

Kunststoff-Zentrum in Leipzig gGmbH

**Machbarkeitsstudie zum Rezyklateinsatz bei transparenten
Kunststoffanwendungen**

Abschlussbericht über eine Machbarkeitsstudie,
gefördert unter dem AZ:39222/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Nico Reimann

Leipzig, den 20.03.2025

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
Zusammenfassung	5
Einleitung.....	6
Hauptteil	9
AP 1: Aktualisierung der Literatur- und Patentrecherche und Abstimmung der Projektdetails mit dem projektbegleitenden Ausschuss	9
AP 2: Entwicklung und Umsetzung einer optisch relevanten Formteilgeometrie.....	11
AP 3: Generierung der Rezyklate und Herstellung der zu verarbeitenden Neuware-Mahlgut-Abmischungen.....	14
AP 4: Werkzeugabmusterung, Referenzprobenherstellung und optische Beurteilung.....	18
AP 5: Herstellung von Formteilen mit gestufter Rezyklatzugabe und Mehrfachrezyklatanteil.....	19
AP 6: Messtechnische Erfassung der Kennwerte und Vergleich mit Referenzwerten.....	20
AP 7: Generierung eines Modells zur Vorhersage der Formteilqualität mit STASA QC	32
Verbreitung der Projektergebnisse	35
Fazit.....	37
Literaturverzeichnis.....	38

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Reduzierung des CO ₂ -Fußabdrucks durch Zugabe von Rezyklat.....	6
Abbildung 2: Entwicklung eines Modells zur Vorhersage der Qualitätsmerkmale und der anwendbaren Produktkategorie in Abhängigkeit des Rezyklatanteils.....	8
Abbildung 3: Umfrageergebnisse zur Verwendung von transparenten Kunststoffen in der optischen Industrie	10
Abbildung 4: Umfrageergebnisse zur Verwendung von mechanischen Rezyklat in der optischen Industrie	10
Abbildung 5: Umfrageergebnisse zu den Ansprüchen an die optischen Eigenschaften.....	11
Abbildung 6: mittels CAD konstruiertes Formteil mit unterschiedlichen Wandstärken und konkav/konvexer Struktur.....	12
Abbildung 7: Bei Moldex3D dargestelltes Spritzgussformteil mit dazugehörigen Temperierbohrungen (blau)	12
Abbildung 8: simulativer Formfüllverlauf des Spritzgussformteils.....	13
Abbildung 9: Füllsimulation des Formteils mit Auswertung des Brechungsindex.....	13
Abbildung 10: hergestellter und verbauter Werkzeugeinsatz.....	14
Abbildung 11: Hergestellte Spritzgussplatten für das anschließende Recycling.....	14
Abbildung 12: Verwendete Schneidmühle zur Mahlgutgenerierung.....	15
Abbildung 13: Ergebnisse der IR-Untersuchungen von PMMA.....	15
Abbildung 14: Ergebnisse der DSC-Messungen von PMMA.....	16
Abbildung 15: Darstellung einer MVR-Messung.....	17
Abbildung 16: Resultierende Eigenspannungen.....	18
Abbildung 17: Sichtbare Einfallstelle und Lunker im Angussverteilerbereich.....	19
Abbildung 18: Spritzgegossenes Projektformteil.....	20
Abbildung 19: Haze-Messergebnisse für PMMA – 1x recycelt.....	21
Abbildung 20: Haze-Messergebnisse für PMMA – 2x recycelt.....	21
Abbildung 21: Haze-Messergebnisse für PMMA – 3x recycelt.....	22
Abbildung 22: Haze-Messergebnisse für PC – 1x recycelt.....	22
Abbildung 23: Haze-Messergebnisse für PC – 2x recycelt.....	23
Abbildung 24: Haze-Messergebnisse für PC – 3x recycelt.....	23
Abbildung 25: Haze-Messergebnisse für PS – 1x recycelt.....	23
Abbildung 26: Haze-Messergebnisse für PS – 2x recycelt.....	24
Abbildung 27: Haze-Messergebnisse für PS – 3x recycelt.....	24
Abbildung 28: Transmission-Messergebnisse für PMMA – 1x recycelt.....	24
Abbildung 29: Transmission-Messergebnisse für PMMA – 2x recycelt.....	25
Abbildung 30: Transmission-Messergebnisse für PMMA – 3x recycelt.....	25
Abbildung 31: Transmission-Messergebnisse für PC – 1x recycelt.....	25
Abbildung 32: Transmission-Messergebnisse für PC – 2x recycelt.....	26
Abbildung 33: Transmission-Messergebnisse für PC – 3x recycelt.....	26
Abbildung 34: Transmission-Messergebnisse für PS – 1x recycelt.....	26
Abbildung 35: Transmission-Messergebnisse für PS – 2x recycelt.....	27
Abbildung 36: Transmission-Messergebnisse für PS – 3x recycelt.....	27
Abbildung 37: Gelbwert-Messergebnisse für PMMA – 1x recycelt.....	28
Abbildung 38: Gelbwert-Messergebnisse für PMMA – 2x recycelt.....	28
Abbildung 39: Gelbwert-Messergebnisse für PMMA – 3x recycelt.....	29
Abbildung 40: Gelbwert-Messergebnisse für PC – 1x recycelt.....	29
Abbildung 41: Gelbwert-Messergebnisse für PC – 2x recycelt.....	29
Abbildung 42: Gelbwert-Messergebnisse für PC – 3x recycelt.....	30
Abbildung 43: Gelbwert-Messergebnisse für PS – 1x recycelt.....	30
Abbildung 44: Gelbwert-Messergebnisse für PS – 2x recycelt.....	30
Abbildung 45: Gelbwert-Messergebnisse für PS – 3x recycelt.....	31

Abbildung 46: UVC Gelbwert-Messergebnisse für PMMA – 3x recycelt	31
Abbildung 47: UVC Gelbwert-Messergebnisse für PC – 3x recycelt	32
Abbildung 48: UVC Gelbwert-Messergebnisse für PS – 3x recycelt	32
Abbildung 49: STASA QC Qualitätsdaten-Modell	33
Abbildung 50: Einfluss der Maschineneinstellgrößen auf die optischen Eigenschaften im Spritzgießzyklus für PMMA.....	34
Abbildung 51: Empfohlene Maschineneinstellgrößen für PMMA für ein ausgewähltes Beispiel.....	34
Abbildung 52: Einfluss der Maschineneinstellgrößen auf die optischen Eigenschaften im Spritzgießzyklus für PC.....	34
Abbildung 53: Einfluss der Maschineneinstellgrößen auf die optischen Eigenschaften im Spritzgießzyklus für PS	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse der MVR-Messungen von Neuware und Rezyklat von PMMA, PC und PS.....	17
Tabelle 2: Trocknungsparameter von PMMA, PC und PS.....	18
Tabelle 3: Übersicht über die im Projekt verwendeten Prüfmethode und Prüfparameter	28

Zusammenfassung

Im vorliegenden Abschlussbericht wurde die Verwendung von mechanisch recyceltem PIR (Post-Industrial-Rezyklat)-Material für transparente Kunststoffbauteile untersucht. Hierbei wurden die Materialien Polymethylmethacrylat (PMMA), Polycarbonat (PC) und Polystyrol (PS) analysiert. Grundlage für das Forschungsvorhaben sind Vorbehalte und enge Richtlinien der kunststoffverarbeitenden Industrie, welche die Nutzung transparenter Rezyklate im optischen Bereich sehr stark einschränken. Die Bereitschaft zur Verwendung eines solchen Rezyklates wurde durch eine durchgeführte Marktumfrage belegt. Daraufhin wurde ein spritzgusstechnisches Formteil unterstützend durch eine Spritzgussimulation konstruiert und das dazugehörige Spritzgusswerkzeug gefertigt. Das Formteil verfügt über konkave/konvexe Strukturen und verschiedene Wandstärken, welche die Beurteilung verschiedener optischer Eigenschaften ermöglichte. Infolgedessen fanden Abmusterungsversuche statt, um die Herstellbarkeit des Formteils zu überprüfen. Dies beinhaltete eine nachträgliche Bearbeitung des Spritzgusswerkzeuges. Dabei wurde die Breite des Filmschnittes vergrößert, was die Formfüllung verbesserte. Anschließend wurden die notwendigen Rezyklatmengen hergestellt und prüftechnische Vergleichsversuche von Neuware und Rezyklat durchgeführt. Die Erkenntnisse aus IR-Analysen, DSC-Messungen und MVR-Untersuchungen belegen, dass keine Verunreinigung des PIR-Materials festzustellen war. Die Fließfähigkeit nahm im Vergleich zur Neuware allerdings zu. Anschließend wurden die Prüfkörper mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen von Neuware zu Rezyklat und unterschiedlichen Recyclingdurchläufen spritzgegossen. Abhängig davon wurden jeweils die Spritzgussparameter (Verarbeitungstemperatur, Staudruck) angepasst. Auffällig war, dass es bei PS Probleme beim Materialeinzug bereits bei geringen Rezyklatmengen und eine sichtbare gelbliche Verfärbung der Prüfkörper gab. Im Anschluss fanden die messtechnischen Untersuchungen statt. Hierbei wurden der Haze-Wert, die Transmission und der Gelbwert ermittelt. Zusammenfassend stellte sich heraus, dass das Rezyklat von PMMA bei Wandstärken bis zu 2 mm zu einem Anteil von 30 % verwendet werden kann. Bei Wandstärken > 2 mm speziell in Abhängigkeit des Gelbwertes bis zu 20 %. Für PC lagen die Haze-Werte für alle Mischungsverhältnisse und Anzahl der Recyclingdurchläufe im zulässigen Bereich. Jedoch verschlechterten sich die Transmissionswerte ab einer Wandstärke von 4 mm deutlich. Hinsichtlich des Gelbwertes sollte maximal 10 % Rezyklat verwendet werden. Wichtig ist die Tatsache, dass künftig die Unternehmen entscheiden müssen bis zu welcher Gelbwertgrenze sie Rezyklat verwenden dürfen. Somit wären auch höhere Rezyklatmengen bei PC möglich. Bei PS stellte sich heraus, dass eine Verwendung von mechanischem Rezyklat nicht zu empfehlen ist, da sich die Haze- und Transmissionswerte bereits bei sehr geringen Rezyklatanteilen oberhalb der Maximalgrenze befanden. Diese Erkenntnis wird durch sehr hohe Gelbwerte bestärkt, welche ein Indiz für eine Degradation des Kunststoffes darstellt. Die Software STASA QC wurde verwendet, um die Abhängigkeit der optischen Eigenschaften von den gewählten Maschineneingangsgrößen (Wandstärke, Rezyklatanteil, Anzahl der Recyclingdurchläufe) prägnant sichtbar zu machen. Demnach haben die Wandstärke und der Rezyklatanteil den größten Einfluss auf die optischen Eigenschaften. Somit könnten, mit Ausnahme von PS, fortführende Versuche mit höheren Recyclingdurchläufen stattfinden, um die Grenzwerte für PMMA und PC zu finden. Dahingehend kann die CO₂-Einsparung noch deutlich erhöht werden.

Im Laufe des Projektes fand ein regelmäßiger Ausschuss mit dem projektbegleitenden Ausschuss statt. Hiervon haben bereits zwei Unternehmen ihre Bereitschaft geäußert, aufgrund der positiven Forschungsergebnisse, Folgeuntersuchungen in Kooperation mit dem KUZ für PMMA durchzuführen. Hierbei soll sowohl der Rezyklatanteil erhöht, als auch die Verarbeitungsparameter optimiert werden. Fortführend fand ein Austausch mit einem weiteren Produzenten höherwertiger transparenter Kunststoffe statt, um für dieses Material die zulässige Rezyklatmenge in Abhängigkeit optischer Eigenschaften zu ermitteln.

Einleitung

Ausgangssituation

Der Klimawandel stellt eine der zentralen Herausforderungen unserer Zeit dar und erfordert umfassende Maßnahmen auf allen gesellschaftlichen Ebenen. Gesetzgeberische Initiativen setzen dabei gezielt Rahmenbedingungen, um Ressourceneffizienz nachhaltig im gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Handeln zu verankern. Für die Industrie bedeutet dies eine beschleunigte Transformation hin zu nachhaltigen Produktions- und Verarbeitungsprozessen.

Im Bereich der Kunststoffindustrie ist eine deutliche Erhöhung der derzeit in Deutschland bei 30 % liegenden Recyclingquote erforderlich. Allerdings bestehen spezifische Herausforderungen beim werkstofflichen Recycling von Kunststoffen, insbesondere bei der Herstellung technischer und transparenter Bauteile. Im Gegensatz zum etablierten Recycling von PET-Flaschen sind Vorbehalte gegenüber dem Einsatz von Rezyklaten in diesen Bereichen weit verbreitet [1,2]. Diese Vorbehalte resultieren vor allem aus Unsicherheiten hinsichtlich der Materialeigenschaften von Rezyklaten sowie aus rechtlichen Bedenken, beispielsweise in Bezug auf die Produzentenhaftung. Die Praxis zeigt, dass aus Sicherheitsgründen oftmals der Einsatz von Neuware pauschal bevorzugt wird, wodurch aktuelle Anforderungen an Ökodesign und Ressourcenschonung nicht erfüllt werden [3].

Ökologische Potenziale des Rezyklateinsatzes

Mit dem Fokus auf die Herstellung transparenter Formteile durch Spritzgießen fehlen systematische Untersuchungen zur Beurteilung der Machbarkeit und Umsetzbarkeit des Rezyklateinsatzes in transparenten Anwendungen. Welche Zugabemengen an Rezyklat zu den transparenten Kunststoffen PS, PC, PMMA sind tolerierbar? Welche Risiken und Unsicherheiten sind damit verbunden? Diese Fragen sind bisher häufig unbeantwortet. Es bedarf des Nachweises, inwieweit die optischen Eigenschaften der Formteile wie deren Transparenz, Klarheit (definiert über den Haze-Wert) und Gelbwert durch definierte Rezyklatzugaben verändert werden und ab welcher Zugabemenge eine nicht tolerierbare Verschlechterung der Produkteigenschaften eintritt.

Durch die Verwendung von Rezyklaten wird die CO₂-Bilanz deutlich verbessert, wie das Beispiel von PC und PS – siehe Abbildung 1 – zeigt: Durch die Zugabe von 10% typenreinen Rezyklat bei PC wird eine Reduktion des Fußabdrucks von 5,15 auf 4,71 kg CO₂e/kg, bei PS von 3,65 auf 3,35 kg CO₂e/kg erreicht.

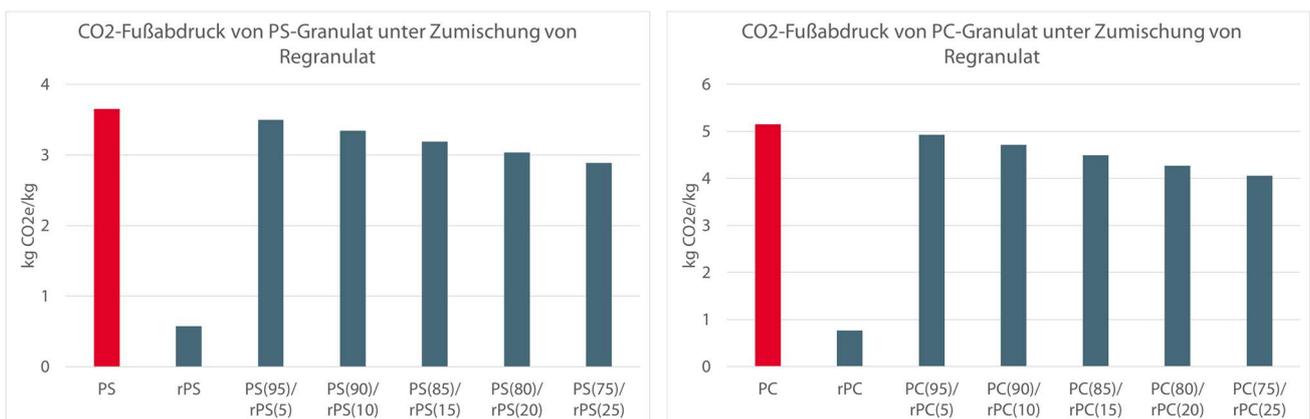


Abbildung 1: Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks durch Zugabe von Rezyklat

Diese Zahlen beziehen sich auf die angenommene Zugabemenge von 10% Rezyklat. Abbildung 1 zeigt das steigende Potential zur Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks bei höherer Zugabe von Rezyklat auf. Eine mögliche und zulässige Maximierung im Sinne der Ressourceneffizienz ist anzustreben. Nutzt man diesen Hebel bei der Herstelltechnologie des Spritzgießens, die immer mit sehr hohen Stückzahlen einhergeht, wird der positive Effekt vervielfacht.

Zielsetzung des Projekts

Das Ziel der Forschungsarbeit besteht darin, den Einfluss der prozentualen Zugabe von typenreinem Rezyklat auf die optischen Eigenschaften von transparenten Formteilen zu untersuchen und verallgemeinerungsfähige Schlussfolgerungen in Form von Handlungsempfehlungen für die Industrie abzuleiten. Dabei gilt es, die Zusammenhänge in zwei Stufen zu untersuchen und zu beschreiben:

1. Beeinflussung der Materialeigenschaften durch unterschiedliche Mengen und Arten von Rezyklatzugaben
2. Beeinflussung der optischen Eigenschaften von transparenten Anwendungen in Abhängigkeit der durch Rezyklatzugabe veränderten Materialeigenschaften

Da es vielfältige transparente Anwendungen gibt und im Rahmen dieser ersten Machbarkeitsstudie auch verschiedene Anwendungsgebiete für den Rezyklateinsatz beschrieben werden sollen, wird der Zusammenhang zunächst für eine transparente Prinzipgeometrie dargestellt. Im Ergebnis des Projektes soll abgeleitet werden können, ob und bis zu welchem Prozentsatz transparentes Rezyklat bei unterschiedlichen transparenten Formteilen verwendet werden kann.

