

Abschlussbericht

Erschließung des Recycling-Potenzials lackierter thermoplastischer Kunststoffe durch umweltfreundliche Laserentlackung

DBU-Aktenzeichen: 34843/01

von Prof. Dr.-Ing. Alexandru Sover & M. Eng. Markus Zink

Bewilligungsempfänger:



Kooperationspartner:



gefördert durch




Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Ansbach, August 2020

Projektkennblatt

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	34843/01	Referat	21	Fördersumme	125.000 €
Antragstitel		Erschließung des Recycling-Potenzials lackierter thermoplastischer Kunststoffe durch umweltfreundliche Laserentlackung			
Stichworte					
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
19 Monate	06.12.2018				
Zwischenberichte	30.07.2019	15.01.2020			
Bewilligungsempfänger	Hochschule für angewandte Wissenschaften Ansbach Residenzstr. 8 91522 Ansbach			Tel	0981/4877-527
				Fax	0981/4877-302
				Projektleitung Prof. Dr.-Ing. Alexandru Sover	
Kooperationspartner	HP-T Höglmeier Polymer-Tech GmbH & Co. KG Industriestraße 1 D - 91790 Raitenbuch			Bearbeiter M. Eng. Markus Zink	
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Aus Gründen des Klima-, Ressourcen- und Umweltschutzes müssen die Verwertungswege für Kunststoffe in Deutschland, aber auch weltweit, dringend verbessert werden. Dazu gehören lackierte Kunststoffteile, die fester Bestandteil zahlreicher Konsumgüter sind und besonders in der Bau- und Automobilindustrie sowie als Formteile für Möbel, Elektronik und Haushaltsgeräte weit verbreitet sind. Die Recyclingfirmen beklagen sich über die hohe Menge an lackierten Kunststoffen auf dem Markt.</p> <p>Solche Hybridsysteme bestehen aus zwei verschiedenen Materialtypen mit unterschiedlichen Eigenschaften, während die Thermoplaste wiederholt erwärmt und verformt werden können, verändern sich Duroplaste beim Erwärmen chemisch und bilden ein dreidimensionales Netzwerk. Nachdem sie erhitzt und geformt wurden, können sie nicht wieder erhitzt und umgeformt werden.</p> <p>Der einfachste Weg diese Hybridteile wiederzuverwenden, besteht darin sie zu schmelzen und daraus neue Teile herzustellen. Der Lack aus Duroplaste verursacht jedoch Restpartikel, die sich nicht schmelzen lassen. Diese ungeschmolzenen Partikel erzeugen eine geringe Qualität des recycelten Materials, welche nicht einmal für Kunststoffprodukte mittlerer Qualität geeignet sind.</p> <p>Die Lackierung dieser Bauteile erschwert das spätere Recycling massiv, so dass neue Technologien benötigt werden, um die Lackschicht von den Thermoplasten zu trennen.</p> <p>Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden umfangreiche Prüfungen zur Trennung der Lackschicht von verschiedenen Trägermaterialien mithilfe eines gepulsten Lasers mit unterschiedlichen Parametereinstellungen sowie einer anschließenden Charakterisierung der behandelten Oberflächen durchgeführt. Hierbei lag das Hauptziel in der klaren Abtrennung der Lackschicht von häufig verwendeten Standardthermoplaste, welche nur bei einer klaren Ablösung der Lackschicht mit einer hohen Qualität wiederverwertbar sind.</p>					

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die im Antrag dargestellten Arbeitspakete sind gemäß des festgelegten Zeitplans umgesetzt worden. In enger Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner wurden die im nachfolgenden Bericht dargestellten Forschungsarbeiten durchgeführt. Alle Werkstoffuntersuchungen und Entlackungsversuche wurden an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Ansbach durchgeführt. Die zu entlackenden Bauteile (lackierte Thermoplaste mit verschiedenen Geometrien und Lackierungen) und zugehörige Informationen wurden vom Antragsteller der Firma HP-T Högmeier zur Verfügung gestellt.

Ergebnisse und Diskussion

Die ausführlichen Untersuchungen zur Entfernung der Lackschicht von farbig lackierten Thermoplasten mittels Laser zeigten, dass die Ablösung der Lackschicht bei den meist verwendeten Standardthermoplasten vollständig möglich ist, während das empfindliche thermoplastische Substrat bei der Laserbearbeitung nicht beschädigt wird.

Nach der „Entlackung“ ist es möglich, die gereinigten thermoplastischen Teile wieder zu verwenden oder zurückzugewinnen, ohne die Qualität des recycelten Materials zu mindern. Das im Projektantrag formulierte Ziel der erfolgreichen Entlackung bei mindestens drei Standardthermoplaste mit unterschiedlichen Lackfarben wurde vollständig erfüllt.

Die Entfernung der Lackschicht ist nach Projektabschluss bei folgenden Thermoplaste rückstandslos möglich: ABS, PC/PET, PC/PBT, PP und PP/EPDM. Die Einstellungen des Laserstrahls können präzise angepasst werden, um den Prozess, seine Geschwindigkeit und die Belastung der Oberfläche zu optimieren. Auf diese Weise kann ein hochwertiges, wiederaufbereitetes Recyclingmaterial hergestellt werden.

Im Vergleich zu anderen Trennverfahren bietet diese Technologie große Vorteile: Sie ist einfach zu bedienen und leise, hat niedrige Betriebskosten und benötigt keine Verbrauchsmaterialien oder gar umweltgefährdende Medien (Schleifmittel, Chemikalien oder Lösungsmittel). Zudem sind außer dem Strahlenschutz keine besonderen Sicherheitsmaßnahmen erforderlich.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Mit der Öffentlichkeitsarbeit wurde auf Basis der Projektergebnisse intensive Gespräche mit Recyclingunternehmen, OEMs, Hersteller von Laseranlagen, usw. geführt. Die Projektergebnisse begünstigen diese Gespräche dahingehend, dass mit dem entwickelten Verfahren die verschiedensten lackierten Thermoplaste bearbeitet werden können und somit diese Technologie bei den unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt werden kann.

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten wurden zudem auf verschiedenen internationalen Konferenzen wie z.B. „Business meets Technology“ (Ansbach - Deutschland 2020), „Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Conference – IMANEE“ (Pitesti – Rumänien 2019), in mehreren Papern „Research on the Process of Paint Removal from Thermoplastic Materials by Laser“ [Sov19] bzw. „Study on the Process of Paint Removal from Thermoplastic Materials by Laser Technology“, im Poster „Paint Removal from Thermoplastic Materials by Laser Technology“, im Report „Kunststoffland NRW“ [Men20] sowie auf der Homepage [Hsa20] der Hochschule für angewandte Wissenschaften Ansbach vorgestellt.

Zudem werden die Erkenntnisse im Rahmen von verschiedenen Vorlesungen an berufsbegleitende Studenten des Studiengangs „Angewandte Kunststofftechnik“ und in Seminaren von Line-to-Circle des Biomasse-Instituts - eine gemeinsame Einrichtung der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf und der Hochschule Ansbach - weitergegeben.

Fazit

Die Entfernung der Lackschicht von thermoplastischen Materialien wird in Zukunft eine wichtige Rolle im Bereich des Kunststoffrecyclings spielen. Zum nachhaltigen Recycling von lackierten thermoplastischen Teilen ohne dabei Qualitätsverlust beim Recyclat zu erhalten, ist es unerlässlich die Lackschicht vom thermoplastischen Trägermaterial zu entfernen. Um die enormen Abfallmengen aus lackierten Kunststoffteilen zu bewältigen und gleichzeitig das Recyclat aufzubereiten, muss in Zukunft die „Laserentlackung“ in der Recyclingindustrie zur nachhaltigen Verarbeitung ihrer technischen Kunststoffe eingesetzt werden.

Die industrielle Laserentlackung könnte künftig von einschlägigen Recyclingunternehmen und kunststoffverarbeitenden Betrieben durchgeführt werden. Erstere könnten ihr Geschäftsmodell als Sekundärrohstofflieferant ausbauen, letztere ihre Ressourceneffizienz verbessern. Zudem erscheint ein Wissenstransfer über die Möglichkeiten des Verfahrens in die Entwicklungsabteilungen kunststoffverarbeitender Betriebe zielführend, damit die Recyclingfähigkeit von Bauteilen schon beim Produktdesign berücksichtigt werden kann.

Für die Optimierung der Entlackung hinsichtlich einer Industrialisierung dieses Prozesses sind aber noch weitere materialtechnische Untersuchungen an den zu entlackenden Materialien notwendig.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	2
Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	7
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen.....	9
1. Zusammenfassung.....	10
2. Einleitung.....	11
3. Hauptteil	13
3.1. Recherche	13
3.1.1 Thermoplastische Kunststoffe.....	13
3.1.2 Vorbehandlungsverfahren.....	15
3.1.2.1 Reinigen	15
3.1.2.2 Aktivierungsverfahren.....	15
3.1.3 Lacksysteme	16
3.2 Charakterisierung lackierter Bauteile	17
3.2.1 Thermogravimetrische Analyse – TGA	18
3.2.2 Dynamische Differenzkalorimetrie – DSC.....	20
3.2.3 Infrarotspektroskopie – FT-IR	23
3.2.4 Mikroskopie	24
3.3 Vorbereitung der Materialproben für die Entlackung	25
3.3.1 Elektroschere	26
3.3.2 Abschlagschere.....	27
3.4 Laserentlackung von Bauteilen mit unterschiedlichen Prozessparametern	28
3.5 Untersuchung und Charakterisierung der bearbeiteten Oberflächen	31
3.5.1 Optische Untersuchungen.....	31
3.5.2 Mechanische Untersuchung.....	33
3.5.3 Oberflächentopologie	37
3.5.4 IR-Untersuchung der entlackten Bauteile	38
3.6 Untersuchung zur Notwendigkeit weiterer Nachbearbeitungsschritte	39
3.6.1 Abbürsten mit Wasser.....	40
3.6.2 Strahlen mit Nusschalen	40

3.6.3	Strahlen mit Glasperlen.....	42
3.7	Laserentlackung weiterer Bauteile mit optimierten Prozessparametern.....	43
3.8	Untersuchung der entstehenden Prozessgase	46
3.9	Erstellung einer Datenbank.....	47
3.10	Ergebnisbewertung, Präsentation und Abschlussbericht.....	48
4	Fazit und Ausblick	49
5	Literaturverzeichnis	51

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Weltweite und europäische Produktionsmenge von Kunststoff in den Jahren von 1950 bis 2017 (in Millionen Tonnen) [Pla19]	13
Abbildung 2: Anteile an der Verwendung von Kunststoffen in Europa nach Einsatzgebieten in den Jahren 2016 bis 2018 [Pla21]	14
Abbildung 3: Anteile der verwendeten Plastiksarten in der europäischen Automobilindustrie im Jahr 2012 [Pla20]	14
Abbildung 4: Probentiegel nach der TGA-Messung	18
Abbildung 5: TGA-Kurve der Probe "Granulat"	19
Abbildung 6: TGA-Vergleich aller Auswertungskurven	20
Abbildung 7: DSC-Thermogramm der Probe "Granulat"	21
Abbildung 8: DSC-Kurvenvergleich aller Auswertungskurven	22
Abbildung 9: IR-Spektren der Proben "Rohteil (blaue Kurve)" und „lackiertes Bauteil (rote Kurve)“	23
Abbildung 10: Querschnitt des Prüflings	24
Abbildung 11: Probe in Harz eingebettet	24
Abbildung 12: Prüflinge nach dem Poliervorgang	24
Abbildung 13: Mikroskopische Bilder der eingebetteten Proben	24
Abbildung 14: Elektroschere der Firma Dräco	26
Abbildung 15: Mikroskopische Aufnahme der Schnittkante – Elektroschere (links: Lack zeigt beim Trennen nach oben; rechts: Lack zeigt beim Trennen nach unten)	26
Abbildung 16: Abschlagschere	27
Abbildung 17: Trennung von dreidimensionalen Bauteilen mit der Abschlagschere	27
Abbildung 18: Stoßstange aus Polypropylen (PP) (links) Herstellungs- und Materialinformationen (rechts)	28
Abbildung 19: 50 Watt Faserlaser der Fa. Coherent/Rofin	28
Abbildung 20: Anwendung des Applikationsassistenten auf die PP-lackierten Kunststoffteile	29
Abbildung 21: Trennung der Lackschicht von der bearbeiteten Oberfläche	30
Abbildung 22: Laserbearbeitung einer 20 mm x 20 mm großen Oberfläche mit Farbabtrag	30
Abbildung 23: Großflächige Entlackung einer Fläche von bis zu 240 mm x 240 mm	30
Abbildung 24: Entlackte Teile einer Stoßstange, Abbildung links: Lackfarbe schwarz, Abbildung rechts: Lackfarbe rot – jeweils auf der linken Seite die abgetrennte Duroplast-Folie und auf der rechten Seite das entlackte Trägermaterial	31
Abbildung 25: Originalzustand – unbearbeitetes Bauteil in der Lackfarbe rot	31
Abbildung 26: Mit dem Laser bearbeitetes Bauteil in der Lackfarbe rot	32
Abbildung 27: Mikroskopie der mit dem Laser bearbeiteten Oberfläche	32
Abbildung 28: Rohmaterial (a), Bauteil unlackiert (b), Bauteil entlackt (c), Bauteil lackiert (d), Bauteil nachbehandelt (entlackt + gereinigt) (e)	33
Abbildung 29: Diagramm der Werte der Variante Rohmaterial mit den Achsen Belastung in [N] und Verformung in [mm]	35
Abbildung 30: Digitalmikroskop der Hochschule Ansbach	37
Abbildung 31: Oberflächen der laserbearbeiteten Bauteile (Trägermaterial ABS) (links: unbeschädigt, mitte: leicht beschädigt, rechts: beschädigt)	37
Abbildung 32: Dreidimensionales Höhenprofil eines entlackten Bauteils	38
Abbildung 33: IR-Spektren der Proben "Rohteil" und "entlackt"	39
Abbildung 34: Entlacktes und nachbearbeitetes Bauteil	39
Abbildung 35: Mikroskopische Aufnahme der Bauteiloberfläche nach dem Bürsten	40
Abbildung 36: Saugstrahlkabine (links: Außenansicht; rechts: Innenansicht)	41
Abbildung 37: Vorderseite Bauteil vor (links) und nach (rechts) dem Strahlen	41
Abbildung 38: Mikroskopische Aufnahme der Oberfläche der Vorderseite	42

Abbildung 39: Vorderseite (links) und Rückseite (rechts) des Bauteils nach dem Strahlen mit Glasperlen	42
Abbildung 40: Mikroskopische Aufnahme der Vorderseite (links) und Rückseite (rechts) des Bauteils	43
Abbildung 41: Farblich lackierte Thermoplasten (Trägermaterial PP/EPDM) mit verschiedenen Lackfarben	43
Abbildung 42: Mit den optimalen Laserparametern wird eine Fläche von 50 mm x 50 mm bearbeitet.	44
Abbildung 43: Großflächige Entlackung (20 mm x 30 mm) von PC/PBT	44
Abbildung 44: Optimierung der Entlackungsgeschwindigkeit	45
Abbildung 45: Optimierung der Entlackungsgeschwindigkeit	45
Abbildung 46: Großflächige Entlackung (130 mm x 130 mm)	46
Abbildung 47: IR Spektrum der Prozessgase	47
Abbildung 48: Neuer Stoffkreislauf zur Rückgewinnung und Wiederverwendung des thermoplastischen Materials	49
Tabelle 1: Probenbezeichnung für die Messungen	17
Tabelle 2: Datensatz der ersten TGA-Messung	19
Tabelle 3: Werte aus den Thermogrammen nach der Messung bis 310°C	22
Tabelle 4: Mittelwerte der Schichten in µm	25
Tabelle 5: Vergleich der Verfahren zur Trennung der Bauteile	25
Tabelle 6: Vergleich der durchschnittlichen MFR Werte der fünf Varianten	34
Tabelle 7: Vergleich der vorgetrockneten Varianten Rohmaterial und Bauteil unlackiert	35
Tabelle 8: Vergleich der durchschnittlichen maximalen Belastung und der durchschnittlichen maximalen Verformung bis zum Bruch der fünf Varianten	36
Tabelle 9: Auszug Datenbank	47

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

°C	Grad Celsius
A	Ampere
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie
EU	Europäische Union
FT-IR	Fourier-Transformation-Infrarot
g	Gramm
HPPE	High Performance Polyethylene
IR	Infrarot
ISO	Internationale Organisation für Normung
K	Kelvin
kHz	Kilohertz
LDPE	Low Density Polyethylen
LLDPE	Linear Low Density Polyethylen
m ²	Quadratmeter
MFR	Melt Flow Rate
mg	Milligramm
min	Minute
MIR	Mittleres Infrarot
mm	Millimeter
MVR	Melt Volume Rate
N ₂	Stickstoff
N	Newton
ns	Nanosekunde
O	Sauerstoff
PC/PBT	Polycarbonat/Polybuthylenterephthalat
PC/PET	Polycarbonate/Polyethylenterephthalat
PKW	Personenkraftwagen
PP	Polypropylen
PP/EPDM	Polypropylen/Ethylen-Propylen-Dien-Monomer
PUR	Polyurethan
TGA	Thermogravimetrische Analyse
UP	Ungesättigtes Polyester
UV	Ultraviolett

1. Zusammenfassung

Im Forschungsvorhaben „Erschließung des Recycling-Potenzials lackierter thermoplastischer Kunststoffe durch umweltfreundliche Laserentlackung“ mit dem DBU-Aktenzeichen 34843/01 wird im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefordertes Kooperationsprojekt mit den beiden Projektpartner Firma HP-T Höglmeier sowie der Hochschule für angewandte Wissenschaften Ansbach eine innovative Methode zur Entfernung der Lackschicht von thermoplastischen Bauteilen entwickelt und erprobt. Um lackierte thermoplastische Teile wie Stoßfänger, Kotflügel oder Kühlergrill ohne Qualitätsverlust des Recyclats zu recyceln, ist es unerlässlich, den Duroplastlack vom thermoplastischen Trägermaterial zu trennen.

Die ausführliche Untersuchung zur Entfernung der Lackschicht von farbig lackierten Thermoplasten mittels Laser zeigten, dass die Ablösung der Lackschicht bei den meist verwendeten Standardthermoplasten vollständig möglich ist, während das empfindliche thermoplastische Substrat nicht beschädigt wird. Zur materialtechnischen Aufbereitung ist eine Entfernung der Lackschicht vom thermoplastischen Trägermaterial vor dem eigentlichen Recycling unumgänglich, denn ohne die Entlackung zerfällt der Lack beim Wiederverwerten in kleine Partikel und vermindert die Qualität der Recyclingprodukte massiv. Die Laser-Reinigungstechnik zeigt sehr gute Ergebnisse bei der Entfernung der Lackschicht von empfindlichen thermoplastischen Materialien, ohne die Oberfläche zu beschädigen. Flächen von bis zu 240 mm x 240 mm wurden mit sehr guten Ergebnissen bearbeitet.

Im Vergleich zu anderen Trennungverfahren bietet diese Technik große Vorteile: Sie ist einfach zu bedienen und leise, hat niedrige Betriebskosten und benötigt keine Verbrauchsmaterialien oder gar umweltgefährdende Medien (Schleifmittel, Chemikalien oder Lösungsmittel). Die Einstellungen des Laserstrahls können präzise angepasst werden, um den Prozess, seine Geschwindigkeit und die Belastung der Oberfläche zu optimieren. Zudem kann der Prozess leicht automatisiert werden. Auf diese Weise kann ein hochwertiges wiederaufbereitetes Recyclingmaterial gewonnen werden.

Die industrielle Laserentlackung könnte künftig von einschlägigen Recyclingunternehmen und kunststoffverarbeitenden Betrieben durchgeführt werden. Erstere könnten ihr Geschäftsmodell als Sekundärrohstofflieferant ausbauen, letztere ihre Ressourceneffizienz verbessern. Zudem erscheint ein Wissenstransfer über die Möglichkeiten des Verfahrens in die Entwicklungsabteilungen kunststoffverarbeitender Betriebe zielführend, damit die Recyclingfähigkeit von Bauteilen schon beim Produktdesign berücksichtigt werden kann und somit ein hochwertiges stoffliches Recycling von Thermoplasten zu realisieren.

An das Vorhaben anknüpfend können weitere Forschungsfragen mit hoher Praxisrelevanz bearbeitet werden. Beispielsweise sind Unternehmen bereits jetzt interessiert an der Entwicklung besonders recyclingfreundlicher Lacksysteme.

Für die Optimierung der Entlackung hinsichtlich einer Industrialisierung dieses Prozesses sind noch weitere Untersuchungen an den zu entlackenden Materialien sowie an den benötigten Anlagen notwendig.

2. Einleitung

Aus Gründen des Klima-, Ressourcen- und Umweltschutzes müssen die Recyclingpfade und -quoten für Kunststoffe in Deutschland, aber auch weltweit dringend verbessert werden. Dies fordert u.a. die Anfang 2018 veröffentlichte Kunststoffstrategie der EU. Eine der größten technischen Hürden ist dabei das Recycling von Kunststoffverbunden. Zu diesen zählen auch alle lackierten Kunststoffbauteile, die Bestandteile zahlreicher Gebrauchsgüter sind und besonders im Bauwesen, im Automobilbau und als Formteile für Möbel, Elektronik- und Haushaltsgeräte weit verbreitet sind. Besonders in der Automobilindustrie werden solche thermoplastischen Teile mit duroplastischen Beschichtungssystemen verwendet, um ein schönes optisches Design mit verschiedenen Farben und einer guten Beständigkeit für verschiedene Oberflächenspannungen zu erzeugen. Das Recycling von lackierten Kunststoffteilen wie Stoßstangen, Kotflügeln, Kühlergrill usw. ist aber immer noch eine Herausforderung für die Industrie. In der Entsorgungspraxis sind lackierte Kunststoffbauteile bisher kaum verwertbar. Manche Entsorgungsbetriebe berichten von Mengen im Tonnenmaßstab, die sie mangels Vermarktbarkeit zwischenlagern müssen.

