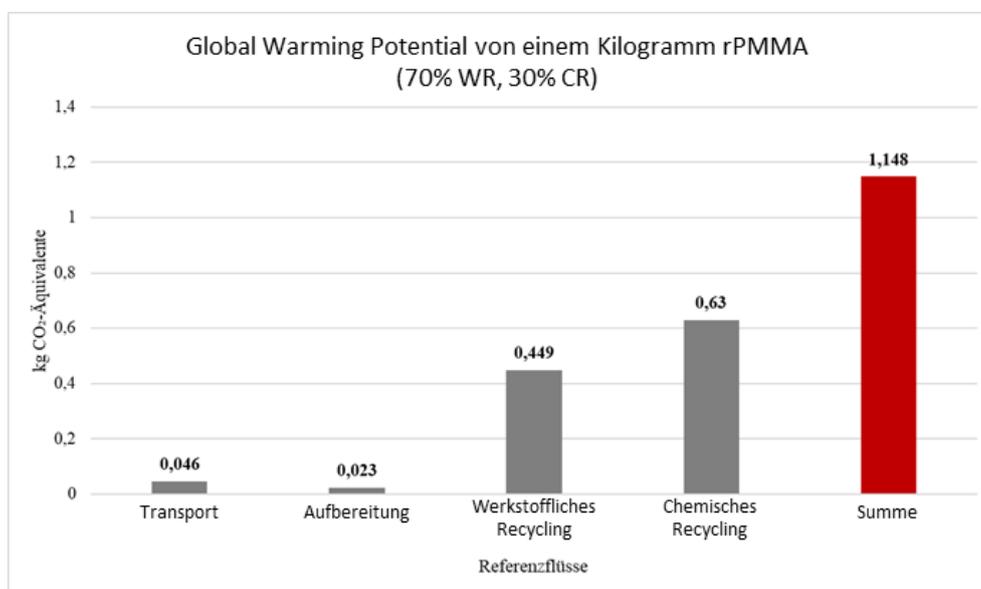


Abbildung 36: Darstellung des PCF von einem Kilogramm rPMMA (70 % WR und 30 % CR)

Tabelle 13: GWP der beitragenden Stoffströme in der Kombination aus WR und CR

Beitragender Prozess bzw. Stoffstrom		Menge [kg CO ₂ e]	GWP-Anteil rPMMA [%]
Transport	Transport Service _{Aufb.}	0,022	1,92
	Transport Service _{WR}	0,004	0,35
	Transport Service _{CR}	0,020	1,74
Aufbereitung	Strom _{Zerkl.}	0,023	2,00
Werkstoffliches Recycling	PMMA-Neuware	0,309	26,92
	Strom _{Coextr.}	0,140	12,20
Chemisches Recycling	Stickstoff	0,006	0,52
	Lachgas	0,078	6,79
	Strom _{Therm. Cracken & Dest.}	0,040	3,48
	Strom _{Gießv. & Polym.}	0,506	44,08
			GWP_{gesamt}: 1,148 kg CO₂e

3.6.4 Auswertung

Aus dem Systemvergleich der verschiedenen Kreislauflösungen von rPMMA bezogen auf das GWP der jeweiligen Recyclingroute, geht hervor, dass das WR mit 0,66 kg CO₂e das geringste GWP für die Herstellung von 1 kg rPMMA aus Post-Industrial- und Post-Consumer- PMMA-Abfällen aufweist (Abbildung 37).

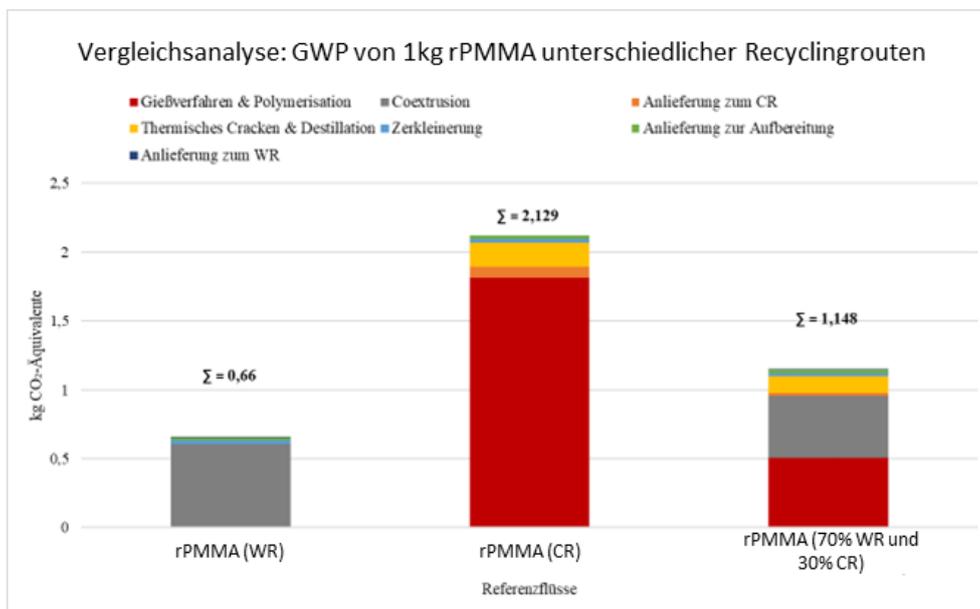


Abbildung 37: Vergleich des PCFs für ein Kilogramm rPMMA

Im Rahmen einer Signifikanzprüfung werden die ermittelten GWP-Ergebnisse für das chemische Recycling mit veröffentlichten Ergebnissen aus LCA-Studien und der EPD von Green Cast® (Madreperla S.p.a.) verglichen. Zum WR können aufgrund der in einem unzureichenden Maße vorliegenden EPD von PLEXIGLAS® proTerra sowie Literatur während der Literaturrecherche keine Aussagen getroffen werden. In der EPD von Madreperla wurden die Umweltauswirkungen für die Bezugsgröße von einem Kubikmeter Green Cast®, welches 1,19 t entspricht, untersucht. Das gesamte GWP entspricht für die gesetzte Bezugsgröße 2540 kg CO₂e. Rechnet man das Ergebnis auf 1 kg um erhält man 2,134 kg CO₂e (Madreperla S.p.a. 2021). Vergleicht man dies mit dem Ergebnis der vorliegenden Arbeit von 2,129 kg CO₂e, besteht eine Differenz von 0,005 kg CO₂e.