Der innovative Anspruch des Projektes besteht darin nachzuweisen, dass definierte typenreine Rezyklatzugaben auch bei transparenten Anwendungen möglich sind und über Qualitätsklassen bzw. Anforderungskategorien eine Zuordnung zu realen Produktgruppen möglich wird. Die im Projekt avisierten Machbarkeitsstudien unter Verwendung von drei ausgewählten transparenten Kunststoffen für die Herstellung von flächigen Mustergeometrien tragen Modellcharakter.

Mit Erreichung der Projektzielstellung dieser Machbarkeitsstudie und positiven Ergebnissen zur möglichen Steigerung des Rezyklateinsatzes sind die Voraussetzungen für

- die Untersuchung weiterer transparenter Kunststofftypen,
- die Erweiterung der geometrischen Ansprüche an das Formteil,
- die Hinzunahme weiterer und/oder anspruchsvoller transparenter Anwendungen und
- weiterführende Optimierungen zur Erhöhung des Rezyklateinsatzes

gegeben. Die Machbarkeitsstudie ermöglicht somit die gezielte Weichenstellung für weitere Forschungsprojekte.

Aufgabenstellung

Wesentliche Forschungsaufgaben umfassen:

- Welche Anteile an Rezyklat können in den transparenten Kunststoffen PS, PC, PMMA eingesetzt werden, ohne die Materialeigenschaften unzulässig zu beeinträchtigen?
- Welche optischen und mechanischen Eigenschaften, beispielsweise Transparenz, Klarheit (Haze-Wert), Farbveränderungen (Gelbwert) werden durch Rezyklate beeinflusst?
- Ab welcher Rezyklatmenge treten signifikante Verschlechterungen der Produkteigenschaften auf?

Ohne belastbare Daten bleiben pauschale Urteile und Unsicherheiten ein Hindernis für die Akzeptanz des Rezyklateinsatzes, insbesondere bei der Entwicklung und Herstellung transparenter Formteile

Um die genannten Ziele zu erreichen, wird im Projekt folgende Vorgehensweise gewählt:

- (1) Entwicklung einer für optische Anforderungen repräsentativen Formteilgeometrie als Voraussetzung für eine qualitativ hochwertige Bewertung hinsichtlich Transparenz, Klarheit (Haze-Wert) und Gelbeffekt
- (2) Generierung der notwendigen Rezyklatmengen der zu untersuchenden repräsentativen Kunststofftypen, so dass thermische Schädigungen und Verunreinigungen des Mahlgutes ausgeschlossen werden

- (3) Auswahl der Messverfahren und Entwicklung einer geeigneten Messmethodik zur hinreichenden Beurteilung der optischen Eigenschaften unter Berücksichtigung von Abbruchkriterien
- (4) Entwicklung von Modellen, die die linearen und gegebenenfalls nicht linearen Abhängigkeiten zwischen dem verwendeten Rezyklatanteil, den daraus resultierenden Materialeigenschaften und den geforderten optischen Anforderungen widerspiegeln (siehe Abbildung 2, in Arbeitspaket 7 werden die Eingangsgrößen, Qualitätsmerkmale und Produktkategorien dahingehend aufgezählt)

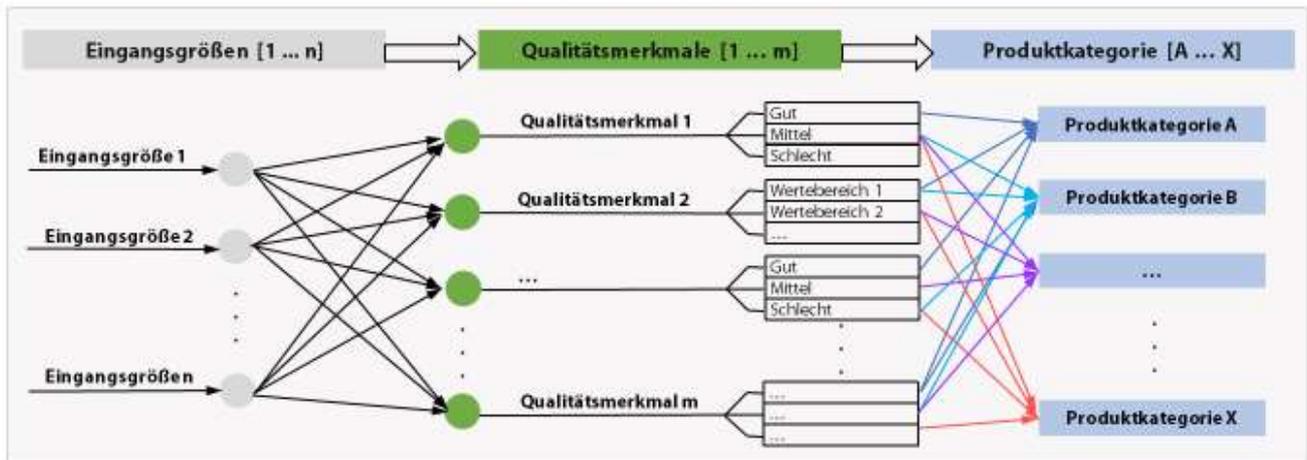


Abbildung 2: Entwicklung eines Modells zur Vorhersage der Qualitätsmerkmale und der anwendbaren Produktkategorie in Abhängigkeit des Rezyklatanteils

Die Bearbeitung, Auswertung und Zusammenfassung dieser Teilziele erfolgt in zwei Phasen: Die erste endet mit Meilenstein M1 nach der Herstellung des Werkzeuges und der Referenzprobekörper. Sollte es nicht möglich sein Referenzprobekörper herzustellen, welche eine optische Bewertung mittels Prüfmethode zulassen, wird das Projekt an dieser Stelle abgebrochen. Der zweite Abbruchzeitpunkt und damit der zweite Meilenstein liegt im AP 6, in dem die Erfassung der messtechnischen Kennwerte stattfindet, welche die Voraussetzung bilden, um das anschließende Arbeitspaket der Generierung eines Modells zur Vorhersage der Formteilqualität zu erfüllen.

Um ein Umdenken in Richtung ressourceneffizienter Produktionsprozesse zu ermöglichen, ist eine fundierte wissenschaftliche Datenbasis erforderlich. Derzeit fehlen systematische Untersuchungen, die die Auswirkungen des Rezyklateinsatzes auf die Material- und Produkteigenschaften transparent machen. Dies gilt insbesondere für die Herstellung transparenter Formteile durch Spritzgießen.

Hauptteil

Im folgenden Teil werden für die jeweiligen Arbeitspunkte des Arbeitsplanes, die entsprechende Vorgehensweise und die erzielten Ergebnisse präsentiert.

Nr.	Arbeitspaket
1	Überprüfung der Literatur- und Patentrecherche und Abstimmung der Projektdetails mit dem projektbegleitenden Ausschuss
2	Entwicklung und Umsetzung einer optisch relevanten Formteilgeometrie
3	Generierung der Rezyklate und Herstellung der zu verarbeitenden Neuware-Mahlgut-Abmischungen
4	Werkzeugabmusterung, Referenzprobenherstellung und optische Beurteilung
5	Herstellung von Formteilen mit gestufter Rezyklatzugabe
6	Messtechnische Erfassung der Kennwerte und Vergleich mit Referenzwerten
7	Generierung eines Modells zur Vorhersage der Formteilqualität
8	Abschlussbericht

AP 1: Aktualisierung der Literatur- und Patentrecherche und Abstimmung der Projektdetails mit dem projektbegleitenden Ausschuss

Mit Projektaufnahme wurden grundlegende Betrachtungen zur Verwendung von Rezyklat in der Spritzgussfertigung von transparenten Bauteilen und eine Analyse des Stands der Technik durchgeführt.

Eine Literaturrecherche und Patentrecherche angelehnt an die initiale Recherche aus dem Projektantrag konnte keine neuen Entwicklungen seit der Antragstellung identifizieren. Zur Literaturrecherche wurden die Datenbanken TIB (Informationsbibliothek) und PubMed genutzt. Die Patentrecherche wurde mit der Datenbank DEPATISnet und Google Scholar mit folgenden Thematiken sowohl auf Deutsch, als auch auf Englisch durchgeführt:

- (mechanisches) Recycling transparenter Kunststoffbauteile (Optiken)
- Qualitätsanforderungen an transparente, optische Kunststoffbauteile
- Herstellungsverfahren transparenter, optischer Kunststoffbauteile

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurde eine erweiterte Online-Umfrage bei Zielgruppen wie Herstellern, Produktentwicklern und Verarbeitern, die sich mit transparenten Kunststoffanwendungen in einer großen Spannbreite beschäftigen, durchgeführt.

Dies erfolgte, um

- zu prüfen, ob die in der Antragsphase für die Untersuchungen festgelegte Materialauswahl PMMA, PC und PS bestätigt wird oder eine Korrektur erforderlich ist,
- die transparenten Anwendungen je nach Qualitätsanforderung in Produktgruppen zu unterteilen,
- die Qualitätsmerkmale zu klassifizieren, welche bei der späteren Modellfindung (AP 7 Generierung eines Modells zur Vorhersage der Formteilqualität) benötigt werden.

Zunächst wurde erfragt, welchen Kunststofftyp das jeweilige Unternehmen herstellt oder verarbeitet. Um ein hohes CO₂-Einsparungspotential realisieren zu können, wurde sich im Vorfeld auf die transparenten Massenkunststofftypen PMMA, PC und PS festgelegt. Die Umfrage gab hierbei folgende Ergebnisse:

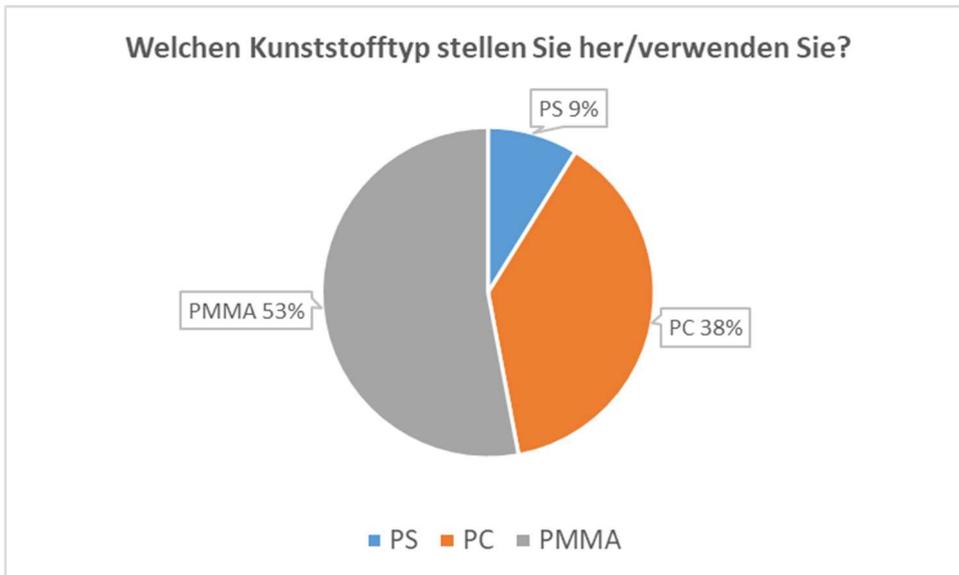


Abbildung 3: Umfrageergebnisse zur Verwendung von transparenten Kunststoffen in der optischen Industrie

Aus Abbildung 3 ist zu entnehmen, dass bei den befragten Unternehmen überwiegend PMMA und PC zur Anwendung kommen.

Die Erkenntnisse aus der Projektantragszeit, dass die Unternehmen zu großen Teilen komplett auf das mechanische Recycling bei transparenten Kunststoffen verzichten, belegt Abbildung 4.

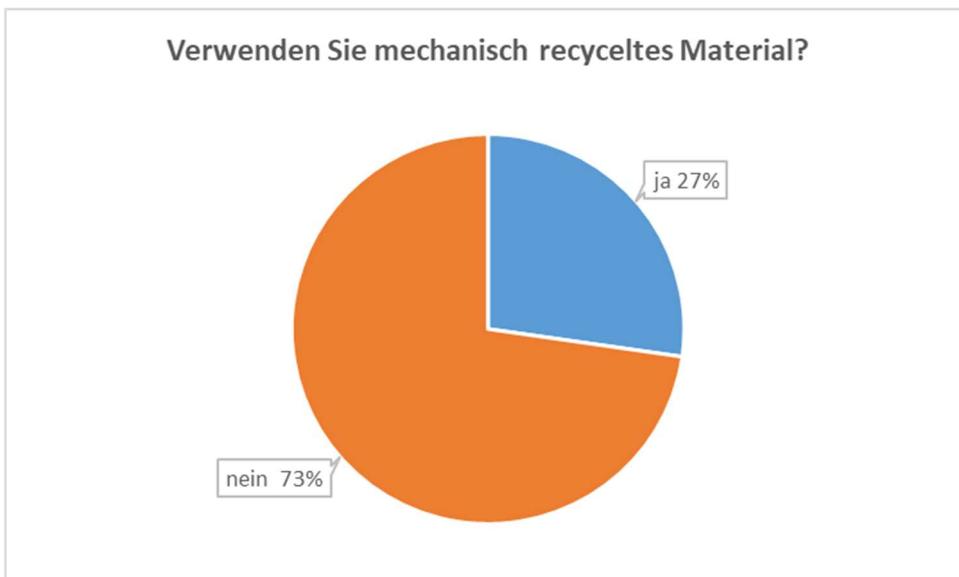


Abbildung 4: Umfrageergebnisse zur Verwendung von mechanischen Rezyklat in der optischen Industrie

Lediglich 27% verwenden aktuell mechanisch recyceltes Material in Ihrer Produktion. Es gibt aber auch erfreuliche Bestrebungen zu einer Erhöhung des Rezyklatanteils. So gab ein Unternehmen an bei der Herstellung von Kunststofffolien und Massivplatten bereits jetzt bis zu 10% Rezyklat zu verwenden. Allerdings berichtete wiederum ein anderes Unternehmen 1-2% Rezyklatanteil zu verwenden und gerne bereit ist diesen zu erhöhen, allerdings stark an die Qualitätsanforderungen verschiedener Kunden gekoppelt ist, welche sich wiederum strengen Normen hinsichtlich der optischen Güte unterordnen müssen.

Die hohen Anforderungen an die optischen Eigenschaften spiegeln sich in folgender Abbildung wieder:

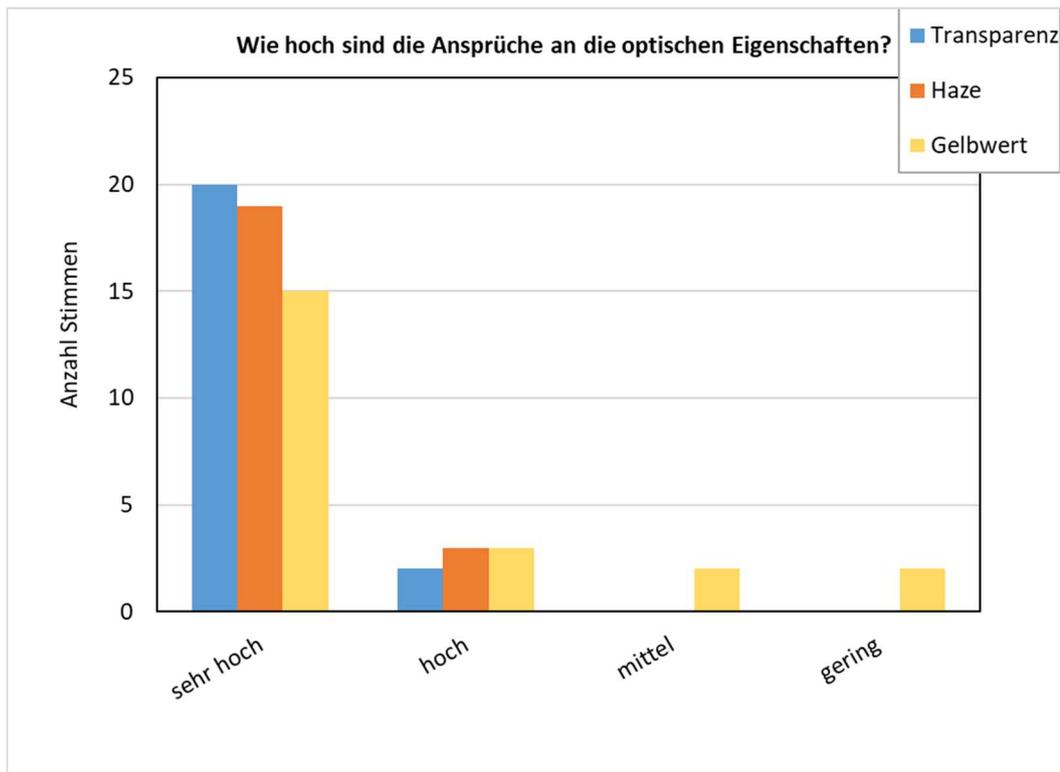


Abbildung 5: Umfrageergebnisse zu den Ansprüchen an die optischen Eigenschaften

Neben den sehr hohen Anforderungen an die Transparenz, den Haze-Wert und den Gelbwert gaben die befragten Unternehmen an, dass nach dem Spritzgussprozess die Maßgenauigkeit und das Fehlen von Oberflächendefekten wichtige Qualitätsparameter darstellen.

Der projektbegleitende Ausschuss kam zweimal während der Projektlaufzeit mittels Onlinekonferenz zusammen. Dabei wurden die Vorgehensweise und erste Ergebnisse präsentiert. Die endgültigen Ergebnisse werden dem projektbegleitenden Ausschuss zukommen und Gespräche über weitere Untersuchungen im Rahmen von Dienstleistungen oder Forschungsprojekten aufbauend auf den erzielten Ergebnissen sind geplant.