Nach dem Gebrauch werden sie bisher verbrannt oder in zermahlener Form als niederwertiger Füllstoff verwendet; der Bedarf für letzteres ist nur begrenzt. Dabei sind besonders reine Thermoplaste an sich hervorragend wiederverwertbar, da sie mehrfach geschmolzen und umgeformt werden können. Doch die Lackierung, welche die Haltbarkeit und Funktionalität in der Gebrauchsphase erheblich verbessert, erschwert das spätere Recycling massiv. Eine signifikante Fraktion von Kunststoffabfällen war nie in Gebrauch, allein 856.000 Tonnen Kunststoffabfälle entstehen jährlich bei Kunststoffverarbeitern (z.B. bei Extrusion, Spritzgießen, Lackieren) oder Weiterverarbeitern (z.B. im Fenster- und Möbelbau). [Con16] Zulieferer für die Automobilindustrie müssen teils mehr als zehn Prozent ihrer Produktion wegen höchster Qualitätsansprüche aussondern; dies betrifft auch Produktionsausschüsse, einen Abfallstrom mit besonderem Potenzial:

Die entsprechenden Abfallströme sind leicht sammelbar und qualitativ hochwertig, da nicht gealtert. Sie nur minderwertig zu verwerten erscheint keine angemessene Lösung. Gerade aus Produktionsausschuss, aber auch aus weiteren gut erfassbaren bzw. qualitativ hochwertigen Kunststoffbauteilen könnten künftig signifikante Mengen an hochwertigem Rezyklat entstehen, indem thermoplastische Bauteile entlackt und als Granulat verwertet werden.

Lackierte Kunststoffbauteile sind Verbundsysteme aus einem duroplastischen Lacksystem (z.B. Alkyd-, Epoxid-, Polyurethanharz) und thermoplastischen, duroplastischen oder elastomeren Polymerwerkstoffen [Hil16] [Ste03]. Thermoplaste sind besonders weit verbreitet, so sind z.B. fast alle lackierten Kunststoffbauteile in der Automobilindustrie thermoplastische Polymerwerkstoffe (z.B. ABS, PP, usw.) [Ste03]. Für ein werkstoffgerechtes Recycling ist eine Entfernung der Lackschicht unumgänglich, denn ohne eine Abtrennung des Lacks zerfällt dieser in kleine Partikel und vermindert die Qualität des Recyclates massiv. Die Lackpartikel unterbrechen den geschlossenen Werkstoffverbund und sind Ausgangsstellen für Anrisse [Löh02]. Materialien aus zuvor nicht entlackten Kunststoffen haben nur sehr geringe Zugfestigkeit, Kerbschlag-Zähigkeit sowie Reiß- und Bruchdehnung im Vergleich zum Original-Kunststoff [Löh02]. Zudem sind diese Kunststoffe für Sichtbauteile nicht geeignet, da Lackreste an der Bauteiloberfläche erscheinen und unerwünschte Effekte verursachen.

In vielen Industriezweigen ist die Verwendung lackierter Kunststoffbauteile stark angewachsen. Sie sind leicht, können günstig und in vielfältigen Geometrien, Farben und Oberflächengüten produziert werden. Oft werden sie zusätzlich lackiert, um weitere Eigenschaften zu erzielen, wie individuelle Farbgebung, mehr Glanz, mehr Farbbrillanz oder Schutz gegen Witterung und Alterung durch UV-Licht, Temperatur und Feuchtigkeit [Sta20].

Die Produktionsmengen machen den großen Handlungsbedarf sichtbar. In Deutschland wurden im Jahr 2015 rund 9,4 Millionen Tonnen thermoplastischer Kunststoffe als Werkstoffe verarbeitet, davon rund 2 Millionen Tonnen im Baubereich, 1 Million Tonnen für Fahrzeuge und 0,5 Millionen Tonnen im Bereich Elektro/Elektronik [Con16]; ein signifikanter Anteil davon wird lackiert.

Allein die Jahresproduktion an lackierten Heckspoilern in Deutschland schätzt ein führender Hersteller auf derzeit rund 250 Tonnen. Angesichts der hervorragenden Werkstoffeigenschaften von Thermoplasten (z.B. Leichtbau, hochflexible Formgebung und Funktionalisierung) wird eine weiter steigende Verwendung erwartet. Beispielsweise beträgt der Kunststoffanteil in PKW heute bereits rund 18% und soll in den nächsten Jahren auf deutlich über 20% steigen [Ind14]; in einem typischen PKW werden danach rund 200-300 kg Kunststoffe verbaut.

Gängige Entlackungsverfahren bringen bei der Entlackung thermoplastischer Bauteile bisher technisch unbefriedigende Ergebnisse, wirtschaftliche Nachteile und/oder erhebliche Umweltbelastungen mit sich [Löh02] [Hal85] [The20] [Cle20].

Bei der thermischen Entlackung von Thermoplasten werden diese aufgeschmolzen und die Lackreste abgetrennt. Dazu wird das Bauteil zermahlen und im Extrusionsverfahren über ein Sieb (Schmelzfilter) gedrückt, welcher die Lackreste abfiltriert. Nachteile des Verfahrens sind ein hoher Maschinenenergiebedarf und die partielle Unterbrechung des Prozesses beim Filterwechsel [The20]. Zudem führen die hohe Extrusionstemperatur und der starke Differenzdruck am Sieb zur degradativen Schädigung der Polymere [Löh02], zudem wird keine vollständige Trennung erreicht. Schätzungen zufolge werden bis zu 20% der Lackreste nicht vom Thermoplast abgefiltert.

Beim nasschemischen Verfahren werden die Teile meist im Tauchverfahren mit Chemikalien wie Säure oder Lauge behandelt. Unter zusätzlichem mechanischem Einfluss (z.B. Ultraschall) oder Erhitzung wird die Bindschicht des Lackes angegriffen, der Lack zerfällt und wird von seinem Untergrund getrennt [The20]. Die Verfahren liefern eine gute Entlackungsqualität, erfordern aber einen weiteren Prozessschritt zur Reinigung der Oberfläche. Zudem fordern sie besondere Sicherheitsmaßnahmen bei der Bearbeitung sowie die angemessene Entsorgung der teils aggressiven, umweltschädlichen Lösungen.

Mechanische Verfahren wie das Strahlentlacken, die Stickstoff- oder Hochdruckwasserstrahl-Entlackung ermöglichen eine werkstoffgerechte Trennung, sind jedoch zeitintensiv und daher für großvolumige Entlackung unwirtschaftlich. Daher werden sie bisher eher für kleine Oberflächen und lokale Bearbeitungen eingesetzt. Beim Strahlentlacken wird ein Strahlmittel mit hoher Geschwindigkeit auf die zu behandelnde Oberfläche beschleunigt. Mögliche Strahlmittel sind z.B. Trockeneispellets, Glasperlen, Korund, Stahlkies oder Kunststoffgranulat unterschiedlicher Korngröße. Die Strahlmittel stellen ein Verbrauchsmittel dar, das mit Ausnahme von Trockeneis wiederum entsorgt werden muss.

Die Lackierung muss wegen der länger werdenden Garantiezeiten oftmals hohe Qualitätsanforderungen erfüllen. Daher zielen aktuelle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten darauf, die Haftfestigkeit von Lacken auf Kunststoffträgern weiter zu verbessern. [Hil16] [Sta20] [Hil13]

Großes Potenzial für die umweltfreundliche, kostengünstige und zugleich werkstoffgerechte Trennung der Lackschichten von thermoplastischen Kunststoffträgern hat die Lasertechnologie. Hier bringt ein Laserstrahl lokal eine hohe Energie auf die lackierte Oberfläche; richtig dosiert wirken die kurzen, leistungsstarken Laserpulse nur in geringstem Maß thermisch auf das Basismaterial ein [Cle20] [Whi20]. Die Lichtenergie des Laserstrahls wird in thermische Energie umgewandelt und verdampft die abzutragende Schicht und/oder Zwischenschicht [Cle20] [Bac93] [Lot99] [Kra11]. Variable Parametereinstellungen des Laserstrahls ermöglichen maximale Präzision und Bearbeitungsgeschwindigkeit [Bac93]. Verdampfungsrückstände können abgesaugt und durch Filtrierung neutralisiert werden. Wichtige Vorteile gegenüber den oben genannten Verfahren sind eine hohe Umweltfreundlichkeit und Energieeffizienz sowie eine voraussichtlich gut automatisierbare und wartungsarme Prozessführung. Sie ermöglicht auch eine flexible Bearbeitung von Oberflächen, die unterschiedliche Geometrien, Beschaffenheit usw. haben.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird gezeigt wie mit der Lasertechnologie eine Entlackung von thermoplastischen Bauteilen mit der erforderlichen technischen und wirtschaftlichen Effizienz durchgeführt werden kann. Hierfür werden geeignete Laserbearbeitungsparameter, Geometrien, Lacksysteme und Vorbereitungsprozesse für gängige Kombinationen von Lacksystemen und Thermoplasten untersucht. Für verschiedene Werkstoffkombinationen müssen individuell geeignete Laserparameter (Energie, Pulsdauer, Geschwindigkeit) angewendet werden, um eine zu hohe thermische Belastung bei thermoplastischen Polymerwerkstoffen, insbesondere bei Standardthermoplasten, und die damit verbundene Schädigung (Karbonisierung) zu vermeiden.

Als entscheidende Kriterien für den Einsatz eines Lasersystems zielt die Studie auf das gleichzeitige Erreichen von hoher Entlackungsqualität und Produktivität im Verfahren. Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen in einem Nachfolgeprojekt den Aufbau und die Erprobung einer industriellen Entlackungsanlage ermöglichen. Alle gewonnenen Informationen bezüglich der Laserentlackung und der ggf. erforderlichen Vor- oder Nachbereitung der Teile werden einfließen, um eine hohe Automatisierung des Prozesses zu erzielen.

Für eine Anwendung auf lackierte Kunststoffbauteile bestand bisher jedoch noch keine wissenschaftlich gesicherten Erfahrungswerte bezüglich des Werkstoffverhaltens, der optimalen Prozessführung und der Prozessqualität.

3. Hauptteil

Das Projekt wurde in enger Abstimmung mit dem Projektpartner Fa. HP-T Högmeier Polymer Tech GmbH & Co. KG sowie der Hochschule für angewandte Wissenschaften Ansbach durchgeführt. In den folgenden Unterkapiteln werden die erarbeitete Arbeitspakete ausführlich dargestellt:

3.1. Recherche

3.1.1 Thermoplastische Kunststoffe

Die Abbildung 1 zeigt die weltweite und europäische Produktionsmenge von Kunststoff in den Jahren 1950 bis 2017. Die jährlich produzierte Kunststoffmenge ist in den letzten knapp 70 Jahren sehr stark gestiegen. Im Jahr 2017 lag die Weltproduktion von Kunststoffen bei rund 348 Millionen Tonnen, damit hat sich das reine Produktionsvolumen von Kunststoffen weltweit im Vergleich zu 1976 circa versiebenfacht. In Europa ist die Produktionsentwicklung weniger rasant; in den vergangenen 15 Jahren stagniert das pro Jahr produzierte Kunststoffvolumen tendenziell innerhalb der europäischen Kunststoffindustrie. In dieser Statistik wurden dabei Thermoplaste, Polyurethan, Duroplaste, Elastomere, Klebstoffe, Beschichtungen und Dichtungsmassen berücksichtigt. [Pla19]

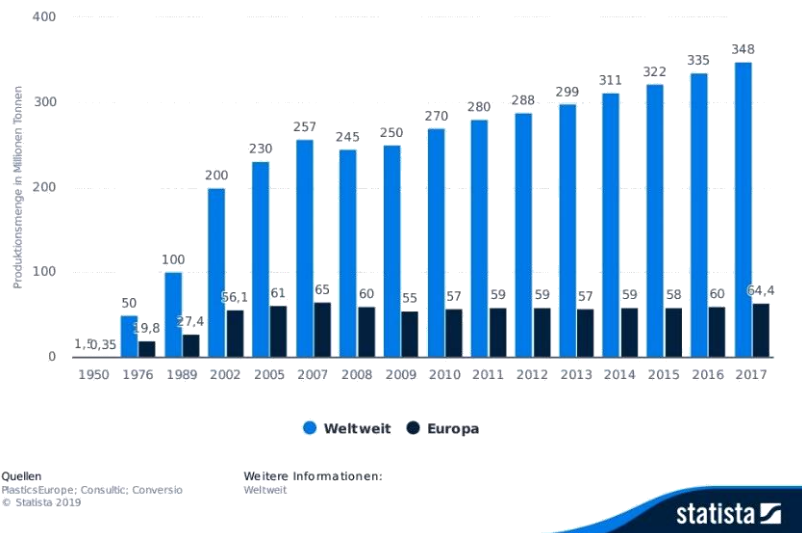


Abbildung 1: Weltweite und europäische Produktionsmenge von Kunststoff in den Jahren von 1950 bis 2017 (in Millionen Tonnen) [Pla19]

Die Kunststoffindustrie in Deutschland ist im europäischen Maßstab führend. Die Produktionsmenge der Kunststoffindustrie in Deutschland entspricht etwa einem Drittel des gesamten europäischen Produktionsvolumens an Kunststoffen. Das Recycling von Kunststoffen und der Aufbau einer veritablen Kreislaufwirtschaft stellt aufgrund der Auswirkungen von beispielsweise Plastikmüll auf die Umwelt eine Herausforderung dar. [Pla19]

Die Abbildung 2 zeigt die Anteile an der Verwendung von Kunststoffen in Europa nach Einsatzgebiet in den Jahren von 2016 bis 2018.

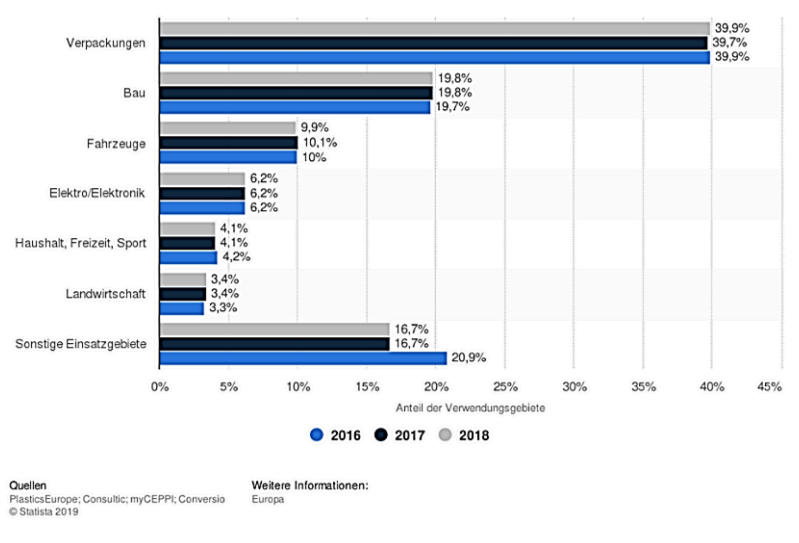


Abbildung 2: Anteile an der Verwendung von Kunststoffen in Europa nach Einsatzgebieten in den Jahren 2016 bis 2018 [Pla21]

Das Gesamtvolumen des in Europa (EU-28, Norwegen, Schweiz) verbrauchten Kunststoffs belief sich im Jahr 2018 auf rund 64 Millionen Tonnen. Im genannten Jahr entfielen rund zehn Prozent des europäischen Kunststoffverbrauchs auf die Automobil- und Fahrzeugindustrie. [Pla21] Dies entspricht einer Menge von über 6 Millionen Tonnen an Kunststoffen, die jährlich in Europa im Automobilbereich verbaut werden. Die Statistik in Abbildung 3 zeigt die Anteile der verwendeten Sorten in der europäischen Automobilindustrie im Jahr 2012. In diesem Jahr verbaute diese Branche insgesamt rund 3,8 Millionen Tonnen Plastik. Der meistverbaute Kunststoff im Automobil ist Polypropylen (PP). Auf diesen Kunststofftyp entfallen rund 28 % der Gesamtnachfrage.

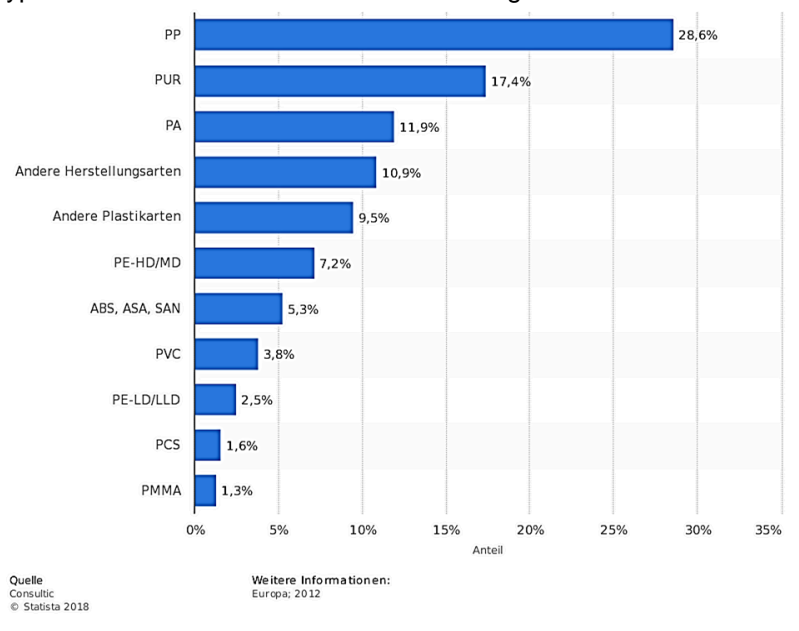


Abbildung 3: Anteile der verwendeten Plastiksorten in der europäischen Automobilindustrie im Jahr 2012 [Pla20]

Das wichtigste Anwendungsgebiet für Polypropylen in der Fahrzeugherstellung ist der Bereich Stoßstangen sowie Beleuchtung. Produkte aus den Polyethylen-Sorten HDPE, LDPE und LLDPE werden in Fahrzeugen vorwiegend im Motorraum bzw. für Kraftstoffsysteme eingesetzt. [Kut16]

3.1.2 Vorbehandlungsverfahren

Bei Betrachtung von Oberflächen lassen sich Rauheiten und Welligkeiten feststellen. Teilweise sind Oberflächen auch mit Verarbeitungshilfsmitteln ausgestattet. Um Lacke an der Kunststoffoberfläche zu fixieren ist eine Abreinigung störender Elemente notwendig. [Lak16] Viele Kunststoffe besitzen eine geringere Oberflächenenergie als ihr Beschichtungsmedium, daher kann es zu Schwierigkeiten bei der Haftfestigkeit kommen. Da Festkörper auf Flüssigkeiten treffen wirken Kohäsionskräfte, diese bewirken das Zusammenhalten von gleichartigen Molekülen und Atomen. Das Fundament für haftfeste Beschichtungen ist die Benetzbarkeit der Werkstoffoberflächen.

In den beiden nachfolgenden Unterkapiteln werden die verschiedenen Vorbehandlungsverfahren zur Oberflächenvorbehandlung erläutert.

3.1.2.1 Reinigen

Manuelle Reinigung

Bei einer manuellen Reinigung werden Oberflächen mit einem Lappen oder Tuch, die zuvor in Isopropanol oder Alkohol getränkt wurden abgewischt und dadurch gereinigt. [Lak16]

Mechanische Reinigung

Unter einer mechanischen Reinigung wird die Reinigung durch Strahlen, Schleifen, Bürsten etc. definiert. Hierbei wird die Oberfläche gereinigt bzw. aufgeraut. [Lak16]

Ionisation

Ionisation bedeutet, dass elektrostatische Entladungssysteme zum Einsatz kommen und mittels ionisierter Druckluft die Kunststoffteile entladen und gereinigt werden. [Lak16]

Trockeneisreinigung

Mit Hilfe eines Trockeneisstrahls werden Kunststoffbauteile von Strahlgut oder Feuchtigkeiten befreit. Diese Reinigung ähnelt dem Sandstrahlverfahren bzw. der Hochdruckreinigung. [Lak16]

Laserreinigung

Oberflächen werden unter Einfluss eines fokussierten Lichtstrahls behandelt. Der Laserstrahl wird dabei kontinuierlich oder gepulst eingesetzt um Verschmutzungen zu entfernen. [Lak16]

3.1.2.2 Aktivierungsverfahren

Beflammung

Um die Benetzbarkeit einer Oberfläche zu optimieren können Kunststoffe beflammt werden. Bei diesem Vorbehandlungsverfahren wird die Kunststoffoberfläche kurzzeitig mit Hilfe einer Flamme aufgebrochen und aktiviert. Es können sich anschließend sauerstoffhaltige sowie polare Gruppen anlagern. Hierbei verbessert sich die Benetzbarkeit und die Haftfestigkeit des Kunststoffes. Viele gebräuchliche Thermoplaste lassen sich beflammen. [Lak16]

Corona-Behandlung

Werden aus dem Zwischenraum von einem oder mehreren Molekülen die Elektronen entfernt, sodass nur noch ein positiv geladenes Molekül übrigbleibt, wird dieser Vorgang Ionisierung genannt, hierdurch entsteht eine sogenannte Coronaentladung. [Lak16]

VUV-Vorbehandlung

Durch eine energiereiche und homogene Vakuum-ultravioletter-Strahlung (VUV-Strahlung) werden Kunststoffoberflächen gereinigt oder aktiviert. Die chemischen Bindungen der Kunststoffoberflächen werden aufgebrochen und dienen als Anlagerstellen für den Sauerstoff. Zudem wird die Luft zwischen der Kunststoffoberfläche und der Lampe ionisiert. [Lak16]

Plasmatechnologie

Ein Plasmazustand entsteht, wenn einem Gas bei Atmosphären- oder Niederdruck Energie zugeführt wird. Die Energieeinbringung kann durch Wärme, Anlegen elektrische Spannung oder Einspeisung hochfrequenter elektromagnetischer Felder erfolgen. Bei der Atmosphärendruckplasma-Technologie werden Gase mit Hilfe von Hochspannung unter Normaldruck angeregt. Hierbei kann die Kunststoffoberfläche aktiviert, elektrisch Neutral und Verschmutzungen, wie zum Beispiel störende Partikel, entfernt werden. Mit der Niederdruckplasma-Technologie können Oberflächen unter anderem geätzt, gereinigt oder aktiviert werden. Hier wird bei einem sehr geringen Druck ein derartiges Plasma erschaffen, dass Gase ionisiert werden. [Lak16]

Fluorierung

Durch Reaktion mit Fluorgas werden Kunststoffoberflächen aktiviert, die dauerhaft stabil sind. Ein großer Vorteil von Fluor ist, dass dieses Element die höchste Elektronegativität von allen Elementen besitzt und dadurch auch bei Raumtemperatur mit den meisten anorganischen und organischen Verbindungen reagiert. [Lak16]

3.1.3 Lacksysteme

Die Lackiertechnik stellt Verfahren und Prozesse für die Applikation von Lacksystemen bereit, um Kunststoffprodukte des Alltags mit dekorativen, schützenden und funktionellen Oberflächen auszustatten. Lacksysteme sind Beschichtungsstoffe, die als organische und oberflächenschützende Überzüge dienen. Dabei kann ein Lack eine Fläche optisch verschönern, vor etwas schützen oder für einen anderen Zweck dienen.