Aufgrund des geringen Unterschieds beider Ergebnisse, kann das ermittelte GWP von 1 kg rPMMA (CR) als schlüssig eingestuft werden.

Vergleicht man den PCF der verschiedenen Recyclingrouten für die Herstellung rPMMA mit den Ergebnissen der Literaturrecherche, lässt sich feststellen, dass die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Kreislaufführungen für PMMA ein geringeres GWP aufweisen als die Herstellung von PMMA-Neuware (Abbildung 38).

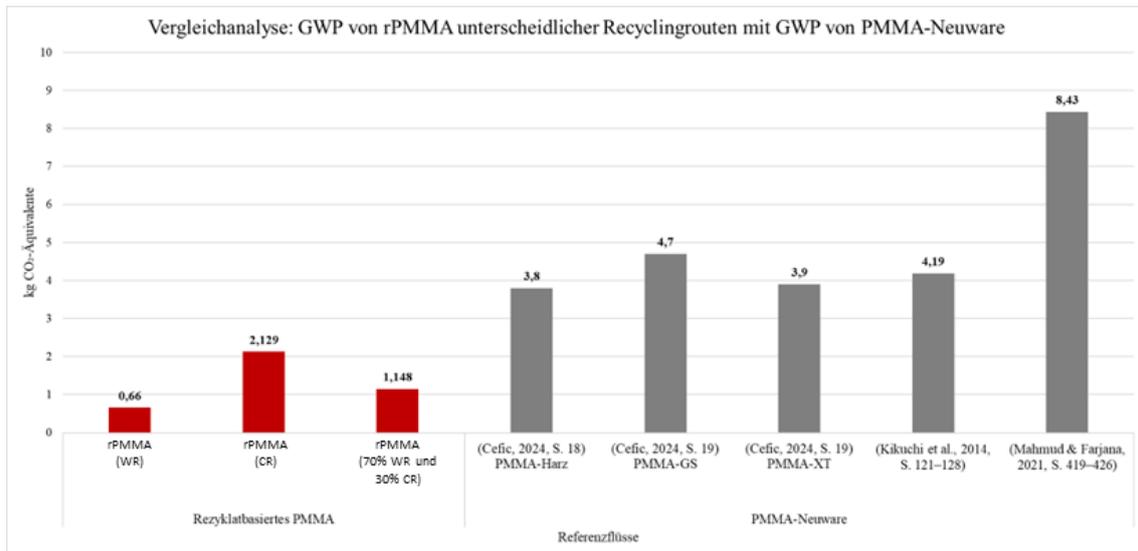


Abbildung 38: Vergleich der PCFs von rPMMA mit den PCFs von PMMA

Die für die Analyse der in dieser Studie untersuchten Verwertungsprozesse relevanten Informationen und Daten waren im Hinblick auf Vollständigkeit, Konsistenz und Datenqualität nur teilweise verfügbar. Alle relevanten Informationen in Bezug auf die Ökobilanz des Aufbereitungsprozesses von Pekutherm konnten durch Expertengespräche mit Pekutherm gesammelt und verwendet werden. Für die Herstellung von rPMMA im WR und CR gab es gewisse Einschränkungen hinsichtlich der Repräsentativität der Daten. So mussten eine Reihe an Annahmen getroffen werden, wie beispielsweise Daten für den Doppelschneckenextruder für das Coextrusionsverfahren im WR oder den Geräten in den einzelnen Prozessschritten im CR und den damit verbundenen Umweltauswirkungen. Diese fehlenden Daten wurden unter anderem mit Labor-Depolymerisation ergänzt (Gkaliou et al. 2023) oder mussten für die Prozessschritte der Pyrolyse und des chemischen Crackens angenommen werden. Insgesamt sind die Datenqualität und die Datensymmetrie befriedigend bis gut.

3.7 Entwicklung eines Gesamtkonzeptes [AP2]

3.7.1 Kombinationszenarien zum Einsatz neuer Kennzeichnungstechnologien

Die Bewertung des Einsatzes neuer Kennzeichnungstechnologien erfolgte mit Hilfe der Nutzwertanalyse. Hierfür wurde mehrere Szenarien erstellt. Die Untersuchung der Szenarien erfolgte vorrangig hinsichtlich der erwarteten Mengenverschiebungen zwischen den einzelnen PMMA-Qualitätsstufen mit dem Ziel, möglichst hochwertige Sortierqualitäten in der größtmöglichen Menge zu erzielen. Das erste Szenario bildet der Status Quo mit den Sortierqualitäten A+, A/B, und Crack, wie in Kapitel 3.3 basierend auf der Sortierstudie beschrieben.

Szenario 2 stellt die Kennzeichnung der Schutzfolie dar. Die Kennzeichnung kann dabei entweder mittels Aufdruckes oder durch einen Tracer erfolgen. Eine Veränderung der Mengenströme

bewirkt die Wahl der Kennzeichnungstechnologie in diesem Szenario nicht. Außerdem wird unterschieden, ob die Kennzeichnung einseitig auf dem PMMA (2A, 2C) oder beidseitig auf dem PMMA (2B, 2D) aufgebracht wird. Zwei weitere Szenarien differenzieren zwischen einer herstellerspezifischen Lösung (2A, 2B), am Beispiel von POLYVANTIS, und einer Branchenlösung (2C, 2D), an welcher alle Hersteller mitwirken.

Szenario 3 nutzt Tracer zur direkten Kennzeichnung der Plattenware. Hier wird angenommen, dass der Tracer im PMMA-Werkstoff enthalten ist, sodass diese trotz fehlender Schutzfolien anhand des Tracer-Signals sortiert werden können. Auch hier wird zwischen einer herstellerspezifischen Lösung (3A, 3B, 3C) und einer Branchenlösung (3D) unterschieden. Szenario 3A ist die herstellerspezifische Kennzeichnung von PMMA-XT, Szenario 3B von PMMA resist und Szenario 3C von PMMA-XT und resist, sodass hier mindestens 2 verschiedene Tracer erforderlich sind. In Szenario 3D wird ebenfalls PMMA-XT gekennzeichnet.