AP 2: Entwicklung und Umsetzung einer optisch relevanten Formteilgeometrie

Wie geplant wurde eine optisch relevante Formteilgeometrie mit den Kantenlängen 40 mm mit unterschiedlichen Wandstärken von 1 mm, 2 mm und 4 mm (Formgeometrie 1) und konkav/konvexer sphärischer Strukturen (Formgeometrie 2) konstruiert (Abbildung 6). Mit der Dickenvariation in der Stufe bei der ersten Geometrie ist die Untersuchung der optischen Eigenschaften in Abhängigkeit von den Wanddicken möglich. Beide Formteilgeometrien wurden über einen komfortabel ausgelegten Filmanschnitt über einen Kaltkanalverteiler realisiert, um eine gleichmäßige Formfüllung mit möglichst geringer Materialscherung zu gewährleisten.

Die optimale Formteil- und Werkzeugentwicklung sowie deren Auslegung erfolgte unter Zuhilfenahme der Spritzgießsimulation.

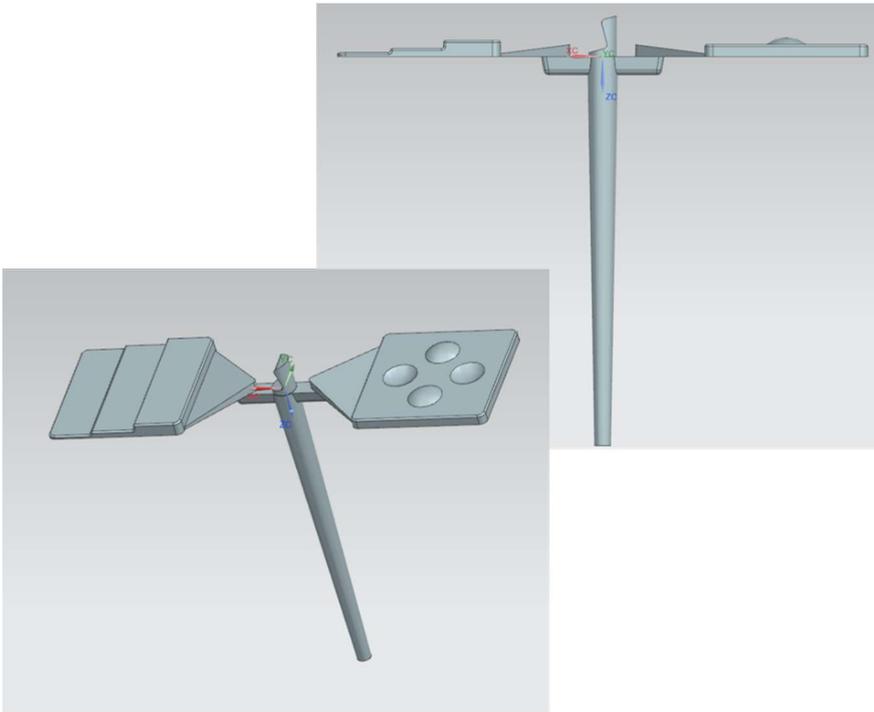


Abbildung 6: mittels CAD konstruiertes Formteil mit unterschiedlichen Wandstärken und konkav/konvexer Struktur

Für die verwendeten Kunststoffe PMMA, PC und PS wurden entsprechende Spritzgussimulationen mit der Simulationssoftware Moldex3D® durchgeführt. Diese bietet den Vorteil mit den Prozessparametern, welche in der Produktion gewählt werden (Füllzeit, Nachdruckzeit, Nachdruckhöhe, Abkühlzeit etc.), den Füllverlauf der Kunststoffschmelze darzustellen und eventuelle Füllprobleme offenzulegen. Somit kann die Konstruktion bei Füllproblemen angepasst werden bis ein zufriedenstellendes Ergebnis eintritt. Es ist zudem möglich das Abkühlverhalten des Spritzgussformteiles durch Einbinden der realen Temperierbohrungen im Spritzgusswerkzeug zu betrachten. Diese haben einen hohen Einfluss auf die Formteilqualität. Die Temperierbohrungen sind in Abbildung 7 hellblau dargestellt.

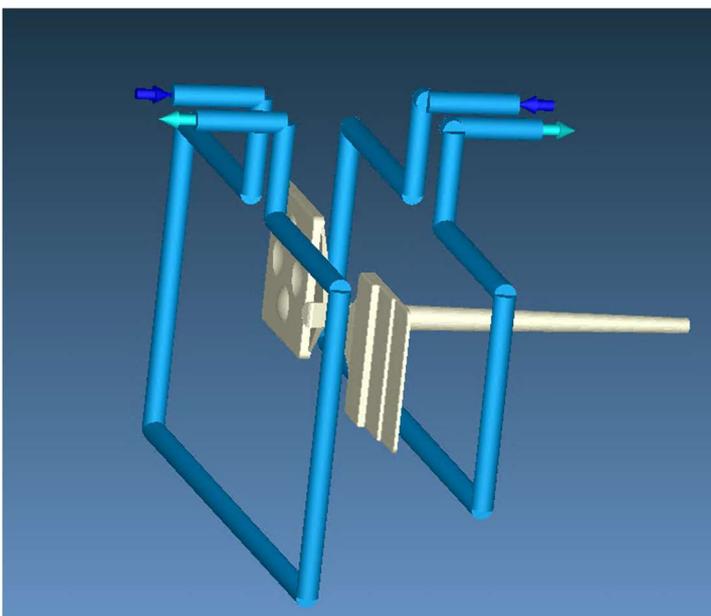


Abbildung 7: Bei Moldex3D dargestelltes Spritzgussformteil mit dazugehörigen Temperierbohrungen (blau)

Besonders wichtig ist bei Mehrfachkavitätenwerkzeugen, dass eine gleichmäßige Formfüllung gewährleistet werden kann (also eine gleichmäßige Formfüllung der Formgeometrie 1 und 2). Folgend ist die simulative Formfüllung dargestellt:

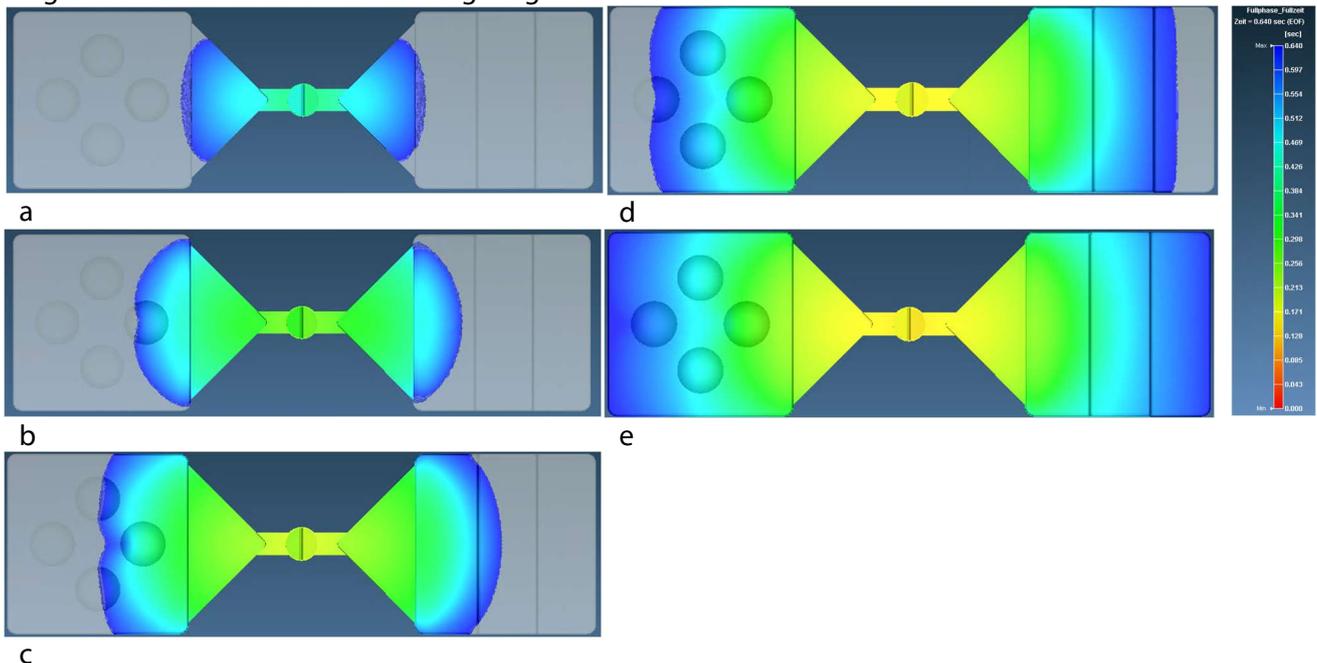


Abbildung 8: simulativer Formfüllverlauf des Spritzgussformteils

Zusätzlich zur hauptsächlichen Prozesssimulation des Spritzgussverfahrens bietet Moldex3D® die Möglichkeit optische Eigenschaften der Spritzgussformteile darzustellen [4]. Hierbei konnten bei den gewählten Parametern keine Auffälligkeiten festgestellt werden, was die Eignung der entworfenen Formteil- und Anguss-/Anschnittgestaltung untermauert (Abbildung 9).

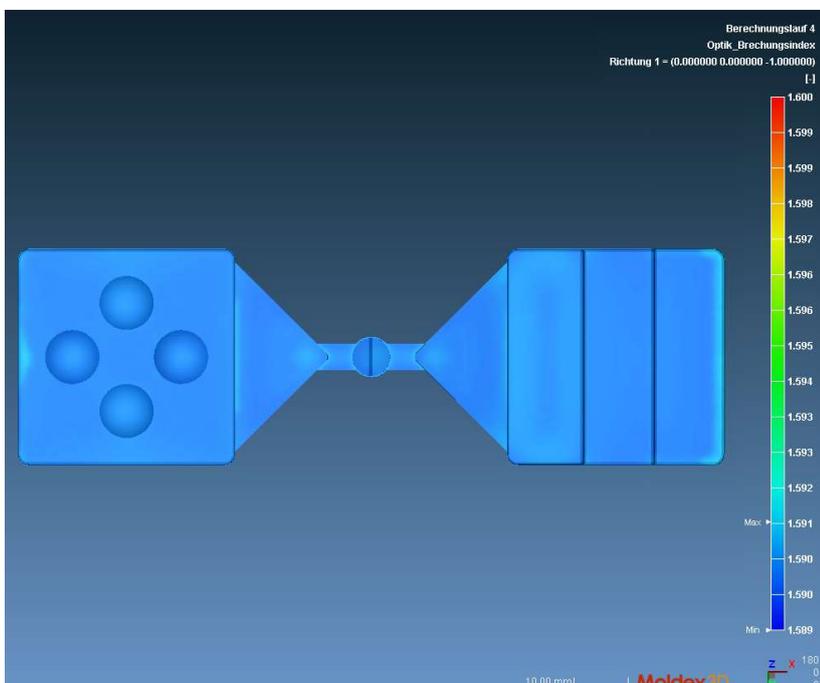


Abbildung 9: Füllsimulation des Formteils mit Auswertung des Brechungsindex

Auf Basis der Simulation wurden die Werkzeugeinsätze mit entsprechend hochpolierten Werkzeugkavitätsflächen hergestellt (Abbildung 10). Das Spritzgusswerkzeug verfügt über eine drehbar gelagerte Angussbuchse, was die Füllung beider oder nur einer Werkzeugkavität ermöglicht.

Herstellung der Werkzeugformeinsätze



Auf der Spritzgussmaschine (Engel e-motion 50t) verbautes Werkzeug



Im Stammwerkzeug verbauter und polierter Formeinsatz

Abbildung 10: hergestellter und verbauter Werkzeugeinsatz

AP 3: Generierung der Rezyklate und Herstellung der zu verarbeitenden Neuware-Mahlgut-Abmischungen

Parallel zu den Arbeiten an Arbeitspaket 2 fand die Generierung der erforderlichen Rezyklatmengen statt. Die Mahlgutmengen wurden materialschonend unter Nutzung eines einfachen Plattenwerkzeuges auf einer Maschine mit einer optimalen Hubauslastung hergestellt. Als PMMA wurde das Material Plexiglas 7N des Herstellers Röhm/Polyvantis, für PC das Material Makrolon 2805 des Herstellers Covestro und für PS das Material Styrolution PS 124N des Herstellers Ineos Styrolution verwendet. Es wurde sichergestellt, dass das Ausgangsmaterial vor der Herstellung entstaubt wurde und die verwendete Plastifiziereinheit der Spritzgussmaschine gereinigt ist, um Staubeinschlüsse und Verunreinigungen in den Spritzgussplatten zu vermeiden (Abbildung 11). Die Spritzgussplatten verfügten über die Maße 100x100x2 mm. Es wurde sich für eine Wandstärke von 2 mm entschieden, da 1 mm starke Platten eine Erhöhung der Gesamtproduktionszeit mit sich gebracht hätten. Von Wandstärken größer 2 mm wurde abgesehen, weil sich herausgestellt hat, dass sich diese deutlich schlechter mechanisch recyceln lassen.

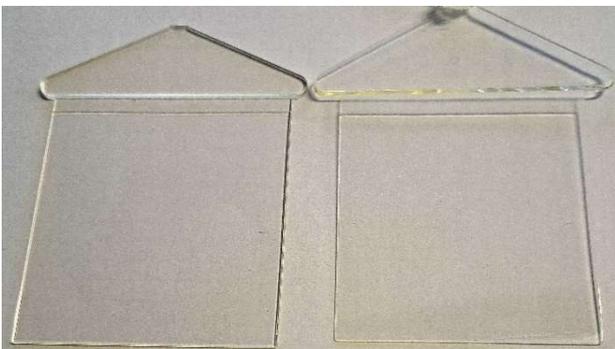


Abbildung 11: Hergestellte Spritzgussplatten für das anschließende Recycling

Anschließend fand die Mahlgutgenerierung durch eine Schneidmühle statt. In die Schneidmühle wurde ein Mahlsieb von 4 mm verwendet, um eine Mahlgut Korngröße ähnlich der des Ausgangsgranulates zu erzielen

(Abbildung 12).



Abbildung 12: Verwendete Schneidmühle zur Mahlgutgenerierung

Das generierte Mahlgut wurde anschließend luftdicht verpackt, um eine Kontamination mit Staub zu vermeiden.

Wie im Projektantrag beschrieben, wurde das Mahlgut mit unterschiedlichen Prüfverfahren mit der Neuware verglichen.

Bei IR-Untersuchungen wurde die Probe mit infrarotem Licht in Schwingung versetzt und ein Teil der Strahlung durch die Materialmoleküle absorbiert. Aufgrund der Wechselwirkung von IR-Strahlung und Molekülen werden Absorptionsspektren mit spezifischen Absorptionsbanden erzeugt, welche Aufschlüsse für Fremdpartikel und Alterungs- bzw. Abbauprozesse geben können. Bei der Vorgehensweise wurden die Absorptionsspektren der Referenzproben (Neuware des jeweiligen Kunststoffes) mit denen des recycelten Materials verglichen. Beispielhaft dargestellt am Vergleich von Neuware (PMMA_n) und Rezyklat (PMMA_r) des Kunststoffes PMMA.

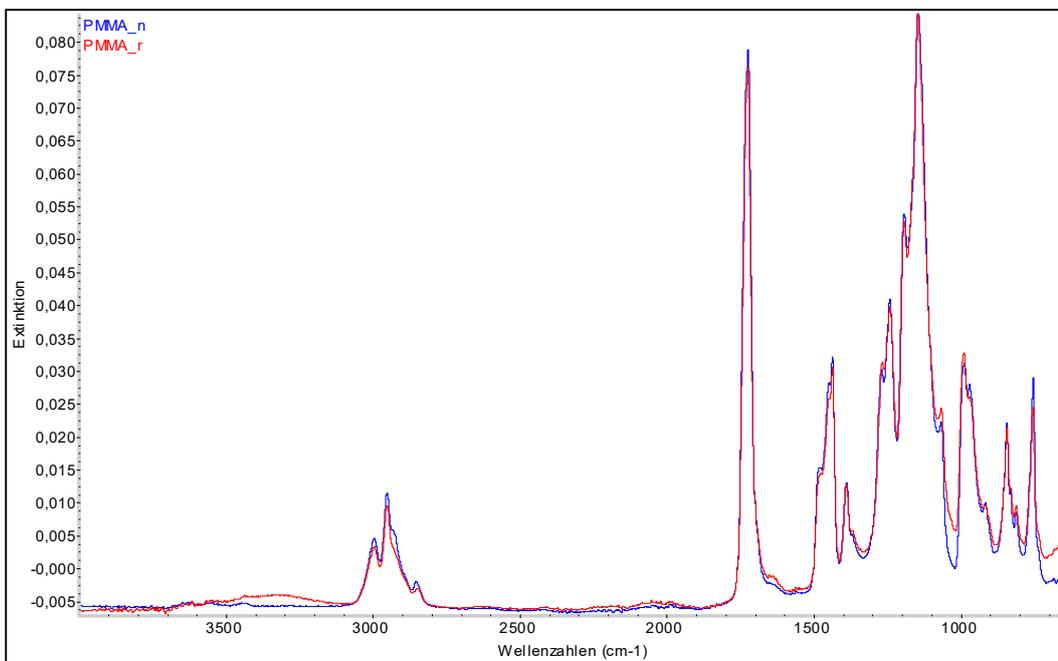


Abbildung 13: Ergebnisse der IR-Untersuchungen von PMMA

Es fällt auf, dass es keine signifikanten Abweichungen zwischen den Messergebnissen der Neuware im Vergleich zum Rezyklat gibt. Diese Erkenntnis war auch bei den Proben von PC und PS ersichtlich. Daraus lässt

sich schlussfolgern, dass es zu keiner Verunreinigung des Mahlgutes mit Fremdpartikeln oder zu einem Alterungsprozess im Mahlgut kam.

Zum selben Schluss gelangt man, wenn man die Neuware mit dem Rezyklat bei einer DSC-Messung vergleicht. Auch hier vorgenommen an PMMA-Proben (Abbildung 14). Speziell bei der Betrachtung des Glaspunktes ist zu erkennen, dass es nur einen geringfügigen Unterschied zwischen Neuware und Rezyklat gibt. Der Glaspunkt weist die größte Änderung der Verformungsfähigkeit auf, ist also der Übergang vom spröden energieelastischen Bereich hin zum weichen entropieelastischen Bereich. Sowohl im Heizlauf, als auch im Kühllauf sind keine nennenswerten Unterschiede erkennbar.