Lacke lassen sich auf verschiedene Art und Weisen unterteilen. Sie werden unter anderem nach der Funktion, dem Lackieraufbau oder dem Verwendungszweck eingeteilt.

Kunststofflacke bestehen aus verschiedenen Zusammensetzungen, die in einer bestimmten Rezeptur miteinander vermischt werden, der sogenannten Lackrezeptur. Lacke die gespritzt werden benötigten andere Additive und Komponenten, als Lacke die auf eine Oberfläche gestrichen werden. [Lak16]

Ein technischer Vorteil von lackierten Kunststoffen in der Automobilbranche ist die Schutzwirkung.

Der Lack schützt das Substrat, bzw. den unter dem Lack liegenden Werkstoff gegen

- Chemische Einwirkungen (z. B. höhere Lösemittelbeständigkeit)
- Chemikalienbeständigkeit gegen Reinigungs- und Pflegemittel.
- Physikalische Einwirkungen (z. B. Reduzierung der Wasseraufnahme, höhere Kratzfestigkeit und Oberflächenhärte)
- Klimatische Beanspruchungen (z. B. Schutz vor Kunststoffabbau durch UV- und IR-Strahlung, erhöhte Licht- und Wetterbeständigkeit auch im Wechselklima)

Des Weiteren soll die Lackierung ein kostengünstiges Aussehen bezüglich der Oberfläche, Struktur, Glanz, Farbe und Effekte bieten. Ein Vorteil von Lackierungen ist, dass sie trotz dünner Schichten von 10 bis 50 µm, charakteristische Dekorationseigenschaften haben.

Weitere Beispiele für spezielle Funktionen und Eigenschaften sind:

- Vermeidung elektrostatischer Aufladung
- Erzielung elektrisch leitfähiger Oberflächen
- Minderung der Entflammbarkeit
- Transparente Beschichtungen
- Steinschlagschutzschichten.

Aus wirtschaftlicher Sicht sprechen weitere Gründe, wie z. B. langzeitiger Erhalt der Oberflächengüte für die Lackierung [Lak16]

Der Lackaufbau gliedert sich in drei Schichten:

Grundlack

Nachdem nicht alle Kunststoffe eine gut lackierbare Oberfläche besitzen, ist in diesen Fällen ein Grundlack nötig. Dieser wird nach eventuellen Vorbehandlungen auf das Substrat aufgetragen und verbessert die Oberflächeneigenschaft für spätere Lackierungsvorgänge. [Lak16]

Zwischenlack

Mit Zwischenlacken werden vorwiegend Farb- und Effektlacke in Verbindung gebracht. Manche Kunststoffe kommen ohne Grundierung aus. Bei diesen Kunststoffen fungiert der Basislack dann als Haftvermittler. Die Unterteilung von Farblacken erfolgt nach ihren Effekten und Farben. [Lak16]

Decklack

Als Decklack wird die oberste aufgetragene Schicht bezeichnet. Man unterscheidet zwischen Ein- und Mehrschichtlacke oder Klarlacke. Der Decklack übernimmt daher eine Schutzfunktion für alle darunterliegenden Schichten, kann aber jedoch auch weitere Eigenschaften vorweisen. [Lak16]

In der Regel ist ein 1- oder 2-schichtiger Lackaufbau üblich. Ist eine Zwischenbeschichtung nicht ausreichend, ist ein 3-schichtiger Aufbau unausweichlich. Helle Lacke können beispielsweise nicht ausnahmslos auf dunklen Oberflächen aufgetragen werden, daher ist eine helle Grundierschicht in einem 3-schichtigen Lackaufbau erforderlich, um ein Durchscheinen des Substrats zu vermeiden. [Lak16]

3.2 Charakterisierung lackierter Bauteile

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden verschiedene thermische und optische Messungen an lackierten Kunststoffbauteilen aus dem thermoplastischen Kunststoffgemisch PC+PET in Bezug auf ihre Wiederverwertung durchgeführt sowie die Messergebnisse bewertet.

PC+PET ist eine Kombination aus Polycarbonat und Polyester. Diese Kombination weist hohe Zähigkeit (auch bei niedrigen Temperaturen), gute Chemikalienbeständigkeit gegenüber vielen Schmier-, Löse- und Reinigungsmitteln, geringe Anfälligkeit für Spannungsrisse sowie gute Lackierbarkeit und geringe Feuchtigkeitsaufnahme auf.

Das amorphe Polycarbonat reagiert bei Einwirkung von lösenden organischen Chemikalien, wodurch Spannungsrisse entstehen. Dieses Problem wird durch den schwer quellenden Polyester (teilkristallin) im Blend deutlich verringert.

Die Prüfverfahren sind bedeutsam für die Untersuchung, Charakterisierung und Qualifizierung von Kunststoffen und der daraus hergestellten Formteile. Die Kunststoffprüfung leistet werkstofftechnische, qualitätssichernde und schadensanalytische Prüfungen, sowie Untersuchungen zum Recycling von Kunststoffen. [Fri17]

Ziel ist hierbei Informationen für die Entlackung und die anschließende Wiederverwertbarkeit von lackierten thermoplastischen Kunststoffen zu erhalten. Die Auswertung dieser Ergebnisse werden die Grundlage in Bezug auf die Entlackung von Kunststoffen sein, bei der die Einflüsse der Kunststoffverarbeitung sowie die Lackeigenschaften eine große Rolle spielen. Die Voraussetzung für eine hochwertige Wiederverwertung von thermoplastischen Kunststoffen ist die Sortenreinheit der Kunststoffreste und -abfälle, nur so kann der Aufwand neue und qualitativ hochwertige Produkte daraus herzustellen, am geringsten sein.

Tabelle 1 zeigt die Probenbezeichnungen für die TGA, DSC und IR Messungen, die während der Probenpräparation, Messung und Auswertung der Ergebnisse verwendet werden.

Tabelle 1: Probenbezeichnung für die Messungen

Bauteil	Probennamen für TGA, DSC und IR
Granulat	Granulat
Rohteil	Rohteil
Bauteil blau lackiert	Lackfarbe_blu
Bauteil rot lackiert	Lackfarbe_rot
Bauteil weiß lackiert	Lackfarbe_weiß

3.2.1 Thermogravimetrische Analyse – TGA

Die thermogravimetrische Analyse ist ein thermisches Prüfverfahren, welches die Massenänderung einer Probe in Abhängigkeit der Temperatur und Zeit misst. Dabei wird die Probe einer inerten oder oxidierenden Ofenatmosphäre ausgesetzt. Die flüchtigen Bestandteile, ein Füllstoffgehalt sowie das thermische Zerungsverhalten einer zu untersuchenden Probe wird hierbei festgestellt. [Fri17]

Der Pyrolyseprozess erfolgt in inerter Stickstoff-Atmosphäre (N₂). Der entstandene Pyrolyseruß einschließlich möglicher in der Probe enthaltener Füll- und Verstärkungstoffe wird anschließend in Sauerstoff-Atmosphäre (O₂) weiter zu höherer Temperatur erhitzt. Während dem Pyrolyseprozess verbrennen die organischen Bestandteile der Probe, die anorganische Füll- und Verstärkungstoffe und Asche bleiben erhalten.

Die Messung startet bei Raumtemperatur mit einer Heizrate von $10,00 \frac{\text{K}}{\text{min}}$ mit dem Inertgas Stickstoff N₂. In der Minute werden 50 ml Stickstoff in die Ofenatmosphäre zugeführt. Nachdem die Probe bei hoher Temperatur vollständig pyrolysiert, wird ab 600°C auf das Spülgas Sauerstoff O₂ gewechselt. Der Sauerstoff wird ebenfalls mit 50 ml pro Minute zugeführt. Dieser Wechsel ist essentiell, da bei hohen Temperaturen durch Zufuhr von Stickstoff kein weiterer Abbau von organischen Inhaltsstoffen der Probe stattfindet.

Für die vollständige Verbrennung der organischen Inhaltsstoffe der Probe und des Pyrolyserußes (auch organisch) ist Sauerstoff nötig, daher wird eine oxidative Ofenatmosphäre geschaffen. Anorganische Asche und Füllstoffe der Probe bleiben letztendlich als Rest zurück.

Abbildung 4 zeigt die Proben Tiegel nach der ersten TGA-Messung bis 800°C, die zunächst betrachtet und verglichen werden. Der Tiegelinhalt weist bei allen weiße pulverige bzw. kalkartige Rückstände auf. Unterschiede sind keine zu erkennen. Die organischen Inhaltsstoffe haben sich in der oxidativen Ofenatmosphäre vollständig zersetzt und anorganische Inhaltsstoffe sind zurückgeblieben.



Abbildung 4: Proben Tiegel nach der TGA-Messung

Bei Betrachtung der TGA-Kurve „Granulat“ (siehe Abbildung 5) fällt auf, dass in der ersten Stufe der TGA-Kurve bis ungefähr 319°C ein geringer Masseabbau stattfindet. Dies ist vermutlich auf flüchtige Inhaltsstoffe in der Probe, wie zum Beispiel Verarbeitungszusätze, Entformungshilfsmittel oder Quellmittel wie Wasser und Weichmacher, zurückzuführen, da flüchtige Inhaltsstoffe bereits bei niedriger Temperatur entweichen [Ste16]. Bei der nächsten Stufe der TGA-Kurve ab ca. 319°C ist zu erkennen, dass 30,87% der Masse bis 476,80°C abgebaut wird. Ab 477°C bis ca. 599°C nimmt nochmals die Masse in Höhe von 36,01% ab. Das Peak der TGA-Kurve bei 477°C charakterisiert die Temperatur der maximalen Massenänderung. In der letzten Stufe erfolgt die Verbrennung oberhalb 600°C, innerhalb von drei Minuten. Der Rückstand liegt bei 15%.

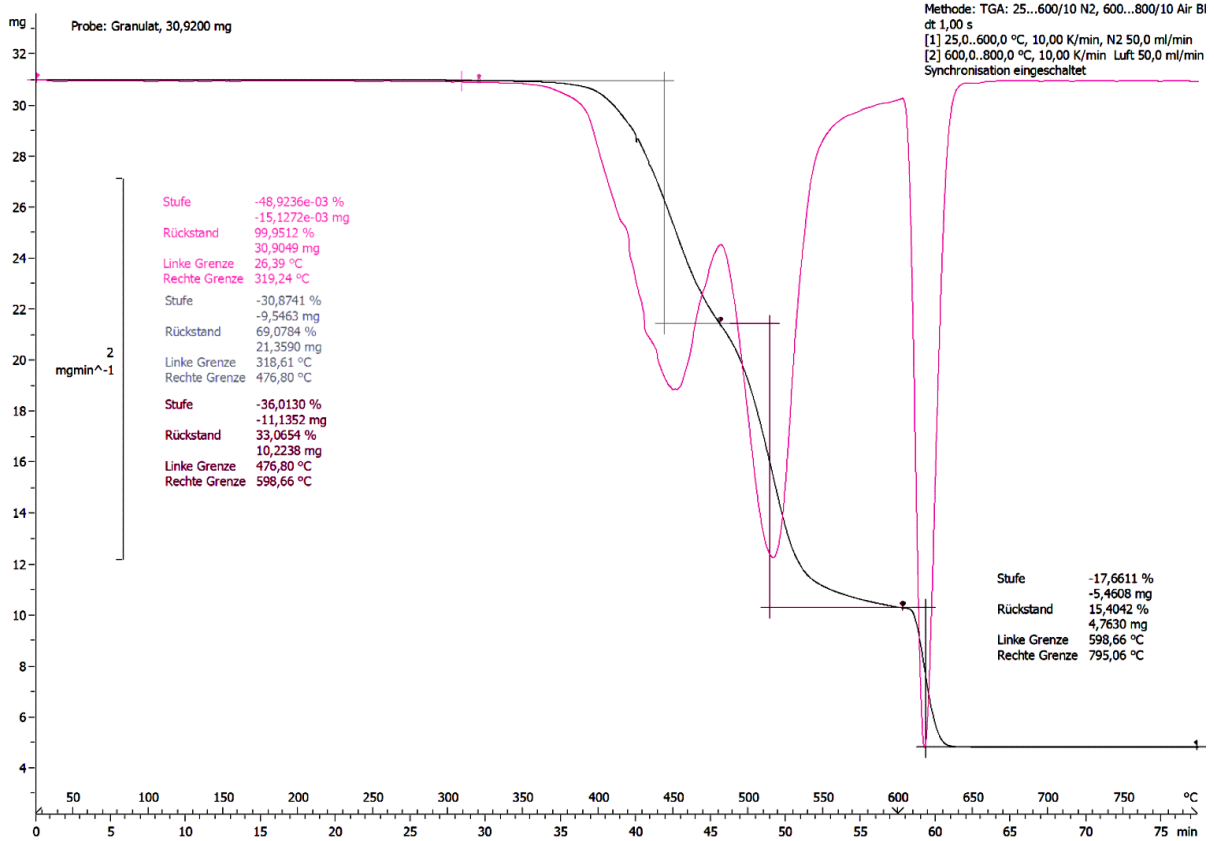


Abbildung 5: TGA-Kurve der Probe "Granulat"

Im nächsten Schritt werden die Kurvenauswertungen der fünf Proben untersucht und verglichen. Anhand der Kurvenauswertungen wird die Tabelle 2 zur Vereinfachung erstellt.

Tabelle 2: Datensatz der ersten TGA-Messung

Nr.	Probenname	Einwaage [mg]	Rückstand [%]	Massenverlust						Oxidation [min]
				Gewicht [mg]	Gewicht [%]	Starttemperatur [°C]	linke Grenze [°C]	rechte Grenze [°C]	Zeit [min]	
1	Granulat	30,92	15,40	20,70	66,94	26,39	395,00	550,00	37-53	3
2	Rohteil	33,33	15,28	10,82	67,54	27,08	395,00	550,00	37-53	3,5
3	Lackfarbe_rot	23,37	15,36	16,30	69,73	29,78	380,00	550,00	35-53	3
4	Lackfarbe_blaue	24,71	15,53	17,12	69,28	27,09	390,00	550,00	36-53	3
5	Lackfarbe_weiß	38,61	15,50	26,73	69,23	26,87	390,00	550,00	36-53	3

Bei der Betrachtung der Tabelle 2 fällt auf, dass alle fünf Proben nach der Oxidation ab 800°C einen Rückstand in Höhe von ca. 15% haben. Der stärkste Massenverlust der Kurven findet ab 380 bis 550°C statt. Jede der Kurven hat eine leichte Wölbung bei 430 bis 520°C. Die Einwaagen Überschreitung hat keine Auswirkung auf das Messergebnis. Diese gewonnenen Erkenntnisse der Kurven sind in der nachfolgenden Abbildung 6 genauer zu sehen.

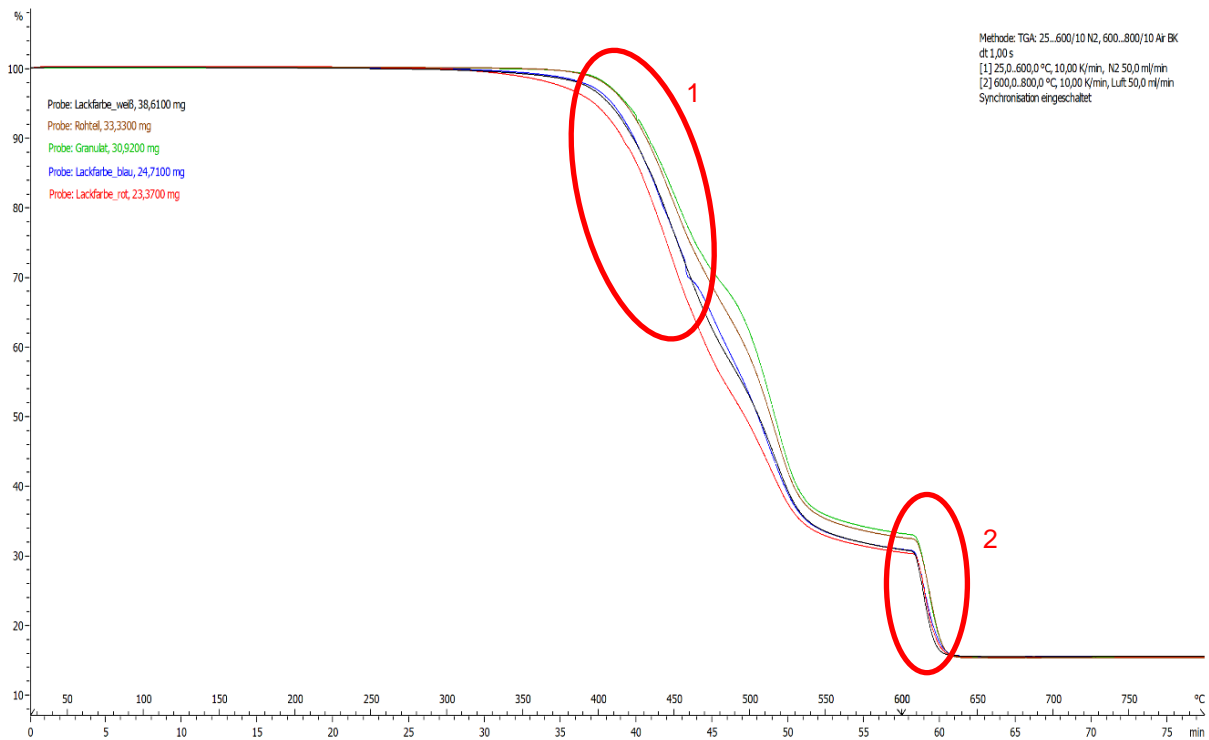


Abbildung 6: TGA-Vergleich aller Auswertungskurven

Zusammengefasst ist deutlich zu sehen, dass die Kurvenverläufe beim Massenabbau bis 800°C fast identisch sind. In Abbildung 6 mit eins gekennzeichnet, ist deutlich zu erkennen, dass der starke Massenverlust der Kurven bei ca. 380°C beginnt. Die vollständige Verbrennung der organischen Inhaltstoffe findet innerhalb von 3 bis 4 Minuten statt (Markierung 2). Mit der TGA-Messung und deren Kurvenauswertung wird bestätigt, dass die Roh- und Bauteile, sowie das Granulat mit mindestens 15% Mineralien gefüllt ist.

3.2.2 Dynamische Differenzkalorimetrie – DSC

Beim DSC-Prüfverfahren werden die kalorischen Effekte einer zu untersuchenden Probe analog zu einer leeren Referenz gemessen. Die DSC dient der Untersuchung des Schmelz- und Kristallisationsverhaltens in einer thermischen und oxidativen Atmosphäre. Zudem wird die Glasumwandlungstemperatur, die Schmelztemperatur sowie die spezifische Wärmekapazität definiert. [Fri17]

Für diese Methode ist die Höchsttemperatur so zu wählen, dass ein thermischer Abbau der Probe während der Messung vermieden werden kann. Die Endtemperatur sollte deshalb 30 bis 40°C höher sein als die empfohlene Schmelzverarbeitungstemperatur des zu untersuchenden Kunststoffes.

Eine Endtemperatur von 310°C wird gewählt, da die Schmelztemperatur des Kunststoffes PET bei 250 – 260°C liegt. Der Messvorgang startet bei 50°C bis 310°C. Anschließend wird die Probe auf Starttemperatur abgekühlt und nochmals auf die Endtemperatur von 310°C erhitzt. Die zwei Heizvorgänge erfolgen mit einer Heizrate von 10 K in der Minute und der Abkühlvorgang mit einer Kühlrate von -10 K in der Minute. Die drei Vorgänge sind maßgebend für eine eindeutige Identifizierung der zu untersuchenden Probe. Die DSC-Kurven des zweiten Heizlaufs sind für die Kunststoffidentifikation ausschlaggebend, beim zweiten Heizlauf wurde die thermische und verarbeitungsbedingte Vorgeschichte durch eine vorangegangene geregelte Abkühlung bereits eliminiert. Somit werden teilkristalline Kunststoffe durch ihre Peaktemperatur und amorphe Thermoplaste durch ihre Glasübergangstemperatur charakterisiert.

Nach der ersten DSC-Messung bis 310°C werden die Aluminiumtiegel betrachtet. Zu erkennen ist, dass der Tiegel den selben Zustand wie vor der Messung besitzt. Nach dem Öffnen des Deckels ist eine Schmelzperle mit der Lackierung zu erkennen, die sich nicht auffällig verändert hat.

Abbildung 7 stellt das Thermogramm der Probe „Granulat“ als Beispielinterpretation für die Thermogramme der DSC-Messung dar. Bei der Betrachtung des Thermogrammes ist zu erkennen, dass die Kurve des 1. Heizlaufs eine Glasumwandlungstemperatur mit einem Mittelpunkt bei 78°C hat. Nach einem weiteren Anstieg der Temperatur ist ein exothermer Vorgang mit einem Peak bei 120°C zu sehen, dies bedeutet, dass die Probe nachkristallisiert. Bei der Temperatur 259°C ist ein endothermer Vorgang zu beobachten, der den Schmelzpunkt der Probe darstellt.

Während der Abkühlung findet ab der Temperatur 240°C ein exothermer Vorgang mit dem Peak bei 220°C statt. Die Probe kristallisiert durch das Abkühlen vollständig. Aus diesem Grund findet beim 2. Heizlauf keine Nachkristallisation im Festkörper statt. Es ist nur eine Glasübergangstemperatur bei 139°C und ein Schmelzpeak bei der Temperatur 255°C zu sehen.

