

Analyse von Aufbereitungsmöglichkeiten für mehr Kunststoff-Rezyklateinsatz in der Elektroindustrie

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades einer

Doktorin der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Marina Mönikes, M. Sc.

Berichter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Kathrin Britta Greiff

Prof. Dr.-Ing. habil. Christina Dornack

Tag der mündlichen Prüfung: 31.03.2025

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Gruppenleitern im Corporate Facility Management bei der Phoenix Contact GmbH & Co. KG. Die letzten vier Jahre waren für mich eine Zeit mit vielen neuen Erfahrungen und Erkenntnissen; und an dieser Stelle gilt es den Menschen, die mich ganz besonders begleitet haben, „Danke“ zu sagen!

Mein Dank gilt Torsten Janwlecke, Geschäftsführer der Phoenix Contact GmbH & Co. KG, der mich im August 2020 trotz der Coronapandemie in seinem Büro empfangen und meine Projektidee unterstützt hat. Dieser Dank gilt auch Herbert Kamionka, der als Bereichsleiter diesem Projekt seine Zustimmung gab. Eine wichtige Person war in diesem Zusammenhang vor allem Dr.-Ing. Ralf Gärtner, der als mein Betreuer und Mentor jederzeit für mich erreichbar war und mir wertvolle Ratschläge gab. Vielen Dank dafür!

Ich möchte mich zudem ganz besonders bei Frau Prof. Dr. Kathrin Greiff bedanken, die mir diese externe Promotion am Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe (ANTS) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen überhaupt erst ermöglicht hat. Ich bin sehr dankbar dafür, dass ich diese Möglichkeit erhalten habe, für alle offenen Diskussionen, für die gute Unterstützung und dafür, dass ich mich nie alleingelassen gefühlt habe. Ich danke auch den Kollegen vom ANTS, die mich als externe Doktorandin so gut aufgenommen haben.

Mein von Herzen kommender Dank gilt zudem Rolf Stanislawski, der als mein zuständiger Abteilungsleiter, Mentor und Freund jederzeit an mich geglaubt hat. Er hat mich erst auf die Idee gebracht, zu promovieren, und war maßgeblich daran beteiligt, dass ich diesen Versuch wagte. Er hat mich immer wieder motiviert und seine Bürotür stand jederzeit offen. Zudem gilt ein großer Dank all meinen Kollegen der Phoenix Contact GmbH & Co. KG, die mich so vielfältig unterstützt haben und die ich namentlich alle gar nicht nennen kann. Für ihre fachliche Unterstützung danke ich ganz besonders Dr.-Ing. Micha Scharf und Andraes Rex. Ohne die Unterstützung all meiner Kollegen wäre ein solches Projekt nicht möglich gewesen! Danke!

Ich möchte mich auch bei meinen Freunden und meiner Familie bedanken, die während der Zeit der Promotion Verständnis gezeigt haben, immer für mich da waren und es mir auch mal nachgesehen haben, wenn ich nicht so viel Zeit hatte.

Marina Mönikes

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Grundlagen.....	3
2.1	Theoretischer Rahmen	4
2.1.1	Recyclingfähigkeit	4
2.1.2	Gesetzliche und normative Anforderungen in der Elektroindustrie	6
2.1.2.1	Umwelt- und abfallrechtliche Anforderungen	7
2.1.2.2	Normen und Zulassungsverfahren.....	9
2.1.3	Industrielle Faktoren zum Einsatz von Kunststoffrezyklaten	10
2.1.4	Stand des Wissens	11
2.2	Darlegung des Anwendungsfalls	11
2.2.1	Unternehmensbeschreibung Phoenix Contact	12
2.2.2	Materialien für die Versuchsreihe.....	12
2.2.3	Betrachtungsrahmen.....	14
3	Beschreibung der Versuchsreihe zur technischen Recyclingfähigkeit	15
3.1	Aufbereitungsverfahren.....	15
3.1.1	Herstellung Mahlgut	17
3.1.2	Herstellung Regranulat	17
3.2	Charakterisierung und Beschreibung der Versuchsmaterialien	18
3.2.1	Polyamide (PA)	19
3.2.2	Polybutylenterephthalat (PBT)	19
3.2.3	Polycarbonat (PC)	20
3.2.4	Flüssig-kristallines Polymer (LCP)	20
3.2.5	Thermoplastisches Polyurethan (TPU).....	21
3.3	Prüf- und Messplan zur Charakterisierung der Kunststoff-Rezyklat-Qualität.....	21
3.3.1	Qualitätsprüfungen Versuchsmaterialien	22
3.3.2	Qualitätsprüfungen Probekörper	27
3.3.3	Prozessparameter bei der Anwendung im Spritzgießverfahren	28
3.4	Validierungsverfahren zur Auswertung der Kunststoff-Rezyklat-Qualität.....	29
4	Bewertung der technischen Recyclingfähigkeit im Modellverfahren	31

4.1	Eignung der einzelnen Kunststoffrezyklate: Ergebnisse und Diskussion.....	31
4.1.1	Versuchsreihe 1: Polyamid (PA 6.6).....	31
4.1.1.1	Feuchtemessung	33
4.1.1.2	Farbmessung	33
4.1.1.3	UV-Lagerung und Klimalagerung	35
4.1.1.4	Messung des Glührückstands.....	37
4.1.1.5	Messung der Korngröße	37
4.1.1.6	Analyse des Fließverhaltens (Lösungsviskosität).....	39
4.1.1.7	Analyse des Fließverhaltens (Hochdruck-Kapillarrheometrie)	40
4.1.1.8	Zugversuche (E-Modul, Zugfestigkeit).....	43
4.1.1.9	Kerbschlagbiegeprüfung.....	44
4.1.1.10	Bauteilprüfung.....	46
4.1.1.11	Prozessdaten.....	46
4.1.2	Versuchsreihe 2: Polybutylenterephthalat (PBT)	47
4.1.2.1	Feuchtemessung	49
4.1.2.2	Farbmessung	49
4.1.2.3	UV-Lagerung und Klimalagerung	51
4.1.2.4	Messung des Glührückstands.....	52
4.1.2.5	Messung der Korngröße	52
4.1.2.6	Analyse des Fließverhaltens (Schmelzviskosität).....	54
4.1.2.7	Analyse des Fließverhaltens (Hochdruck-Kapillarrheometrie)	54
4.1.2.8	Zugversuche (E-Modul, Zugfestigkeit).....	56
4.1.2.9	Kerbschlagbiegeprüfung.....	58
4.1.2.10	Prozessdaten	60
4.1.3	Versuchsreihe 3: Polycarbonat (PC)	61
4.1.3.1	Feuchtemessung	63
4.1.3.2	Farbmessung	63
4.1.3.3	UV- Lagerung und Klimalagerung	63
4.1.3.4	Messung des Glührückstands.....	63
4.1.3.5	Messung der Korngröße	64

4.1.3.6	Analyse des Fließverhaltens (Schmelzviskosität).....	65
4.1.3.7	Analyse des Fließverhaltens (Hochdruck-Kapillarrheometrie)	66
4.1.3.8	Zugversuche (E-Modul, Zugfestigkeit).....	66
4.1.3.9	Kerbschlagbiegeprüfung.....	67
4.1.3.10	Prozessdaten	67
4.1.4	Versuchsreihe 4: flüssig-kristalline Polymere (LCP)	68
4.1.4.1	Feuchtemessung	70
4.1.4.2	Farbmessung	70
4.1.4.3	UV-Lagerung und Klimalagerung	70
4.1.4.4	Messung des Glührückstands.....	70
4.1.4.5	Messung der Korngröße	71
4.1.4.6	Analyse des Fließverhaltens	72
4.1.4.7	Analyse des Fließverhaltens (Hochdruck-Kapillarrheometrie)	72
4.1.4.8	Zugversuche (E-Modul, Zugfestigkeit).....	73
4.1.4.9	Kerbschlagbiegeprüfung.....	73
4.1.4.10	Prozessdaten	74
4.1.5	Versuchsreihe 5: Thermoplastisches Polyurethan (TPU).....	76
4.1.5.1	Feuchtemessung	77
4.1.5.2	Farbmessung	77
4.1.5.3	UV-Lagerung und Klimalagerung	78
4.1.5.4	Messung des Glührückstands.....	79
4.1.5.5	Messung der Korngröße	79
4.1.5.6	Analyse des Fließverhaltens (Schmelzviskosität).....	80
4.1.5.7	Analyse des Fließverhaltens (Hochdruck-Kapillarrheometrie)	81
4.1.5.8	Zugversuche (E-Modul, Zugfestigkeit).....	82
4.1.5.9	Kerbschlagbiegeprüfung.....	83
4.1.5.10	Prozessdaten.....	84
4.2	Fazit der Untersuchungen	85
5	Anwendung der Kunststoffrezyklate in der Elektroindustrie.....	89
5.1	Einordnung der Ergebnisse für den Rezyklateinsatz	89

5.2	Bewertung der Recyclingfähigkeit.....	92
6	Diskussion, Schlussfolgerung und Ausblick	95
7	Zusammenfassung	99
	Glossar.....	101
	Abkürzungs- und Formelverzeichnis	103
	Abbildungsverzeichnis	105
	Tabellenverzeichnis.....	107
	Literaturverzeichnis	108
	Anhang	112

1 Einleitung und Zielsetzung

Ein Schlüsselfaktor für die Veränderung zu einer nachhaltigen Gesellschaft ist die Nutzungsart von Ressourcen. Dabei nehmen Kunststoffe seit dem letzten Jahrzehnt eine besondere Rolle ein: Zum einen steht die Reduktion primärer Rohstoffe im Fokus – und damit auch die Verringerung der Emissionen –, zum anderen das Ziel, kein kunststoffhaltiges Material in die Umwelt zu entlassen. Die Elektro- und Elektronikindustrie¹ ist mit einem Branchenanteil von 6,4 % die viertgrößte Branche in der Kunststoffverarbeitung und stellt somit einen wesentlichen Bereich in der Verarbeitung von Kunststoffen dar (Conversio Market & Strategy GmbH, 2022; Umweltbundesamt, 2023). In dieser Branche ist der Einsatz von Kunststoffen aus technischer und wirtschaftlicher Sicht unabdingbar. Kunststoffe sind gut zu verarbeiten sowie vielseitig einzusetzen und bieten den Vorteil, dass ihr Gewicht sowie der Energieverbrauch für ihre Produktion und Verarbeitung im Verhältnis zu anderen Werkstoffen gering ausfallen (DIN e.V. et al., 2023). Aus jenen beispielhaft genannten Gründen steigt die Verwendung von Kunststoffen in diesem Bereich stetig. Gleichzeitig stehen der Einsatz und der Lebenszyklus von Kunststoffen weltweit immer stärker im (kritischen) Fokus. Industrieunternehmen haben einen großen Einfluss auf die Nutzung von Ressourcen und tragen vor allem deshalb eine unternehmerische Verantwortung, die auch dem Ressourceneinsatz und somit der Kunststoffverwendung gilt.

In der vorliegenden Dissertation wurde in Kooperation mit dem Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen und der Phoenix Contact GmbH & Co. KG² untersucht, wie mehr Kunststoffrezyklate in der Elektroindustrie innerhalb des Unternehmenskreislaufes zurückgeführt werden können. Dabei wird betrachtet, welche die größten Potenziale und auch die stärksten Hemmnisse beim industriellen Einsatz von Kunststoffrezyklaten sind und wie diese abgebaut und gleichzeitig die Qualitätsanforderungen eingehalten werden können. Im Vordergrund stehen dabei die Analyse der mechanischen und chemischen Eigenschaften der Kunststoffabfälle sowie die Machbarkeit der mechanischen und thermischen Aufbereitung für die einzelnen Kunststoffarten bzw. Kunststoffgruppen. Unterschiedliche Literatur und Fachmagazine zeigen auf (Schraub, 2020; VDMA e.V., 2020), dass der Einsatz von Rezyklaten im Bereich der sogenannten technischen Kunststoffe noch nicht verbreitet ist, da die Aufbereitung einen hohen Kostenfaktor darstellt und der Einsatz von Rezyklaten eine Vielzahl von Hemmnissen aufweist. Hinzu kommt in der Elektroindustrie, dass die Zulassungsanforderungen für den Einsatz von Kunststoffen und Sekundärmaterial die Verwendung von Rezyklaten oft erschweren. Daten auf deutscher Ebene zeigen, dass der Anteil der Recyclingkunststoffe lediglich rund 16 % des Rohstoffbedarfs einnimmt und der Anteil, der in der Elektroindustrie eingesetzt wird, sogar nur

¹ Im Folgenden „Elektroindustrie“ genannt.

² Im Folgenden „Phoenix Contact“ genannt.

weniger als 2 % beträgt (Conversio Market & Strategy GmbH, 2022). Auf europäischer Ebene wird zudem eine Zunahme des Bedarfs an Kunststoffen bis 2050 von 26 % prognostiziert. Dabei wird angenommen, dass die Kunststoffe am Ende der Nutzungsphase verbrannt werden und sich die tatsächlich freigesetzten Emissionen um ein Vielfaches erhöhen, was auf die gebundenen Emissionen im Kunststoff selbst zurückzuführen ist. Das werkstoffliche Recycling von Kunststoffen wird aus den genannten Gründen daher immer bedeutender und würde den zukünftigen Primärrohstoffverbrauch sowie damit auch die Emissionen erheblich senken (Material Economics, 2018, S. 23–27).

Ziel dieser Arbeit ist es, die Potenziale für den Einsatz von Kunststoffzyklen in der Elektroindustrie aufzuzeigen und darzulegen, mit welchen Aufbereitungsmöglichkeiten Kunststoffabfälle aus dem industriellen Umfeld zurückführt werden können, um Kreisläufe zu schließen. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich aus diesem Grund mit den branchentypischen Anforderungen in der Elektroindustrie und der technischen Untersuchungen von Kunststoffzyklen. Auf Basis der Materialanalysen können grundlegende Erkenntnisse über den Einsatz von Kunststoffzyklen in der Elektroindustrie gewonnen werden, so dass das Recyclingpotenzial für die Branche dargelegt werden kann. Folgende Fragestellungen stehen hierbei im Vordergrund:

1. Welche Aufbereitungsmöglichkeiten von Kunststoffabfällen sind für den Einsatz in der Elektroindustrie geeignet?
2. Treten Materialschädigungen bei unterschiedlichen Aufbereitungsstufen von Kunststoffabfällen auf? Kann eine geeignete Qualität aufrechterhalten werden?
3. Wie können Kunststoffzyklen für die Elektroindustrie auf die Recyclingfähigkeit hin geprüft werden? Wie sieht ein geeignetes Validierungsverfahren aus?
4. Welches Potenzial zur Schließung von Materialkreisläufen bietet der Einsatz von Kunststoffzyklen in der Elektroindustrie?

Die folgenden Kapitel geben zunächst einen umfassenden Überblick über den theoretischen Rahmen, der unter anderem die rechtlichen und branchentypischen Anforderungen widerspiegelt. Auf dieser Grundlage wird das Anwendungsbeispiel von Phoenix Contact konkretisiert und die Versuchsmaterialien festgelegt. Weiterhin werden die Aufbereitungsverfahren ermittelt und beschrieben. Darauf aufbauend wird ein Validierungsverfahren entwickelt, das die Bewertung der Recyclingfähigkeit in der Elektroindustrie widerspiegelt. Anschließend wird im Praxisteil, anhand eines Prüf- und Messkonzeptes untersucht und charakterisiert, wie sich die Merkmale und Eigenschaften des Ausgangsmaterials – wie beispielsweise Form, Farbe und Schmelzverhalten – durch die einzelnen Verarbeitungs- und Aufbereitungsschritte verändern. Auf Basis dieser Ergebnisse wird abschließend die Recyclingfähigkeit in der Elektroindustrie bewertet und dargelegt.

2 Grundlagen

Die Elektroindustrie ist eine der Schlüsselbranchen der Gegenwart. Sie steht für Innovation und Wachstum. Bedingt durch die steigenden Anfragen an neuen Medien und Energie wird der Bedarf an elektronischen Komponenten und Produkten immer größer (Tsuchimoto & Kajikawa, 2022). „Die Branche steht wie kaum eine andere für technischen Fortschritt, und dieser wiederum ist essenziell für nachhaltiges Wachstum“ (Gontermann & Grömling, 2011b). Der Forschungsstand zeigt schon seit einigen Jahren, insbesondere seit 2016, dass das Kunststoffrecycling einen immer höheren Stellenwert in der Gesellschaft einnimmt und zunehmend an Bedeutung gewinnt (Tsuchimoto & Kajikawa, 2022, S. 1). Dieser Umstand spiegelt sich auch in der steigenden Anzahl von Studien, Potenzialanalysen und Forschungsprojekten im Sektor des Kunststoffrecyclings und der Circular Economy wider (Tsuchimoto & Kajikawa, 2022, S. 20–27). Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Umweltverantwortung wird das Kunststoffrecycling daher in der Elektroindustrie zunehmend umgesetzt und weiterverfolgt (Jansen, 2015, S. 3–5; Rudolph et al., 2020; ZVEI, 2020, 2021). Im Vergleich zu anderen Branchen ist der Einsatz von Kunststoffrezyklaten aufgrund von Produkt- und rechtlichen Anforderungen allerdings noch nicht verbreitet und weist eine Vielzahl von Herausforderungen auf, die in den nachfolgenden Unterkapiteln näher betrachtet werden.

Um das Recycling von Kunststoffen sowie den Einsatz von Rezyklaten (Sekundärmaterialien) zu erhöhen und damit den Primärbedarf zu senken, muss zuerst eine einheitliche und ganzheitliche Sichtweise über die Handlungsebene bestehen. Im Handbuch Kreislaufwirtschaft (Frenz, 2024) wird dieses grundlegend derart beschrieben, dass es drei Betrachtungsebenen gibt, auf denen man sich im Rahmen der Circular Economy bewegt. Wegweisend hierbei ist, dass sich unterschiedliche Stakeholder von Industrie, Branchenverbänden und Politik bewusst darüber sind, dass eine Vielzahl von Faktoren Einfluss auf das Recycling und die Emissionen nimmt. Die drei Ebenen werden wie folgt beschrieben (Hagedorn & Greiff, 2024, 125):

- „(1) Mikro-Ebene – Produkte, Unternehmen, Organisationen
- (2) Meso-Ebene – Industrieparks
- (3) Makro-Ebene – Regionen, Städte, Länder, Welt“

In den einzelnen Ebenen wird zudem eine weitere Differenzierung vorgenommen. Die Mikro-Ebene stellt mit den Bereichen der Produkte, der Unternehmen und der Organisationen die kleinste Systemeinheit dar. Die hier vorgestellte Arbeit bezieht sich auf die Unternehmensebene und die dabei anfallenden Reststoffe, die in ein Recycling überführt werden sollen. Bei den Unternehmen bedeutet die weitere Differenzierung, dass eine Betrachtung der einzelnen Branchen und Industriezweige erfolgen muss. Dabei ist die Branche der Landwirtschaft mit über 40 % Vorreiter im Einsatz von Kunststoffrezyklaten, gefolgt von der Bau- und

Verpackungsindustrie mit rund 24 % und 15 %. Die Elektroindustrie ist mit einem Branchenanteil von 6,3 % (895 kt) der viertgrößte Kunststoffverarbeiter in Deutschland, doch der Einsatz von Rezyklaten liegen mit einem Anteil der gesamten verarbeiteten Kunststoffrecyclingmenge von unter 2 % deutlich darunter (Conversio Market & Strategy GmbH, 2022). Aufgrund der Branchenunterschiede gibt es spezifische, gesetzliche und qualitative Anforderungen, die vorab analysiert werden müssen und nicht aus anderen Branchen übertragbar sind. Um die produktspezifischen und rechtlichen Anforderungen in der Elektroindustrie zu erfüllen, ist es zunächst notwendig, die relevanten Anforderungen zu bewerten. Diese Bewertung soll sowohl die bestehenden Abhängigkeiten aufzeigen als auch Wege zur Implementierung des Recyclings innerhalb der Unternehmenskreisläufe darlegen. Im Unterkapitel 2.1 wird hierzu zunächst der theoretische Rahmen dargelegt, darauf aufbauend wird in Unterkapitel 2.2 der praxisorientierte Anwendungsfall am Beispiel von Phoenix Contact abgeleitet und der Betrachtungsrahmen festgelegt.

2.1 Theoretischer Rahmen

In diesem Unterkapitel werden die theoretischen Grundlagen für das Recycling von Kunststoffabfällen in der Elektroindustrie ermittelt und dargelegt. Zunächst wird ein Modell erläutert, das die Recyclingfähigkeit bestimmt und für die abschließende Potenzialanalyse angewandt wird. Anschließend wird auf die verschiedenen Rahmenbedingungen eingegangen, die das Recycling beeinflussen, wie die gesetzlichen und normativen Anforderungen in der Elektroindustrie und die industriellen Faktoren.

2.1.1 Recyclingfähigkeit

Zum Ausbau des Kunststoff-Rezyklateinsatzes innerhalb der Elektroindustrie, ist wie einleitend beschrieben, zuerst ein Überblick über die Recyclingfähigkeit von Kunststoffen notwendig. Für die Darstellung der Recyclingfähigkeit und die weitere Betrachtung wird daher der Ansatz von Pomberger „Über die theoretische und reale Recyclingfähigkeit“ (Pomberger, 2021) herangezogen und als Modell in diese Arbeit übertragen. Durch diesen Ansatz wird aufgezeigt, dass die Recyclingfähigkeit von vielen Faktoren abhängig ist und die reale Umsetzung stark von der theoretischen Ausgangsbasis abweichen kann. Dies stellt für die vorliegende Arbeit eine wichtige Grundlage dar, um die Ergebnisse umfassend zu präsentieren und die Handlungsfelder sowie die Potenziale hervorzuheben.

Pomberger spricht von einem Stufenmodell der Recyclingfähigkeit, das für eine bildliche Darstellung in drei Säulen übertragen werden kann. Das Modell bildet damit die theoretische, technische und reale Recyclingfähigkeit ab und kann Aufschluss darüber geben, in welchen Bereichen sich die Recyclingfähigkeit um welchen Anteil erhöhen lässt. Die Anwendung der Säulen der Recyclingfähigkeit (s. Abbildung 1) wurden in der Normungsroadmap zur Circular

Economy, unter Mitwirkung der Autorin dieser Dissertation, veröffentlicht (DIN e.V. et al., 2023).

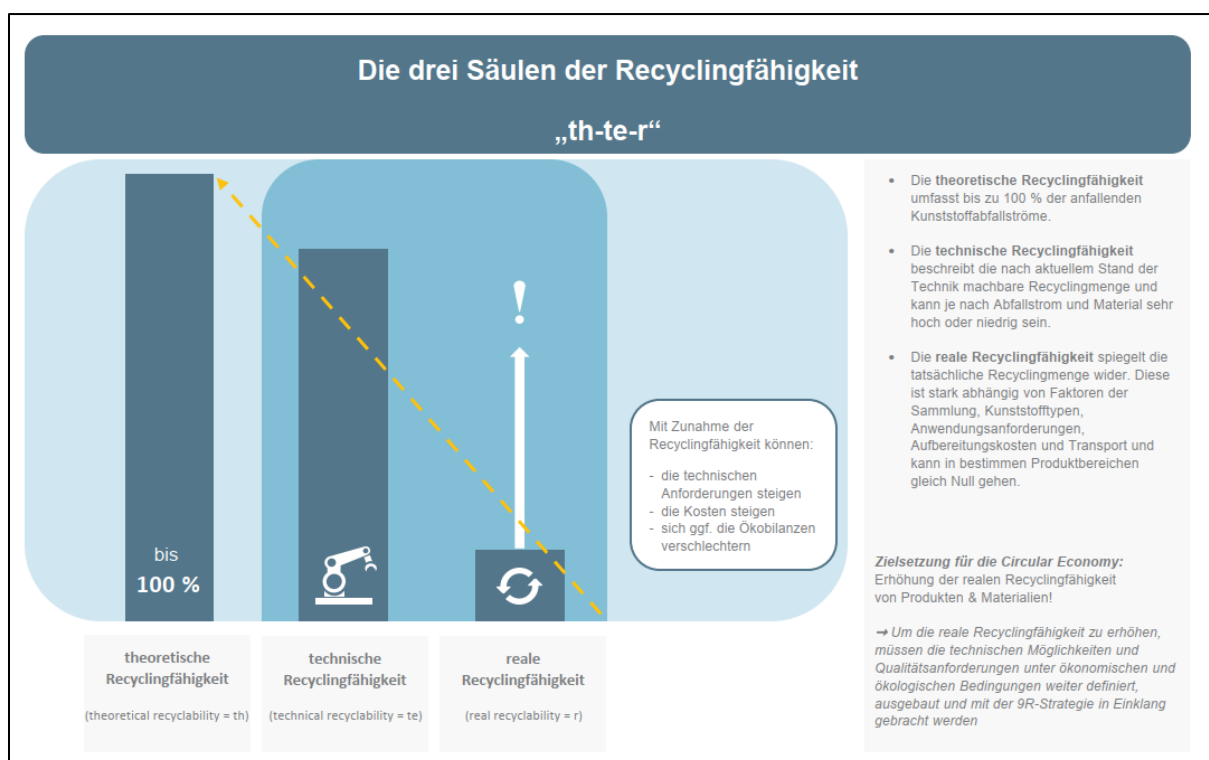


Abbildung 1: Die drei Säulen der Recyclingfähigkeit (Quelle: DIN e.V. et al., 2023, S. 181)

Wie in der Einleitung von Kapitel 2 genannt, wird in der vorliegenden Arbeit die Elektroindustrie als viertgrößte Branche für die Betrachtung herangezogen. Vergleicht man die unterschiedlichen Ebenen zum Wiedereinsatz und Recycling von Kunststoffen in unterschiedlichen Branchen und Regionen, so liegt in der Regel die theoretische Recyclingfähigkeit weitaus höher als die technische Recyclingfähigkeit und diese wiederum höher als die reale Recyclingfähigkeit (Pomberger, 2021, S. 29–30). Die drei Säulen der Recyclingfähigkeit werden in dieser Arbeit mit dem Ziel betrachtet, Möglichkeiten zur Erhöhung der realen Recyclingfähigkeit in der Elektroindustrie aufzuzeigen.

Die theoretische Recyclingfähigkeit (th) umfasst den gesamt anfallenden Abfall. Damit kann die th bis zu 100 % des Abfallstroms umfassen. Im Anwendungsfall von Phoenix Contact werden allerdings 10 % der anfallenden Reststoffe separiert, die aufgrund von Materialschädigungen, Verunreinigungen oder Kleinstmengen nicht für ein Recycling genutzt werden können. Diese können unter anderem in Form von Spitzkuchen, Spülmaterial und Bauteilen mit Fremdstoffeinschlüssen vorliegen. Des Weiteren treten in jeder Produktion Sondersituationen, wie Pausen und Maschinendefekte auf, die den Kunststoff schädigen können, dabei sollte die Verwendung von Abfällen für das Recycling aus solchen Sondersituationen ausgeschlossen werden (Baur et al., 2019, S. 62). Zu den Verlusten zählen zudem Kunststoffabfälle aus

Materialien, die z. B. zu Forschungszwecken innerbetrieblich eingesetzt werden und bei denen nur Kleinstmengen vorliegen. Im Jahr 2014 hat Phoenix Contact die Bestandteile dieser Verlustfraktion in einer Projektarbeit analysiert und ermittelt, inwieweit die sortenreinen Kleinstmengen noch separiert werden können. Das Ergebnis dieser Projektarbeit zeigt, dass eine weitere Separierung und damit ein Recycling nur mit sehr hohem Aufwand oder gar nicht möglich ist. Ein Verlust von ca. 10 % ist auf Basis dieser Auswertung unvermeidbar (Phoenix Contact, 2015c). Die Verluste im Recyclingprozess, die z. B. bei der Zerkleinerung oder der Extrusion entstehen können, werden an dieser Stelle aufgrund ihrer Geringfügigkeit vernachlässigt.

Die zweite Säule zeigt die technischen Möglichkeiten, die zum Wiedereinsatz und zum Recycling der Kunststoffabfälle führen. Die technische Machbarkeit ist in vielen Bereichen zwar gegeben und schafft Möglichkeiten des fast vollständigen Recyclings, jedoch ist die Ausbeute der erhaltenen Rezyklate nicht bei 100 % bzw. nicht bei den genannten theoretischen 90 %. Aufgrund der fehlenden Datenlage zur technischen Recyclingfähigkeit von Kunststoffabfällen in der Elektroindustrie ist es notwendig, die technische Machbarkeit für die branchentypischen Kunststoffe zu untersuchen. Mit der Analyse der Machbarkeit soll in dieser Arbeit die technische Recyclingfähigkeit (te) in der Elektroindustrie für Kunststoffabfälle dargelegt werden, um weitere Kreisläufe zu schließen. Die Auswahl der Kunststofftypen, die hierfür beispielhaft herangezogen werden, findet in Abschnitt 2.2.2 statt.

Nachdem die theoretischen Mengen ermittelt und die technischen Möglichkeiten geprüft wurden, gelangt man zur dritten Säule, derjenigen der realen Recyclingfähigkeit (r). Die reale Recyclingfähigkeit kann man als eine Art Wirkungsgrad verstehen, der aufzeigt, wie hoch der Anteil des Kunststoffabfalls ist, der tatsächlich in einem Industrieunternehmen aufbereitet und wieder eingesetzt wird. Unterschiedliche Faktoren haben dabei Einfluss auf die Machbarkeit und schlussendlich die reale Recyclingfähigkeit in einem Unternehmen. Diese sind unter anderem die Verfügbarkeit der Kunststoffe, die notwendige Technik für die Separierung und Aufbereitung sowie die Logistik. Dabei können Faktoren wie ein erhöhter Energie- und Transportbedarf, die Qualitätsanforderungen an die Rezyklate als Sekundärmaterial, ein hoher personeller Aufwand und komplexe Logistikabläufe die Kosten des Recyclings so erhöhen, dass technisch mögliche Kreisläufe nicht in der Praxis angewandt werden. Die Bewertung des Stufenmodells zur Recyclingfähigkeit für die Elektroindustrie wird, nach Umsetzung der technischen Potenzialanalysen, in Kapitel 5 durchgeführt.

2.1.2 Gesetzliche und normative Anforderungen in der Elektroindustrie

„Grundsätzlich gibt es verschiedene Recyclingverfahren, bei denen die stoffliche Verwertung (mechanisch, physikalisch, chemisch) im Fokus steht [...]“ (ZVEI, 2021, S. 13). Bei der Beurteilung der unterschiedlichen Verfahren, müssen unter anderem die Zusammensetzung der Kunststoff, wie Polymere, Füllstoffe und Additive beachtet werden. Zudem müssen die

Branchenanforderungen an das Rezyklat bewertet und eingehalten werden. So sind in der Elektroindustrie sowohl gesetzliche als auch normative Anforderung relevant. Diese sind exemplarisch nachfolgend dargestellt. Hierbei handelt es sich lediglich um einen Ausschnitt aus den Anforderungen, da diese je nach Anwendung und Land stark variieren können. Neben den Branchenanforderungen ist auch die Kenntnis über die Herkunft des Rezyklates entscheidend. So wird der Begriff *Rezyklat* derzeit als Synonym für alle aufbereiteten Kunststoffabfälle eingesetzt und sagt nichts über die Herkunft, das Recyclingverfahren und die Zusammensetzung des Sekundärmaterials aus (ZVEI, 2021, S. 11).

2.1.2.1 Umwelt- und abfallrechtliche Anforderungen

Der Wiedereinsatz von Kunststoffabfällen unterliegt einer Vielzahl gesetzlicher Rahmenbedingungen. Dabei ist im Sprachgebrauch das Wort „Rezyklat“ als Endprodukt der Aufbereitung weitverbreitet. Wie im vorangegangenen beschrieben, wird dieses Wort als Synonym für alle Aufbereitungsformen von Kunststoffabfällen eingesetzt. Ein Rezyklat wird im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (§ 3 Nr. 7b KrWG) als sekundärer Rohstoff bezeichnet, der durch die Verwertung von Abfällen gewonnen wird oder bei der Beseitigung anfällt und der für die Herstellung neuer Erzeugnisse geeignet ist. Für die rechtliche Einstufung gemäß dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) ist daher eine Differenzierung nach Abfällen mit einer Abfallschlüsselnummer und Abfällen ohne eine Abfallschlüsselnummer für den Wiedereinsatz als Nebenprodukt (§ 4 KrWG) relevant. Die Differenzierung wird in Abbildung 2 dargestellt. Nach dieser Einstufung sind die Abfälle, die im eigenen Produktionsprozess entstehen und z. B. als Mahlgut direkt im Kreislauf geführt werden, als Nebenprodukt zu bewerten. Des Weiteren können auch die Mahlgüter die, wie in dieser Dissertation, durch ein externes Recyclingunternehmen (Lohnaufbereiter) aufbereitet und im eigenen Betrieb wieder eingesetzt werden, rechtlich als Nebenprodukt eingestuft werden. Dabei sind die individuellen Gegebenheiten, vertraglichen Bedingungen und Aufbereitungsverfahren genau zu beachten. Gemäß § 4 KrWG kann eine Einstufung als Nebenprodukt erfolgen, wenn sichergestellt ist, dass das Sekundärmaterial weiterverwendet wird, wenn ein normales industrielles Verfahren zur Aufbereitung eingesetzt wird, das Sekundärmaterial integraler Bestandteil des Herstellungsprozesses ist und die Verwendung rechtmäßig ist. Durch die Einstufung als Nebenprodukt findet das KrWG zwar Anwendung, die Abfallverzeichnisverordnung (AVV) mit der Einordnung der Abfallschlüsselnummern allerdings nicht. So müssen die Abfälle bilanziell auch nicht in der Abfallbilanz eines Unternehmens geführt werden. Weitere Vereinfachungen entstehen zudem bei dem Transport und der Übergabe an das Recyclingunternehmen. Bei der Differenzierung, ob Abfall oder Nebenprodukt, ist immer die aktuelle Rechtslage und Rechtsprechung zu berücksichtigen. Für die vorliegende Arbeit wurden ausschließlich Abfälle an das Recyclingunternehmen übergeben, da, wie beschrieben, eine rechtliche Einstufung als Nebenprodukt genau differenziert werden muss. Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es allerdings keine rechtliche Definition eines

„normalen industriellen Verfahrens“ welches in § 4 Voraussetzung für die Einstufung als Nebenprodukt ist. Die Leitlinien der Europäische Kommission zur Abfallrahmenrichtlinie weist allerdings darauf hin, dass die Veränderung der Größe oder Form durch mechanisch Behandlung ein normales industrielles Verfahren ist (European Commission, 2012, S. 17–18). Das Mahlgut kann in diesem Fall als normales industrielles Verfahren eingestuft werden, währenddessen eine Einstufung des Regranulat nicht eindeutig ist.

Die oft in diesem Zusammenhang genannte Elektro- und Elektronik-Altgeräte-Richtlinie (WEEE-Richtlinie 2012/19/EU, engl. Waste from electrical and electronic equipment) findet in dieser Arbeit keine Anwendung. Die Richtlinie dient der Vermeidung von Abfällen von Elektro- und Elektronikgeräten sowie der Reduzierung durch Wiederverwendung, Recycling und andere Formen der Verwertung. Das Anwendungsfeld bezieht sich damit auf das Recycling der Elektronikprodukte – und nicht auf den Produktionsprozess sowie die dort anfallenden Abfälle.

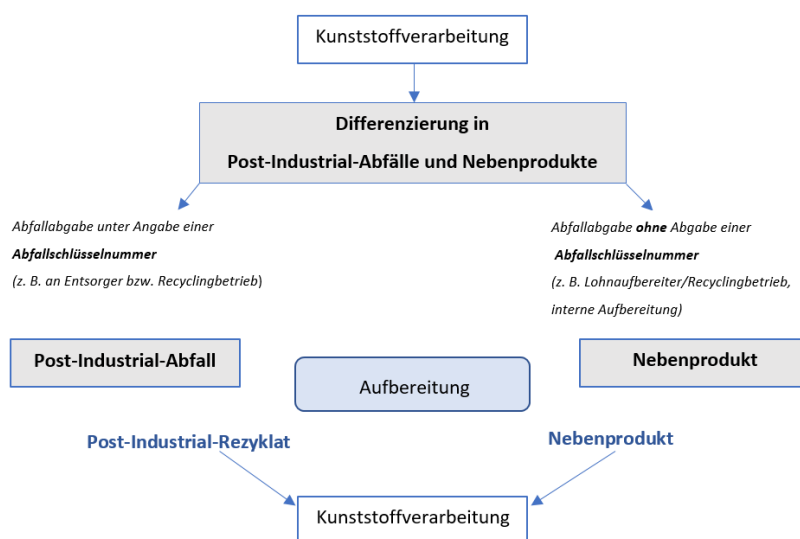


Abbildung 2: Post-Industrial-Abfälle und Nebenprodukte (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Conversion Market & Strategy GmbH, 2022)

Eine relevante Verordnung für das Aufbereiten von Kunststoffabfällen ist – neben dem KrWG – u. a. die EU-Chemikalienverordnung REACH (Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, REACH, engl. Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals). Die Verordnung regelt zum Schutz der Gesundheit und Umwelt die Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe. Vor allem bei der Aufbereitung unter Einsatz von Additiven, wie Flammschutzmittel, ist die Verordnung relevant. Was in dieser Arbeit dazu führt, dass sich ausschließlich auf zugelassene Kunststoffe mit einer mechanischen und mechanisch-thermischen Aufbereitung konzentriert wird und die REACH Verordnung dadurch keine weitere Anwendung findet, da keine Additive oder andere chemische Stoffe zugeführt werden.

Die Untersuchung der rechtlichen Anforderungen legen dar, dass eine Aufbereitung der Kunststoffabfälle mit den genannten Verfahren durch mechanische und mechanisch-thermische Verarbeitung gesetzlich zulässig ist. Dabei ist eine Klassifizierung als Nebenprodukt unter bestimmten Voraussetzungen möglich, diese erfordert jedoch immer einer individuelle Einzelfallbetrachtung.

2.1.2.2 Normen und Zulassungsverfahren

Im Nachfolgenden wird das Augenmerk auf die europäischen und US-amerikanischen Normen in der Elektroindustrie, die Einfluss auf den Kunststoffrecycling-Einsatz haben, gelegt. Darüber hinaus kann es auch sogenannte Werksnormen, länderspezifische Normen oder Standards, beispielsweise die DIN SPEC 91446 für die „Klassifizierung von Kunststoff-Recyclaten durch Datenqualitätslevels für die Verwendung und den (internetbasierten) Handel“, geben. Die wegen ihrer Vielfältigkeit und produktspezifischen Anwendung in dieser Arbeit allerdings keine weitere Betrachtung finden. Auch europäische Normen, wie die DIN EN 15342, DIN EN 15344, DIN EN 15345, DIN EN 15346 und DIN EN 15348, werden nicht angewendet, da in diesen die Eigenschaften und Prüfverfahren der Rezyklate der Kunststoffe Polystyrol (PS), Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC) und Polyethylenterephthalat (PET) betrachtet werden. Diese Kunststoffe kommen zudem bei Phoenix Contact nicht zum Einsatz und sind daher auch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Eine relevante europäische Normungskommission für die Elektroindustrie ist die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC, von engl. International Electrotechnical Commission). „Die IEC veröffentlicht etwa 10 000 internationale IEC-Normen, die zusammen mit der Konformitätsbewertung den technischen Rahmen bilden [...]. Unternehmen aller Größenordnungen [...] werden in die Lage versetzt, durchgängig sichere und zuverlässige Produkte zu kaufen und zu verkaufen. Die internationalen IEC-Normen dienen als Grundlage für das Risiko- und Qualitätsmanagement und werden bei Zertifizierungen eingesetzt, um zu überprüfen, ob die Versprechen der Hersteller eingehalten werden.“ (DKE, 2021) Die DIN, die DKE und der VDI haben im Rahmen der Normungsroadmap Circular Economy eine Normrecherche durchgeführt. In dieser Recherche wurden 29 IEC-Normen für die Elektroindustrie in der Kategorie „Großgeräte, Anlagen, Installationen“ ermittelt, die sich mit der Circular Economy beschäftigen (DIN e.V. et al., 2023). Dabei handelte es sich vorwiegend um Normen zum Design und zu der Entsorgung von Produkten; diese geben allerdings keinen Aufschluss über den Einsatz von Rezyklaten in Produkten, sodass für diese Arbeit keine Norm der IEC herangezogen werden kann.

Für die Branche sehr bedeutende Zertifizierungsanforderungen an elektronische Erzeugnisse und die eingesetzten Materialien stellen die US-amerikanischen Underwriters Laboratories (UL) mit ihren UL-Zulassungen dar. Die UL lässt dabei die Verwendung von Rezyklaten nur

für bestimmte Materialien und unter festgelegten Bedingungen zu (ZVEI, 2021, S. 15). Der Standard für die Kunststoffe (Polymer-Werkstoffe) ist in der UL 746D festgeschrieben. Die UL legt für den Wiedereinsatz von Mahlgut einen Grenzwert von 25 % fest. Letzterer kann aber überschritten werden, wenn bei der Zertifizierung des Primärrohstoffes ein höherer Mahlgutanteil zugelassen wurde (Kapitel 8.2/8.4, UL 746D). Für ein PA 6.6 kann gemäß den Zulassungsangaben beispielsweise sogar ein Anteil von 50 % Mahlgut für die gleiche Anwendung eingesetzt werden. Das Mahlgut wird durch UL dabei wie folgt definiert: „Ein nicht kontaminiertes Produkt oder Schrott wie Angüsse und Läufer, die durch Zerkleinerung und Granulierung zur internen Verwendung wiedergewonnen werden.“ (Kapitel 2.12, UL 746D, S. 6) Die Zulassungen der eingesetzten Primärkunststoffe und der Anteile an Mahlgütern wird in der Yellow Card dargelegt. Letztere ist eine Kurzcharakterisierung einzelner Kunststofftypen und erhält Angaben über deren Eigenschaften (Abts, 2020, S. 274). Die Anwendung von Kunststoffen mit einer vorliegenden Yellow Card sichert die Zulassung des Produktes zum Einsatz in der Elektroindustrie ab. Der Vorteil der Zertifizierung ist, dass keine zusätzlichen Zulassungen oder Prüfungen für das Kunststoffbauteil, das für ein Elektronikprodukt eingesetzt wird, durch den Hersteller mehr durchgeführt werden müssen. Die in diesem Unterkapitel dargelegten Normungs- und Zulassungsanforderungen der UL zeigen, dass ein mechanisches Recycling mit der Herstellung eines Mahlgutes für den Wiedereinsatz zulassungsrechtlich am einfachsten geeignet ist. Weiterhin wäre aber auch die Herstellen eines Regranulates durch Extrusion, als eine mechanisch-thermische Aufbereitung möglich. Eine Lösung für den Einsatz von Regranulat könnte eine Sonderzulassung des Regranulates durch UL sein. Ein Modell wären in einem solchen Fall eine Zertifizierung der UL beim Recyclingunternehmen und eine Sonderprüfung des Regranulats zum Identitätstest, um einen Einsatz des Regranulates mit mindestens dem Standard von 25 % Beimischung zur zertifizierten Neuware zu ermöglichen.

2.1.3 Industrielle Faktoren zum Einsatz von Kunststoffzyklen

An die Industrie werden besondere Anforderungen gestellt, die ein hohes Maß an Sicherheit und Qualität der Produkte fordern. Dafür werden ein fehlerloser Herstellungsprozess sowie geeignete Materialien vorausgesetzt. Der Endabnehmer muss darauf vertrauen, dass die Produkte in einwandfreiem Zustand sind und die erforderliche Sicherheit aufweisen (Haberland, 2016, S. 1). Es ist daher für die Hersteller von großem Interesse, dass die Qualität der eingesetzten Werkstoffe einwandfrei ist und diese alle produktspezifischen Anforderungen erfüllen. Dieser Grundsatz ist auch bei der Anwendung von Sekundärmaterialien der Fall. Von Vorteil ist beim Einsatz von Rezyklaten ist, wenn diese als Kunststoffabfällen (Post-Industrial-Abfällen) aus dem eignen Produktionsprozess stammen, da sowohl der eingesetzte Rohstoff als auch alle Verarbeitungsschritte bekannt sind. In der Elektroindustrie dienen die technischen Kunststoffe bei vielen Anwendungen als Schutz des Nutzers, d. h., sie werden als Gehäuse, funktionale Komponenten oder auch als Isolierschutz für die Anlagensicherheit industrieller

Infrastruktur eingesetzt (ZVEI, 2020, S. 4). Der Hersteller hat somit eine hohe Sorgfaltspflicht und muss zwingend einwandfreie Produkte liefern. In Deutschland wird die Haftung des Herstellers bei Körper-, Gesundheits- und Sachschäden durch das Produkthaftungsgesetz (ProdHaftG) geregelt. Für den Einsatz von Rezyklaten muss der Hersteller daher sicherstellen, dass die Rezyklate für die Anwendung geeignet sind. Dabei unterstützt die Materialzertifizierung des Primärrohstoffes (s. Kapitel 2.2) und die Materialqualität muss bei der Verwendung von Sekundärmaterialien zwingend erhalten bleiben.

2.1.4 Stand des Wissens

Zur Ermittlung des Stands des Wissens wurde im Rahmen dieser Arbeit eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Die Fragestellungen zum Forschungsstand waren folgende: „Wie können mehr Kunststoffabfälle aus dem Produktionsprozess in der Elektroindustrie aufbereitet und eingesetzt werden?“ und „Wie ist der aktuelle Stand beim Einsatz von Kunststoffrezyklaten in der Elektroindustrie?“. Für die systematische Literaturrecherche wurden zunächst 19 Schlag- und Stichworte festgelegt. Diese wurden dann in der Literatursuche zum einen einzeln genutzt und zum anderen für eine Eingrenzung miteinander verknüpft. Die Schlag- und Stichworte, die für die systematische Suche ausgewählt wurden, waren u. a. „Kunststoffe“, „Kunststoffverarbeitung“, „Kunststoffrezyklate“, „recycling plastic waste“, „post industrial waste“, „circular plastic economy“ und „electrical industry“ (s. Anhang 1). Für die Literaturrecherche wurden der Bibliothekskatalog der RWTH Aachen sowie die Datenbanken Google Scholar, Scopus und Web of Science genutzt. Insgesamt wurden bei der Literaturanalyse weit über 100.000 Ergebnisse ermittelt, die, wie beschrieben, durch die Zusammenführung von Stichworten auf rund 4.500 Ergebnisse eingegrenzt wurden. Nach einer weiteren Bewertung und einer intensiven Einarbeitung in das Thema wurden diese auf ca. 100 Quellen reduziert. Die ausgewählten Quellen sind u. a. Fachbücher, aktuelle Branchenpapiere und Aufsätze in Fachjournalen wie *Polymers*, *Journal of Environmental Management* oder *Resources, Conservation & Recycling*. Die Quellen wurden anschließend im Literaturverwaltungssystem Citavi dokumentiert und strukturiert. Neben der systematischen Literaturrecherche wurden zu Beginn der Arbeit auch versuchs- und materialgeleitet Gesetze und Normen herangezogen. Zudem wurden im Laufe des Forschungszeitraumes bei Bedarf weitere Dokumente und Werke recherchiert sowie eingesehen.

2.2 Darlegung des Anwendungsfalls

Wie einleitend beschrieben, untersucht diese Arbeit das Recyclingpotenzial in der Elektroindustrie und bewertet die technische Machbarkeit anhand praxisnaher Aufbereitungsmodelle. Als Fallbeispiel dient das Unternehmen Phoenix Contact, um die theoretischen Ansätze in einem realen industriellen Kontext zu veranschaulichen und nachzuweisen. Im nachfolgenden werden hierzu das Unternehmen und die im Fokus stehende Kunststoffe beschrieben sowie

ein Überblick über die branchentypischen Kunststoffmaterialien gegeben. Im Unterkapitel 2.2.2 werden die branchetypischen Materialien dann systematisch identifiziert und priorisiert.

2.2.1 Unternehmensbeschreibung Phoenix Contact

Phoenix Contact ist weltweiter Marktführer für Komponenten, Systeme und Lösungen im Bereich der Elektrotechnik, Elektronik und Automation. Das Unternehmen beschäftigt rund 21.700 Mitarbeiter weltweit und hat im Jahr 2023 einen Umsatz von 3,4 Mrd. Euro erwirtschaftet. Der Stammsitz ist im westfälischen Blomberg. Zur Phoenix Contact-Gruppe gehören Fertigungsstätten in elf Ländern sowie mehr als 50 eigene Vertriebsgesellschaften in aller Welt. Das Produktspektrum umfasst Komponenten und Systemlösungen für die Energieversorgung, den Geräte- und Maschinenbau sowie den Schaltschrankbau. Zu den Produkten gehören beispielsweise Reihen- und Sonderklemmen, Printklemmen und Steckverbinder, Kabelanschlusstechniken und Installationszubehör sowie elektronische Interfaces, Automatisierungssysteme oder Überspannungsschutz-Systeme (Phoenix Contact, 2024).

Phoenix Contact dient für diese Arbeit mit der Fertigung am Stammsitz in Blomberg als praxisnahes Fallbeispiel für die Ermittlung des Recyclingpotenzials von Kunststoffabfällen in der Elektroindustrien. Neben Metallen ist Kunststoff ein zentraler Bestandteil von Elektrobauteilen. Kunststoffe machen dabei oft den größten Rohstoffanteil aus, so auch bei Bauteilen wie Reihenklemmen oder Steckverbinder, die standartmäßig bei Phoenix Contact hergestellt werden. Das Unternehmen stellt die Kunststoffbauteile für die Produkte im Spritzgießverfahren her und sammelt die anfallenden Abfälle, wie Angüsse und Ausschussteile separat.

2.2.2 Materialien für die Versuchsreihe

Die Materialgruppen in der Elektroindustrie sind sehr unterschiedlich und müssen einer Vielzahl von Anforderungen der Produktsicherheit, Mechanik, Verarbeitbarkeit, Qualität und Optik standhalten. Darunter fallen beispielhaft das Brandverhalten, die hohe Designfreiheit, die UV-Beständigkeit sowie die Farbbeständigkeit, die als Anforderungen an die Kunststoffe gestellt werden (ZVEI, 2021). Kunststoffe werden dabei in drei Gruppen unterteilt: Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere (Baur et al., 2019, S. 3). Die in dieser Arbeit betrachteten Kunststoffe gehören der Gruppe der Thermoplaste an. Letztere werden wiederum in Standardkunststoffe, technische Kunststoffe und Hochleistungskunststoffe unterteilt.

Die Elektroindustrie unterscheidet sich in Bereiche wie Automation, Energietechnik, Medizintechnik, Fahrzeugtechnik, Kabel, Elektrowerkzeuge, Haushaltsgeräte und Unterhaltungselektronik (Gontermann & Grömling, 2011a, S. 37). Die vorliegende Arbeit fokussiert sich, wie voran gegangen beschrieben, auf die Anwendungen im Bereich der Automation und

Energietechnik. Die Besonderheit bei diesen Anwendungen ist, dass u. a. die elektrotechnischen und brandschutztechnischen Anforderungen sehr hoch sind, weil das direkt eingesetzte Produkt aus Kunststoffen besteht – und der Kunststoff eine schirmende und damit sicherheitsrelevante Bedeutung hat. Wie in Unterkapitel 2.1.1 beschrieben, werden jährlich rund 90 % der anfallenden Kunststoffabfälle bei Phoenix Contact dem Recycling³ durch ein Entsorgungunternehmen zugeführt. Die restlichen 10 % werden der energetischen Verwertung zugeführt. Dieser Anteil wird nicht näher betrachtet, da es aus technischer Sicht nicht möglich ist, alle Kunststoffe sortenrein zu trennen und der Wiederverwertung zuzuführen.