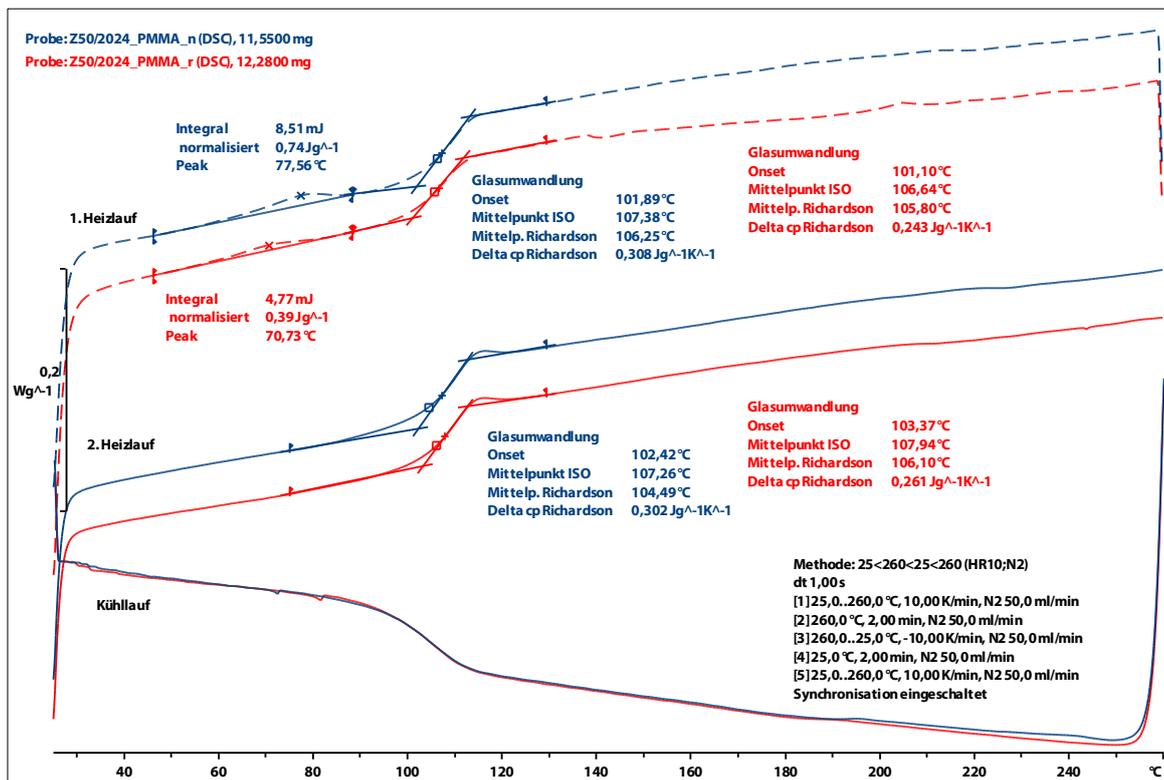


Abbildung 14: Ergebnisse der DSC-Messungen von PMMA

Dies ermöglicht die Annahme, dass die Verwendung des einfach recycelten Materials keine Änderungen im thermischen Verarbeitungsbereich und damit in der Fließfähigkeit des Materials nach sich zieht. Um dies genauer zu validieren, wurden MVR-Vergleichsmessungen durchgeführt. Das Prinzip der MVR-Messung ist in der folgenden Abbildung dargestellt (Abbildung 15).

Mittels der MVR-Messung wird der Fließfähigkeitsindex eines Materials (MFR bzw. MVR) ermittelt. Dieser ist ein Indikator für die Fließfähigkeit eines Materials, also dem rheologischen Verhalten. Beeinflusst wird die Fließfähigkeit beim Spritzgussprozess von der Scherbelastung des Materials während der Plastifizierung, den Temperaturen und der Einspritzgeschwindigkeit. Bei der MVR-Messung wird der Kunststoff in einem definiert beheizten Zylinder zum Schmelzen gebracht und nach DIN EN ISO 1133:2012-03 mit einem Kolben des Durchmessers 9,55 mm durch eine Düse des Durchmessers 2,095 mm gedrückt. Hierbei wird das durch die Düse austretende aufgeschmolzene Volumen während einer Messdauer von 10 min gemessen.

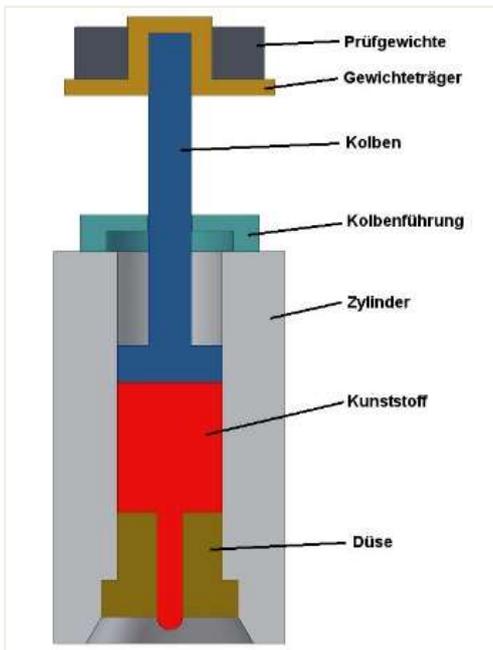


Abbildung 15: Darstellung einer MVR-Messung

Für die verschiedenen Kunststofftypen ergaben sich folgende Messwerte:

Tabelle 1: Ergebnisse der MVR-Messungen von Neuware und Rezyklat von PMMA, PC und PS

Material	MVR [$\frac{\text{cm}^3}{10 \text{ min}}$]
PMMA_neu	6,68
PMMA_Rezyklat	7,09
PC_neu	21,69
PC_Rezyklat	22,38
PS_neu	11,96
PS_Rezyklat	14,08

Die Prüfergebnisse belegen, dass die Fließfähigkeit des Materials aufgrund des Recyclingverfahrens zunimmt. Die erhöhte Fließfähigkeit ist auf eine Verkürzung der Makromolekülketten des jeweiligen Kunststoffes während des Recyclings zurückzuführen. Dahingehend wird eine Anpassung der Prozessparameter während der Spritzgussversuche in Abhängigkeit des Rezyklatanteils und der Häufigkeit der Recyclingdurchläufe notwendig sein.

Vor der Spritzgussverarbeitung müssen die Kunststoffgranulate und die Rezyklate standardgemäß einer Trocknung entsprechend des Materialdatenblattes unterzogen werden.

Die Trocknungsparameter für die jeweiligen Materialien betragen:

Tabelle 2: Trocknungsparameter von PMMA, PC und PS

Material	Trocknungstemperatur [°C]	Trocknungsdauer [h]
PMMA	80	4
PC	120	4
PS	80	3

Mittels der Restfeuchtemessung nach dem Trocknen der Neuware und des Rezyklats gemäß der Karl-Fischer-Titration konnten keine unzulässig hohen Feuchtegehalte im Material festgestellt werden.

AP 4: Werkzeugabmusterung, Referenzprobenherstellung und optische Beurteilung

Dieses Arbeitspaket umfasste die Erprobung des hergestellten Spritzgusswerkzeugs mit Werkzeugeinsätzen, um die Werkzeugfunktionalität sowie die geforderten Formteileigenschaften und deren Reproduzierbarkeit nachzuweisen. Vor der Herstellung der Referenzproben wurden das Spritzgusswerkzeug und die Formeinsätze korrekt eingebaut sowie das Angussystem und die Kühlkanäle überprüft. Zur Analyse des Füllverhaltens wurde eine Formfüllstudie durchgeführt, die mit den Ergebnissen der Spritzgussimulation verglichen wurde. Nach der Trocknung des Materials wurde dieses mittels einer Granulatentstaubungsanlage auf eventuelle Kontaminierung mit Umgebungsstaub vorbeugend gereinigt. Hierbei wird das Granulat direkt aus dem Materialsack in ein Entstaubungsmodul gesaugt, womit Staubpartikel durch Verwirbelung und ein eingebautes Filtersieb entfernt werden. Das Lösen des Staubes vom Granulat erfolgt im Ionisationsmodul mittels einer Koronaentladung, wodurch die Staubkörner ihre Haftung verlieren. Das gereinigte Granulat gelangt anschließend direkt vom Entstaubungsmodul mit entsprechenden Schläuchen in den Granulatrockner, welcher sich auf dem Materialeinzugsbereich der Spritzgussmaschine befindet. Somit wird staubfreies Material für die Spritzgussverarbeitung sichergestellt.

Bei den folgenden Abmusterungsversuchen mit PMMA stellte sich heraus, dass es zu einer ungleichmäßigen Formfüllung der beiden Kavitäten kam.

Dies muss unbedingt vermieden werden, da es andernfalls zu eingefrorenen Spannungen in bereits gefüllten Formteilmereichen kommt, während die ungefüllte Seite noch mit Kunststoffschmelze gefüllt wird. Dies fördert den Verzug, da die Makromolekülketten durch das Verdichten in Zwangslagen gezwungen werden, welche während der Abkühlphase des Spritzgussprozesses einfrieren. Nach der Entformung fördert dies bei der weiteren Nutzung den Verzug und die Bildung von Eigenspannungen.

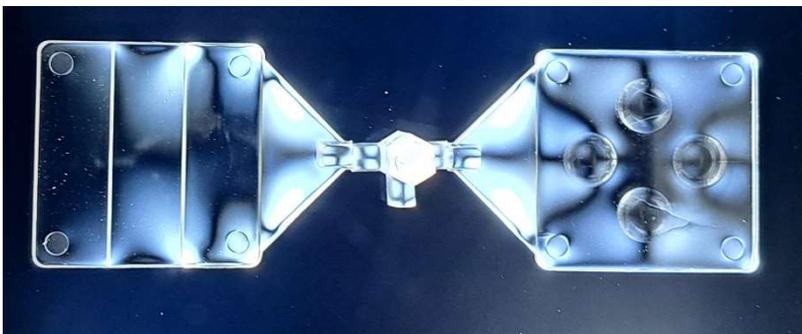


Abbildung 16: Resultierende Eigenspannungen

Diese Eigenspannungen können durch das Einwirken von mechanischen Beanspruchungen oder erhöhten Temperaturen zu Rissen oder zum kompletten Bauteilversagen führen.

Auffällig war, dass es bereits im Formfüllbereich der Angussbuchse zu deutlich sichtbaren Einfallstellen und Lunkern kam. Dies ist ein Indiz dafür, dass der erforderliche Nachdruck, welcher die Schwindung ausgleichen muss, nicht komplett wirken konnte (Abbildung 17).



Abbildung 17: Sichtbare Einfallstelle und Lunker im Angussverteilerbereich

Da dieser Effekt auch bei Probeversuchen mit PC und PS auftrat, konnte eine Materialabhängigkeit ausgeschlossen werden. Infolgedessen wurde beschlossen die Höhe des Filmanschnittes von 0,75 mm auf 1,5 mm zu vergrößern und die Düsenöffnung von 2 mm auf 3,5 mm zu erweitern, um eine Prozessstabilität gewährleisten zu können. Die Anpassung des Formeinsatzes fand in der hauseigenen Werkstatt des KUZ statt.

In nachfolgenden Abmusterungsversuchen konnte eine gleichmäßige Formfüllung beider Kavitäten erreicht werden. Zudem konnten keine Eigenspannungen mehr festgestellt werden.

AP 5: Herstellung von Formteilen mit gestufter Rezyklatzugabe und Mehrfachrezyklatanteil

Um die Abhängigkeit der optischen Eigenschaften von den der Neuware zugesetzten Rezyklatanteilen zu untersuchen und Grenzwerte für die zulässigen Zugabemengen abzuleiten, wurden Spritzgießversuche mit unterschiedlichen Rezepturen durchgeführt. Dabei wurden ebenfalls Versuche mit Rezyklat durchgeführt, welche den mechanischen Recyclingprozess bis zu dreimal durchlaufen haben.

Die Versuche fanden mit folgenden Mischungsverhältnissen von Neuware zu Rezyklat statt:

- 95 % zu 5 %
- 90 % zu 10 %
- 85 % zu 15 %
- 80 % zu 20 %
- 70 % zu 30 %
- 60 % zu 40 %

für die weiteren Versuche wurden für zweifachen und dreifachen Recyclingdurchlauf folgende Mischungsverhältnisse gewählt:

- 95 % zu 5 %
- 90 % zu 10 %
- 80 % zu 20 % und
- 70 % zu 30 %

Während der Spritzgussversuche konnten Unterschiede bei der Verarbeitbarkeit der jeweiligen Materialien und Recyclingdurchläufe festgestellt werden. Für das PMMA wurde eine Verarbeitungstemperatur von 270 °C gewählt und eine Werkzeugtemperatur von 80 °C. Während der Versuchsdurchführungen wurden die Zylindertemperaturen um 10 °C verringert, um einen besseren Materialeinzug des Kunststoffes gewährleisten zu können. Ebenso wurde der Staudruck von 120 bar auf 130 bar erhöht, um eine bessere Homogenisierung von Neuware und Rezyklat zu realisieren.

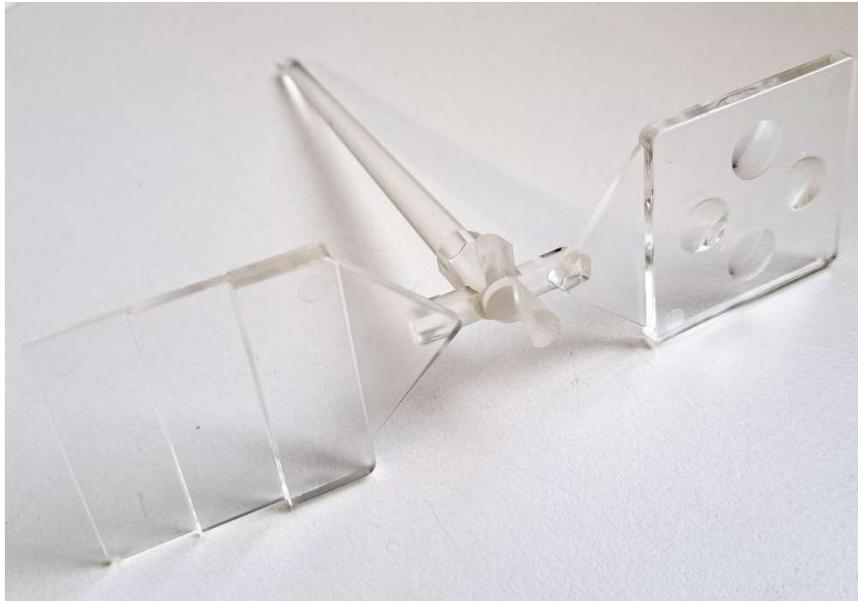


Abbildung 18: Spritzgegossenes Projektformteil

Bei den Spritzgussversuchen mit Polycarbonat betrug die Verarbeitungstemperatur 310 °C und die Werkzeugtemperatur 103 °C. Während der Spritzgussversuche fand unabhängig von der Rezyklatmenge ein guter Materialeinzug statt. Zudem konnte für die Versuche mit zweifach und dreifach recyceltem Anteil der Staudruck von 100 bar auf 60 bar abgesenkt werden, was förderlich für den Energieverbrauch ist. Es stellte sich heraus, dass ebenso mit dem geringeren Staudruck eine ausreichend gute Homogenisierung des Materials stattfand.

Bei der Verarbeitung des PS zeigte sich, dass sich der Materialeinzug bei Versuchen mit 100 % Rezyklatanteil mit Zunahme der Recyclingdurchläufe verschlechterte. Zudem waren hierbei direkte Vergilbungen im Spritzling zu erkennen, was auf einen nicht zulässigen Materialabbau hindeutet.

AP 6: Messtechnische Erfassung der Kennwerte und Vergleich mit Referenzwerten

Im sechsten Arbeitspaket wurde die geplante messtechnische Erfassung durchgeführt. Die optische Beurteilung erfolgte auf Grundlage repräsentativer Stichproben der in AP 4 und AP 5 generierten Musterteile.

Zu den untersuchten optischen Eigenschaften zählt die Lichtdurchlässigkeit, auch als Transmission bezeichnet. Diese wird mit einem Transmissionsmessgerät gemessen. Zur Untersuchung hinsichtlich der Materialtrübung oder Verunreinigung aufgrund des Recyclingvorgangs und der Spritzgussherstellung wird das Hazemeter verwendet. Der Einfluss von Haze bewirkt, dass Farben, welche durch das Material betrachtet werden, als ausgewaschen und verblichen erscheinen. Als Einflussfaktoren zählen bei Haze die Materialauswahl, -verarbeitung, sowie Oberflächenstrukturen. Neben dem Hazewert wurden mit dem Transmissionsmessgerät (Rhopoint ID) zudem die Transmission und die Schärfe der jeweiligen Proben gemessen. Hierbei ergab sich der Vorteil aus der Formteilkonstruktion, dass die drei verschiedenen Wandstärken direkt nacheinander gemessen werden konnten. Das Rhopoint ID Messgerät misst, wie das menschliche Auge sieht. Es quantifiziert die Qualität der Durchsichtigkeit von Materialien nach einem Verfahren, das den Praxisbedingungen entspricht, und mit der menschlichen Wahrnehmung korreliert.

Haze quantifiziert den Kontrastverlust von Gegenständen, die durch ein Material betrachtet werden und kann somit also als Indiz für Verunreinigungen oder Inhomogenitäten zwischen Neuware und Rezyklat angesehen werden.

Zunächst wurden die Haze-Werte der PMMA-Proben in Abhängigkeit Ihres Rezyklatanteils und der Anzahl der Recyclingdurchläufe miteinander verglichen. Auffällig ist, dass der Haze-Wert mit zunehmendem Rezyklatanteil und in Abhängigkeit der Wandstärke steigt. Auch nimmt die Standardabweichung, also die Streuung der Ergebnisse dahingehend zu. Positiv heraus sticht die Tatsache, dass bestimmte Mischungsverhältnisse bezogen auf den Haze-Wert und die Transmission im zulässigen Bereich liegen.