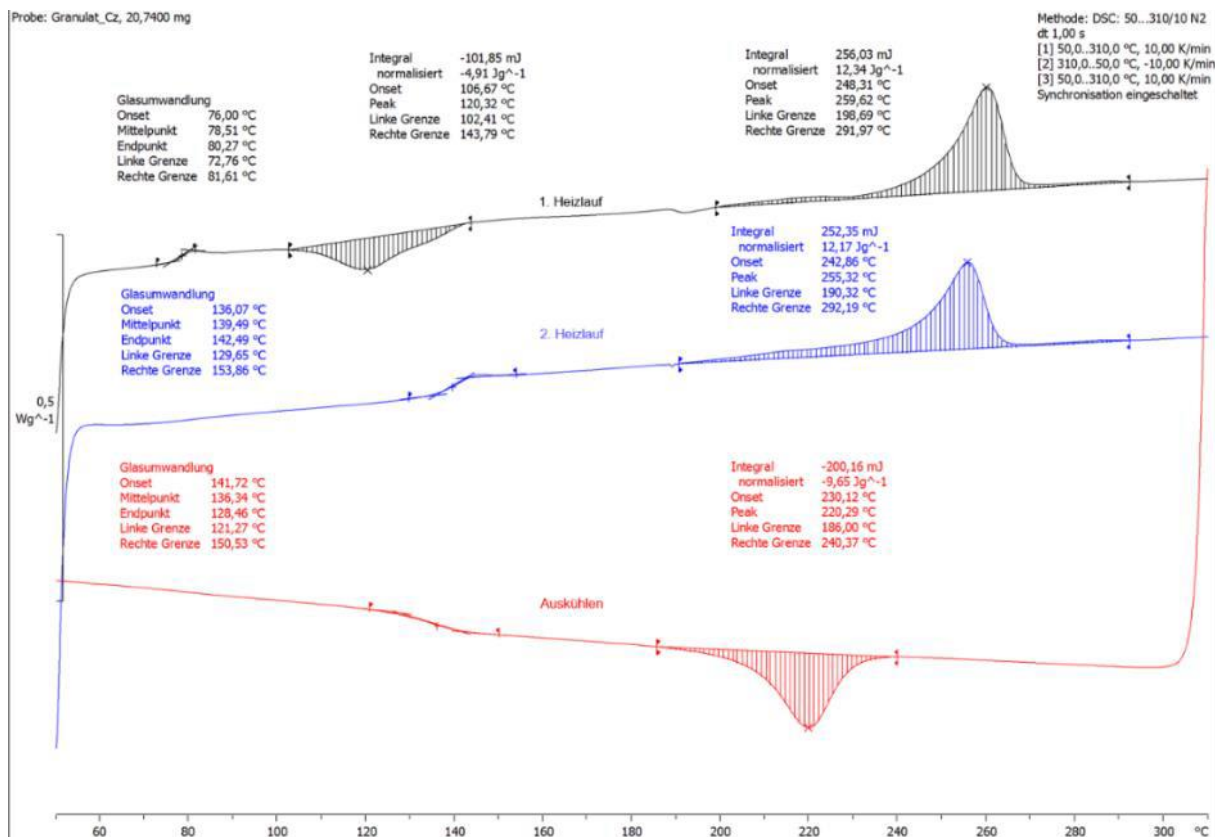


Abbildung 7: DSC-Thermogramm der Probe "Granulat"

Die Kristallisation beim ersten Heizvorgang ist nur beim Thermogramm des Granulats vorhanden. Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, wurde eine zweite Messung für das Granulat durchgeführt. Aber auch in der zweiten Messung war ein exothermer Peak bei der Temperatur 120°C zu sehen. Das Material wurde vermutlich beim Herstellungsprozess zu schnell abgekühlt und konnte sich dadurch nicht auskristallisieren, d. h. keine Kristallstruktur bilden. Die Nachkristallisation könnte vermieden werden, indem eine schnellere Heizrate definiert wird, da die Heiz – und Abkühlgeschwindigkeit das Messergebnis beeinflusst.

Tabelle 3: Werte aus den Thermogrammen nach der Messung bis 310°C

Nr.	Probenname	Einwaage [mg]	Glasumwandlung (Mittelpunkt) [°C]			Schmelzpeak [°C]		
			1. Heizlauf	2. Heizlauf	Abkühlen	1. Heizlauf	2. Heizlauf	Abkühlen
1	Granulat	20,74	78,51	139,49	136,34	259,62	255,32	220,29
2	Rohteil	14,65	136,61	136,48	133,94	261,14	255,49	222,51
3	Lackfarbe_rot	25,35	136,09	136,65	133,78	262,18	256,09	222,35
4	Lackfarbe_blau	21,12	138,74	135,26	131,45	261,27	255,34	221,77
5	Lackfarbe_weiß	14,64	135,31	136,37	131,97	260,31	255,88	222,14

Gemeinsamkeiten nach der Messung sind, dass die Proben der Bauteile nahezu identische Glasumwandlungstemperaturen beim ersten und zweiten Heizlauf haben. Beim Abkühlen liegen die Glasumwandlungstemperaturen zwischen 131 und 139°C.

Die Schmelztemperaturen beim ersten und zweiten Heizlauf liegen alle zwischen 255 und 262°C. Beim Abkühlen liegen die Schmelztemperaturen zwischen 220 und 222°C.

Der Einzige erkennbare Unterschiede ist beim Granulat liegt die Glasübergangstemperatur bei 78°C, dies könnte auf das nachkristallisieren zurückgeführt werden. Da nach der S-förmigen Kurve die Nachkristallisation mit einem Peak bei 120°C zu sehen ist, die in etwa der Glasumwandlungstemperatur, mit einer Abweichung von ca. 12 %, der Heizläufe entspricht.

Die Auskühlung und der 2. Heizlauf liefert Informationen über den Kunststoff. Werden die gewonnenen Werte mit den PC+PET-Blend Angaben aus dem technischen Datenblatt verglichen, ist zu erkennen, dass die angegebene Schmelztemperatur von 260 bis 280°C der ermittelten Schmelztemperatur beim 2. Heizlauf um ca 4 – 5°C abweicht. Die ermittelte Glasübergangstemperatur entspricht der angegebenen Vicat-Erweichungstemperatur.

In der nachfolgenden Abbildung 8 werden die Kurven der Heizläufe und des Auskühlens aller Proben als Überblick dargestellt.

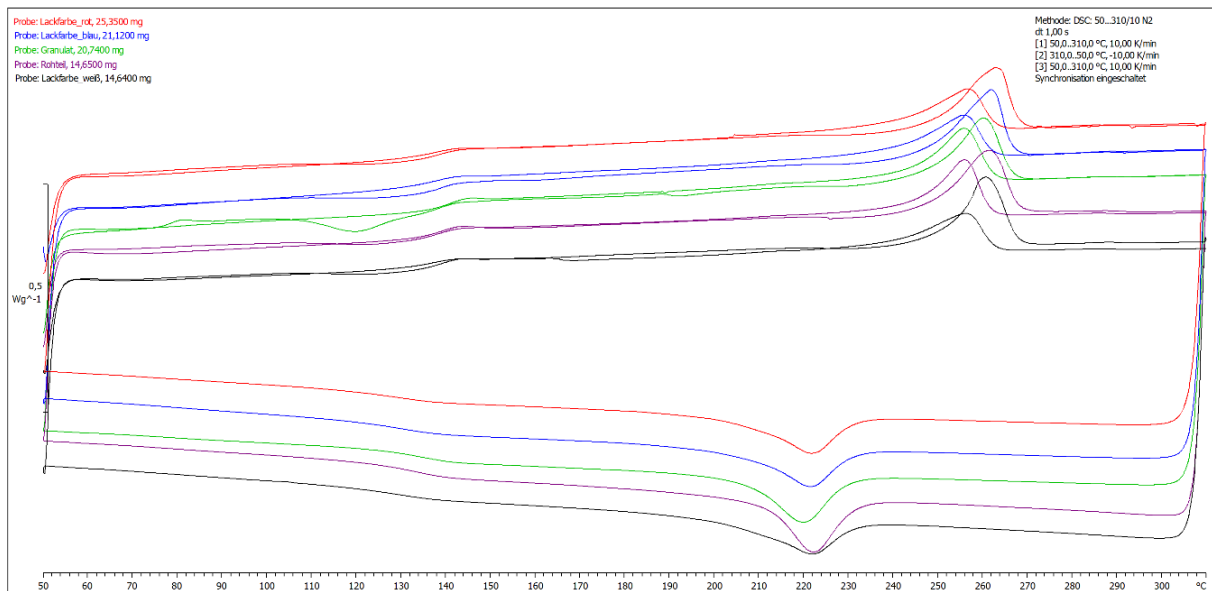


Abbildung 8: DSC-Kurvenvergleich aller Auswertungskurven

Abgesehen von den minimalen Abweichungen sind identische Kurvenverläufe bei allen Bauteilen zu erkennen, vor allem bei den lackierten Bauteilen. Der einzige auffällige Unterschied wird bei den Auskühlungskurven ersichtlich. Die exothermen Peaks der Proben von den Rohbauteilen d. h. die grüne und die lila Kurve, sind tiefer als die Peaks der lackierten Bauteile. Die Proben der Rohbauteile haben bei der Kristallisation mehr Wärmeenergie abgegeben als die Proben der lackierten Bauteile.

Außerdem fällt bei näherer Betrachtung der Thermogramme auf, dass die Heizläufe einen Glasübergang mit überlagerter Relaxation haben. Aus der thermischen Vorgeschichte bedingte, in der Probe enthaltene Orientierungen können bei Überschreiten der Glasübergangstemperatur gelöst werden und führen zu einer solchen Enthalpierreaxation.

Nach Untersuchung der Thermogramme und Abgleich mit dem technischen Datenblatt wird bestätigt, dass das PC+PET-Blend eine Schmelztemperatur bei 260°C hat und die angegebene Vicat-Erweichungstemperatur der ermittelten Glasumwandlungstemperatur entspricht.

3.2.3 Infrarotspektroskopie – FT-IR

FT-IR ist die Abkürzung für Fourier-Transformation-Infrarot und ist eine Methode der optischen Spektroskopie. IR wird in der Kunststofftechnik zur Identifizierung von unbekanntem Proben und zur Ermittlung der Zusammensetzung von Verbundwerkstoffen angewendet. [Fri17] Bei der IR-Spektroskopie entstehen Spektren mit Mustern von Proben, die im spektralen Bereich des mittleren Infrarot (MIR) gemessen werden. Anschließend werden die Ergebnisse mit bekannten Spektren verglichen. Der Vergleich der IR-Spektren erfolgt über eine Spektrenbibliothek, hierdurch ist es möglich, die untersuchte Probe zu identifizieren. [Fri17]

In nachfolgender Abbildung werden die beiden Spektren eines Rohteils (blaue Kurve) sowie eines lackierten Bauteils (rote Kurve) dargestellt. Hierbei ist deutlich sichtbar, dass sich die beiden Spektren deutlich unterscheiden. Für ein sortenreines Recycling sollten die Material und somit auch die Spektren möglichst identisch sein.

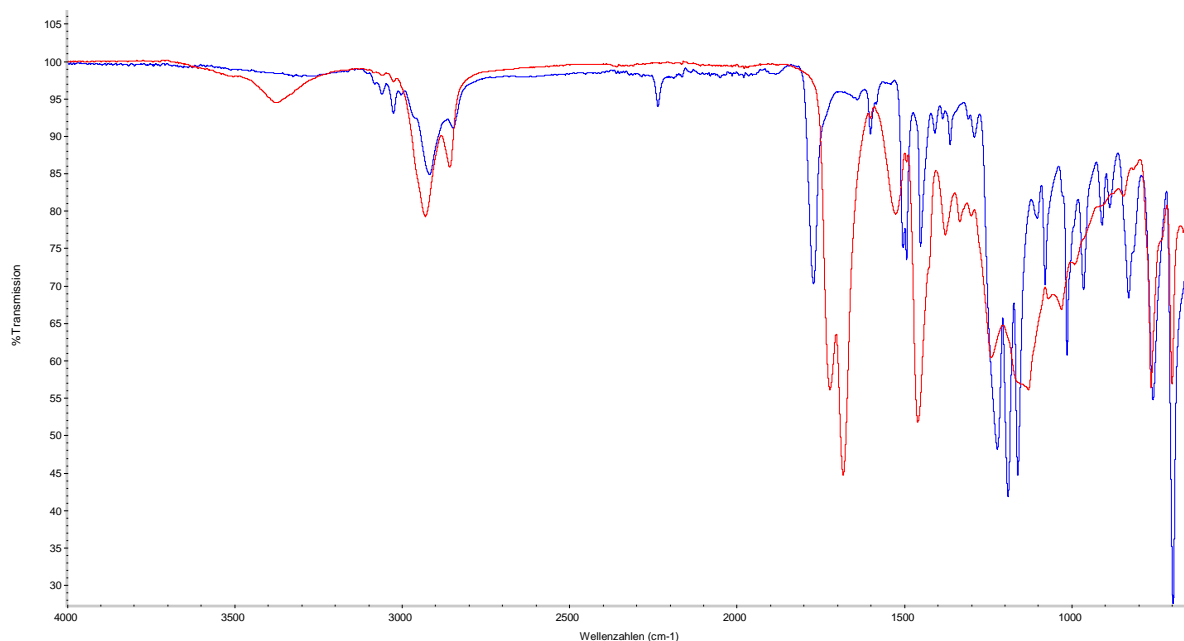


Abbildung 9: IR-Spektren der Proben "Rohteil (blaue Kurve)" und „lackiertes Bauteil (rote Kurve)“

3.2.4 Mikroskopie

Die mikroskopischen Untersuchungen werden mit einem Digitalauflichtmikroskop durchgeführt. Die fünf Probenstücke Granulat, Rohteil, Lackfarbe_Rot, Lackfarbe_Blau und Lackfarbe_Weiß werden den Probenstreifen an den relevanten Stellen abgetrennt.

Während der mechanischen Bearbeitung der Probekörper wird jeweils ein sauberer Querschnitt erzeugt, siehe Abbildung 10. Anschließend werden die Probekörper an den Querschnittstellen feingeschliffen und poliert. Die Oberflächenbearbeitung erfolgt an einer Schleifmaschine mit Hilfe von Schleif- und Poliermitteln, bis eine glasklare Oberfläche entsteht. Dadurch wird ein Anschliff erzeugt, siehe Abbildung 12, der für eine Untersuchung der Lackschichten am Mikroskop geeignet ist.



Abbildung 10: Querschnitt des Prüflings



Abbildung 11: Probe in Harz eingebettet



Abbildung 12: Prüflinge nach dem Poliervorgang

Abbildung 13 zeigt die 1.000-fache Vergrößerung der Lackschichten des roten, blauen und weißen Bauteils.

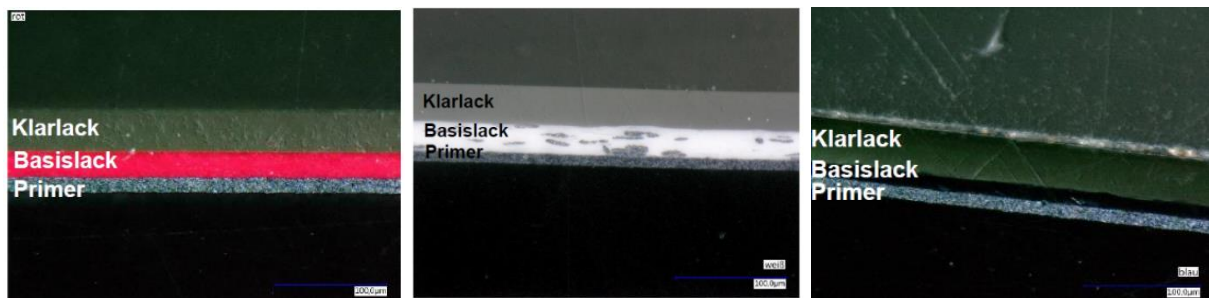


Abbildung 13: Mikroskopische Bilder der eingebetteten Proben

Links: Rotes Probenmaterial, Mitte: Blaues Probenmaterial, Rechts: Weißes Probenmaterial

Der rote und weiße Basislack ist auf den mikroskopischen Bildern deutlich erkennbar. Der blaue Basislack erscheint wie eine schwarze Lackierung. Bei näherer Betrachtung sind im blauen Basislack kleine Partikel zu erkennen, diese sind beim weißen Basislack ausgeprägter. Oberhalb der Klarlackschicht beim blauen Bauteil ist eine weitere Schicht zu sehen. Diese Schicht ist ein Verarbeitungsfehler, der beim Anschliff entstand und für die Bewertung der mikroskopischen Bilder irrelevant ist.

Tabelle 4 veranschaulicht die Abmessungen der jeweiligen Schichten. Aus fünf Maßen wird der Mittelwert gebildet. Zu erkennen ist, dass die Summe der Lackierung des roten Bauteils dicker ist als die Lackierung der weißen und blauen Bauteile. Die Schicht des weißen Basislacks ist im Vergleich zu den anderen zwei Basislacken dicker. Dies kann an der häufigeren Auftragung der weißen Farbe liegen, da die Deckkraft bei hellen Farben gewöhnlich geringer ist als bei dunkleren Farben. Weiterhin auffällig ist die Dicke des Basislacks beim blauen Bauteil im Vergleich zum roten und weißen Basislack. Dieser wurde vermutlich aus Kostengründen sehr dünn aufgetragen, da die blauen Bauteile sehr dunkel sind und die blaue Lackierung nur schwer erkennbar ist.

Tabelle 4: Mittelwerte der Schichten in μm

	Rot		Blau		Weiß	
	Mittelwert	Summe	Mittelwert	Summe	Mittelwert	Summe
Klarlack	37,4	73,8	35,0	70,9	37,8	62,2
Basislack	22,3		26,6		14,8	
Primer	14,1		9,3		9,6	

3.3 Vorbereitung der Materialproben für die Entlackung

Die Vorbereitung dient dazu, Kunststoffkarosserieteile für die Laserentlackung vorzubereiten. Hierfür erfolgte eine Recherche, um eine geeignete Methode zum Zerteilen der Kunststoffkarosserieteile zu finden. Die wichtigsten Aspekte zur Vorbereitung der Probe sind in Tabelle 5 erwähnt, damit eine problemlose Entlackung stattfinden kann.

Zudem muss eine optimale Größe (max. 240 mm x 240 mm) der Bauteile für die spätere Laserbearbeitung gewährleistet sein. Die Trennung muss schnell und sauber funktionieren, ohne dabei Wülste, Risse und Oberflächenbeschädigungen des Lackes zu erhalten.

Aus der Recherche ergab sich folgende Trennverfahren:

Tabelle 5: Vergleich der Verfahren zur Trennung der Bauteile

Trennart	Kunststoff schmilzt	Grat- bildung	Wulst- bildung	Ver- formung	Span- bildung	Lackbe- schädigung
Elektroschere	Nein	Nein	Nein	Nein	Langer Span	Vermutlich nein
Ozilation - Multi- funktions- werkzeug	Bei zu langsamer Schnitt- bewegung	Bei zu langsamer Schnitt- bewegung	Bei zu langsamer Schnitt- bewegung	Keine	Keine	Gering
Heißdraht	Gehört zum Vorgang	Nein	Ja	Ja	Nein	Durch Wulst
Bandsäge	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja viel	Ja
Stanzen	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Evtl. brechen des Bauteils
Schredern grob	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Hoch

Aus der ersten Recherche kristallisierte sich die Elektroschere sowie die Abschlagschere als mögliches Verfahren zur Trennung der lackierten Bauteile. Diese beiden Verfahren werden im nachfolgenden Kapitel näher untersucht.

3.3.1 Elektroschere

Die Elektroschere ist ein speziell entwickeltes Werkzeug, um Kunststoffe kalt zu trennen (Abbildung 14). Hierbei ist es auch möglich, Radien zu schneiden. Ein elektrisch angetriebener Zahn drückt den Kunststoff gegen zwei Klingen, die für eine sehr saubere Trennung sorgen.



Abbildung 14: Elektroschere der Firma Dräco

Beim Trennen entsteht ein langer Span, welcher nicht mehr verwendet werden kann. Durch die einfache Handhabung können auch schwere Geometrien getrennt werden.

Zu verwinkelte, gebogene und komplexe Geometrien können im späteren Schritt für die Laserentlackung nicht verwendet werden, da der Laser für die Fokussierung nur einen geringen Fahrweg besitzt und somit die Teile möglichst planar sein sollten.

Auf beiden nachfolgenden Bildern ist das Schnittbild der Elektroschere zu sehen. Abbildung 15 zeigt den Querschnitt bei einer Trennung der Bauteile wenn der Lack beim Trennen nach oben (links) bzw. unten (rechts) zeigt.

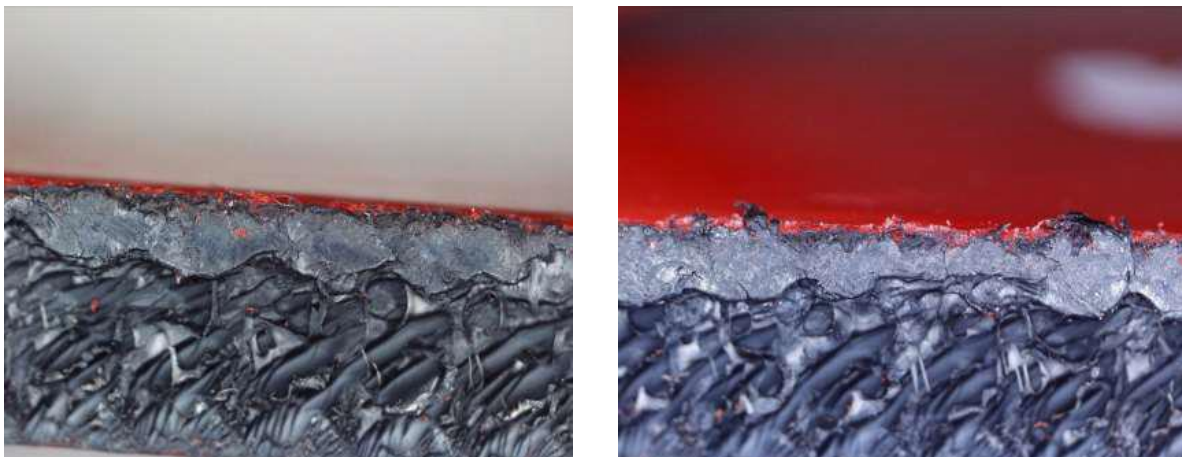


Abbildung 15: Mikroskopische Aufnahme der Schnittkante – Elektroschere
(links: Lack zeigt beim Trennen nach oben; rechts: Lack zeigt beim Trennen nach unten)

Deutlich zu erkennen ist, dass sich durch das Trennen Lackpartikel in der Platte verschieben, wenn die lackierte Seite beim Trennen nach oben zeigt. Im Vergleich wenn die lackierte Seite nach unten zeigt, ist dies nicht zu erkennen. Es entsteht ein minimaler Grat an der nach unten gerichteten Kante. Dies ist auf die Funktion der Elektroschere zurückzuführen. Das Material wird gegen die Klingen gedrückt und somit abgeschert. Beim Abscheren schiebt sich die Lackschicht an den Klingen entlang und wird in das Material gepresst.