Damit ergeben sich insgesamt folgende Szenarien:

- Status Quo: Visuelle Bemusterung der Proben
- Szenario 1: Kennzeichnung der Folie
 - A. Herstellerspezifisch: Tracer-Einsatz in/Bedruckung auf einer Folie
 - B. Herstellerspezifisch: Tracer-Einsatz in/Bedruckung auf beiden Folien
 - C. Branchenlösung: Tracer-Einsatz in/Bedruckung auf einer Folie
 - D. Branchenlösung: Tracer-Einsatz in/Bedruckung auf beiden Folien
- Szenario 2: Tracer Einsatz im Produkt
 - A. Kennzeichnung nur XT-Produkte Polyvantis (Positivsortierung)
 - B. Kennzeichnung resist-Produkte Polyvantis (Positivsortierung)
 - C. Kombination 1 & 2 mit 2 unterschiedlichen Tracern
 - D. Branchenlösung: Positivsortierung XT-Produkte oder Negativsortierung (GS, resist, kratzfest)

Für die Erstellung der Szenarien müssen einige Annahmen getroffen werden. So lassen ca. 60% der Proben aus der Sortierstudie keine Rückschlüsse auf den Hersteller zu. Für diese Proben wurde in etwa das Marktverhältnis mit 25% POLYVANTIS und 75% andere Hersteller angenommen. Eine Einteilung in A- und B-Qualitäten kann auf Basis unseres Datensatzes nicht vorgenommen werden, da sich diese in ihrer Sortierreinheit unterscheiden. Nach Rücksprache mit Pekturm wird ein Verhältnis von 50:50 zwischen diesen Qualitäten angenommen. Für eine Nutzwertanalyse wird den einzelnen Qualitäten ein relativer Wert zugeordnet, der mit den Verkaufswert der einzelnen Qualitäten berücksichtigt:

- A+ = 1
- A = 1
- B = 0,5
- C = 0,3

Der Status quo ist in Abbildung 39 dargestellt. Etwa 13,6% sind der Qualität A+ zugeordnet, 16,7% der Qualität A/B und 65% der Qualität Crack. Der Nutzwert für den Status Quo beträgt 0,48 (Abbildung 40).

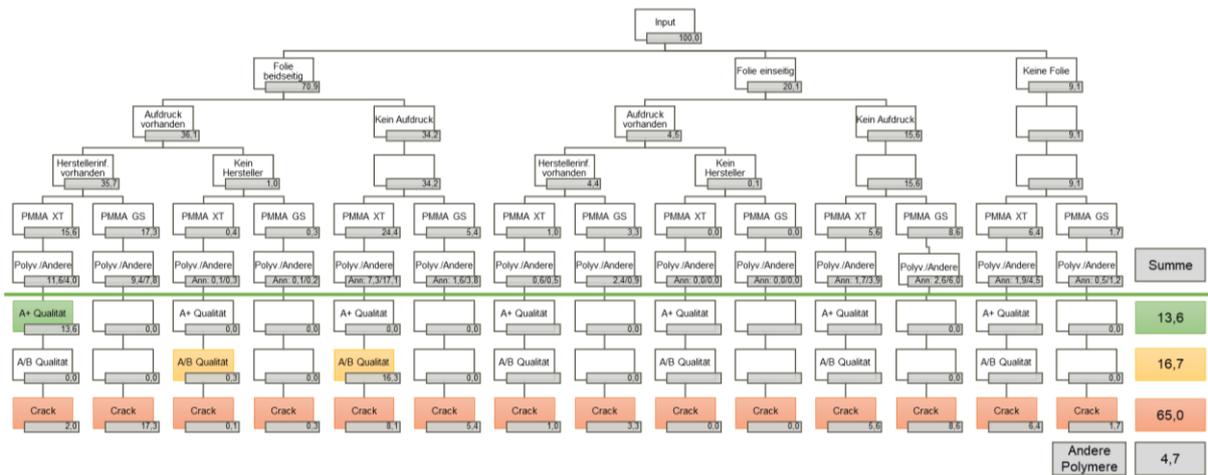
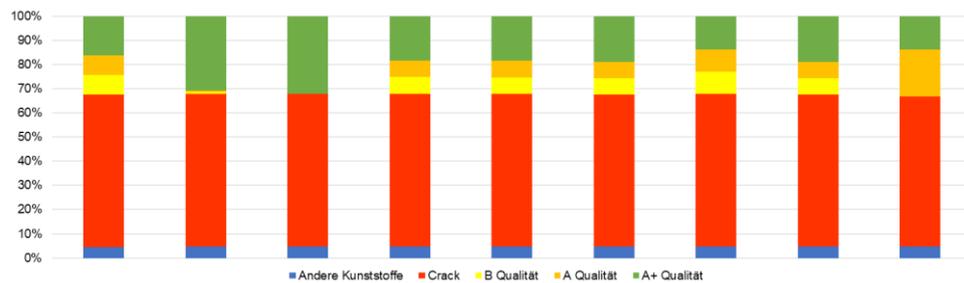


Abbildung 39: Status-Quo-Szenario

Der Vergleich der Szenarien (Abbildung 40) zeigt generell, dass bei Pekutherm bereits im Status Quo-Szenario sehr gut sortiert wird. Durch den Einsatz neuer Technologien können nur Verschiebungen im Prozentbereich erreicht werden. Durch den Einsatz von Markierungstechnologien kann jedoch sichergestellt werden, dass ein Hersteller von Halbzeugen sein eigenes Recyclingmaterial in bekannter Qualität im Recyclingprozess identifizieren und damit zurückgewinnen kann. Andere Aspekte, wie z.B. die Erhöhung des Durchsatzes, wurden hier nicht bewertet. Dies könnte jedoch den Einsatz dieser Technologien begünstigen.