Für die Auswahl der Forschungsmaterialien wurden Vertreter aus den drei vorher beschriebenen Anwendungsklassen der Standard-, technischen- und Hochleistungskunststoffe betrachtet. In Abbildung 3 wird die Mengenverteilung am Beispiel von Phoenix Contact dargestellt. Die Auswertung zeigt, dass der Einsatz von Standardkunststoffen wie Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP) für die Elektroindustrie nur eine untergeordnete Rolle spielt und jeweils unter 1 % liegt. Deswegen werden keine Standardkunststoffe für die weitere Untersuchung ausgewählt. Als die drei Hauptkunststoffe konnten die Kunststoffe Polyamid (PA), Polybutylenterephthalat (PBT) und Polycarbonat (PC) identifiziert werden, die alle zu den technischen Kunststoffen gehören. Eine Veröffentlichung der BASF zeigt, dass die Kunststoffe PA, PBT und PC in der Elektroindustrie, wie in diesem Fall, in der Installationstechnik weit verbreitet sind (Reinfrank & Neuhaus, 2004). Aufgrund des Mengenanteils werden die drei Kunststoffarten als technische Kunststoffe für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Als Kunststofftype der PA-Gruppe wird zwischen PA 4, PA 4.6, PA 6, PA 6.3, PA 6.6 und PA 12 unterschieden; der Anteil des PA 6.6 ist mit rund 76 % am größten, sodass dieser für die Materialuntersuchung ausgewählt wird. Als Hochleistungsthermoplast wird das flüssig-kristalline Polymer (LCP, engl.: liquid crystal polymer) ausgewählt. Des Weiteren wird ein thermoplastisches Elastomer als weitere Anwendungsklasse ausgewählt. Diese Anwendungsklasse hat einen Gesamtanteil von unter 2 %. Mit einem Anteil von etwa 1,5 % stellt das Thermoplastische Polyurethan (TPU) den größten Anteil dar und wird daher für die Auswahl eines thermoplastischen Elastomers berücksichtigt. Somit sind fünf Kunststofftypen, die als Anwendungsbeispiel für die Elektroindustrie dienen, selektiert worden.

³ Das Recycling bezieht sich in diesem Fall auf die Aufbereitung und den Wiedereinsatz durch externe Unternehmen. Eine Rückführung des Recyclingmaterials in das eigene Unternehmen, in dem der Abfall angefallen ist, findet nicht statt.

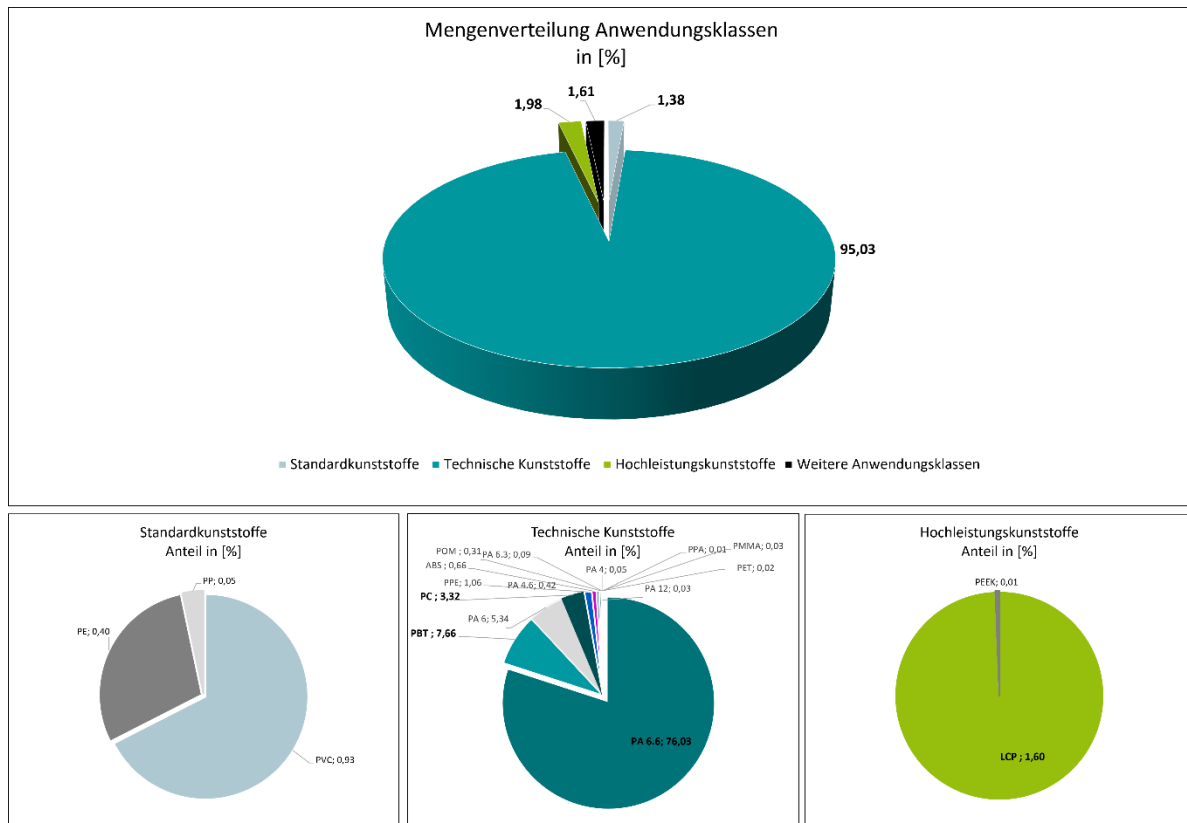


Abbildung 3: Mengenverteilung Kunststofftypen in der Elektroindustrie am Beispiel Phoenix Contact (Quelle: eigene Darstellung)

2.2.3 Betrachtungsrahmen

In den vorangegangenen Kapitelteilen wurden sowohl die theoretischen Grundlagen als auch die Anwendungsanforderungen näher betrachtet und differenziert. Aufgrund der Vielzahl an Anforderungen, Recyclingmöglichkeiten und Verfahren sowie der Größenordnung und Komplexität dieses Themas wird anhand der gewonnenen Erkenntnisse die Forschungsarbeit im Folgenden auf ein Teilgebiet eingegrenzt. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der mechanischen bzw. mechanisch-thermischen Aufbereitung und soll im beschriebenen Fallbeispiel dieser Arbeit untersucht werden. Der Betrachtungsrahmen findet nach der systematischen Bewertung der Erkenntnisse wie folgt statt:

- Abfallart: technische Kunststoffe (sortenrein)
- Ebene: Mikro-Ebene (Unternehmen)
- Herkunft: Abfälle aus Produktionsprozess (Angüsse und Ausschuss)
- Einstufung: Nebenprodukt (keine Abfallschlüsselnummer)
- Aufbereitung: mechanisch und mechanisch-thermisch
- Aufbereiter: externes Recyclingunternehmen

3 Beschreibung der Versuchsreihe zur technischen Recyclingfähigkeit

In diesem Kapitel wird untersucht, wie die Qualität des Kunststoffes beeinflusst wird, wenn Kunststoffe nach der Verarbeitung recycelt werden. Die Untersuchung konzentriert sich auf die in Kapitel 3.1 dargelegten Aufbereitungsmodelle des Mahlgutes und Regranulates. Für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten ist es vor allem bedeutsam, die Degradation des Kunststoffes zu analysieren und zu bewerten. Denn die planmäßige Verarbeitung und die Wiederaufbereitung können Einfluss auf den Wiedereinsatz nehmen, da das Material sowohl Hitze als auch mechanischer Belastung ausgesetzt ist (Pfaender, 2016, S. 1204–1205; Rudolph et al., 2020, S. 30–31). Um Aufschluss über die Degradation und die Qualität der Rezyklaten nach den jeweiligen Aufbereitungsstufen zu erhalten, werden in den Unterkapiteln 3.2 und 3.3 sowohl die Polymereigenschaften der ausgewählten Kunststofftypen als auch eine Versuchsreihe zur Untersuchung der technischen Recyclingfähigkeit dargelegt. Ziel ist es, durch den dargelegten Prüfplan sowohl die Materialqualität der Kunststoffrezyklate als auch die mechanischen Eigenschaften zu analysieren und zu verdeutlichen, inwieweit die Rezyklate in der Elektroindustrie einsetzbar sind.

Wichtig für die weiteren Untersuchungen ist es dabei, die Kunststofftypen mit ihrer Zusammensetzung und Beschaffenheit einzeln zu betrachten, denn sowohl das Primär- als auch als Sekundärmaterial haben unterschiedlichen Einfluss auf den Spritzgießprozess und letztlich ebenso auf die Produktqualität. Dabei werden relevante Prüfverfahren aus den Normungen, den Zulassungsanforderungen, der Literatur und den Unternehmensanforderungen der Phoenix Contact betrachtet und in den Prüfplan integriert. Bei dem Einsatz von Kunststoffen sind es u. a. die Polymerstrukturen, die Additive, die Granulatform und -größe, die Restfeuchte und die Viskosität die wichtigen Indikatoren für die Qualität darstellen. Ein weiterer relevanter Faktor, der wesentlichen Einfluss auf die Produktqualität haben kann, ist der Rezyklatanteil. Je nach Anteil kann sich die Qualität des Produktes verbessern oder verschlechtern. Um auch dieses für die einzelnen Kunststofftypen dieser Arbeit darzulegen, werden Untersuchungen bezüglich der Veränderung des Rezyklatanteils in den Prüfplan integriert. Des Weiteren können Prozessparameter im Spitzgießverfahren Aufschluss über die Materialqualität geben und sind somit weitere wichtige Kenngrößen zur ganzheitlichen Bewertung der technischen Recyclingfähigkeit.

3.1 Aufbereitungsverfahren

Für die Aufbereitung von Kunststoffen können zwei Verwertungsmethoden herangezogen werden: die werkstoffliche Verwertung und die rohstoffliche Verwertung. Dabei ist der werkstofflichen Verwertung aufgrund der rechtlichen und nachhaltigen Aspekte Vorzug zu geben (Rudolph et al., 2020, S. 18). Auch die Auswertung der rechtlichen und normativen

Rahmenbedingungen in Kapitel 2 hat gezeigt, dass für die industrielle Kreislaufführung der Kunststoffabfälle die werkstoffliche Verwertung zu priorisieren ist und die Aufbereitung mit dem geringsten Aufwand umgesetzt werden kann. Durch die werkstoffliche Verwertung des Kunststoffabfalls können drei Formen von Rezyklat hergestellt werden. Die erste Verarbeitungsform davon ist in der einfachsten Form, das Mahlgut. Jenes wird durch das Mahlen von Kunststoffabfällen gewonnen. Die Rückführung von Angüssen als Mahlgut wird im Industrieprozess in vielen Bereichen umgesetzt und entspricht dem Stand der Technik (Clauss, 2019, S. 59). Als zweite Verarbeitungsform kann man das Regranulat bezeichnen; hierbei wird das Mahlgut einem weiteren Verarbeitungsschritt unterzogen. Das Regranulat wird durch einen Schmelzprozess des Mahlgutes (z. B. Extrusion) erzeugt. Hierdurch entsteht ein Granulat mit gleichmäßiger Korngröße ohne Staubanteil. Als dritte Verarbeitungsform wird die Herstellung eines Regenerates bezeichnet. Das Regenerat wird, wie das Regranulat, durch einen Schmelzprozess erzeugt, allerdings mit dem Unterschied, dass zur Verbesserung der Eigenschaften Additive zugesetzt werden (Sesotec GmbH, 2021, S. 14).

Aufgrund der in Kapitel 2 genannten Anforderung wird in dieser Arbeit auf den Zusatz von Additiven und die Herstellung eines Regenerates verzichtet. In diesem Fall soll daher nachgewiesen werden, dass eine mechanische Aufbereitung (Herstellung Mahlgut) oder eine mechanisch-thermische Aufbereitung (Herstellung Regranulat) ausreichend ist und bestmöglich, ohne zusätzliche Zulassungen und Zertifizierungen, in den Produktionsprozess integriert werden kann.

Zur Herstellung des Mahlgutes gibt es zwei Methoden. Die erste Methode beinhaltet die Produktion von Mahlgut durch dezentrale Schneidmühlen an den Spitzgießmaschinen, das dann zur zentralen Kunststoffversorgung geführt wird. In diesem Prozess wird ausschließlich Kunststoffabfall in Form von Angüssen verarbeitet. Dieses ist ein gängiges Verfahren und wird auch bei Phoenix Contact eingesetzt. Allerdings führt dieses Variante prozessbedingt dazu, dass ausschließlich Angüsse verarbeitet werden und eine Vielzahl an Mühlen und Scheidewerken eingesetzt werden muss. Die zweite Methode beinhaltet die zentrale Herstellung von Mahlgut. Hierbei werden größere Mengen von Angüssen und Ausschussteilen mechanisch verarbeitet. Diese Variante kann sowohl innerhalb des eigenen Unternehmens als auch durch einen externen Dienstleister stattfinden, erfordert aber durchdachte Logistikprozesse.

In dieser Arbeit wurde sich für die Herstellung des Mahlgutes und des Regranulates durch einem externen Recyclingunternehmen entschieden. Die Entscheidung für eine externe Aufbereitung wurde getroffen, da das ausgewählte Recyclingunternehmen in der Lage ist, größere Mengen von Angüssen und Ausschussteilen mechanisch zu verarbeiten und die technische Möglichkeit der mechanisch-thermischen Aufbereitung besteht. Weiterhin ermöglicht die

externe Aufbereitung einen Vergleich mit dem dezentralen hergestellten Mahlgut aus den bestehenden Produktionsprozessen. Die Analysen und die Ergebnisse werden in Kapitel 4 dargestellt. Ein wichtiger Faktor, der durch eine externe Aufbereitung bedingt ist, ist jedoch, dass Angüsse und Ausschussformteile schwierig zu handhaben, zu lagern und zu transportieren sind, da sie im Verhältnis zu ihrem Gewicht ein unverhältnismäßig großes Volumen einnehmen. Diese Arbeit soll daher untersuchen, ob das durch die zentrale Aufbereitung hergestellte Mahlgut eine bessere Korngrößenverteilung aufweist als das im Produktionsbetrieb durch dezentrale Schneidmühlen erzeugte Mahlgut.

Aus werkstofflicher Sicht muss der Abfall für eine gleichbleibende Qualität des Sekundärmaterials in erster Linie aus stabilen Prozessen ohne jegliche Vermischungen, z. B. durch das Reinigen oder Farbwechsel, stammen (Clauss, 2019, S. 62). Zudem muss die Degradation des Kunststoffes während der Aufbereitung möglichst gering gehalten werden. „Eine Wiederaufbereitung kann mechanische, thermische und thermisch-oxidative Degradationsmechanismen hervorrufen.“ (Rudolph et al., 2020, S. 30) Diese Degradationsmechanismen können wesentlichen Einfluss auf die Materialeigenschaften und deren Wiedereinsatz haben. So ist es von großer Bedeutung, die Aufbereitungsschritte nur insoweit durchzuführen, wie sie für einen sicheren und stabilen Prozessablauf notwendig sind, um die Materialschädigung durch die Aufbereitung so gering wie möglich zu halten.

3.1.1 Herstellung Mahlgut

Die Herstellung des Mahlgutes wird durch einen externen Aufbereiter durchgeführt. Das Vermahlen der Kunststoffabfälle findet in Schneidmühlen der Hersteller Zerma und Dreher statt. Für fast alle der zu analysierenden Materialien, mit Ausnahme der Probe 2.1 (hier liegt das Material als internes Mahlgut vor), werden rund 2.000 kg Angüsse und Ausschussformteile durch das externe Recyclingunternehmen aufbereitet. Die 2.000 kg wurden ausgewählt, um einen stabilen Prozessablauf für den Mahlvorgang sicherzustellen. Zudem wird durch die eingesetzte Menge eine bestmögliche Homogenisierung der unterschiedlichen Teilchengrößen erzielt, wobei das Mahlgut selbst sehr inhomogen bleibt und die Teilchengröße in der Regel zwischen 2 mm bis 5 mm, mit einem zusätzlichen Staubanteil, liegt. Um den Staubanteil bestmöglich zu minimieren, wird eine automatische Entstaubung im Herstellungsprozess durchgeführt. Als Schutzmaßnahme findet zudem eine Entmetallisierung statt, um metallische Fremdkörper auszuschließen.

3.1.2 Herstellung Regranulat

Die Regranulierung geschieht ebenfalls durch das externe Recyclingunternehmen, das im ersten Schritt auch das Mahlen der Probematerialien übernommen hat. Für die Herstellung des Regranulates wird jeweils eine Hälfte des Mahlgutes abgeteilt, die in 1.000-kg-Chargen zu

Regranulat verarbeitet werden. Die Verarbeitung findet durch Aufschmelzen und Regranulieren über einen Extruder statt. Die Verarbeitungstemperaturen variieren dabei je nach Material zwischen 200 und 340 °C. Durch diesen Verarbeitungsschritt liegt ein homogenes Granulat (Regranulat) mit einer gleichmäßigen Korngröße und ohne Staubanteil vor. Die Granulatgröße des Regranulats variiert dabei je nach Materialtyp zwischen 3,2 mm und 4 mm.

3.2 Charakterisierung und Beschreibung der Versuchsmaterialien

Für den Forschungsteil dieser Arbeit wurden in Kapitel 2 fünf repräsentative Stoffgruppen der Elektroindustrie festgelegt. Diese sind die Polyamide (PA), Polybutylenterephthalate (PBT), Polycarbonate (PC), flüssig-kristalline Polymere (LCP, engl. liquid crystal polymer) und das thermoplastische Polyurethan (TPU). Im nachfolgenden werden die fünf Stoffgruppen weiter beschrieben und die Eigenschaften der einzelnen Polymere dargelegt. Neben der Polymerstruktur haben zudem die Farben Einfluss auf die Wiederaufbereitung und den Einsatz von Rezyklaten. Dieses ist zum einen dadurch bedingt, dass die Farbe ein Qualitätsmerkmal ist und zum anderen, dass eine hohe Farbvielfalt die sortenreine Trennung erschweren kann; so können bei einem Kunststofftyp über 40 Farben zum Einsatz kommen. Eine in der Elektroindustrie häufig eingesetzte Farbe ist Schwarz. Schwarz ist daher in dieser Arbeit eine repräsentative Farbe, die im Weiteren für alle Kunststofftypen untersucht wird. Erfahrungsgemäß zeigen schwarze Kunststoffteile zudem Farbveränderungen, wie Schlieren und damit einhergehende mögliche Schädigungen, augenscheinlich sehr gut an. Eine weitere Farbe, die aufgrund ihrer eingesetzten Menge beim PA 6.6 eine wesentliche Rolle für Phoenix Contact spielt, ist Grau. Erfahrungen bei Phoenix Contact zeigen zudem, dass intensive Farben, beispielsweise Orange und Rot gut als Versuchsmaterialien geeignet sind, da an ihnen die Farbstabilität gut untersucht werden kann. Die Farbstabilität ist dabei allerdings immer von den eingesetzten Pigmenten, ihren Eigenschaften und der Schädigungshistorie bei der Verarbeitung abhängig (Jandke & Reinicker, 2016, S. 748–752).

Auf Basis des breiten Farbspektrums und der vorliegenden Erfahrungswerte, wurden neben der Farbe Schwarz für das Standardmaterial PA 6.6 die Farben Grau und Orange gewählt; und für das PBT zusätzlich die Farbe Orange. Zudem wurde bei der Separierung der Kunststoffabfälle darauf geachtet, dass die Chargen nach Möglichkeit bekannt sind, um mögliche Rückschlüsse auf das Primärmaterial zu ziehen. Eine Ausnahme der genannten Punkte wurde für das PC getroffen. Aufgrund der vorherrschenden Prozessabläufe und Mengenanteile konnte eine Separierung eines definierten Materialtyps, einer Farbe und einer Charge nicht stattfinden. Für die Aufbereitung wurde daher ein gemischtes PC herangezogen.

3.2.1 Polyamide (PA)

Das PA ist ein teilkristalliner technischer Kunststoff und zählt zu den wichtigsten Thermoplasten. Das PA wird in der kunststoffverarbeitenden Industrie, wie in diesem Fall der Elektroindustrie, vielfältig eingesetzt. Unterschieden werden die Polyamide in zwei Gruppen. In der ersten Gruppe werden die Molekülketten mit einem Grundbaustein aufgebaut, z. B. beim PA 6. In der zweiten Gruppe werden die Molekülketten aus zwei verschiedenen Grundbausteinen aufgebaut, wie beim PA 6.6. Insgesamt sind die Polyamide zähe Materialien, die u. a. eine hohe Festigkeit, Schlagzähigkeit, Wärmeformbeständigkeit sowie guten Isolationseigenschaften aufweisen. Durch die mechanischen Eigenschaften, die Wärmebeständigkeit und die guten elektrischen Eigenschaften sind die Polyamide, in diesem Beispiel das PA 6.6, in der Elektroindustrie ein weitverbreiteter Kunststoff. Die Materialien lassen sich bei entsprechenden Verarbeitungstemperaturen gut verarbeiten. Sie können gleichermaßen durch Spritzgießen, Extrudieren oder Blasformen verarbeitet werden. Zu beachten ist allerdings, dass die Polyamide hygroscopisch sind und Feuchtigkeit aus der Umgebung aufnehmen, was die Eigenschaften beeinflusst und auch für die Verarbeitung bedeutend ist. (Abts, 2020, S. 122–123; Bonten, 2020, S. 222–223; Bruder, 2016, S. 23–26; Hellerich et al., 2010, S. 133–140) Inwieweit das PA 6.6 innerhalb der Elektroindustrie für ein mechanisches bzw. mechanisch-thermisches Recycling geeignet ist, sollen die Untersuchungen in Kapitel 3.3 zeigen. Aufgrund der Anwendungsbereiche, der Vielfältigkeit und der Verfügbarkeit bei Phoenix Contact, wurden für die Untersuchungen die Farben Schwarz, Grau und Orange ausgewählt.

3.2.2 Polybutylenterephthalat (PBT)

Das PBT ist ein technischer teilkristalliner Thermoplast und gehört zu der Gruppe der Polyester. Das PBT hat u. a. eine gute Festigkeit sowie Steifigkeit und wird im Anwendungsfenster wenig von Temperatur und Feuchte beeinflusst. Zudem besitzt der Kunststoff eine gute Resistenz gegen schwache Säuren und alkalische Lösungen. Anders als bei den meisten Polyesterarten wird das PBT hauptsächlich durch Spritzgießen und Extrusion verarbeitet (Bonten, 2020, S. 228–229; Bruder, 2016, S. 29–31) „Es kommt meist zum Einsatz, wenn Polyamid aus Gründen der geringen Dimensionsbeständigkeit oder auch der chemischen Beständigkeit nicht eingesetzt werden kann.“ (Bonten, 2020, S. 229)

In dieser Arbeit werden zwei PBT Materialien in den Farben Schwarz und Orange untersucht. Beide Materialtypen sind anwendungsbedingt mit Glasfasern verstärkt. Das PBT in Schwarz ist in diesem Beispiel ein Material, dass innerhalb des Produktionsprozesses in einer standardmäßigen Spritzgießmaschine mit einem Kaltkanalsystem verarbeitet wurde. Das PBT in Orange hingegen, wurde in einer Spritzgießmaschine mit einem Heißkanalsystem verarbeitet. Das Verfahren unterscheidet sich in Bezug auf die Werkzeugart sowie die Verarbeitungs- und Verweilzeiten. Bedingt durch die längeren Verweilzeiten kann es zu einem stärkeren Abbau

des Materials kommen – daher ist nicht jedes Material für das Heißkanalsystem geeignet (Bruder, 2016, S. 132). Für diese Arbeit bedeutet dieser Umstand, dass das PBT orange nicht mit dem PBT in schwarz vergleichbar ist und während der Verarbeitung einer anderen Beanspruchung ausgesetzt wurde. Die Untersuchungen in Kapitel 3.3 sollen zeigen, ob das PBT, das sowohl aus dem Kaltkanalsystem als auch aus dem Heißkanalsystem stammt, als Sekundärmaterial wiederverwendet werden kann.

3.2.3 Polycarbonat (PC)

Das PC ist ein amorpher technischer Thermoplast und gehört wie das PBT zu den Polyestern. Das PC weist eine hohe Transparenz, Wärmeformbeständigkeit, Schlagzähigkeit und ausgezeichnete elektrische Isolierung auf, allerdings besitzt es eine geringe UV-Beständigkeit und muss mit Stabilisatoren geschützt werden. Eine Verarbeitung findet mittels Spießgießen, Extrusion oder weiterer gängiger Verfahren für Thermoplaste statt (Abts, 2020, S. 129; Bonten, 2020, S. 232).

Grundsätzlich ist das PC gut für das Recycling geeignet und zeigt ein hohes Potenzial (Rudolph et al., 2020, S. 36–37). Wie in der Einleitung dieses Kapitels beschrieben, war die Verfügbarkeit des Materials während der Forschungszeit allerdings gering und konnte nicht auf ein Material sowie eine Farbe begrenzt werden. Daher wurde der gesamte Stoffstrom vom PC herangezogen. Der Stoffstrom besteht aus unterschiedlichen Materialtypen und Farben. Für die weiteren Untersuchungen wird das Materialgemisch hingegen genauso behandelt wie alle anderen Proben; als Referenz wurde ein definiertes Material mit dem größten Verarbeitungsanteil herangezogen. Die Untersuchungen sollen zeigen, inwieweit ein PC-Gemisch überhaupt für das Recycling nutzbar ist.

3.2.4 Flüssig-kristallines Polymer (LCP)

Das LCP (engl.: liquid crystal polymer) ist ein teilkristalliner Hochleistungskunststoff, der zu der Gruppe der aromatischen Polyester gehört. Die kristallinen Strukturen können während der Verarbeitung orientiert werden, sodass dadurch eine gute Verarbeitbarkeit erzielt wird. Zudem wirken diese Strukturen positiv auf Zug- und Biegebeanspruchbarkeit. Dabei kann der Verstärkungseffekt durch die Orientierung der Molekülstäbe wesentlich höher sein als bei der Faserverstärkung. Die meisten LCP sind zudem glasfaserverstärkt. LCP sind u. a. schwer entflammbar und weisen gute elektrische Isoliereigenschaften auf (Abts, 2020, S. 239; Bonten, 2020, S. 138; Bruder, 2016, S. 50–51). Inwieweit ein LCP für das Recycling innerhalb der Elektroindustrie geeignet ist, sollen die weiteren Untersuchungen in Kapitel 3.3 zeigen. Für die Aufbereitung und die weitere Analyse wurde ein LCP in Schwarz verwendet.

3.2.5 Thermoplastisches Polyurethan (TPU)

Das TPU gehört zu den thermoplastischen Elastomeren und besitzt die Besonderheit thermoplastisch verarbeitbar zu sein, während es die Eigenschaft von Elastomeren aufweist. Das TPU kann aufgrund seiner Struktur durch Spitzgießen, Extrudieren und auch alle anderen gängigen Verfahren für Thermoplaste verarbeitet werden, ist allerdings etwas schwieriger zu verarbeiten als diese. Es weist eine hohe Festigkeit, Schlagzähigkeit sowie vor allem Weiterreißfestigkeit und Bruchdehnung auf und wird oft als Weichkomponente genutzt. Das TPU kann zudem bei hohen Dauergebrauchstemperaturen eingesetzt werden (Abts, 2020, S. 148; Bonten, 2020, S. 252–253; Bruder, 2016, S. 41). Das Granulat liegt als farblich neutrales sogenanntes Naturmaterial vor und ist mit Glasfasern verstärkt. Im Produktionsprozess wird das TPU natur mit einem schwarzen Masterbatch versehen. Dadurch findet, anders als bei den anderen Materialien, die Färbung erst beim Spritzgießen statt. Auch für dieses Material wird im Weiteren analysiert, inwieweit das TPU für das Recycling in der Elektroindustrie geeignet ist.

3.3 Prüf- und Messplan zur Charakterisierung der Kunststoff-Rezyklat-Qualität

Um die technische Recyclingfähigkeit der zuvor aufgeführten Versuchsmaterialien zu ermitteln, wird in diesem Unterkapitel der Prüf- und Messplan dargelegt. Für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten ist es von hoher Bedeutung, die Rezyklate je nach Kunststofftyp auf ihre Materialschädigung bzw. ihr Abbauverhalten hin zu überprüfen. Der Prüf- und Messplan wurde somit auf Basis aller gängigen Prüfverfahren und Erfahrungswerte erarbeitet. Im ersten Schritt findet dabei eine Qualitätsprüfung aller Materialien statt (Unterkapitel 3.3.1). Die Qualitätskriterien werden bei dieser Voranalyse mittels Feuchtemessungen, Farbmessungen, Messungen der Abbauvorgänge durch UV-Lagerung und Klimalagerung, einer Korngrößenermittlung, der Analyse des Fließverhaltens sowie einer ganzheitlichen rheometrischen Analyse untersucht und bewertet. Darauf aufbauend werden im zweiten Schritt Probekörper mit unterschiedlichen Rezyklat-Anteilen hergestellt und untersucht (Unterkapitel 3.3.2). Die Machbarkeit des Rezyklateinsatz wird dabei durch die unterschiedlichen Mischungsverhältnisse dargestellt. Im dritten Schritt werden zudem die Prozessparameter des Spritzgießprozesses gemessen und ausgewertet (Unterkapitel 3.3.3). Die Ergebnisdarstellung findet in Kapitel 4 statt. Um die Qualitätskriterien sowie die Analyse- und Messmethoden ganzheitlich darzulegen, wird der Prüf- und Messplan in Tabelle 1 aufgeführt.

Beschreibung der Versuchsreihe zur technischen Recyclingfähigkeit

Tabelle 1: Prüf- und Messplan zur Charakterisierung der Kunststoff-Rezyklat-Qualität (eigene Darstellung)

Qualitätskriterium	Beschreibung	Analysemethode	Prüfungstyp	Versuchsbeschreibung
Feuchtigkeitsgehalt	Wassergehalt im Granulat	Bestimmung des Wassergehaltes mittels Calciumhydrid in Anlehnung an DIN EN ISO 15512:2019	Materialprüfung	Anhang 2
Farbeintensität	Gleichmäßigkeit und Intensität der Farbe auf eine Farbmusterplatte	Spektroskopie mit dem CIE 1976- L*a*b*-Farbmodell	Materialprüfung	Anhang 3
Stabilität	Verhalten des Kunststoffes bei UV-Einstrahlung und hohen Temperaturen	Farbmessungen und Migrationstest nach UV-Lagerung und Klimalagerung	Materialprüfung	Anhang 4
Glührückstand	Anteil an anorganischen Rückständen nach Verbrennung	Veraschung in Anlehnung an DIN EN ISO 1172 und DIN EN ISO 3451	Materialprüfung	Anhang 5
Korngröße	Durchschnittliche Größe der Granulatpartikel	Siebanalyse	Materialprüfung	Anhang 6
Schmelzindex	Fließverhalten des geschmolzenen Granulats	Lösungviskositäts-Messung nach DIN EN ISO 307 oder Schmelzviskositäts-Messung nach DIN EN ISO 1133	Materialprüfung	Anhang 7
Viskosität	Fließverhalten des geschmolzenen Granulats	Rheometrie	Materialprüfung	Anhang 8
Zugfestigkeit	Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Zugbelastung	Zugversuch nach ISO 527-2	Prüfung Probekörper	Anhang 9
Schlagzähigkeit	Widerstandsfähigkeit gegen plötzliche Belastung	Kerbschlagbiegeprüfung nach ISO 179-1	Prüfung Probekörper	Anhang 10
Bruchfestigkeit	Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Belastungen	Bruchprüfung	Prüfung Probekörper	Anhang 11
Dosierzeit	Zeit, die benötigt wird, um eine bestimmte Menge Granulat zu dosieren	Maschinenüberwachung, Aufnahme von Zykluszeiten	Messung Maschinendaten	-
Einspritzdruck	Druck, der während des Einspritzens des Granulats in die Form aufgebracht wird	Drucksensoren	Messung Maschinendaten	-
Massepolster	Restmenge des Materials im Zylinder nach dem Einspritzen	Maschinenüberwachung	Messung Maschinendaten	-

3.3.1 Qualitätsprüfungen Versuchsmaterialien

Die Rezyklierbarkeit von Kunststoffabfällen wird durch die Empfindlichkeit des Polymers gegenüber des Materialabbaus beeinflusst (Rudolph et al., 2020, S. 40). Aufgrund dessen ist eine Materialanalyse der einzelnen Rezyklate unabdingbar, denn nur so kann neben der Herstellung von Probekörper ermittelt werden, wie stark ein Materialabbau und damit eine Degradation des Kunststoffes stattgefunden hat. Für die Analysen der Kunststoff-Rezyklat-Qualität werden für die acht ausgewählten Kunststoffe jeweils die Mahlgüter (M) und die Regranulate (R) untersucht. Je nach Messverfahren werden zum Vergleich Messdaten der Primärrohstoffe, Granulate (G), herangezogen. Um möglichst vergleichbare Werte zu nutzen, wurden die verarbeiteten Chargen identifiziert und nach Möglichkeit die Eingangsmessungen der jeweiligen Chargen ausgewertet. Für die Unterscheidung der Proben wurde eine Kennzeichnung festgelegt und wie folgt benannt:

Beschreibung der Versuchsreihe zur technischen Recyclingfähigkeit

1. Ziffer = Kunststofftyp, 2. Ziffer = Material/Farbvariante, 3. Ziffer = Referenzprobe (wenn relevant), Buchstabe = Aufbereitungsindex (G, M, R)

z.B.: 1.1-G; 1.1-M; 1.1-R; 1.2-G; ...

Die Kennzeichnungen der einzelnen Kunststoffproben sind in Tabelle 2 dargestellt. Diese Tabelle zeigt eine Übersicht aller Proben, so dass eine eindeutige Zuordnung möglich ist.

Tabelle 2: Bezeichnung der Kunststoffproben (Quelle: eigene Darstellung)

Bezeichnung	Kunststoffproben
1.1-G	PA 6.6, schwarz – Granulat
1.1-M	PA 6.6, schwarz – Mahlgut
1.1-R	PA 6.6, schwarz – Regranulat
1.2-G	PA 6.6, grau – Granulat
1.2-M	PA 6.6, grau – Mahlgut
1.2-R	PA 6.6, grau – Regranulat
1.3-G	PA 6.6, orange – Granulat
1.3-M	PA 6.6, orange – Mahlgut
1.3-R	PA 6.6, orange – Regranulat
2.1-G	PBT, schwarz – Granulat
2.1-M	PBT, schwarz – Mahlgut (intern)
2.1-R	PBT, schwarz – Regranulat
2.2-G	PBT, orange – Granulat
2.2-M	PBT, orange – Mahlgut
2.2-R	PBT, orange – Regranulat
3-G	PC, schwarz – Granulat
3-M	PC, gemischt, alle Farben – Mahlgut
3-R	PC, gemischt, alle Farben – Regranulat
4-G	LCP, schwarz – Granulat
4-M	LCP, schwarz – Mahlgut
4-R	LCP, schwarz – Regranulat
5-G	TPU, natur + Masterbatch schwarz – Granulat
5-M	TPU, natur + Masterbatch schwarz – Mahlgut
5-R	TPU, natur + Masterbatch schwarz – Regranulat

Wie in der Einleitung des Unterkapitels 3.3 beschrieben, findet die Qualitätsbewertung der Granulate, Mahlgüter und Regranulate mittels Feuchtemessungen, Farbmessungen, Messungen der Abbauvorgänge durch UV-Lagerung und Klimalagerung, einer Korngrößenermittlung, der Analyse des Fließverhaltens sowie einer ganzheitlichen rheometrischen Analyse statt.

Die Untersuchung der *Feuchte* wurde als Erstes durchgeführt. Das Hauptziel dieser Untersuchung besteht darin, den Feuchtigkeitsgehalt der jeweiligen Granulate, Mahlgüter und Regranulate zu bestimmen, da Thermoplaste bei der Lagerung Feuchtigkeit aufnehmen können. Die Feuchtigkeitsaufnahme variiert bei den einzelnen Materialien und kann bei der Verarbeitung eine Schädigung durch Polymerabbau begünstigen (Abts, 2020, S. 172). Um eine

Materialschädigung durch Hydrolyse zu vermeiden, muss eine definierte Verarbeitungsfeuchte eingehalten werden. „Die sogenannte Verarbeitungsfeuchte ist der maximal mögliche Feuchteanteil im Granulat, bei dem die Qualität der Formteile bzw. Halbzeuge noch gesichert ist“ (KUZ, 2022). Entspricht der tatsächliche Feuchtegehalt des Granulats nicht der Verarbeitungsfeuchte, muss eine Vortrocknung erfolgen (Abts, 2020, S. 172). Um die Trocknungszeiten und den damit verbundenen Arbeitsaufwand möglichst gering zu halten, kann der Kunststoffverarbeiter mit dem Hersteller Grenzwerte für die Feuchte festlegen. Bei der Beauftragung des Aufbereiters für die Verarbeitung der Mahlgüter und Regranulate wurden in diesem Projekt keine spezifischen Anlieferfeuchten vereinbart. Der Grund dafür war, durch möglichst wenig Vorgaben eine realistische Einschätzung zu erhalten, wie das Material sich bei der werksspezifischen offenen Lagerung verhält. Für das Primärmaterial hingegen sind für viele Materialien Anlieferfeuchten mit dem Hersteller definiert. Auf Basis der Feuchtemessung wurden alle Materialien für die Herstellung der Farbmusterplatten und der Probekörper gemäß der definierten Verarbeitungsfeuchte mittels Trockenlufttrocknern vorgetrocknet. Der Einsatz der Prüfgeräte, der Verfahren sowie die genannten Feuchtegehalte und Trocknungszeiten gemäß den Herstellerangaben sind in Anhang 2 dargelegt.

Als weitere Qualitätsanalyse wurde die *Farbe* an Farbmusterplatten untersucht. Das Ziel dieser Analyse ist es, potenzielle Farbschäden und Abbauprozesse zu identifizieren und zu bewerten. Gegenwärtig gibt es eine Vielzahl von Produkten aus Kunststoffen in vielfältigen Farben. Die optische Wahrnehmung spielt beispielsweise eine große Rolle für die Anwendung oder die Kaufentscheidungen. Letztere wird dabei nicht zuletzt durch die Farbe bestimmt. Dabei ist die Farbe ein bedeutendes visuelles Qualitätsmerkmal. Die Sicherung dieses Qualitätsmerkmals ist daher zentral (Bastian & Hochrein, 2018, S. 10–13). Auch Erfahrungen im industriellen Umfeld haben gezeigt, dass Kunden eine gleichbleibende Farbe als Qualitätsmerkmal einstufen und diese zur Kaufentscheidung bzw. zur Beanstandung beiträgt. Dabei ist die Farbvielfalt im Bereich der Kunststoffe enorm; allein bei Phoenix Contact werden mehr als 40 verschiedene Farben eingesetzt. Um die optische Wahrnehmung eines Produktes dabei immer gleich zu halten, ist die Farbmessung ein wesentlicher Bestandteil der Qualitätsprüfung des Kunststoffgranulates. Neben den optischen Anforderungen kann eine Veränderung der Farbe aber auch auf das Voranschreiten von unterschiedlichen Abbauprozessen und den Verbrauch der Stabilisatoren und anderer Zuschlagstoffe hinweisen (Bastian & Hochrein, 2018, S. 179–181). Die Prüfbedingungen und die Spezifikation der Farbmusterplatten werden in Anhang 3 dargestellt. Bei Phoenix Contact ist der maximale Gesamtfarbabstand dE mit einer oberen Toleranz (OT) angegeben und dient bei allen Farbmessungen als Referenzwert. Der OT-Wert ist für die jeweiligen Materialien und Farben als Parameter festgelegt.

Um weitere Abbauvorgänge zu erkennen, erfolgt eine *UV-Lagerung* und eine *Klimalagerung* der Farbmusterplatten. Die Langzeitbeständigkeit von Kunststoffen kann durch die „[...] Anwesenheit von Luftsauerstoff, besonders in Kombination mit Wärme und/oder Sonnenlicht [...]“ (Bonnet, 2016, S. 113), stark beeinflusst werden und es kann zum Kettenabbau kommen. „Bei ausreichender Energiezufuhr durch z.B. UV-Strahlung oder Wärme kann es zu einer Spaltung der Ketten kommen.“ (Bonnet, 2016, S. 113) Hinzu kommt, dass die Molekülketten beim Rezyklat durch die mechanische und die mechanisch-thermische Verarbeitung schon geschädigt sein können. Die Abbauvorgänge von Kunststoffen sind ein sehr komplexes, vielfältiges Thema und werden in dieser Arbeit auf die UV-Lagerung und Klimalagerung begrenzt (Bastian & Hochrein, 2018, S. 174). Die Versuchsbedingungen sind in Anhang 4 dargelegt.

Desweiteren wird der *Glührückstand* ermittelt. Ziel dieser Untersuchung ist es, zu prüfen, ob es während der Verarbeitung zu einem Abrieb, und damit zu einem Verlust, der Glasfasern gekommen ist. Die Eigenschaften von Kunststoffen können durch Füllstoffe wie Glasfasern beeinflusst werden. Sie können beispielsweise die Wärmebeständigkeit und Zugfestigkeit des Kunststoffes erhöhen und sind im Bereich der Thermoplaste ein vielseitig eingesetzter Füllstoff. Die glasfaserverstärkten Thermoplaste liegen in der Regel als Granulat vor. In dieser Arbeit sind es die Materialien PBT, LCP und TPU (Knerr & Hersche, 2016, S. 1081–1099). Die Glasfasern sind als anorganische Bestandteile eingebunden und ihr Anteil kann über den Glührückstand ermittelt werden. Durch die Verarbeitung des Kunststoffes und die Wiederaufbereitung kann es sowohl zum Abrieb der Glasfaser als auch zum Faserbruch kommen. Dabei können die Fasern stark beschädigt werden (Eriksson et al., 1996). Um die enthaltenen Glasfaseranteile nach der Verarbeitung und der Aufbereitung nachzuweisen, wurde der Glührückstand gemessen. Über eine mögliche Verkürzung oder Änderung der Anordnung der Fasern kann in diesem Versuch keine Aussage getroffen werden, wichtig ist an dieser Stelle aber, dass keine Glasfasern durch die Verarbeitung oder Aufbereitung verloren gegangen sind. Die Verkürzung oder Veränderung der Anordnung der Glasfasern werden über die Eigenschaften wie die Zugfestigkeit in Kapitel 3.3.2 geprüft. Die Prüfbedingungen für den Glührückstand sind in Anhang 5 beschrieben.

Eine weitere wichtige Kenngröße die in dieser Arbeit analysiert wird, ist die *Korngröße*. Das Hauptziel dieser Untersuchung ist es, die Korngrößenverteilung zu ermitteln und zu prüfen, ob eine dezentrale oder zentrale Aufbereitung Auswirkung auf die Verteilung der Körnung hat. Die Korngrößen haben einen wesentlichen Effekt auf den Produktionsprozess, beispielsweise auf die Dosierphase der Spitzgießmaschinen. Vor allem eine inhomogene Korngrößenverteilung kann Einfluss auf die Produktqualität nehmen. So kann diese zur unvollständigen Füllung, einer sogenannten Unterspritzung, einzelner oder aller Kavitäten im Spitzgießwerkzeug führen. Erfahrungen bei Phoenix Contact haben gezeigt, dass vor allem die unterschiedlichen

Größen von Angüssen und Ausschussteilen in einem sehr inhomogenen Materialstrom des Mahlgutes münden. Durch das Mahlen von Ausschussteilen können bei Bauteilen mit dünnen Wanddicken sehr dünne Plättchen im Mahlgut vorliegen (s. Abbildung 4). Diese Plättchen erschweren das gleichmäßige Aufschmelzen des Kunststoffes. Dabei weist der Materialstrom, im Vergleich zu Granulat und Regranulat, eine größere Schwankungsbereite auf (Pfaender, 2016, S. 1205). Die Untersuchungsparameter sind in Anhang 6 aufgeführt.

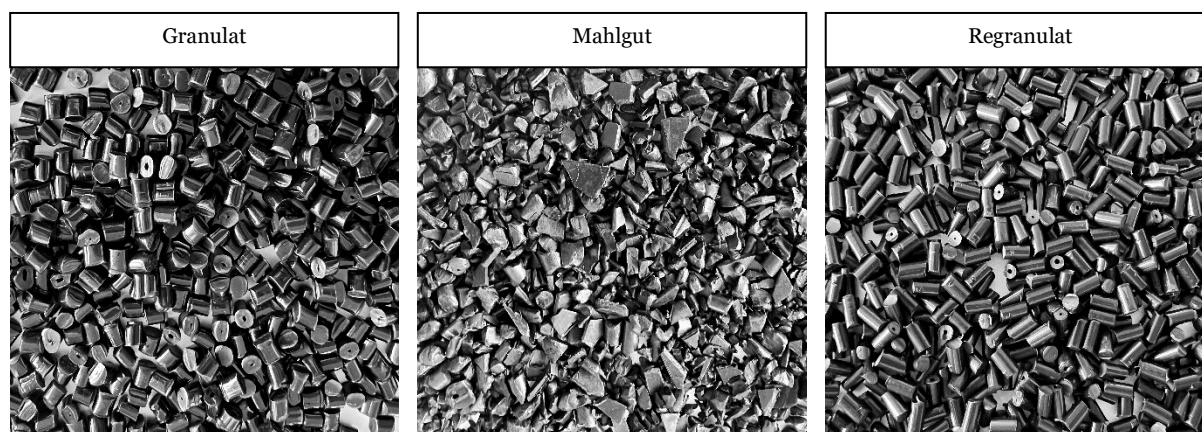


Abbildung 4: Bilder Materialproben PA 6.6 (Quelle: eigene Darstellung)

Eine weitere Untersuchung ist die des *Fließverhaltens*. Hauptziel dieser Untersuchung ist es, das Fließverhalten zu bestimmen und Veränderung nach den jeweiligen Verarbeitungsstufen zu erkennen. Für die Verarbeitbarkeit von Kunststoffen ist das Fließverhalte eine wichtige Kenngröße (Bonnet, 2016, S. 13). Die Degradation der Kunststoffe durch das Wiederaufbereiten kann zur Reduktion der Schmelzviskosität führen, welche die Maß für das Fließverhalten darstellt und das Prozessverhalten beeinflusst (Rudolph et al., 2020, S. 33). Durch die Aufbereitung „[...] kann in bestimmten Fällen die Verarbeitbarkeit von Materialien so stark beeinflusst werden, dass diese nicht mehr im selben Prozess verwendet werden können“ (Rudolph et al., 2020, S. 33). Es gibt unterschiedliche Arten der Viskositätsbestimmung. Nachfolgend werden die Lösungsviskosität (VZ) und die Schmelzviskosität (MVR) gemessen. Die Anwendung der Verfahren ist von den Kunststoffen und deren Eigenschaften abhängig. Die VZ wird für die Analyse des Kunststoffes PA 6.6 eingesetzt, die MVR für die Kunststofftypen PBT, PC und TPU. Für das LCP ist eine Messung mit den genannten Verfahren technisch nicht möglich. Die Verfahrensbeschreibung sowie die eingesetzten Messgeräte sind in Anhang 7 aufgeführt.

Als abschließende Materialuntersuchung wurde eine *Rheometrische Analyse* durchgeführt. Hierzu wurde für diese Arbeit eine rheometrische Charakterisierung mittels des Hochdruckkapillarrheometers (HKR) beim Institut für Kunststoffverarbeitung der RWTH Aachen in Auftrag gegeben. Das Hochdruckkapillarrheometer eignet sich aufgrund der Messungen in hohen Schwergeschwindigkeitsbereichen besonders für Kunststoffschmelzen, da in den hohen

Schwergeschwindigkeitsbereichen die wichtigsten Verarbeitungsprozesse in der Kunststoffverarbeitung ablaufen (Schröder, 2020, S. 59). Ziel dieser Untersuchung ist es, die Veränderungen des Fließverhaltens zu erkennen. Hierzu wurden die drei Stufen „Granulat, Mahlgut, Regranulat“ rheologisch charakterisiert. Die Versuchsbeschreibung ist zusammenfassend in Anhang 8 aufgeführt. Alle weitergehenden Informationen wie die durchgeführten Analysen, die technischen Grenzen und die umgesetzten Abhilfemaßnahmen sind in einem Abschlussbericht des Instituts für Kunststoffverarbeitung dargelegt (IKV, 2023b).

3.3.2 Qualitätsprüfungen Probekörper

Nachdem die Voranalysen zur Materialqualität in Kapitel 3.3.1 durchgeführt wurden, ist es für die weitere Bewertung relevant die Werkstoffqualität zu analysieren. Hierzu werden Zugstäbe für Zugprüfungen, Stabprobekörper für Kerbschlagbiegeversuche und Kunststoffgehäuse für Bruchprüfungen hergestellt. Ziel ist es, anhand der Probekörper die Qualität der Rezyklate weiter zu bewerten und auch mögliche Beimischungsmengen zu erproben. Die Beimischung von Primärrohstoff kann sich positiv auf die Anwendung auswirken und den Verdünnungseffekt des Materials begrenzen (Rudolph et al., 2020, S. 32).

Um vergleichbare Referenzwerte zu haben, werden neben den Beimischungsformen auch Probekörper aus 100 % Primärmaterial (Granulat) hergestellt. Die Untersuchung der Rezyklate erfolgt mit drei Mischungsparameter für eine Versuchsreihe (V). Die erste Beimischungsform enthält 25 % Rezyklat. Die zweite Beimischung enthält einen Anteil von 50 % Rezyklat, der dritte Probekörper einen solchen von 100 % Rezyklat. Daraus ergibt sich der in Tabelle 3 dargelegte Herstellungsplan.

Tabelle 3: Herstellungsplan der Probekörper mit Rezyklatanteilen (Quelle: eigene Darstellung)

Versuchsreihe (V)	Probe	Mahlgut (M) oder Regranulat (R) / Granulat (G) [%]	Bemerkung
V 0/100	1 - 5	0/100G	Referenzprobe
V 25/75	1 - 5	25M o. R/75G	
V 50/50	1 - 5	50M o. R/50G	
V 100/0	1 - 5	100M o. R/0G	

Die ersten Prüfungen, die zur Untersuchung der Werkstoffqualität dienen, sind die *Zugprüfungen*. Die Zugeigenschaften geben Aufschluss über die mechanische Belastbarkeit des Materials. Wegen der Verarbeitung im Spießgießprozess bzw. der Wiederaufbereitung – sowohl durch das Mahlen als auch durch das Regranulieren – kann es zu Schädigungen des Materials gekommen sein. Vor allem bei glasfaserverstärkten Kunststoffen, wie in dieser Arbeit bei PBT, LCP und TPU, kann es zu Qualitätsverlusten der Glasfasern gekommen sein. Die Abnutzung und Veränderung der Glasfasern kann starken Einfluss auf die Zugfestigkeit haben (Eriksson et al., 1996). Für die Zugprüfungen wurden als Probekörper Zugstäbe (Probekörper 1A nach der ISO 527-2/1A) im Spitzgießverfahren hergestellt. Für die Untersuchungen wurden alle

Versuchsreihen gemäß Tabelle 3 untersucht. Die Prüfbedingungen und die spezifischen Daten der Zugstäbe sind in Anhang 9 aufgeführt.