3.3.2 Abschlagschere

Beim Trennen mit einer Abschlagschere (Abbildung 16), wird das Kunststoffkarosserieteil zwischen einer festen Kante und einem beweglichen Messer gerade abgeschert. Das Problem hierbei ist, dass nur flache Geometrien wie beispielsweise Platten geschnitten werden können. Sehr positiv ist, dass saubere und glatte Schnittbild ohne Grat oder Wülste entsteht.



Abbildung 16: Abschlagschere

Das ganze Bauteil kann mit der Kabelrohrscherer verarbeitet werden und somit kann auf die Abschlagschere verzichtet werden. Bei großer Stückzahl ist jedoch zu überlegen, die einfachen und geraden Schnitte mit der Abschlagschere durchzuführen. Dies ist sinnvoll, da die Abschlagschere mehrere Platten gleichzeitig trennen kann, was zu einer Zeitersparnis führt. Mit Hilfe eines Anschlags werden dementsprechend auch alle Teile gleich groß.

Zu vermeiden sind dreidimensionale Bauteile; die Schnittkanten können hier sehr schnell brechen und es entsteht ein Grat wie auf der Abbildung 17 zu erkennen ist. Zudem wird das Bauteil stark verformt und kann dadurch brechen. Durch das Brechen entstehen Risse im Lack, welche beim Entlacken zu Problemen führen können und die Weiterverarbeitung erschweren.



Abbildung 17: Trennung von dreidimensionalen Bauteilen mit der Abschlagschere

Um gute Zuschnitte zu erhalten, könnten zuerst komplexe Geometrien mit der Elektroschere entfernt und anschließend die Platten mit der Abschlagschere geschnitten. Vorteil der Abschlagschere ist, dass kein Span entsteht und weniger Material entfernt werden muss.

3.4 Laserentlackung von Bauteilen mit unterschiedlichen Prozessparametern

Großes Potenzial für die umweltfreundliche, kostengünstige und zugleich werkstoffgerechte Trennung der Lackschichten von thermoplastischen Kunststoffträgern hat die Lasertechnologie. Sie wird bereits routinemäßig zum Entlacken von Stahl- und Faserverbundbauteilen verwendet.

Eine Anwendung für das Recycling von thermoplastischen Bauteilen stehen jedoch bisher deren thermische Empfindlichkeit, sowie den noch unbekanntem Prozesseffekten entgegen. Die Lasertechnologie bietet einen wiederholbaren, berührungslosen Prozess und ist eine saubere, staubarme (oder staubfreie) Methode zur selektiven Entfernung von Beschichtungssystemen. Ein gepulster Laserstrahl wird mit einem bestimmten Energieniveau auf die Oberfläche gerichtet und bricht die Lack- und Grundierungsschichten auf. Starke, sehr kurze Laserpulse erzeugen Schockwellen und thermische Belastung, die zur Sublimation sowie zur Abtrennung der Lackschicht führen.

Für die ersten Versuche zur Entlackung von thermoplastischem Material wurde eine gebrauchte Stoßstange verwendet, die 2008 hergestellt wurde, siehe Abbildung 18 links. Informationen über das Herstellungsdatum und das Material liefert der Stempel auf dem im Spritzgussverfahren hergestellten Kunststoffteil, Abbildung 18 rechts.



Abbildung 18: Stoßstange aus Polypropylen (PP) (links)
Herstellungs- und Materialinformationen (rechts).

Die Karosserie (Träger) der Stoßstange ist ein thermoplastisches Material, Polypropylen (PP), ein mit 20% Talkum verstärktes Homopolymer. Das thermoplastische Material enthält Additive, wie Flammschutzmittel, Wärme- und Lichtstabilisatoren und ist für das Spritzgussverfahren ausgelegt. Das Material weist eine hohe mechanische Festigkeit, Formbeständigkeit, hohe thermische Beständigkeit auf und ist leicht zu verarbeiten.

Die Bearbeitung erfolgte mit einem 50-W-Faserlaser der Firma Coherent-ROFIN. (siehe Abbildung 19)



Abbildung 19: 50 Watt Faserlaser der Fa. Coherent/Rofin

Im ersten Schritt müssen die optimalen Laserparameter bestimmt werden. Bei der Laseranlage sind u.a. die folgenden 5 Laserparameter einstellbar:

- Frequenz
- Geschwindigkeit
- Punktabstand
- Pulsbreite
- Linienbreite

Die Laseranlage bietet zur Bestimmung der optimalen Laserparameter ein Softwaretool den sogenannten „Applikationsassistenten“ an. Mithilfe dieses Assistenten können die besten Parameter für die Bearbeitung von unterschiedlichsten Materialien bestimmt werden.

Auf die lackierte Oberfläche werden hierzu mehrere Quadrate mit verschiedenen Laserparametern auf die lackierte Oberfläche aufgebracht. Die Laserparameter können sowohl auf der X-Achse sowie auf der Y-Achse variiert werden und von Versuch zu Versuch immer feiner abgestuft werden, bis ein optimales Ergebnis erzielt wird. Die übrigen Parameter werden konstant gehalten.

Nach dem Schneiden und Reinigen eines Teils der Stoßstange wurden mehrere Rechtecke mithilfe des Applikationsassistenten mit unterschiedlichen Laserparametern auf die rot lackierte Oberfläche aufgebracht. Auf der horizontalen Achse wurde der Strom und auf der vertikalen Achse die Frequenz variiert, siehe Abbildung 20. Die Pulslänge betrug 50 ns und die Geschwindigkeit 8.000 mm/s bei einer Linienbreite von 0,04 mm.

Somit wurde ein Feld mit 7 x 7 Quadraten erstellt, bei dem jedes Quadrat durch Änderung des Laserstroms (horizontal) und der Frequenz (vertikal) individuelle Laserparameter in Abhängigkeit der X/Y-Position besitzt.

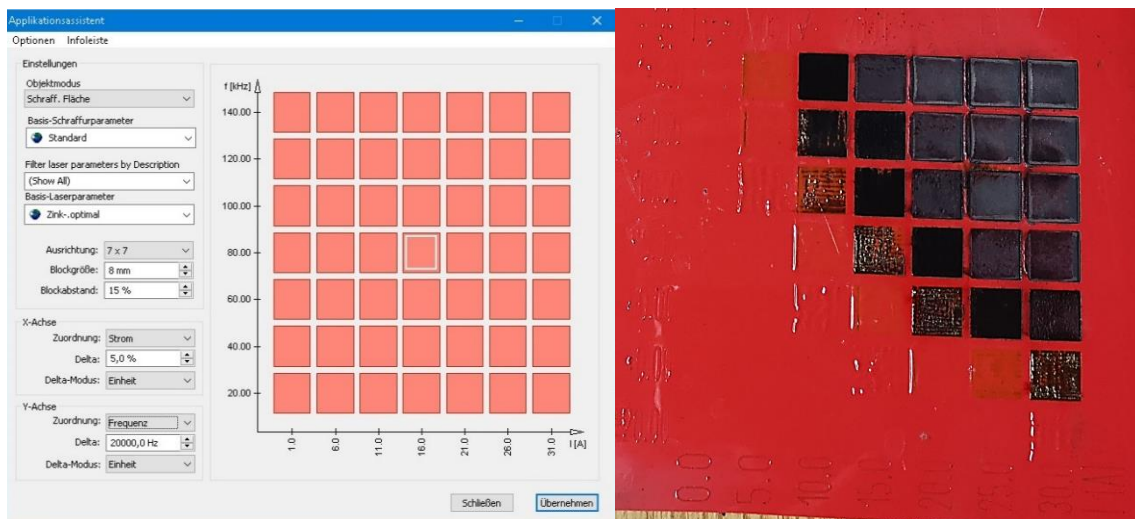


Abbildung 20: Anwendung des Applikationsassistenten auf die PP-lackierten Kunststoffteile

Zu beobachten ist, dass in der linken unteren Ecke des Felds der Lack keine Bearbeitungsspuren aufweist. Im rechten oben Bereich wird der Träger, die Thermoplaste (PP), thermisch geschädigt und die Oberfläche wird karbonisiert. Diese Art von Beschädigung ist für ein weiteres Recycling nachteilig. Einige der Testquadrate sind weder thermisch geschädigt noch karbonisiert; sie sehen eher wie Blasen aus. Bei diesen Quadraten lässt sich die Lackschicht mit Hilfe eines Skalpells leicht vom Trägermaterial entfernen. (siehe Abbildung 21) Die besten/optimalen Ergebnisse wurden bei der Stromstärke von 15 A und der Frequenz von 60 kHz erzielt. Soweit Rückstände zwischen der Mantelschicht und dem Trägermaterial vorhanden sind, lassen sie sich ebenfalls leicht entfernen.

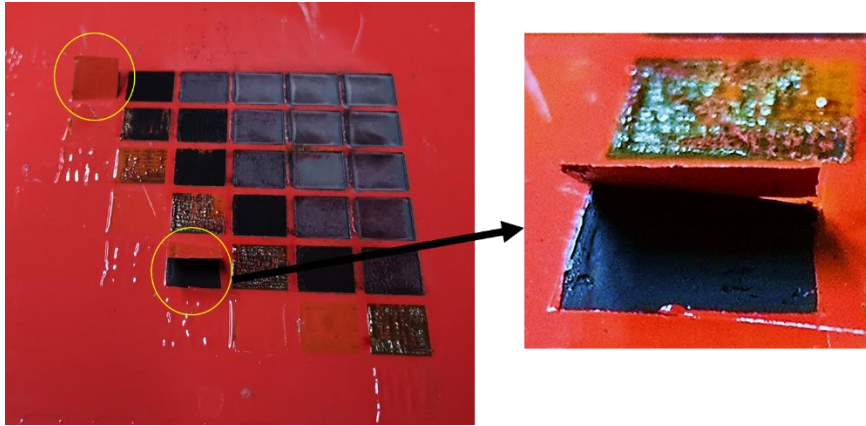


Abbildung 21: Trennung der Lackschicht von der bearbeiteten Oberfläche.

Ein weiterer Test wurde auf einer vergrößerten Oberfläche von 20 mm x 20 mm mit den optimalen Laserparametern durchgeführt. Auch diese Behandlung der Oberfläche war erfolgreich, und die Lackschicht konnte sehr leicht entfernt werden (siehe Abbildung 22). Die Haftung zwischen der Lackschicht und der Trägeroberfläche ist nach der Laserbearbeitung zerstört, so dass die Lackschicht (Duroplast) sehr leicht abgelöst werden kann, ohne das thermoplastische Material zu beschädigen.



Abbildung 22: Laserbearbeitung einer 20 mm x 20 mm großen Oberfläche mit Farbabtrag.

Der Prozess ist sehr stabil, so dass unterschiedliche Bereiche der beschichteten Teile mit sehr guten Ergebnissen bearbeitet wurden. Zudem ist mit den festgelegten Laserparametern möglich, Flächen von bis zu 240 mm x 240 mm zu bearbeiten. (siehe Abbildung 23)

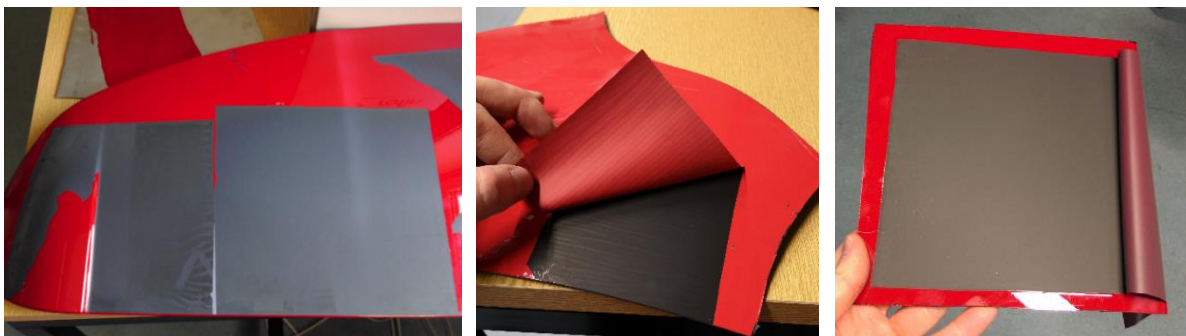


Abbildung 23: Großflächige Entlackung einer Fläche von bis zu 240 mm x 240 mm

Für weitere Entlackungsversuche wurde ein weiteres Trägermaterial untersucht und zwar ein ABS, welches für Karosseriebauteile in der Automobilindustrie oft verwendet wird. Auch hier mussten die optimalen Laserparameter mit dem Applikationsassistenten bestimmt werden. Die Abbildung 24 zeigen die rückstandlose Ablösung der Lackschicht vom Trägermaterial bei verschiedenen Lackfarben.

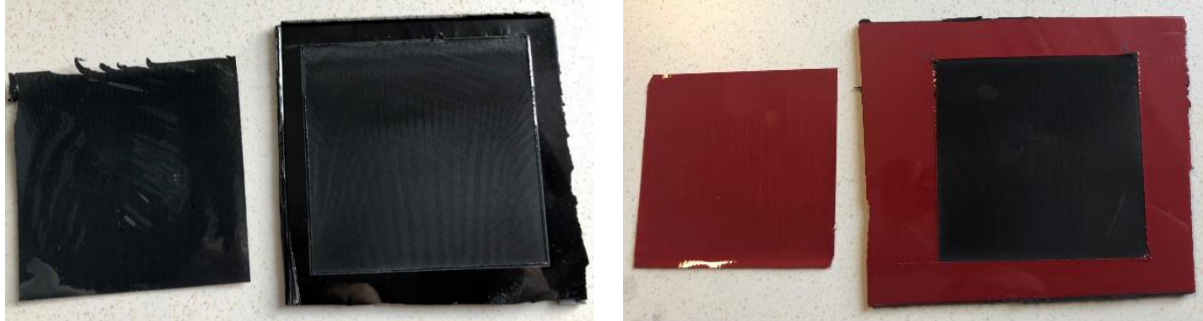


Abbildung 24: Entlackte Teile einer Stoßstange, Abbildung links: Lackfarbe schwarz, Abbildung rechts: Lackfarbe rot – jeweils auf der linken Seite die abgetrennte Duroplast-Folie und auf der rechten Seite das entlackte Trägermaterial.

Die ausführliche Untersuchung zur Entlackung von farbig lackierten Thermoplasten mittels Laser haben gezeigt, dass die Ablösung der Lackschicht möglich ist. Für die Optimierung der Entlackung hinsichtlich einer Industrialisierung dieses Prozesses sind noch weitere Untersuchungen an den zu entlackenden Materialien sowie an den benötigten Anlagen notwendig.

3.5 Untersuchung und Charakterisierung der bearbeiteten Oberflächen

3.5.1 Optische Untersuchungen

Zur Untersuchung der Qualität der entlackten Bauteile wird an der interessierenden Stelle im Teil zunächst ein Querschnitt erzeugt und dieser anschließend mit kalt aushärtendem Harz eingebettet. In Abbildung 25 ist der Querschnitt eines unbearbeiteten Bauteils (Trägermaterial ABS) in der Lackfarbe rot dargestellt.

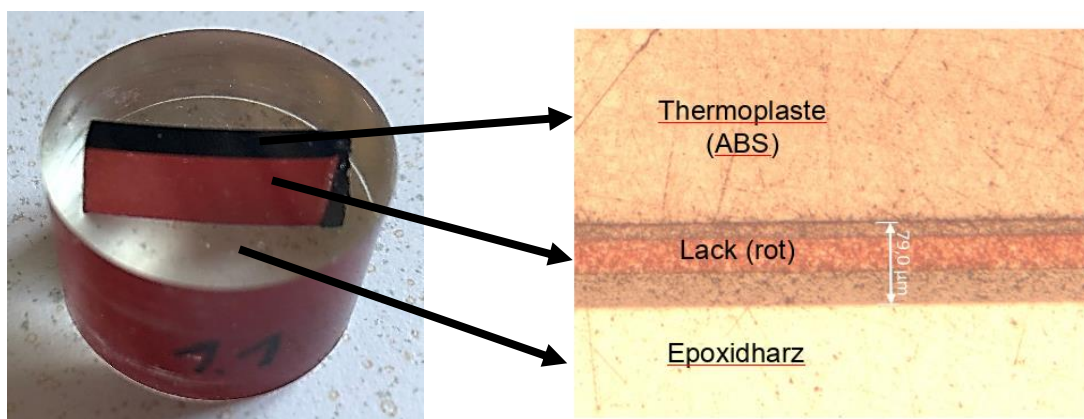


Abbildung 25: Originalzustand – unbearbeitetes Bauteil in der Lackfarbe rot

Im oberen Teil des rechten Bildes ist das Trägermaterial (ABS) sichtbar; im unteren Bereich ist das für die Einbettung benötigte Epoxidharz sichtbar und dazwischen ist deutlich der Lackaufbau erkennbar; er besteht aus drei Schichten

- Schutzlack
- Farblack
- Haftvermittler

Die gesamte Lackdicke beträgt ca. 80 µm.

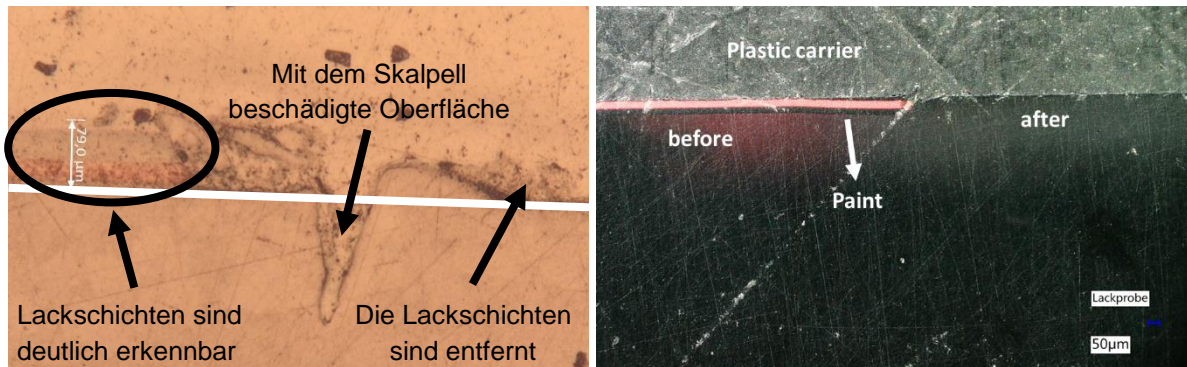


Abbildung 26: Mit dem Laser bearbeitetes Bauteil in der Lackfarbe rot

In Abbildung 26 sind die Bereiche vor und nach der Laserbearbeitung abgebildet. Auf der linken Seite sind die Lackschichten noch deutlich sichtbar. Rechts ist zu erkennen, dass der Lack entfernt wurde und die Oberfläche durch die Laserbearbeitung nicht beschädigt wurde. Die „Vertiefung“ in der Mitte ist beim Entfernen der Lackschicht mit dem Skalpell auf der Oberfläche entstanden.

Im nächsten Schritt wurden die Oberflächen der Bauteile mit dem Mikroskop untersucht. Bei der Betrachtung der Oberflächen unter dem Mikroskop ist deutlich zu erkennen, dass noch leichte Spuren von Lackpartikeln auf der Oberfläche haften (siehe Abbildung 27).

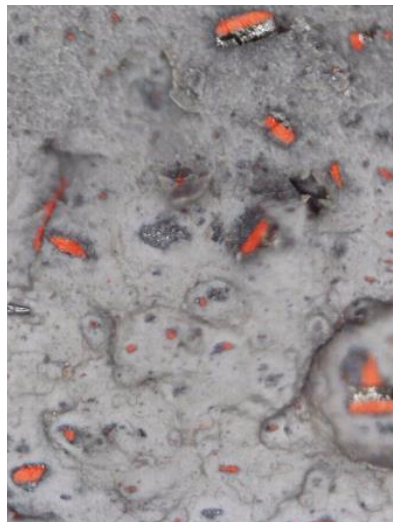


Abbildung 27: Mikroskopie der mit dem Laser bearbeiteten Oberfläche

Jedes einzelne Lackpartikel verringert die Dichte des eigentlichen Materials und verändert die Eigenschaften. Da der Lack selbst ganz andere physikalische Eigenschaften aufweist, werden die Eigenschaften eines anderen Stoffs, welcher Lackpartikel enthält, verändert. Umso höher hierbei der Anteil der Lackpartikel, umso gravierender die Auswirkungen auf die Eigenschaften des Werkstoffs. Deshalb ist es essenziell wichtig möglichst alle Lackreste zu entfernen, um ein hochwertiges Rezyklat für eine spätere Wiederverwendung des Trägermaterials zu erhalten.

3.5.2 Mechanische Untersuchung

Der nachfolgende Abschnitt behandelt die Charakterisierung und Vergleich der Qualitätsmerkmale von lackierten und entlackten thermoplastische Kunststoffteilen in Bezug auf ihre physikalischen Eigenschaften.

Um den Einfluss der Entlackung auf die Qualität des Kunststoffs herauszubekommen, wurden unterschiedliche Varianten des gleichen Materials zu Granulat sowie zu Prüfkörpern verarbeitet, welche anschließend auf ihre physikalischen Eigenschaften geprüft wurden.

Als wichtige Qualitätsmerkmale, in Bezug auf Anwendung und Verarbeitung des Materials, wurden der Schmelzflussindex sowie die Zugdehnung auf Bruch festgelegt. Die Ergebnisse wurden grafisch dargestellt und miteinander verglichen.