Das Material PMMA hat als Virginmaterial einen Haze-Wert von <0,5 % bei einer Wandstärke von 3 mm. Auf Basis dieses Wertes kann die Aussage getroffen werden, dass 1x recyceltes PMMA bis zu einem Prozentsatz von 20 % Rezyklat für die Wandstärken 1 mm, 2 mm und 4 mm verwendet werden kann.

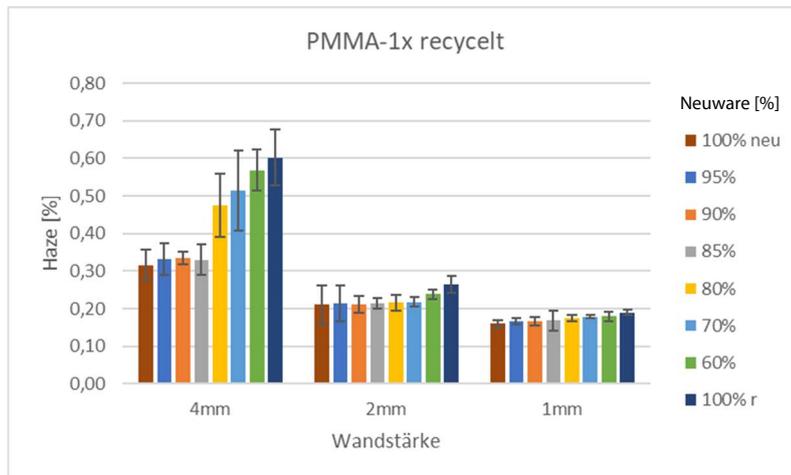


Abbildung 19: Haze-Messergebnisse für PMMA – 1x recycelt

Für 2-fach recyceltes Material sind die Wandstärken bis maximal 2 mm zulässig. Oberhalb liegen die Haze-Werte außerhalb des zulässigen Bereiches. Zudem nimmt die Streuung stark zu.

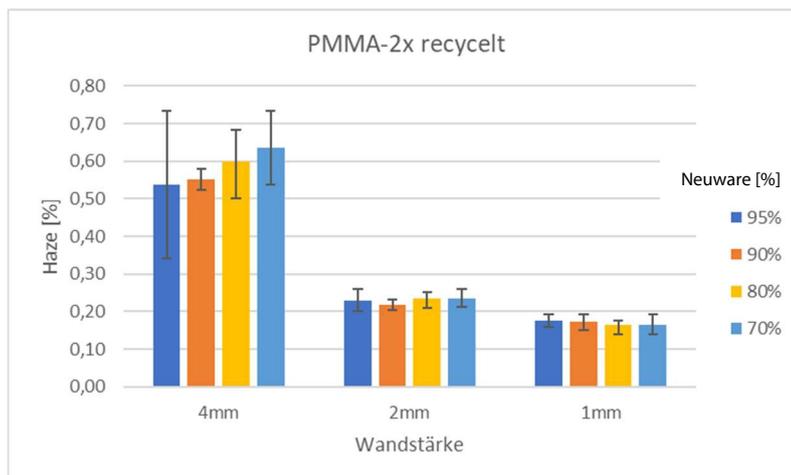


Abbildung 20: Haze-Messergebnisse für PMMA – 2x recycelt

Gleiche Erkenntnisse lassen sich für 3-fach recyceltes Material erzielen. Auffällig ist, dass hinsichtlich des Haze-Wertes künftig Untersuchungen mit einem Rezyklatanteil > 40% unternommen werden können, da ersichtlich ist, dass der Haze-Wert hauptsächlich durch die Wandstärke und die Anzahl der Recyclingdurchläufe beeinflusst wird. Auch können Versuche mit Recyclingdurchläufen > 3 für Wandstärken bis 2 mm durchgeführt werden, um hierbei ebenfalls die zulässigen Maximalwerte zu ermitteln und damit die Recyclingquote weiter zu erhöhen.

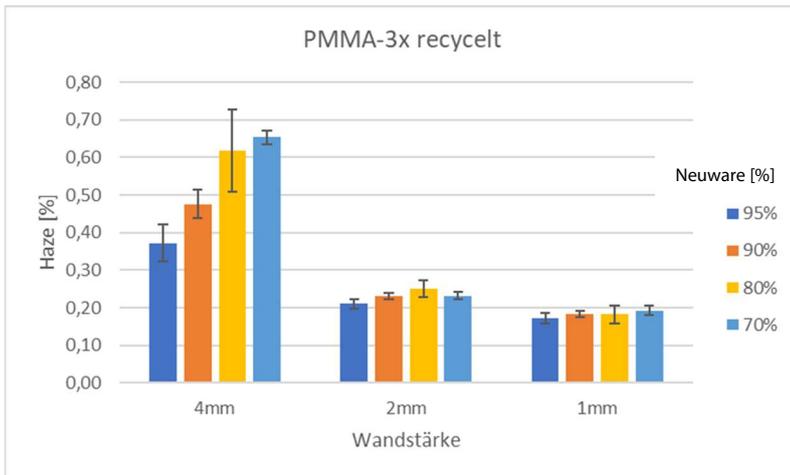


Abbildung 21: Haze-Messergebnisse für PMMA – 3x recycelt

Erfreulich ist zudem, dass für PC die Haze-Werte über alle Mischungsverhältnisse unter dem zulässigen Wert von 0,8 % liegen.

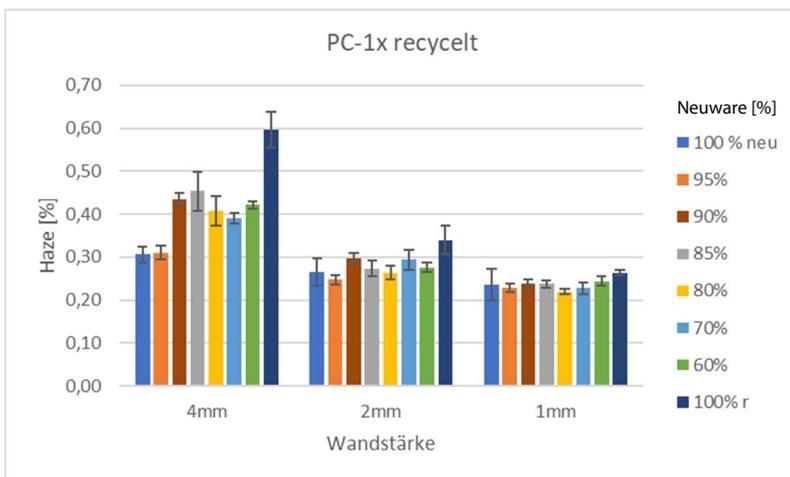


Abbildung 22: Haze-Messergebnisse für PC – 1x recycelt

Die gleichen Aussagen können bei PC für alle Wandstärken auch mit 2-fach und 3-fach recyceltem Material getroffen werden. Somit kann festgestellt werden, dass bei mechanisch recyceltem Material, insofern es sich um PIR-Rezyklat handelt, bedenkenlos bis zu einer Wandstärke von 4 mm und bis zu 3-fachem Rezyklatanteil mechanisches Rezyklat verwendet werden kann. Wie bei PMMA sollten auch bei PC künftig Versuche mit höherem Rezyklatanteil und häufigeren Recyclingdurchläufen durchgeführt werden.

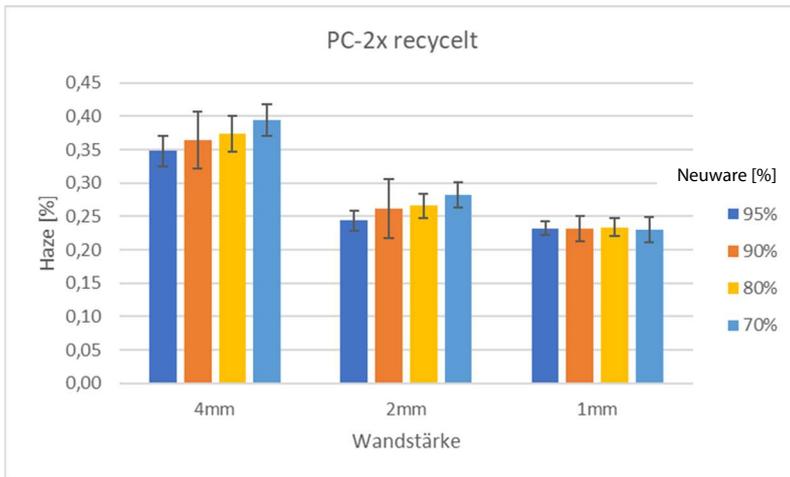


Abbildung 23: Haze-Messergebnisse für PC – 2x recycelt

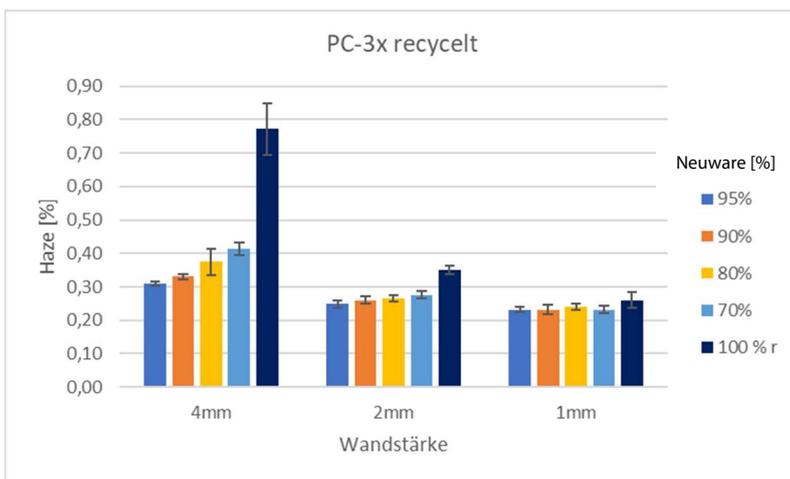


Abbildung 24: Haze-Messergebnisse für PC – 3x recycelt

Entgegen der Ergebnisse bei PMMA und PC stehen die Haze-Werte von PS. Der zulässige Haze-Wert liegt hier bei 0,3 %. Für die dünnen Wandstärken von 1 mm liegen die Haze-Werte teilweise im zulässigen Bereich bei einem einfachen Recyclingdurchlauf. Allerdings nicht mehr bei 2 mm und 4 mm Wandstärke.

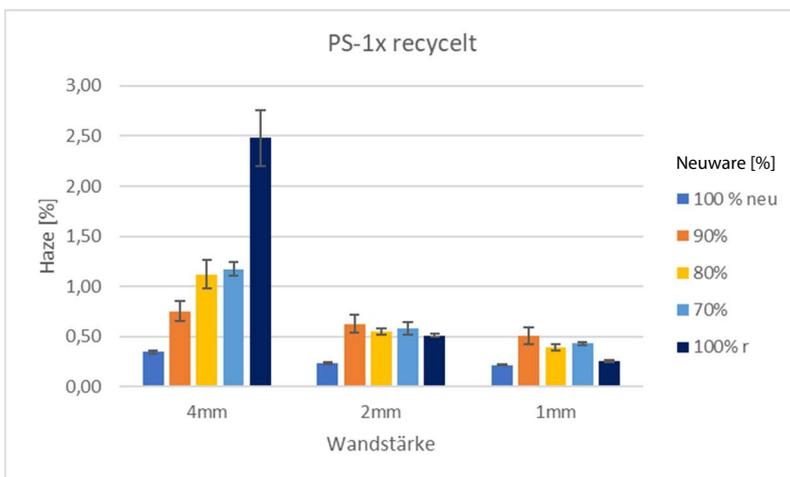


Abbildung 25: Haze-Messergebnisse für PS – 1x recycelt

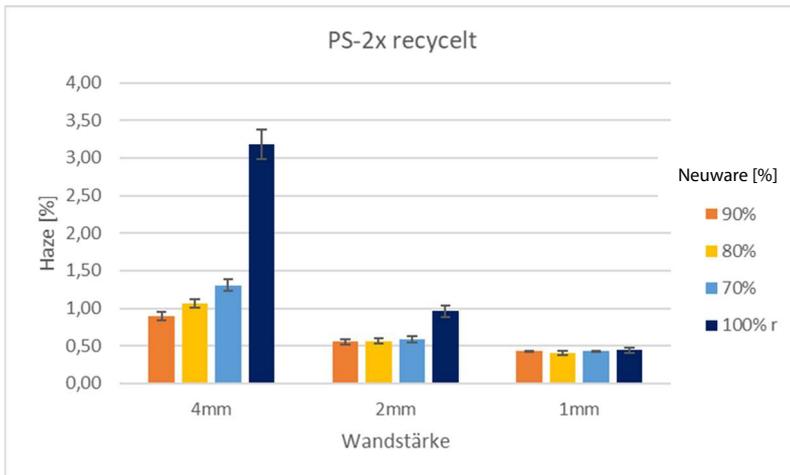


Abbildung 26: Haze-Messergebnisse für PS – 2x recycelt

Es ist deutlich zu erkennen, dass 2-fach und 3-fach recyceltes Material zu keinem Mischungsverhältnis für eine erneute spritzgusstechnische Verarbeitung in Frage kommt.

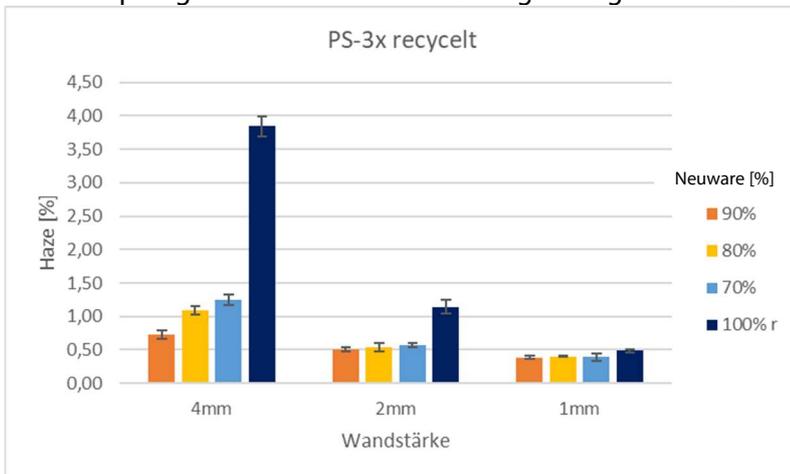


Abbildung 27: Haze-Messergebnisse für PS – 3x recycelt

Als weitere optische Eigenschaft wurden mit dem Transmissionsmessgerät die Werte für die Transmission gemessen. Entgegengesetzt zum Haze-Wert sinken die Transmissionswerte mit zunehmenden Rezyklatanteil und zunehmender Wandstärke. Für PMMA liegt der zulässige Transmissionswert bei > 92%.

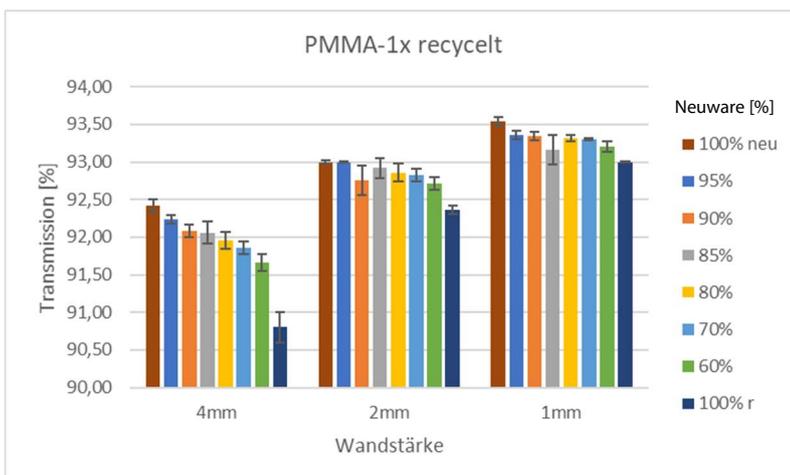


Abbildung 28: Transmission-Messergebnisse für PMMA – 1x recycelt

Mit Ausnahme der Mischungsverhältnisse mit einem Rezyklatanteil > 20 % bei einer Wandstärke von 4 mm sind alle PMMA-Transmissionswerte für alle Recyclingdurchläufe im zulässigen Bereich.

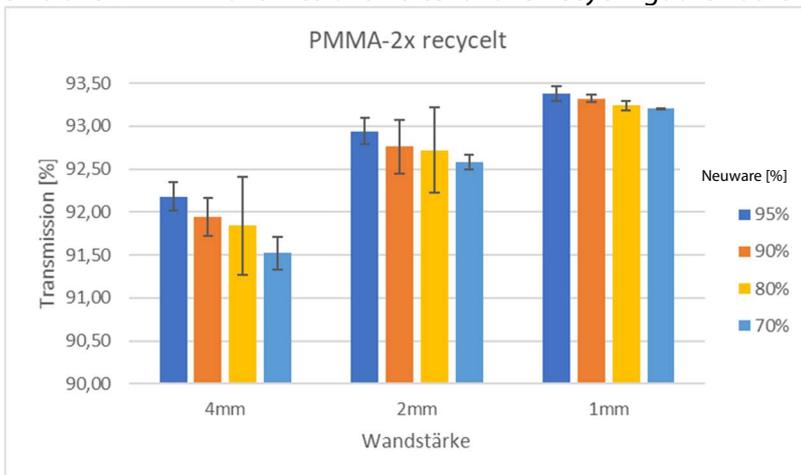


Abbildung 29: Transmission-Messergebnisse für PMMA – 2x recycelt

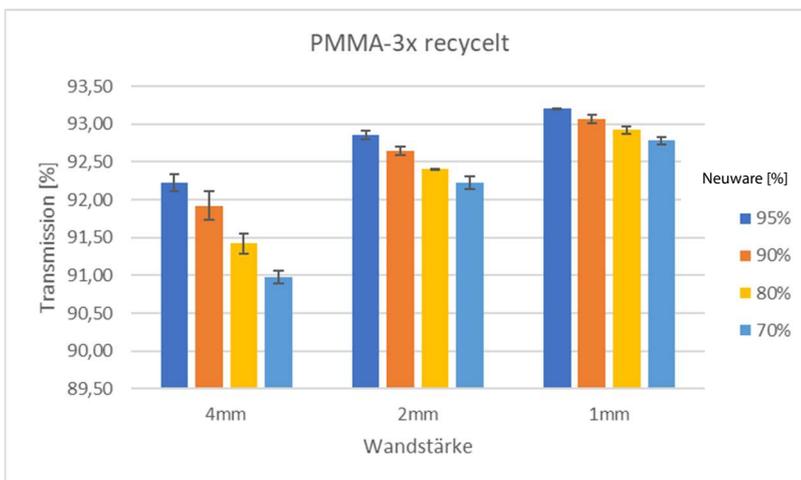


Abbildung 30: Transmission-Messergebnisse für PMMA – 3x recycelt

Bei Polycarbonat liegt der zulässige Transmissionswert bei 89%. Für einfach recyceltes Material liegen die Transmissionswerte für dünne Bauteile von 1 mm und 2 mm im entsprechenden Bereich. Bei den Messproben mit einer Wandstärke von 4 mm sind Rezyklatanteile von maximal 5 % im entsprechenden Grenzbereich.