Eine weitere wichtige mechanische Prüfung ist die *Kerbschlagbiegeprüfung*. „Kerbschlagbiegeversuche geben Aufschluss über die Zähigkeit von Thermoplasten“ (Abts, 2020, S. 202). Für die Prüfung der Zähigkeit wird ein Stabprobekörper mit eingelassener Kerbe als Probekörper herangezogen. Die sogenannte Charpy-Schlagzähigkeits-Prüfung basiert auf der ISO 179-1; die Prüfbedingungen sind in Anhang 10 aufgeführt. Auch für diese Untersuchung wurde die gesamte Versuchsreihe nach Tabelle 3 ausgeführt und die Ergebnisse werden in Kapitel 4 dargestellt.

Für die weitere Qualitätsprüfung wird eine praxisbezogene *Bruchprüfung* von Echtbauteilen von Phoenix Contact herangezogen. Die sogenannte Fußbruchprüfung soll die Bruchstabilität des Bauteils darstellen. Die Prüfung wird bei Kunststoffgehäusen mit einem Befestigungsfuß zum Aufrasten auf eine Tragschiene durchgeführt. Zur Bewertung der Materialeigenschaften wird bei diesem Versuch eine Nullfehlertoleranz angesetzt, d. h., es darf kein Fuß beim Auf- und Abrasten brechen oder Risse bilden. Das Material muss diesem Versuch fehlerfrei standhalten. Die Fußbruchprüfung wird ausschließlich für Gehäuse mit dem Materialien PA 6.6 durchgeführt. Davon betroffen sind die Proben 1.1, 1.2 und 1.3. Hierzu wurden unter stabilen Spritzgießbedingungen 30 Bauteile mit den Mischungsanteilen aus Tabelle 3 hergestellt. Davon wurden mind. zehn Bauteile, in Anlehnung an die Anzahl der Kerbschlagbiegeprüfung, spritzfrisch geprüft. Für die Materialien, bei denen Bauteile gebrochen sind, wurde der Versuch ein zweites Mal mit zehn Bauteilen durchgeführt. Zusätzlich wurde in diesem Fall der Versuch mit weiteren zehn Bauteilen an einer Normschiene mit 35 mm vorgenommen (Phoenix Contact, 2022b, S. 11). Die Prüfbedingungen sind in Anhang 11 aufgeführt, die Prüfergebnisse sind in Kapitel 4.1.1 dargelegt.

3.3.3 Prozessparameter bei der Anwendung im Spritzgießverfahren

Neben den Materialanalysen geben auch die Prozessparameter, wie die Dosierzeiten, der Einspritzdruck und das Massepolster, Kenntnis über die Materialqualität. Die Zähigkeit bzw. das Fließverhalten des Kunststoffes werden mit den Analysemethoden, die in Kapitel 3.3.1 beschrieben sind, bestimmt. Das Fließverhalten nimmt in diesem Fall unmittelbar Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und zeichnet sich in den Prozessdaten ab. Für einen einwandfreien Verarbeitungsprozess ist eine gleichbleibende Dosierzeit von hoher Bedeutung. Hinzu kommen die Druckverläufe, die in direkter Abhängigkeit von den Viskositäten stehen; so erzeugt eine geringe Viskosität einen geringen Einspritz-Druck. Für eine konstante Qualität und Verarbeitbarkeit ist dabei eine homogene Masse bzw. Durchmischung notwendig. Es muss sichergestellt sein, dass die Granulate sowohl rieselfähig sind als auch von der Schnecke eingezogen werden

können, um einen sicheren Prozess abzubilden (Baur et al., 2019, S. 536; Bonnet, 2016, S. 164–167), was vor allem bei den Mahlgütern durch die Mahlgutgeometrie beeinflusst werden kann. Die Siebanalyse gibt Aufschluss darüber, ob die Mahlgüter sowohl kleine staubähnliche Partikel als auch große Körnungen enthalten. Zudem beinhaltet das Mahlgut unterschiedliche Geometrien, wie Flakes bzw. Plättchen, runde Partikel oder auch Stäbe, die Einfluss auf die Dosierung und das Massepolster haben können. Die Prozessparameter sollen zeigen, ob auch aus den Rezyklaten werkstofflich gute Bauteile im Spritzgießverfahren hergestellt werden können. Für die Bewertung der Prozessparameter werden die Dosierzeit in Sekunden (s), der maximale Einspritzdruck in bar und das Rest-Massepolster in Kubikzentimetern (cm³) ausgewertet. Die genannten Parameter sind standardisierte Überwachungswerte im Spritzgießprozess und werden als Maschinenmessdaten erfasst. Die Prozessdaten wurden für die Zugstäbe, Stabprobekörper und die Gehäuse erfasst und werden in Kapitel 4 ausgewertet.

3.4 Validierungsverfahren zur Auswertung der Kunststoff-Rezyklat-Qualität

Um die Rezyklatqualität der einzelnen Kunststoffe zu bewerten, ist es notwendig ein geeignetes Bewertungsmodell heranzuziehen bzw. zu entwickeln. Da kein standardisiertes Verfahren für eine Bewertung von Kunststoffrezyklaten in der Elektroindustrie vorliegt, wird an dieser Stelle die Forschungsfrage aufgegriffen, wie ein geeignetes Validierungsverfahren aussehen kann, um die Qualität der Kunststoffrezyklate zu überprüfen und das Nutzungsziel zu erfüllen.

Als Anforderungen an ein solches Verfahren ist zu nennen, dass alle Prüfungen und Messungen aus der Versuchsreihe von Kapitel 3.3 abgebildet werden müssen. Als Methode eignet sich hier die Auswertung in Form einer Bewertungsmatrix. Eine Bewertungsmatrix kann dabei die unterschiedlichen Farben und Mischungsverhältnisse, sowie die einzelne Prüf- und Messergebnisse abbilden. Damit wird eine systematische Bewertung für alle Kunststofftypen sichergestellt. Um eine solche Bewertungsmatrix einzusetzen, werden im nachfolgenden die Bewertungskriterien entwickelt und festgelegt. Die Bewertungskriterien werden dabei wie folgt festgelegt:

- Ergebnis in Ordnung: ✓
- leichte Degradation: !
- vorangeschrittene Degradation: !!
- erhebliche Degradation: !!!
- Ergebnis nicht auswertbar: ?

Beschreibung der Versuchsreihe zur technischen Recyclingfähigkeit

Wenn das Ergebnis im festgelegten Toleranzbereich liegt bzw. nahezu mit dem Primärmaterial gleichzusetzen ist, dann wird das Ergebnis als in Ordnung bewertet. Die Ergebnisse, die auf die Degradation des Materials Bezug nehmen, sind hingegen in drei Stufen unterteilt. Dabei ist die erste Stufe ein Ausrufezeichen „!“ , das zeigt, dass eine leichte Degradation vorliegt, die zweite Stufe mit zwei Ausrufezeichen „!!“ zeigt, dass die Schädigung schon vorangeschritten ist und die drei Ausrufezeichen „!!!“ als letzte Stufe zeigen eine erhebliche Schädigung des Materials. Ein „?“ kommt dann zum Tragen, wenn keine Ergebnisse vorliegen bzw. diese nicht auswertbar waren. Für eine transparente und fundierte Entscheidungsfindung ist es zudem wichtig, die Werte für die jeweilige Einordnung innerhalb der Bewertungsmatrix festzulegen. Die Bewertungskriterien und deren Erläuterung sowie die Mindestkriterien sind in Tabelle 4 dargestellt

Tabelle 4: Bewertungskriterien für die Nutzung einer Bewertungsmatrix zur Validierung der Untersuchungsergebnisse (eigene Darstellung)

Prüf- / Messung	Bewertungskriterien					Bemerkung
	in Ordnung	leichte Degradation	vorangeschrittene Degradation	erhebliche Degradation	nicht auswertbar	
	✓	!	!!	!!!	?	
Feuchte	≤ max. VAF	> max. VAF bis ≤ max. VAF * 1,5	> max. VAF * 1,5 bis ≤ max. VAF * 2	> max. VAF * 2	keine Messergebnisse	VAF = Verarbeitungsfeuchte
Farbe	≤ OT	> OT bis ≤ OT * 1,5	> OT * 1,5 bis ≤ OT * 2	> OT * 2	keine Messergebnisse	OT = Obere Toleranz
Klimalagerung	keine Farbmigration	leichte Farbmigration	deutliche Farbmigration	deutliche Farbmigration und weitere Schädigungen	keine Messergebnisse	
Glührückstand	= SdH	SdH -1 %	SdH -2 %	> SdH -2 %	keine Messergebnisse	SdH= Spezifikation des Herstellers
Körnung	homogen und Größe ähnlich Granulat	Anteil < 1 mm und > 4mm 20 %	Anteil < 1 mm und > 4mm > 20% bis ≤ 30%	Anteil < 1 mm und > 4mm > 30%	Kein Ergebnisse	
VZ / MVR	≤ OT und ≥ UT	OT/UT * 1,5	> OT/UT * 1,5 bis ≤ OT/UT * 2	> OT/UT * 2		OT = Obere Toleranz UT = Unter Toleranz
rheometrische Analyse	Viskositätskurve nahezu gleich mit Referenzkurve	leichte Veränderung der Viskositätskurve	sichtbare Veränderung der Viskositätskurve	erhebliche Veränderung der Viskositätskurve	keine Messergebnisse/nicht auswertbar	
Zugprüfung	RP ± 5%	≥ ± 5 % bis ± 15% von RP	≥ ± 15% bis ± 25% von RP	≥ ± 25% von RP oder Bruch	nicht interpretierbar	RWH = Referenzwert Hersteller RP = Referenzprobe
Kerbschlag	RP ± 5%	≥ ± 5 % bis ± 15% von RP	≥ ± 15% bis ± 25% von RP	≥ ± 25% von RP oder Bruch	nicht interpretierbar	RP = Referenzprobe
Bruchprüfung	0 Brüche	1 Bruch	2 bis 5 Brüche	> 5 Brüche		10 Bauteilen
Dosierzeiten	gleichbleibende Dosierzeit	leichte Veränderung	sichtbare Veränderung	starke Schwankungen	keine Prozessdaten	
Einspritzdruck	gleichbleibender Druck	leichte Veränderung	sichtbare Veränderung	starke Schwankungen	keine Prozessdaten	
Massepolster	Stabiles Massepolster	leichte Veränderung	sichtbare Veränderung	starke Schwankungen	keine Prozessdaten	

4 Bewertung der technischen Recyclingfähigkeit im Modellverfahren

In Kapitel 2 und 3 wurden die relevanten Kunststoffgruppen für die Elektroindustrie ermittelt und die Vorgehensweisen für die Charakterisierung, Aufbereitung und Untersuchung beschrieben. In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse zeigen, inwieweit die einzelne Kunststoffgruppen recyclingfähig sind. Der Fokus dieses Kapitels liegt auf der Recyclingfähigkeit innerhalb der Elektroindustrie. Dabei wird angestrebt, ein möglichst hohes Recyclingpotenzial technisch nachzuweisen, um mehr Kunststoffkreisläufe innerhalb einer Produktion bzw. eines Industrieunternehmens zu schließen. Um die technische Recyclingfähigkeit für die fünf ausgewählten Kunststoffgruppen zu bewerten, wurde im Rahmen dieser Dissertation eine Vielzahl technischer Prüfungen durchgeführt und erörtert. In diesem Kapitel findet die abschließende Bewertung der technischen Recyclingfähigkeit statt. Hierzu werden in Unterkapitel 4.1 die Einzeluntersuchungen für den jeweiligen Kunststoff aufgezeigt und bewertet. Abschließend wird in Unterkapitel 4.2 ein Fazit der Untersuchungen gezogen, indem dargelegt wird, welche Kunststoffe unter welchen Recyclingbedingungen für die Wiederverwendung als Sekundärrohstoff geeignet sind.

4.1 Eignung der einzelnen Kunststoffrezyklate: Ergebnisse und Diskussion

In diesem Unterabschnitt werden die Ergebnisse der Materialanalysen und der Untersuchung der Probekörper zusammengefasst. Dabei werden die Untersuchungen der Materialien PA 6.6, PBT, PC, LCP und TPU detailliert beschrieben. Um einen umfassenden Überblick über die Ergebnisse zu erhalten, wird zu Beginn jedes Abschnitts eine vollständige Darstellung der Resultate gemäß dem Bewertungsschema aus Kapitel 3.4 präsentiert. Die detaillierten Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen werden anschließend in den entsprechenden Unterkapitel dargestellt.

4.1.1 Versuchsreihe 1: Polyamid (PA 6.6)

Für die Versuchsreihe der Polyamide wurde das Material PA 6.6 festgelegt und es wurden drei Farbvarianten herangezogen. In diesem Fall handelt es sich um das Material PA 6.6 in Schwarz, Grau und Orange. Die Kunststoffeigenschaften der Polyamide wurden in Unterkapitel 3.2.1 beschrieben. Wie einleitend beschrieben, werden für diese Untersuchungsreihe die Ergebnisse anhand einer Bewertungsmatrix zusammengefügt und bewertet. Die Bewertungsmatrix für das PA 6.6 in Tabelle 5 verdeutlicht, dass eine Vielzahl der Prüfungen mit einem positiven Ergebnis abgeschlossen wurden. Die Analysen belegen, dass sowohl das Mahlgut als auch das Regranulat für den weiteren Einsatz im Spritzgussprozess grundsätzlich geeignet sind. Allerdings gibt es bei dem Einsatz des Mahlgutes und Regranulats bestimmte Parameter, die beachtet werden müssen; so weist das Mahlgut keine gleichbleibende Geometrie auf und auch die Viskositätsmessung mittels HKR legen einige Schwierigkeiten beim Mahlgut offen,

sodass grundsätzlich die Annahme getätigt werden kann, dass das Mahlgut undefinierbare Prozessschwankungen hervorrufen kann und damit die Produktionsabläufe schwieriger planbar machen sowie Ausfälle nicht ausgeschlossen werden können. Dieses belegen auch die Schwankungen der gemessenen Prozessdaten. Die Versuchsreihe der mechanischen Prüfung zeigen zudem, dass auch schon Materialschädigungen in dieser Verarbeitungsstufe vorliegen. Die Materialqualität und Verarbeitbarkeit kann aber durch das Beimischen von Primärmaterial positiv beeinflusst werden und so ist eine maximale Mahlgutmenge von 50 % für die Farben Schwarz und Grau möglich. Allerdings ist die inhomogene Mahlgutstruktur nicht außer Acht zu lassen und zeigt teilweise schon bei einem geringeren Einsatz von 25 % Prozessschwankungen in der Dosierzeit auf, so dass ein Einsatz von maximal 25 % empfohlen werden kann. Auch das Regranulat weist Materialschädigungen auf, die durch Beimischung von Primärmaterial positiv beeinflusst werden können. Aufgrund seiner Struktur ist das Regranulat zudem im Prozess besser zu verarbeiten, so dass an dieser Stelle technisch sogar ein Anteil von 50 % eingesetzt werden kann. Bei dem Einsatz des Regranulates ist jedoch darauf zu achten, dass eine maximale Beimischung von 50 % nicht überschritten wird, da sowohl die Untersuchungen zeigen, dass es zu Einschränkungen in der Materialqualität kommt, als auch die Zulassung der UL, wie in Kapitel 2 beschrieben, eine bedeutende Rolle spielt. Die Verwendung von Regranulat in der Elektroindustrie ist hierdurch, insbesondere bei Anwendungen, die eine UL-Zulassung erfordern, lediglich mit einer Sondergenehmigung realisierbar.

Tabelle 5: Bewertungsmatrix PA 6.6 – Proben 1.1, 1.2 & 1.3 (Quelle: eigene Darstellung)

Materialanalyse	PA 1.1						PA 1.2						PA 1.3					
	Mahlgut			Regranulat			Mahlgut			Regranulat			Mahlgut			Regranulat		
Feuchte	!!!			!!			!!!			✓			!!!			✓		
Farbe	✓			✓			✓			!			!!!			!!!		
Farbe (Beimischung)	-			-			-			✓			-			-		
UV-Lagerung	✓			✓			✓			!			!!!			!!!		
Klimalagerung	✓			✓			✓			✓			✓			✓		
Glührückstand	-			-			-			-			-			-		
Körnung	!!			✓			!!			✓			!!			✓		
VZ	✓			✓			!			✓			✓			✓		
rheometrische Analyse	?						?						?					
mechanische Prüfung	25M/75	50M/50	100M	25R/75	50R/50	100R	25M/75	50M/50	100M	25R/75	50R/50	100R	25M/75	50M/50	100M	25R/75	50R/50	100R
Zugprüfung	✓	✓	!	✓	✓	!	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kerbschlag	✓	✓	✓	✓	!!!	!!!	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	!	✓	✓	✓	!!!
Bruchprüfung	✓	✓	!	✓	✓	!!	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Prozessdaten	25M/75	50M/50	100M	25R/75	50R/50	100R	25M/75	50M/50	100M	25R/75	50R/50	100R	25M/75	50M/50	100M	25R/75	50R/50	100R
Dosierzeiten	!!	✓	!!!	✓	✓	!	✓	✓	!	✓	✓	✓	✓	✓	!	!	✓	✓
Einspritzdruck	✓	✓	!	✓	!	!	✓	✓	!	✓	!	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Massepolster	✓	✓	!	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	!	!	✓	✓
Gesamtbewertung	!	!	!!	✓	✓	!!	✓	✓	!!	✓	✓	✓	!!	!!	!!	!!	!!	!!

4.1.1.1 Feuchtemessung

Als erste Analyse wurde die Feuchte bei den Mahlgütern und Regranulaten gemessen. Dabei zeigen die Ergebnisse, die in Tabelle 6 dargestellt sind, dass vor allem das Mahlgut einen erhöhten Feuchtegehalt aufweist. Dieser liegt beim Mahlgut mit bis zu 2,08 % nahezu an der Sättigung der Feuchteaufnahme, die gemäß der Herstellerangabe bei 2,1 % liegt. Der hohe Feuchtegehalt führt zu einem Mehraufwand für die Trocknung, der sich sowohl in langen Trocknungszeiten als auch erhöhtem Energiebedarf für den Einsatz der Trockenlufttrockner widerspiegeln kann. Aufgrund des hohen Feuchtegehalts sind die Mahlgüter in den gegenwärtigen Prozessabläufen kaum einzusetzen. Für die Herstellung der Farbmusterplatten und Probekörper, die für diese Arbeit im Spitzgießverfahren hergestellt wurden, wurden alle Materialien auf die maximale Verarbeitungsfeuchte aus den Herstellerangaben eingestellt. Die Trocknungszeiten lagen dabei bei bis zu 20 Stunden und sind somit um das 2,5-Fache höher als die empfohlenen Trocknungszeiten. Bei dem Regranulat zeigt nur eine von drei Proben (Probe 1.1) einen erhöhten Feuchtegehalt, der zu einer Trocknungszeit über der empfohlenen Zeit des Herstellers führt. Die hohe Feuchtigkeit in den Kunststoffproben ist vor allem dadurch zu begründen, dass die Kunststoffabfälle im eigenen Unternehmen und beim Recyclingunternehmen offen an der Luft in Lagerhallen ohne definierte Raumfeuchte gelagert wurden. Bedingt durch die offene Lagerung in Oktabins und einer Luftfeuchte bei der Lagerung bis zu 60 % wird Feuchtigkeit vom Kunststoffabfall aufgenommen. Um den Produktionsablauf bei einem möglichen Einsatz des Mahlgutes oder Regranulates durch die Vortrocknung nicht zu stark zu beeinflussen, ist ein Lösungsansatz, dass die Lagerung in luftdicht verschlossenen Behältern erfolgt oder dass das Mahlgut in der laufenden Fertigung direkt wieder zurückgeführt wird.

Tabelle 6: Feuchtegehalte und Trocknungszeiten, PA 6.6 (Quelle: eigene Darstellung)

Probe	Feuchtegehalt Probe [%]	max. Verarbeitungsfeuchte [%]	Trocknungszeiten bis zur Verarbeitungsfeuchte [h]	empfohlene Trocknungszeit [h]
1.1-G	0,109*	0,150	–	4–8
1.1-M	2,080	0,150	17	4–8
1.1-R	0,483	0,150	11	4–8
1.2-G	0,098*	0,150	–	4–8
1.2-M	1,543	0,150	18	4–8
1.2-R	0,155	0,150	4	4–8
1.3-G	0,096*	0,150	–	4–8
1.3-M	1,817	0,150	20	4–8
1.3-R	0,231	0,150	4	4–8

* = Ø aus Einzellieferungen aller verarbeiteten Chargen

4.1.1.2 Farbmessung

An den Farbmusterplatten wurden im nächsten Schritt Farbmessungen durchgeführt. Dabei ist, wie in Kapitel 3.3.1 und Anhang 2 beschrieben die obere Toleranz (OT) für das PA 6.6 in Schwarz mit $dE_{\text{max zul.}} = 1,06$, in Grau mit $dE_{\text{max zul.}} = 0,75$ und in Orange mit $dE_{\text{max zul.}} = 1,73$ festgesetzt. Die oberen Toleranzwerte sind unternehmensintern festgelegt und spiegeln

Erfahrungswerte wider, die darlegen, dass kein sichtbarer Unterschied zu erkennen ist und die Bauteile somit dem Qualitätsanspruch erfüllen. Die Ergebnisse der Farbmessungen in Abbildung 5 zeigen, dass das Mahlgut und Regranulat in Schwarz (Probe 1.1) keine Farbunterschiede zum Granulat aufweisen. Auch das Mahlgut in Grau (Probe 1.2) zeigt keinen Unterschied, jedoch liegt das Regranulat in Grau über dem Toleranzbereich. Das PA 6.6 in Orange (Probe 1.3) liegt hingegen sowohl bei dem Mahlgut als auch bei dem Regranulat weit oberhalb des Grenzwertes.

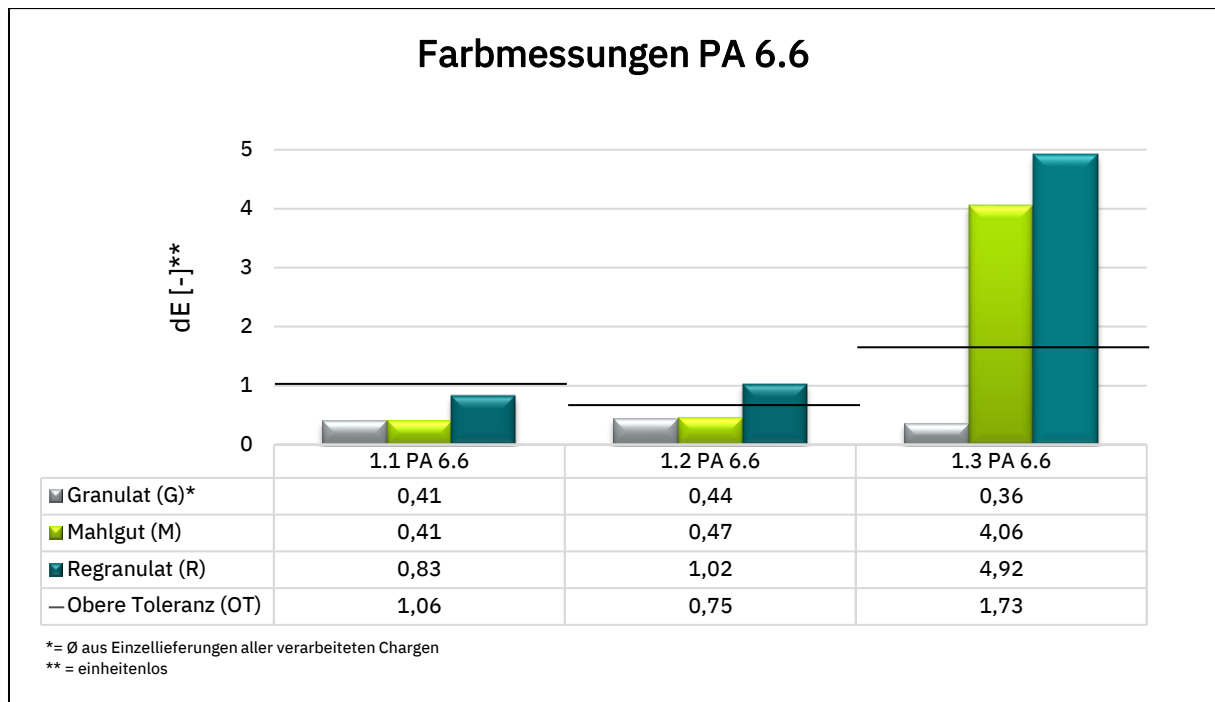


Abbildung 5: Farbmessungen PA 6.6 (Quelle: eigene Darstellung)

Inwieweit die Rezyklate, bei denen die Farbewerte nicht eingehalten werden konnten, für den Einsatz in der Elektroindustrie geeignet sind, sollen Nachuntersuchungen mit einer Beimischung von Primärmaterial gemäß der Beimischungsform aus Unterkapitel 3.3.2 zeigen. So werden für eine Nachfolgeuntersuchung, in Anlehnung an die Untersuchung der Probekörper, die Mischungsverhältnisse mit 50 % und 75 % Primärmaterial für die Farbmusterplatten eingesetzt. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis für das Regranulat in Grau. Eine Nachmessung der Farbe Orange war nicht möglich, da während der Forschungszeit ein unternehmensinterner Farbwechsel des PA 6.6 Orange stattgefunden hat. Eine Beimischung mit dem Primärmaterial in der neuen Farbe Orange war somit technisch nicht umsetzbar, da das Material in einem anderen Farbspektrum liegt und die gemessenen Spektralkurven nicht miteinander vergleichbar sind, sodass eine Umrechnung auf einen Farbwert nach ΔE nicht möglich ist. Die Beimischung des Primärmaterials in Grau zeigt positiven Einfluss auf die Farbe; so kann die gewünschte Farbe schon bei einer Beimischung von 50 % Granulat erreicht werden. Bei einer Beimischung von 75 % Granulat wird sogar nahezu der Farbwert des Primärmaterials erreicht.

Mit dieser Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass auch das Regranulat für einen anteiligen Einsatz zur Herstellung neuer Produkte geeignet ist. Für das Material in Orange ist aufgrund der angegebenen Gründe keine Aussage über die Beimischung zu treffen. Die erste Untersuchung zeigt allerdings, dass der Farbbau vorangeschritten ist und die Grenzwerte überschritten werden.

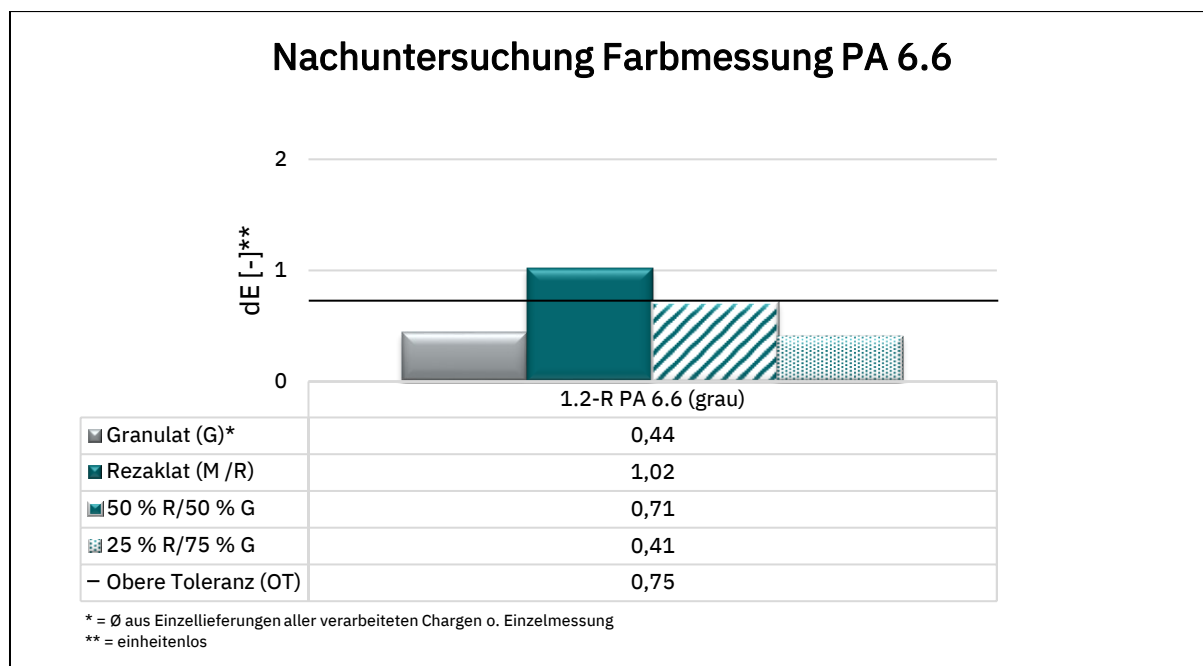


Abbildung 6: Nachuntersuchung Farbmessung PA 6.6 (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.1.3 UV-Lagerung und Klimalagerung

Für die weiteren Untersuchung werden die Farbmusterplatten einer UV-Lagerung und Klimalagerung ausgesetzt. Daraufhin werden die Farbmusterplatten auf eine mögliche Farbmigration hin überprüft und eine weitere Farbmessung wird durchgeführt. In Abbildung 7 werden beispielhaft die Farbmusterplatten des PA 6.6 Mahlgutes in Schwarz dargestellt. Die Farbmusterplatte ist nach der UV-Lagerung leicht heller, zeigt aber keine wesentliche Migration. Bei der Klimalagerung hingegen ist eine Migration (unterer Teil der Farbmusterplatte) zu erkennen; diese ist abwischbar (oberer Teil der Farbmusterplatte). Bei der Migration von Additiven ist bedeutsam, ob die Ablagerungen, die auf der Oberfläche entstehen, Farbpigmente enthalten. Hierbei wird mit einem Tuch die Migration abgewischt und optisch überprüft, ob eine Farbmigration stattgefunden hat und Farbpigmente auf dem Tuch haften bleiben. Eine Farbmigration kann dazu führen, dass sich Farbe ablöst und sich z. B. auf die Haut überträgt. Dieser Effekt soll möglichst vermindern werden und ist ein Qualitätskriterium. Eine regulatorische Begrenzung der eingesetzten Stoffe findet im Vorfeld bei der Herstellung der Kunststoffe statt und wird an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Die UV-Lagerungen und Klimalagerungen ergaben bei allen PA 6.6 Materialien keine Ausmigration der Farbe. Das Qualitätsmerkmal in

Bezug auf die Farbmigration kann somit bei allen Proben als erfüllt angesehen werden. Allerdings ist die Migration von Additiven grundsätzlich nicht außer Acht zu lassen, da ein Einfluss auf die Bauteil-Qualität nicht ausgeschlossen werden kann. Da dieser Effekt hingegen auch bei den Primärmaterialien zu beobachten ist, findet keine gesonderte Bewertung der Sekundärmaterialien statt.

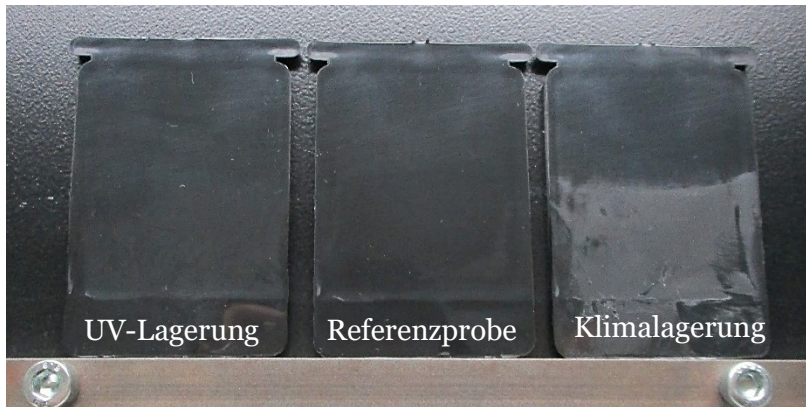


Abbildung 7: Farbmusterplatten nach UV-Lagerung und Klimalagerung, PA 6.6 Mahlgut (Quelle: eigene Darstellung)

Weiterhin wurden wie beschrieben, nach der UV-Lagerung Farbmessungen durchgeführt, die Aufschluss darüber geben, inwieweit mögliche Stabilisatoren im Kunststoffverbrauch sind (s. Abbildung 8).

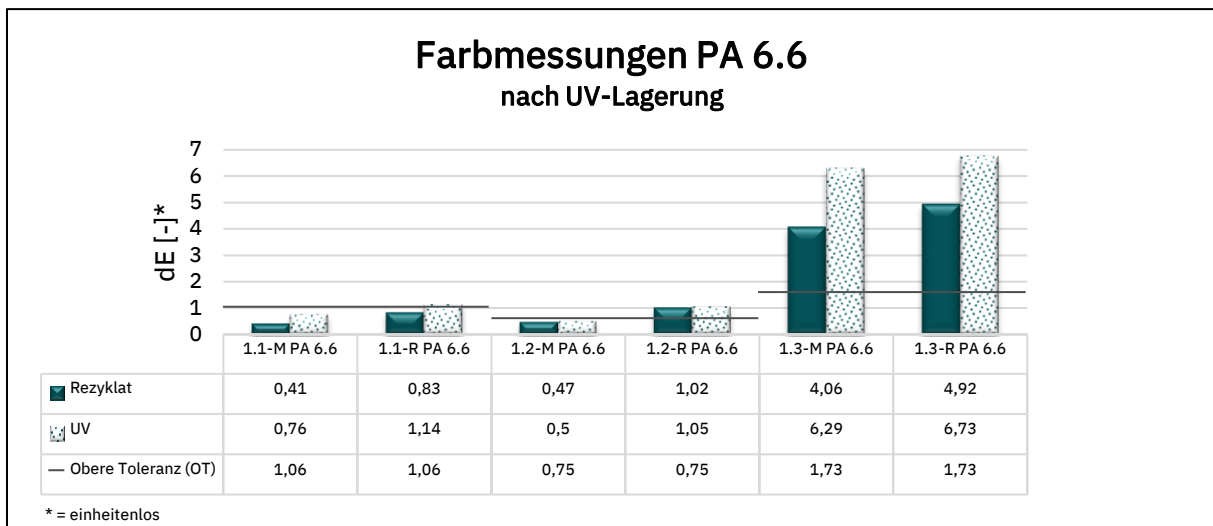


Abbildung 8: Farbmessungen PA 6.6 nach der UV-Lagerung (Quelle: eigene Darstellung)

Nach der UV-Lagerung ist bei dem Mahlgut und Regranulat in Orange ein deutlicher Farbumschlag zu erkennen. Der Farbumschlag zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass die Farbe nicht mehr so kräftig ist und augenscheinlich eher ausgebleichen scheint. In diesen Fällen gibt es eine deutliche Abweichung im Vergleich zum Bezugswert im L*-Wert, der die Helligkeit angibt, im a*-Wert, der den Rotanteil angibt und auch im b*-Wert, der den Gelbwert angibt. Als

Differenz zum Bezugswert (dL^* , da^* , db^*) ist ein Wert von ± 1 akzeptabel. Wie Tabelle 7 zeigt, liegen alle Werte allerdings deutlich über ± 1 , so dass auf Basis dieser Ergebnisse keine geeignete Farbqualität beim Orange nachgewiesen werden konnte.

Tabelle 7: Messwerte Farbsystem nach UV-Lagerung, PA 6.6

Farbsystem CIELAB76	Bezug Lichtart D65	Messwert nach UV-Lagerung	
		1.3-M PA 6.6	1.3-R PA 6.6
L*	64,79	68,14	68,44
a*	37,82	33,48	33,10
b*	51,00	47,96	47,90
dL*	-	3,39	3,66
da*	-	-4,34	-4,73
db*	-	-3,05	-3,10

4.1.1.4 Messung des Glührückstands

Eine weitere Analyse aus dem Prüfplan ist die Messung des Glührückstandes. Eine Messung des Glührückstandes ist für die PA 6.6 Materialien allerdings nicht relevant und wurde nicht durchgeführt, da die in dieser Arbeit untersuchten Materialien nicht als glasfaserverstärkte Materialien vorliegen.

4.1.1.5 Messung der Korngröße

Als weitere Untersuchung wurde die Messung der Korngrößen mittels einer Siebanalyse durchgeführt. Diese wurde ausschließlich für die Mahlgüter angewandt, da die Granulate sowie die Regranulate in spezifischer Form und homogener Struktur vorliegen und sich nur unwesentlich unterscheiden. Für die Untersuchung der Korngrößenverteilung wurden die extern aufbereiteten Mahlgütern (Probe 1.1, 1.2 und 1.3) aus dieser Arbeit mit internen hergestellten Mahlgütern verglichen. Wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, soll dieser Vergleich Aufschluss darüber geben, ob eine zentrale Herstellung des Mahlgutes für den Einsatz im Produktionsprozess besser geeignet ist. Die Verteilungskurven in Abbildung 9 zeigen eine vergleichbare Korngrößenverteilung über alle extern aufbereiteten Mahlgüter hinweg, wobei die Ausgangsmaterialien, bedingt durch die unterschiedliche Anguss- und Ausschussgeometrie, keine Homogenität aufwiesen. Auch die Referenzproben, bei denen intern aufbereitete Mahlgüter für die Siebanalysen genutzt wurden, zeigen in sich ein sehr ähnliches Bild der Korngrößenverteilung. Vergleicht man allerdings die externen Mahlgüter mit den internen Mahlgütern, wird ein deutlicher Unterschied der Korngrößenverteilung ersichtlich. Die externen Proben zeigen eine insgesamt flachere Verteilung der Korngrößen. Diese Verteilung zeigt, dass der Anteil an kleinen Körnungen < 1 mm und großen Körnungen > 4 mm insgesamt größer ist als bei den intern hergestellten Mahlgütern.

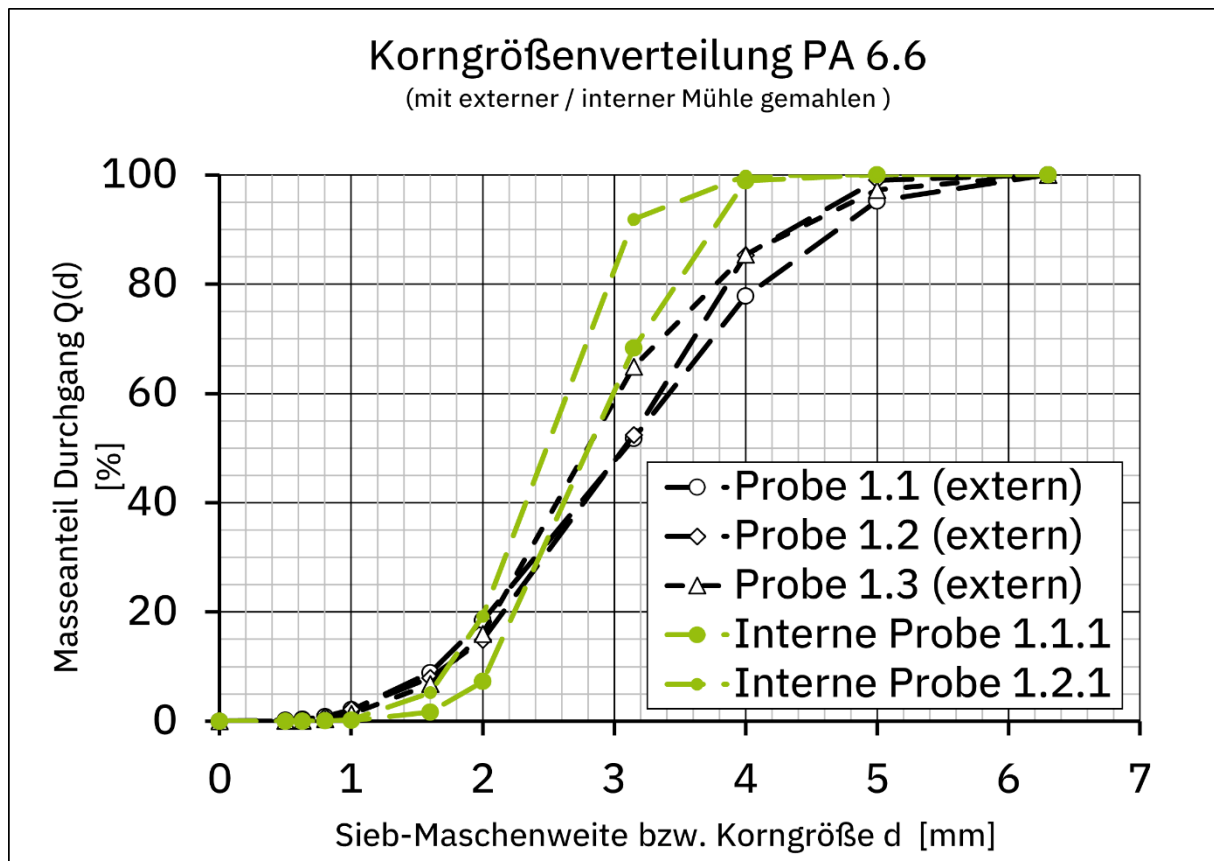


Abbildung 9: Korngrößenverteilung PA 6.6 (Quelle: eigene Darstellung)

Die vorangegangene Einschätzung, dass der Anteil der kleineren und größeren Körnung bei den externen Mahlgütern höher ist, zeigt auch die grafische Darstellung in Abbildung 10. Hier wird der Massenanteil < 1 mm und > 4 mm gegenübergestellt. Die drei extern aufbereiteten Proben zeigen einen deutlich größeren Bereich bzw. Anteil als die intern aufbereiteten. Das extern aufbereitete Mahlgut ist nach jetzigem Kenntnisstand schlechter geeignet, da die Verteilung zu breit ist. Für den Einsatz im Spritzgussprozess ist eine schmale Korngrößenverteilung besser geeignet; zudem ist bei einem großen Anteil < 1 mm und > 4 mm prozessabhängig nicht sichergestellt, dass die Körner verarbeitet werden können. So können in kleinen Schnecken beispielsweise keine oder nur schlecht Körner > 4 mm eingezogen werden. Aufgrund der Granulatgröße von $3 \pm 0,5$ mm ist auch eine Verschlechterung des Spritzgussprozesses durch die Beimischung von Mahlgütern mit einer breiten Korngrößen-Verteilung zu erwarten. Im Rahmen dieser Arbeit ist eine weitergehende Untersuchung aufgrund der technischen Möglichkeiten und des zeitlichen Rahmens nicht möglich, sodass empfohlen wird, bei dem möglichen Einsatz von Mahlgut eine nachgeschaltete Mahlgutanalyse und Untersuchung der Auswirkungen auf den Spritzgussprozess durchzuführen.

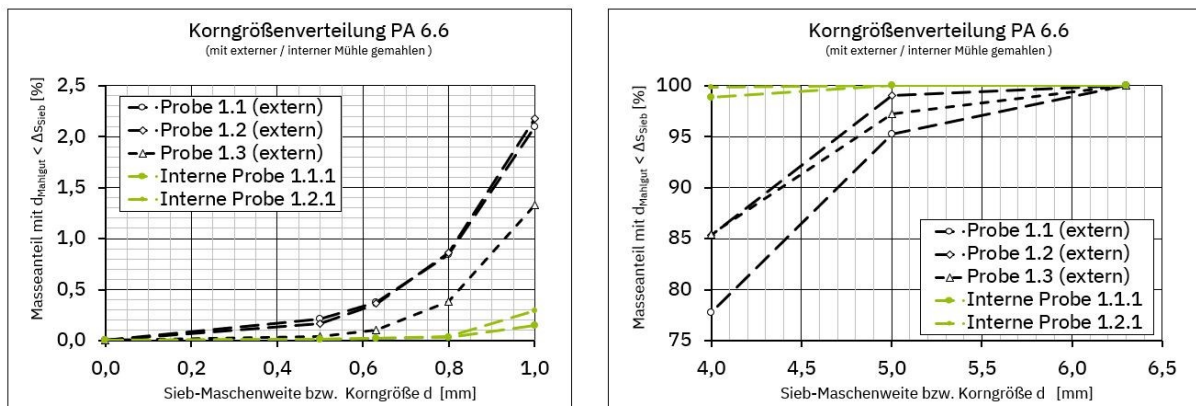


Abbildung 10: Korngrößenverteilung PA 6.6 < 1 / > 4 mm (Quelle: eigene Darstellung)

Zudem wurde aufgrund der nur eingeschränkten Aussagen der Massenverteilung das statistische Verteilungsmodell der Normalverteilung, die sogenannte Gaußsche Glockenkurve, eingesetzt, um die Messungen und die Verteilungen zu stützen. Hierzu wurden die Grunddaten genutzt und mithilfe der kumulierten Korngrößenverteilung wurde die Normalverteilung ermittelt sowie in ein Histogramm eingebracht (s. Abbildung 11). Die Normalverteilungs-Parameterwerte \bar{x} und s wurden dabei so ermittelt, dass die Fehlerquadrat-Summe der Stützstellen der kumulierten Normalverteilung minimal ist. Mit diesem Modell wird die Grundannahme belegt, dass die massenbezogene Korngrößenverteilung normalverteilt ist.

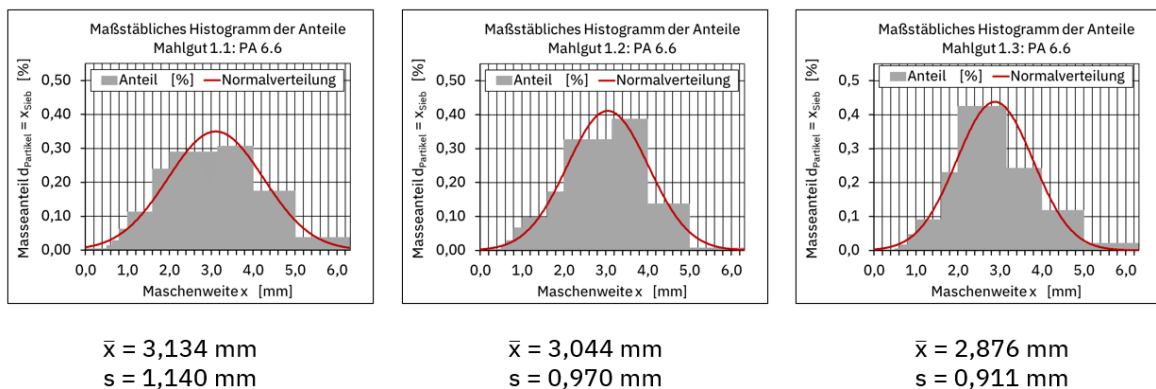


Abbildung 11: Histogramme inkl. Normalverteilungskurven am Beispiel PA 6.6 (Quelle: Phoenix Contact, 2023b)

4.1.1.6 Analyse des Fließverhaltens (Lösungsviskosität)

Eine weitere Materialuntersuchung ist die des Fließverhaltens. Bei den PA 6.6 Materialien wird die Lösungsviskosität untersucht. Die Untersuchung kann zum einen für die Eingangskontrolle, zum anderen auch zur Qualitätskontrolle – nach einer thermischen Schädigung und einem möglichen Kettenabbau – eingesetzt werden (Hellerich et al., 2010, S. 477). Die gemessenen Viskositätszahlen der drei Materialien waren, bis auf das Mahlgut der Probe 1.2 in Grau, durchweg im Toleranzbereich der Lösungsviskosität und zeigen nur geringfügig sinkende

Viskositätszahlen (s. Abbildung 13). Die positiven Messwerte lassen sowohl das Mahlgut als auch das Regranulat mit Neuware konkurrieren. Der untere Toleranzwert (UT) von 130 cm³/g gilt dabei für Primärkunststoffe. Bei einem Rezyklat, das zum Primärmaterial anteilig beige-mischt wird, wird auf Basis von Erfahrungswerten bei Phoenix Contact ein UT von 125 cm³/g angenommen. Qualitätsmessungen innerhalb der Kreislaufführung von Mahlgütern im Produktionsprozess haben gezeigt, dass es nicht ungewöhnlich ist, dass Mahlgüter unterhalb des Grenzwertes von 130 cm³/g liegen. Bei einer Beimischung von Mahlgütern zum Frischgranulat, bei denen eine VZ bis 125 cm³/g gemessen wurde, ist die Verarbeitung im Produktionsprozess erfahrungsgemäß unproblematisch. Auf Basis dieser Erfahrungswert wird auch das PA 6.6 in grau für eine Beimischung als geeignet angesehen.

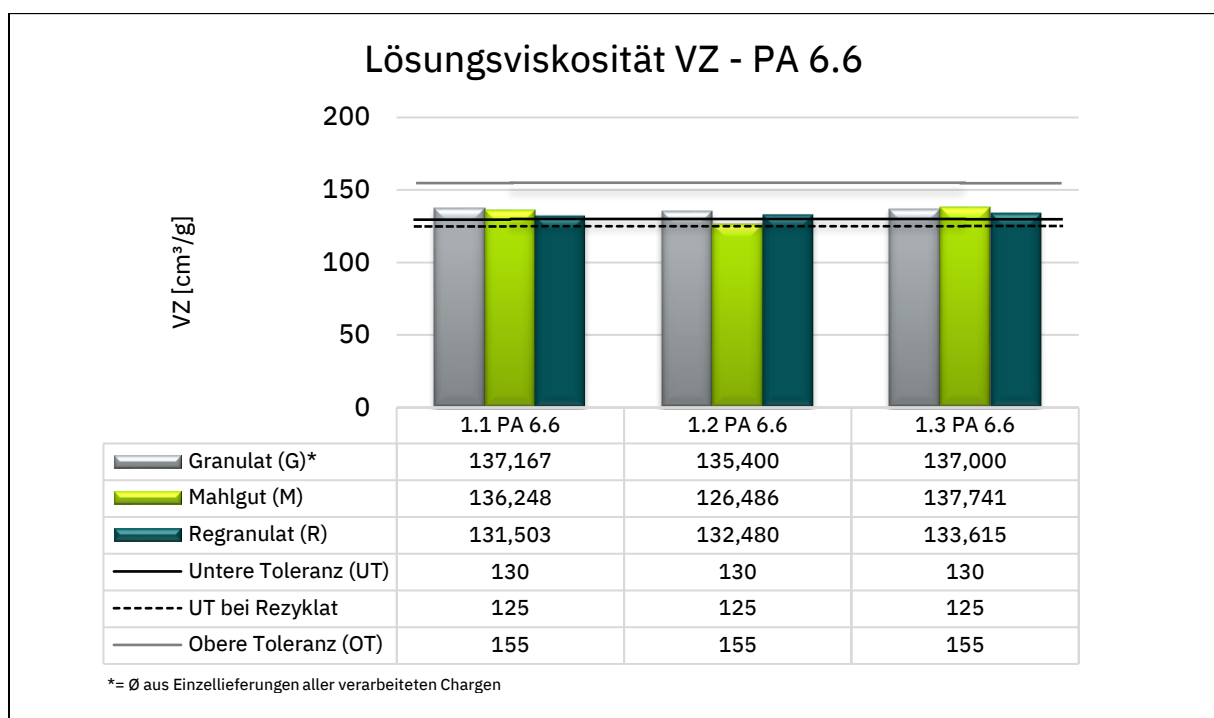


Abbildung 12: Lösungsviskosität PA 6.6 (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.1.7 Analyse des Fließverhaltens (Hochdruck-Kapillarrheometrie)

Um die Einzelmessungen der Lösungsviskosität weiter zu stützen, wurde im nächsten Schritt eine ganzheitliche rheometrische Analyse durchgeführt. Die Messungen des PA 6.6 wurden dabei auf vier Schergeschwindigkeiten begrenzt, da eine Durchführung mit fünf Messpunkten technisch nicht möglich war. Das Material zeigte immer wieder ein unerwartetes Schmelzverhalten; so schäumte das PA 6.6 während der Versuche immer wieder auf, sodass eine Messung nicht möglich war (IKV, 2023b, S. 13). Die Vermutung, dass das Material nicht genug getrocknet wurde, konnte nach mehrfachen Messungen ausgeschlossen werden, sodass als eine mögliche Ursache Additive, wie Flammschutzmittel, in Betracht kommen. Die Additive würden in

diesem Fall bei zu hohen Schergeschwindigkeiten austreten und das Schäumen verursachen. Bei Probe 1.3 waren beim Mahlgut sogar gar keine Messungen möglich.