Für die Charakterisierung der Qualitätsmerkmale wurden mehrere Varianten (siehe Abbildung 28) des Kunststoffs (Trägermaterial ABS) miteinander verglichen:

- Rohmaterial, welches als Granulat vorhanden war.
- Unlackiertes Bauteil
- Lackiertes und anschließend entlacktes Bauteil
- Lackiertes Bauteil
- Nachbearbeitetes Bauteil, welches nach dem Entlackungsprozess mit Glasperlen gestrahlt und mit Wasser gereinigt wurde. (siehe Kapitel 3.6).

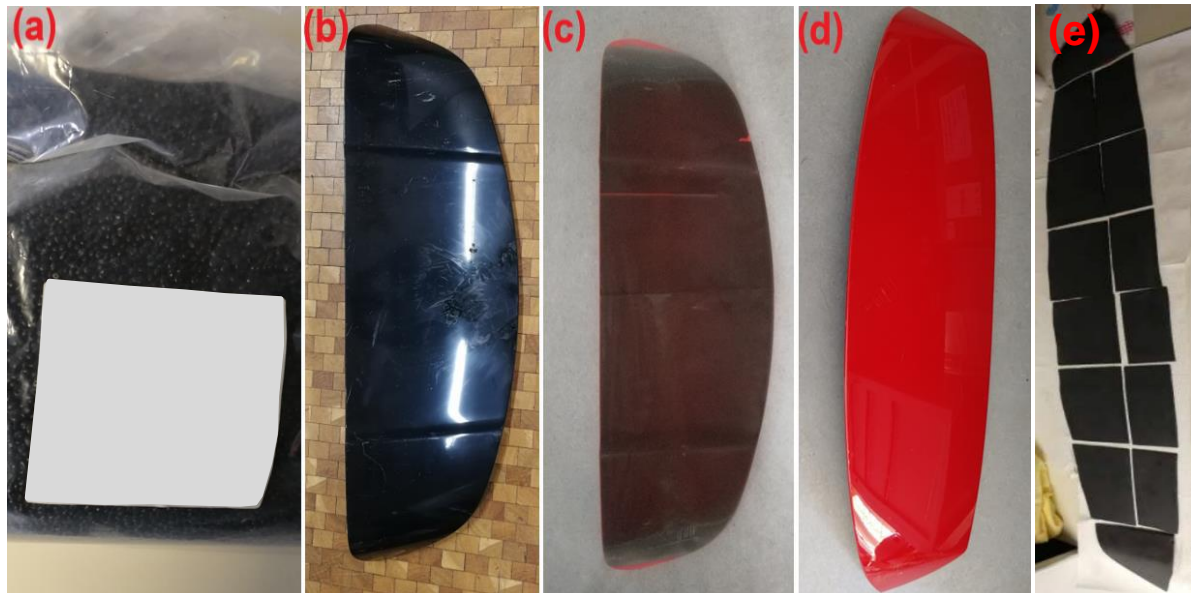


Abbildung 28: Rohmaterial (a), Bauteil unlackiert (b), Bauteil entlackt (c), Bauteil lackiert (d), Bauteil nachbehandelt (entlackt + gereinigt) (e)

Zum Vergleich dieser verschiedenen Varianten des Trägermaterials wurde aus den Bauteilen Granulat hergestellt und anschließend für die Zugprüfung zu genormten Prüfkörpern gespritzt.

Schmelzflussindex

Zur Bestimmung des Schmelzflussindex wurde das Schmelzflussprüfgerät MeltFlow@on der Firma Karg Industrietechnik verwendet. Das Schmelzflussprüfgerät ermittelt den MFR-Wert mithilfe einer Software.

MFR steht hierbei für die Melt Flow Rate, den Schmelzflussindex, welcher in $\frac{\text{Masse in g}}{10 \text{ min}}$ angegeben wird.

Der Versuch wurde bei einer Temperatur von 220°C in der Kapillare sowie mit einer Belastung von 10 kg durchgeführt. Diese Temperatur sowie die Belastung werden üblicherweise für Schmelzflussprüfungen für ABS verwendet.

Zugversuch

Der Zugversuch wurde an der Zugprüfmaschine MTS Criterion™ Model 43 von MTS nach der ISO 527, bei einer Raumtemperatur von 23°C durchgeführt.

Für das vorliegende ABS wird eine Prüfgeschwindigkeit von $50 \frac{mm}{min}$ verwendet. Wichtige Daten, die bei dem Versuch gewonnen wurden, sind die maximale Belastung, sowie die maximale Verformung bis zum Bruch.

Ergebnisse:

Schmelzflussindex

Die Datenblätter der einzelnen Schmelzflussmessungen wurden ausgewertet und zum Vergleich der Varianten in einer Tabelle dargestellt. Als vergleichbare Eigenschaft wurde hierbei der MFR-Wert in $\frac{g}{10 min}$ gewählt.

Tabelle 6: Vergleich der durchschnittlichen MFR Werte der fünf Varianten

Material	ØV1 [g/10min]	ØV2 [g/10min]	ØV3 [g/10min]	Ø
Rohmaterial	12,653	12,077	12,522	12,417
Bauteil unlackiert	11,677	11,864	11,818	11,786
Bauteil entlackt	15,813	16,099	15,317	15,743
Bauteil lackiert	21,67	22,875	24,428	22,991
Bauteil nachbearbeitet	13,464	13,393	14,439	13,765

Anhand der durchschnittlichen Werte der Varianten ist sehr gut zu erkennen, dass das Granulat aus einem lackierten Bauteil mit einem durchschnittlichen MFR Wert von $22,99 \frac{g}{10 min}$ einen deutlich höheren Wert aufweist, als das eigentliche Rohmaterial mit einem Wert von durchschnittlich $12,42 \frac{g}{10 min}$.

Der MFR Wert liegt beim Granulat vom lackierten Bauteil fast doppelt so hoch wie beim Rohmaterial. Dies kann einen erheblichen Einfluss auf die Verarbeitung des Kunststoffes aufweisen, da die Variante des lackierten Bauteils sehr viel schneller fließt. Gerade beim Spritzguss kann es daher zu Abweichungen im Prozess kommen, da die Parameter beim Spritzgießen auch auf die Fließeigenschaften eines Materials abgestimmt sind.

Während die Varianten Rohmaterial und Bauteil unlackiert sehr nah beieinander liegen wird sofort deutlich, dass die Variante Bauteil entlackt bereits etwas höher liegt als diese. Die Variante Bauteil lackiert hingegen liegt deutlich über den anderen Varianten mit einem fast doppelt so hohen Durchschnittswert, wie das Rohmaterial. Sehr gut erkennbar ist in der Tabelle auch die Schwankung der Messwerte der Variante Bauteil lackiert. Nachdem sich die Lackpartikel nicht homogen im Granulat verteilen, weisen die Proben der Variante Bauteil lackiert, unterschiedlich hohe Konzentrationen von Lackpartikeln auf und daher auch Schwankungen in den Messwerten. Diese Lackpartikel in der Variante „Bauteil lackiert“ beeinflussen somit sehr die Schmelzflusseigenschaften.

Eine Nachbearbeitung der entlackten Bauteile durch Strahlen mit Glasperlen könnte noch weitere Lackpartikel entfernen und somit eine bessere Qualität des Kunststoffes erreicht, dies ist deutlich bei der Variante „Bauteil nachbearbeitet“ sichtbar.

Etwas ungewöhnlich hingegen, war die Tatsache, dass die Variante Bauteil unlackiert einen geringeren MFR Wert als die Variante Rohmaterial aufweist. Hierzu wurde ein weiterer Versuch mit vorgetrockneten Proben der beiden Varianten durchgeführt, da das Rohmaterial als Granulat geliefert wurde und hierbei keine Angaben zu Vortrocknung gemacht wurden. Von den beiden Varianten wurden jeweils 10 g Granulat in einem Ofen für zwei Stunden bei 80°C getrocknet. Mit diesem vorgetrockneten Granulat wurden anschließend jeweils eine MFR Messung durchgeführt und die durchschnittlichen MFR Werte in der Tabelle 7 verglichen.

Tabelle 7: Vergleich der vorgetrockneten Varianten Rohmaterial und Bauteil unlackiert

Material	V1 [g/10min]	Ø ungetrocknet [g/10min]	[Δ] [g/10min]
Rohmaterial getrocknet	11,899	12,431	0,532
Bauteil unlackiert getr.	11,827	11,7916	0,0354

Das Rohmaterial getrocknet erreicht bei dieser Messung einen Wert von $11,89 \frac{g}{10 \text{ min}}$, was eine Abweichung von $0,53 \frac{g}{10 \text{ min}}$ im Vergleich zum Durchschnitt der vorherigen Messreihe von $12,43 \frac{g}{10 \text{ min}}$ zeigt. Die Werte des Bauteil unlackiert hingegen sind nahezu identisch mit der vorherigen Messreihe und haben eine Abweichung von nur $0,03 \frac{g}{10 \text{ min}}$.

Des Weiteren liegen die neuen Messwerte der beiden Varianten sehr nah beieinander. Somit lässt sich die Abweichungen der Varianten Rohmaterial und Bauteil unlackiert der vorherigen Messreihe mit einer unterschiedlichen Vortrocknung der beiden Varianten erklären. Die Varianten Bauteil unlackiert, Bauteil entlackt und Bauteil lackiert weisen hierbei keine Abweichungen auf, da sie alle identisch im Labor der Hochschule Ansbach hergestellt worden sind. Nur die Variante Rohmaterial wurde als Granulat geliefert und es war somit nichts über die Vortrocknung des Materials bekannt.

Zugversuch

Die beim Zugversuch gewonnenen Daten wurden ebenfalls ausgewertet und miteinander verglichen. Interessant für den Vergleich der verschiedenen Varianten waren hierbei die maximale Belastung in N sowie die maximale Verformung in mm.

Die Messpunkte wurden grafisch in einem Diagramm dargestellt (siehe Abbildung 29). Auf der X-Achse ist hierbei der zurückgelegte Weg des Querhaupts in mm dargestellt und auf der Y-Achse die Kraft in N. Der Datenpunkt mit der maximalen Kraft wurde rot markiert und mit seinen Werten gekennzeichnet. Der Datenpunkt mit dem maximalen Weg des Querhaupts wurde grün markiert und ebenfalls mit seinen Werten gekennzeichnet.

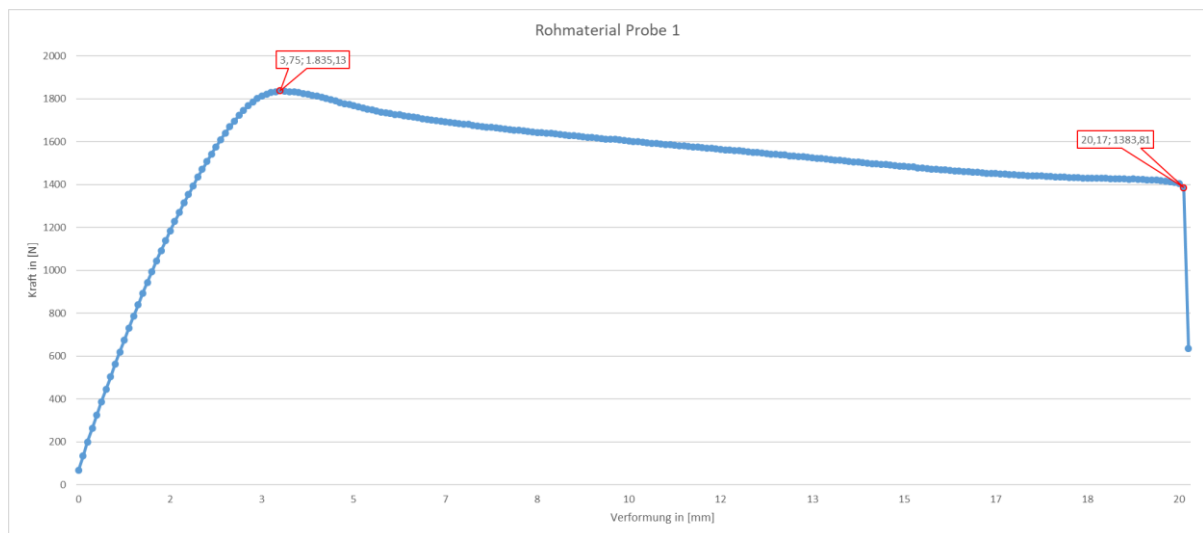


Abbildung 29: Diagramm der Werte der Variante Rohmaterial mit den Achsen Belastung in [N] und Verformung in [mm]

Die durchschnittliche maximale Belastung in N sowie die durchschnittliche maximale Verformung in mm wurde für jede Probe bestimmt und in der folgenden Tabelle erfasst.

Tabelle 8: Vergleich der durchschnittlichen maximalen Belastung und der durchschnittlichen maximalen Verformung bis zum Bruch der fünf Varianten

Variante	Ø max. Belastung in N	Ø max. Verformung bis Bruch in mm
Rohmaterial	1817,85	19,05
Bauteil unlackiert	1820,80	20,37
Bauteil entlackt	1747,33	14,65
Bauteil lackiert	1718,64	6,52
Bauteile nachbearbeitet	1743,66	15,65

Anhand der Werte in Tabelle 8 ist sehr gut zu erkennen, dass die Varianten Rohmaterial und Bauteil unlackiert sehr ähnliche Werte der maximalen Belastung und der maximalen Verformung aufweisen. Bei der Variante Bauteil entlackt ist die durchschnittliche maximale Kraft hingegen etwas geringer und der durchschnittliche maximale Weg bis zum Bruch ist ca. 5 mm kürzer.

Die Variante Bauteil lackiert hingegen weist deutlich schlechtere Werte auf. Die maximale durchschnittliche Kraft beträgt bereits circa 100 N weniger als die der Varianten Rohmaterial und Bauteil unlackiert. Der durchschnittliche maximale Weg bis Bruch beträgt sogar insgesamt nur 6,52 mm was circa einem Drittel der Varianten Rohmaterial und Bauteil unlackiert entspricht. Hierbei ist eine klare Verschlechterung der Werkstoffeigenschaften zu erkennen, da die Variante Bauteil lackiert weniger Belastung standhält und deutlich schneller bricht. Die Werte für die nachbearbeiteten Bauteile entsprechen den Werten der entlackten Bauteile.

Ein noch deutlicheres Ergebnis ist zu sehen, wenn die durchschnittliche maximale Belastung bis zum Bruch der einzelnen Varianten miteinander verglichen wird. Bei diesem Vergleich ist sofort sichtbar, dass sich die Varianten Rohmaterial und Bauteil unlackiert wieder in einem ähnlichen Bereich bewegen. Auch die Variante Bauteil entlackt ist nur geringfügig unter diesen beiden Varianten angeordnet. Die Variante Bauteil lackiert hingegen weist deutlich schlechtere Eigenschaften auf.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen deutlich, dass die Lackpartikel einen großen Einfluss auf die Qualitätseigenschaften des recycelten Kunststoffes haben. Umso mehr Lackpartikel vorhanden sind, umso schlechter sind die Ergebnisse der einzelnen Versuche.

Dies zeigt, dass die Entlackung der Bauteile die Qualitätseigenschaften des recycelten Kunststoffes erhöht. Die Qualitätseigenschaften des entlackten Bauteils sind jedoch noch nicht so gut, wie die des unlackierten Bauteils, da wie der mikroskopische Versuch ergeben hat, immer noch restliche Lackpartikel enthalten sind. Um hier ein Rezyklat mit ähnlichen Qualitätseigenschaften wie die Variante Bauteil unlackiert produzieren zu können muss der Entlackungsprozess eine bessere Entlackung ermöglichen. Dies wird durch eine Nachbearbeitung nach dem eigentlichen Entlacken erreicht. Hierbei wird nach dem eigentlichen Entlackungsvorgang noch eine Nachbearbeitung in Form von Strahlen mit Glasperlen, sowie ein Waschvorgang mit Wasser und Bürste durchgeführt. Durch die mechanische Belastung beim Strahlen wurden weiter Lackpartikel von der Oberfläche des Bauteils entfernt, welche beim Entlacken per Laser noch nicht entfernt wurden. Das Reinigen per Wasser und Bürste entfernte anschließend noch Verunreinigungen in Form von Staub, welche beim Strahlen entstanden sind. Das hierbei erzielte Ergebnis weist keine mit bloßem Auge erkennbaren Lackpartikel an der Oberfläche mehr auf.

Eine Verarbeitung hingegen, wie sie bei der Variante Bauteil unlackiert im Vergleich zur Variante Rohmaterial stattgefunden hat, verändert die Werkstoffeigenschaften kaum. Die Messergebnisse der Varianten Rohmaterial und Bauteil unlackiert waren bei allen Versuchen sehr nah bei einander. Für weiterführende Versuche bietet sich ein Vergleich der Qualitätseigenschaften eines Entlackten und nachbearbeiteten Bauteils mit den Qualitätseigenschaften des Rohmaterials, sowie der Variante Bauteil entlackt an.

3.5.3 Oberflächentopologie

Die Oberflächen der laserbearbeiteten Bauteile wurden mithilfe eines Digitalmikroskops (siehe Abbildung 30) analysiert sowie ein dreidimensionales Höhenprofil erstellt.



Abbildung 30: Digitalmikroskop der Hochschule Ansbach

Diese Untersuchungen der bearbeiteten Oberflächen zeigte, dass aufgrund der verschiedenen Laserparameter die Oberflächen unterschiedlich aussehen. In Abbildung 31 ist deutlich der Unterschied von einer beschädigten zu einer nicht beschädigen Oberfläche zu erkennen. Die glänzenden Flächen sind Verbrennungen auf der Oberfläche, welche die Thermoplaste schädigen und somit deutliche Qualitätsverluste bei einem späteren Recycling verursachen, im späteren Entlackungsprozess sollten deshalb Beschädigungen an der Oberfläche vermieden werden.



Abbildung 31: Oberflächen der laserbearbeiteten Bauteile (Trägermaterial ABS)
(links: unbeschädigt, mitte: leicht beschädigt, rechts: beschädigt)

Die nachfolgende Abbildung 32 zeigt das dreidimensionale Höhenprofil eines laserbearbeiteten Bauteils. Im Bild links oben ist der Höhenunterschied aufgrund der entfernte Lackschicht auf der linken Seite zu erkennen. Das Höhenprofil (Bild unten) zeigt diesen Unterschied nochmals deutlich (ca. 90 µm)

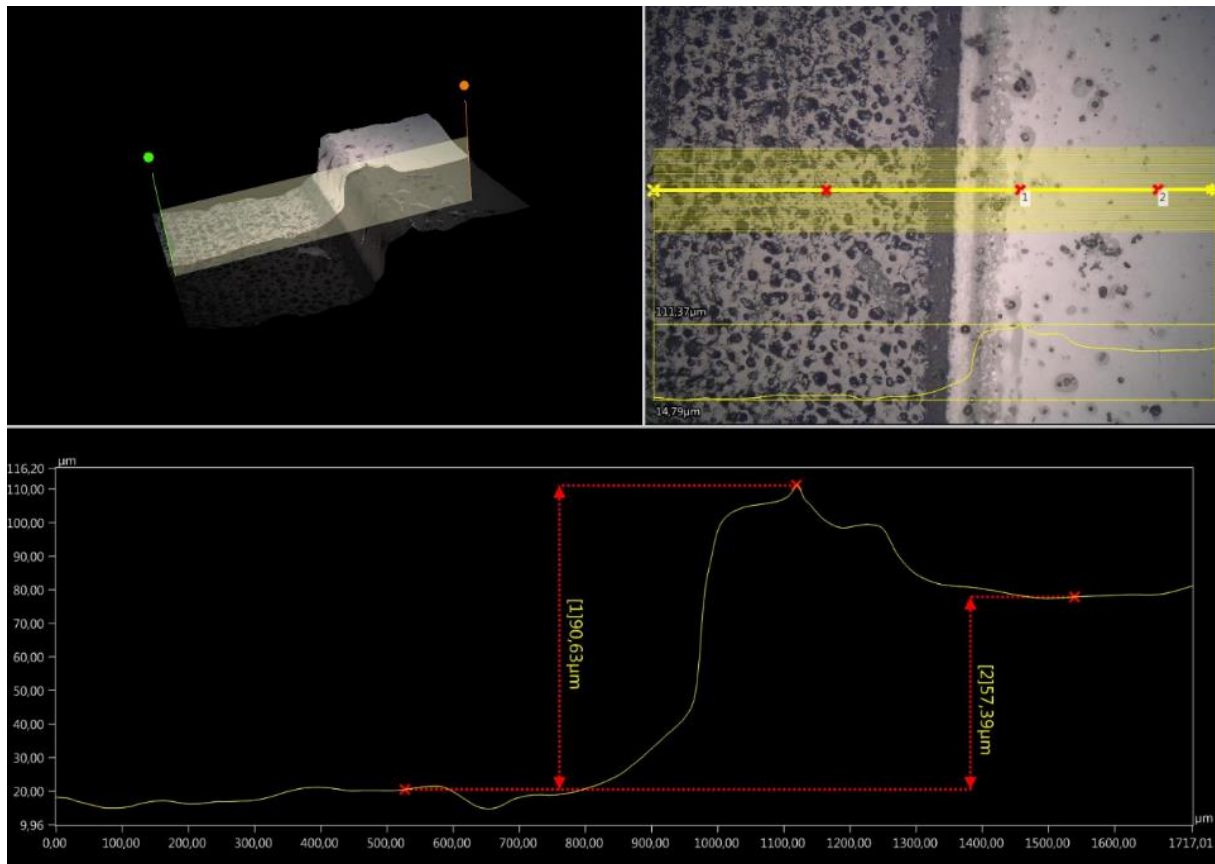


Abbildung 32: Dreidimensionales Höhenprofil eines entlackten Bauteils

3.5.4 IR-Untersuchung der entlackten Bauteile

Mithilfe einer IR-Untersuchung wurde überprüft, ob die Oberfläche der entlackten Teilen mit der Oberfläche eines Rohteils übereinstimmt und somit nachgewiesen werden kann, dass die Lackschicht vollständig abgelöst wurde.

In der nachfolgenden Abbildung 33 sind die beiden IR-Spektren abgebildet und wie zu erkennen ist, sind beide Spektren, außer leichte Abweichungen aufgrund von Rückständen des Primers, sehr ähnlich. Eine „Lackschicht“ kann somit nicht mehr auf der Oberfläche nachgewiesen werden.