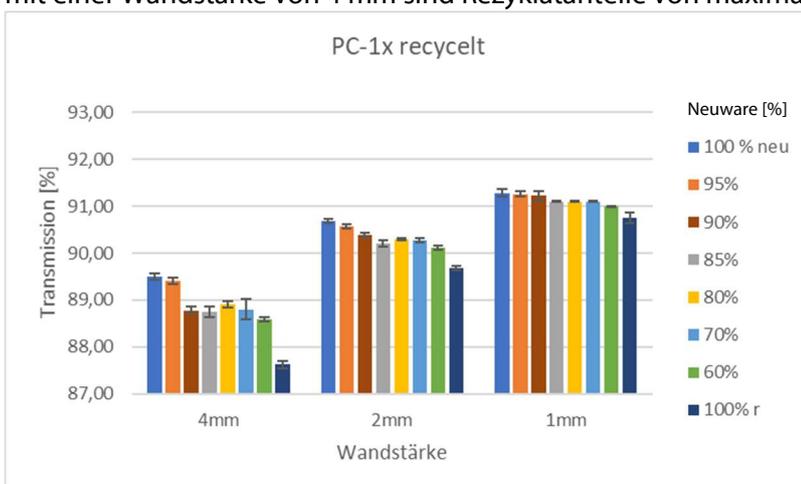


Abbildung 31: Transmission-Messergebnisse für PC – 1x recycelt

Ähnlich verhalten sich die Ergebnisse bei zweifach recyceltem Material. Allerdings verringern sich die Transmissionswerte im Durchschnitt um 2%, wodurch bei einer Wandstärke von 4 mm und mindestens 10 %

Rezyklatanteil die Transmissionswerte zu gering sind.

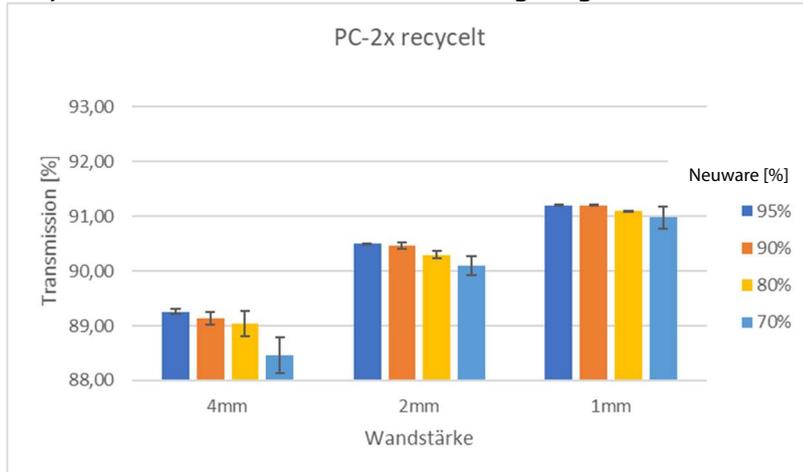


Abbildung 32: Transmission-Messergebnisse für PC – 2x recycelt

Ebenso sind bei dreifach recyceltem PC dünne Formteile < 4 mm Wandstärke mit Rezyklateanteil herstellbar.

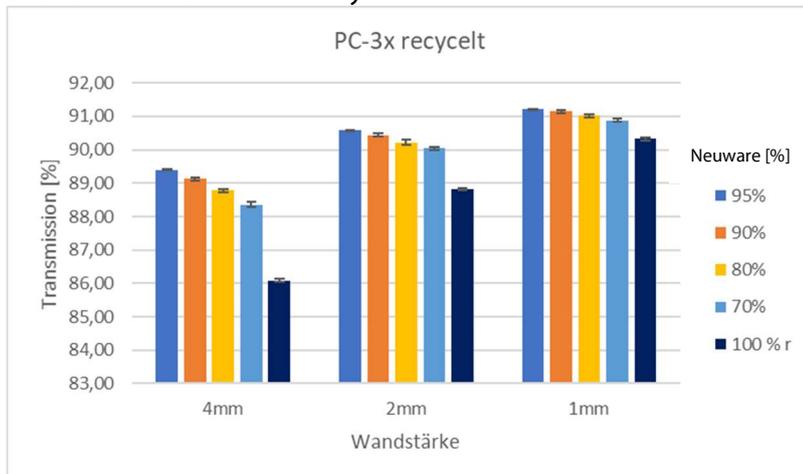


Abbildung 33: Transmission-Messergebnisse für PC – 3x recycelt

Bei PS ergeben sich ähnlich schlechte Transmissions- wie auch Haze-Werte. Der zulässige Transmissionswert bei PS beträgt 91%. Lediglich die Neuware für Formteile mit 1 mm Wandstärke erreicht diesen Grenzwert.

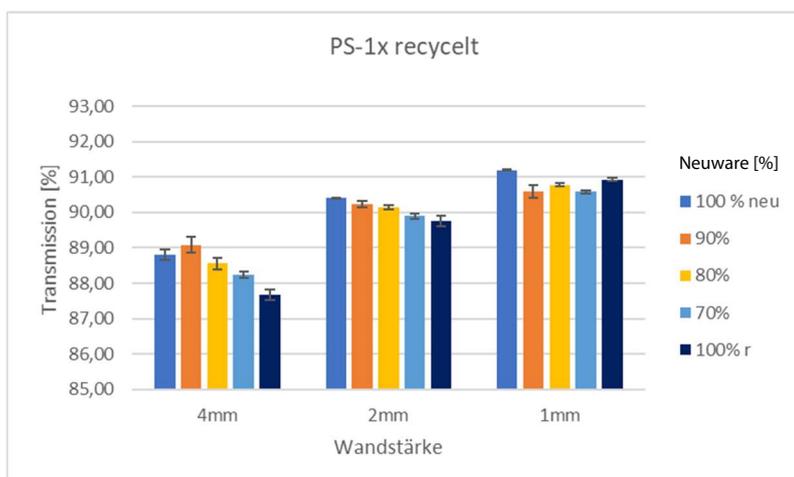


Abbildung 34: Transmission-Messergebnisse für PS – 1x recycelt

Alle anderen Mischungsverhältnisse sowie Recyclingdurchläufe liegen unterhalb dieses Wertes. Besonders bei einer Wandstärke von 4 mm ist ein drastischer Transmissionsabfall zu erkennen. (Abbildung 35).

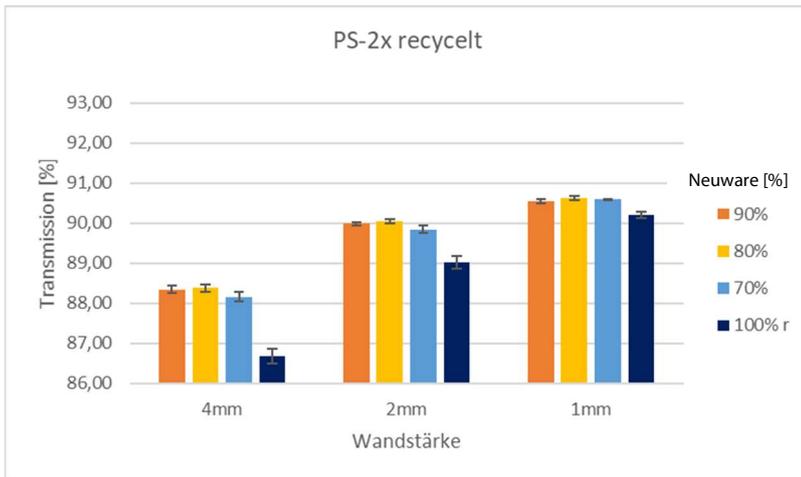


Abbildung 35: Transmission-Messergebnisse für PS – 2x recycelt

Auch hierbei fällt auf, dass die Transmissionswerte weniger stark von der Anzahl der Recyclingdurchläufe abhängen, sondern hauptsächlich von der Wandstärke. Aus den Diagrammen wird ersichtlich, dass PS nicht für das mechanische Recycling geeignet ist.

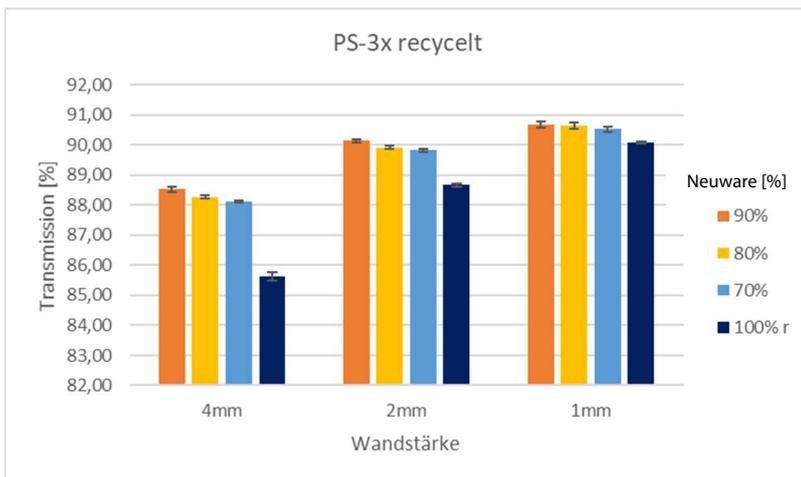


Abbildung 36: Transmission-Messergebnisse für PS – 3x recycelt

Neben den zwei, mit dem Transmissionsmessgerät ermittelten Werten, spielt der Gelbwert eine entscheidende Rolle in der Bewertung der Forschungsversuche. Der Gelbwert wurde mit dem Spektralphotometer bestimmt und wird über den Yellowness Index oder auch Vergilbungsindex YI ausgegeben. Er ist ein Maß für die Alterung eines Materials und äußert sich, entsprechend des Namens, in einem gelblich optischen Erscheinungsbild.

In Tabelle 3 sind die wichtigsten Details zum entsprechenden Prüfgerät zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht über die im Projekt verwendeten Prüfmethode und Prüfparameter

Prüfmethode, Prüfgerät	Eigenschaft	Prüfparameter
Farbmessung Spektrophotometer CM 5	Farbachse a*: Rot-Grün Farbachse b*: Gelb-Blau Farbachse L*: Weiß-Schwarz Farbabstand: dE*	DIN EN ISO 11664-4:2020-03 Messgeometrie Reflexion: 45/0 Messgeometrie Transmission: d/8 Wellenlängenbereich: (360 bis 740) nm Lichtart: D65 Beobachter: 10 ° Farbsystem: CIE L*, a*, b*

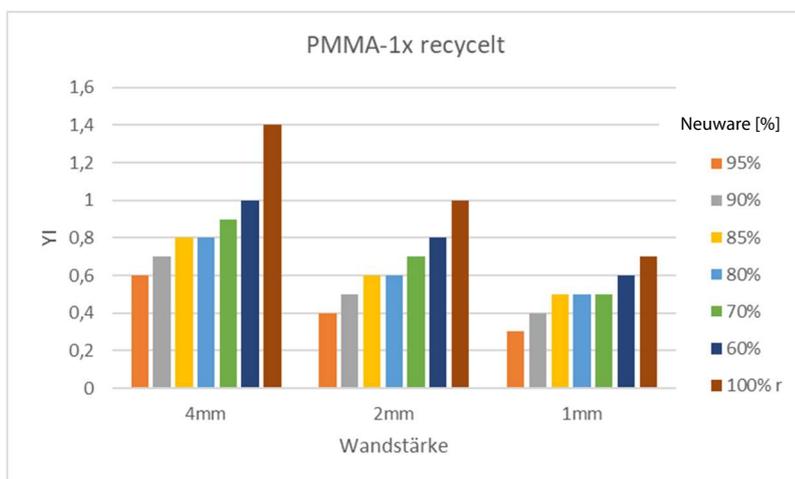


Abbildung 37: Gelbwert-Messergebnisse für PMMA – 1x recycelt

Entsprechend der Theorie steigt der Vergilbungsindex mit zunehmenden Rezyklatanteil. Bei PMMA fällt auf, dass der Vergilbungsindex ebenfalls abhängig von der Wandstärke ist. Je größer die Wandstärke, umso höher die Vergilbung. Dies ist auf die zunehmende Degradation, also das Zerbrecen der Molekülketten infolge der mechanischen und thermischen Belastung durch das Recycling und die erneute spritzgusstechnische Verarbeitung zurückzuführen.

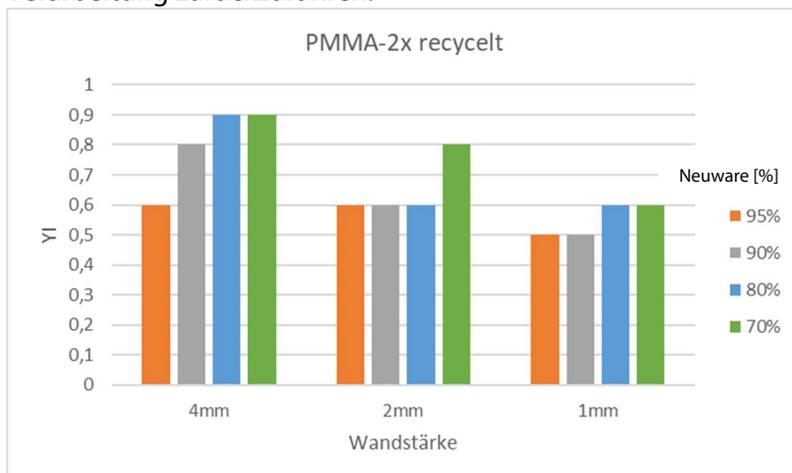


Abbildung 38: Gelbwert-Messergebnisse für PMMA – 2x recycelt

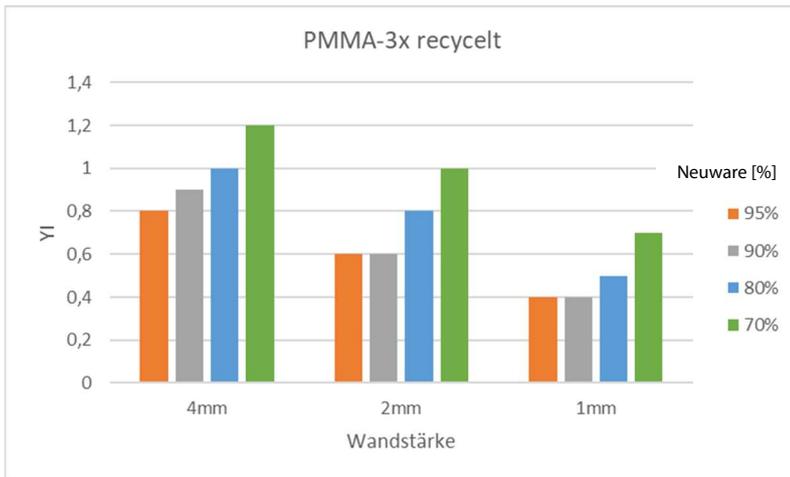


Abbildung 39: Gelbwert-Messergebnisse für PMMA – 3x recycelt

Vergleicht man die einzelnen Mischungsverhältnisse bei PMMA ist eine Zunahme des Vergilbungseffektes mit zunehmenden Recyclingdurchläufen festzustellen.

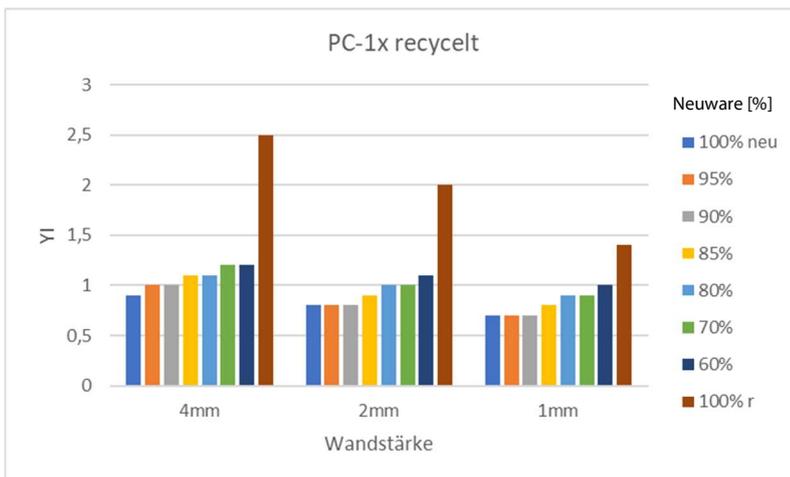


Abbildung 40: Gelbwert-Messergebnisse für PC – 1x recycelt

Die gleichen Schlussfolgerungen sind ebenso für die Gelbwertergebnisse von PC festzustellen. Hierbei sind die Werte sogar noch höher als bei PMMA.