Auf Basis der vorliegenden Messpunkte wurden daraufhin Viskositätskurven abgeleitet, weiterhin wurden der Carrau-Ansatz zur Approximation der Messwerte verwendet und in Viskositätskurven dargestellt. Die Viskositätskurven der Messungen und der Berechnungen sind in den Abbildungen 14 bis 16 dargestellt. Die rheometrische Charakterisierung ist für die weitere Betrachtung allerdings nicht aussagekräftig. Der Unterschied zwischen dem Mahlgut und dem Regranulat bei den jeweiligen Materialien ist nicht zu interpretieren. Bei einer Materialschädigung würde es zu einer sinkenden Viskosität kommen, da das Regranulat gegenüber dem Mahlgut einen weiteren Aufschmelzprozess erfahren hat. Die Proben 1.1 und 1.2 zeigen demgegenüber bei dem Regranulat eine höhere Viskosität als das Mahlgut, auch bei Probe 1.3 ist das Regranulat fast identisch mit dem Granulat.

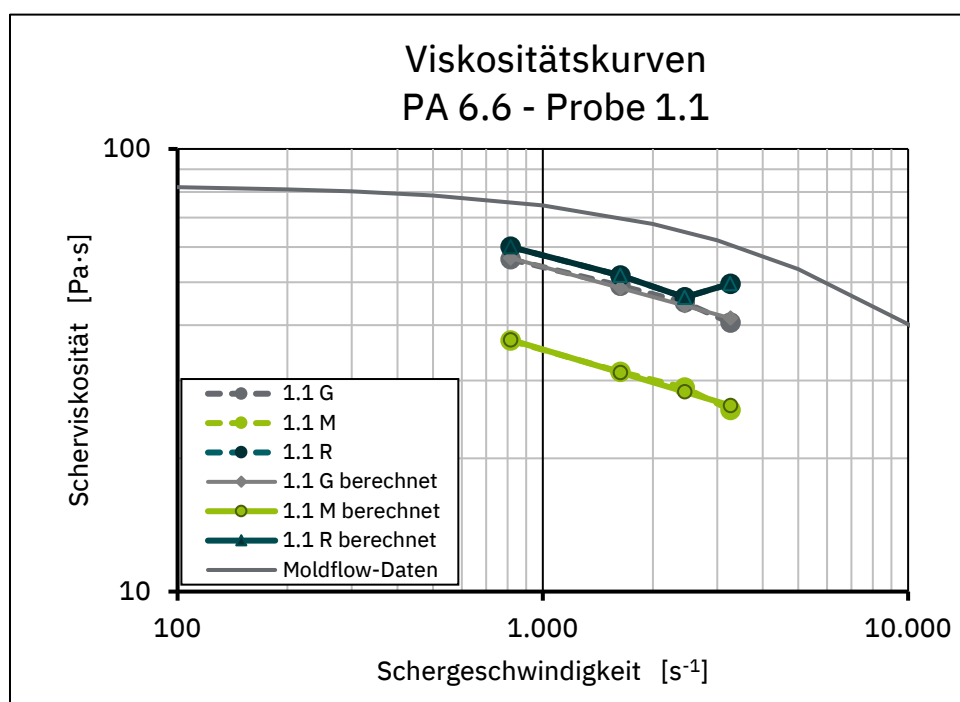


Abbildung 13: Viskositätsmodell PA 6.6, Probe 1.1 (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an IKV, 2023b)

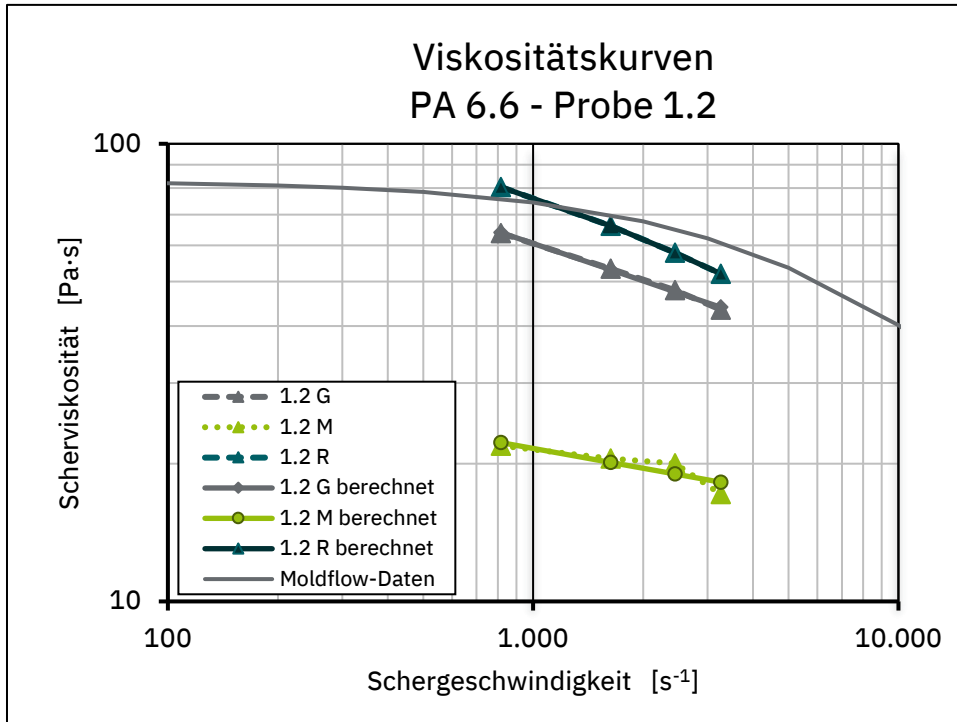


Abbildung 14: Viskositätsmodell PA 6.6, Probe 1.2 (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an IKV, 2023b)

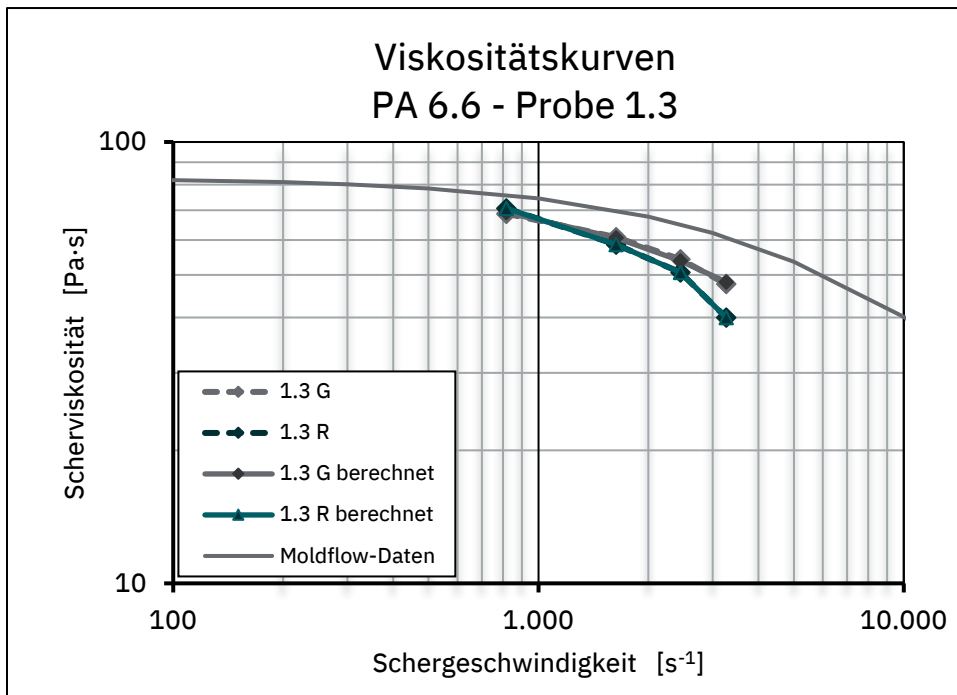


Abbildung 15: Viskositätsmodell PA 6.6, Probe 1.2 (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an IKV, 2023b)

4.1.1.8 Zugversuche (E-Modul, Zugfestigkeit)

Neben den aufgezeigten Voranalysen der Materialien wurden, wie in Unterkapitel 3.3.2 beschrieben, Probekörper hergestellt, um die Materialeigenschaften nach der Verarbeitung und mit unterschiedlichen Rezyklatanteilen zu prüfen. Die Zugprüfungen sollen dabei Aufschluss über die Steifigkeit (E-Modul) und die Zugfestigkeit der Materialien geben. Die Ergebnisse der Mahlgüter und Regranulate werden jeweils mit dem Granulat und den Referenzwerten des Herstellers aus den Datenblättern verglichen und sind in Tabelle 8 dargestellt. Das Primärmaterial, das als 100%-Granulatprobe herangezogen wurde, entstammt einer anderen Charge als das Recyclingmaterial, sodass Chargenschwankungen nicht auszuschließen sind, die aber für die weiteren Vergleiche mit den Rezyklaten zu vernachlässigen sind.

Tabelle 8: Ergebnisse der Zugprüfungen, PA 6.6 (Quelle: eigene Darstellung)

Probe	Referenzwert Hersteller	Zugmodul – E-Modul [MPa] nach ISO 527-1*			Zugfestigkeit – σ_M [MPa] nach ISO 527-1*		
		G	M	R	G	M	R
1.1 (PA 6.6)	3500	3563	3623	3701	73	79	79
1.2 (PA 6.6)	3500	3664	3718	3678	83	85	84
1.3 (PA 6.6)	3500	3660	3716	3689	83	86	84

* \bar{x} = 5 Messungen

Bei dem Primärmaterial konnte näherungsweise ein E-Modul erreicht werden, das den Herstellerangaben entspricht. Eine einheitliche Abnahme des E-Moduls ist jedoch nicht bei allen Materialien in den Recyclingstufen Mahlgut und Regranulat zu erkennen. Bei der Zugfestigkeit zeigt sich ebenfalls kein einheitliches Bild, sodass eine übergeordnete Interpretation der Ergebnisse auch an dieser Stelle nicht möglich ist. Wie in Tabelle 8 dargelegt, liegen allerdings sowohl die Zugmodule als auch die Zugfestigkeit nahe der Herstellerangaben und der Referenzmessung. Bei dem Einsatz von 100 % Mahlgut oder Regranulat der Materialien 1.1, 1.2 und 1.3 sinkt bzw. steigt die Steifigkeit (E-Modul) gegenüber dem Primärmaterial um ca. 2 %. Die Zugfestigkeit verändert sich um <4 %. Der Einsatz und die Beimischung von Rezyklaten beeinträchtigen die Zug-Eigenschaften somit bei diesen Materialien nicht nennenswert.

4.1.1.9 Kerbschlagbiegeprüfung

Des Weiteren wurde als zweite mechanische Prüfung die Kerbschlagbiegeprüfung durchgeführt. Dabei zeigen die Versuchsreihen, dass das Mahlgut und das Regranulat keine Verringerung der Schlagzähigkeit aufweisen (s. Abbildung 16-18). Das Regranulat von der Proben 1.1 zeigt bei 50%er und bei Probe 1.1 und 1.3 bei 100%er Beimischung sogar eine höhere Schlagzähigkeit auf. Die Zunahme der Schlagzähigkeit lässt auf einen Aufbau der Orientierungsstrukturen des teilkristallinen Kunststoffes schließen (Baur et al., 2019, S. 17–18). Die Zunahme der Schlagzähigkeit hat für die Anwendung der Bauteile in der Elektroindustrie keinen wesentlichen Einfluss, so dass in diesem Fall nichts gegen einen Einsatz der Rezyklate spricht. Die Einzelbetrachtung der Messwerte zeigt zudem keine signifikanten Unterschiede. Um die Interpretation der Messwerte zu stützen und eine Beurteilung des arithmetischen Mittels zu gewährleisten, wurde gemäß der Empfehlung zu den statistischen Größen der DIN EN ISO 179-1 auch die einfache Standardabweichung aufgeführt. Dabei sind Standardabweichungen >1 nur bei Probe 1.1 zu erkennen.

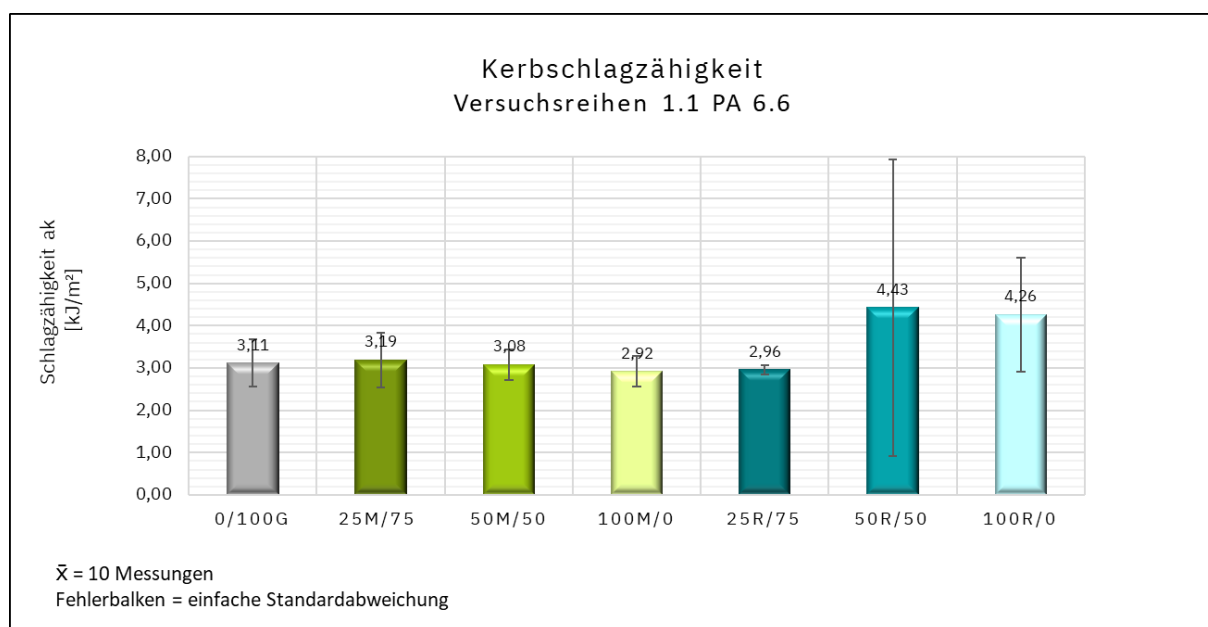


Abbildung 16: Kerbschlagzähigkeit PA 6.6, Probe 1.1 (Quelle: eigene Darstellung)

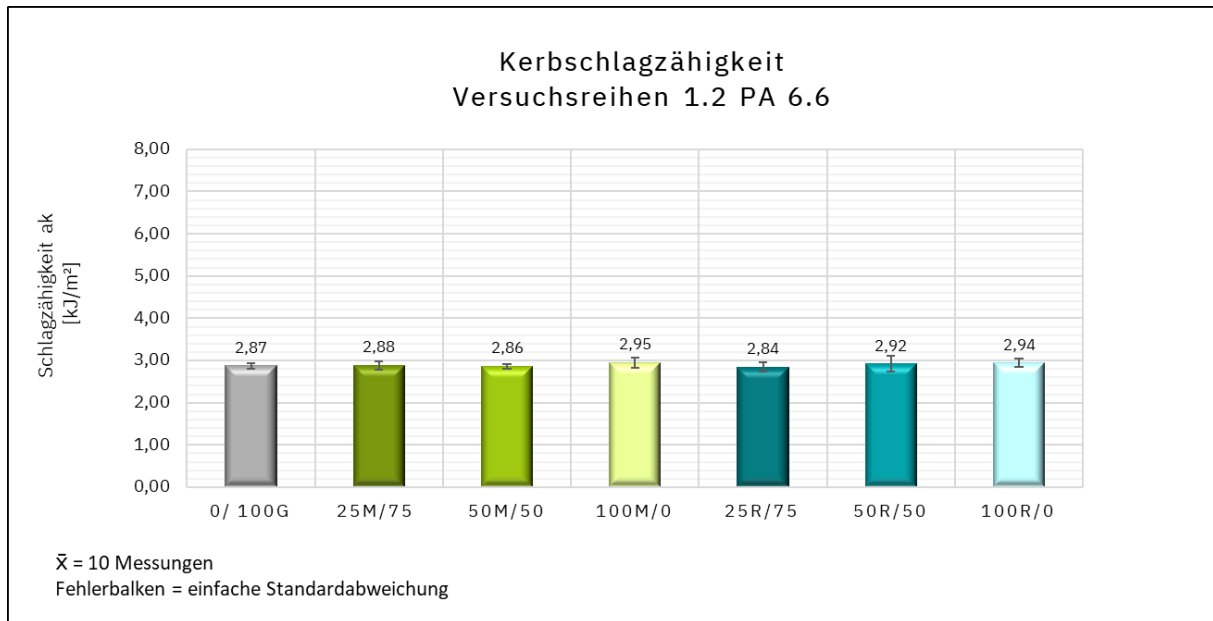


Abbildung 17: Kerbschlagzähigkeit PA 6.6, Probe 1.2 (Quelle: eigene Darstellung)

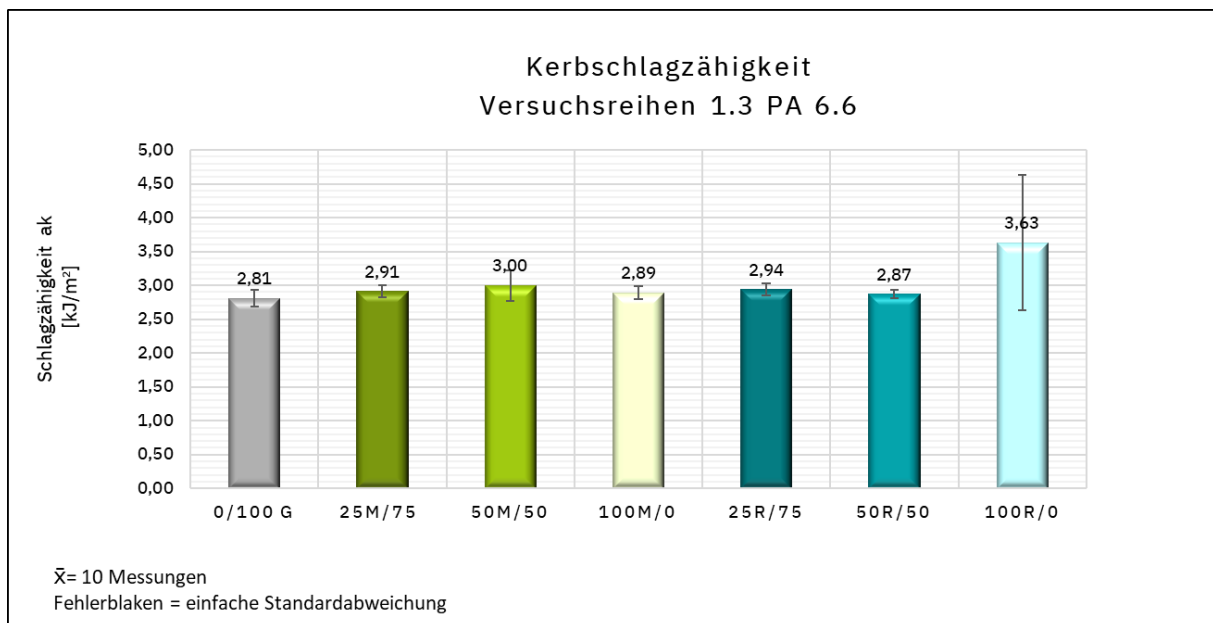


Abbildung 18: Kerbschlagzähigkeit PA 6.6, Probe 1.3 (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.1.10 Bauteilprüfung

Neben den standardisierten Prüfungen wurde, wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, für das PA 6.6 zusätzlich eine interne Bruchprüfung durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Prüfung sind in Tabelle 9 dargestellt. Bei dem Einsatz von 100 % Mahlgut trat bei dem PA 6.6 in Schwarz (Probe 1.1) ein Bruch je Versuchsreihe auf. Des Weiteren brachen bis zu 5 Bauteilen bei dem Einsatz von 100 % Regranulat; hier brach ein Teil der Bauteile schon beim Aufrasten auf die Schiene und weitere Füße brachen beim Abrasten ab. Das PA 6.6 in Grau und Orange (Probe 1.2 & 1.3) zeigten indessen eine Nullfehlerquote bei allen sieben Mischungen. Aufgrund der Fehlerquote beim reinen Mahlgut und Regranulat der Probe 1.1 ist der Einsatz von 100%igem Rezyklat nicht zu empfehlen, da ein Bruch der Bauteile nicht ausgeschlossen werden kann.

Tabelle 9: Auswertung Bruchversuche, PA 6.6 (Quelle: eigene Darstellung)

		Bruchversuche fehlerfreie Bauteile / geprüfte Bauteile [Stk./Stk.]						
Probe		0/100G	25M/75G	50M/50G	100M/0G	25R/75G	50R/50G	100R/0G
1.1 (PA 6.6)	1. Prüfung	10 ✓	10 ✓	10 ✓	9 / 10	10 ✓	10 ✓	6 / 10
	2. Prüfung	-	-	-	9 / 10	-	-	5 / 10
	3. Prüfung (35 mm)	-	-	-	9 / 10	-	-	10 ✓
1.2 (PA 6.6)	1. Prüfung	10 ✓	10 ✓	10 ✓	10 ✓	10 ✓	10 ✓	10 ✓
1.3 (PA 6.6)	1. Prüfung	10 ✓	10 ✓	10 ✓	10 ✓	10 ✓	10 ✓	

4.1.1.11 Prozessdaten

Zusätzlich zu den Materialdaten wurden, wie in Unterkapitel 3.3.3 beschrieben, die Prozessdaten aus der Herstellung der Probekörper analysiert und ausgewertet. Eine ganzheitliche Beurteilung der Prozessstabilität aller eingesetzten Beimischungsformen ist jedoch an dieser Stelle nicht möglich. Die Prozessdaten zeigen immer wieder unterschiedliche Schwankungen auf, stellen aber dem gegenüber bei vielen Herstellungsprozessen ein einheitliches Muster dar. Dieses spiegelt auch die unterschiedlichen Ergebnisse der einzelnen Material-Untersuchungen wider. Beispielfhaft ist für die Prozessdaten zu nennen, dass das 100%ige Mahlgut von Probe 1.1 vergleichsweise hohe Abweichungen bei den Dosierzeiten der Zugstäbe aufweist. Zudem zeigen sich beim 25%ige Mahlgut von Probe 1.1 starke Schwankungen bei der Dosierzeit der Gehäuse (s. Abbildung 21). Das Massepolster der Gehäuse zeigt hingegen für das Beispiel der Proben 1.1 und 1.2 keine signifikanten Schwankungen (s. Abbildung 21).

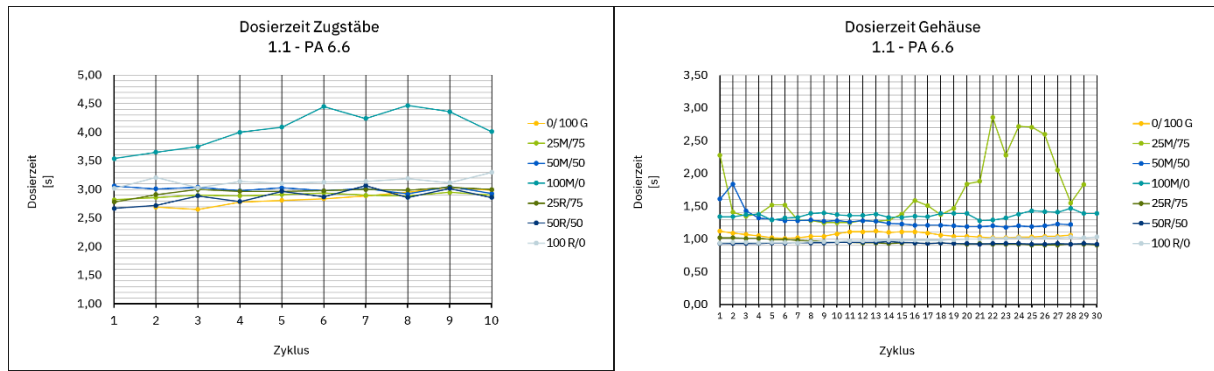


Abbildung 19: Dosierzeit Zugstäbe & Gehäuse PA 6.6, Probe 1.1 (Quelle: eigene Darstellung)

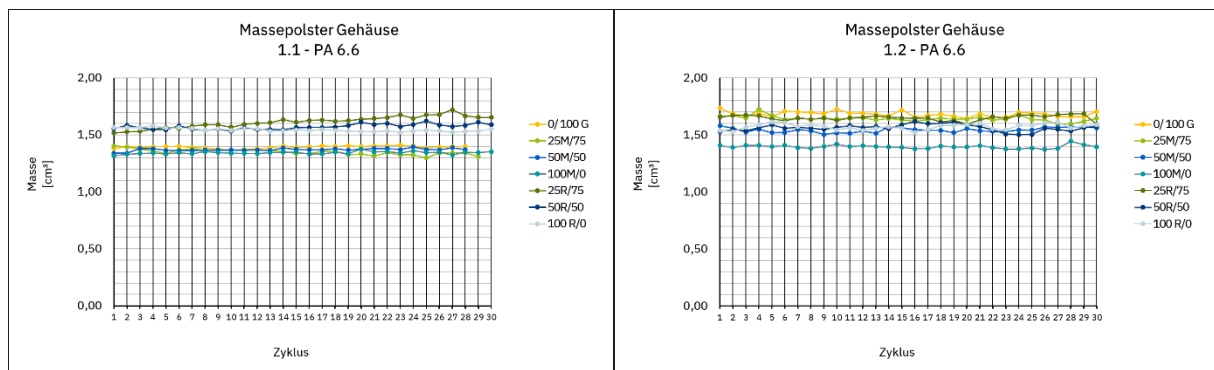


Abbildung 20: Massepolster Gehäuse PA 6.6, Probe 1.1 und 1.2 (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.2 Versuchsreihe 2: Polybutylenterephthalat (PBT)

Die Versuchsreihe der Polybutylenterephthalate besteht aus zwei unterschiedlichen PBT-Materialien in zwei verschiedenen Farben, in Schwarz (Probe 2.1) und in Orange (Probe 2.2). Aufgrund ihrer Eigenschaften, ihres Glasfaseranteils und ihrer unterschiedlichen Verarbeitung, inkl. Verweildauer im Produktionsprozess (Kaltkanal- und Heißkanalsystem im Spritzgießwerkzeug), ist davon auszugehen, dass die vorliegenden Analysen materialabhängig nur bedingt miteinander vergleichbar sind. Die abschließende Bewertungsmatrix aller Materialanalysen und mechanischen Versuche in Tabelle 10 zeigt jedoch, dass die Degradation bei beiden Kunststoffproben mit jedem weiteren Verarbeitungsschritt zunimmt und sowohl bei Probe 2.1 als auch bei Probe 2.2 nachweisbar ist.

Für das Mahlgut ist die Feuchtigkeit ein Einsatzkriterium, das nicht außer Acht gelassen werden darf, da die Feuchtigkeit Einfluss auf die Trocknungszeiten und damit die Prozessabläufe hat. Allerdings ist der Einfluss der Feuchtigkeit für die Bewertung der Materialqualität als eher gering zu betrachten. Des Weiteren ist für den Prozessablauf die Körnung der Rohstoffe relevant. Diese haben erheblichen Einfluss auf den Spritzgießprozess. Die Siebanalyse hat gezeigt, dass das extern aufbereitete Mahlgut zu große und kleine Partikel enthält und daher nur

bedingt einzusetzen ist. Neben den genannten Parametern ist ein eindeutiges Qualitätsmerkmal die Verschlechterungen der Fließeigenschaften, die sowohl durch die MVR-Messung als auch durch die rheologische Analyse nachgewiesen wurde. Ein Einsatz von 100 % Mahlgut sollte aufgrund der vorliegenden Ergebnisse ausgeschlossen werden. Dies spiegelt sich auch in den mechanischen Untersuchungen wider, die zeigen, dass das Material spröde wird. Die mechanische Untersuchung zeigt dagegen allerdings auch, dass eine erhebliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch die Beimischung von Primärmaterial erreicht wird. So ist eine Beimischung auch gemäß den Zertifizierungsanforderungen nach UL von 25 % Mahlgut zugelassen und als optimal anzusehen, eine Beimischung von 50 % ist gemäß den vorliegenden Analysen ebenfalls technisch möglich. Die Ergebnisse der Regranulat-Untersuchungen zeigen eine stärkere Degradation des Kunststoffes, wobei die Eigenschaften der Feuchte und der Körnung als prozessstabiler anzusehen sind. Allerdings zeigt die Materialanalyse, dass es zu einer Glasfaserschädigung und einem Abbau des Glührückstandes kommt. Das Fließverhalten macht zudem deutlich, dass es zu einem Kettenabbau kommt. Diese Schädigungen bestätigen die Zug- und Kerbschlagprüfungen. Auch die Farbe in Orange wird durch die Verarbeitung geschädigt und kann nur mit einer Beimischung von Primärmaterial wiederhergestellt werden. Eine Beimischung von 75 % Primärmaterial zeigt eine deutliche Verbesserung des Materialverhaltens, sodass beim Regranulat ein Einsatz von maximal 25 % technisch möglich ist.

Die Prozessdaten des PBT zeigen allerdings gegenüber der technischen Einstufung, dass ein Einsatz von 50 % Mahlgut zu veränderten Prozessen führen und vergleichbare Prozessdaten in Bezug auf Dosierzeiten, max. Einspritzdruck und Massepolster nicht erreicht werden können. Dieses Bild verstärkt sich bei dem 100%igem Einsatz vom Mahlgut. Auch der Einsatz von 50 % und 100 % Regranulat kann keine vergleichbaren Prozessdaten aufzeigen. Die Beimischung von 25 % Mahlgut oder Regranulat führte hingegen nahezu zu gleichwertigen Prozessparametern, die durchweg stabil verliefen. Abschließend ist damit eine maximale Beimischung von 25 % Mahlgut oder Regranulat zu empfehlen. An dieser Stelle sei, wie auch beim PA 6.6 darauf hingewiesen, dass bei der Verwendung eines Regranulates in der Elektroindustrie in der Regel Sonderzulassungen notwendig sind. Die Einzelergebnisse zu den jeweiligen Untersuchungen werden in den nachfolgenden Unterabschnitten dargestellt.

Tabelle 10: Bewertungsmatrix PBT – Proben 2.1 & 2.2 (Quelle: eigene Darstellung)

Materialanalyse	PBT 2.1						PBT 2.2					
	Mahlgut			Regranulat			Mahlgut			Regranulat		
Feuchte	!			✓			!			✓		
Farbe	✓			!			!			!!		
Farbe (Beimischung)	-			✓			✓			✓		
UV/Klima	✓			✓			!			✓		
Glührückstand	✓			✓			✓			✓		
Körnung	!!			✓			!			✓		
MVR	!			!!			!			!!!		
rheometrische Analyse	!!!			!!!			!!			!!!		
mechanische Prüfung & Nachuntersuchung	25M/75	50M/50	100M	25R/75	50R/50	100R	25M/75	50M/50	100M	25R/75	50R/50	100R
Zugprüfung	✓	!	!!	!	!!	!!!	✓	✓	!!	✓	!!	!!!
Kerbschlag	✓	✓	!	✓	!	!!!	✓	✓	✓	✓	!	!!!
Prozessdaten	25M/75	50M/50	100M	25R/75	50R/50	100R	25M/75	50M/50	100M	25R/75	50R/50	100R
Dosierzeiten	✓	✓	!!	✓	✓	✓	✓	✓	!!	✓	✓	✓
Einspritzdruck	✓	!	!!	✓	!	!!	✓	!	!!	✓	!	!!
Massepolster	✓	!!	!!	✓	✓	!	✓	!!	!!	✓	✓	!
Gesamtbewertung	✓	!	!!	✓	!	!!!	✓	!	!!	✓	!!	!!!

4.1.2.1 Feuchtemessung

Die Feuchtemessungen, die als erste Materialanalysen durchgeführt wurden, sind für die PBT-Materialien in Tabelle 11 dargestellt. Hierbei zeigt das Mahlgut sowohl bei Probe 2.1 als auch Probe 2.2 einen erhöhten Feuchtegehalt auf. Der Feuchtegehalt liegt bei einem Gehalt von bis zu 0,133 % und führt zu erhöhten Trocknungszeiten. Die maximale Feuchteaufnahme, die gemäß den Herstellerangaben bei bis zu 0,4 % liegt, ist allerdings noch nicht erreicht. Die Regranulate lag bei beiden Proben sogar unterhalb der maximalen Verarbeitungsfuchte. Dieses ist auf die Materialeigenschaften zurückzuführen, da das PBT weniger hygroskopisch ist (s. Unterkapitel 4.1.2). Unter diesem Gesichtspunkt sind die Regranulate gut als Sekundärmaterial einzusetzen.

Tabelle 11: Feuchtegehalt und Trocknungszeiten, PBT (Quelle: eigene Darstellung)

Probe	Feuchtegehalt Probe [%]	max. Verarbeitungsfeuchte [%]	Trocknungszeiten bis zur Verarbeitungsfeuchte [h]	empfohlene Trocknungszeit [h]
2.1-G	0,037**	0,04	–	4
2.1-M	0,091	0,04	4	4
2.1-R	0,028	0,04	3	4
2.2-G	0,016	0,02	–	4–8
2.2-M	0,133	0,02	10	4–8
2.2-R	0,016	0,02	4	4–8

4.1.2.2 Farbmessung

Wie auch bei dem vorangegangenen Material, wurden im nächsten Schritt Farbmusterplatten hergestellt und untersucht. Als Grenzwert ist für das PBT in Schwarz (Probe 2.1) und das PBT in Orange (Probe 2.2) ist der OT-Wert mit $dE_{\max \text{ zul.}} = 1,73$ festgelegt. Die Farbmessungen, dessen Ergebnisse in Abbildung 21 dargestellt sind, zeigen bei dem PBT in Schwarz einen starken

Farbabbau beim Regranulat und bei dem orangenen PBT sogar beim Mahlgut sowie beim Regranulat.

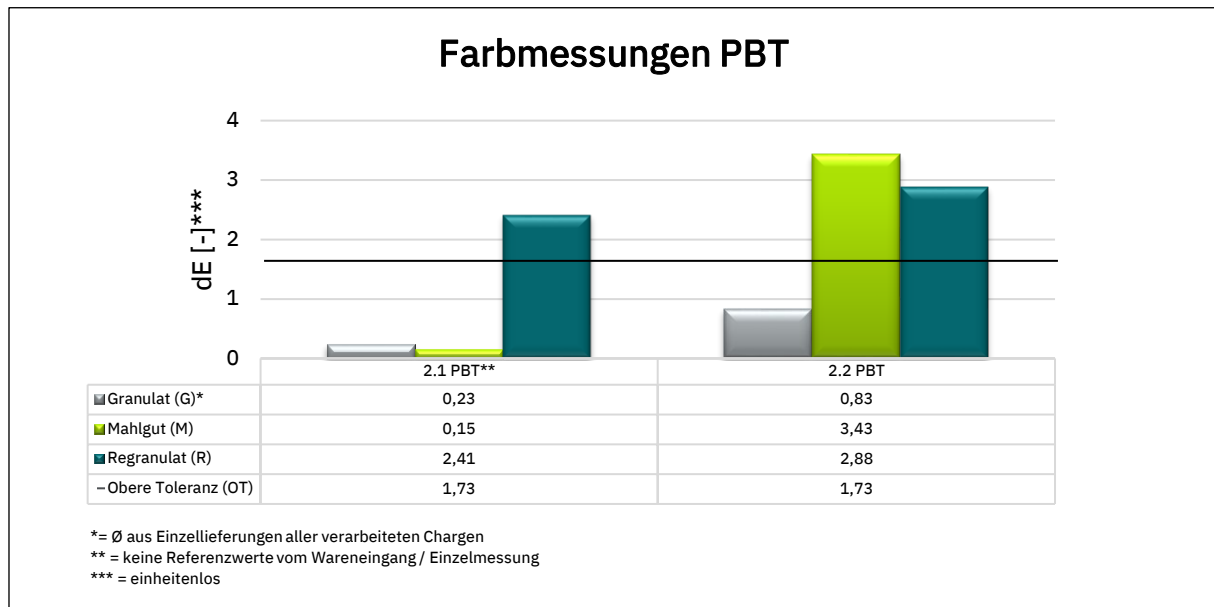


Abbildung 21: Farbmessungen PBT (Quelle: eigene Darstellung)

Für die drei Versuchsreihen, bei denen die Grenzwerte überschritten wurden, zeigen Nachuntersuchungen, inwieweit eine Beimischung von Primärmaterial zur Wiederherstellung der Farbe führen kann. Hierzu wurden Farbmusterplatten mit einer Beimischung von 50 % und 75 % Primärmaterial hergestellt. In allen drei Fällen konnte mit einer Beimischung von 50 % Neuware eine Verbesserung der Farbe hergestellt werden und bei einer Beimischung von 75 % Neuware konnte bei der Probe 2.2 noch einmal eine Verbesserung der Farbe erzielt werden (s. Abbildung 22).

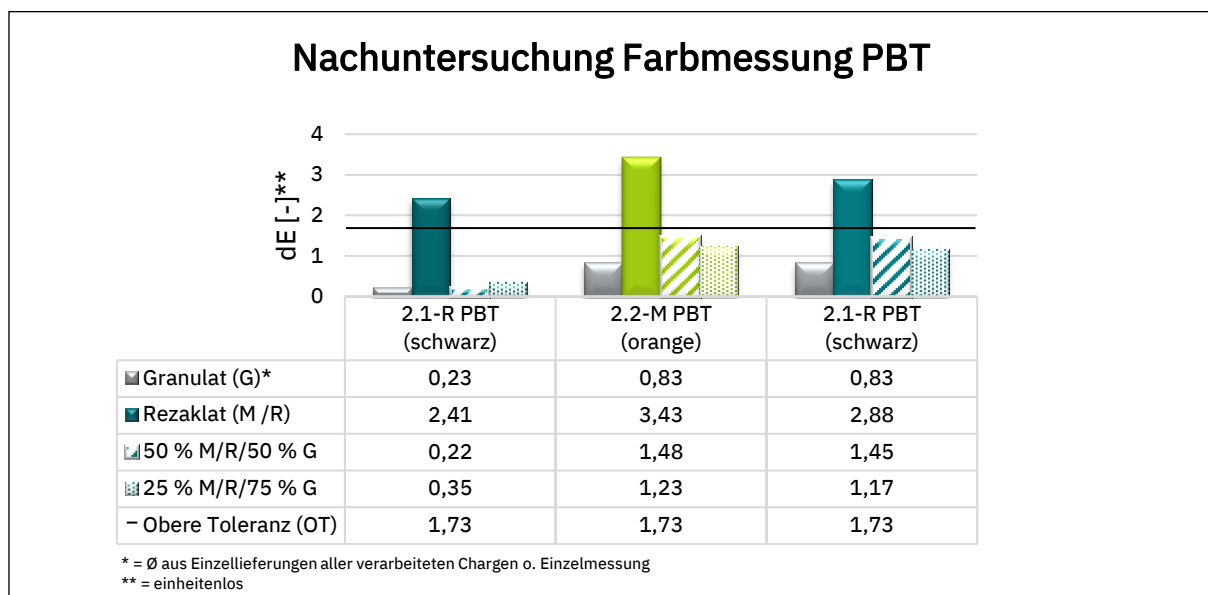


Abbildung 22: Nachuntersuchung Farbmessung PBT (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.2.3 UV-Lagerung und Klimalagerung

In diesem Versuchsteil wurden die Farbmusterplatten vom PBT einer UV-Lagerung und Klimalagerung ausgesetzt. Nach der Lagerung wurden die Farbmusterplatten auf eine Ausmigration der Farbe hin überprüft. Die Proben zeigten dabei schon eine Ausmigration von Additiven, allerdings wurden bei den Abwischtest keine Farbaustritte erkannt, so dass die Qualität der Rezyklate in diesem Fall als gegeben anzusehen ist. Eine weitergehende Analyse und Betrachtung der ausgetretenen Additive finden im Rahmen dieser Arbeit nicht statt. Erfahrungsgemäß kommt es bei den PBT-Materialien immer wieder zu Migrationen, sodass diese für die weitere Betrachtung keinen Einfluss auf den Einsatz der Rezyklate haben.

Nach der UV-Lagerung wurden die Farbmusterplatten einer erneuten Farbmessung unterzogen. Bei den dem Regranulat der Probe 2.1 und dem Mahlgut der Probe 2.2 ist ein deutlicher Farbumschlag zu erkennen. Die Messwerte sind in Abbildung 23 dargestellt. Der Farbunterschiede ist besonders daran erkennbar, dass die Farbe an Intensität verliert und eher verblasst wirkt. Dieses spiegelt sich auch in den Einzelwerten aus dem Farbsystem wider. Hierbei werden die Messwerte in Bezug zum Referenzwerte gesetzt und mit einer Abweichung von ± 1 als gut befunden. Die Ergebnisse in Tabelle 12 zeigen hierbei für die Regranulat der Probe 2.1 allerdings werte innerhalb der oberen Toleranz und liegen alle bei einer Abweichung < 1 , bei Probe 2.2 ist die Abweichung aber weiterhin über Toleranz und zeigt auch in den Einzelwerten ein Wert von > 1 . In letzteren Fall konnte somit keine geeignete Farbstabilität nachgewiesen werden.

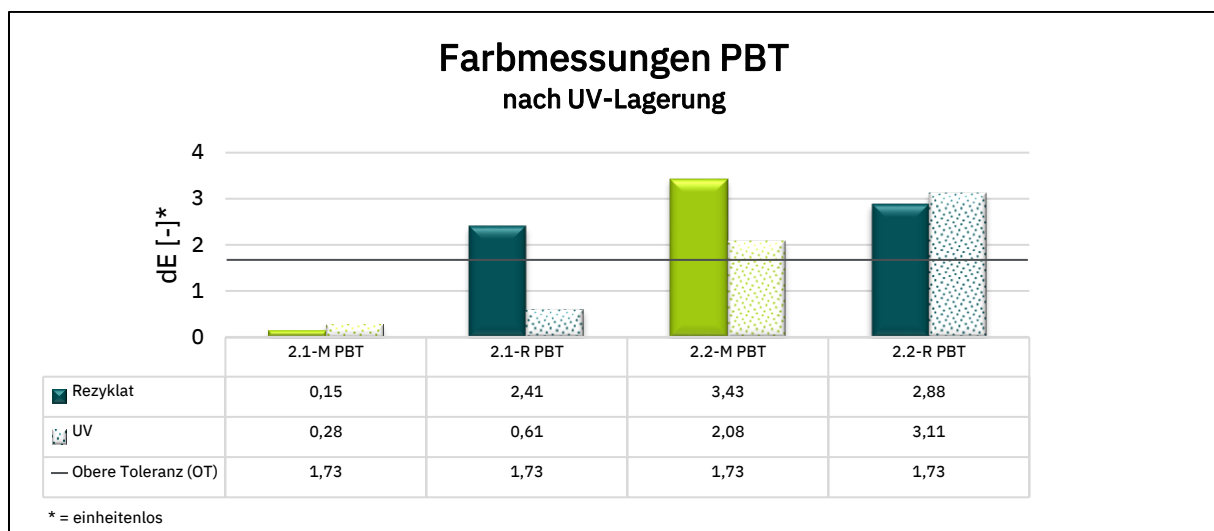


Abbildung 23: Farbmessung PBT nach der UV-Lagerung (Quelle: eigene Darstellung)

Tabelle 12: Messwerte Farbsystem nach UV-Lagerung, PBT

Farbsystem CIELAB76	Bezug Lichtart D65	Messwert nach UV Lagerung	Bezug Lichtart D65	Messwert nach UV-Lagerung
	2.1-R PBT		2.2-M PBT	
L*	30,23	29,65	67,40	66,22
a*	-0,07	-0,09	39,45	37,84
b*	1,60	-1,39	51,90	51,31
dL*	-	-0,57	-	-1,19
da*	-	-0,02	-	-1,61
db*	-	0,21	-	-0,58

4.1.2.4 Messung des Glührückstands

Die ausgewählten PBT-Materialien sind glasfaserverstärkt, sodass ein Glührückstand gemessen wurde. Der Massenanteil der Glasfasern ist für jeden Materialtyp unterschiedlich und ist vom Hersteller bei der Probe 2.1 mit 10 % definiert und bei der Probe 2.2 mit 30 %. Dabei liegt die Glasfaserdosierung nach Herstellerangaben bei allen Materialien bei ± 2 % absolut. In Tabelle 13 werden sowohl die Herstellerangaben als auch die analysierten Glührückstände aufgezeigt.

Tabelle 13: Glührückstand PBT (Quelle: eigene Darstellung)

Probe	Glasfaseranteil Granulat [%]	Glührückstand Mahlgut [%]	Glührückstand Regranulat [%]	Glasfaseranteil Spezifikation (Hersteller) [%]
2.1 (PBT)	10	12	10	8–12 (± 2)
2.2 (PBT)	30	31	32	28–32 (± 2)

Die Analyse der Glührückstände zeigt bei allen Materialien, dass der Glasfaseranteil beim Granulat, Mahlgut und Regranulat in gleichbleibender Größenordnung und innerhalb der Herstellerspezifikation nachgewiesen werden konnte. Bei dem PBT schwarz (Probe 2.1) ist mit 10 % der Anteil der Glasfasern auch im Regranulat noch erhalten. Beim PBT orange (Probe 2.2) liegt der Anteil der anorganischen Stoffe sogar noch über 30 %; hier befand sich die EingangschARGE laut Prüfzeugnis auch bei nahezu 32 %. Zusammenfassend hat beim Regranulat der Probe 2.1 ein leichter Abbau des Glührückstandes und damit ggf. ein Glasfaserabbau/-abrieb stattgefunden. Bei den anderen drei Proben (2.1-M, 2.2-M, 2.2-R) konnte kein Abbau der organischen Bestandteile nachgewiesen werden.

4.1.2.5 Messung der Korngröße

Für die Mahlgüter wurde neben den genannten Messungen Siebanalysen zur Korngrößenermittlung durchgeführt. Die Siebungen zeigen keine vergleichbare Korngrößenverteilung der extern oder intern aufbereiteten Mahlgüter. Allerdings zeigt die Verteilung, die in Abbildung 24 dargestellt ist, dass die extern aufbereiteten Mahlgüter eine insgesamt flachere Ausprägung

haben und – wie auch bei dem PA 6.6 – darauf deuten lassen, dass es einen höheren Anteil an kleinen und größeren Körnungen gibt.

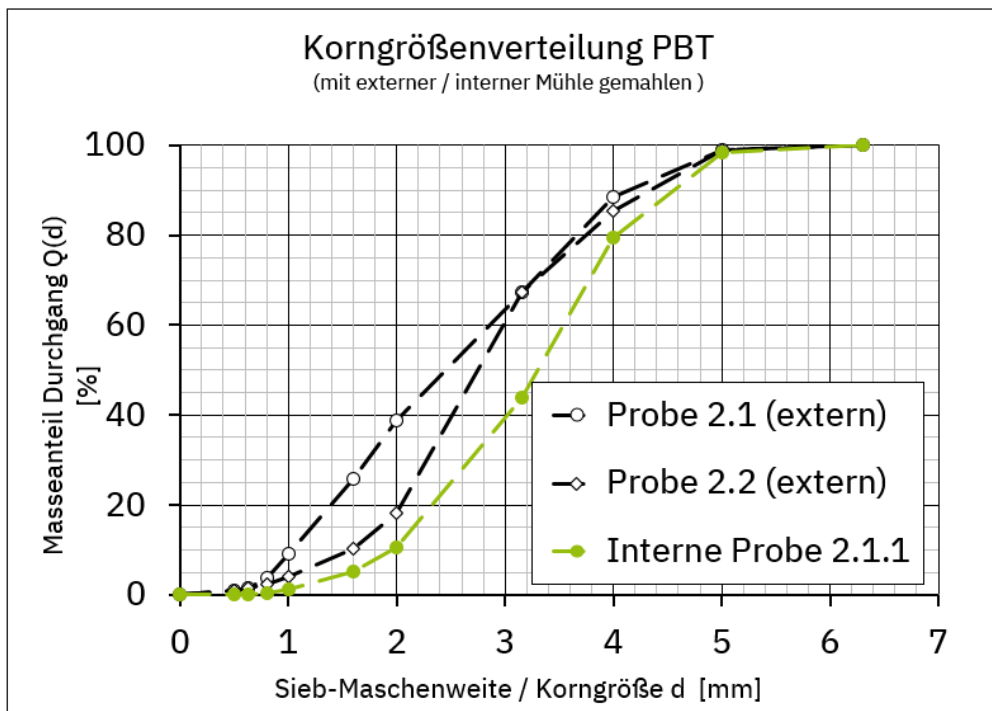


Abbildung 24: Korngrößenverteilung PBT (Quelle: eigene Darstellung)

Für die weitere Auswertung wurden in Abbildung 25 die Massenanteile $< 1\text{ mm}$ und $> 4\text{ mm}$ gegenübergestellt. Die zwei extern aufbereiteten Mahlgüter zeigen vor allem bei den Korngrößen $< 1\text{ mm}$ einen deutlich größeren Anteil als die intern aufbereiteten Mahlgüter.

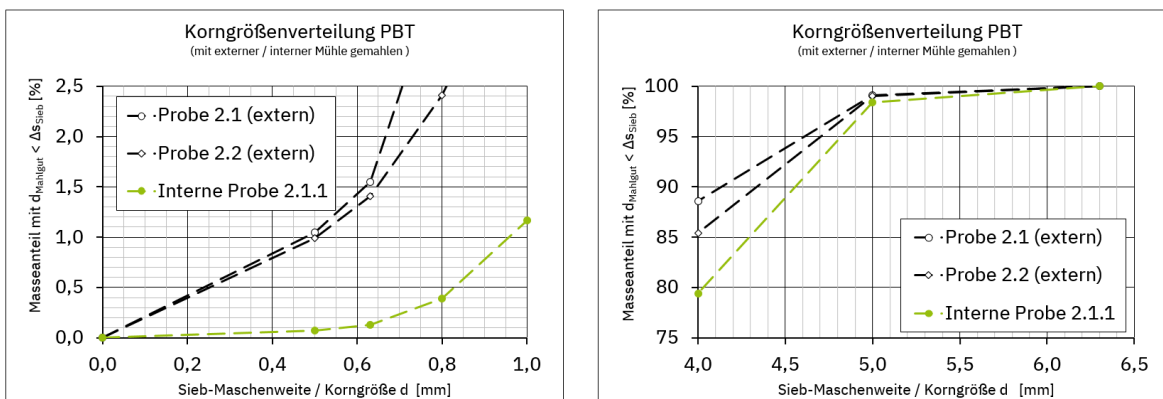


Abbildung 25: Korngrößenverteilung PBT $< 1\text{ mm}$ / $> 4\text{ mm}$ (Quelle: eigene Darstellung)

Aufgrund des hohen Anteils kleinerer Partikel wird das externe Mahlgut als schlechter geeignet eingestuft. Wie auch bei der Bewertung des PA 6.6 ist für den Einsatz im Spritzgussprozess eine schmalere Korngrößenverteilung besser geeignet. Gemäß dieser Interpretation ist der Einsatz des intern aufbereiteten Mahlgutes besser geeignet.