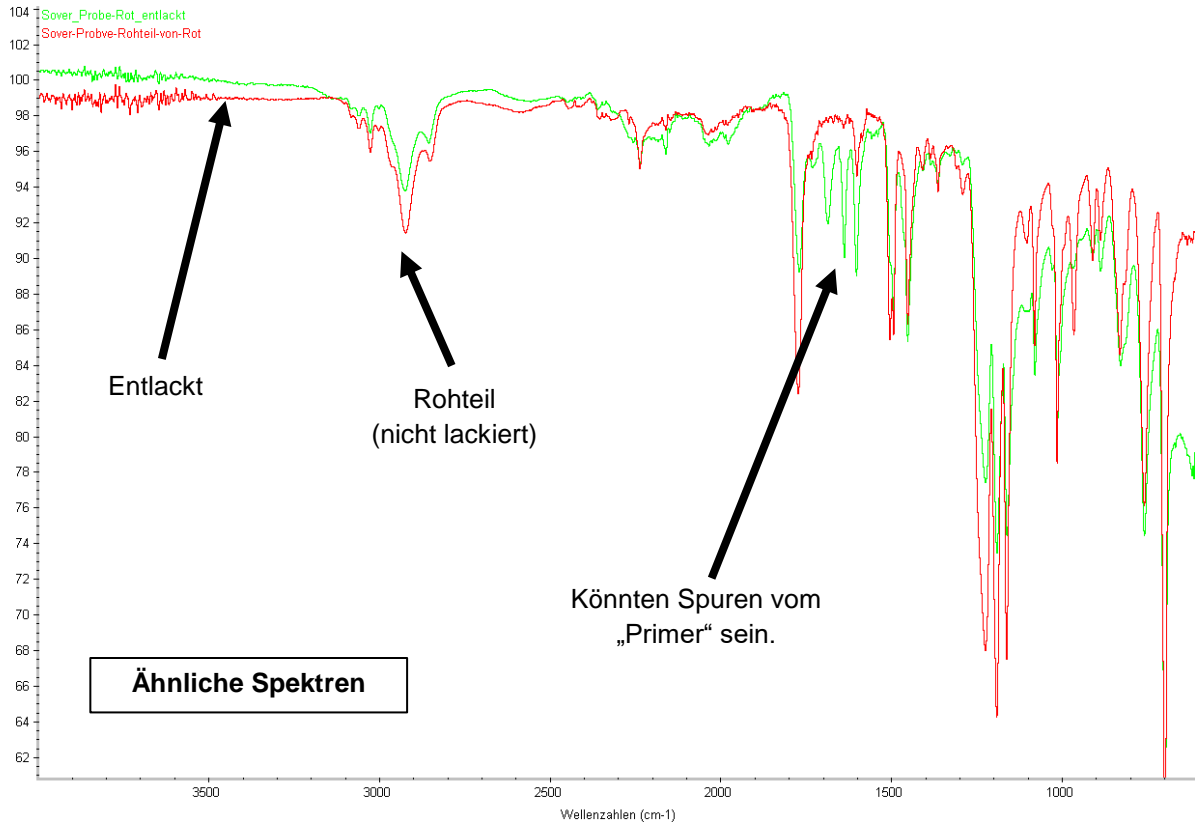


Abbildung 33: IR-Spektren der Proben "Rohteil" und "entlackt"

3.6 Untersuchung zur Notwendigkeit weiterer Nachbearbeitungsschritte

Die Nachbearbeitung dient dazu, Lackpartikel, welche nach dem Entlacken per Laser noch auf dem Kunststoffbauteil sind, zu entfernen und somit ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen. Des Weiteren ist die Nachbearbeitung auch ein erster Schritt zur Vorbereitung des Kunststoffes auf eine nachfolgende Regranulierung. Als Verfahren zur Nachbearbeitung wurden das Abbürsten mit Wasser, das Abstrahlen mit dem Strahlmittel Nusschalen und das Abstrahlen mit dem Strahlmittel Glasperlen getestet. Wichtig hierbei war, dass bereits ein Großteil der Lackschicht direkt nach dem Lasern per Skalpell entfernt wurde, um ein gutes Ergebnis (siehe Abbildung 34) zu erzielen.



Abbildung 34: Entlacktes und nachbearbeitetes Bauteil

3.6.1 Abbürsten mit Wasser

Als erste Art der Nachbearbeitung wurde das Abbürsten mit einer handelsüblichen Spülbürste getestet. Hierbei wirken mechanische Kräfte auf die Oberfläche des Bauteils ein, um die verbleibenden Lackpartikel von dieser zu entfernen. Das Ganze erfolgt unter fließendem Wasser, da die Bauteile nach dem Laserentlacken noch Schmutzpartikel auf der Oberfläche haben, welche hierdurch entfernt werden. Grundsätzlich sollte diese Methode als vorbereitende Maßnahme auf das Regranulieren immer angewendet werden, um den Kunststoff zu reinigen und somit die Qualität des Regranulats zu erhöhen. Für die erste Versuchsreihe wurde ein Bauteil direkt nach dem Laserentlacken und grobem Entfernen der Lackschicht per Skalpell, unter fließendem Wasser abgebürstet und das Ergebnis anschließend optisch begutachtet.

Das Bürsten per Hand mit einer Spülbürste erzeugt nur geringe mechanische Kräfte auf die Oberfläche und kann somit nicht alle Partikel lösen. Ein Blick durch das Mikroskop (siehe Abbildung 35) zeigt, dass nach dem Bürsten sich noch Lackpartikel auf der Oberfläche des Bauteils befinden. Das Bürsten eignet sich somit nicht als alleinige Maßnahme der Nachbearbeitung, da die Auswirkung auf die restlichen Lackpartikel auf den Oberflächen zu gering sind und kein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht wird. Eine Anwendungsmöglichkeit wäre, das Abbürsten mit Wasser als den letzten Schritt der Nachbearbeitung zu verwenden, wenn das Teil vorher mit einem Strahlmittel abgestrahlt wird. Dieser Prozess verursacht eine staubige Schicht aus Partikel- und Strahlmittelresten auf der Oberfläche, welche vor dem Regranulieren entfernt werden sollte. Hierbei genügen die geringen mechanischen Kräfte der Bürste, um die Oberfläche zu reinigen.

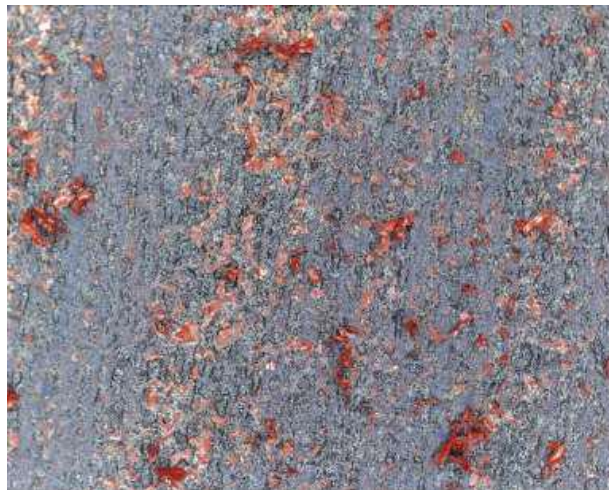


Abbildung 35: Mikroskopische Aufnahme der Bauteiloberfläche nach dem Bürsten

3.6.2 Strahlen mit Nussschalen

Eine weitere Art der Nachbearbeitung ist das Abstrahlen der Oberfläche mittels Nussschalen. Das Abstrahlen erfolgt in einer Saugstrahlkabine (siehe Abbildung 36). In dieser werden Nussschalen per Luftdruck beschleunigt und auf die Oberfläche des Kunststoffbauteils geschossen. Hierbei werden die Lackpartikel von der Oberfläche abgetragen und das Kunststoffbauteil gereinigt. Die Nussschalen wurden als Strahlmittel gewählt, da diese eine geringe Härte aufweisen und sich somit für weichere Oberflächen wie Kunststoff sehr gut eignen. Ein weiterer Vorteil ist der ökologisch wertvolle Faktor der Nussschalen, welche ein biologisch abbaubares Abfallprodukt darstellen und somit keine Schäden an der Umwelt verursachen.



Abbildung 36: Saugstrahlkabine (links: Außenansicht; rechts: Innenansicht)

Für den Versuch wurde ein Kunststoffbauteil vorbereitet und laserbearbeitet. Anschließend wurden die einzelnen Teile in der Saugstrahlkabine mit Nusschalenstrahlmittel bestrahlt und anschließend die Oberflächen optisch begutachtet. Hierbei wurde solange gestrahlt, bis mit bloßem Auge keine Lackreste mehr auf der Oberfläche sichtbar waren.

Zur besseren Visualisierung der Ergebnisse wurden die Bilder vor und nach der Bearbeitung nebeneinander dargestellt. (siehe Abbildung 37) Deutlich zu erkennen ist, dass durch die Nachbearbeitung die größten Lackreste auf der Vorderseite entfernt wurden.

Das Bauteil vor der Bearbeitung befindet sich hierbei auf der linken Seite, das Bauteil nach der Bearbeitung auf der rechten Seite. Wie zu erkennen ist, wurden durch die Nachbearbeitung die größten Lackreste auf der Vorderseite entfernt. Es gab allerdings ein Einzelteil, von welchem sich der Lack auch nach intensiver Bestrahlung nicht ablösen ließ und ein weiteres, welches nicht vollständig laserbearbeitet wurde, so dass eine Randschicht aus Lack bestehen blieb. Bei dem Einzelteil, von welchem sich der Lack nicht ablösen ließ hat ein Fehler bei der Fokussierung bei der Laserbearbeitung zu diesem Ergebnis geführt, da bereits vor der Nachbearbeitung der Lack sich kaum per Skalpell lösen ließ.



Abbildung 37: Vorderseite Bauteil vor (links) und nach (rechts) dem Strahlen

Die mikroskopische Untersuchung zeigte, dass auf der Vorderseite (siehe Abbildung 38) noch kleine rote Lackpartikel auf der Oberfläche zu erkennen sind.



Abbildung 38: Mikroskopische Aufnahme der Oberfläche der Vorderseite

Auf der Oberfläche der Vorderseite befinden sich hierbei deutlich mehr Lackpartikel, was sich auf die Lackpartikeldichte vor der Entlackung zurückführen lässt. Das Verfahren eignet sich nicht für eine vollständige Entlackung, da immer noch Lackpartikel auf der Oberfläche übrigbleiben. Um dieses Ergebnis zu verbessern wird im nächsten Versuchsabschnitt ein anderes Strahlmittel verwendet.

3.6.3 Strahlen mit Glasperlen

Für die Bestrahlung mit Glasperlen wird die gleiche Saugstrahlkabine wie beim Strahlen mit Nusschalen verwendet, lediglich das Strahlmittel wird hierbei geändert. Als neues Strahlmittel werden Glasperlen verwendet. Diese haben gegenüber den Nusschalen den Vorteil, dass sie eine höhere Härte und eine kleinere Korngröße haben. Dies führt zu einer feineren Bearbeitung der Oberfläche und einem besseren Abtragen der Lackpartikel.

Genau wie bei der Versuchsdurchführung mit dem Strahlmittel Nusschalen wurde auch beim Bestrahlen der Bauteile mit Glasperlen die Teile einzeln gestrahlt und anschließend optisch begutachtet. Die Parameter der Laserbearbeitung waren bei allen Bauteilen gleich.

Das Strahlen mit Glasperlen erzeugte optisch sehr gute Ergebnisse. Sowohl auf der Rückseite (siehe Abbildung 39 rechts) als auch auf der Vorderseite (siehe Abbildung 39 links) waren direkt nach dem Strahlen keine Lackpartikel mehr erkennbar. Auch die Dauer des Strahlens war geringer als beim Strahlmittel Nusschalen. Während beim Strahlen mit Nusschalen die Teile teilweise mehrere Minuten lang abgestrahlt werden mussten war die Dauer beim Strahlen mit Glasperlen deutlich geringer.



Abbildung 39: Vorderseite (links) und Rückseite (rechts) des Bauteils nach dem Strahlen mit Glasperlen

Bevor das Bauteil unter dem Mikroskop auf Lackpartikel untersucht wurde, wurde es per Bürste und Wasser gereinigt, um die beim Strahlen entstandene Staubschicht zu entfernen. Die mikroskopische Betrachtung der Vorderseite (siehe Abbildung 40 links) zeigt, dass keine roten Lackpartikel mehr zu erkennen sind. Auf der Rückseite (siehe Abbildung 40 rechts) sind noch leichte rötliche Schimmer zu erkennen, die auf restliche Lackpartikel hinweist.



Abbildung 40: Mikroskopische Aufnahme der Vorderseite (links) und Rückseite (rechts) des Bauteils

Das Strahlen mit dem Strahlmittel Glasperlen hat die besten Ergebnisse erzielt. Das Bürsten mit Wasser eignet sich hingegen als eine zusätzliche Maßnahme zu den beiden Strahlmethoden und sollte vor der Regranulierung angewendet werden. Im Vergleich zum Strahlen mit Nusschalen hat das Strahlen mit Glasperlen die übrigen Lackpartikel auf der Vorderseite sehr gut entfernt, sodass selbst unter dem Mikroskop keine Rückstände mehr sichtbar waren. Auf der Rückseite hingegen sind unter dem Mikroskop immer noch Lackrückstände zu sehen, diese sind allerdings minimal.

3.7 Laserentlackung weiterer Bauteile mit optimierten Prozessparametern

Im nächsten Schritt wurde bei weiteren Materialien (PP/EPDM sowie PC/PBT) mit unterschiedlichen Lackfarben versucht die Lackschichten zu entfernen. Die verwendeten Teile wurden ebenfalls von der Fa. HP-T Höglmeier zur Verfügung gestellt, siehe folgende Abbildung 41.

Wie bereits erläutert, wurden die optimalen Laserparameter wieder mit dem Applikationsassistenten ermittelt.



Abbildung 41: Farbige lackierte Thermoplasten (Trägermaterial PP/EPDM) mit verschiedenen Lackfarben

Mit den ermittelten Laserparametern wurden anschließend eine großflächige Entlackung der Bauteile untersucht. Die Lackschicht lässt sich auch bei einer großflächigen Entlackung sehr gut ablösen (siehe Abbildung 42)

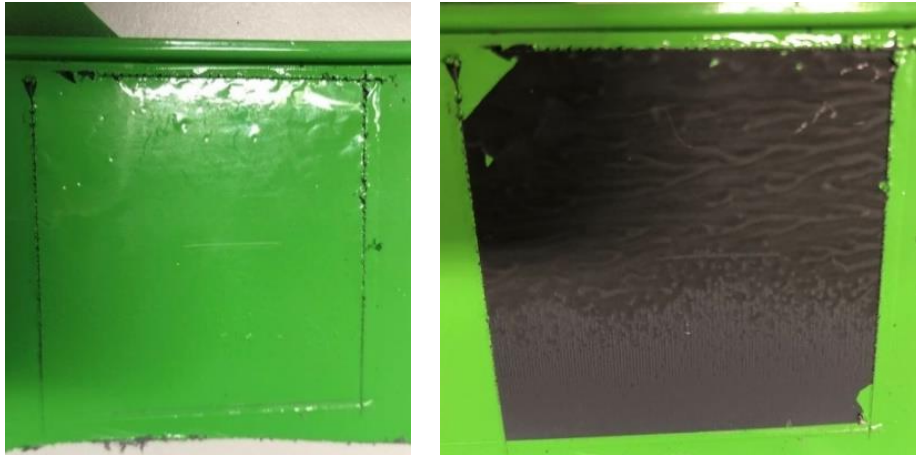


Abbildung 42: Mit den optimalen Laserparametern wird eine Fläche von 50 mm x 50 mm bearbeitet.

In Abbildung wurde die Entlackung bei lackierten Thermoplasten mit dem Trägermaterial PC/PBT untersucht.

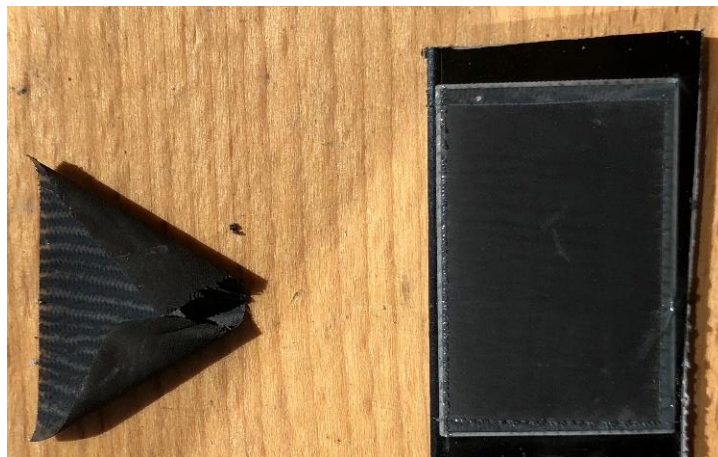


Abbildung 43: Großflächige Entlackung (20 mm x 30 mm) von PC/PBT

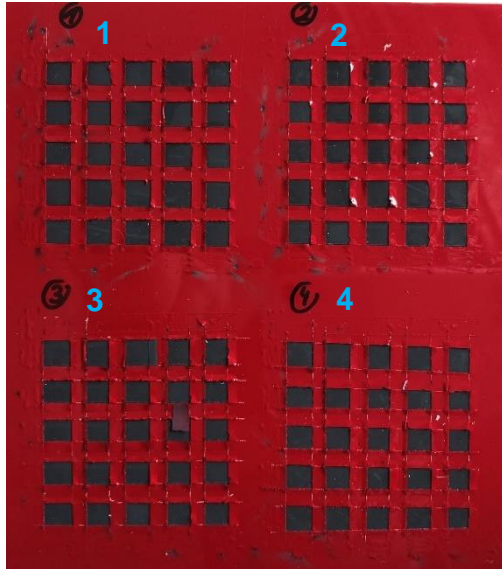
Die ausführlichen Untersuchungen zur Entlackung von lackierten Thermoplasten zeigten, dass die rückstandslose Ablösung der Lackschicht möglich ist und die erforderliche Qualität und Vollständigkeit der Lacktrennung erreicht werden kann.

Die erfolgreiche Entlackung ist bei folgenden Trägermaterialien mit unterschiedlichen Lackfarben nachgewiesen:

- ABS
- PC/PET
- PC/PBT
- PP
- PP/EPDM

Optimierung der Entlackungsgeschwindigkeiten

Im nächsten Schritt erfolgt die Ermittlung der maximal erreichbaren Entlackungsgeschwindigkeiten. Für die Festlegung des Laserparameters „Geschwindigkeit“ wurde erneut der Applikationsassistent verwendet. Die bereits bekannten restlichen Parameter wurden jeweils konstant gehalten und der Parameter „Geschwindigkeit“ auf der X-Achse in 500 mm/s Schritten erhöht. In den beiden nachfolgenden Abbildungen ist deutlich zu erkennen, dass die Erhöhung der Geschwindigkeit keinen Einfluss auf die Qualität der Entlackung hat.

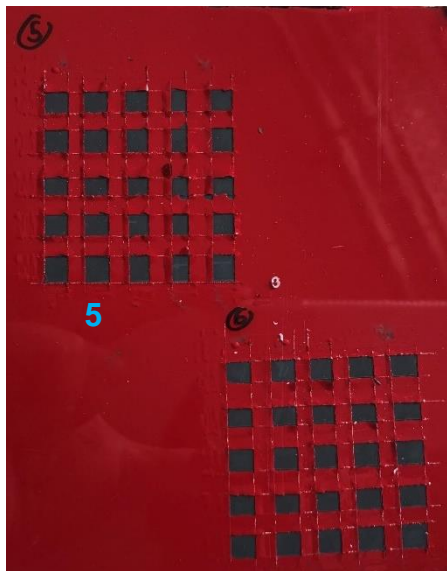


Änderung der Geschwindigkeit auf der horizontalen Achse in 500 $\frac{mm}{s}$ Schritten.

Der Parameter „Geschwindigkeit“ beträgt somit pro Rechteck (von links nach rechts):

- 1: 3.500; 4.000; 4.500; 5.000; 5.500 ($\frac{mm}{s}$)
- 2: 5.500; 6.000; 6.500; 7.000; 7.500 ($\frac{mm}{s}$)
- 3: 7.500; 8.000; 8.500; 9.000; 9.500 ($\frac{mm}{s}$)
- 4: 9.500; 10.000; 10.500; 11.000; 11.500 ($\frac{mm}{s}$)

Abbildung 44: Optimierung der Entlackungsgeschwindigkeit



Änderung der Geschwindigkeit auf der horizontalen Achse in 500 $\frac{mm}{s}$ Schritten.

Der Parameter „Geschwindigkeit“ beträgt somit pro Rechteck (von links nach rechts):

- 5: 11.500; 12.000; 12.500; 13.000; 13.500 ($\frac{mm}{s}$)
- 6: 13.500; 14.000; 14.500; 15.000; 15.500 ($\frac{mm}{s}$)

Abbildung 45: Optimierung der Entlackungsgeschwindigkeit

Lasergeschwindigkeiten bis zu 15.000 mm/s sind somit ohne Probleme möglich.

Mit diesen Parametern wurde anschließend versucht großflächig zu entlacken. Wie in Abbildung 46 zu erkennen ist, ist auch hier die rückstandslose Ablösung des Lacks möglich. Die Bearbeitungszeit einer Fläche von 130 mm x 130 mm beträgt bei dieser Lasergeschwindigkeit ca. 4,8 Sekunden.