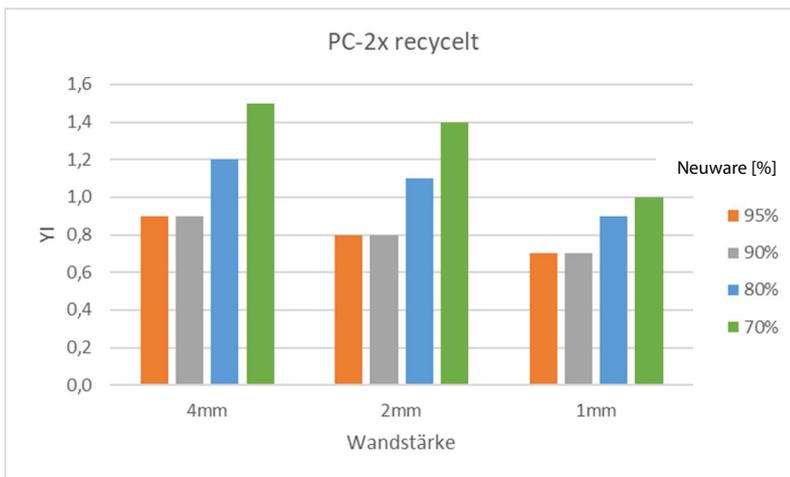


Abbildung 41: Gelbwert-Messergebnisse für PC – 2x recycelt

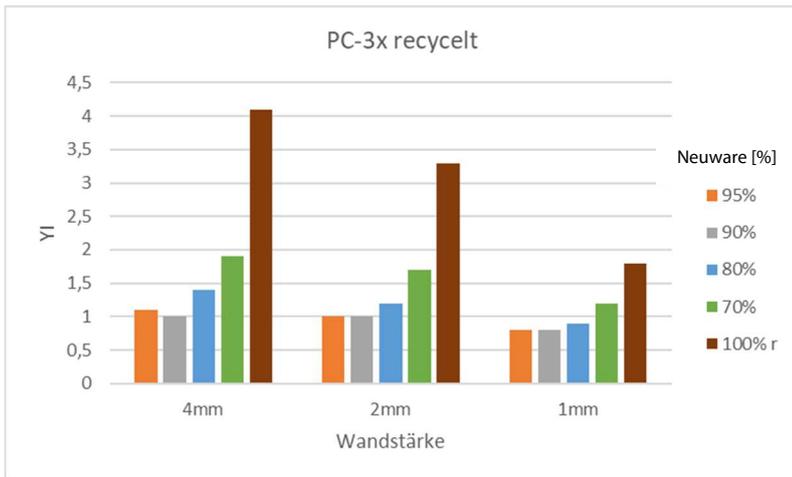


Abbildung 42: Gelwert-Messergebnisse für PC – 3x recycelt

Bei Polystyrol konnte die Vergilbung bereits bei hohen Rezyklatanteilen mit einfach recyceltem Material mit bloßem Auge festgestellt werden. Dies spiegelt sich auch in den Messergebnissen wieder.

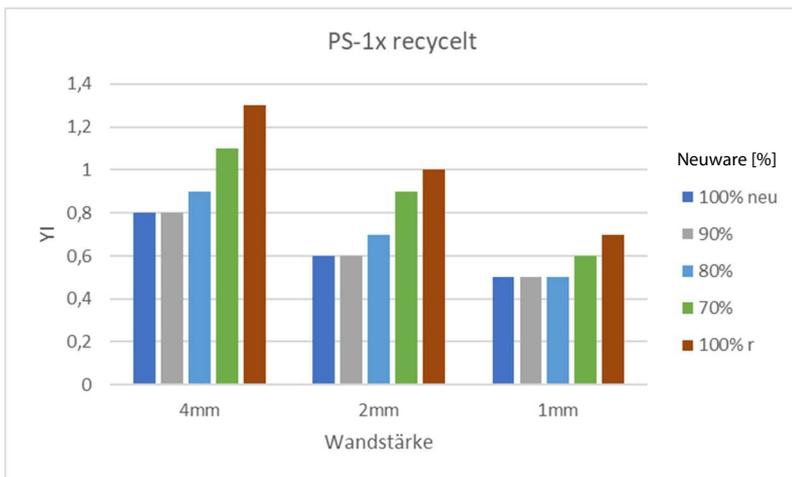


Abbildung 43: Gelwert-Messergebnisse für PS – 1x recycelt

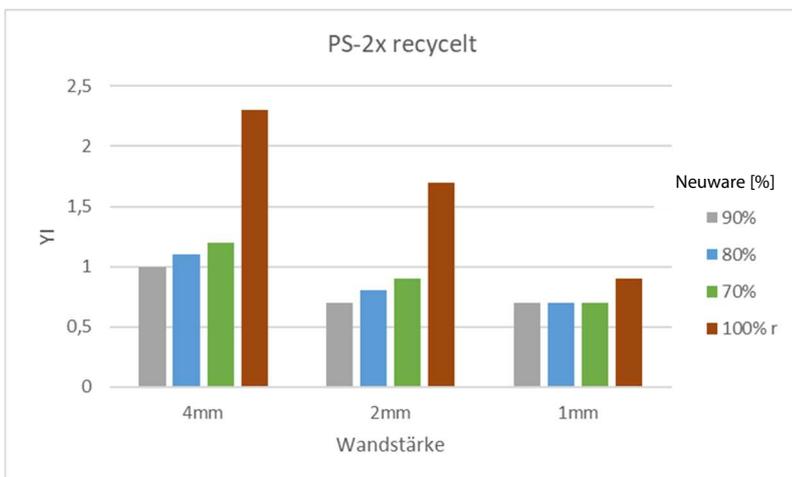


Abbildung 44: Gelwert-Messergebnisse für PS – 2x recycelt

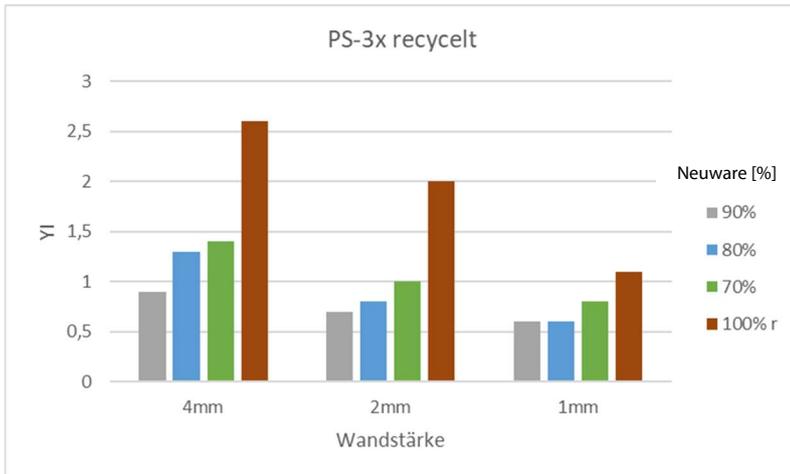


Abbildung 45: Gelbwert-Messergebnisse für PS – 3x recycelt

Neben den genannten optischen Untersuchungen wurden Alterungsversuche durchgeführt, um den Einfluss der Rezyklatmenge und der Häufigkeit der mechanischen Recyclingdurchläufe auf die Lebensdauer der Formteile beurteilen zu können. Dabei wurde der Einfluss auf den Gelbwert aufgrund von Abbauerscheinungen der transparenten Kunststoffe infolge von UV-C-Strahlung untersucht.

Es ist allgemein bekannt, dass es unter der Einwirkung von UV-A- und UV-B-Strahlung zur Degradation von Kunststoffen kommt. Hierbei werden neben chemischen Veränderungen (Kettenspaltung, Vernetzungen, Bildung neuer funktioneller Gruppen) auch Veränderung der optischen Eigenschaften (Vergilbung, Ausbleichen, Risse) und Veränderung der mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Dehnbarkeit, Zähigkeit) in den Materialien hervorgerufen. Ähnliche Mechanismen sind bei der Belastung mit UV-C-Strahlung zu erwarten.

Für die Kunststoffe wurde die Farbe in Transmission gemessen. Der Farbabstand dE^* , der sich aus der Veränderung der Einzelfarbwerte errechnet, stieg bei allen geprüften Kunststoffen bereits nach kurzen Bestrahlungszeiten deutlich an. Die Kunststoffproben wurden insgesamt 7 Tage der UVC-Belastung ausgesetzt. Als Proben wurden lediglich Prüfkörper der jeweiligen Kunststoffsorten verwendet, welche 3-fach recycelte Rezyklatanteile beinhalteten, um maximale Gelbwerte erzielen zu können. Der Vergilbungsindex steigt wie folgt an:

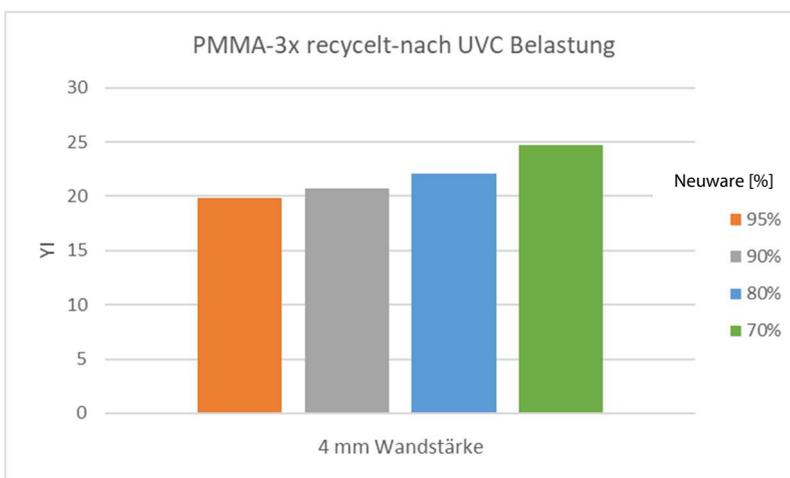


Abbildung 46: UVC Gelbwert-Messergebnisse für PMMA – 3x recycelt

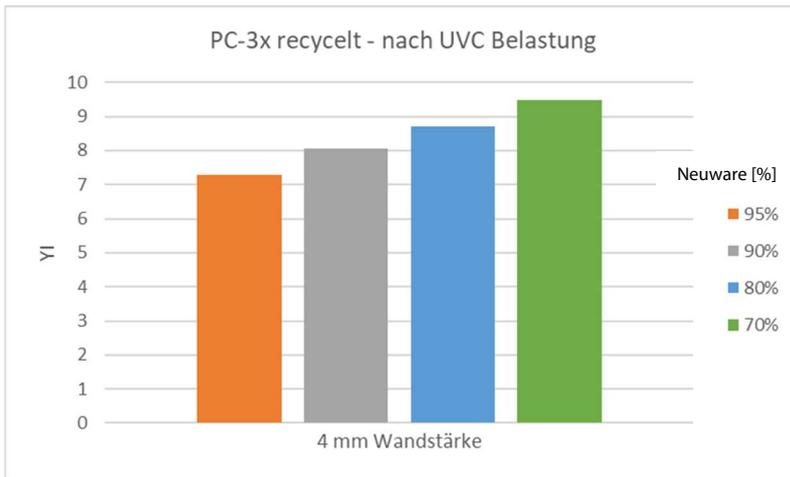


Abbildung 47: UVC Gelbwert-Messergebnisse für PC – 3x recycelt

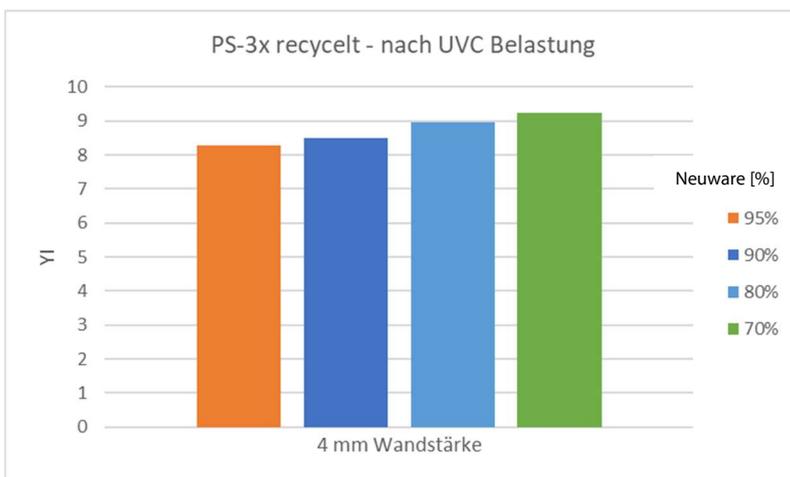


Abbildung 48: UVC Gelbwert-Messergebnisse für PS – 3x recycelt

Bei allen Kunststofftypen erhöhten sich die Gelbwerte, um ein Vielfaches und es kam zu einer deutlichen Steigerung der Sprödigkeit, der Rissbildung und des Verzugs. Dies sind alle Indikatoren für eine sehr starke Degradation des Kunststoffes.

Dahingehend kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass eine längere Nutzung dieser transparenten Polymere mit Rezyklatanteil unter der Einwirkung von UVC-Strahlung ausgeschlossen werden muss.

AP 7: Generierung eines Modells zur Vorhersage der Formteilqualität mit STASA QC

Um den unmittelbaren Bezug zur praktisch genutzten Spritzgießmaschine herzustellen, wurden Ansätze zur softwarebasierten Optimierung mit STASA QC verfolgt. Ebenso wie der Einsatz der Spritzgießsimulation erfolgte dies mit dem Ziel, die nicht-linearen Zusammenhänge beim Spritzgießen zu erfassen und schneller zum Optimum in den Prozesseinstellungen zu finden. [5, 6]

Die Software STASA QC ist zur Arbeitspunktoptimierung und optional auch zur Online-Qualitätsprognose mit integrierter Prozessüberwachung einsetzbar. Im Rahmen des Projektes wurde die Funktion der Arbeitspunktoptimierung genutzt. [1] Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

1. Definition der relevanten Maschineneinstellgrößen

2. Definition der Qualitätsmerkmale für das konkrete Formteil¹
3. Generierung des Versuchsplans mit 5 Zyklen je Einstellung
4. Durchführung der Versuche
5. Erstellung der Datenbasis aus den ermittelten Qualitätsdaten
6. Automatische Generierung des Prozessmodells
7. Arbeitspunktoptimierung nach vom Nutzer vorgegebenen Kriterien

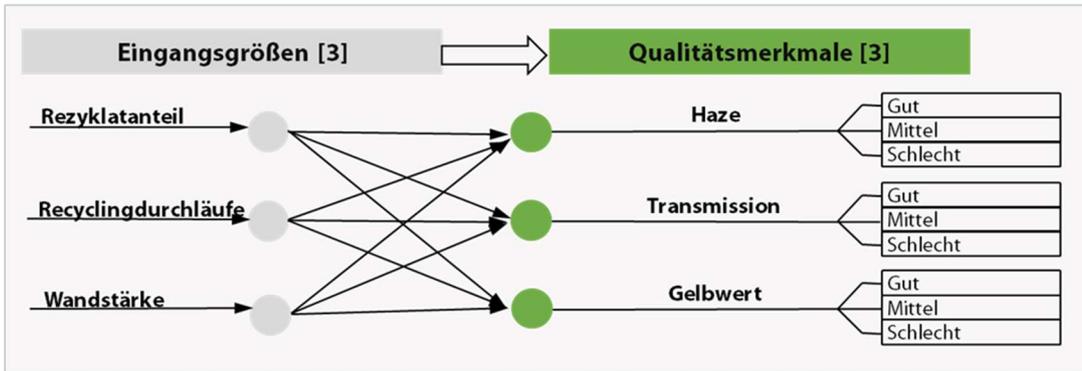


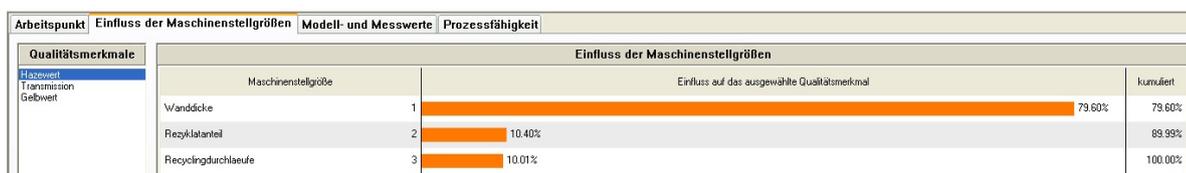
Abbildung 49: STASA QC Qualitätsdaten-Modell

Für die Arbeitspunktoptimierung wurden für die jeweiligen Materialien die entsprechenden Grenzwerte aus den Datenblättern als Zielwerte verwendet.

Tabelle 3: Übersicht über die Qualitätsmerkmale der jeweiligen Kunststofftypen

Kunststofftyp	Haze [%]	Transmission [%]	Gelbwert [-]
PMMA	0,5	92	0,9
PC	0,8	89	0,9
PS	0,3	91	0,9

Im Ergebnis der zielorientierten Arbeitspunktoptimierung erhält der Nutzer eine Aussage, mit welcher Wertigkeit die einzelnen Maschineneinstellgrößen jedes Qualitätskriterium beeinflussen. Abbildung 50 zeigt die Sensitivität der Qualitätsmerkmale bezüglich Änderungen der Maschineneinstellgrößen bei der Herstellung des Formteils aus PMMA. Die Wanddicke ist beim Haze-Wert und der Transmission der größte Einflussfaktor auf die Qualität, während beim Gelbwert die Anzahl der Recyclingdurchläufe entscheidend ist.



¹ Die Qualitätsmerkmale können sowohl kontinuierliche als auch attributive Merkmale sein.