4.1.2.6 Analyse des Fließverhaltens (Schmelzviskosität)

Das Fließverhalten wird beim PBT typischerweise mit der Schmelzviskosität charakterisiert. Für die beiden Versuchsmaterialien wurde eine MVR-Messung durchgeführt. Die Veränderung der MVR ist bei den vorliegenden Untersuchungen ganz deutlich zu erkennen, die Sekundärmaterialien zeigen erhöhte MVR-Werte, die darauf schließen lassen, dass der Kettenabbau fortgeschritten ist und eine zweite Verarbeitung problematisch sein kann (s. Abbildung 26). Bei einem Polymerkettenabbau steigt die Schmelz-Volumen-Rate (Rudolph et al., 2020, S. 34).

Die MVR-Werte steigen mit jedem Verarbeitungsschritt an, so dass ein Einsatz von Regranulat als kritisch betrachtet werden muss, da das Regranulat allein für die Herstellung des Sekundärmaterials schon einen weiteren Verarbeitungsschritt durchlaufen hat.

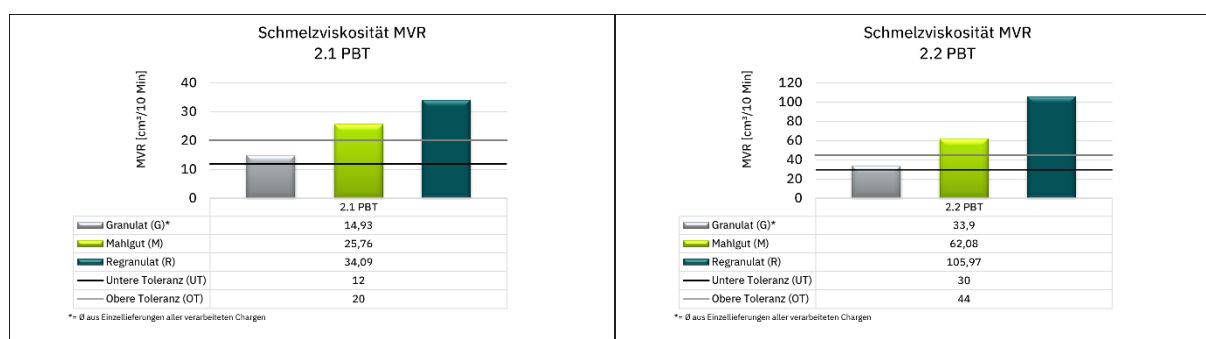


Abbildung 26: Schmelzviskosität PBT (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.2.7 Analyse des Fließverhaltens (Hochdruck-Kapillarrheometrie)

Als weitere Untersuchung des Fließverhaltens, wurde zudem eine rheometrische Analyse mittels Hochdruckkapillarrheometer durchgeführt. Die Degradation, die auch bei der MVR Messung in Abschnitt 4.1.2.6 aufgezeigt wurde, wird auch in der rheometrischen Analyse bestätigt. Die Viskosität bei Probe 2.1 nimmt beim Mahlgut um ein Vielfaches ab; diese Abnahme verstärkt sich dann noch einmal geringfügig bei dem Regranulat. Der erste Aufschmelzprozess schädigt das Material schon enorm und führt fast zu einer halbierten Schwerviskosität (s. Abbildungen 27). Die Schädigung vom zweiten Aufschmelzprozess für das Regranulat ist im Vergleich nur noch gering. Für die Approximation des Carreau-Ansatz konnten bei der Proben 2.1 sowohl bei dem Mahlgut als auch bei dem Regranulat zwei Messwerte nicht mit einbezogen werden. Zu beobachten ist, dass aus einem nicht erkläraren Grund die Scherviskositäten bei niedrigen Schergeschwindigkeiten abfallen.

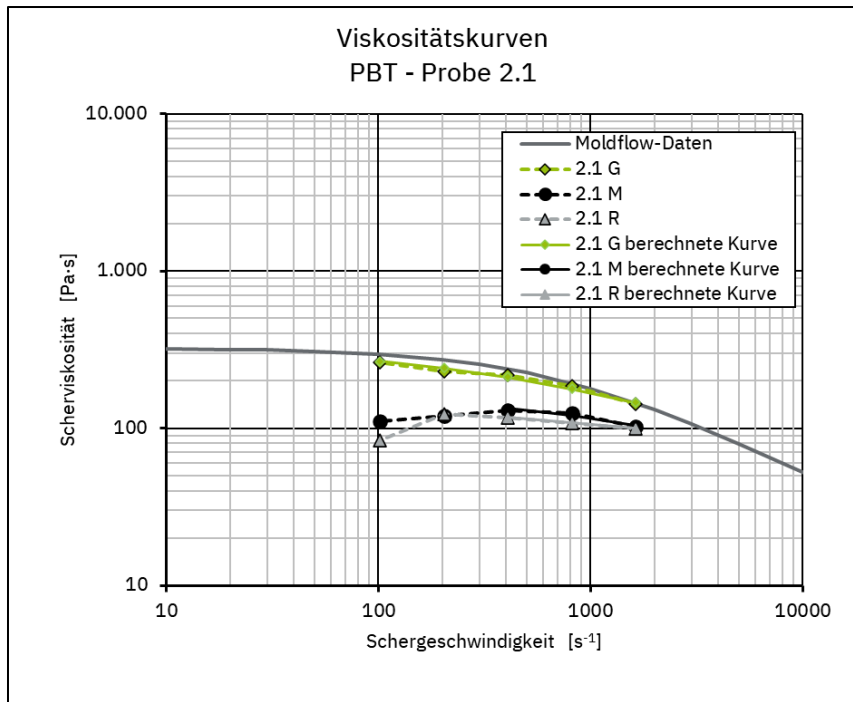


Abbildung 27: Viskositätsmodell PBT, Probe 2.1 (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an IKV, 2023b)

Bei der Probe 2.2 konnten bei allen drei Stufen – Granulat, Mahlgut und Regranulat – zwei Messwerte nicht mit ausgewertet werden. Die Messungen wurden in unterschiedlichen Messvarianten, wie mit veränderten Druckaufnehmern oder Schergeschwindigkeiten wiederholt, ergaben aber keine anderen bzw. auswertbaren Messergebnisse. Die berechneten Kurven von der Probe 2.2 mit den drei Messpunkten und dem Vergleich aller Messpunkte sind in Abbildung 28 dargestellt. Die Probe 2.2 zeigt beim Mahlgut nur eine geringe Reduzierung der Viskosität. Auch der berechnete Kurvenverlauf weist eine parallellaufende Kurve mit geringer Differenz auf.

Die Proben 2.1 und 2.2 können nicht miteinander verglichen werden, da es sich um zwei verschiedene Kunststofftypen mit unterschiedlichem Glasfaseranteil (10 % und 30 %) handelt. Zudem wurden die Kunststoffe in zwei verschiedenen Verarbeitungsverfahren eingesetzt. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse sind die Rezyklate der PBT-Materialien für den direkten Einsatz als Rezyklat unterschiedlich zu bewerten. Probe 2.1 zeigt eine starke Reduzierung der Viskosität, wohingegen Probe 2.2 eine geringe Reduzierung aufweist.

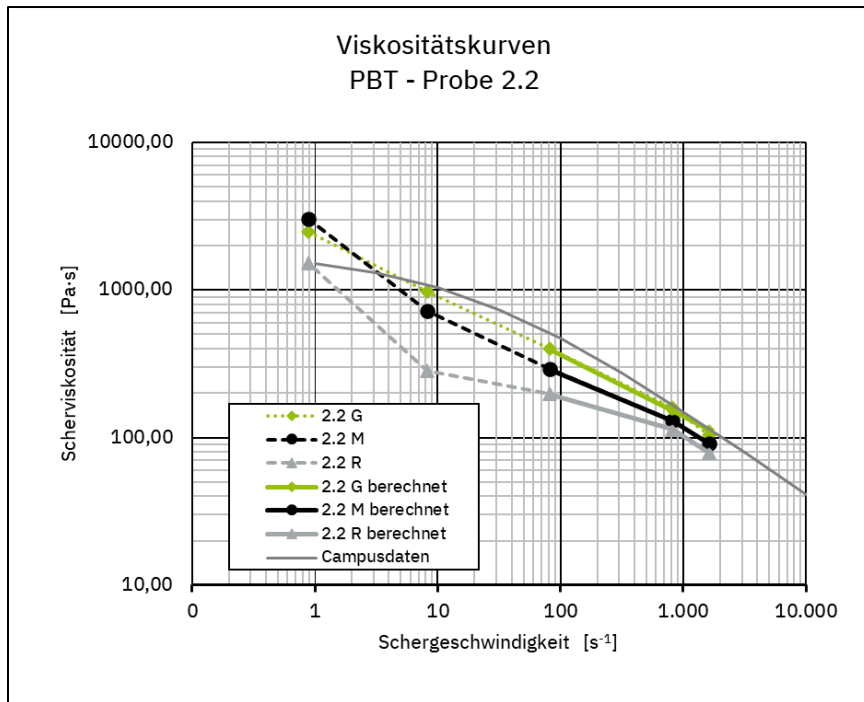


Abbildung 28: Viskositätsmodell PBT, Probe 2.1 (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an IKV, 2023b)

4.1.2.8 Zugversuche (E-Modul, Zugfestigkeit)

Die Ergebnisse der mechanischen Prüfungen geben im Nachfolgenden weiter Aufschluss über die Anwendbarkeit in der Elektroindustrie. Die Zugprüfungen zeigen, dass das E-Modul und die Zugfestigkeit mit den Verarbeitungsstufen Mahlgut und Regranulat bei beiden Materialien (Proben 2.1 und 2.2) sinken. Die Kennwerte für diese Untersuchung sind in Tabelle 14 dargestellt. Die Abnahme des E-Moduls war aufgrund der Degradation des Kunststoffes zu erwarten, da in diesem Fall zwei glasfaserverstärkte Kunststoffe vorliegen. Bei den glasfaserverstärkten Kunststoffen kann dieses auf die Kürzung der Glasfasern zurückzuführen werden (Schmiemann & Böger, 2020).

Tabelle 14: Ergebnisse der Zugprüfungen, PBT (Quelle: eigene Darstellung)

Probe	Referenzwert Hersteller	Zugmodul – E-Modul [MPa] nach ISO 527-1*			Zugfestigkeit – σ_M [MPa] nach ISO 527-1*		
		G	M	R	G	M	R
2.1 (PBT)	4400	5534	5141	3709	85	73	62
2.2 (PBT)	11500	11212	10977	9577	133	124	94

*X = 5 Messungen

Für die Bewertung des Materials 2.1 wird zudem eine Spannungs-Dehnungskurve als Ausschnitt in Abbildung 29 dargestellt. Die Spannungs-Dehnungskurven zeigen den Anfangsbereich, aus dem auch das E-Modul ermittelt wird. Sowohl beim Mahlgut als auch beim Regranulat ist eine eindeutige Abstufung der Beimischungsformen zu erkennen. Die Bereiche, die noch am nächsten an dem Primärmaterial liegen, hier als Granulat eingezeichnet, sind die

Mischungsformen 25 % Mahlgut, 50 % Mahlgut und 25 % Regranulat. Alle anderen Einsatzformen zeigen eine eindeutige Tendenz des Materialabbaus. Der größte Materialabbau, der auch im direkten Vergleich der E-Modul-Werte erkennbar ist, liegt beim Regranulat.

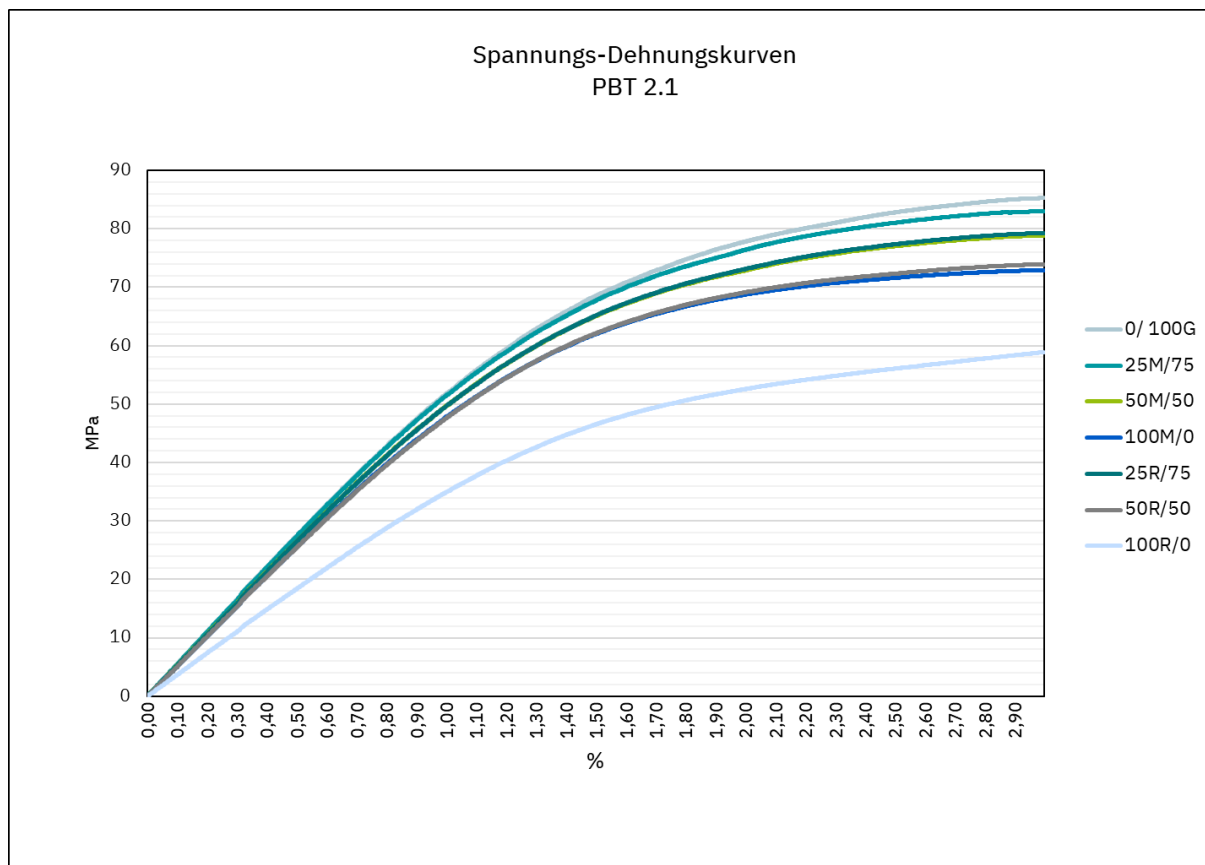


Abbildung 29: Spannungs-Dehnungskurven PBT, Probe 2.1 (Quelle: eigene Darstellung)

Die Versuchsreihe des Materials 2.2 zeigt einen ähnlichen Unterschied bei den Aufbereitungsstufen und Mischungsverhältnissen, wobei das Material an sich schon einen höheren E-Modul aufweist, was bedeutet, dass das PBT 2.2 an sich schon steifer ist und das Material grundsätzlich einen höheren Widerstand gegenüber der Verformung hat. In Abbildung 30 ist auch hier deutlich zu erkennen, dass vor allem das 100 % Regranulat eine starke Abnahme der Spannungs-Dehnungskurve und des E-Moduls aufweist. Hingegen sind auch hier die Mischungsformen mit 25 % Mahlgut, 50 % Mahlgut und 25 % Regranulat nahe am Primärmaterial.

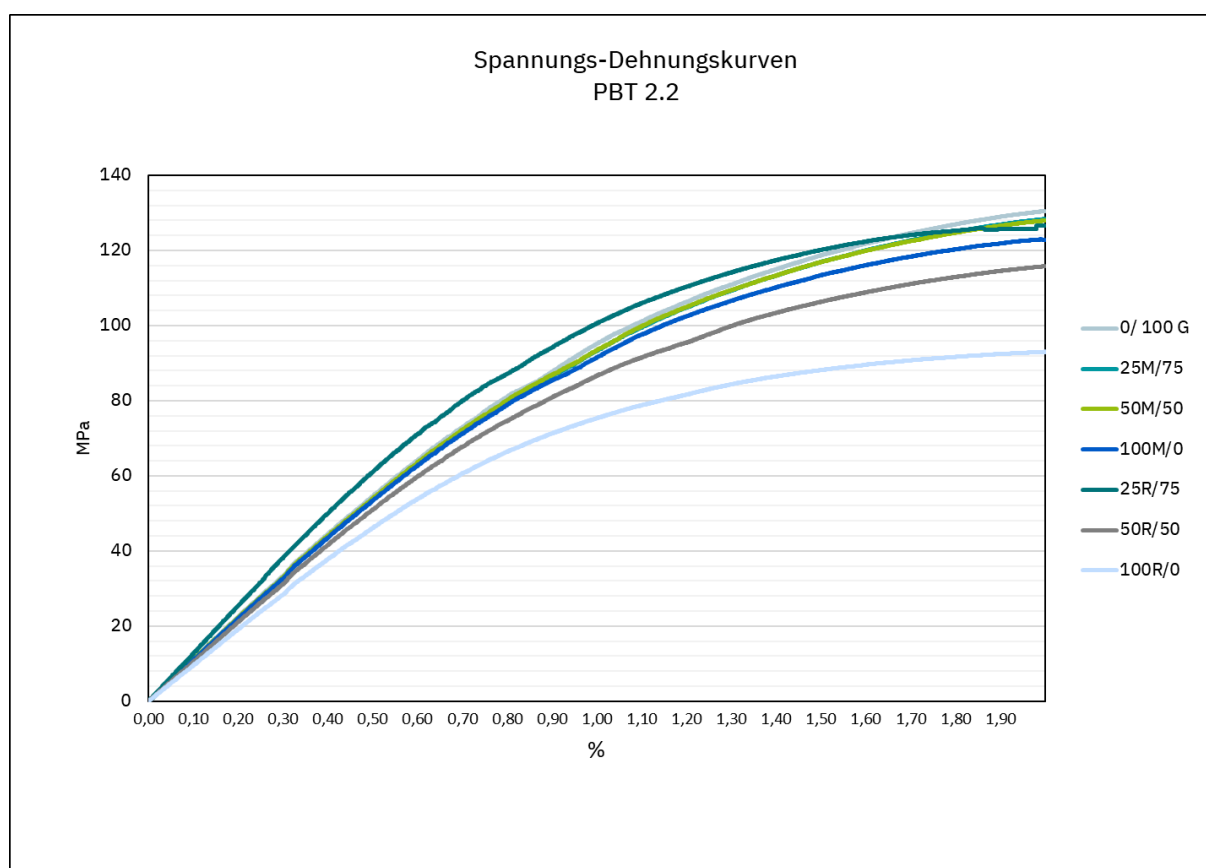


Abbildung 30: Spannungs-Dehnungskurven PBT, Probe 2.2 (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.2.9 Kerbschlagbiegeprüfung

Des Weiteren zeigen die Kerbschlagbiegeversuche eine Reduzierung der Schlagzähigkeit in den Beimischungsformen beim Mahlgut und Regranulat. Die Kerbschlagzähigkeit sinkt bei dem PBT der Probe 2.1 signifikant, je mehr Rezyklate beigemischt wird (s. Abbildung 31). Beim 100 % Regranulat sinkt die Schlagzähigkeit um die Hälfte im Vergleich zum Primärrohstoffes – damit steigt die Sprödeheit bedeutsam. Beim Mahlgut mit einer Beimischung von 25 % wird hingegen nahezu eine Zähigkeit wie beim Primärrohstoff erreicht. Wie auch in den vorangegangenen Zugversuchen zeigen die Einsatzformen 100 % Mahlgut sowie 50 % und 100 % Regranulat die kritischsten Veränderungen des Kunststoffes. Die Abnahme der Schlagzähigkeit hat für die Anwendung der Bauteile in der Elektroindustrie einen bedeutenden Einfluss, so dass in den genannten Fällen vom Einsatz der Rezyklate abgeraten wird. Die Einzelbetrachtung der Messwerte zeigt zudem keine signifikanten Unterschiede. Um die Interpretation der Messwerte zu stützen und eine Beurteilung des arithmetischen Mittels zu gewährleisten, wurde gemäß der Empfehlung zu den statistischen Größen der DIN EN ISO 179-1 auch die einfache Standardabweichung aufgeführt. Dabei sind Standardabweichungen >1 nur beim 100%igem Mahlgut zu erkennen.

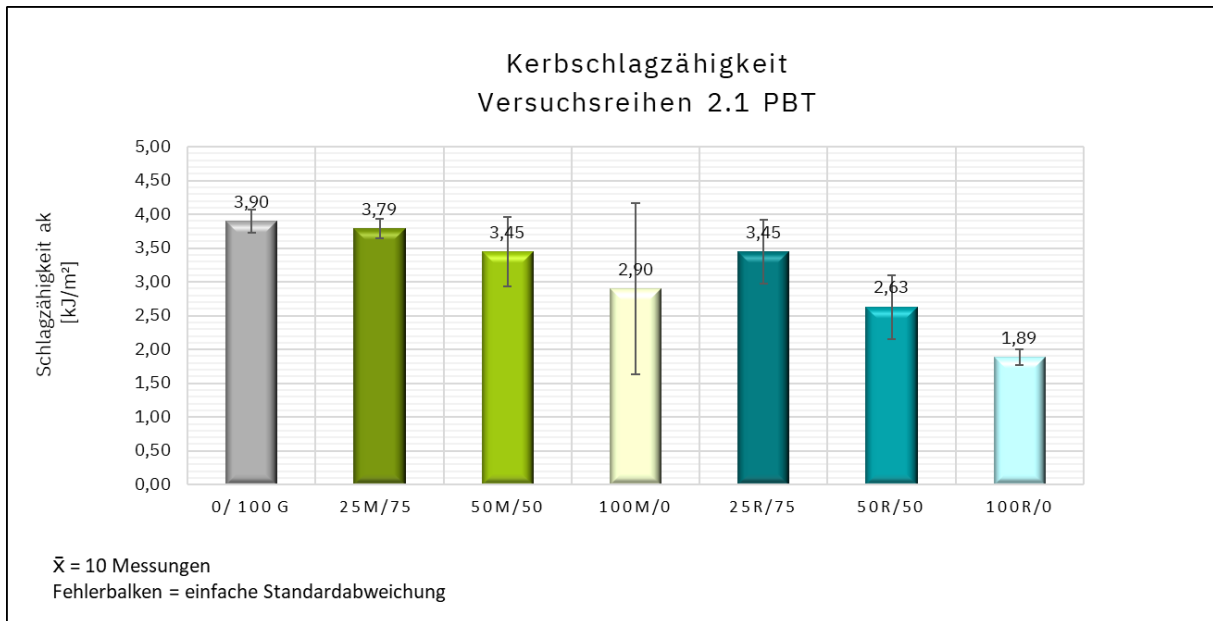


Abbildung 31: Kerbschlagzähigkeit PBT, Probe 2.1 (Quelle: eigene Darstellung)

Das PBT 2.2 zeigt gegenüber den vorangegangenen PBT eine flachere Verteilung der Schlagzähigkeit (s. Abbildung 32). Das Mahlgut in 100%igem Einsatz weist dabei nur eine geringfügige Veränderung zum Primärrohstoff auf. Die Probe mit dem 25%-Anteil von Mahlgut hat sogar eine besser Schlagzähigkeit als die Probe mit dem Frischgranulat, was mit einer Chargenschwankung zu begründen ist, da als Referenzprobe eine andere Charge herangezogen wurde. Lediglich beim Einsatz von 100 % Regranulat ist ein starker Abbau der Schlagzähigkeit erkennbar, sodass eine Verwendung von 100 % Regranulat ausgeschlossen werden sollte. Alle Messwerte dieser Messreihe zeigen eine konstante Standardabweichung <1.

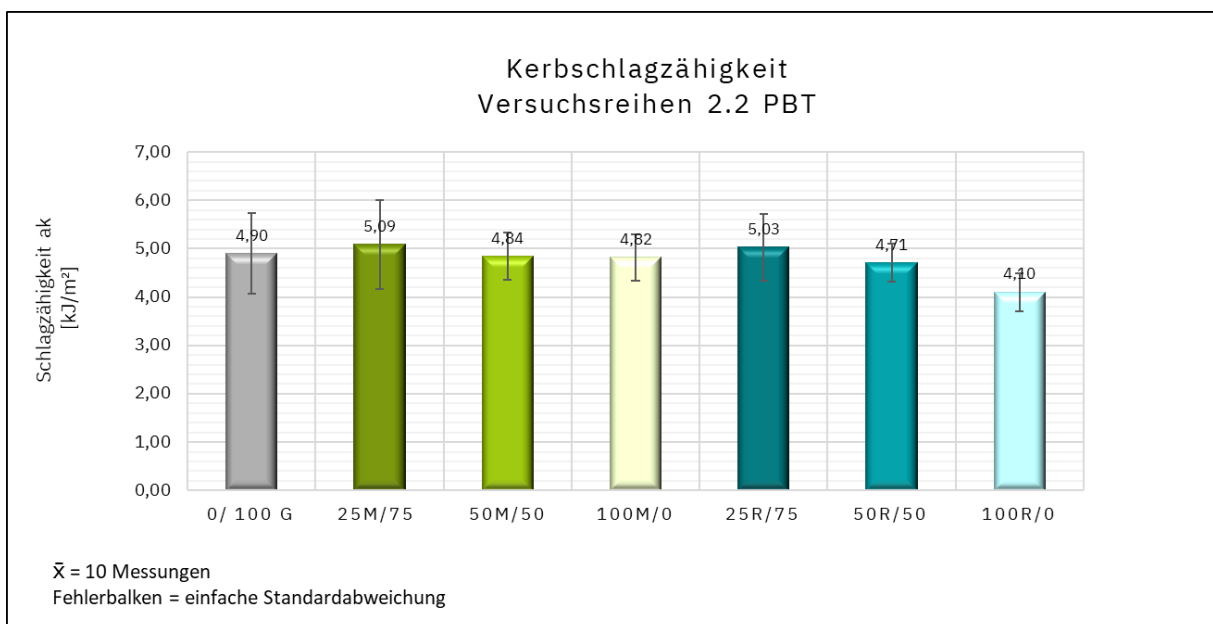


Abbildung 32: Kerbschlagzähigkeit PBT, Probe 2.2 (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.2.10 Prozessdaten

Für das PBT wurden die Prozessdaten des Spitzgießprozesses der Zugstäbe und der Kerbschlagkörper ausgewertet und in diesem Abschnitt aufgeführt. Die Prozessdaten der Proben 2.1 und 2.2 können, wie auch bei den Materialqualitäten, nur bedingt miteinander verglichen werden, da es sich um zwei unterschiedliche PBT-Typen handelt. Die Auswertung der Dosierzeiten zeigt bei der Probe 2.1 verlängerte Zeiten bei dem Einsatz von 100 % Mahlgut (s. Abbildung 33). Die anderen Dosierzeiten sind annähernd gleich und stabil. Beim Einspritzdruck ist allerdings bei beiden Versuchsreihen (Probe 2.1 und 2.2) eine eindeutige Abstufung der Drücke zu erkennen (s. Abbildung 34). Dieses Verhalten entspricht der Abnahme der Viskosität, die auf die Degradation beim PBT nach jedem Verarbeitungsschritt zurückzuführen ist. Die Prozessdaten spiegeln dabei die Beimischung und die Verdünnungseffekte wie erwartet wider. Die Abstufung nach dem Einsatz des Primärmaterial erfolgt in den Stufen, 25 % Mahlgut, 25 % Regranulat, 50 % Mahlgut, 50 % Regranulat, 100 % Mahlgut und zuletzt mit dem geringsten Einspritzdruck das 100 % Regranulat. Des Weiteren zeigt das Massepolster bei den Zugstäben der Probe 2.1, dass dieses mit einer weitaus geringeren Masse bei dem Einsatz mit 50 % und 100 % Mahlgut vorliegt; was durch die inhomogenen Geometrien des Mahlgutes zu begründen ist. Bei der Probe 2.2 ist der gegenteilige Effekt für das 100 % Regranulat zu beobachten, hier liegt ein höheres Massepolster vor und steht in Verbindung mit der Körnung des Regranulates (s. Abbildung 35). Die Prozessdaten des PBT weisen nach, dass sowohl die verringerte Viskosität als auch die Körnung Einfluss auf den Verarbeitungsprozess haben. Die vorliegenden Prozessparameter zeigen, dass ein Einsatz von 50 % oder sogar 100 % Mahlgut zu veränderten Prozessen führen und vergleichbare Prozessdaten in Bezug auf Dosierzeiten, max. Einspritzdruck und Massepolster nicht erreicht werden können. Auch der Einsatz von 50 % und 100 % Regranulat kann keinen vergleichbaren Prozessdaten aufzeigen, dabei verändert sich vorwiegend der Einspritzdruck und zum Teil das Massepolster. Die Beimischung von 25 % Mahlgut oder Regranulat führte nahezu zu gleichwertigen Prozessparametern, die durchweg stabil verliefen.

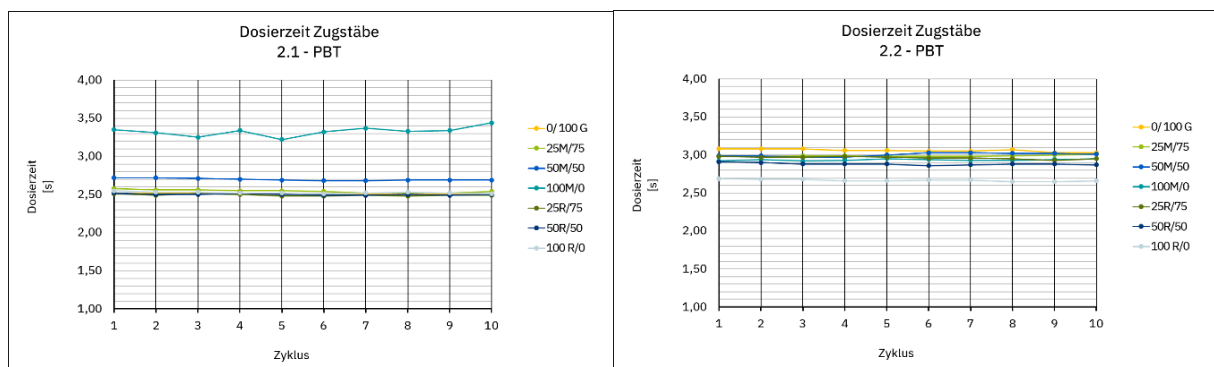


Abbildung 33: Dosierzeit Zugstäbe PBT, Probe 2.1 und 2.2 (Quelle: eigene Darstellung)

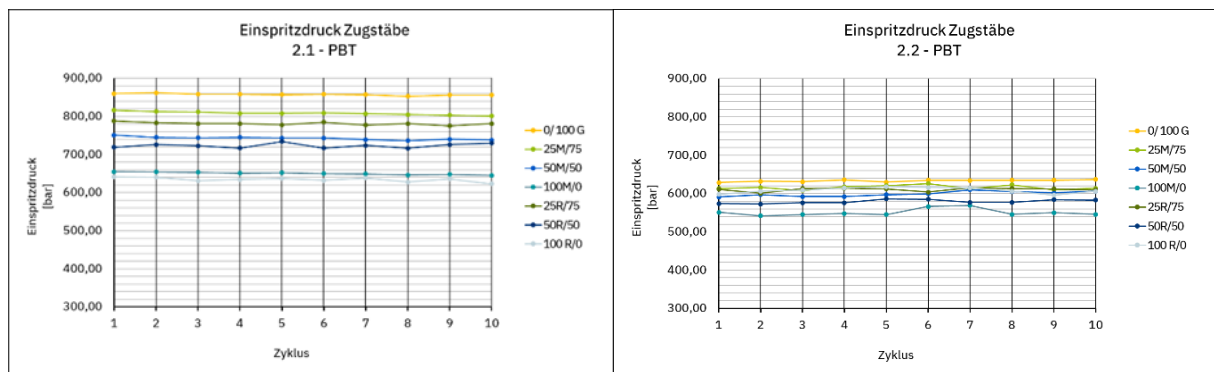


Abbildung 34: Einspritzdruck Zugstäbe PBT, Probe 2.1 und 2.2 (Quelle: eigene Darstellung)

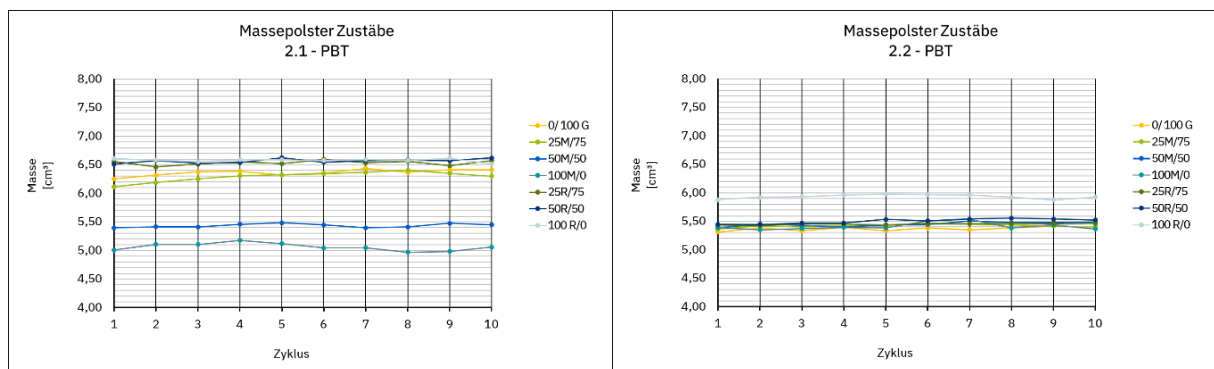


Abbildung 35: Massepolster Zugstäbe PBT, Probe 2.1 und 2.2 (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.3 Versuchsreihe 3: Polycarbonat (PC)

Die dritte der Versuchsreihen ist die des Polycarbonats. Aufgrund der Einzelmengen und der Prozessabläufe wurden für diese Arbeit unterschiedliche Polycarbonate und Farben gesammelt; aus dieser Sammlung entstand ein PC-Gemisch. Die Farben, die in dem Gemisch vorwiegend enthalten sind, sind Schwarz, Grau, Blau und Transparent. Gemische können meist nur begrenzt für Formteile mit niedrigen Qualitätsansprüchen eingesetzt werden (Clauss, 2019, S. 59). Dennoch wird in dieser Arbeit das Gemisch untersucht, um eine Aussage darüber treffen zu können, ob das PC unter den genannten Umständen technisch wieder eingesetzt werden kann. PC ist grundsätzlich ein Material mit einem hohen Potenzial für das Recycling und kommt oft in Elektronikbauteilen vor (Rudolph et al., 2020, S. 36–37).

Die Materialqualität wird ganzheitlich anhand der nachfolgenden Bewertungsmatrix in Tabelle 15 bewertet – wobei hierbei immer zu beachten ist, dass es sich um ein Materialgemisch handelt. Dieses wird auch im Folgenden nochmals näher erläutert und bewertet.

Tabelle 15: Bewertungsmatrix PC – Probe 3 (Quelle: eigene Darstellung)

Materialanalyse	PC 3					
	Mahlgut			Regranulat		
Feuchte	!!!			!!!		
Farbe	-			-		
UV/Klima	✓			✓		
Glührückstand	-			-		
Körnung	!			✓		
MVR	✓			!		
rheometrische Analyse	!!!			!!!		
mechanische Prüfung & Nachuntersuchung	25M/75	50M/50	100M	25R/75	50R/50	100R
Zugprüfung	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kerbschlag	!	!	!!	!	!!	!!
Prozessdaten	25M/75	50M/50	100M	25R/75	50R/50	100R
Dosierzeiten	!	!!	!!!	✓	✓	✓
Einspritzdruck	!	!!	!	✓	✓	✓
Massepolster	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Gesamtbewertung	!	!!	!!	✓	!!	!!

Die Auswertung des Mahlgutes zeigt, dass das Material feucht ist und keinem Farbstandard entspricht. Zudem hat die Körnung einen hohen Anteil der größeren Korngrößen, was ggf. zu Prozessschwierigkeiten führen kann, bei richtiger Prozessplanung aber einsetzbar ist. Die rheometrische Analyse zeigt nicht interpretierbare Ergebnisse, was eine Bewertung des Fließverhaltens erschwert und an dieser Stelle nicht weiter beurteilt werden kann. Die mechanischen Prüfungen bringen bis auf den 100 % Mahlguteinsatz bei der Kerbschlagbiegeprüfung durchweg positive Ergebnisse hervor. Ähnliche Resultate werden auch bei dem Regranulat erzielt. Allerdings zeigen hier auch der MVR-Wert und die Kerbschlagbiegeprüfungen einen Materialabbau an. Die geringe Schlagzähigkeit bei 100 % Mahlgut und Regranulat muss allerdings nicht zwingend von Bedeutung sein, da das PC schon an sich hohe Schlagzähigkeiten aufweist. Die Einzelergebnisse der jeweiligen Untersuchungen sind in den nachfolgenden Unterabschnitten dargestellt.

Bei dem vorliegenden Materialgemisch ist allerdings kein Standardverhalten zu erwarten und es kann auch nicht durch Materialanalysen definiert werden. Durch diese Voraussetzungen wird der Produktionsprozess ggf. erheblich beeinträchtigt. Ein Gemisch kann aufgrund der vorliegenden Nachweise nicht für Produkte in der Elektroindustrie eingesetzt werden. Da das Material sich grundsätzlich gut für das Recycling eignet, sollten Einzelchargen im besten Fall separiert werden und es sollte die Kreislaufführung für ein Hilfsprodukt als Zielbild definiert werden. PC-Materialien werden beispielsweise als (Schutz-)Abdeckungen, Spulenkörper oder Gehäuse eingesetzt (Baur et al., 2019, S. 163–164).

4.1.3.1 Feuchtemessung

Als erste Untersuchung wurde der Feuchtegehalt des PC gemessen. Als Referenzmessung (Granulat „G“) wurde ein definiertes PC Material herangezogen. Die Feuchtemessung zeigt, dass sowohl das Mahlgut als auch das Regranulat einen hohen Feuchtegehalt aufweisen. Mit einem Feuchtegehalt beim Mahlgut von 0,178 % liegt dieser allerdings noch unter der maximalen Wasseraufnahme von 0,35 %. Das Regranulat hingegen zeigt einen leicht höheren Feuchtegehalt als das Granulat auf. Beide Sekundärrohstoffe, das Mahlgut und das Regranulat haben allerdings bedingt durch den erhöhten Feuchtegehalt höhere Trocknungszeiten als vom Hersteller empfohlen. Die Messparameter sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Tabelle 16: Feuchtegehalte und Trocknungszeiten, PC (Quelle: eigene Darstellung)

Probe	Feuchtegehalt Probe [%]	max. Verarbeitungsfeuchte [%]	Trocknungszeiten bis zur Verarbeitungsfeuchte [h]	empfohlene Trocknungszeit [h]
3-G	0,039	0,02	–	2–4
3-M	0,178	0,02	9	2–4
3-R	0,053	0,02	5	2–4

4.1.3.2 Farbmessung

Die Auswertung der Farbe vom untersuchten PC-Gemisch zeigt, dass durch das Farbgemisch die Farbe, rein visuell betrachtet, ein ansehnliches und gleichmäßiges Dunkelgrau ergibt. Durch das Gemisch ist die Farbe allerdings nicht dauerhaft auf dem gleichen Niveau zu halten, auch ein Vergleich mit einem Standard ist nicht möglich. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf eine Darlegung der Einzelergebnisse verzichtet. Findet man allerdings in der Elektroindustrie eine Anwendung, bei der die Formteile keinen besonderen Qualitäts- und Farbanprüche haben, ist das Material rein auf die Farbe bezogen wiedereinsatzbar, denn es sind keine Schlieren, Farbungleichheiten oder Ähnliches erkennbar.

4.1.3.3 UV- Lagerung und Klimalagerung

Auch die UV-Lagerungen und Klimalagerungen zeigen neben den als normal eingestuften Migrationen keine Farbmigration. Da wie unter Punkt 4.1.3.2 schon beschrieben, kein Farbvergleich möglich sind, wird auch an dieser Stelle auf eine weitere Auswertung verzichtet.

4.1.3.4 Messung des Glührückstands

Da keines der PC-Materialien Glasfasern enthält, wurde eine Ermittlung des Glührückstandes nicht durchgeführt.

4.1.3.5 Messung der Korngröße

Um eine Abschätzung der Körnung vom Mahlgut zu erhalten, wurde auch für das PC-Gemisch eine Siebanalyse durchgeführt (s. Abbildung 36). Da die vorliegenden Kunststofftypen in keinem internen Prozess gemahlen werden, konnte kein Vergleich mit einem internen Mahlgut herangezogen werden.

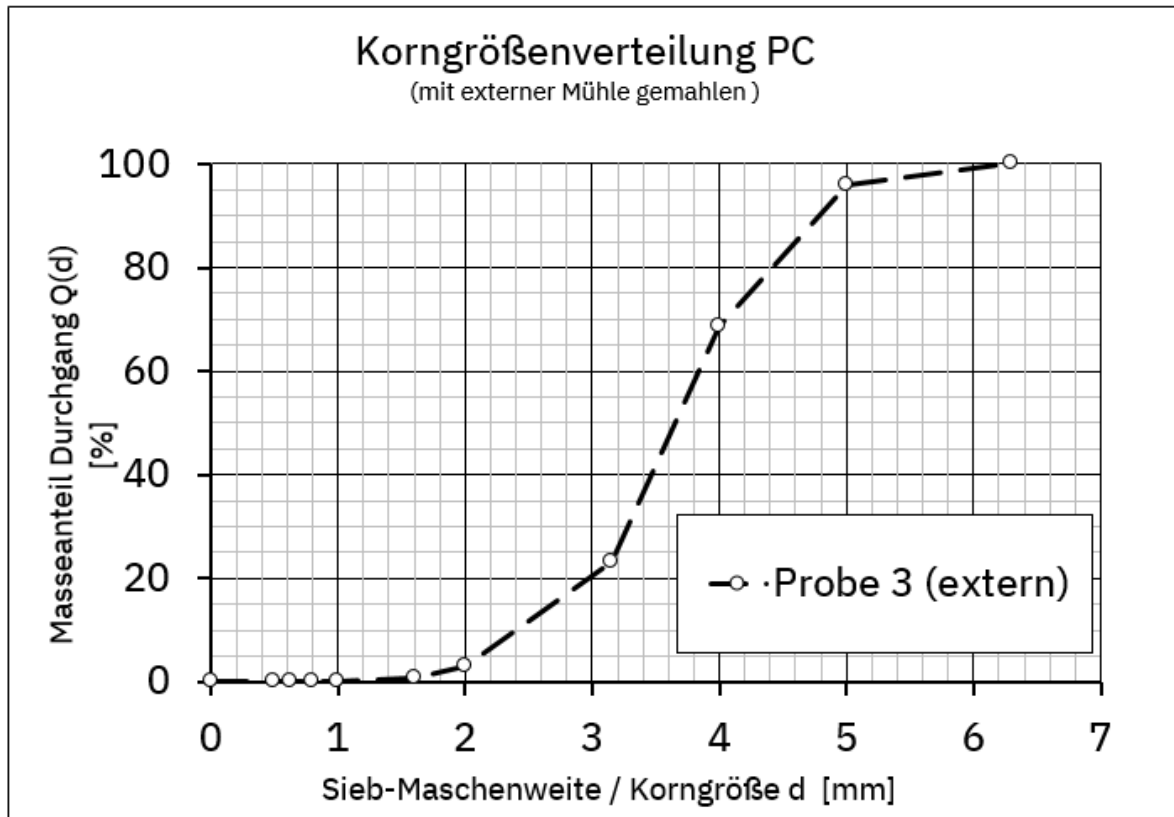


Abbildung 36: Korngrößenverteilung PC (Quelle: eigene Darstellung)

Die Größenverteilung im Bereich < 1 mm und > 4 mm zeigt allerdings auch ohne weiteren Vergleich ganz deutlich, dass der Partikelanteil < 1 mm sehr gering ist und die großen Körnungen > 4 mm mit einem hohen Anteil im Mahlgut vom PC enthalten sind (s. Abbildung 37). Der geringe Anteil der kleinen Partikel ist durch die Polymerstruktur des PC zu erklären und für die Weiterverarbeitung von Vorteil. Inwieweit das Mahlgut allerdings einzusetzen ist, zeigt die Auswertung der Prozessdaten in Unterkapitel 4.1.3.10.

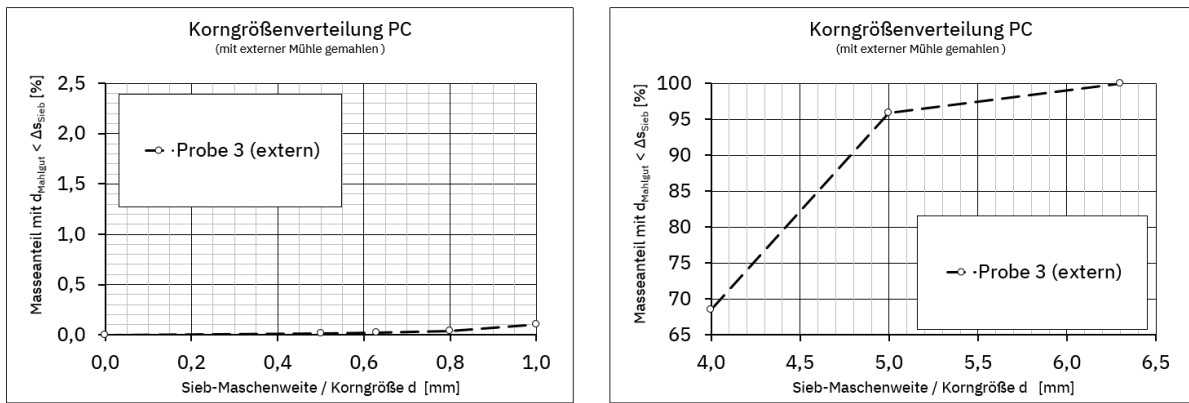


Abbildung 37: Korngrößenverteilung PC < 1/ > 4 mm (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.3.6 Analyse des Fließverhaltens (Schmelzviskosität)

Für das PC wurde eine MVR-Messung durchgeführt. Die Auswertung der Schmelzviskosität hat ergeben, dass das Mahlgut im Toleranzbereich liegt und damit weitgehend den gleichen Standard, wie die verglichene Frischmaße, einhält. Beim Regranulat ist eine Steigerung des MVR-Wertes zu erkennen – und diese überschreitet den oberen Toleranzbereich (s. Abbildung 43). Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass es sich um ein Gemisch aus vielen unterschiedlichen Materialien handelt und für die Festlegung des Toleranzbereiches nur ein Material herangezogen wurde. Anzumerken ist dabei, dass keiner der eingesetzten Primärrohstoffe, die in dem Gemisch enthalten sind, über einem MVR von $20 \text{ cm}^3/10 \text{ min}$ liegt, sodass von einem Kettenabbau, der zur Verringerung der Schmelzviskosität führt, auszugehen ist.

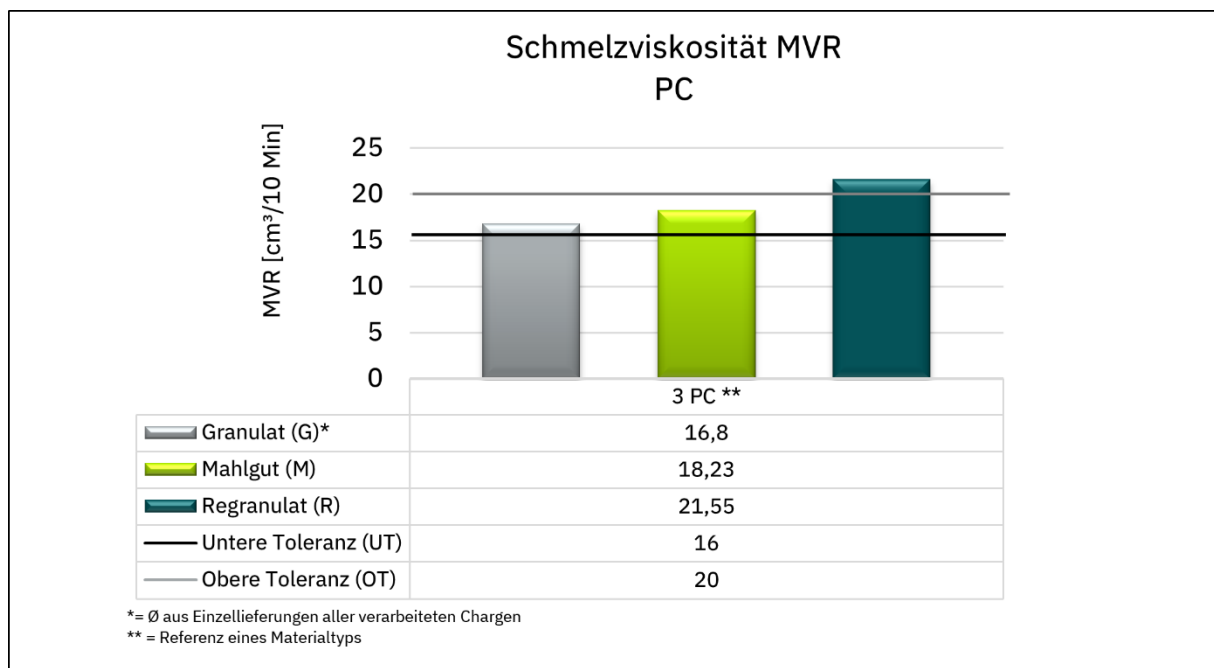


Abbildung 38: Schmelzviskosität PC (eigene Darstellung)

4.1.3.7 Analyse des Fließverhaltens (Hochdruck-Kapillarrheometrie)

Weiterführende Untersuchungen durch die rheometrischen Analyse zeigen, dass das Materialgemisch sich nach keinem Standard verhält und es schwer ist, eine wissenschaftliche Aussage über die Materialeigenschaften zu treffen. Bei den in Abbildung 39 dargestellten berechneten Kurven sowie den vorliegenden Messwerten ist zu erkennen, dass die drei Stufen sich in den niedrigen Schergeschwindigkeiten, wie auch bei den MVR-Messungen, in den Abstufungen Granulat, Mahlgut und Regranulat voneinander unterscheiden. In den hohen Schergeschwindigkeitsbereichen weisen sie jedoch ein vergleichbares Verhalten auf, sodass die Kurven sich sogar schneiden (IKV, 2023b, S. 8–9). Diese Verläufe können daher nicht weiter interpretiert werden.