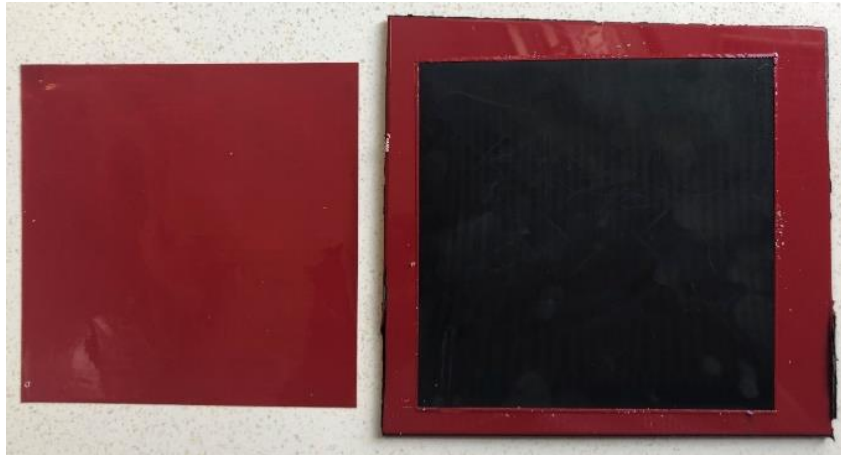


Abbildung 46: Großflächige Entlackung (130 mm x 130 mm)

Im nächsten Schritt wurde die Entlackung einer Fläche von einem Quadratmeter berechnet:

$$\frac{16.900 \text{ mm}^2 (130 \text{ mm} \times 130 \text{ mm})}{4,8 \text{ s}} = 3.520 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

$$\frac{1.000.000 \text{ mm}^2 (\approx 1 \text{ m}^2)}{3.520 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}} = 284 \text{ s} = 4,7 \text{ min}$$

Die Entlackung dieser Fläche (1 m²) könnte somit nur ca. 4,7 Minuten dauern.

3.8 Untersuchung der entstehenden Prozessgase

Bei der Laserbearbeitung der lackierten Kunststoffteile entstehen aufgrund der thermische Belastung unterhalb der Lackschicht Prozessgase; diese Gase erzeugen kleine Bläschen auf der Oberfläche. Mithilfe einer Spritze wurden die Gase von der Unterseite der Lackschicht abgezogen und mithilfe einer Gasmesszelle im IR Spektrometer ausgewertet. Zudem wurden der Einfluss der Lasergeschwindigkeit auf die entstehenden Prozessgase untersucht; hierfür wurden verschiedenen Entlackungsversuche mit unterschiedlichen Lasergeschwindigkeiten ($2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bzw. $20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) durchgeführt. Im nachfolgenden IR-Spektrum (Abbildung 47) ist erkennbar, dass bei einer langsameren Lasergeschwindigkeit ($2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) und somit einer höheren thermische Belastung der Oberfläche leichte Spuren von Blausäure (HCN) entstehen können. Bei einer höheren Lasergeschwindigkeit ($20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) ist dieser Cyanwasserstoff nicht mehr im Spektrum erkennbar.

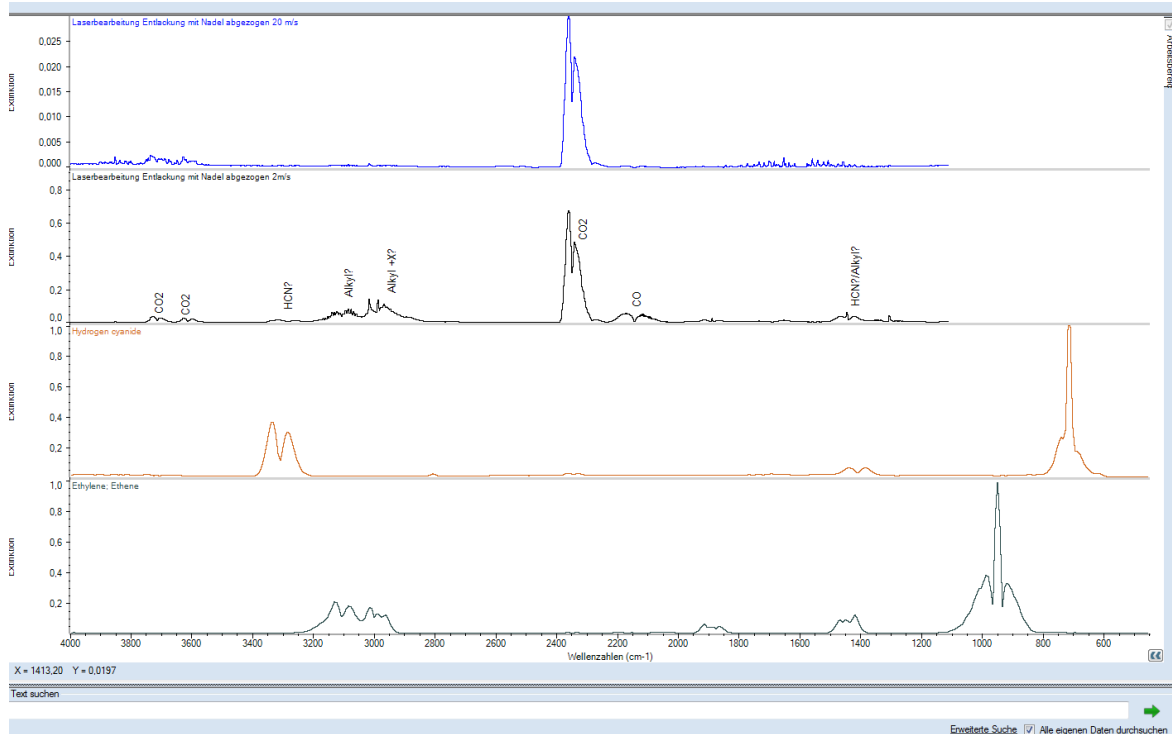


Abbildung 47: IR Spektrum der Prozessgase

3.9 Erstellung einer Datenbank

Sämtliche Ergebnisse von den unterschiedlichsten Entlackungsversuchen wurden in einer Excel-Datei dokumentiert. Sie liefert Informationen über Zusammenhänge zwischen Prozess, Materialien und Verfahren und dient als Datenbasis für die Optimierung von Bearbeitungsparametern und Lacksystemen.

Für eine spätere Industrialisierung dieses Prozesses dient sie als Grundlage für die benötigten Lasereinstellungen für die unterschiedlichsten Materialien und Lackfarbe.

Nachfolgend ein Auszug aus der Datenbank:

Tabelle 9: Auszug Datenbank

Materialeigenschaften		Laserparameter					
Lackfarbe	Trägermaterial	Pumpleistung [%]	Frequenz [kHz]	Geschwindigkeit [mm/s]	Punktabstand [mm]	Pulsbreite [ns]	Linienbreite [mm]
grün	PP/EPDM	98	300	10.000	0,0333	120	0,200
schwarz	PC/PBT	98	300	1.000	0,0333	120	0,200
silber	ABS	98	300	4.000	0,0067	120	0,200

3.10 Ergebnisbewertung, Präsentation und Abschlussbericht

Mit der Öffentlichkeitsarbeit wurde auf Basis der Projektergebnisse intensive Gespräche mit Recyclingunternehmen, OEMs, Hersteller von Laseranlagen, usw. geführt. Die Projektergebnisse begünstigen diese Gespräche dahingehend, dass mit dem entwickelten Verfahren die verschiedensten lackierten Thermoplaste bearbeitet werden können und somit diese Technologie bei den unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt werden kann.

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten wurden zudem auf verschiedenen internationalen Konferenzen wie z.B. „Business meets Technology“ (Ansbach - Deutschland 2020), „Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Conference – IMANEE“ (Pitesti – Rumänien 2019), in mehreren Papern „Research on the Process of Paint Removal from Thermoplastic Materials by Laser“ [Sov19] bzw. „Study on the Process of Paint Removal from Thermoplastic Materials by Laser Technology“, im Poster „Paint Removal from Thermoplastic Materials by Laser Technology“, im Report „kunststoffland NRW“ [Men20] sowie auf der Homepage [Hsa20] der Hochschule für angewandte Wissenschaften Ansbach vorgestellt.

Zudem werden die Erkenntnisse im Rahmen von verschiedenen Vorlesungen an berufs begleitende Studenten des Studiengangs „Angewandte Kunststofftechnik“ und in Seminaren von Line-to-Circle des Biomasse-Instituts - eine gemeinsame Einrichtung der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf und der Hochschule Ansbach - weitergegeben.

4 Fazit und Ausblick

Zum nachhaltigen Recycling von lackierten thermoplastischen Teilen ohne dabei Qualitätsverlust beim Recyclat zu erhalten, ist es unerlässlich, die Lackschicht vom thermoplastischen Trägermaterial zu entfernen. Um die enormen Abfallmengen aus lackierten Kunststoffteilen zu bewältigen und gleichzeitig das Recyclat aufzubereiten, muss in Zukunft die „Laserentlackung“ in der Recyclingindustrie zur nachhaltigen Verarbeitung ihrer technischen Kunststoffe eingesetzt werden. Diese Technologie bietet neue Möglichkeiten zur Rückgewinnung und Wiederverwendung des thermoplastischen Materials aus den Anwendungen für lackierte Kunststoffteile. Die recycelte Stoßstange wird mit dem Laser bearbeitet und die Lackschicht vom Trägermaterial getrennt. Anschließend kann das Trägermaterial ohne Lackreste granuliert werden und zu einem neuen Produkt verarbeitet werden. Die Lackschicht kann ebenfalls separat recycelt werden. (siehe Abbildung 48)

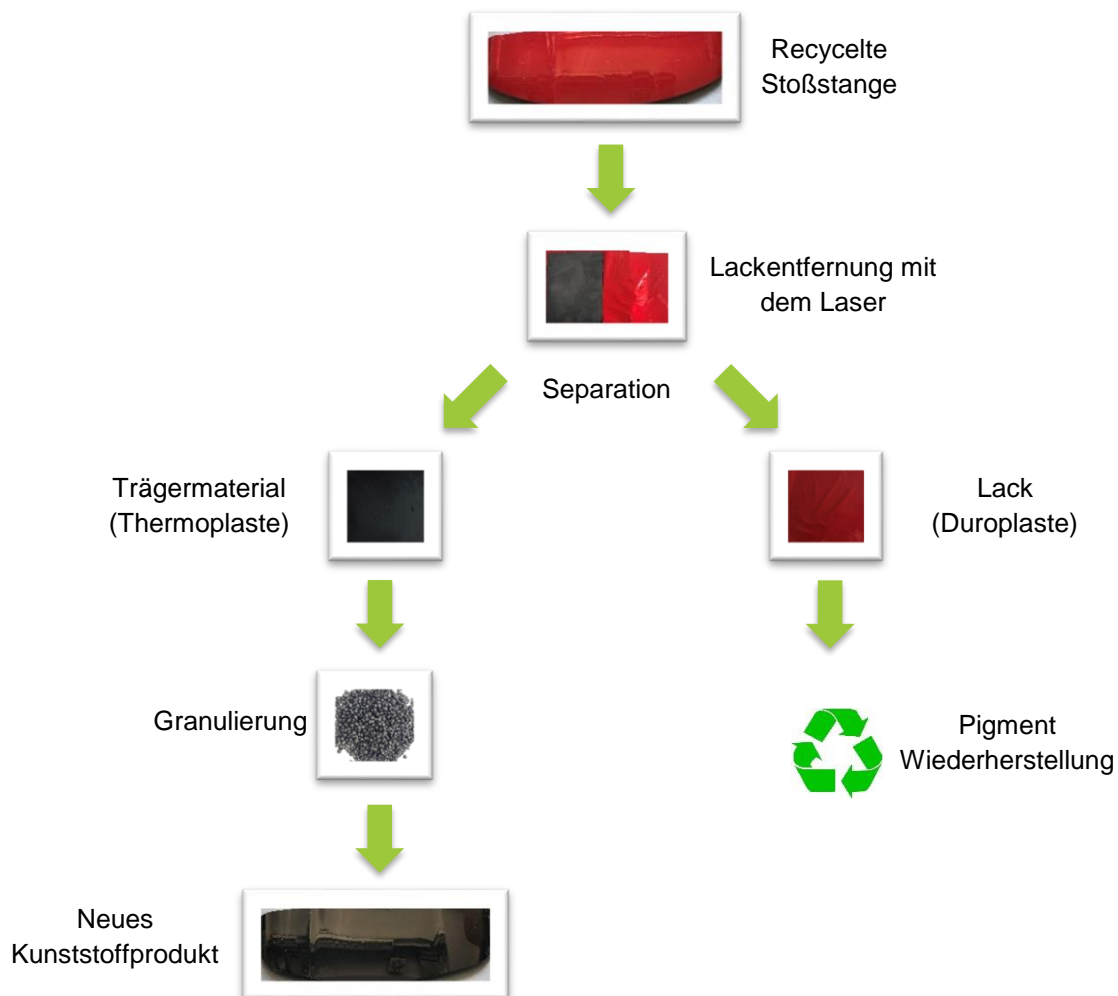


Abbildung 48: Neuer Stoffkreislauf zur Rückgewinnung und Wiederverwendung des thermoplastischen Materials

Die Lasertechnologie ist einfach zu bedienen und leise, hat niedrige Betriebskosten und benötigt keine Verbrauchsmaterialien oder umweltgefährdende Medien (Schleifmittel, Chemikalien oder Lösungsmittel). Darüber hinaus sind, abgesehen vom Strahlenschutz, keine besonderen Umweltschutzmaßnahmen erforderlich.

Das im Projekt generierte Wissen soll in einem Folgevorhaben verwendet werden, um eine industrielle Entlackungsanlage zu bauen und sie industriell zu betreiben. Alle gewonnenen Informationen bezüglich Laserentlackung und ggf. erforderliche Vor- oder Nachbereitungsprozesse werden einfließen, um eine hohe Automatisierung des Prozesses zu gewährleisten.

Die industrielle Laserentlackung könnte künftig von einschlägigen Recyclingunternehmen und kunststoffverarbeitenden Betrieben durchgeführt werden. Erstere könnten ihr Geschäftsmodell als Sekundärrohstofflieferant ausbauen, letztere ihre Ressourceneffizienz verbessern. Zudem erscheint ein Wissenstransfer über die Möglichkeiten des Verfahrens in die Entwicklungsabteilungen kunststoffverarbeitender Betriebe zielführend, damit die Recyclingfähigkeit von Bauteilen schon beim Produktdesign berücksichtigt werden kann.

Für die Optimierung der Entlackung hinsichtlich einer Industrialisierung dieses Prozesses sind aber noch weitere materialtechnische Untersuchungen an den zu entlackenden Materialien notwendig.

An das Vorhaben anknüpfend können weitere Forschungsfragen mit hoher Praxisrelevanz bearbeitet werden. Produzierende Kunststoffunternehmen (z.B. für Automobilindustrie, Baubranche bzw. ihre Zuliefernden) können ihre lackierten Bauteile recyclinggerecht entlacken lassen oder diese Technologie selbst anschaffen. Schon heute sind mehrere Unternehmen interessiert, eine umweltfreundliche Technologie für das Recycling von lackierten Produktionsabfällen aus der kunststoffverarbeitenden Industrie einzusetzen. Die Branche ist mittelständisch strukturiert und umfasst in Deutschland mehrere hundert Unternehmen.

Zukünftig wird die Laser-Entlackung in der Recycling-Industrie eine entscheidende Rolle bei der Entfernung der Farbschicht spielen, um die enormen Abfallmengen von lackierten Kunststoffteilen zu bewältigen und gleichzeitig das Recyclat nachhaltig aufzubereiten.

5 Literaturverzeichnis

- [Arn20] ARNOLD, R., Dr.; „*Lexikon der IR-Spektroskopie*“ [Online], Available: <http://www.ir-spektroskopie.de/basics/lexikon.html>. [Zugriff am 15 06 2020]
- [Bac93] BACHHUBER, A.; BERGMANN, H.-W., Prof.Dr.-Ing.; UFER, Peter, Dipl.-Ing.; LINDNER, Horst, Dipl.-Ing., „*Verfahren zum Entlacken von Teilen*“. Deutschland Patent DE000004202074A1, 29 07 1993
- [Cle20] CLEAN-LASERSYSTEME GmbH; „*Wie funktioniert das Laserverfahren?*“, [Online]. Available: <https://www.cleanlaser.de/de/anwendungen/funktionsprinzip/laserverfahren/> [Zugriff am 22 04 2020]
- [Con16] CONSULTIC MARKETING & INDUSTRIEBERATUNG GmbH; „*Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015-Kurzfassung*“ [Online], Available: https://www.bvse.de/images/pdf/kunststoff/2016/161020_Consultic_Endbericht_2015_19_09_2016_Kurzfassung.pdf. [Zugriff am 14 04 2020]
- [Fri17] FRICK A.; STERN C.; „*Einführung in die Kunststoffprüfung - Prüfmethode und Anwendungen*“, München: Carl Hanser Verlag, 2017
- [Hal85] HALBARTSCHLAGER J.; „*Untersuchung verschiedener Entlackungsverfahren der Automobilindustrie unter besonderer Berücksichtigung umwelttechnischer Belange*“ Düsseldorf, VDI-Verlag, 1985
- [Hil13] HILT, M., Dr.; JOOS-MÜLLER, B., Dr.; „*Aktivierungsverfahren für Kunststoffe auf dem Prüfstand*“ [Online]. Available: <https://www.besserlackieren.de/Technologien-Substrate/Vorbehandeln-Entlacken/Aktivierungsverfahren-fuer-Kunststoffe-auf-dem-Pruefstand>. [Zugriff am 08 04 2020]
- [Hil16] HILT, M., Dr.; WEGMANN, V., Dr.; „*Der Einfluss von Kunststoffadditiven auf die Lackhaftung*“, [Online]. Available: <https://www.besserlackieren.de/Technologien-Substrate/Kunststofflackierung/Der-Einfluss-von-Kunststoffadditiven-auf-die-Lackhaftung>. [Zugriff am 08 04 2020]
- [Hsa20] HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN ANSBACH; „*Erschließung des Recyclingpotentials von lackierten thermoplastischen Kunststoffen durch umweltfreundliche Entlackung*“, [Online]. Available: <https://www.hs-ansbach.de/forschung/projekte/erschliessung-des-recyclingpotentials-von-lackierten-thermoplastischen-kunststoffen/>. [Zugriff am 23 Juni 2020].
- [Ind14] INDUSTRIEANZEIGER; „*Kunststoffanteil im Automobil steigt*“, 05 April 2014. [Online]. Available: <https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/fertigung/kunststoffanteil-im-automobil-steigt/>. [Zugriff am 15 04 2020]
- [Kra11] KRAUS, J.-M.; „*Kostengünstig entlacken, reinigen und reparieren mit dem Laser*“, [Online]. Available: https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjlr0u_oAhUPY8AKHS-JDBwQFjAAegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fwww.maschinenmarkt.vogel.de%2Findex.cfm%3Fpid%3D7502%26pk%3D302850%26fk%3D355265%26type%3Darticle&usq=AOvVaw2. [Zugriff am 14 03 2020]

- [Kut16] KUTSCH, O., Dipl.-Kaufm.; „*Marktstudie Kunststoffe im Automobil*“ [Online]. Available: <https://www.ceresana.com/de/marktstudien/industrie/kunststoffe-im-automobil/ceresana-marktstudie-kunststoffe-automobil.html>. [Zugriff am 15 06 2020]
- [Lak16] LAKE, M.; "Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung - Vorbehandeln, Beschichten, Bedrucken, Funktionalisieren, Prüfen" München: Carl Hanser Verlag, 2016
- [Löh02] LÖHR, K., Dipl.-Phys. Dr.; KETTEMANN, B.-U., Dipl.-Ing.; ZÜRN, J., Dr.-Ing.; MELCHIORRE, M., Dipl.-Ing.; „*Chemisch-mechanisches Entlacken von Kunststoffteilen*“. Deutschland Patent DE4344582C2, 08 08 2002
- [Lot99] LOTZE, R.; BIRKEL, J.; WISSENBACH, K.; „*Entlacken mit Laserstrahlung. Neue industrielle Anwendungen*“ JOT + Oberfläche. *Journal für Oberflächentechnik*, pp. 44-48, 1999 Nr. 8
- [Men20] MENZ, V., Dipl.-Biol.; SCHWAKE, M., Dr., „*Laserentlackung thermoplastischer Kunststoffe*“, *kunststoffland NRW report*, pp. 44-45, Ausgabe 1 2020.
- [Pla19] PLASTICS EUROPE; „*Weltweite und europäische Produktionsmenge von Kunststoff in den Jahren von 1950 bis 2017 (in Millionen Tonnen)*“ 01 12 2018. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167099/umfrage/weltproduktion-von-kunststoff-seit-1950/>. [Zugriff am 25 10 2019]
- [Pla20] PLASTICS EUROPE; „*Anteile der verwendeten Plastiksarten in der europäischen Automobilindustrie im Jahr 2012*“, September 2013. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/275072/umfrage/anteile-der-verwendeten-plastiksarten-in-der-europaeischen-automobilindustrie/>. [Zugriff am 21 10 2019]
- [Pla21] PLASTICS EUROPE; „*Anteile an der Verwendung von Kunststoff in Europa nach Einsatzgebieten in den Jahren 2016 bis 2018*“ Oktober 2019. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/206528/umfrage/verwendung-von-kunststoff-in-europa-nach-einsatzgebieten/>. [Zugriff am 22 04 2020]
- [Sov19] SOVER, A. ,Prof. Dr.-Ing.; „*Research on the Process of Paint Removal from Thermoplastic Materials by Laser*“ in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019
- [Sta20] STANDOX GmbH, „*Standotheken - Kunststoffe und ihre Lackierung*“ [Online]. Available: https://www.standex.com/content/dam/EMEA/Standox/HQ/Public/Documents/German/S_tandotheken/THK_001_Kunststoff.pdf. [Zugriff am 16 04 2020]
- [Ste03] STEGEN H.; „*Gewusst wie. Kunststoffe richtig lackieren*“ Jahrg. 57 (2003). [Online]. Available: https://www.egl-online.de/fileadmin/user_upload/PDF_Dokumente/metalloberflaeche/03-03-02.pdf. [Zugriff am 15 04 2020]
- [Ste16] STERN C.; FRICK A.; "Einführung in die Kunststoffprüfung: Prüfmethode und Anwendungen" Aalen: Hanser Verlag GmbH Co KG, 2016
- [The20] THERMO-CLEAN GROUP; „*Der Spezialist für die chemische oder thermische Entlackung von Metall*“ Thermo-Clean Group, [Online]. Available: <https://www.thermoclean.de/>. [Zugriff am 16 04 2020]
- [Whi20] WHITE LION Dry Ice & Laser Cleaning Technology GmbH, „*White Lion - Laserreinigung*“ [Online]. Available: <https://white-lion.eu/laserreinigung/laserreinigung/>. [Zugriff am 23 04 2020]