	Status-Quo	Szenario 2A	Szenario 2B	Szenario 2C	Szenario 2D	Szenario 3A	Szenario 3B	Szenario 3C	Szenario 3D
Hersteller- oder Branchen-Lösung		Herstellerspez.	Szenario 2B	Branchenlösung	Szenario 2D	Branchenlösung	Herstellerspez.	Szenario 3C	Szenario 3D
Markierung von		1 Folie	2 Folien	1 Folie	2 Folien	XT	Resist	XT+Resist	XT
A+ Qualität	13,6%	30,8%	32,1%	18,3%	18,5%	18,8%	13,9%	18,8%	13,9%
A Qualität	8,4%	0,7%	0,0%	6,9%	6,8%	6,8%	9,1%	6,8%	19,3%
B Qualität	8,4%	0,7%	0,0%	6,9%	6,8%	6,8%	9,1%	6,8%	0,0%
Crack	65,0%	63,2%	63,2%	63,2%	63,2%	62,9%	63,2%	62,9%	62,1%
Andere Kunststoffe	4,7%	4,7%	4,7%	4,7%	4,7%	4,7%	4,7%	4,7%	4,7%
Polyvantis XT-Qualität									
A+ Qualität	9,9%	14,5%	14,7%	14,6%	14,7%	15,1%	10,1%	15,1%	10,1%
A/B Qualität	4,3%	0,2%		0,2%	0,0%	0,0%	4,6%	0,0%	5,0%
Crack	27,0%	26,5%	26,5%	26,5%	26,5%	26,1%	26,5%	26,1%	26,1%
Nutzwert	0,48	0,53	0,53	0,50	0,50	0,50	0,49	0,50	0,54

Abbildung 40: Nutzwertanalytischer Vergleich der Szenarien zum Einsatz neuer Kennzeichnungstechnologien

Die Analyse des Nutzwertes zeigt, dass sich dieser mit dem Einsatz der neuen Technologien in allen Szenarien im Vergleich zum Status-Quo-Szenario steigert. Am effektivsten ist der branchenweite Einsatz des Tracers für PMMA-XT, der die werkstoffliche Verwertungsquoten (A+ und A/B-Qualität) im am stärksten erhöht. Auch die herstellereinspezifische Kennzeichnung auf der Folie kann für Pekutherm einen hohen Nutzwert haben, da hier hochwertige A+ Qualitäten erzeugt werden können.

3.7.2 Business Model Canvas

Die drei Industriepartner haben basierend auf den Erkenntnissen aus dem Forschungsvorhaben und ihren aktuellen geschäftlichen Tätigkeiten ein Business Model Canvas für ihr jeweiliges Unternehmen erstellt. Diese sind in den Abbildung 41 bis Abbildung 43 dargestellt. Die Einführung neuer Technologien verändern den Kern der Tätigkeit bei den Unternehmen nicht.

Business Model Canvas		Designed for:	Designed by:	Date:	Version:
		Pekutherm GmbH	Heiko Pfister	11.12.2024	1
Key Partners	Key Activities	Value Propositions	Customer Relationships	Customer Segments	
Lieferanten, die PMMA Abfälle post-industrial oder post-consumer liefern Kunden mit spezifischen Qualitätsanforderungen (insb. Bereitstellung von herstellerepezifischen Rezyklaten)	Logistik zur Abholung von PMMA Abfällen, Bereitstellung von Sammelboxen Sortierung von PMMA, Trennen von Fremdstoffen, Herstellung sortenreiner Mahlgüter Vertrieb sortenreiner Rezyklate Key Resources Lieferanten- und Kundenstruktur Eigene Sammelbehälter und Logistik Geschulte und erfahrene Mitarbeiter System zur Erkennung von Störstoffen und der sortenreinen Sortierung Maschinen, abfallrechtlich genehmigter Standort, zertifizierter Entsorgungsbetrieb (EfbV) Große Lager- und Verarbeitungskapazitäten um eine kontinuierliche Versorgung zu gewährleisten	Bereitstellung hochwertiger PMMA Rezyklate zur Herstellung nachhaltiger Produkte Gewährleistung von Rezyklat-Reinheiten	<i>langjährige direkte Kunden- und Lieferantenbeziehung</i> <i>direkte Rückmeldungen zur Produkt-/Sammelqualität; ggf. Kundens Schulungen zur Getrennthaltung und Sammlung</i>	Kunden mit spezifischen Qualitätsanforderungen (insb. Bereitstellung von herstellerepezifischen Rezyklaten) Produzenten von PMMA-Neuware Lieferanten, die PMMA vorsortieren und frei von Fremdstoffen sammeln Rohstoff-Erzeuger, Halbzeughersteller, Großhändler, Verarbeitungsbetriebe etc. insb. von PMMA-Produkten	
Cost Structure		Revenue Streams			
Einkaufspreis von PMMA-Abfällen Mitarbeiterkosten, Standortkosten Logistik, Verpackung, Services		Hochreine PMMA-Mahlgüter Individuelle Entsorgungskonzepte Aufbau von Close-Loop-Systemen für Hersteller Lohnaufbereitung			

Designed by: The Business Model Foundry (www.businessmodelgeneration.com/canvas). Word implementation by: Neos Chronos Limited (<https://neoschronos.com>). License: CC-BY-SA 3.0