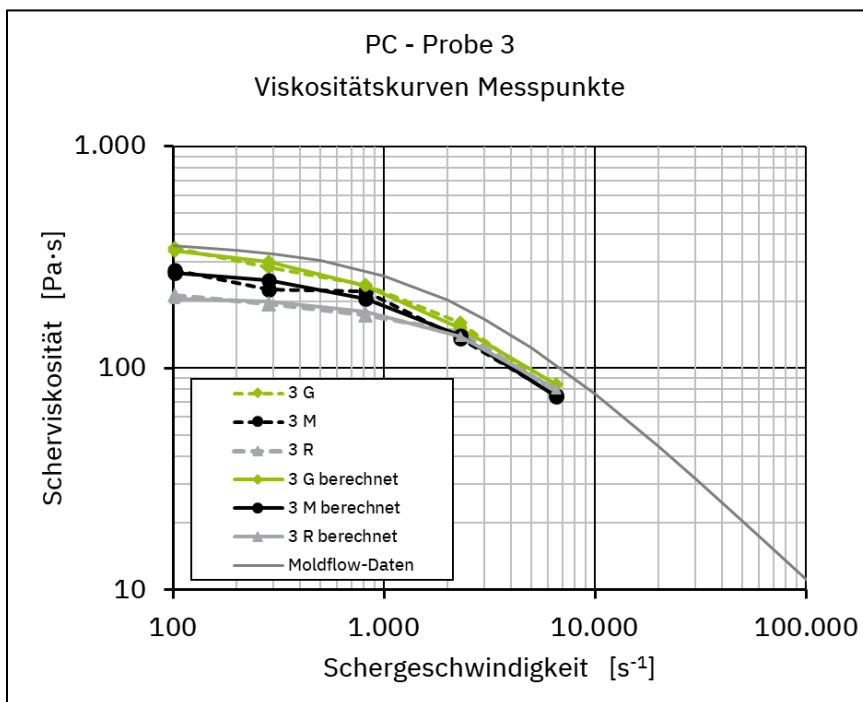


Abbildung 39: Viskositätsmodell PC (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an IKV, 2023b)

4.1.3.8 Zugversuche (E-Modul, Zugfestigkeit)

Die mechanischen Prüfungen geben im nachfolgenden Aufschluss darüber, wie sich das Materialgemisch nach den einzelnen Aufbereitungsstufen verhält. Hierbei sind keinerlei Unterschiede im E-Modul und in der Zugfestigkeit zu erkennen (s. Tabelle 17), so dass die Qualität in diesem Fall als erfüllt angesehen wird.

Tabelle 17: Ergebnisse der Zugprüfungen, PC (Quelle: eigene Darstellung)

Probe	Referenzwert Hersteller	Zugmodul – E-Modul [MPa] nach ISO 527-1*			Zugfestigkeit – σ_M [MPa] nach ISO 527-1*		
		G	M	R	G	M	R
3 (PC)	2350	2353	2335	2345	62	62	62

* \bar{x} = 5 Messungen

4.1.3.9 Kerbschlagbiegeprüfung

Des Weiteren wurden, gemäß dem Prüfplan aus Kapitel 4, Kerbschlagbiegeprüfungen durchgeführt. Polycarbonate gelten grundsätzlich als sehr schlagzäher Kunststoff (Abts, 2020, S. 202). Dies zeigt auch die hohe Schlagzähigkeit, die bei der Referenzprobe bei $13,83 \text{ kJ/m}^2$ liegt. Bei den Rezyklaten ist auch für das PC deutlich zu erkennen, dass die Schlagfestigkeit mit der höher der Beimischungsmenge sinkt (s. Abbildung 40). So ist der Mischungsanteil mit 25 % Mahlgut oder Regranulat noch nahe der Referenzprobe, wohingegen bei den Proben mit 50 % Regranulat und 100 % Mahlgut sowie Regranulat schon ein deutlich niedriger Wert nachgewiesen wird. Die Standardabweichung der einzelnen Proben ist als nahezu gleich anzusehen und hat keine Einfluss auf die Gesamtauswertung.

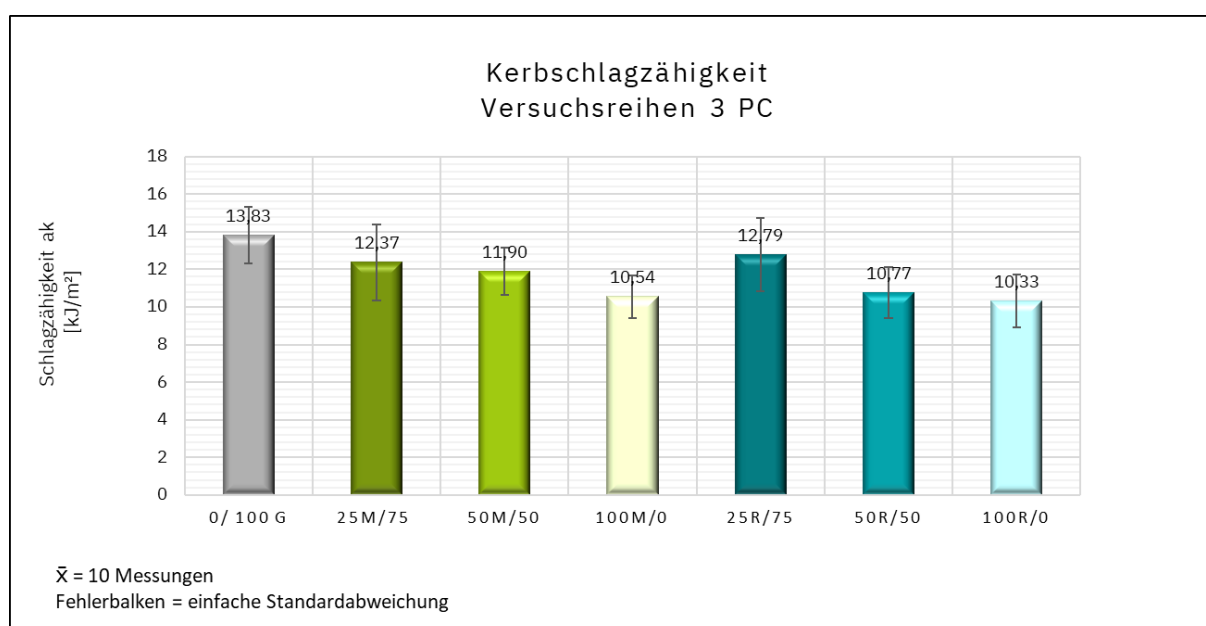


Abbildung 40: Kerbschlagzähigkeit PC (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.3.10 Prozessdaten

Im folgenden Abschnitt werden die Prozessdaten dargelegt. Während der Aufzeichnung der Prozessdaten, kam es allerdings immer wieder zu technischen Problemen bei der Übertragung der Daten auf einen USB-Stick, sodass die Daten nur lückenhaft vorliegen. Die vorliegenden Daten zeigen, dass vor allem die Dosierzeiten bei dem 100 %igen Mahlgut, stark schwanken und sich keine gleichbleibende Dosierung einstellt (s. Abbildung 41). Beim Einspritzdruck zeigt sich bei dem Spitzgießprozess der Kerbschlag-Probekörper, dass die Anwendung von 50 % Mahlgut starke Schwankungen aufweist (s. Abbildung 42). Das Massepolster hingegen, ist bei allen Beimischungsformen konstant und nur geringfügig niedriger als bei dem Primärmaterial und wird an dieser Stelle nicht extra aufgeführt. Prozessseitig spricht einem Einsatz von einem gemischtem Regranulat nichts entgegen, da die Prozessparameter konstant gehalten werden

können, lediglich der Einsatz von Mahlgütern führt zu stärkeren Schwankungen im Produktionsprozess. Die Schwankungen beim Mahlgut können aufgrund der Anteile des Gemisches nicht abgeschätzt werden, sodass die Einstellung der Spitzgießmaschine erschwert wird und für einen industriellen Prozess nicht zu empfehlen ist.

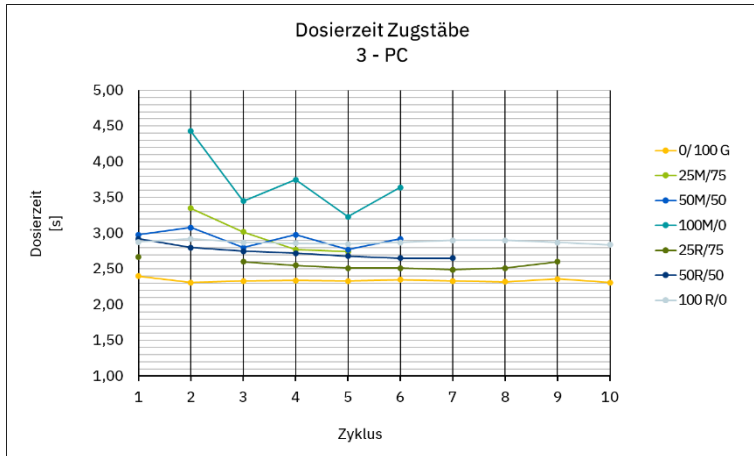


Abbildung 41: Dosierzeit Zugstäbe PC, Probe 3 (Quelle: eigene Darstellung)

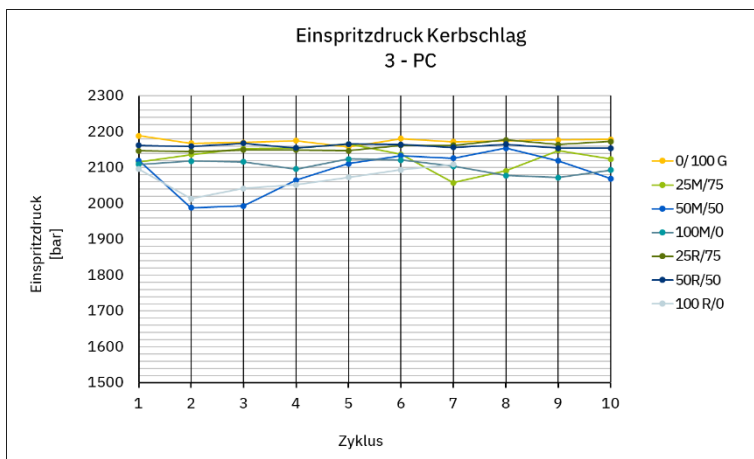


Abbildung 42: Einspritzdruck Kerbschlag PC, Probe 3 (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.4 Versuchsreihe 4: flüssig-kristalline Polymere (LCP)

Für eine weitere Versuchsreihe wurde das LCP als flüssig-kristallines Polymer ausgewählt. Die Kunststoffeigenschaften wurden für dieses Material in Unterkapitel 3.2.4 beschrieben. Es handelt sich um ein LCP in Schwarz. Die ganzheitliche Bewertungsmatrix in Tabelle 18 für das LCP gibt Aufschluss über die Materialqualität und die damit zusammenhängende Degradation der jeweiligen Verarbeitungsschritte.

Bei dem vorliegenden Material spielen Farbe und Feuchte nur eine untergeordnete Rolle für die Bewertung. Die UV-Lagerung zeigt einen Farbumschlag, dieser ist allerdings auch zu

vernachlässigen. Beim Glührückstand konnte zudem kein Abbau von Glasfasern oder Additiven nachgewiesen werden. Die Körnung ist, aufgrund der Materialstruktur, als eher problematisch zu betrachten, da das Mahlgut einen hohen Staubanteil aufweist, der sich auch bei der Siebanalyse als schwer händelbar zeigte, da sich die feinen Staubpartikel statisch aufluden und kaum rieselfähig waren. Eine MVR-Messung ist technisch nicht möglich – somit kann die Fließfähigkeit ausschließlich über die rheometrische Analyse beurteilt werden. Die Analyse zeigt eine eindeutige Degradation des Kunststoffes je Aufschmelzprozess. Folglich sind die Abstufung und die sinkende Scherviskosität vom Regranulat als sehr hoch anzusehen. Auch die mechanischen Untersuchungen geben ein eindeutiges Ergebnis, dass das Regranulat im Einsatz von 100 % ungeeignet ist. Der Einsatz von Mahlgut bzw. die Beimischung von Mahlgut ist zwar aus mechanischer Sicht besser geeignet, aber für die Verarbeitung im Prozess als kritisch anzusehen. So ist die am besten einzusetzende Verarbeitungsform das Regranulat, das allerdings maximal mit einem Anteil von 25 % beigemischt werden kann, um die mechanischen Eigenschaften zu erhalten. Dieses Bild zeigt sich auch bei den Prozessdaten; lediglich der Einsatz von 25 % Regranulat zeigt nährungsweise gleichbleibende Prozessverläufe, unterscheidet sich dabei aber stark vom Primärmaterial. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Anwendung von aufbereiteten LCP erschwert ist und dieses ein so ungleichmäßiges Materialverhalten zeigt, dass ein stabiler Prozess nicht möglich ist. In den nachfolgenden Unterabschnitten werden die Einzelergebnisse dargestellt. Basierend auf den Ergebnissen dieser Untersuchung wird von der Anwendung der Rezyklate in Form von Mahlgut und Regranulat abgeraten.

Tabelle 18: Bewertungsmatrix LCP – Probe 4 (Quelle: eigene Darstellung)

Materialanalyse	LCP 4					
	Mahlgut			Regranulat		
Feuchte	!!			!		
Farbe	?			?		
UV/Klima	✓			✓		
Glührückstand	✓			✓		
Körnung	!!!			-		
MVR	-			-		
rheometrische Analyse	!!			!!!		
mechanische Prüfung & Nachuntersuchung	25M/75	50M/50	100M	25R/75	50R/50	100R
Zugprüfung	?	?	?	?	?	!!!
Kerbschlag	✓	!	!!	!	!!	!!!
Prozessdaten	25M/75	50M/50	100M	25R/75	50R/50	100R
Dosierzeiten	!!!	!!!	!!	✓	!!	!!!
Einspritzdruck	!!	!!	!!	!	!!	!!!
Massepolster	!!	!!!	!!	!	!!	!!!
Gesamtbewertung	!!!	!!!	!!	!	!!	!!!

4.1.4.1 Feuchtemessung

In der Voranalyse der Mahlgüter und Regranulate wurde festgestellt, dass sowohl das Mahlgut als auch das Regranulat einen erhöhten Feuchtegehalte aufweisen. Eine Besonderheit bei diesem Material ist, dass auch das Granulat eine hohe Feuchte im Verhältnis zur Verarbeitungsfeuchte zeigt, was dadurch zu erklären ist, dass für das LCP keine maximale Anlieferfeuchte festgelegt ist. Trotz der hohen Feuchtegehalte kann die empfohlen Trocknungszeit eingehalten werden, so dass die Feuchte für die weitere Bewertung nur eine untergeordnete Rolle spielt. Die genauen Messwerte sind in Tabelle 19 aufgeführt

Tabelle 19: Feuchtegehalte und Trocknungszeiten, LCP (Quelle: eigene Darstellung)

Probe	Feuchtegehalt Probe [%]	max. Verarbeitungsfeuchte [%]	Trocknungszeiten bis zur Verarbeitungsfeuchte [h]	empfohlene Trocknungszeit [h]
4-G	0,050*	0,01	–	4–6
4-M	0,109	0,01	4	4–6
4-R	0,024	0,01	3	4–6

* = Ø aus Einzellieferungen aller verarbeiteten Chargen

4.1.4.2 Farbmessung

Die Farbmessungen der Rezyklate sind, wie die Einstufung der Feuchte, bei dem untersuchten LCP wenig aussagekräftig. Für das Primärmaterial wird in der Wareneingangsuntersuchung keine Farbmessung vorgenommen und auch das Abnahmeprüfzeugnis des Herstellers gibt keinen Aufschluss über die Farbparameter des Materials. Wird das Material mit den Farbgrenzwerten für ein Standartschwarz verglichen, fällt das Material aus dem Grenzwert und übersteigt diesen um ein Vielfaches. Nimmt man eine Farbprobe des Primärrohstoffes, zeigt sich, dass auch der Primärrohstoff die Farbparameter nicht erreicht und kein einheitliches Farbbild auf der Oberfläche entsteht. Aus den genannten Gründen wird auf einer weitere Darstellung und Bewertung der Ergebnisse verzichtet.

4.1.4.3 UV-Lagerung und Klimalagerung

Bei den UV-Lagerungen und Klimalagerungen gab es hingegen keine Auffälligkeiten und es kam nicht zu einer Farbmigration. Da allerdings keine Farbparameter für dieses Material festgelegt sind und auch keine Wareneingangsanalysen stattfinden, ist die Farbmessung nach der UV-Lagerung nur bedingt bis gar nicht relevant für den Rezyklateinsatz und wird im Weiteren nicht betrachtet.

4.1.4.4 Messung des Glührückstands

Ein wichtiger Parameter im Abnahmeprüfzeugnis des Herstellers ist für den vorliegenden glasfaserverstärkten Kunststoff der Aschegehalt, der auch für das Rezyklat mittels eines

Glührückstandes analysiert wurde. Der Glührückstand hat sich gleichermaßen beim Mahlgut und beim Rezyklat nicht verändert und liegt wie beim Primärmaterial bei rund 34 % (s. Tabelle 20). Es konnte damit kein Abbau von organischen Bestandteilen bzw. Glasfasern nachgewiesen werden.

Tabelle 20: Glührückstände LCP (Quelle: eigene Darstellung)

Probe	Glasfaseranteil Granulat [%]	Glührückstand Mahlgut [%]	Glührückstand Regranulat [%]	Glasfaseranteil Spezifikation (Hersteller) [%]
4 (LCP)	34,5	34	34	32–37 (± 2,5)

4.1.4.5 Messung der Korngröße

Des Weiteren wurden für die Mahlgüter Siebanalysen des externen und des internen erzeugten Mahlgutes durchgeführt. Die Siebanalysen zeigen eine vergleichbare Korngrößenverteilung der beiden Proben, wobei die externe Probe, gleichartig wie bei den Proben vom PA 6.6, flacher verläuft (s. Abbildung 43).

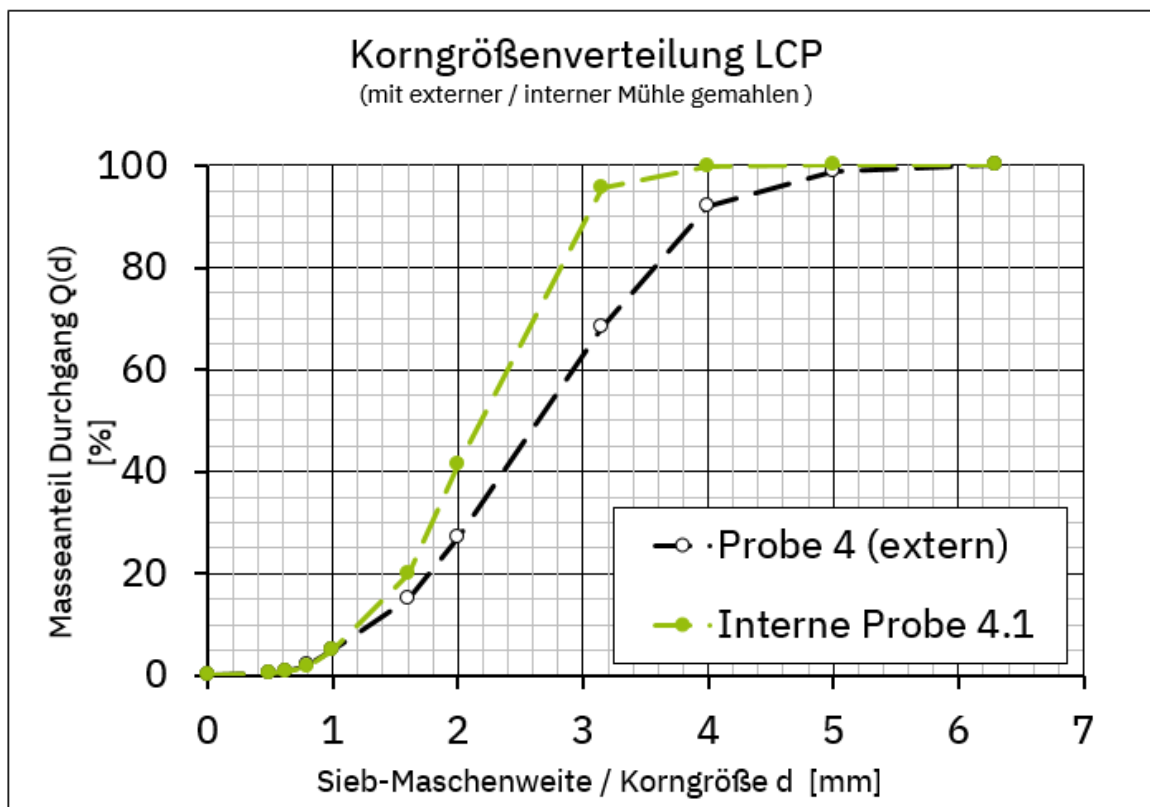


Abbildung 43: Korngrößenverteilung LCP (Quelle: eigene Darstellung)

Um weiteren Aufschluss über die fehlerfreie Anwendbarkeit für den Spitzgießprozess zu bekommen, wird die Darstellung in Abbildung 44 auf die Bereiche der Korngrößen < 1 mm und > 4 mm differenziert. Bei dieser Unterscheidung wird ersichtlich, dass die Korngrößen < 1

m sich nur unwesentlich unterscheiden, allerdings ist der Anteil von kleinen Partikeln/Staub sehr groß und kann zu Problemen in der Verarbeitung führen und ist als besonders kritisch anzusehen. Demgegenüber ist der Anteil der größeren Körnungen $> 4 \text{ mm}$ ist nur geringfügig.

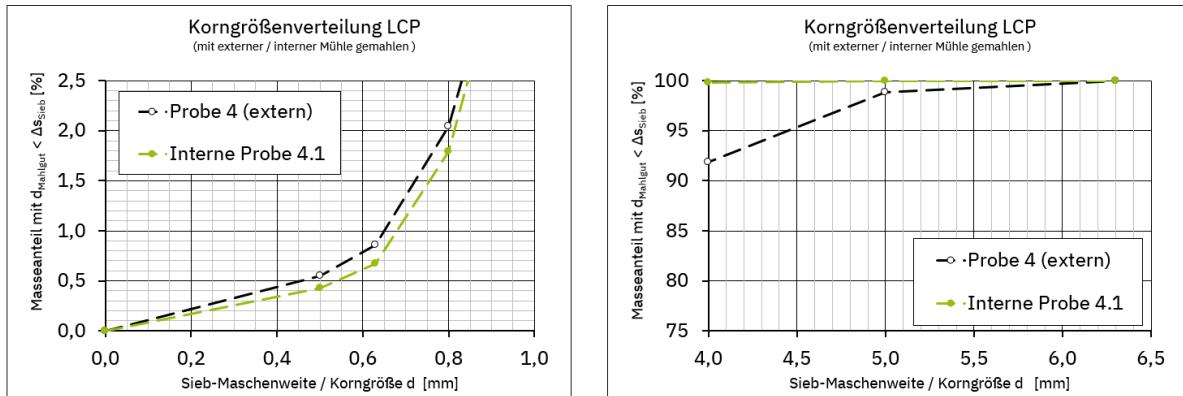


Abbildung 44: Korngrößenverteilung LCP $< 1 / > 4 \text{ mm}$ (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.4.6 Analyse des Fließverhaltens

Eine Messung der Viskosität als VZ oder MVR ist bei einem LCP nicht möglich, sodass nur die rheometrische Analyse in Unterkapitel 4.1.4.7 Aufschluss über die Veränderung der Viskosität gibt.

4.1.4.7 Analyse des Fließverhaltens (Hochdruck-Kapillarrheometrie)

Die rheometrische Analyse soll aufzeigen, wie sich die Fließeigenschaften des Kunststoffes darstellen. Auffällig dabei ist, dass die berechneten Kurven, wie in Abbildung 45 dargestellt, nicht mit den Moldflow-Daten übereinstimmen. Die gemessenen Daten zeigen allerdings ein in sich schlüssiges Bild mit einem sehr ähnlichen Kurvenverlauf. Durch die vorliegenden Messungen wird für das LCP belegt, dass jeder Aufschmelzprozess zu einer Reduzierung der Scherviskosität führt. Das Regranulat ist, bedingt durch die stark abfallende Viskosität, nur noch begrenzt als Rezyklat im Spritzgießprozess einsetzbar. Die mechanischen Versuche geben weiteren Aufschluss über den Einsatz und die Anwendbarkeit. Vor allem die Abstufungen sowie die Beimischungsanteile sind dabei von Bedeutung.

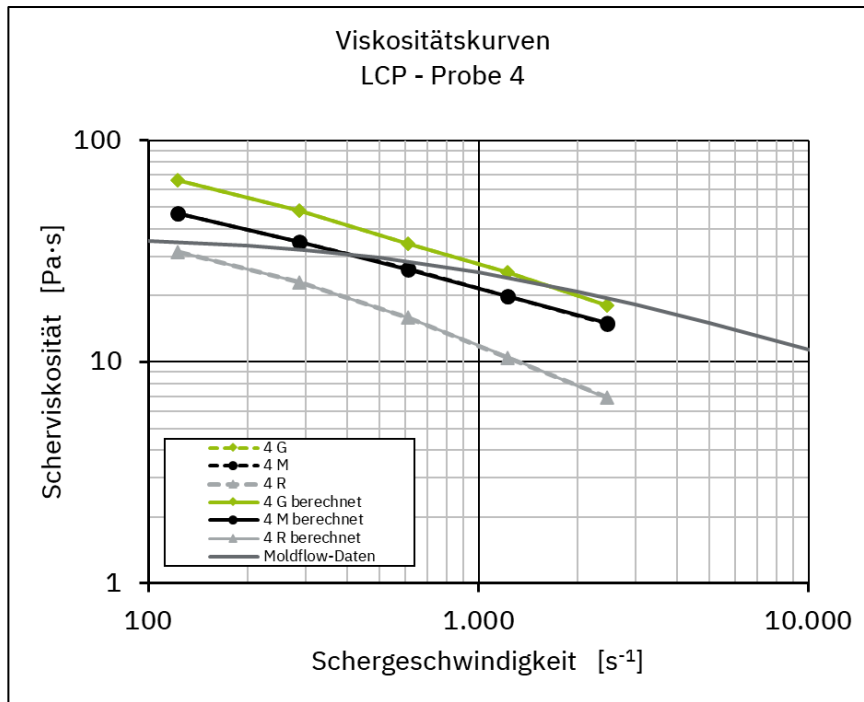


Abbildung 45: Viskositätsmodell LCP, Probe 4 (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an IKV, 2023b)

4.1.4.8 Zugversuche (E-Modul, Zugfestigkeit)

Die Zugversuche liefern Informationen über die mechanische Belastbarkeit des Materials. Vor allem bei glasfaserverstärkten Kunststoffen, wie vorangegangen auch beim PBT es zu Qualitätsverlusten der Glasfasern gekommen sein. Die Messergebnisse, die in Tabelle 21 dargestellt sind, zeigen, dass zu einer Abnahme des E-Moduls beim Regranulat im Vergleich zum Mahlgut kommt. Für das Mahlgut kann keine Aussage getroffen werden, da das E-Modul im direkten Vergleich zum Granulat höher liegt, was aber mit der Chargenschwankung zu tun haben kann. Das gleiche gilt für die Werte der Zugfestigkeit. Auch eine Darstellung der Spannungs-Dehnungskurven ist an dieser Stelle nicht vergleichbar.

Tabelle 21: Ergebnisse der Zugprüfungen, LCP (Quelle: eigene Darstellung)

Probe	Referenzwert Hersteller	Zugmodul – E-Modul [MPa] nach ISO 527-1*			Zugfestigkeit – σ_M [MPa] nach ISO 527-1*		
		G	M	R	G	M	R
4 (LCP)	13500	13175	13578	12806	128	134	104

* \bar{x} = 5 Messungen

4.1.4.9 Kerbschlagbiegeprüfung

Neben den Zugprüfungen wurde als mechanische Prüfung die Kerbschlagbiegeprüfung ausgewählt. Diese zeigt in der Versuchsreihe mit dem Mahlgut und dem Regranulat vor allem Auffälligkeiten im Bereich des Regranulat, wie in Abbildung 46 gut zu erkennen ist. In der Reihe der Regranulate ist der Unterschiede bei dem Einsatz von 25 %, 50 % und 100 % Regranulat

deutlich zu sehen. Der Verlust in der Schlagfestigkeit im Vergleich zu den Versuchen mit dem Mahlgut ist signifikant. Ein Einsatz von Regranulat mit $\geq 50\%$ sollte vermieden werden. Eine mögliche Ursache könnte die Neuorientierung der kristallinen Struktur bei der Regranulierung sein. Die Orientierung hat eine nachgewiesene Auswirkung auf die Schlagzähigkeit (Baur et al., 2019, S. 258). Das Mahlgut hingegen zeigt bei den Anteilen von 25 % und 50 % noch sehr gute Schlagfestigkeiten auf, die Messergebnisse bei einem Anteil von 25 % weichen sogar nur geringfügig von der Referenzprobe ab. Die Plausibilität der Werte wird mit der einfachen Standardabweichung dargestellt; diese zeigt ein einheitliches Bild bei allen Messungen.

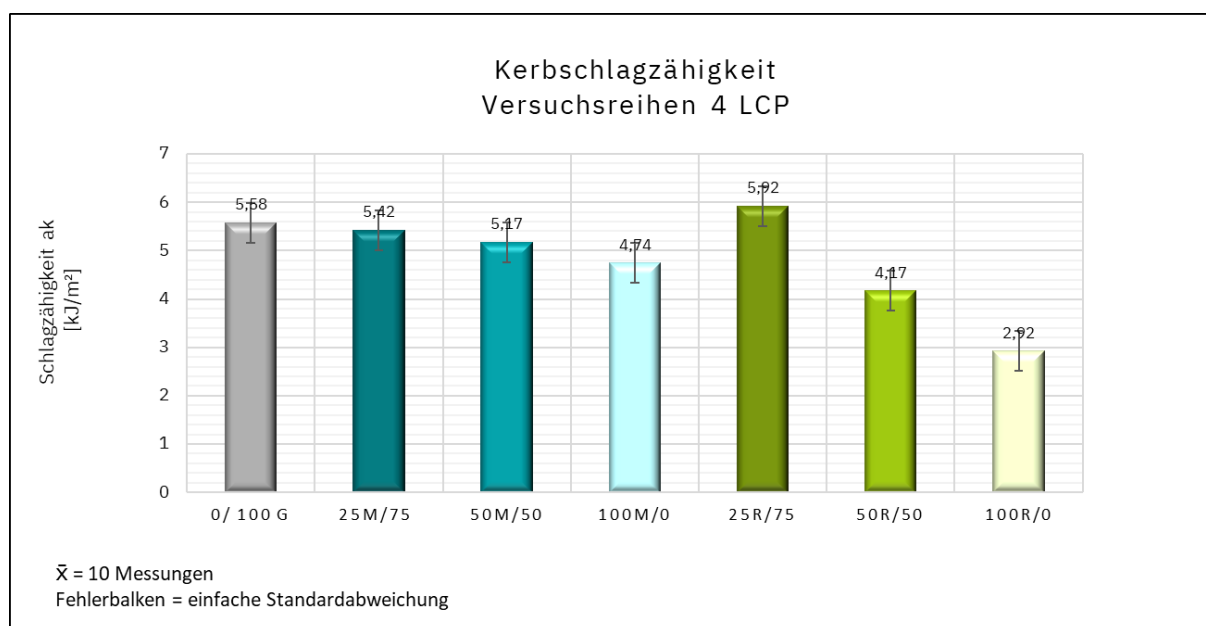


Abbildung 46: Kerbschlagzähigkeit LCP, Probe 4 (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.4.10 Prozessdaten

Für das LCP wurden die Prozessdaten der Zugstäbe und Kerbschlagkörper beispielhaft in den nachfolgende Abbildungen 47 bis 49 aufgeführt. Die Parameter der Dosierzeiten, der Einspritzdrücke und des Massepolsters ergeben dabei kein einheitliches und konstantes Bild. Das LCP zeigt im Vergleich zu allen anderen aufbereiteten Materialien die stärksten Schwankungen. Betrachtet man diese im Einzelnen so zeigt sich, dass der Mahlguteinsatz mit 25 % und 50 % die stärksten Differenzen aufweist. Auch der Einsatz von 100 % Regranulat zeigt erhebliche Ungleichmäßigkeiten auf. Eine konstante Verarbeitung ist bei keinem der aufbereiteten Materialien zu erkennen, lediglich der Einsatz von 25 % Regranulat zeigt nährungsweise gleichbleibende Prozessverläufe, unterscheidet sich dabei aber stark vom Primärmaterial. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Anwendung von aufbereiteten LCP erschwert ist und dieses ein so ungleichmäßiges Materialverhalten zeigt, dass ein stabiler Prozess nicht möglich ist.

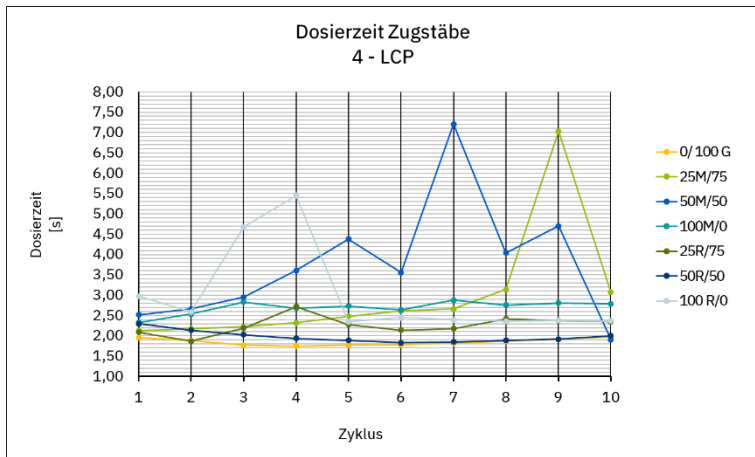


Abbildung 47: Dosierzeit Zugstäbe LCP, Probe 4 (Quelle: eigene Darstellung)

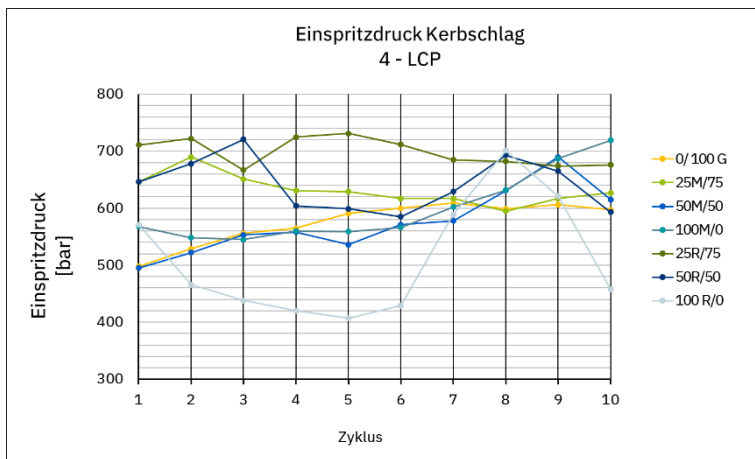


Abbildung 48: Einspritzdruck Kerbschlag LCP, Probe 4 (Quelle: eigene Darstellung)

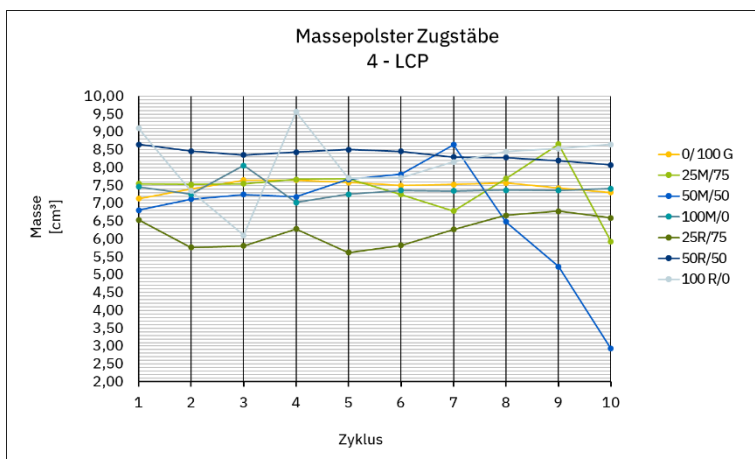


Abbildung 49: Massepolster Zugstab LCP, Probe 4 (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.5 Versuchsreihe 5: Thermoplastisches Polyurethan (TPU)

Die fünfte Versuchsreihe wurde mit einem thermoplastischen Elastomer, dem TPU, ausgeführt. Die Eigenschaften und die Besonderheiten wurden in Unterkapitel 3.2.5 erläutert. Bei dem vorliegenden Kunststoff handelt sich um ein TPU in Natur. Dem Material wird vor der Verarbeitung ein Masterbatch in Schwarz zugesetzt; dadurch wird das Material erst mit der Schmelze eingefärbt. Wie auch bei den vorangegangenen Materialien wird eine abschließende Beurteilung der Materialeigenschaften über eine Bewertungsmatrix gegeben (s. Tabelle 22). Letztere stellt sowohl die Ergebnisse der Materialanalysen als auch die der mechanischen Untersuchungen dar.

Bei der Auswertung der Ergebnisse ist die Feuchte des Mahlgutes kennzeichnend, auch das Regranulat zeigt eine hohe Feuchte auf; diese liegt aber näherungsweise mit dem Primärmaterial gleich. Die Farbe ist ebenfalls sehr gut, was nicht zuletzt damit zu begründen ist, dass ein Masterbatch in Schwarz direkt in der Verarbeitung zugesetzt wird und das Material damit einen starken Schwarzanteil aufweist, der auch durch die weitere Verarbeitung nicht maßgeblich geschädigt wird. Die Körnung des Mahlgutes ist zudem als sehr gut anzusehen. Demgegenüber zeigt die Viskosität eine eindeutige Schädigung nach dem ersten Verarbeitungsprozess, die sowohl bei der MVR-Messung als auch bei der rheometrischen Analyse nachgewiesen werden konnte. Die zweite Verarbeitung zum Regranulat hat an dieser Stelle nicht mehr so viel Einfluss auf die Materialschädigung. Die mechanischen Prüfungen demonstrieren, dass sowohl das eine Mahlgut als auch Regranulat nicht mehr einsatzfähig sind. Vor allem beim Regranulat können keine mechanischen Anforderungen eingehalten werden und das Material bricht beim Kerbschlagbiegeversuch sogar, entgegengesetzt den Herstellerangaben. Aufgrund der stark veränderten Fließeigenschaften ist eine Verarbeitung des TPU als eher kritisch anzusehen. Betrachtet man ausschließlich die Materialeigenschaften, wäre eine Beimischung von 25 % Mahlgut möglich. Aufgrund der guten Korngrößen wäre auch eine Weiterverarbeitung zum Regranulat nicht notwendig. Allerdings zeigen die Prozessdaten erhebliche Einschränkungen und das 100 %ige Regranulat ist gar nicht zu verarbeiten. Wie beschrieben, ist auf Basis der mechanischen Prüfungen und der damit zusammenhängenden Materialeigenschaften ein 25%iges Mahlgut anwendbar. An dieser Stelle ist aber zu bedenken, dass aufgrund des veränderten Fließverhaltens diese nur mit weitergehenden Maschineneinstellungen möglich sind, um einen reibungslosen Prozessablauf zu gewährleisten.

Tabelle 22: Bewertungsmatrix TPU – Probe 5 (Quelle: eigene Darstellung)

Materialanalyse	TPU 5					
	Mahlgut			Regranulat		
Feuchte	!!!			!		
Farbe	✓			✓		
UV/Klima	✓			✓		
Glührückstand	✓			✓		
Körnung	✓			-		
MVR	!!!			!!		
rheometrische Analyse	!!!			!!		
mechanische Prüfung & Nachuntersuchung	25M/75	50M/50	100M	25R/75	50R/50	100R
Zugprüfung	!!	!!	!!!	!!	!!!	!!!
Kerbschlag	!!	!!	!!	!!	!!	!!!
Prozessdaten	25M/75	50M/50	100M	25R/75	50R/50	100R
Dosierzeiten	✓	!!	!!	!	✓	!!!
Einspritzdruck	!	!!	!!!	!	!!	!!!
Massepolster	✓	✓	✓	!	✓	!!!
Gesamtbewertung	!	!!	!!	!	!!	!!!

4.1.5.1 Feuchtemessung

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse der Feuchtemessung für das TPU dargestellt. Auffällig ist, dass bei der Voranalyse sowohl das Granulat als auch das Rezyklat sehr feucht ist, wobei das Mahlgut die höchste Feuchtigkeit aufweist (s. Tabelle 23). Wie beim LCP sind auch beim TPU keine Wareneingangswerte mit dem Hersteller des Granulats für die Feuchte festgelegt. Das Material ist nach Herstellerangaben grundsätzlich feuchteempfindlich, eine maximale Feuchteaufnahme wurde allerdings in den Herstellerspezifikationen nicht angegeben. Das Mahlgut zeigt einen erhöhten Feuchtegehalt. Das Regranulat hingegen zeigt einen bessere Feuchtwerte hat als das Granulat. Die Trocknungszeiten liegen in den genannten Fällen über den empfohlen Trocknungszeiten des Herstellerst. Grundsätzlich ist der Einsatz des Mahlgrundes, aufgrund der hohen Feuchte, als kritisch zu betrachten

Tabelle 23: Feuchtegehalte und Trocknungszeiten, TPU (Quelle: eigene Darstellung)

Probe	Feuchtegehalt Probe [%]	max. Verarbeitungsfeuchte [%]	Trocknungszeiten bis zur Verarbeitungsfeuchte [h]	empfohlene Trocknungszeit [h]
5-G	0,098*	0,02	-	3-4
5-M	0,518	0,02	6	3-4
5-R	0,059	0,02	5	3-4

* = Ø aus Einzellieferungen aller verarbeiteten Chargen

4.1.5.2 Farbmessung

Zur Durchführung der Farbmessungen wurden, wie auch bei den vorherigen Proben, Farbmusterplatten hergestellt und untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 50 aufgezeigt. Beim TPU besteht die Besonderheit darin, dass das eingesetzte Granulat in der Farbe Natur vorliegt und mit einem Masterbatch in Schwarz verarbeitet wird. Für dieses Material lagen keine Vergleichswerte für die Farbmessung vor – daher wurden zusätzlich Farbmessungen für

das Granulat inkl. Masterbatch durchgeführt. Die Farbmessungen der Farbmusterplatten vom Mahlgut und vom Regranulat zeigen eine sehr gute Farbstabilität, was voraussichtlich auf die direkte Beimischung des Masterbatches beim Granulat zurückzuführen ist. Die Farbmessung des Granulates, inkl. Masterbatch, präsentiert auch ein sehr deutliches Schwarz.

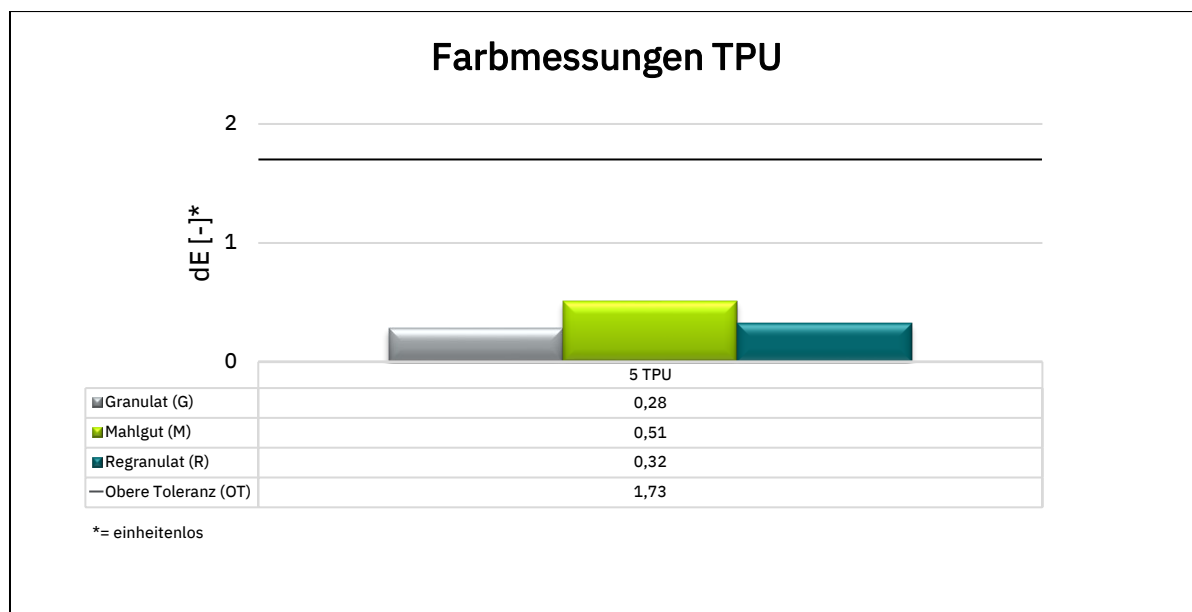


Abbildung 50: Farbmessungen TPU (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.5.3 UV-Lagerung und Klimalagerung

Aufbauend auf die Untersuchung der Farbe, wurden die Farbmusterplatten im nächsten Schritt einer UV-Lagerung und Klimalagerung unterzogen. Bei den UV-Lagerungen und Klimalagerungen konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden. Neben der Farbmigration wurden die Platten, mit denen die UV-Lagerung stattgefunden hat, ein weiteres Mal auf ihre Farbe hin untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 51 dargestellt und lagen alle im Toleranzbereich.

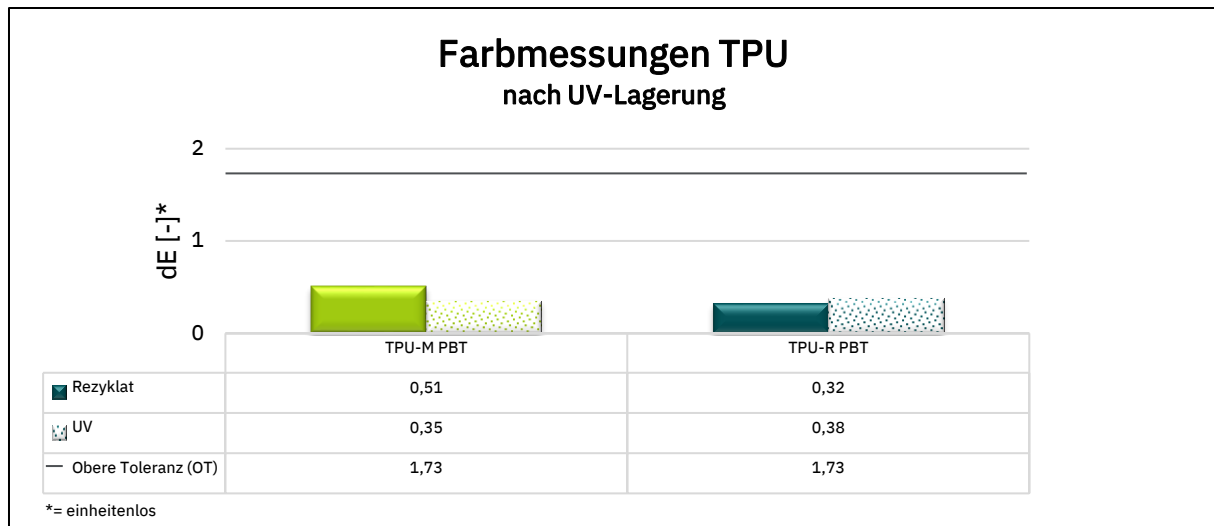


Abbildung 51: Farbmessungen TPU nach der UV-Lagerung (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.5.4 Messung des Glührückstands

Der Massenanteil der Glasfasern ist für jeden Materialtyp unterschiedlich und ist vom Hersteller bei der Probe 5 mit 20 % angegeben. Dabei liegt die Glasfaserdosierung nach Herstellerangaben bei ± 2 % absolut. In Tabelle 24 sind die analysierten Glührückstände enthalten. Gegenüber dem Primärmaterial wurde beim Sekundärmaterial ein leichter Rückgang des Glührückstandes ermittelt, dieser unterschied sich allerdings nicht beim Mahlgut sowie beim Regranulat und lag innerhalb der Herstellerspezifikation. Der Abbau der organischen Stoffe steht damit nicht im Vordergrund für die Weiterverarbeitung.

Tabelle 24: Glührückstände TPU (Quelle: eigene Darstellung)

Probe	Glasfaseranteil Granulat [%]	Glührückstand Mahlgut [%]	Glührückstand Regranulat [%]	Glasfaseranteil Spezifikation (Hersteller) [%]
5 (TPU)	20	19	19	18–22(± 2)

4.1.5.5 Messung der Korngröße

Für die weitere Beurteilung des Einsatzes vom TPU-Mahlgut, wurde eine Siebanalyse zur Korngrößenmessung durchgeführt. Wie in Abbildung 52 dargestellt, ist die Korngrößenverteilung stark im mittleren Korngrößenbereich verteilt, was ein Vorteil für die Verarbeitung ist. Die nähere Betrachtung der kleineren und größeren Körnungen in Abbildung 53 zeigt zudem, dass die Anteile in diesen Bereichen nur geringfügig sind – was die Annahme stützt, dass die Korngröße des TPU-Mahlgutes keinen wesentlichen Einfluss auf den Produktionsprozess hat.

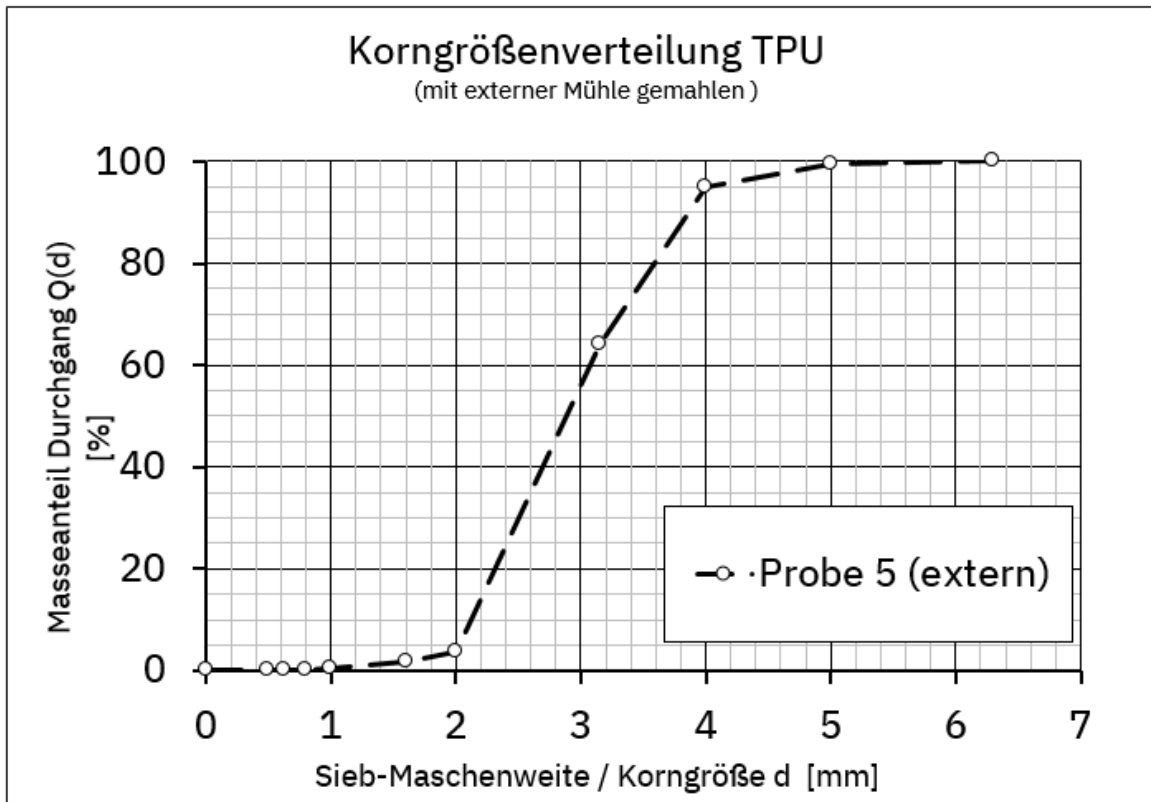


Abbildung 52: Korngrößenverteilung TPU (Quelle: eigene Darstellung)

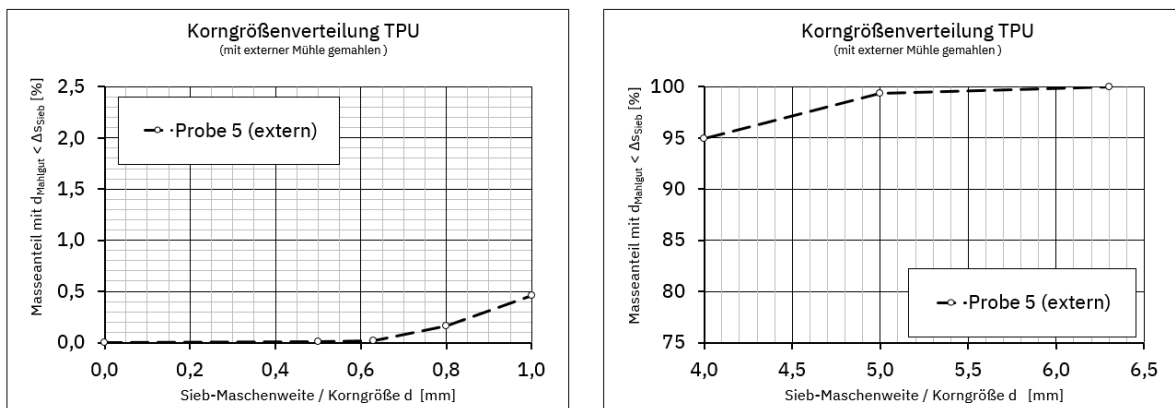


Abbildung 53: Korngrößenverteilung TPU < 1 / > 4 mm (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.5.6 Analyse des Fließverhaltens (Schmelzviskosität)

Eine wichtige Kenngröße für die reibungslose Verarbeitung von Rezyklaten ist die Viskosität, die mit der MVR-Messung geprüft wird. Anders als bei den anderen Kunststofftypen gibt es für die Viskosität des TPU keine Grenzwerte. Aus diesem Grund können lediglich die Schmelzviskositäten des Primär- und Sekundärmaterials gegenübergestellt werden. Dabei ist, wie in Abbildung 54 dargestellt, die Steigerung in den Verarbeitungsschritten Mahlgut und

Regranulat eindeutig zu erkennen. Da keine Grenzwerte vorliegen, sind die Werte und der mögliche Kettenabbau allerdings nur schwer zu interpretieren. Die Bewertung der Viskosität findet daher anhand der Ergebnisse aus der rheologischen Analyse statt.