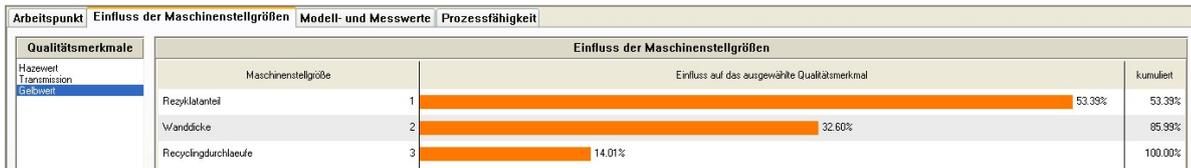
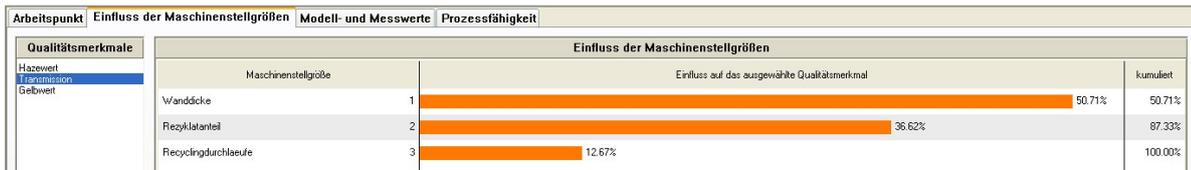


Abbildung 50: Einfluss der Maschineneinstellgrößen auf die optischen Eigenschaften im Spritzgießzyklus für PMMA

Dazu liefert die Software technologische Vorgaben, welche die optimalen Einflussgrößen auf die gesetzten Toleranzwerte im Prozess liefern. Neben dieser Empfehlung (rote Linie in Abbildung 51) werden noch weitere Alternativen geboten, wie in der Abbildung dargestellt ist. Die Werte können beliebig variiert werden. Zur Veranschaulichung wurde ein Rezyklatanteil von 20 %, welches 3-mal recycelt wurde für eine Wandstärke von 2 mm ausgewählt.

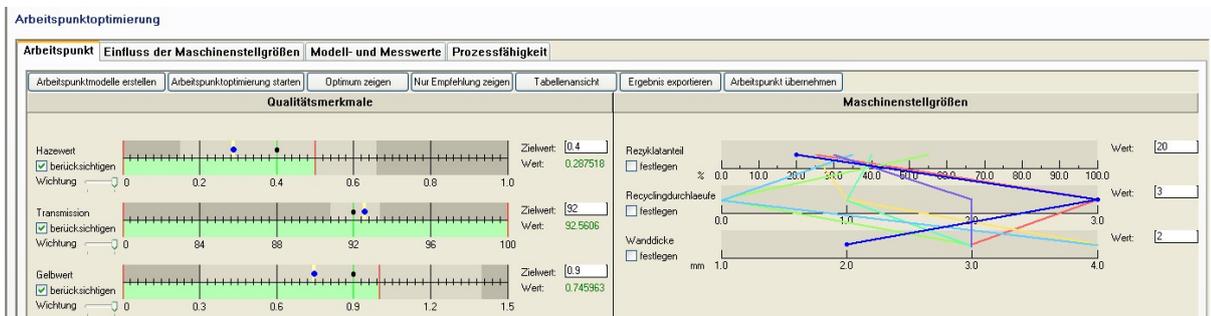


Abbildung 51: Empfohlene Maschineneinstellgrößen für PMMA für ein ausgewähltes Beispiel

Die dargestellten Ergebnisse belegen die Erkenntnisse aus den praktischen Versuchen und stellen graphisch eindeutig die Abhängigkeiten der Maschineneinstellgrößen auf die optischen Eigenschaften dar.

Diese Abhängigkeiten bestätigten sich ebenso bei den Ergebnissen von PC:

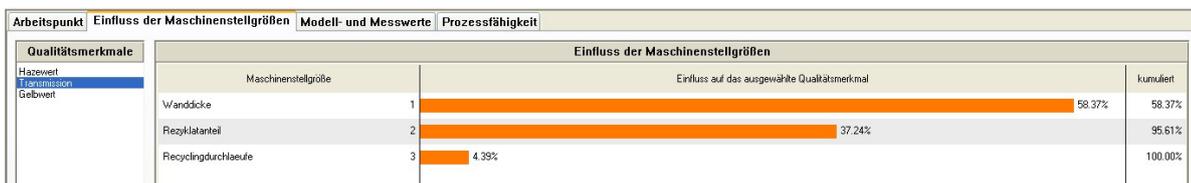
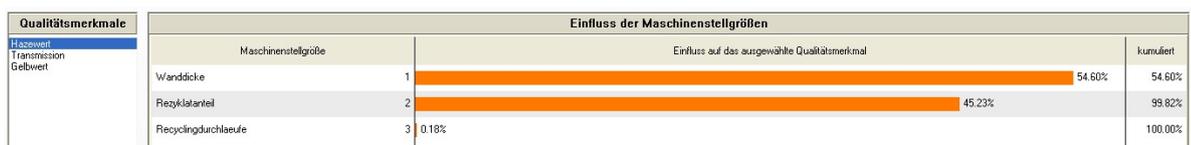


Abbildung 52: Einfluss der Maschineneinstellgrößen auf die optischen Eigenschaften im Spritzgießzyklus für PC

Ähnlich wie bei PMMA hat die Wandstärke den größten Einfluss auf die Optik. Auffällig ist jedoch, dass der Rezyklatanteil sich negativer auf die Ergebnisse auswirkt als bei PMMA.

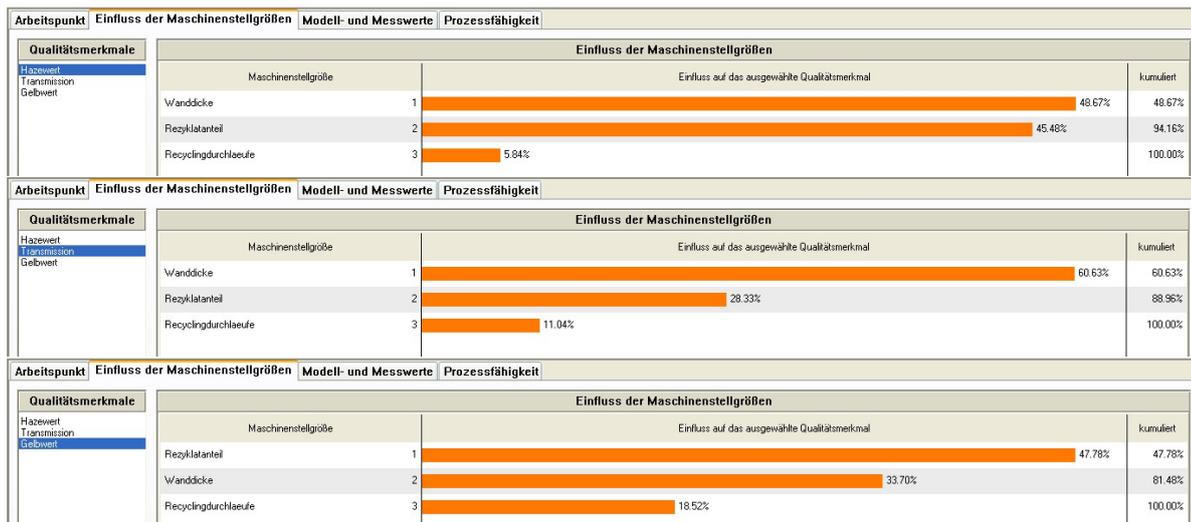


Abbildung 53: Einfluss der Maschineneinstellgrößen auf die optischen Eigenschaften im Spritzgießzyklus für PS

Dieselben Erkenntnisse können bei PS getroffen werden. Neben der Wandstärke hat der Rezyklatanteil den größten Einfluss, während die Anzahl der Recyclingdurchläufe bei allen drei Materialien wenig Auswirkungen auf den Haze-Wert, die Transmission und den Gelbwert haben. Anhand der Ergebnisse von STASA QC kann ebenfalls die Schlussfolgerung getroffen werden, dass künftig weitere Versuche mit Recyclingdurchläufen > 3 durchgeführt werden müssen.

Verbreitung der Projektergebnisse

Der Technologietransfer findet in erster Linie durch die direkte Zusammenarbeit mit den Firmen aus dem projektbegleitenden Ausschuss statt. Explizit die Firmen Engel und Polyvantis haben die Bereitschaft erklärt weitere spritzgusstechnische Versuche mit Rezyklat bei transparenten Polymeren mit dem KUZ durchzuführen. Hierbei kann es sich sowohl um Dienstleistungen, Schulungen als auch weitere Forschungsvorhaben handeln. Im weiteren Projektablauf erfolgt eine Vorstellung der Projektergebnisse gegenüber Anwendern, Kunststoffverarbeitern, Werkzeugbauern und anderen interessierenden Firmen von transparenten Kunststoffen. Des Weiteren wird entsprechendes Präsentationsmaterial zu den Prinzipien, Vorteilen und Nutzen des Rezyklateinsatzes bei optischen Polymeren erarbeitet. Die Nutzung von Messeveranstaltungen, Tagungen und Foren führt zu weiterführenden Kontakten und zur Zusammenarbeit mit interessierten Firmen. Die bestehenden Kontakte zu geeigneten Arbeitskreisen der Industrie wie z. B. Optence und Optik & Photonik – IVAM eröffnen vielfältige Möglichkeiten zum Technologietransfer. Auch die Erarbeitung von Schulungs- und Weiterbildungsveranstaltungen im KUZ zum Thema der Verwendung von mechanischem Rezyklat und damit der zugehörigen Werkzeugtechnik ist ein wichtiger Teil des Technologietransfers.

Darüber hinaus sollen durch eine aktive Öffentlichkeitsarbeit weitere Interessenten gewonnen werden. Als zusätzliche Transferunterstützung dienen dabei:

- Publikationen in Fachzeitschriften,
- Veröffentlichungen des Forschungsthemas und der Ergebnisse im Internet über die Homepage des KUZ,
- Beiträge im KUZ-Newsletter,
- Nutzung von Messen (z. B. „Fakuma“, „K“, Medica und Compamed),
- Veröffentlichung auf Fachtagungen und
- Aufnahme dieser Thematik in den Produkt- und Leistungskatalog des KUZ.

Der ökologische Nutzen stellt die treibende Kraft in der Fortsetzung der Thematik dar. Wie im Projekt bewiesen wurde, ergeben sich für alle drei verwendeten Polymere die Möglichkeiten mechanisches PIR-Rezyklat in der Produktion einzubinden.

Fortführende Untersuchungen - Zukunftsausblick

Durch Absprachen mit den Firmen Engel und Polyvantis bestehen aufgrund der erfolgreichen Ergebnisse konkrete Planungen das Themengebiet des Rezyklateinsatzes bei transparenten Kunststoffen weitergehend zu untersuchen. Sowohl die prozentuale Rezyklatmenge als auch die Anzahl der Recyclingdurchläufe soll speziell bei PMMA erhöht werden. Dies kann im Rahmen von Dienstleistungen oder durch künftige Forschungsprojekte erfolgen. Die Durchführung solcher Verbundprojekte wird das Thema noch mehr in das Bewusstsein der kunststoffverarbeitenden Industrie befördern, da die Vorbehalte bzgl. des Rezyklateinsatzes mit den vorliegenden Projektergebnissen entkräftigt werden konnten.

Neben den bisher verwendeten Kunststoffen, welche in der Massenverarbeitung ihre Anwendung finden, sollen weitere transparente Kunststoffe untersucht werden, welche höhere Verarbeitungs- und Anwendungsbedingungen mit sich bringen. Ein langjähriger Partner des KUZ ist die Firma TOPAS, welche das transparente Polymer COC herstellt und vertreibt. Die verschiedenen COC-Typen finden in der Medizin, Optik, Diagnostik und Mikrofluidik eine große Anwendung. Somit sind auch hier ausreichende ökologische Einsparungspotentiale durch die Nutzung von mechanischem Rezyklat gegeben. Auch von Seiten TOPAS wurde die Bereitschaft gegeben erste Testversuche für das mechanische Recycling im KUZ durchzuführen. In Abhängigkeit der Ergebnisse können Überlegungen stattfinden weitergehende Versuche im Rahmen eines Forschungsprojektes durchzuführen.

Fazit

Die Versuche haben gezeigt, dass die Verwendung von mechanischem Rezyklat für die amorphen transparenten Kunststofftypen PMMA, PC bei jeweils unterschiedlichen Mischungsverhältnissen von Neuware zu Rezyklat und in Abhängigkeit der Häufigkeit der Recyclingdurchläufe des Rezyklates möglich ist. Lediglich PS erwies sich als ungeeignet für die Wiederverwendung. Die Bereitschaft zur Verwendung von Rezyklat bei der Herstellung transparenter Spritzgussformteile wurde infolge einer durchgeführten Umfrage gestärkt. Einige Firmen äußerten den Wunsch mehr Rezyklat verwenden zu dürfen, sind aber stark an Qualitätsanforderungen und strikte Normen mit engen Toleranzbereichen gebunden. Erfreulich ist, dass das Forschungsvorhaben deutlich macht, dass für PMMA und PC die Verwendung von mechanischem PIR-Rezyklat definitiv eine Option in darstellt und weitere Anknüpfungspunkte bereits bestehen.

Als Einflussfaktoren für die drei untersuchten optischen Eigenschaften Haze, Transmission und dem Gelbwert wurden die Wandstärke des spritzgegossenen Prüfkörpers, der prozentuale Anteil des Rezyklates und die Anzahl der Recyclingdurchläufe festgelegt. Für PMMA lässt sich zusammenfassend sagen, dass für dünne Formteile bis 2 mm Wandstärke ein Rezyklatanteil bis zu 30% zulässig ist. Bei größeren Wandstärken ist maximal eine Rezyklatmenge von 10 % verwendbar. Bezogen auf den Gelbwert darf maximal 20 % Rezyklat genutzt werden. Ähnliche Erkenntnisse konnten bei PC getroffen werden. Während der Haze-Wert bei allen Mischungsverhältnissen und Wandstärken im zulässigen Bereich liegt, verschlechterten sich die Transmissionswerte bei einer Wandstärke von 4 mm deutlich. Bei der Messung des Gelbwertes stellte sich heraus, dass lediglich ein Rezyklatanteil von max. 10 % unter dem Grenzwert von 0,9 liegt. Bei diesem Wert muss künftig mit entsprechenden Unternehmen evaluiert werden, welche Toleranzen beim Gelbwert in Abhängigkeit des herzustellenden Produktes gestattet sind. Insofern ein Gelbwert > 0,9 möglich ist, kann auch der Rezyklatanteil bei der Produktion erhöht werden. Für PS lässt sich klar resümieren, dass eine Hinzugabe von mechanischem Rezyklat nicht möglich ist. Sowohl die Haze- als auch die Transmissionsergebnisse waren bereits bei sehr geringen Mengen von einmal recyceltem Material über der Toleranzgrenze. Bezogen auf den Gelbwert konnte bereits ohne messtechnische Hilfsmittel eine Vergilbung des Materials nach dem Spritzgussprozess festgestellt werden. Dies bestätigte sich anschließend deutlich in den Gelbwertmessungen. Zur Verarbeitungstechnik muss zudem stets die Versuchsmusterung durchgeführt werden, d.h. die Prozessparameter in Abhängigkeit des Rezyklatanteils angepasst werden, da die Fließfähigkeit dahingehend ansteigt. Dies bestätigten die MVR-Messungen. Ebenso handelte es sich im Forschungsvorhaben um PIR-Rezyklat. Dieses Material wies durch die direkte Verarbeitung keine Verunreinigungen auf. Diese Erkenntnis wird durch die IR-Messungen und DSC-Untersuchungen gestützt. Zudem sorgte die Verwendung eines Granulatentstaubungsmoduls für gereinigtes Material vor der Spritzgussverarbeitung. Interessant wäre die weitergehende Untersuchung von PCR (Post-Consumer) Material.

Zusammenfassend sind die Ergebnisse für PMMA und PC erfreulich und widerlegen die grundlegende Skepsis der kunststoffverarbeitenden Industrie bezogen auf die Nutzung von mechanischem Rezyklat bei transparenten Formteilen. Es findet bereits ein Austausch für die Fortführung der Untersuchungen mit interessierten Unternehmen statt. Hierbei sollen bei PMMA höhere Recyclingdurchläufe getestet sowie andere transparente Kunststoffe gleichermaßen untersucht werden.

Somit ergeben sich bereits durch die Projektergebnisse und zukünftigen Planungen ein hohes Einsparpotential von Virgin-Material. Der CO₂-Fußabdruck könnte anhand der Ergebnisse für PMMA und PC um mindestens 10 % reduziert werden und diese Quote ist weiter ausbaufähig. Um das Bewusstsein der kunststoffverarbeitenden Industrie dahingehend zu schärfen, ist geplant die Ergebnisse über Fachzeitschriften, Fachmessen, Tagungen und in Schulungen des KUZ zu verbreiten.

Literaturverzeichnis

- [1] Recyclingware mit Food-Potenzial.- In: K-PROFI, 10/2021, S. 6ff.
 - [2] N.N.: Vertrauen in Rezyklate stärken.- In: K-Zeitung | Ausgabe 7 | 5. April 2022, S.22
 - [3] Baur, Erwin.; Harsch, Günther; Moneke, Martin: Werkstoff-Führer Kunststoffe, 11. Aufl. München : Hanser, 2019 ISBN 978-3-446-45798-0
 - [4] Hinse, Christoph; Simões, Nuno Ribeiro: Prozessabwägung zur Herstellung von optischen Bauteilen mittels Simulation: https://www.kunststoffweb.de/technologie-news/simpatec_prozessabwaegung_zur_herstellung_von_optischen_bauteilen_mitt_tn103452/.- abgerufen am 2024-01-04
 - [5] N.N.: STASA QC. Prospekt. Steinbeis Angewandte Systemanalyse GmbH
 - [6] Vortrag: Prof. Haag, P.: 1. Optimale Prozesseinrichtung und 100%ige Online Qualitätsüberwachung mittels effizienter branchenspezifischer KI-Software. Fachtagung: Digitalisierung/KI in der Kunststoffverarbeitung, Leipzig 06.06.2023
-