Abbildung 41: Businessmodel-Canvas des Unternehmens Pekutherm

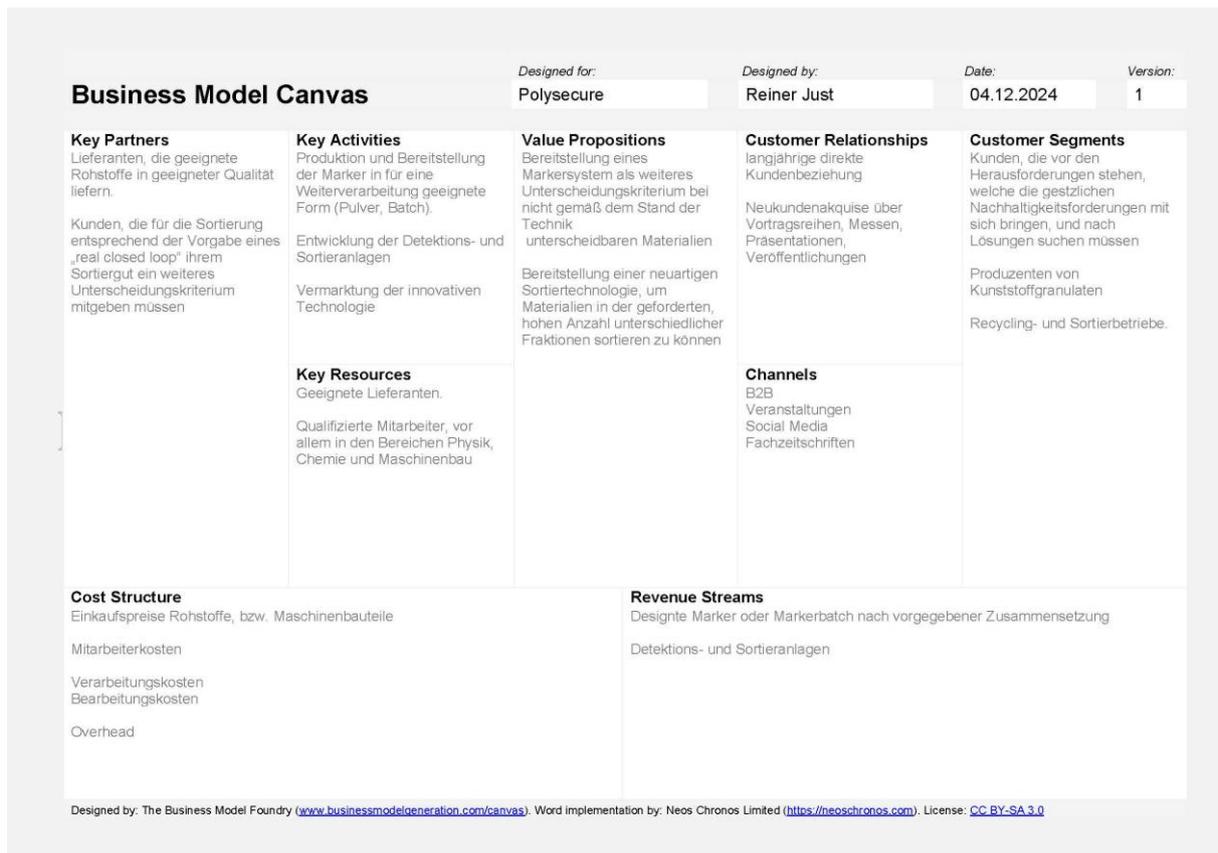


Abbildung 42: Businessmodel-Canvas des Unternehmens Polysecure

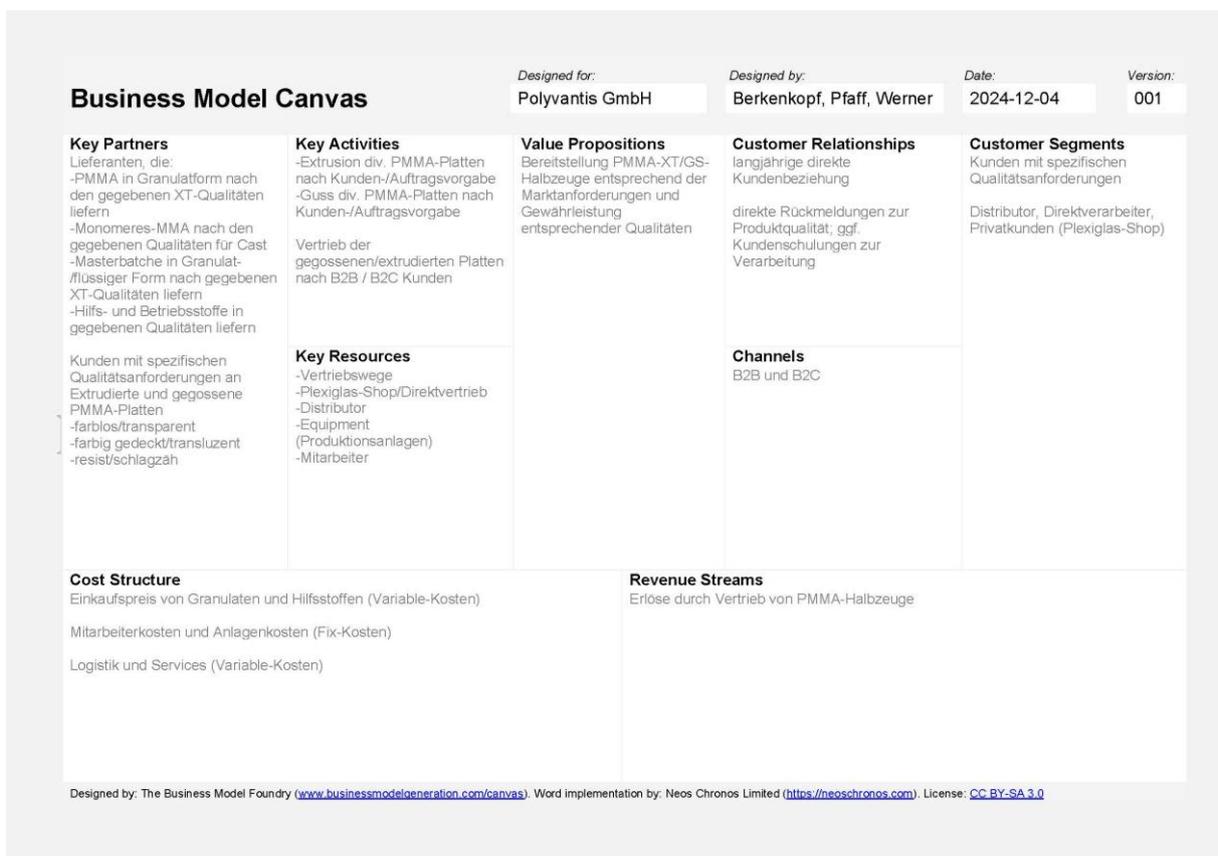


Abbildung 43: Businessmodel-Canvas des Unternehmens Polyvantis

4 Transfer und Netzwerkbildung [AP6]

Publikationen, Vorträge und andere Tätigkeiten zur Öffentlichkeitsarbeit

- Pressemitteilung vom 25.01.2023, Glasklar mit viel Luft nach oben: Industriekonsortium gewinnt Förderprojekt zur Acrylglas-Kreislaufführung, verfügbar unter: https://www.hs-pforzheim.de/news_detailansicht/news/glasklar_mit_viel_luft_nach_oben_industriekon-sortium_gewinnt_foerderprojekt_zur_acrylglas_kreislauffuehrung
- Projektwebseite: <https://www.hs-pforzheim.de/pace>
- Beitrag „Glasklar mit viel Luft nach oben“ in der Hochschulzeitschrift Konturen, 2023, S. 28-29, verfügbar unter: <https://www.hs-pforzheim.de/hochschule/oeffentlichkeit/publi-kationen/konturen>
- Vortrag „PACE-Förderprojekte – Herausforderungen und Lösungen durch SORT4CIRCLE® für den Kreislauf von Acrylglas und andere technische Kunststoffe“ beim wip-Forum Kunststoffpraxis 2023, 06. Juni 2023, Garbsen.
- Posterpräsentation und Tagungsbandbeitrag beim 13. DGAW-Wissenschaftskongress am 15.-16. Februar 2024 an der TU Wien: Auer, M.; Glaser, K.; Schmidt, J.; Woidasky, J. (2024): Was passiert mit den Hygiene-Schutzscheiben? PMMA-Stoffstromanalyse für Deutschland. In: Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V. (Hg.): 13. Wissenschaftskongress Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft. Innsbruck university press. Unter Mitarbeit von A. Bockreis, M. Faulstich, S. Flamme, M. Kranert, M. Mocker, M. Nelles et al. Technische Universität Wien, 15.-16.02.2024, S. 181–186. DOI: 10.15203/99106-120-5
- Online-Abschlussveranstaltung „PACE – PMMA in der Circular Economy“ am 10.03.2025, 13:00 bis 14:30 Uhr

Studentische Arbeiten und Abschlussarbeiten:

- Bestenreiner, O.; Kluch, D.; Meier, L.; Özdemir, B.; Simic, V. (2023): Stoffstromanalyse für den PMMA-Werkstoff. Projektarbeit der Lehrveranstaltung „Innovative Produktentwicklung“. Hochschule Pforzheim.
- Karatopi, K. (2023): Umweltauswirkungen von Acrylglas bei Nutzung und Recycling. Bachelorarbeit, Hochschule Pforzheim.
- Dhibi, M. (2024): Application of Artificial Intelligence for PMMA Sheet Identification and Classification for Recycling. Masterarbeit. Esprit Universität, Tunesien.
- Çalışkan, Ş. (2024): Evaluation of PMMA Materials. Projektbericht. Hochschule Pforzheim.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts "PMMA in der Circular Economy" wurden signifikante Fortschritte in der Entwicklung und Implementierung von Recyclingverfahren für PMMA erzielt. Die Verarbeitungs- und Detektionsversuche mit dem Tracer haben die Eignung und Robustheit der Technologie für den industriellen Einsatz bestätigt. Hierfür wurden in einem iterativen Prozess mehr als 20 verschiedene Probenchargen mit unterschiedlichen Tracer-Größen und -Konzentrationen in verschieden farbige PMMA-GS- und -XT-Platten eingearbeitet. Sowohl die mechanischen also auch die optischen Eigenschaften zeigten nach einem bis zu 1000 h andauernden Xenontest keine Spezifikationsabweichungen.