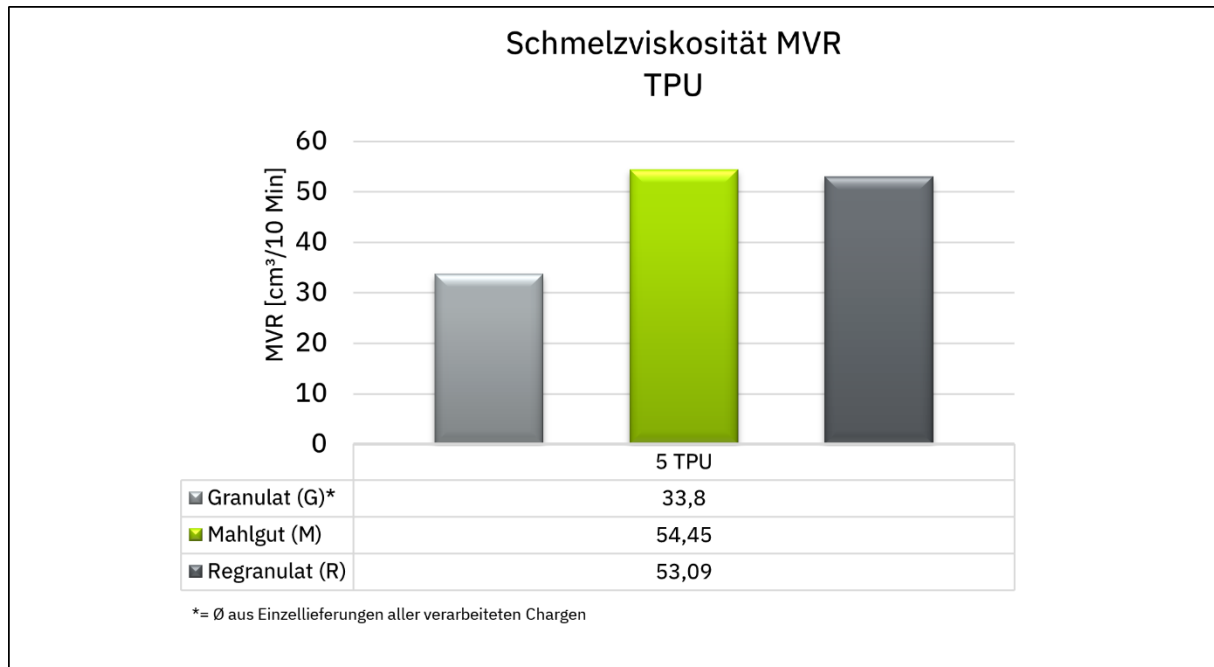


Abbildung 54: Schmelzviskosität TPU (Quelle: eigene Darstellung)

4.1.5.7 Analyse des Fließverhaltens (Hochdruck-Kapillarrheometrie)

Für die rheologische Analyse wurde, wie bei den anderen Materialien, die mittlere Verarbeitungstemperatur als Schmelztemperatur herangezogen. Da das Material bei den angegebenen 210 °C im Versuchsdurchlauf noch nicht vollständig aufgeschmolzen war, wurde die Temperatur auf 230 °C angepasst (IKV, 2023b, S. 5). Für 230 °C konnte keine Viskositätskurve als Referenz ermittelt werden, sodass die Referenzkurve der Schwerviskosität bei 210 °C liegt und somit nicht direkt verglichen werden kann. Anhand von Referenzdaten bei 190 °C, 200 °C und 210 °C ist davon auszugehen, dass die Kurven mit steigender Temperatur in einem niedrigeren Viskositätsbereich liegen – d. h., dass die vorliegende berechnete Kurve des Granulats näherungsweise in dem 230 °C-Modellbereich liegt (s. Abbildung 55). Das TPU zeigt mit dem Viskositätsverlauf Tendenzen zu den einzelnen Verarbeitungsstufen. Der erste Aufschmelzprozess, der sich im Mahlgut widerspiegelt, führt zu einer deutlichen Reduzierung der Schwerviskosität. Der zweite Aufschmelzprozess hingegen, der durch das Regranulat aufgezeigt wird, hat nur noch leichte Viskositätsveränderungen, die dem Bereich des Mahlguts sehr ähnlich sind. Für die Ermittlung der Carreau-Parameter waren nicht alle Messpunkte geeignet, sodass Messpunkte für die Berechnung entfernt wurden (IKV, 2023b, S. 6).

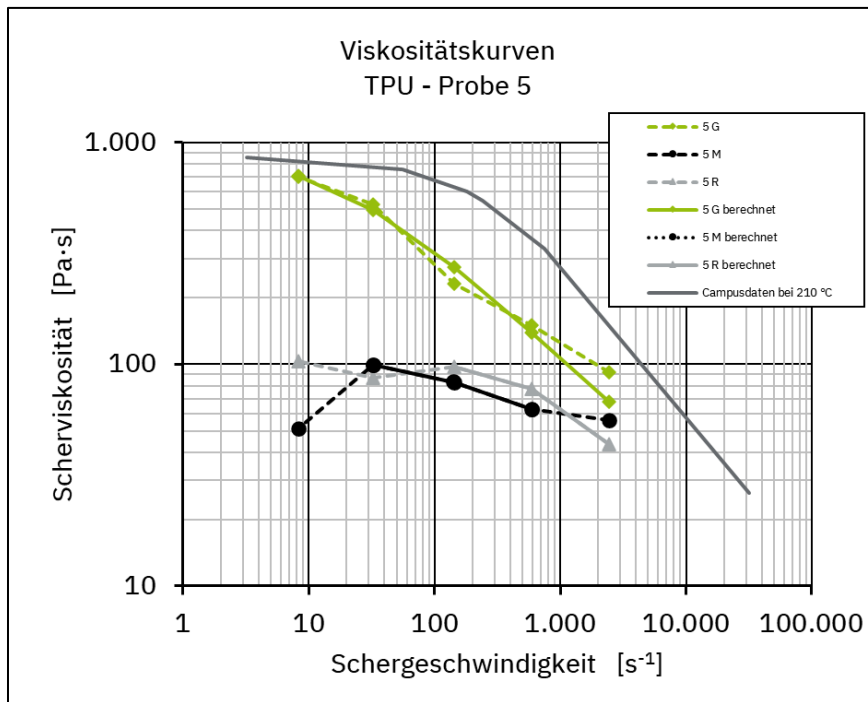


Abbildung 55: Viskositätsmodell TPU, Probe 5 (Quelle: eigene Darstellung)

Die Auswertung der MVR-Messung und der Scherviskositäten zeigt beim TPU deutlich, dass das Material nach der ersten Verarbeitung des Primärrohstoffes geschädigt ist und die Viskosität stark sinkt. Nachfolgende Verarbeitungsschritte haben nach der ersten Schädigung nicht mehr so großen Einfluss auf die Materialqualität. Inwieweit Angüsse und Fehlteile als Rezyklat wieder eingesetzt werden können, zeigt die Auswertung der mechanischen Versuche an den Probekörpern. Des Weiteren geben die Maschinendaten in Unterabschnitt 4.1.5.10 Aufschluss über die Verarbeitbarkeit von TPU-Rezyklaten.

4.1.5.8 Zugversuche (E-Modul, Zugfestigkeit)

Im nachfolgenden geben die Zugeigenschaften Aufschluss über die mechanische Belastbarkeit des TPU. Die in der Tabelle 25 angegebenen Messergebnisse umfassen den Mittelwert der fünf Zugprüfungen. Die Ergebnisse der Rezyklate M und R werden jeweils mit dem Granulat verglichen; Referenzwerten des Herstellers lagen nicht vor.

Tabelle 25: Ergebnisse der Zugprüfungen (Quelle: eigene Darstellung)

Probe	Referenzwert Hersteller	Zugmodul – E-Modul [MPa] nach ISO 527-1*			Zugfestigkeit – σ_M [MPa] nach ISO 527-1*		
		G	M	R	G	M	R
5 (TPU)	-	2268	1884	1211	62	53	41

* \bar{x} = 5 Messungen

Die Ergebnisse der Zugprüfungen zeigen ein eindeutig abnehmendes E-Modul. Dieses Ergebnis spiegelt die Degradation des Kunststoffes wieder und war wie bei den anderen glasfaserverstärkten Materialien zu erwarten, da eine Kürzung der Glasfasern zu einer Abnahme des E-Moduls führen kann (Schmiemann & Böger, 2020). Die Degradation zeichnet sich bei der Zugfestigkeit ab, auch hier sinkt die Festigkeit mit jedem Verarbeitungsschritt.

4.1.5.9 Kerbschlagbiegeprüfung

Das TPU ist ein sehr zähes Material und nach Herstellerangaben kommt es bei den Kerbschlagbiegeprüfungen nicht zum Bruch. Das ist gegenüber den anderen Materien in dieser Arbeit eine Besonderheit, da jene alle vollständig bei dem genannten Versuchsaufbau gebrochen sind. Dies spiegelt auch die hohen Schlagzähigkeitswerte von bis zu 29,51 kJ/m² wider. Auffällig bei der Auswertung der Referenzprobe im Vergleich zu den Proben mit den Rezyklaten ist, dass alle Proben, bis auf eine Ausnahme, in derselben Größenordnung einzuordnen sind. Ein ersichtlicher Unterschied ist nur im Vergleich zur Referenzprobe und zum 100 % Regranulat-Einsatz zu erkennen (s. Abbildung 56). Der Unterschied zur Referenzprobe ist ggf. damit zu erklären, dass die Referenzprobe aus einer anderen Charge stammt. Es liegen keine Herstellerangaben der Schlagfähigkeit für dieses Material vor – daher kann auch hier kein Vergleich stattfinden. Bei den Kerbschlagversuchen, mit den Stabproben aus 100 % Regranulat, versagt das Material allerdings und bricht teilweise mit einem sogenannten Scharnierbruch. Die Materialschädigung ist in diesem Fall so groß, dass eine Weiterverwendung von 100 % Regranulat nicht zum Tragen kommen sollte.

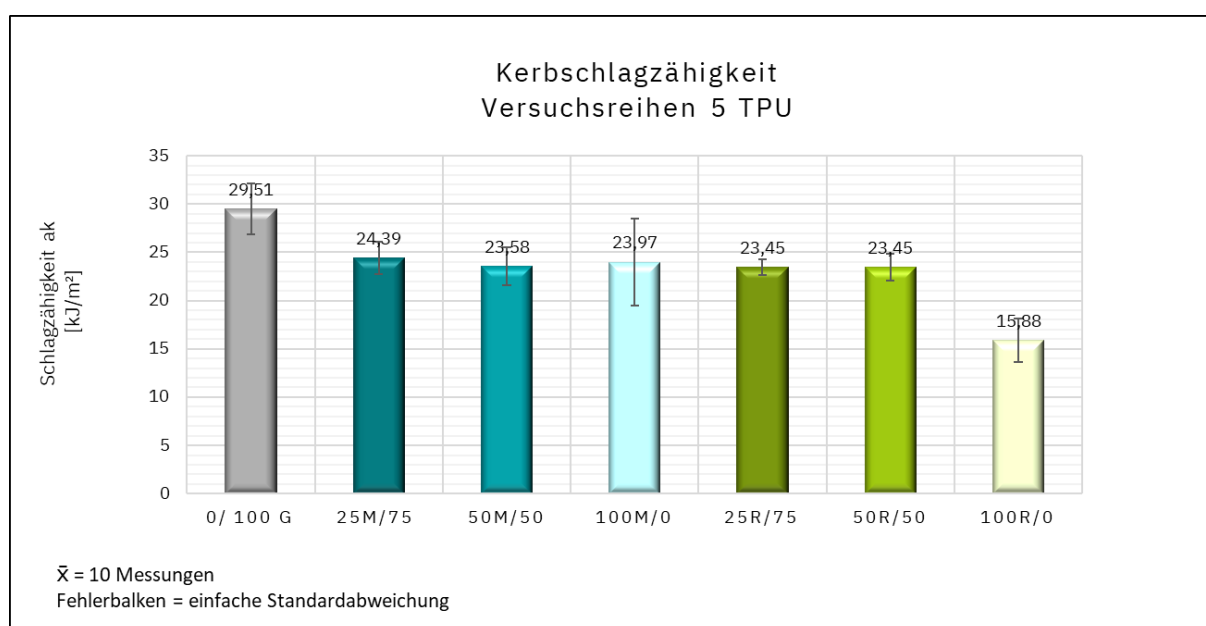


Abbildung 56: Kerbschlagzähigkeit TPU, Probe 5 (eigene Darstellung)

4.1.5.10 Prozessdaten

Die Prozessdaten für das TPU werden in Abbildung 57 bis 59 beispielhaft dargestellt; allerdings liegen die Daten lückenhaft vor, da die Daten aus technischen Gründen teilweise nicht aufgezeichnet wurden. Die Dosierzeiten weisen bei dem Einsatz von 50 % und 100 % Mahlgut sichtbare Schwankungen auf. Die Daten bei dem Einsatz von 100 % Regranulat sind nicht interpretierbar, da diese systemtechnisch nur teilweise gemessen wurden. Wichtig an dieser Stelle ist zu beachten, dass der Einsatz von 100 % Regranulat zu massiven Entformungsproblemen führte, so dass ein einwandfreier Spritzgießprozess nicht durchgeführt werden konnte und auch dazu führte, dass nur wenige Messparameter vorliegen. Des Weiteren wird durch die Messung des Einspritzdrucks der Zugstäbe deutlich, dass die Drücke weit unter denen des Primärmaterials liegen (s. Abbildung 58). Dieses verringerten Drücke machen deutlich, dass die Viskosität abgefallen ist. Das Massepolster dagegen zeigt nur geringfügige Ungleichheiten im Prozess (s. Abbildung 59). Durch die verringerte Viskosität bzw. die verringerten Einspritzdrücke, die unterschiedlichen Dosierzeiten und die Entformungsprobleme bei 100 % Regranulat ist der Prozess bei dem Einsatz von aufbereiteten TPU als eher instabil anzusehen.

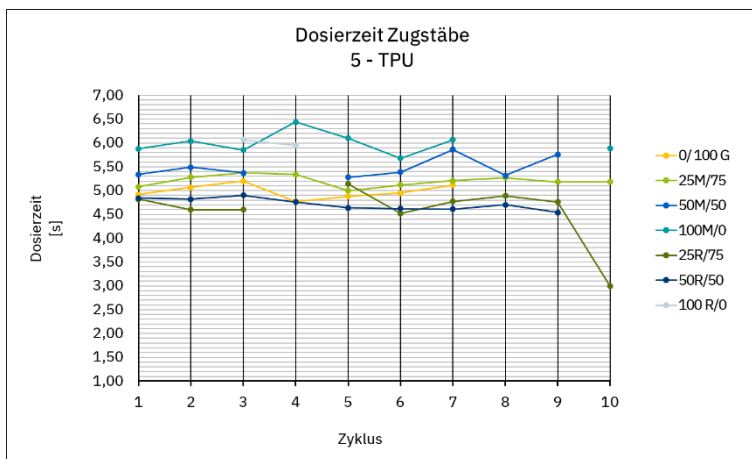


Abbildung 57: Dosierzeit Zugstäbe TPU, Probe 5 (Quelle: eigene Darstellung)

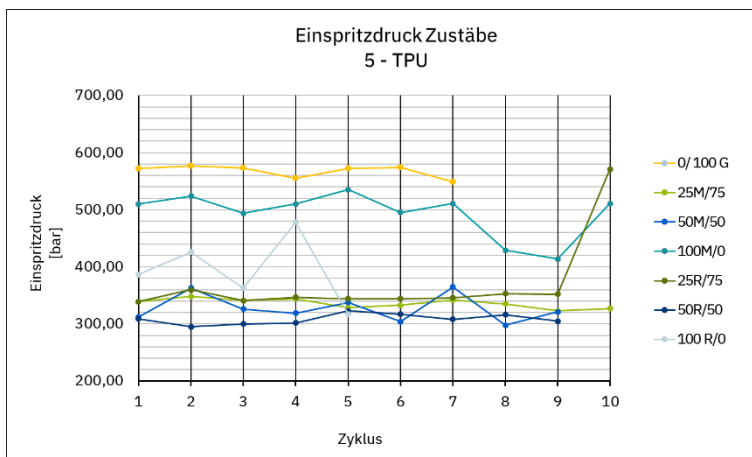


Abbildung 58: Einspritzdruck Zugstäbe TPU, Probe 5 (Quelle: eigene Darstellung)

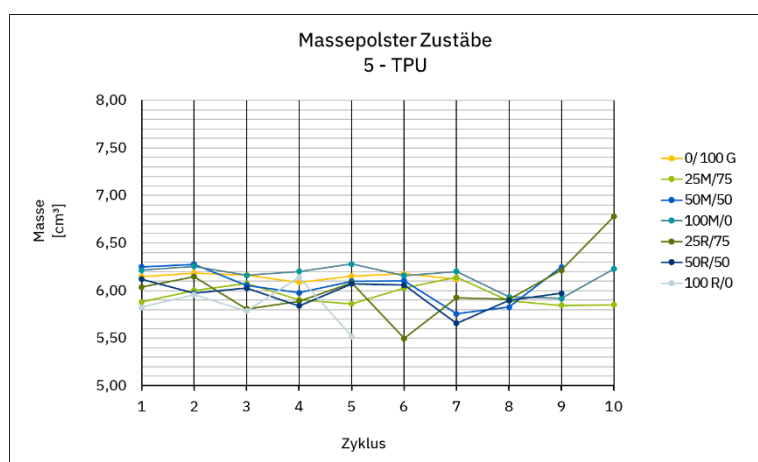


Abbildung 59: Massepolster Zugstäbe TPU, Probe 5 (Quelle: eigene Darstellung)

4.2 Fazit der Untersuchungen

Die Untersuchungen der Materialien PA 6.6, PBT, PC, LCP und TPU zeigen durch die Verarbeitungsstufen Materialschädigungen in unterschiedlichen Ausprägungen. Das PA 6.6 als extern aufbereitetes Mahlgut ist nur bedingt einsetzbar, da das Material aufgrund langer und ungünstiger Lagerung zu feucht für die Integration in den Produktionsprozess ist. Zudem hat die breite Korngrößenverteilung negativen Einfluss auf die Verarbeitung. Aus technischer Sicht ist ein Einsatz von 25 % Mahlgut grundsätzlich möglich und entspricht auch der Zulassung nach UL. Hierzu sollte die Herstellung einer besseren Mahlgutqualität durch zentrale Mühlenarten geprüft und fokussiert werden und ist Voraussetzung für die Anwendung im Produktionsprozess. Die Herstellung eines qualitativ hochwertigen Mahlguts hätte den Vorteil, dass die Verarbeitung mit dem Produktionsprozess gekoppelt werden kann und dadurch die Lagerzeiten, die Feuchteaufnahme und z. B. die Transportwege reduziert werden.

Das PA 6.6 als Regranulat ist mit bis zu 50 % sehr gut anwendbar, das zeigten sowohl die Voranalysen der Rezyklate, die Prüfungen der Probekörper, die Produktionsdaten, sowie ein Praxisprojekt bei Phoenix Contact. Für den Einsatz innerhalb der Elektroindustrie sind an dieser Stelle aber die Bedingungen der US-amerikanischen Zulassungen nicht außer Acht zu lassen. Gemäß der UL-Zulassungen gibt es derzeit keine Freigabe für den Einsatz von Regranulaten und es sind individuelle Einzelzulassungen notwendig.

Für das PBT wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt, die sich im Materialtyp unterscheiden. Die Auswertungen der Materialanalysen, der Untersuchungen der Probekörper und die Auswertung der Prozessdaten zeigt dabei für beide Materialtypen, dass eine Materialschädigung mit den jeweiligen Verarbeitungsstufen der ersten Verarbeitung und des Regranulierens zunimmt. Des Weiteren weisen die Materialanalysen eine hohe Feuchte beim Mahlgut sowie

einen starken Farbbau bei dem Mahlgut und Regranulat in Orange nach. Die Beimischungsformen zeigen in den weiteren Untersuchungen indessen eine deutliche Verbesserung der Material- und Verarbeitungseigenschaften. Das PBT ist aufgrund dieser Untersuchung nachweislich für einen Einsatz mit 25 % Mahlgut und 25 % Regranulat geeignet. Für das PBT als Mahlgut ist zudem zu empfehlen, den Einsatz von zentralen Mühlen zu prüfen, um wie in der vorangehenden Bewertung beschrieben, den Prozess ganzheitlich zu verbessern und kritische Faktoren wie die Feuchteaufnahme zu reduzieren. Für die Beimischung von 25 % liegt zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit außerdem keine übergeordnete Freigabe gemäß der Zertifizierungsstelle UL vor, sodass im Einzelfall der Einsatz von Regranulaten mit den Zertifizierungsstellen der UL abgestimmt werden muss.

Das Kunststoffmaterial PC ist grundsätzlich sehr gut für das mechanische Recycling geeignet. In der vorliegenden Arbeit ist allerdings eine Besonderheit, dass das Material aus einem Gemisch von Produktionsabfällen aus PC in unterschiedlichen Anteilen und Farben vorliegt. Die Materialanalysen und Prozessdaten haben bestätigt, dass das PC als Recyclingmaterial, in diesem Fall das Regranulat sehr gut einsetzbar ist, selbst wenn es sich um ein Gemisch handelt. Die Mischung verschiedener Farben, wie Transparent, Blau und Schwarz, zeigte zudem, dass ein dunkles gleichmäßiges Grau erzeugt werden kann. Daher spricht auch nichts gegen einen optischen Ausschluss eines Gemisches. Das Mahlgut hingegen, ist aufgrund des inhomogenen Gemisches und der unterschiedlichen Anteile schwer im Prozess anzuwenden und wird daher nicht empfohlen. Durch die undefinierte Mischung unterschiedlicher Materialien können weder Zulassungen eingehalten noch eindeutige Aussagen über die Materialqualität getroffen werden, was dazu führt, dass das Regranulat nicht für Bauteile der Elektroindustrie eingesetzt werden darf. Der Rezyklateinsatz ist aufgrund der guten Eigenschaften vom PC jedoch nicht auszuschließen und weiter zu betrachten. Die Wiederverwertung vom Regranulat ist möglich, wenn eine Anwendung gefunden wird, die nicht direkt als Elektronikbauteil eingesetzt wird. Für eine einfache Prozessgestaltung können sogar 100 % Regranulat eingesetzt werden. Für den 100%igen Einsatz des Regranulates wird dann aber empfohlen, den anfallenden Ausschuss nach dieser Anwendung der Entsorgung zuzuführen, da sowohl ein weiterer Verarbeitungsschritt als auch ein erneutes Regranulieren zu weiterer Materialschädigung führt. Der Vorteil von dieser Anwendung wäre, dass die Produktionsabfälle aus dem ersten Verarbeitungsprozess für Hilfs- oder Verpackungsprodukte mit 100 % Rezyklatanteil eingesetzt werden können. So könnte z. B. ein neues internes Mehrwegsystem für Spulen entwickelt werden, oder Schutzabdeckungen für den Transport von Bauteilen hergestellt werden, die aus diesem Recyclingmaterial entstehen. Wenn ein dauerhafter Einsatz der auch in einem solchen Beispielprozess anfallenden Produktionsabfälle entstehen sollen, dann könnte mit einer Beimischungsform von 25 – 50 % gearbeitet werden. Für diesen Prozess müsste dann ein geeignetes Primärmaterial ermittelt werden, was auch aus ökonomischen Gründen gut für ein Hilfs- oder

Verpackungsprodukt geeignet ist. Mit der Beimischung von Primärmaterial könnte der Kreislauf dauerhaft geschlossen werden.

Der Rezyklateinsatz vom LCP ist als kritisch anzusehen. Das Mahlgut zeigt in den mechanischen Untersuchungen zwar gute Eigenschaften, ist aufgrund der Strukturen aber kaum einsetzbar. Die Mahlgutstruktur führt zu einem unplanbaren Prozess; die schwankenden Prozessparameter wurden auch in der Auswertung der Prozessdaten nachgewiesen. Das Regranulat zeigt hingegen in den Material- und Probekörperanalyse erhebliche Einschränkungen in der Viskosität, der Zugfestigkeit und der Schlagfestigkeit. Der Einsatz von Regranulaten ist aufgrund der vorliegenden Ergebnisse in den Formen 100 % und 50 % technisch nicht möglich und nur bis max. 25 % ausführbar. Aus prozessualer Sicht wird der Einsatz von 25 % Regranulat hingegen nicht empfohlen. Die Abweichungen der Prozessparameter zum Primärmaterial sind zu groß, um einen stabilen Prozess vorherzusagen.

Die Auswertungen des TPU zeigt, dass das Material nach der Verarbeitung stark veränderte Fließeigenschaften aufweist, die auf einer Degradation des Kunststoffes hinweisen. Des Weiteren zeigen die Rezyklate – vor allem das Mahlgut – hohe Feuchtwerte. Die sinkenden Viskositäten sind grundsätzlich als kritisch anzusehen, die mechanischen Analysen der Probekörper zeigt allerdings, dass ein Einsatz von 25 % Mahlgut möglich ist. Dabei sind die Mahlgutstrukturen als sehr gut anzusehen, so dass ein Einsatz und weitere Betrachtung des Regranulat nicht notwendig ist. Allerdings zeigen die Prozessparameter sehr instabile Strukturen, die nur schwer interpretierbar sind und auf die Materialschädigung zurückzuführen sind. Die Materialschädigungen wurde durch die Viskositätsmessungen bestätigt und haben wesentlichen Einfluss auf den Produktionsprozess. Aufgrund der vorliegenden unterschiedlichen Ergebnisse, die für einen mechanischen Einsatz von 25 % Mahlgut sprechen, aber prozessbedingt als differenziert anzusehen sind, wird empfohlen, weitere Versuchsreihen mit dem TPU durchzuführen und in möglichen Praxisanwendungen zu testen.

In allen Versuchsreihen war die hohe Feuchte bei dem Mahlgut und teilweise bei dem Regranulat relevant. Die Materialfeuchte hat wesentlichen Einfluss auf die Verarbeitung und die vorgeschalteten Trocknungsprozesse. Weiterhin kann der hohe Feuchtegehalt bei den hygroskopischen Kunststoffen zu Degradation des Kunststoffes führen. Die Hersteller der Primärmaterialien geben in ihren Herstellerangaben immer eine empfohlenen Verarbeitungsfeuchte an. Um die Feuchtigkeit so gering wie möglich zu halten, sollte eine interne Mahlgutherstellung mit zentralen Mühlen priorisiert werden, dieses wurde auch durch die Untersuchung der Mahlgutqualität bestätigt. Bei einer externen Aufbereitung sollte das Material zeitnah bei einer konstanten Lagerung vom Recyclingunternehmen verarbeitet werden. Das setzt voraus, dass das Material direkt aus dem Produktionsprozess übergeben und nicht lange zwischengelagert wird. Dieses sollte auch bei der Rücklieferung und dem Wiedereinsatz des Rezyklates beachtet

werden. Um die Feuchtigkeit so gering wie möglich zu halten, sollte auch die Verpackung der Rezyklate entsprechend gewählt werden, so können dieses beispielsweise in Säcken abgefüllt oder das Inlett der Oktabins kann nach Verfüllung verschweißt werden.

5 Anwendung der Kunststoffrecyklate in der Elektroindustrie

Die Ergebnisse und Auswertungen in Kapitel 4 zeigen, dass die Anwendung von Rezyklaten in der Elektroindustrie von vielen Faktoren abhängig ist, dieses betrifft sowohl die technische Machbarkeit, die Verfügbarkeit sowie rechtliche und normative Regelungen, die zu einer Einschränkung des Rezyklateinsatz führen können. Im Unterkapitel 5.1 werden die vielseitigen Faktoren, die Einfluss auf die Möglichkeit des Rezyklateinsatz haben, näher beleuchtet und dargelegt. Anhand der Materialanalysen und der relevanten Faktoren der Machbarkeit wird in Unterkapitel 5.2 die Bewertung im Stufenmodell zur Recyclingfähigkeit nach Pomberger durchgeführt (Pomberger, 2021). Ergänzend wird eine Abschätzung der ökologischen und ökonomischen Faktoren aufgezeigt.

5.1 Einordnung der Ergebnisse für den Rezyklateinsatz

Die Versuchsreihe zur technischen Recyclingfähigkeit beispielhafter Kunststoffe der Elektroindustrie, hat gezeigt, dass die Recyclingfähigkeit der Kunststoffe stark abhängig von der Herkunft, der Sammlung und dem Kunststofftyp ist. Die Rezyklierbarkeit von Kunststoffabfälle hängt dabei von der Abfallherkunft, der Sensitivität des Polymers oder dem Materialabbau eines Polymers ab (Rudolph et al., 2020, S. 20). Wie in dieser Arbeit geprüft, zeigen Rudolf et al. auf, dass in den meisten Fällen der Produktionsausschuss „[...] mit einer geringen Verschlechterung der Eigenschaften aufbereitet werden kann. Die Eigenschaftsveränderungen können zusätzlich minimiert oder auch erweitert werden, indem das zerkleinerte Material mit Rohmaterial aufgefrischt wird“ (Rudolph et al., 2020, S. 40). Mit der vorliegenden Dissertation wurde der technische Nachweis erbracht, dass der Anteil des Recyclingmaterials in der Elektroindustrie in der Regel bei 25 % liegen könnte, ohne signifikante Änderung der mechanischen Eigenschaften hervorzurufen. Unterschiedliche brancheübergreifende Analysen zeigen bei der industriellen Fertigung einen möglichen Anteil von recyceltem Material von 20 % bis 30 % auf (Abts, 2020, S. 224; Rudolph et al., 2020, S. 41).

Ausgehend von einem Anteil von 25 % Kunststoffrecykat hat dieses durch den Verdünnungseffekt nicht nur Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften und die Verarbeitung, sondern auch auf die Wiederaufbereitungszyklen. Der Rezyklatanteil reichert sich bei fortwährender Wiederverwendung im Produktionskreislauf an, dadurch ist bei einer konstanten Verwendung von Rezyklaten langfristig mit einer Verschlechterung der Materialqualität zu rechnen (Abts, 2020, S. 224). Die Materialzusammensetzung mit einem Anteil an Rezyklat q lässt sich nach n Verarbeitungszyklen wie folgt berechnen (Rudolph et al., 2020, S. 20):

$$\sum_{i=q}^n q^{n-1} (1 - q) = 1$$

Der Anteil an Rezyklaten im Produkt erhöht sich durch die Beimischung von weiteren Rezyklaten je Verarbeitungszyklus somit kontinuierlich. Dies führt dazu, dass der Gesamtanteil an Kunststoffrezyklaten im Endprodukt mit jedem Zyklus steigt. Für ein Produkt, das anfangs 25 % Rezyklate enthält, bedeutet dies nach mehreren Verarbeitungszyklen, dass es 75 % Material enthält, das einmal verarbeitet wurde, 18,7 % Material, das zweimal verarbeitet wurde, 4,7 % Material, das dreimal verarbeitet wurde, 1,2 % Material, das viermal verarbeitet wurde, und 0,4 % Material, das fünfmal oder öfter verarbeitet wurde (Baur et al., 2019, S. 58). Um den Einfluss der mehrfach verarbeiteten Rezyklatanteile und damit mögliche Materialschädigungen zu ermitteln, sollten für jeden Verarbeitungszyklus weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Nach drei bis fünf Verarbeitungszyklen können erhebliche Schädigungen der Materialeigenschaften auftreten (Baur et al., 2019, S. 58). Die beispielhafte Berechnung zeigt lediglich die Anteile vom Mahlguteinsatz mit 25 % und verändert sich mit der Erhöhung des Beimischungsanteils. Beim Einsatz vom Regranulat ist zudem zu beachten, dass das Material in einem Zwischenschritt mittels Extrusion verarbeitet und ggf. weiter geschädigt wurde. Für den kontinuierlichen Einsatz von Rezyklaten ist unterdessen die Verfügbarkeit relevant (Baur et al., 2019, S. 65). Die Verfügbarkeit hat vor allem Einfluss auf die industriellen Prozessabläufe sowie die gleichbleibende Produktqualität. Für den dauerhaften Einsatz muss sowohl der richtige Materialtyp als auch die richtige Farbe verfügbar sein. Wie in Unterkapitel 3.3.1 beschrieben, hat die Farbe einen wichtigen Einfluss auf den Verkauf eines Produktes und ist zentraler Bestandteil der Qualitätsanforderungen. Um die Verfügbarkeit zu erhöhen, ist eine Möglichkeit, die Farbvielfalt zu begrenzen und so mehr Recyclingpotenzial zu schaffen. Da in dieser Arbeit der Anteil der Produktionsabfälle bei rund 16 % des Rohstoffeinsatzes und die Farbvielfalt bei bis zu 40 Farben liegt, wird ein Einsatz von Rezyklaten von 25 % in allen Produktionsprozessen und bei allen Bauteilen nicht möglich sein. Daher wird davon ausgegangen, dass das Rezyklat nur bei ausgewählten Bauteilen eingesetzt wird, um eine konstante Rezyklat-Zuführung zu ermöglichen.

Neben den technischen Anforderungen sind die rechtlichen und normativen Anforderungen, wie in Unterkapitel 2.2 beschrieben, wichtige Einflussfaktoren für den Rezyklateinsatz. Dabei ist der interne Einsatz von Mahlgütern bedingungslos möglich, auch der Einsatz von Regranulaten ist unter definierten abfallrechtlichen Vorgaben unproblematisch. Für die Elektroindustrie sind die US-amerikanischen Zulassungsanforderungen hingegen von ausschlaggebender Bedeutung und können zu Einschränkungen beim Rezyklateinsatz führen. Die Zulassung nach UL erlaubt für einen Anteil von Mahlgütern bis 25 %, größere Beimischungsanteile sind materialabhängig und in dieser Arbeit nur bei dem PA 6.6 mit bis zu 50 % möglich. Weiterhin gilt gemäß der UL 746D, dass ein Einsatz von Regranulaten nur nach zusätzlichen individuellen Materialqualifizierungen möglich ist. Zu dieser Qualifizierung zählen z. B. Identifikationsprüfung zur Materialbestimmung, Entflammbarkeits- und Zündquellentests, Prüfungen der

mechanischen Eigenschaften sowie die Qualifizierung der externen Aufbereitungsstellen. Die zusätzlichen Materialqualifizierungen sind mit erhöhtem wirtschaftlichen und personellen Aufwand verbunden, der sich nur schwer beziffern lässt; dennoch kann der Aufwand durchaus durch die gute Verarbeitbarkeit von Regranulaten gerechtfertigt werden.

Durch den Einsatz von Regranulaten als Sekundärmaterial kann ein wirtschaftlicher Vorteil von ca. 80 % gegenüber dem Einkauf des Primärmaterials erzielt werden. Die Kostenersparnis ist dabei immer abhängig von dem Kunststoffpreis; Qualifizierungs- und Handlingskosten die im Produktionsbetrieb anfallen, sind dabei nicht berücksichtigt. Am Beispiel von Phoenix Contact können an einem Produktionsstandort allein durch den Einsatz mit bis zu 25 % Regranulat, der Materialien PA 6.6 und PBT, Einsparungen von bis zu 14 % des gesamten Einkaufsvolumens erzielt werden. Vorausgesetzt ist bei dieser Berechnung, dass der gesamte Produktionsausschuss des PA 6.6 und PBT recycelt und als Rezyklat wieder eingesetzt wird.

Für den Einsatz des Mahlgutes wird die interne Mahlgutherstellung betrachtet, da sich in den vorangegangenen Analysen herausgestellt hat, dass die Verarbeitung von größeren Chargen des Produktionsausschuss bei einem externe Aufbereiter kein Vorteil gegenüber der internen Verarbeitung mit sich bringt. Zudem werden die Transportwege eingespart und Lagerflächen für große Volumina müssen nicht vorgehalten werden. Ein weiterer Vorteil der direkten Verarbeitung innerhalb eines Werksgeländes ist, dass die Lagerzeit begrenzt werden kann und die Feuchteaufnahme sich damit reduziert. Für den Einsatz der Materialien PA 6.6 und PBT ergibt sich hierdurch eine mögliche erste Abschätzung der Einsparung von rund 16 % des gesamten Einkaufsvolumens. Die Aufwände für die Mühlen, die Bedingung, die Wartung und Instandsetzung sind hier nicht mit einbezogen. Werden an dieser Stelle die Kosten für eine externe Aufbereitung angenommen, ergibt sich ein Einsparpotenzial von über 85 % gegenüber dem Neukauf.

Die Versuchsreihe und der Stand der Technik zeigen, dass das werkstoffliche Recycling mittels mechanisch-thermischer Aufbereitung oftmals gut geeignet ist; hierzu ist neben den Materialeigenschaften eine schonende Extrusion notwendig (Orth et al., 2022, S. 105–109). Wichtig ist allerdings, dass alle Zulassungsvoraussetzungen für den Einsatz eines Regranulates vorliegen. Sowohl die Versuchsreihe, der Stand der Technik als auch die einschlägigen Zulassungsanforderungen zeigen zudem, dass wenn technisch möglich, ein Einsatz von 25 % Mahlgut fokussiert werden sollte (Abts, 2020, S. 224; Baur et al., 2019, S. 58).

Ein weiterer relevanter Faktor ist die ökologische Betrachtung, die mittels einer Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Assessment – LCA) durchgeführt werden kann. Orth et al. zeigen in einer Zusammenfassung eine Vielzahl von Studien auf, die belegen, dass ein mechanisches Recycling aus ökologischer Sicht oft positivere Effekte hat, als das chemische oder energetische

Recycling und daher bevorzugt betrachtet werden sollten (Orth et al., 2022, S. 140–156). Allerdings basiert die ökologische Betrachtung mittels LCA auf einem komplexen Modell von Primär- und Sekundärdaten, die sich u. a. auf die Sammlung und Lagerung, die Verpackungseinheiten, den Transport, den Energieeinsatz für die Aufbereitung beziehen und immer individuell betrachtet werden müssen.

5.2 Bewertung der Recyclingfähigkeit

Anhand der vorliegenden Auswertungen und der aufgezeigten Einflussfaktoren in Unterkapitel 5.1 wird im Weiteren auf das Potenzial der Materialien PA 6.6 und PBT eingegangen. Zudem wird das Potenzial der Materialien PC (sofern eine Anwendung außerhalb der Elektronikbauteile gefunden wird) und das TPU ergänzend betrachtet. In Abbildung 60 wird das Stufenmodell der Recyclingfähigkeit für Phoenix Contact, als Fallbeispiel, wiedergeben. Die dazugehörige Berechnungsgrundlage ist in Anhang 12 dargestellt.

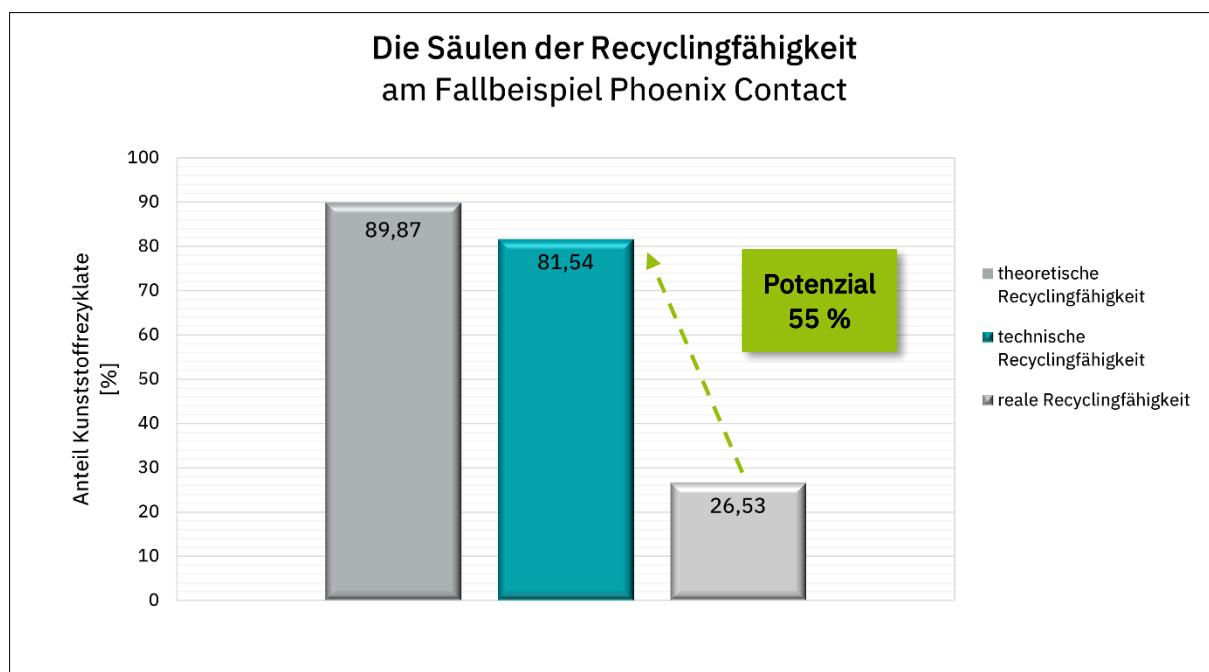


Abbildung 60: Säulen der Recyclingfähigkeit am Fallbeispiel Phoenix Contact (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an DIN e.V. et al., 2023, S. 181)

Die erste Säule der Recyclingfähigkeit zeigt die theoretische Recyclingfähigkeit mit einem Anteil von 89,87 %. Eine 100 %ige theoretische Recyclingfähigkeit wird nicht angenommen, da, wie in Unterkapitel 2.1.1 erläutert, prozessbedingte Verluste und Sondersituationen zu einem Verlust von recycelfähigem Material von rund 10 % führen. Die technische Recyclingfähigkeit, die in der zweiten Säule dargestellt ist, wurde in dieser Arbeit für die branchentypischen Kunststoffe untersucht und die technische Machbarkeit anhand der Ergebnisse abgeleitet. Deutlich wurde bei den vorliegenden Untersuchungen, dass eine technische Recyclingfähigkeit bei den

branchetypischen Kunststoffen wie PA 6.6 und PBT gegeben ist; dabei kann in diesem Modell eine ganzheitlich betrachtete Recyclingfähigkeit von über 80 % erreicht werden. Dass die knapp 90 % der theoretischen Recyclingfähigkeit nicht erreicht werden kann, kommt durch den Einsatz von Kunststoffen zustande, die, wie die Hochleistungsthermoplasten (z. B. LCP) oder thermoplastischen Elastomere (z. B. TPU) nicht bzw. nur bedingt für das Recycling geeignet sind. Des Weiteren können Kunststoffe wie ein PC-Gemisch zwar gut recycelt werden, sind allerdings für die Elektronikindustrie technisch nicht geeignet, so dass ein Recycling dieses Materials nur für einen Einsatz als Zusatzbauteil, wie Schutz- und Transportkappen, Spulen oder ähnlich Anwendungen nutzbar ist. Das nur bedingt anwendbare TPU ist zudem genauer zu analysieren und produktabhängig zu prüfen. Für die Bewertung der Recyclingfähigkeit können das PC mit einem Anteil von ca. 1 % und das TPU mit 0,7 % der Gesamtmenge der Produktionsabfälle jedoch vernachlässigt werden.

Die Säule der realen Recyclingfähigkeit wird in diesem Fallbeispiel mit 26,53 % angegeben. Wie viele Kunststoffabfall innerhalb der Unternehmenskreisläufe in der Branche heute schon zurückgeführt werden, kann aufgrund fehlender Studien nicht konkret angegeben werden und ist sehr stark von den Strukturen innerhalb einer Produktion abhängig. Im Beispiel von Phoenix Contact sind dieses 26,53 %, die als Mahlgut schon heute zurückgeführt werden. Für die Anhebung der realen Recyclingfähigkeit müssen neben der technischen Machbarkeit auch die Prozessabläufe innerhalb eines Unternehmens betrachtet werden. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, müssen Prozesse für die Sammlung von Angüssen und Ausschussteilen geschaffen werden. Für den Einsatz von Mahlgütern muss je nach Anwendung ermittelt werden, ob zentrale oder dezentrale Mühlen besser zu dem eigenem Unternehmensprozess passen. Entscheidungskriterien können hierfür die Fläche, die Verfügbarkeit der Kunststoffmaterialien, die Anbindung an Trockner und Mischungsperipherie sowie die Mühlen sein. Für die externe Aufbereitung zu einem Regranulat ist es demgegenüber von Bedeutung, dass Volumen möglichst gering zu halten und die meist sperrigen Angüsse nicht für den Transport und die Aufbereitung bereitzustellen. Für diesen Prozessschritt ist zu empfehlen, dass z. B. vorhanden dezentrale Mühlen (Baur et al., 2019, S. 58) weiter genutzt werden, um das Volumen von den Angüssen zu reduzieren und somit das Handling und die Lagerung auf ein Minimum zu reduzieren. Erfahrungen aus dem vorliegenden Projekt haben gezeigt, dass für 16 t aufbereitet Rezyklate (entspricht ca. 8-16 Oktabins) über 120 Oktabins mit Angüssen und Ausschussteilen gesammelt und gehandhabt werden müssen. Durch das Mahlen direkt in der Produktion oder in Produktionsnähe und die Weitergabe von Mahlgut für die Herstellung von Regranulat können Prozesse voraussichtlich erheblich verbessert und vereinfacht werden.

Zusammenfassend ist zu nennen, dass in dieser Arbeit ein einzelnes Unternehmen als Fallbeispiel analysiert wurde, das wertvolle Einblicke in einen spezifischen Bereich der Branche gibt.

Die Ergebnisse tragen dazu bei, ein tieferes Verständnis für das Kunststoffrecycling in der Elektroindustrie zu erlangen. Diese Erkenntnisse können als Grundlage für weiterführende Untersuchungen und Praxisanwendungen dienen und leisten somit einen wichtigen Beitrag zur Forschung und Anwendung des Recyclings in diesem Bereich. Die Recyclingfähigkeit für die Elektroindustrie kann anhand der vorliegenden Bewertung wie folgt auf vereinfachte Weise abgeleitet werden. Das theoretische Recyclingpotenzial für die Produktionsabfälle liegt demnach bei rund 90 %. Die technische Recyclingfähigkeit kann anhand der Ergebnisse dieser Studie mit über 80 % angenommen werden; dabei kann die reale Recyclingfähigkeit, bei der die Produktionsabfälle wieder aufbereitet und als Kunststoffrezyklat zurückgeführt werden, jedoch nur mit etwas über 25 % angenommen werden. Das entspricht einem Potenzial für das Kunststoffrecycling von weiteren 55 %.

Eine Steigerung des Recyclings von Produktionsabfällen um 55 %, würde dazu führen, dass der Rezyklatanteil vom Gesamtkunststoffeinsatz bei Phoenix Contact von 4,21 % auf 13,49 % steigen würde, bzw. in der deutschen Elektroindustrie von einem Anteil von 4,5 % auf 14,30 % steigen könnte (s. Tabelle 26). Im Vergleich über alle Branchen hinweg wäre das eine Erhöhung des Gesamtanteils des Rezyklateinsatz von 1,75 % auf 5,60 %; wodurch die Elektroindustrie im nationalen Gesamtvergleich nach der Bau -und Verpackungsindustrie den dritten Platz einnehmen würde.

Tabelle 26: Kunststoffverarbeitung 2021 inkl. Steigerung des Rezyklatanteil aus Produktionsabfall (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Conversio Market & Strategy GmbH, 2022, S. 25; Phoenix Contact, 2022a)

Kunststoffverarbeitung 2021	Gesamt [kt]	aus fossilen Rohstoffen [kt]	Rezyklate [kt]	aus fossilen Rohstoffen [%]	Rezyklate [%]	Verarbeitung von Rezyklaten nach Branchen [%]
Elektro/Elektronik, Deutschland*	895	855	40	95%	4,50%	1,75%
Elektro/Elektronik, Deutschland mit 55 % Steigerung der Rezyklate	895	767	128	86%	14,30%	5,60%
Alle Branchen*	14.038	11.751	2.287	83,70%	16,30%	100 %
Phoenix Contact, Standort Blomberg	8,021	7,683	0,338	95,79%	4,21%	
Phoenix Contact, Standort Blomberg mit 55 % Steigerung der Rezyklate	8,021	6,939	1,082	86,52%	13,48%	

* Daten: (Conversio Market & Strategy GmbH, 2022, S. 25)

6 Diskussion, Schlussfolgerung und Ausblick

Die vorliegende Dissertation ist aus der Motivation entstanden, den Anteil an Kunststoffabfällen in der Elektroindustrie zu reduzieren und den Kunststoffrecycling-Einsatz zu erhöhen. Studien zeigen, dass in der Elektroindustrie rund 4,5 % Rezyklate – in Bezug auf den gesamten Kunststoffbedarf – eingesetzt werden und im Branchenvergleich die Elektroindustrie nur einen Anteil von 1,75 % der gesamten Kunststoffrecyklate in Deutschland verarbeitet. Was zu der Fragestellung führt, wie die Recyclingquote für technische Kunststoffe erhöht werden kann. Im Fokus dieser Arbeit steht dabei die Hypothese, dass das technische Recyclingpotenzial weit über das derzeit umgesetzte liegt.