Parallel hierzu wurde die Detektionstechnik weiterentwickelt. Insbesondere die Anpassung der Laseroptiken, führten zu einer signifikanten Verbesserung der Signalstärke und ermöglichte die Detektion von Markern in Konzentrationen von unter 1 ppm. Dazu hat unter anderem die Umstellung der Flächenanregung, bei welcher sowohl Anregung als auch Detektion in der Fläche der

Platte erfolgen, zur Kantenanregung beigetragen, bei welcher die Anregung über die Schnittkante in die transparente Platte eingekoppelt wurde.

Um ein genaues Bild der zu sortierende Materialien zu erhalten, wurde in einer dreitägigen Sortierkampagne der Wareneingang von Pekutherm genaustens charakterisiert und analysiert. Hierzu wurde ein eigens konzipierter Sortierprüfstand aufgestellt, welcher neben dem Gewicht und der Dicke der Einzelproben auch ein Bildaufnahme machte. Ergänzend wurden hierzu 37 Charakteristiken erfasst, welche die Einzelobjekte über das Material, die Farbe, den Hersteller, den Alterungszustand, usw. genaustens beschreibt. So wurden insgesamt über 1000 Einzelobjekte, bzw. 600kg charakterisiert. Basierend auf diesen Daten erfolgte eine Zuordnung zu den Sortierqualitäten. Etwa 14% können der höchsten Qualitätsstufe A+ zugeordnet werden, welche sich durch sortenreines, herstellerspezifisch sortiertem PMMA-XT auszeichnet. Weitere 16% sind der Qualitätsstufe A/B zuzuordnen, also sortenreinem PMMA-XT. Die A+ und A/B-Qualitäten werden nach der Sortierung zerkleinert und werkstofflich recycelt. Rund 70% des Materialinputs werden der Crack-Qualität zugeordnet und chemisch recycelt. In dieser Fraktion sind verunreinigte, degradierte, und zu kleine Probenstücke, oder PMMA-Guss Materialien, welche aufgrund ihrer molekularen Struktur nicht werkstofflich recycelt werden können.

Ein weiteres Arbeitspaket beschäftigte sich mit der ökologischen Bilanzierung der Recyclingprozesse. Grundsätzlich ist die Verwendung von PMMA-Halbzeugen aus Rezyklat gegenüber von Neuware aus ökologischer Perspektive vorteilhafter. So werden bei der Herstellung von 1kg rPMMA-Halbzeug durch das werkstoffliche Recycling rund 0,66 kg CO₂e an Treibhausgasen verursacht, beim chemischen Recycling etwa 2,13 kg CO₂e. Im Vergleich hierzu werden bei Neuware etwa 4,28 kg CO₂e Treibhausgase verursacht. Der Umweltnutzen ist dabei umso größer, je mehr PMMA mechanisch statt chemisch aufbereitet werden kann. Dies setzt jedoch voraus, dass die PMMA-Abfallstoffe zweifelsfrei identifiziert werden können, um Rezyklatreinheit von mehr als 90% zu erzielen. Hierzu kann die Tracertechnologie in Kombination mit anderen Identifikationstechnologien wie NIR und Objekterkennung ihren Beitrag leisten.

Ein wesentlicher Erfolg war die Neugestaltung der Schutzfolie durch Polyvantis, die nun vollflächig recyclingrelevante Informationen enthält und damit die Sortierprozesse bei Pekutherm erheblich verbessert. Diese Anpassung ermöglicht es, die Qualität der recycelten Materialien zu steigern.

Auf Basis der erzielten Ergebnisse und Erfahrungen kann das Projekt als wichtiger Schritt in Richtung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft betrachtet werden. Die entwickelten Technologien bieten vielversprechende Ansätze, die einer weiteren Erforschung und Optimierung bedürfen, um ihre Anwendung auf andere Kunststoffarten und industrielle Prozesse zu erweitern. Die erfolgreichen Detektionsmethoden und die Integration von recyclingrelevanten Informationen in Produktdesigns stellen zukunftsweisende Lösungen dar, die die Effizienz und Qualität des Recyclingprozesses weiter steigern können.

Zukünftige Forschungsvorhaben könnten sich auf die branchenübergreifende Skalierung entsprechender Technologien sowie auf die Übertragung ihrer Anwendung auf andere Bereiche der Kunststoffverarbeitung konzentrieren. Die Zusammenarbeit mit weiteren Industriepartnern und Forschungseinrichtungen könnte die Innovationskraft des Projekts stärken und seine Ergebnisse auf internationaler Ebene verbreiten.

Das Projekt bildet eine solide Grundlage für den Aufbau einer nachhaltigen Recyclingindustrie, die sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile bietet. Die Erkenntnisse und Technologien aus diesem Projekt können einen Beitrag dazu leisten, die Herausforderungen des Kunststoffrecyclings zu adressieren und eine ressourcenschonende Zukunft zu gestalten.

6 Literaturverzeichnis

- Auer, M.; Glaser, K.; Schmidt, J.; Woidasky, J. (2024): Was passiert mit den Hygiene-Schutzscheiben? PMMA-Stoffstromanalyse für Deutschland. In: Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V. (Hg.): 13. Wissenschaftskongress Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft. Innsbruck university press. Unter Mitarbeit von A. Bockreis, M. Faulstich, S. Flamme, M. Kranert, M. Mocker, M. Nelles et al. Technische Universität Wien, 15.-16.02.2024, S. 181–186.
- Bestenreiner, O.; Kluch, D.; Meier, L.; Özdemir, B.; Simic, V. (2023): Stoffstromanalyse für den PMMA-Werkstoff. Projektarbeit der Lehrveranstaltung „Innovative Produktentwicklung“. Hochschule Pforzheim.
- Beston Group Co., Ltd. (o. D.): Mini-Skid-Pyrolyseanlage. Abfall-zu-Kraftstoff-Alternative. Online verfügbar unter <https://bestonmachinery.com/de/pyrolysis-plant/mini-skid-mounted/>, zuletzt geprüft am 13.12.2023.
- Braido, R.S.; Borges, L.E.P.; Pinto, J.C. (2018): Chemical recycling of crosslinked poly(methyl methacrylate) and characterization of polymers produced with the recycled monomer. In: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 132, S. 47–55.
- Breyer-Mayländer, Thomas; Zerres, Christopher; Müller, Andrea; Rahnenführer, Kai (2022): Die Corona-Transformation. Krisenmanagement und Zukunftsperspektiven in Wirtschaft, Kultur und Bildung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.) (2021): Statistik des Lärmschutzes an Bundesfernstraßen 2017 – 2018 – 2019. Online verfügbar unter https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/StB/statistik-des-laermschutzes-an-bundesfernstrassen.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 13.12.2023.
- Çalışkan, Ş. (2024): Evaluation of PMMA Materials. Projektbericht. Hochschule Pforzheim.
- Clemm, C.; Lang, K.-D. (2019): Stärkere Verankerung der Ressourceneffizienz und Abfallvermeidung in produktpolitischen Instrumenten. Texte | 18/2019. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/staerkere-verankerung-der-ressourceneffizienz>, zuletzt geprüft am 14.12.2023.
- Conversio GmbH (2022): Stoffstrombild der Kunststoffe in Deutschland 2021. Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. Mainaschaff, Germany. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/kurzfassung-stoffstrombild-kunststoffe-2019.pdf>, zuletzt geprüft am 21.03.2023.
- Deutsche Bahn AG (Hg.) (o.J.): Lärmschutz. Online verfügbar unter <https://nachhaltigkeit.deutschebahn.com/de/gruene-transformation/laermschutz>, zuletzt geprüft am 13.12.2023.
- Dhibi, M. (2024): Application of Artificial Intelligence for PMMA Sheet Identification and Classification for Recycling. Masterarbeit. Hochschule Pforzheim.
- Dubois, J.-L.; Heijden, S. (2023): Preface: the genesis of the MMAtwo project. In: D.R. D'hooge, Y.M. Marien und J.-L. Dubois (Hg.): Polymer circularity roadmap. Recycling of poly(methyl methacrylate) as a case study. Berlin, Boston: De Gruyter (De Gruyter STEM), S. 1–4.
- Esmizadeh, E.; Khalili, S.; Vahidifar, A.; Naderi, G.; Dubois, C. (2018): Waste Polymethyl Methacrylate (PMMA): Recycling and High-Yield Monomer Recovery. In: Martínez, L., Kharissova, O., Kharisov, B. (Hg.): Handbook of Ecomaterials: Springer Cham, S. 1–33.

- Gkaliou, K.; Benedini, L.; Sárossy, Z.; Dalsgaard Jensen, C.; Henriksen, U.B.; Daugaard, A.E. (2023): Recycled PMMA prepared directly from crude MMA obtained from thermal depolymerization of mixed PMMA waste. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 164, S. 191–199.
- Godiya, C.B.; Gabrielli, S.; Materazzi, S.; Pianesi, M.S.; Stefanini, N.; Marcantoni, E. (2019): Depolymerization of waste poly(methyl methacrylate) scraps and purification of depolymerized products. In: *Journal of environmental management* 231, S. 1012–1020.
- Hausschild Engineering (2020): SpeedMixer: DAC 150.1 FV / FV-K / FVZ / FVZ-K. Technische Daten. Online verfügbar unter https://cdn2.site-media.eu/images/document/3477996/DAC150.1_DE.pdf, zuletzt geprüft am 13.12.2023.
- Ifland, A. (2020): Transparenz des Plastifizierprozesses spart Energie. Wie man Energieflüsse und Scherenenergie sichtbar machen kann. Hg. v. Hüthig Medien. PLASTVERARBEITER. Online verfügbar unter <https://www.plastverarbeiter.de/markt/transparenz-des-plastifizierprozesses-spart-energie.html>, zuletzt aktualisiert am 09.01.2020, zuletzt geprüft am 17.12.2023.
- JULABO GmbH (o. D.a): CORIO CP-449F Kälte-Umwälzthermostat. Online verfügbar unter <https://www.julabo.com/de/produkte/kaeltethermostate/kaelte-umwaelzthermostate/corio-cp-449f>, zuletzt geprüft am 13.12.2023.
- JULABO GmbH (o. D.b): PURA 4 Wasserbad. für einen Arbeitstemperaturbereich von +18 °C bis +99.9 °C. Online verfügbar unter <https://www.julabo.com/de/produkte/wasserbaeder/pura-wasserbaeder/pura-4>, zuletzt geprüft am 13.12.2023.
- Karatopi, K. (2023): Umweltauswirkungen von Acrylglas bei Nutzung und Recycling. Bachelorarbeit, Hochschule Pforzheim.
- KBA (2022): Durchschnittliches Alter der Lastkraftwagen in Deutschland von 2012 bis 2022. Hg. v. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154528/umfrage/durchschnittliches-alter-der-lkw-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 14.12.2023.
- Kurth, Peter; Oexle, Anno; Faulstich, Martin (Hg.) (2018): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Leistritz Extrusionstechnik GmbH (o. D.a): Doppelschneckenextruder ZSE 18 MAXX. Hg. v. VirtualExpo Group. Direct Industry. Online verfügbar unter <https://www.directindustry.de/prod/leistritz-extrusionstechnik-gmbh/product-96283-883339.html>, zuletzt geprüft am 17.12.2023.
- Leistritz Extrusionstechnik GmbH (o. D.b): ZSE 18 MAXX. Datenblatt.
- Madreperla S.p.a. (2021): Environmental Product Declaration. Green Cast®. Hg. v. EPD International AB (S-P-03495).
- MPC Service GmbH (13.07.2022): Glasfaserausbau 2022 in Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.mpcservice.com/glasfaserausbau-2022-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 13.12.2023.
- Pfaff, T. (2023): Coextrusion bei der Röhm GmbH. Jourfixe des PACE-Projekts, 14.12.2023. Online-Gespräch via Microsoft Teams im an Industriekonsortium des PACE-Projekts.
- Pfister, H. (2023): Kunststoffrecycling bei der Pekutherm Kunststoffe GmbH, 03.11.2023. Online-Gespräch via Microsoft Teams mit an Kiriaki Karatopi.
- Pfister, H.; Just, R.; Moesslein, J.; Woidasky, J.; Pfaff, T. (2022): PMMA in der Circular Economy (Akronym: "PACE"). Vollantrag (AZ 38166/01) zur Einreichung bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt zum Förderthema 3: „Entwicklung, Gestaltung und Akzeptanz

umweltschonender Konsumgüter“ im Schwerpunkt „Innovative Konzepte zur Weiter- und Wiederverwertung von gebrauchten Materialien“.

Röhm GmbH Acrylic Products (2013): Umweltproduktdeklaration nach ISO 14021. PLEXIGLAS® Massivplatte (Kenn-Nr. 212-16).

Röhm GmbH Acrylic Products (2023a): PLEXIGLAS® proTerra. Schön. Nachhaltig. Hochwertig. (Ref.-Nr. 211-14).

Röhm GmbH Acrylic Products (2023b): Technische Informationen. PLEXIGLAS® proTerra. Coextrudiert (Kenn-Nr. 232-43).

Schmidt, J.; Auer, M.; Moesslein, J.; Wendler, P.; Wiethoff, S.; Lang-Koetz, C.; Woidasky, J. (2021): Challenges and Solutions for Plastic Packaging in a Circular Economy. In: *Chemie Ingenieur Technik* 93 (11), S. 1751–1762.

Statista Market Insights (Hg.) (2023): Haushaltsgeräte - Deutschland. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/outlook/cmo/haushaltsgeraete/deutschland>, zuletzt geprüft am 13.12.2023.

Venkatachalam, V.; Pohler, M.; Spierling, S.; Nickel, L.; Barner, L.; Endres, H.-J. (2022): Design for Recycling Strategies Based on the Life Cycle Assessment and End of Life Options of Plastics in a Circular Economy. In: *Macromolecular chemistry and physics*.

Verband der Automobilindustrie (04.01.2023): Marktdaten Deutschland. Deutscher Pkw-Markt 2022. Online verfügbar unter https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/2023/230104_PM_Deutscher-Pkw-Markt-2022_Leicht--ber-Vorjahresniveau, zuletzt geprüft am 13.12.2023.

Wirtschaftswoche (2014): Typische Lebensdauer von Autos in Deutschland nach Automarken. Hg. v. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/316498/umfrage/lebensdauer-von-autos-deutschland/>, zuletzt geprüft am 14.12.2023.

Woidasky, J.; Auer, M.; Schmidt, J.; Kusch, A.; Gasde, J.; Lang-Koetz, C. et al. (2021): „Tracer-Based-Sorting“ in der Verpackungs-Abfallwirtschaft. In: *Müll und Abfall* (7).