Mit Bezug auf die Forschungsfragen konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, welche Aufbereitungsmöglichkeiten von Kunststoffabfällen für den Einsatz in der Elektroindustrie geeignet sind und unter welchen Bedingungen eine geeignete Materialqualität aufrechterhalten bzw. erreicht werden kann. Weiterhin konnte ein Validierungsverfahren dargelegt werden, um die Recyclingfähigkeit zu bewerten und die Recyclingpotenziale aufzuzeigen. Die Erkenntnisse dieser Arbeit resultieren dabei aus einer Versuchsreihe von werkstofflichen und mechanischen Versuchen, die an zwei unterschiedlichen Rezyklaten, dem Mahlgut (mechanische Aufbereitung) und dem Regranulat (mechanisch-thermische Aufbereitung) durchgeführt wurden, um die Forschungshypothese zu überprüfen. Die Laboruntersuchungen geben Aufschluss darüber, wie geschädigt das Material durch die Verarbeitung und Aufbereitung ist und ob und unter welchen Bedingungen dieses wieder im unternehmensinternen Produktionskreislauf zurückgeführt werden kann. Für die Analysen wurden eine Vielzahl an Kunststoffen (PA 6.6, PBT, PC, LCP und TPU) als reines Rezyklat und als Beimischungsanteile zum Primärmaterial untersucht, um eine möglichst hohe Aussagekraft der technischen Recyclingfähigkeit zu erzielen. Bei dem PA 6.6 wurden drei Farbvarianten des gleichen Kunststoffmaterials untersucht, beim PBT wurden zwei unterschiedliche Kunststoffmaterialien untersucht, das PC wurde als Gemisch analysiert, das LCP als Einzelmaterial und das TPU als ein Kunststoff, dem ein Masterbatch im Produktionsprozess zur Einfärbung beige gesetzt wurde. Jedes dieser Materialien erfüllt unterschiedliche funktionale und sicherheitstechnische Anforderungen in der Elektroindustrie und die Auswahl der in dieser Arbeit getroffenen Kunststoffmaterialien gibt einen Einblick, wie unterschiedlich die Auswirkungen des Recyclings auf die verschiedenen technischen Kunststoffe sein kann.

Die Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit zeigen beispielhaft, welche Aufbereitungsmöglichkeiten von Kunststoffabfällen geeignet sind, um die branchentypischen Anforderungen der Elektroindustrie einzuhalten. Dabei konnten bei den unterschiedlichen Aufbereitungsstufen verschiedene Materialschädigungen nachgewiesen werden, die je nach Kunststofftyp variieren und sich unterschiedlich auf die Qualität und Einsatz der Rezyklate auswirken. Die auf die

Ergebnisse aufbauende Potenzialanalyse, am Fallbeispiel von Phoenix Contact, zeigt exemplarisch, dass Unternehmen der Elektroindustrie noch ein Recyclingpotenzial von rund 55 % vorweisen können. Somit ist davon auszugehen, dass die Recyclingquote von Kunststoffen in dieser Branche noch nicht das Maximum erreicht hat. Der Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie hat im Jahr 2021 einen Branchenbericht veröffentlicht, der sich zum einen mit den Herausforderungen zum Kunststoff-Rezyklateinsatz beschäftigt und zum anderen ein Best-Practice-Beispiel der Branche aufzeigt (ZVEI, 2021). Jedoch benennt dieser Branchenbericht keine Potenzial in Zahlen und auch keine weitere Literatur konnte ermittelt werden, die konkrete Recyclingpotenziale darlegt, so dass die vorliegende Arbeit mit der Potenzialanalyse einen wertvollen Beitrag zum Forschungsstand leistet.

Neben den Versuchsergebnissen und der Potenzialanalyse, wurde mit der vorliegenden Bewertungsmatrix ein Ansatz entwickelt, wie unternehmensinterne Kunststoffrezyklate für die Elektroindustrie auf die Recyclingfähigkeit hin geprüft werden können; so dass gute Voraussetzungen gegeben sind, um innerhalb der Branchen das Kunststoffrecycling zu steigern. Voraussetzung dabei ist jedoch immer die Verfügbarkeit von Kunststoffabfällen und die Möglichkeit des Wiedereinsatzes. In dieser Arbeit wurde sich in Bezug auf die Aufbereitung der Kunststoffabfälle ausschließlich mit dem mechanischen und mechanisch-thermischen Aufbereitungsmodellen befasst, dabei zeigte sich, dass ein ganzheitlicher Einsatz von 100%igem Rezyklat zu Herstellung eines Elektronikbauteils, aufgrund von Materialschädigungen und Zulassungsvoraussetzungen in der Elektroindustrie nicht möglich ist. Zum einen konnten anhand der Versuchsmaterialien beispielhaft nachgewiesen werden, dass die Qualität beim Einsatz von 100%igem Rezyklat nicht erreicht wird und die notwendige Qualität nur durch die Beimischung von Primärmaterial sichergestellt werden kann und zum anderen zeigten die Zulassungsbedingungen, wie die UL-Zulassung, dass sich diese auf einen Einsatz von einem festgesetzten Rezyklatanteil beschränkt. Die Mischung von Sekundär- und Primärmaterial ist für den Einsatz von Rezyklaten somit ein technisch geeigneter Weg, bei dem die Qualitätsanforderungen eingehalten und Prozesse stabil eingestellt werden können. Wenn die Elektroindustrie durch die systematische Anwendung bzw. Beimischung von betriebseigenen Kunststoffrezyklaten das hier dargelegte Potenzial anwenden würde, dann könnte der betriebsinterne Anteil von 4,5 % Kunststoffrezyklaten, in Bezug auf die gesamten verarbeitete Kunststoffmenge, auf 14,30% angehoben werden. Für die Umsetzung ist dabei die Aufbereitung der Kunststoffabfälle zum Mahlgut, ein Verfahren, das als Stand der Technik anerkannt ist (Clauss, 2019, S. 59). Um den Einsatz der Rezyklate in Zukunft jedoch sukzessive zu erhöhen, ist neben der Polymerqualität der Rezyklate ein stabiles Prozessumfeld notwendig. In den vorliegenden Untersuchungen konnte beispielhaft gezeigt werden, dass ein ausschlaggebender Faktor für ein stabiles Prozessumfeld die Korngrößenverteilung des Granulates ist. Daraus lässt sich der Rückschluss ziehen, dass ein Mahlgut mit ungleichmäßiger Struktur weniger

geeignet ist als ein Regranulat mit gleichmäßiger Korngröße. Um den Einsatz von Regranulaten für die Elektroindustrie möglich zu machen und damit das Kunststoffrecycling nachhaltig umzusetzen, müssen für den Einsatz der Rezyklate allerdings praxisnahe Lösungen, in Bezug auf die Zulassungen, geschaffen werden. Dafür ist eine Neubetrachtung und die Erarbeitung von Lösungen in Zusammenarbeit von verarbeitenden Unternehmen, Recyclingunternehmen, Behörden und den Zertifizierungsgesellschaften unabdingbar. Eine Berechnung der ökologischen Potenziale mittels Lebenszyklusanalyse (LCA) kann dabei für die genannten Stakeholder entscheidend sein, um den Einsatz von Rezyklaten in der Elektroindustrie nach diesem Vorbild zu steigern und zu fördern. Dabei werden die Klimaschutzpotenzial des Kunststoffrecyclings ganzheitlich erfasst und die LCA kann einen wichtigen Beitrag zur möglichen Ausweitung des Recyclings innerhalb der Unternehmenskreisläufe leisten (Hüsgen & Greiff, 2024, 104).

Ein achtsamer Umgang mit Ressourcen ist für eine nachhaltige Gesellschaft zwingend erforderlich. Für den Einsatz von Rezyklaten als Sekundärmaterial bedeutet das, dass der Einsatz und die Anwendung in der Elektroindustrie weiter voranschreiten müssen. Unterschiedliche Möglichkeiten der Aufbereitung und Einsatzgebiete können dabei zur Schließung von Kreisläufen beitragen. Um die Circular Economy voranzutreiben, müssen jedoch Zertifizierungen im Elektronikbereich und Gesetzgebungen in der Abfallwirtschaft noch einmal auf den Prüfstand. Vor allem die Abgrenzung, ob ein Abfall oder Nebenprodukt vorliegt, kann für Unternehmen eine Hürde für die weitere Nutzung sein. So fallen, wie in diesem Fallbeispiel dargestellt, die Produktionsabfälle wie Angüsse und Ausschussteile vorerst unter die Abfallgesetzgebung, die in Deutschland mit dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) den Rahmen gibt. Dieses enthält unter anderem spezifische Regelungen zur Abgrenzung zwischen einem Abfall und einem Nebenprodukt (s. §4 KrWG). Nebenprodukte können dabei weiterverwendet werden, ohne dass sie als Abfall behandelt werden müssen. Das hat den Vorteil, dass die rechtlichen Anforderungen für Abfälle, wie Nachweispflichten oder Transport- und Lagervorschriften entfallen. Allerdings müssen hierfür bestimmte Kriterien erfüllt sein, die die Einstufung erschweren. Nach §4 KrWG sind dieses die folgenden vier Kriterien: die Sicherstellung der Weiterverwendung, keine zusätzliche Vorbehandlung über ein normales industrielles Verfahren, Erzeugung als integraler Bestandteil des Herstellungsprozesses und die Rechtmäßigkeit der weiteren Verwendung. Die Selbsteinstufung obliegt hier dem Unternehmen, das im Fall einer behördlichen Überwachung alle vier Kriterien zur Einstufung als Nebenprodukt nachweisen muss. Grundsätzlich sind die Möglichkeiten für die Selbsteinstufung bei den Kunststoffabfällen nach dem in dieser Arbeit dargelegtem Modell gegeben, dennoch müssen vor allem der Wiedereinsatz der Rezyklate festgelegt sein und auch das Aufbereitungsverfahren muss genau betrachtet werden, dabei muss klar sein, dass dieses nicht über ein normales industrielles Verfahren hinaus geht; wobei die Schwierigkeit besteht, dass ein „normales industrielles Verfahren“ nicht definiert ist. Das Aufbereitungsverfahren ist auch ein kritischer Punkt bei den

Zulassungsverfahren in der Elektroindustrie, so lassen beispielsweise die Zulassungsgesellschaften, wie die UL, standartmäßig nur einen Anteil von Rezyklaten im Bauteil zu, der mechanisch aufbereitet wurde. Die mechanisch-thermische Aufbereitung, die zur Herstellung eines Regranulates führt, wird zunächst in den Zulassungsvoraussetzungen nicht betrachtet und kann nur mit Sondergenehmigungen erzielt werden. Dieses wiederum führen zu einer zusätzlichen Hürde. Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass je nach Anwendung und Einsatzgebiet, auch andere Recyclingformen, wie die mechanische-thermische Aufbereitung für das Recycling von Produktionsabfällen geeignet sind und für die Schließung von Kreisläufen sorgen. Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass das technische Recyclingpotenzial von Kunststoffabfällen in der Elektronikindustrie höher ist als das zum heutigen Zeitpunkt umgesetzte Recycling. Wird dieses Potenzial in der Branche der Elektroindustrie angenommen, kann der Anteil an eingesetzten Rezyklaten – in Bezug auf die gesamten Kunststoffbedarf der Branche – von rund 4,5 % auf über 14 % steigen und einen wesentlichen Beitrag zur Ressourcenschonung beitragen.

Um dieses Ziel zu erreichen, sollten die Ergebnisse in weiteren Untersuchungen mit einer LCA untermauert werden. Außerdem sollte die Fragestellung untersucht werden, wie rechtliche Anforderungen und Zulassungsverfahren zukünftig so angepasst werden können, dass sie zur Schließung von Kreisläufen in der Elektroindustrie beitragen. Dabei ist ein wichtiges Kriterium, dass die gesetzlichen und zulassungsbedingten Rahmenbedingungen die Kreislaufwirtschaft nicht erschweren. In diesem Zusammenhang könnte ein weiterer Aspekt die Diskussion über die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Rückführung von Elektrobauteilen nach deren Nutzungszeit sein. Ein Schwerpunkt dieser Diskussion könnte sein, wie auch Rezyklate ins Unternehmen zurückgeführt werden können, die aus Bauteilen nach Ende der Nutzungszeit hergestellt werden und welchen Beitrag diese Abfälle bzw. Rezyklate zur Schließung der Kreisläufe beitragen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese Arbeit einen bedeutenden Beitrag zum Verständnis des Recyclingpotenzials in der Elektroindustrie geleistet hat. Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen zudem die Vielschichtigkeit dieses Anwendungsfeldes und eröffnen neue Perspektiven für die praktische Umsetzung und die weitere Forschung.

7 Zusammenfassung

Die Verwendung von Kunststoffen hat u. a. aufgrund ihrer Werkstoffeigenschaften in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Mit steigender Verarbeitung von Kunststoffen rücken auch die damit verbundenen Umweltbelastungen und der Klimawandel in den Fokus. Kunststoffe sind langlebig und bauen sich nur sehr langsam ab, zudem entstehen durch die Herstellung von Kunststoffen Emissionen die Einfluss auf die Umwelt und das Klima haben. Die Elektroindustrie ist national die viertgrößte Branche in der Kunststoffverarbeitung, zudem zeigen weltweite Studien, dass Elektroschrott der am schnellsten wachsende Abfallstrom ist (ITU, 2024). Infolgedessen gilt dieser Branche ein besonderes Augenmerk bei der Verwendung von Rohstoffen und dem Einsatz von Sekundärmaterialien. Aufgrund hoher Anforderungen an die Produkteigenschaften und Prozesssicherheit liegt der Einsatz von Recyclingkunststoffen innerhalb der deutschen Elektroindustrie allerdings nur bei 4,5 % vom Kunststoffbedarf dieser Branche. Vergleicht man die Menge der gesamt eingesetzten Kunststoffrezyklate über alle Branchen hinweg, dann setzt die Elektroindustrie nur 1,75 % aller Kunststoffrezyklate ein. Eine Vielzahl an Anforderungen in der Elektroindustrie, wie spezielle Zulassungsanforderungen, Materialqualifizierungen sowie Qualitätsstandard, schaffen Hemmnisse für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten. Das Sekundärmaterial darf aus den genannten Gründen daher keine signifikanten Einschränkungen, wie verringerte mechanische Eigenschaften, haben und muss nahezu mit dem Primärmaterial gleichzusetzen sein.

In Zusammenarbeit mit der Phoenix Contact GmbH & Co. KG wurde in dieser Arbeit das Recyclingpotenzial beispielhaft für die Elektroindustrie analysiert und dargelegt. Im Allgemeinen ist dabei das theoretische Recyclingpotenzial oft höher als das technische Recyclingpotenzial und dieses ist höher als das reale Recyclingpotenzial. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, die technischen Möglichkeiten für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten in der Elektroindustrie aufzuzeigen und das Potenzial zur Schließung von Materialkreisläufen durch den Einsatz betriebsinterner Sekundärmaterialien darzulegen. Im ersten Schritt wurden die Kunststoffe PA 6.6, PBT, PC, LCP und TPU als Forschungsmaterialien festgelegt; die Auswahl spiegelt die Anwendungsklassen der technischen Kunststoffe und der Hochleistungskunststoffe wider und gibt einen repräsentativen Überblick der eingesetzten Materialien der Elektroindustrie. Für die Analyse der Kunststoffrezyklate wurden sortenreine Produktionsabfälle in Form von Angüssen und Ausschussteilen innerhalb der Produktion gesammelt und durch ein Recyclingunternehmen zu den Recyclingformen Mahlgut und Regranulat aufbereitet. Des Weiteren wurden Kriterien festgelegt und ein Vorgehen entwickelt, wie die Rezyklate für die Elektroindustrie auf ihre Einsatzfähigkeit hin geprüft werden können. Dazu wurde ein Prüf- und Messplan erstellt und zur Validierung der Ergebnisse eine Bewertungsmatrix entwickelt.

In der ersten Versuchsreihe wurden Materialanalysen der Mahlgüter und Regranulate durchgeführt. Es wurden acht unterschiedliche Untersuchungen durchgeführt, die die Farbe, Feuchte, Abbauvorgänge, Korngröße, den Glührückstand und das Fließverhalten dokumentieren. Dabei zeigte die Materialuntersuchung eindeutige Unterschiede zwischen den Aufbereitungsschritten der Mahlgüter und Regranulate. Eine zweite Versuchsreihe zeigte auf, wie sich die Rezyklate bei der Zugabe von Primärmaterial verhalten und welchen Einfluss diese Zugabe auf die Bauteilqualität und den Spitzgießprozess hat. Hierzu wurden bis zu drei Probekörper mit den Beimischungsanteilen 25 %, 50 % und 100 % Mahlgut oder Regranulat durchgeführt und mit einer Referenzmessung von 100 % Primärkunststoff verglichen. Die zweite Versuchsreihe zeigte deutlich, dass die Anwendung von 100%igem Mahlgut oder Regranulat aufgrund der vorliegenden Materialschädigungen, wie beispielsweise einer verringerten Farbqualität und/oder die Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften, nicht geeignet ist. Ausschließlich die Zuführung von Primärmaterial führte zu einwandfreien Ergebnissen.

Aus den Ergebnissen lässt sich für die Elektroindustrie ableiten, dass eine technische Recyclingfähigkeit der gesamten Kunststoff-Produktionsabfälle von über 80 % vorliegt. Durch das Recycling der Produktionsabfälle und dem Wiedereinsatz in unternehmensinternen Produktionsprozessen, könnte der heutige branchentypischen Rezyklatanteil von Gesamtkunstbedarf von 4,5 % auf über 14 % gesteigert werden. Voraussetzung dafür sind u. a. die sortenreine Trennung der Produktionsabfälle, eine geeignete Aufbereitung und die Einhaltung von Zulassungsanforderungen. Damit könnten mehr Kreisläufe in der Elektroindustrie geschlossen und somit die Ressourcenschonung und die Circular Economy aktiv unterstützt werden.

Glossar

Abfall	Gemäß Artikel 3 Abs. 1 der Richtlinie 2008/98/EG sowie § 3 Abs. 1 KrWG sind Abfälle alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigen will oder entledigen muss.
Granulat	Als Granulat bezeichnet man ein Material, das aus vielen kleinen, festen Partikeln wie Körnern oder Kugeln besteht. In dieser Arbeit bezieht sich das Granulat auf das Primärmaterial, das als Kunststoffgranulat bezeichnet wird und eine homogene Körnung hat.
Kunststoffe	Im Sinne des Artikels 3 Nummer 5 der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 ist ein Kunststoff ein Polymer: Stoff, der aus Molekülen besteht, die durch eine Kette aus einer oder mehrerer Arten von Monomereinheiten gekennzeichnet sind.
Mahlgut	Mahlgut entsteht durch das mechanische Verarbeiten (Mahlen) von Kunststoff und besteht in der Regel aus unterschiedlichen Korn- und Teilchengrößen. Ein Mahlgut kann dabei Staubanteile enthalten.
Recycling	Gemäß Artikel 3 Abs. 17 der Richtlinie 2008/98/EG sowie § 3 Abs. 25 KrWG ist Recycling jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden.
Regranulat	Regranulat wird durch das Einschmelzen von Mahlgut gewonnen. Die Korngrößen sind hierbei gleichmäßig und es enthält auch keinen Staubanteil.
Rezyklat	Rezyklate im Sinne des §3, Nr. 7b KrWG sind sekundäre Rohstoffe, die durch die Verwertung von Abfällen gewonnen worden sind oder bei der Beseitigung von Abfällen anfallen und für die Herstellung von Erzeugnissen geeignet sind.
Kunststoffabfall (Post-Industrial Abfall)	Materialien aus industrieller Produktion, die als Abfall im Herstellungsprozess erzeugt werden. Dieses können im Fall der Kunststoffspritzerei beispielsweise Angüsse oder Ausschussteile sein, die aus Qualitätsgründen nicht zum eigentlichen Zweck verwendet werden können.

Nebenprodukt Nebenprodukt im Sinne §4 KrWG ist ein Stoff oder Gegenstand der bei einem Herstellungsverfahren anfällt, das nicht zum hauptsächlichen Zweck auf die Herstellung dieses Stoffes oder Gegenstandes gerichtet ist. Ausschuss ist nicht als Abfall anzusehen, wenn sichergestellt ist, dass der Stoff oder Gegenstand im Betrieb weiterverwendet wird.

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

c_p	Konzentration des Polymers in der Lösung
η_0	Nullviskosität
\approx	ungefähr
\geq	größer als oder gleich
a^*	Rot-Grün-Achse
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere
Abs.	Absatz
ak	Kerbschlagzähigkeit
ak	verbrauchte Schlagarbeit in kJ
ANTS	Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe
b	Breite
b^*	Blau-Gelb-Achse
BK	black/schwarz
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage - Internationale Beleuchtungskommission
d_{50}	Mittlere Korngröße
$\Delta E/\Delta E$	delta E: Farbabstand
DIN	Deutsches Institut für Normung
G	Granulat
GY	grey/ Grau
h	Dicke/Höhe
H ₂ O	Wasser
hk	Dicke des Probekörpers in Kerbmitte
HKR	Hochdruckkapillarrheometer
IEC	International Electrotechnical Commission
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
L^*	Helligkeit
LAGA	Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LCA	Lebenszyklusanalyse, engl. Life Cycle Assessment
LCP	flüssig-kristallines Polymer, engl. Liquid Crystal Polymer
M	Mahlgut
MVI	Melt Volume Index
MVR	Melt Volume (Flow-)Rate
\emptyset	Durchschnitt
OG	orange / Orange
OT	Obere Toleranz
PA	Polyamid
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
POM	Polyoxymethylene
PP	Polypropylen
PPA	Polyphthalamid-
PPE	Polyphenylenether
ProdHaftG	Produkthaftungsgesetz
PVC	Polyvinylchlorid
R	Regranulat
r	reale
rh	relative Feuchte

RP	Referenzprobe
RWH	Referenzwert Hersteller
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SdH	Spezifikation des Herstellers
Stk.	Stück
te	technische
th	theoretische
TPE	thermoplastisches Elastomer
TPU	thermoplastisches Elastomer auf Basis Polyurethan
u. w.	und weitere
UL	Underwriter Laboratories
USA	United States of America
UT	Untere Toleranz
UV	Ultraviolett
VAF	Verarbeitungsfeuchte
VN	Viscosity number
VZ	Viskositätszahl
η	Viskosität (Eta)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die drei Säulen der Recyclingfähigkeit (Quelle: DIN e.V. et al., 2023, S. 181)	5
Abbildung 2: Post-Industrial-Abfälle und Nebenprodukte (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Conversio Market & Strategy GmbH, 2022)	8
Abbildung 3: Mengenverteilung Kunststofftypen in der Elektroindustrie am Beispiel Phoenix Contact (Quelle: eigene Darstellung)	14
Abbildung 4: Bilder Materialproben PA 6.6 (Quelle: eigene Darstellung)	26
Abbildung 5: Farbmessungen PA 6.6 (Quelle: eigene Darstellung)	34
Abbildung 6: Nachuntersuchung Farbmessung PA 6.6 (Quelle: eigene Darstellung)	35
Abbildung 7: Farbmusterplatten nach UV-Lagerung und Klimalagerung, PA 6.6 Mahlgut (Quelle: eigene Darstellung)	36
Abbildung 8: Farbmessungen PA 6.6 nach der UV-Lagerung (Quelle: eigene Darstellung) ..	36
Abbildung 9: Korngrößenverteilung PA 6.6 (Quelle: eigene Darstellung)	38
Abbildung 10: Korngrößenverteilung PA 6.6 < 1 / > 4 mm (Quelle: eigene Darstellung)	39
Abbildung 11: Histogramme inkl. Normalverteilungskurven am Beispiel PA 6.6 (Quelle: Phoenix Contact, 2023b).....	39
Abbildung 12: Lösungsviskosität PA 6.6 (Quelle: eigene Darstellung)	40
Abbildung 13: Viskositätsmodell PA 6.6, Probe 1.1 (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an IKV, 2023b).....	41
Abbildung 14: Viskositätsmodell PA 6.6, Probe 1.2 (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an IKV, 2023b).....	42
Abbildung 15: Viskositätsmodell PA 6.6, Probe 1.2 (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an IKV, 2023b)	42
Abbildung 16: Kerbschlagzähigkeit PA 6.6, Probe 1.1 (Quelle: eigene Darstellung)	44
Abbildung 17: Kerbschlagzähigkeit PA 6.6, Probe 1.2 (Quelle: eigene Darstellung)	45
Abbildung 18: Kerbschlagzähigkeit PA 6.6, Probe 1.3 (Quelle: eigene Darstellung).....	45
Abbildung 19: Dosierzeit Zugstäbe & Gehäuse PA 6.6, Probe 1.1 (Quelle: eigene Darstellung)	47
Abbildung 20: Massepolster Gehäuse PA 6.6, Probe 1.1 und 1.2 (Quelle: eigene Darstellung)	47
Abbildung 21: Farbmessungen PBT (Quelle: eigene Darstellung)	50
Abbildung 22: Nachuntersuchung Farbmessung PBT (Quelle: eigene Darstellung)	50
Abbildung 23: Farbmessung PBT nach der UV-Lagerung (Quelle: eigene Darstellung)	51
Abbildung 24: Korngrößenverteilung PBT (Quelle: eigene Darstellung)	53
Abbildung 25: Korngrößenverteilung PBT <1/>4 mm (Quelle: eigene Darstellung).....	53
Abbildung 26: Schmelzviskosität PBT (Quelle: eigene Darstellung)	54
Abbildung 27: Viskositätsmodell PBT, Probe 2.1 (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an IKV, 2023b).....	55

Abbildung 28: Viskositätsmodell PBT, Probe 2.1 (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an IKV, 2023b).....	56
Abbildung 29: Spannungs-Dehnungskurven PBT, Probe 2.1 (Quelle: eigene Darstellung)....	57
Abbildung 30: Spannungs-Dehnungskurven PBT, Probe 2.2 (Quelle: eigene Darstellung)...	58
Abbildung 31: Kerbschlagzähigkeit PBT, Probe 2.1 (Quelle: eigene Darstellung).....	59
Abbildung 32: Kerbschlagzähigkeit PBT, Probe 2.2 (Quelle: eigene Darstellung).....	59
Abbildung 33: Dosierzeit Zugstäbe PBT, Probe 2.1 und 2.2 (Quelle: eigene Darstellung).....	60
Abbildung 34: Einspritzdruck Zugstäbe PBT, Probe 2.1 und 2.2 (Quelle: eigene Darstellung)	61
Abbildung 35: Massepolster Zugstäbe PBT, Probe 2.1 und 2.2 (Quelle: eigene Darstellung)..	61
Abbildung 36: Korngrößenverteilung PC (Quelle: eigene Darstellung)	64
Abbildung 37: Korngrößenverteilung PC < 1/ > 4 mm (Quelle: eigene Darstellung)	65
Abbildung 38: Schmelzviskosität PC (eigene Darstellung)	65
Abbildung 39: Viskositätsmodell PC (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an IKV, 2023b)	66
Abbildung 40: Kerbschlagzähigkeit PC (Quelle: eigene Darstellung)	67
Abbildung 41: Dosierzeit Zugstäbe PC, Probe 3 (Quelle: eigene Darstellung)	68
Abbildung 42: Einspritzdruck Kerbschlag PC, Probe 3 (Quelle: eigene Darstellung).....	68
Abbildung 43: Korngrößenverteilung LCP (Quelle: eigene Darstellung)	71
Abbildung 44: Korngrößenverteilung LCP < 1/ > 4 mm (Quelle: eigene Darstellung).....	72
Abbildung 45: Viskositätsmodell LCP, Probe 4 (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an IKV, 2023b).....	73
Abbildung 46: Kerbschlagzähigkeit LCP, Probe 4 (Quelle: eigene Darstellung).....	74
Abbildung 47: Dosierzeit Zugstäbe LCP, Probe 4 (Quelle: eigene Darstellung).....	75
Abbildung 48: Einspritzdruck Kerbschlag LCP, Probe 4 (Quelle: eigene Darstellung)	75
Abbildung 49: Massepolster Zugstab LCP, Probe 4 (Quelle: eigene Darstellung)	75
Abbildung 50: Farbmessungen TPU (Quelle: eigene Darstellung)	78
Abbildung 51: Farbmessungen TPU nach der UV-Lagerung (Quelle: eigene Darstellung)	79
Abbildung 52: Korngrößenverteilung TPU (Quelle: eigene Darstellung).....	80
Abbildung 53: Korngrößenverteilung TPU < 1/ > 4 mm (Quelle: eigene Darstellung).....	80
Abbildung 54: Schmelzviskosität TPU (Quelle: eigene Darstellung).....	81
Abbildung 55: Viskositätsmodell TPU, Probe 5 (Quelle: eigene Darstellung).....	82
Abbildung 56: Kerbschlagzähigkeit TPU, Probe 5 (eigene Darstellung)	83
Abbildung 57: Dosierzeit Zugstäbe TPU, Probe 5 (Quelle: eigene Darstellung)	84
Abbildung 58: Einspritzdruck Zugstäbe TPU, Probe 5 (Quelle: eigene Darstellung)	84
Abbildung 59: Massepolster Zugstäbe TPU, Probe 5 (Quelle: eigene Darstellung)	85
Abbildung 60: Säulen der Recyclingfähigkeit am Fallbeispiel Phoenix Contact (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an DIN e.V. et al., 2023, S. 181).....	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Prüf- und Messplan zur Charakterisierung der Kunststoff-Rezyklat-Qualität (eigene Darstellung).....	22
Tabelle 2: Bezeichnung der Kunststoffproben (Quelle: eigene Darstellung)	23
Tabelle 3: Herstellungsplan der Probekörper mit Rezyklatanteilen (Quelle: eigene Darstellung)	27
Tabelle 4: Bewertungskriterien zur Anwendung der Bewertungsmatrix für die Kunststoffproben (eigene Darstellung).....	30
Tabelle 5: Bewertungsmatrix PA 6.6 – Proben 1.1, 1.2 & 1.3 (Quelle: eigene Darstellung)	32
Tabelle 6: Feuchtegehalte und Trocknungszeiten, PA 6.6 (Quelle: eigene Darstellung)	33
Tabelle 7: Messwerte Farbsystem nach UV-Lagerung, PA 6.6	37
Tabelle 8: Ergebnisse der Zugprüfungen, PA 6.6 (Quelle: eigene Darstellung)	43
Tabelle 9: Auswertung Bruchversuche, PA 6.6 (Quelle: eigene Darstellung).....	46
Tabelle 10: Bewertungsmatrix PBT – Proben 2.1 & 2.2 (Quelle: eigene Darstellung).....	49
Tabelle 11: Feuchtegehalt und Trocknungszeiten, PBT (Quelle: eigene Darstellung).....	49
Tabelle 12: Messwerte Farbsystem nach UV-Lagerung, PBT	52
Tabelle 13: Glührückstand PBT (Quelle: eigene Darstellung)	52
Tabelle 14: Ergebnisse der Zugprüfungen, PBT (Quelle: eigene Darstellung)	56
Tabelle 15: Bewertungsmatrix PC – Probe 3 (Quelle: eigene Darstellung)	62
Tabelle 16: Feuchtegehalte und Trocknungszeiten, PC (Quelle: eigene Darstellung).....	63
Tabelle 17: Ergebnisse der Zugprüfungen, PC (Quelle: eigene Darstellung).....	66
Tabelle 18: Bewertungsmatrix LCP – Probe 4 (Quelle: eigene Darstellung).....	69
Tabelle 19: Feuchtegehalte und Trocknungszeiten, LCP (Quelle: eigene Darstellung).....	70
Tabelle 20: Glührückstände LCP (Quelle: eigene Darstellung).....	71
Tabelle 21: Ergebnisse der Zugprüfungen, LCP (Quelle: eigene Darstellung)	73
Tabelle 22: Bewertungsmatrix TPU – Probe 5 (Quelle: eigene Darstellung)	77
Tabelle 23: Feuchtegehalte und Trocknungszeiten, TPU (Quelle: eigene Darstellung).....	77
Tabelle 24: Glührückstände TPU (Quelle: eigene Darstellung).....	79
Tabelle 25: Ergebnisse der Zugprüfungen (Quelle: eigene Darstellung).....	82
Tabelle 26: Kunststoffverarbeitung 2021 inkl. Steigerung des Rezyklatanteil aus Produktionsabfall (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Conversio Market & Strategy GmbH, 2022, S. 25; Phoenix Contact, 2022a).....	94

Literaturverzeichnis

- Abts, G. (2020). *Kunststoff-Wissen für Einsteiger: Grundlagen, Eigenschaften und Recycling polymerer Werkstoffe* (4., aktualisierte und erweiterte Auflage). Hanser.
- Bastian, M. & Hochrein, T. (2018). *Einfärben von Kunststoffen: Produktanforderungen - Verfahrenstechnik - Prüfmethodik* (2., aktualisierte und erweiterte Auflage). Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446453999>
- Baur, E., Harsch, G. & Moneke, M. (Hrsg.). (2019). *Werkstoff-Führer Kunststoffe: Eigenschaften - Prüfungen - Kennwerte* (11., aktualisierte Auflage). Hanser.
- Bonnet, M. (2016). *Kunststofftechnik: Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele* (3., überarbeitete und erweiterte Auflage). *Lehrbuch*. Springer Vieweg. <http://www.springer.com/> <https://doi.org/10.1007/978-3-658-13828-8>
- Bonten, C. (2020). *Kunststofftechnik: Einführung und Grundlagen* (3., aktualisierte Auflage). Hanser *eLibrary*. Hanser. <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446465381> <https://doi.org/10.3139/9783446465381>
- Bruder, U. (2016). *Kunststofftechnik leicht gemacht*. Hanser *eLibrary*. Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446449817>
- Bunge, R. (2012). *Mechanische Aufbereitung: Primär- und Sekundärrohstoffe*. Wiley-VCH.
- Clauss, G. (2019). Kunststoffe - Umwelt und Recycling. In E. Baur, G. Harsch & M. Moneke (Hrsg.), *Werkstoff-Führer Kunststoffe: Eigenschaften - Prüfungen - Kennwerte* (11., aktualisierte Auflage, S. 55–69). Hanser.
- Conversio Market & Strategy GmbH (Hrsg.). (2022). *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Kurzfassung der Conversio Studie*.
- DIN e.V., DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik & VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. (Hrsg.). (2023). *Deutsche Normungsroadmap Circular Economy*.
- DKE (Hrsg.). (2021). *IEC – Internationale Elektrotechnische Kommission*. DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik. <https://www.dke.de/de/ueber-uns/dke-organisation-auftrag/external-relations-and-support/iec-internationale-elektrotechnische-normungsorganisation>
- Eriksson, P.-A., Albertsson, A.-C., Boydell, P., Prautzsch, G. & Månson, J.-A. E. (1996). Prediction of mechanical properties of recycled fiberglass reinforced polyamide 66. *Polymer Composites*, 17(6), 830–839. <https://doi.org/10.1002/pc.10676>
- European Commission (Hrsg.). *Guidance on the interpretation of key provisions of Directive 2008/98/EC on waste*.

- Frenz, W. (Hrsg.). (2024). *Handbuch Kreislaufwirtschaft* (1. Auflage). Erich-Schmidt-Verlag.
<http://www.esv.info/978-3-503-20067-2>
- Gontermann, A. & Grömling, M. (2011a). *Die deutsche Elektroindustrie: Schlüsselbranche für Innovationen und Wachstum. IW-Analysen: Bd. 68*. Inst. der Dt. Wirtschaft.
- Gontermann, A. & Grömling, M. (2011b). *Kurzbeschreibung Studie: Die deutsche Elektroindustrie: Schlüsselbranche für Innovationen und Wachstum*.
<https://www.iwkoeln.de/studien/michael-groemling-die-deutsche-elektroindustrie.html>
- Haberland, P. (2016). *Die Produkthaftung im deutschen und US-amerikanischen Recht: Unter besonderer Berücksichtigung der Produktbeobachtungspflicht* [Dissertation, Düsseldorf]. GBV Gemeinsamer Bibliotheksverbund. <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=4088544>
- Hagedorn, W. & Greiff, K. (2024). Das Messen der Circular Economy: Ziele, Methoden und Indikatoren. In W. Frenz (Hrsg.), *Handbuch Kreislaufwirtschaft* (1. Auflage, 121-149). Erich-Schmidt-Verlag.
- Hellerich, W., Harsch, G. & Baur, E. (2010). *Werkstoff-Führer Kunststoffe: Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte* (10. [vollst. überarb.] Aufl.). Hanser.
- Hüsgen, M. & Greiff, K. (2024). Klimaschutz durch Circular Economy - Potenziale und Herausforderungen. In W. Frenz (Hrsg.), *Handbuch Kreislaufwirtschaft* (1. Auflage, 91-119). Erich-Schmidt-Verlag.
- IKV. (2023a, 23. August). *Zwischenbericht: rheologische Charakterisierung verschiedener Kunststofftypen* (Auftrag 276146).
- IKV. (2023b, 5. Oktober). *Rheologische Charakterisierung - HKR: Abschlussbericht* (Auftrag 276146).
- ITU, U. (2024). *The Global E-waste Monitor*.
- Jandke, J. & Reinicker, R. A. (2016). Farbmittel. In R.-D. Maier & M. Schiller (Hrsg.), *Handbuch Kunststoff-Additive* (4., vollständig neu bearbeitete Auflage, S. 737–811). Hanser.
- Jansen, M. (2015). *Rückgewinnung von Kunststoffen für die werkstoffliche Verwertung in mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen* [Dissertation, RWTH Aachen; Shaker Verlag]. GBV Gemeinsamer Bibliotheksverbund.
- Knerr, M. & Hersche, E. (2016). Füllstoffe und Verstärkungsmittel. In R.-D. Maier & M. Schiller (Hrsg.), *Handbuch Kunststoff-Additive* (4., vollständig neu bearbeitete Auflage, S. 1069–1137). Hanser.
- KUZ. (2022). *Wie feucht darf Granulat sein?* <https://www.kuz-leipzig.de/magazin/detail/wie-feucht-darf-granulat-sein/>
- Material Economics (Hrsg.). (2018). *The Circular Economy a Powerful Force for Climate Mitigation*. <https://materialeconomics.com/publications/the-circular-economy>

- Orth, P., Bruder, J. & Rink, M. (2022). *Kunststoffe im Kreislauf: Vom Recycling zur Rohstoffwende*. Springer Vieweg. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=7051087>
- Pfaender, R. (2016). Additive für das werkstoffliche Recycling. In R.-D. Maier & M. Schiller (Hrsg.), *Handbuch Kunststoff-Additive* (4., vollständig neu bearbeitete Auflage, S. 1203–1224). Hanser.
- Phoenix Contact. (2015a). *Internes Unternehmensdokument: Bedienungsanleitung Viskositätsbestimmung nach DIN EN ISO 307 mit der LAUDA PVS1/VAS1: TP A-7-0013 - Index 00*.
- Phoenix Contact. (2015b). *Internes Unternehmensdokument: Ermittlung des Glührückstandes gefüllter Kunststoffe: TP A-7-0023 - Index 00*.
- Phoenix Contact. (2015c). *Pilotprojekt Umstellung Kunststoffentsorgung: Abschlussbericht*.
- Phoenix Contact. (2016a). *Internes Unternehmensdokument: Bestimmung der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) von Thermoplasten nach DIN EN ISO 1133: TP A-7-0012 - Index 01*.
- Phoenix Contact. (2016b). *Internes Unternehmensdokument: Granulat Feuchtigkeitsmessung mit dem Brabender AQUATRAC: TP A-7-0014 - Index 00*.
- Phoenix Contact. (2022a). *Internes Unternehmensdokument: Auswertung Kunststoffverarbeitung 2018 - 2021*.
- Phoenix Contact. (2022b). *Internes Unternehmensdokument: Qualitätsstandard BU ICC Kunststoff und kunststoffumspritzte Metallteile: Revision 4*.
- Phoenix Contact. (2024). *Nachhaltigkeitsbericht 2023: Phoenix Contact*.
- Pomberger, R. (2021). Über theoretische und reale Recyclingfähigkeit. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 73(1), 24–35. <https://doi.org/10.1007/s00506-020-00721-5>
- Reinfrank, K.-M. & Neuhaus, R. (2004). Kunststoff unter Strom. *Kunststoffe*(08/2004), 91–96.
- Rudolph, N., Kiesel, R. & Aumnate, C. (2020). *Einführung Kunststoffrecycling: Ökonomische, ökologische und technische Aspekte der Kunststoffabfallverwertung*. Hanser.
- Schmiemann, A. & Böger, J. (2020). Recycling flammgeschützter Produktionsabfälle. *Kunststoffe*(11/2020), 60–62.
- Schraub, M. (2020). Viel Angebot, keine Nachfrage. *Recycling Magazin*(Sonderausgabe Kunststoffrecycling), 4–5.
- Schröder, T. (2020). *Rheologie der Kunststoffe: Theorie und Praxis* (2., aktualisierte und erweiterte Auflage). Hanser eLibrary. Hanser. <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446465503>
<https://doi.org/10.3139/9783446465503>

- Sesotec GmbH (Hrsg.). (2021). *Die Kreislaufwirtschaft: Herausforderung und Chancen für Recycler und Kunststoffverarbeiter*.
- SID. (2023). *Farbabstand ΔE (Delta E)*. <https://www.sidleipzig.de/service/glossar/farbabstand>
- Tsuchimoto, I. & Kajikawa, Y. (2022). Recycling of Plastic Waste: A Systematic Review Using Bibliometric Analysis. *Sustainability*, 14(24). <https://doi.org/10.3390/su142416340>
- Umweltbundesamt. (2023). *Kunststoffabfälle*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle#kunststoffe-produktion-verwendung-und-verwertung>
- VDMA e.V. (Hrsg.). (2020). *Recycling von Kunststoffen muss ausgebaut werden*. <https://www.vdma.org/viewer/-/v2article/render/1363779>
- ZVEI. (2020). *Kunststoffe in der Elektroindustrie: Diskussionspapier*.
- ZVEI. (2021). *Wegweiser zu Kunststoffrezyklaten in der Elektroindustrie: Synergien und Zielkonflikte einer nachhaltigen Umsetzung in der Praxis*.

Anhang

Anhang 1: Liste der Schlag- und Stichworte der Literaturrecherche

Nr.	Themen	Schlag- und Stichworte
1	Kunststoffe	Kunststoffe
2		Kunststoffverarbeitung / Verarbeitung Kunststoffe
3		Kunststoffaufbereitung / Aufbereitung Kunststoffe
4		Technische Kunststoffe
5		Thermoplaste
6		Elastomere
7		plastic
8	Recycling	Kunststoffabfall
9		Kunststoffrezyklate / Rezyklat
10		Kunststoffrecycling
11		Produktionsabfall
12		recycling
13		waste / plastic waste
14		refuse / refuse disposal
15		circular plastics economy
16	Elektro- industrie	Elektro- und Elektronikindustrie
17		Produkthaftung
18		electrical industry
19		Post-Industrial-Waste

Anhang 2: Prüfbedingungen „Feuchtemessung“

Messgerät: AQUATEC +
 Hersteller: Brabender
 Prüfverfahren: in Anlehnung an DIN EN ISO 15512:2019

Prüfmenge: ca. 15 g Granulat
 Prüfdauer: ca. 30 min

Versuchsbeschreibung:

Während der Messung reagiert das verdampfte Wasser aus der Probe mit Calciumhydrid. Bei der Reaktion entsteht aus dem Wasser Wasserstoff, der durch eine Kühlfalle geleitet wird. In der Kühlfalle kondensieren nahezu alle austretenden Gase, so dass der Gasdruck proportional den Wassergehalt widerspiegelt. Die Messgröße wird in % angegeben und liegt in einem Messbereich von 0–4 % H₂O (Phoenix Contact, 2016b). Die nachfolgende Tabelle zeigt die empfohlene Feuchtegehalte und empfohlenen Trocknungszeiten aus den Datenblättern der Hersteller.

Tabelle Anhang 2: Feuchtegehalte und Trocknungszeiten gemäß Herstellerangaben (Quelle: eigene Darstellung)

Material	Probe-Nr.	max. Verarbeitungsfeuchte [%]	empfohlene Trocknungszeit [h]
PA 6.6	1.1, 1.2, 1.3	0,150	4–8
PBT	2.1	0,04	4
PBT	2.2	0,02	4–8
PC	3	0,02	2–4
LCP	4	0,01	4–6
TPU	5	0,02	3–4

Anhang 3: Prüfbedingungen „Farbmessung“

Messgerät: Spectrophotometer CM-700
Hersteller: Konica Minolta
Prüfverfahren: CIE 1976 L*a*b*-Farbmodell
Softwaresystem: SpectraMagicNX

Farbmusterplatten: Länge 60 mm, Breite 40 mm, Plattendicke 3 mm
Prüfdauer: ca. 1 min

Versuchsbeschreibung:

Für die Messung wird die Farbmusterplatte mittig auf der Platte, auf einer Messfläche von 5 x 5 mm, gemessen. Während der Messung wird die Probe beleuchtet und das reflektierte sowie das emittierte Licht werden analysiert. Der Farbraum des L*a*b*-Systems ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt und zeigt die Helligkeit L* sowie die Farbkoordinaten a* und b*. Die Farbmessungen erfolgen standardmäßig bei der Normallichtart D65 (Tageslicht).

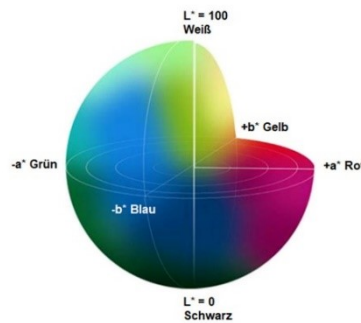


Abbildung Anhang 3: L*a*b*-Farbraum (Quelle: SID, 2023)

Die Differenzen der Lichtwerte werden in dE angegeben. Die Farbdifferenzen sind dabei korrigiert und basieren auf der nachfolgenden Formel sowie den Wahrnehmungsstufen von dE, die zur Einordnung beitragen (SID, 2023). Der Standardwert in der daliegenden Arbeit liegt bei $dE_{\max \text{ zul.}} = 1,73$ und wird als obere Toleranz (OT) festgelegt, kann aber aufgrund von Qualitätsanforderungen auch geringer festgesetzt sein.

$$dE = \sqrt{dL^*{}^2 + da^*{}^2 + db^*{}^2}$$

dE ≤ 1 kein sichtbarer Unterschied
dE = 2 geringer Unterschied
dE = 3 erkennbarer Unterschied
dE = 4 deutlicher Unterschied
dE ≥ 5 starker Unterschied

Anhang 4: Prüfbedingungen „UV-Lagerung“ und „Klimalagerung“

	<u>UV Lagerung</u>	<u>Klimalagerung</u>
Gerät:	UV Schrank - UVACUBE 400	Klimakammer - HPP110eco
Hersteller:	Dr. Hönle AG UV Technologie	Memmert
Prüfverfahren:	-	
Prüfmenge:	mind. 1 Farbmusterplatte	mind. 1 Farbmusterplatte
Prüfdauer:	96 h	72 h
Temperatur:	-	70 °C
Luftfeuchte:	-	80 % r

Versuchsbeschreibung:

Für die UV-Lagerung werden die Farbmusterplatten in einem UV-Schrank *dem* UV-Licht ausgesetzt. Die Klimalagerung der Farbmusterplatten findet in einer Klimakammer statt. Die Abbauvorgänge werden daraufhin anhand erneuter Farbmessungen, wie in Anhang 3 beschrieben, untersucht. Die Farbmusterplatten werden neben der Farbmessung einer Sichtprüfung unterzogen und es wird kontrolliert, ob eine Migration bzw. Farbmigration des Kunststoffes stattgefunden hat. Bei der Migration werden Stoffe, wie niedermolekulare Substanzen, z. B. Additive, an die Oberfläche des Kunststoffes ausmigriert, die Polymere selbst haben zu hohe Molekülmassen und können nicht aus dem Produkt migrieren (Bonten, 2020, S. 460).

Anhang 5: Prüfbedingungen „Glührückstand“

Messgerät:	Phoenix TM
Hersteller:	CEM
Prüfverfahren:	in Anlehnung an DIN EN ISO 1172 und DIN EN ISO 3451
Prüfmenge:	2 g
Prüfdauer:	-

Versuchsbeschreibung:

Für die Glührückstandsermittlung wird eine Probe des Kunststoffes je nach Material in einem Tiegel auf 600-850 °C erhitzt und so lange verbrannt, bis kein Gewichtsverlust mehr nachweisbar ist. Durch diesen Vorgang bleiben nur die anorganischen Bestandteile, wie Glasfasern und Farbpigmente, zurück. Das Gewicht des Rückstandes wird in Relation zum Probengewicht gesetzt und lässt eine Abschätzung des Glasfasergehaltes zu. „Bei [...] glasfaserverstärkten Thermoplasten stimmt der Rückstand meist gut mit dem Gehalt an Glasfaser [...] überein.“ (Hellerich et al., 2010, S. 262) Da aber neben den Glasfasern auch noch andere Bestandteile im Rückstand enthalten sein können, handelt es sich nur um eine Abschätzung. Der Glührückstand bzw. der Glasfaseranteil wird in % angegeben (Phoenix Contact, 2015b).

Anhang 6: Prüfbedingungen „Korngröße“

Messgerät:	Siebturm
Hersteller:	Siebtechnik
Prüfverfahren:	-
Analysesiebe:	ø 40 cm
Prüfmenge:	2 l (Probe in Anlehnung an LAGA PN 98)
Prüfdauer:	3 min

Versuchsbeschreibung:

Für die Analyse der Korngrößenverteilung wurden Laborproben der Mahlgüter in Anlehnung an die LAGA PN 98 entnommen. Die Mahlgüter wurden für diese Arbeit in Oktabin gelagert, in der rund 1.000 kg eines Rezyklates enthalten waren. Für die Laborprobe wurden vier Einzelproben je 1 Liter flächig aus der Oktabin entnommen. Die vier Einzelproben wurden zu einer Mischprobe zusammengefasst, aus der 2 Liter als Laborprobe entnommen wurden. Die Korngrößenverteilung des Mahlgutes wurde mittels einer Siebanalyse im Labor des Instituts für Anthropogene Stoffkreisläufe in Aachen gemessen. Für die Analyse wurde ein Siebturm gewählt. Als Siebschnitte wurden 6,3-mm- bis 0,5-mm-Siebe ausgewählt. Das größte Sieb wurde mit 6,3 mm so gewählt, dass kein Korn mehr liegen bleibt (Bunge, 2012, S. 13). Das kleinste Sieb mit 0,5 mm wurde gewählt, weil davon auszugehen ist, dass eine Fraktionierung < 0,5 mm nicht mehr relevant ist, da das Mahlgut zu klein und in diesem Bereich eher staubförmig ist. Für die Siebung wurde die gesamte Probe in den obersten Siebschnitt gegeben, am Ende der Siebung wurden alle Anteile in den jeweiligen Siebschnitten gewogen. Für die Auswertung der Siebanalyse wurde zuerst der Massenanteil ΔQ_i nach der nachfolgenden Formel berechnet und dann in eine Korngrößenverteilungsfunktion $Q(d)$ übertragen. In der Korngrößenverteilungsfunktion wird auch die mittlere Korngröße d_{50} aufgezeigt; diese zeigt an, wo sich das Material massenbezogen der Hälfte nach in Grobgut und Feingut teilt (Bunge, 2012, S. 14–16).

$$\Delta Q_i = \frac{\Delta M_i}{\sum_{k=i}^n \Delta M_k}$$

Anhang 7: Prüfbedingungen „Fließverhalten“

	<u>Lösungviskosität (VZ)</u>	<u>Schmelzviskosität (MVR)</u>
Messgerät:	PVS 1/4	B4106.200
Hersteller:	Lauda	Zwick
Prüfverfahren:	DIN EN ISO 307	DIN EN ISO 1133
Prüfmenge:	0,25 g	6 g
Prüfdauer:	2 d	15 min

Versuchsbeschreibung:

Die Analyse der VZ erfolgt mittels eines Viskositätsmessgeräts. Für die Messung wird die Kunststoffprobe in Schwefelsäure vollständig, allerdings mind. 12 Stunden, aufgelöst. Danach wird in einem Kapillarviskosimeter die Durchlaufzeit der Lösung und der reinen Schwefelsäure gemessen. Anhand der gemessenen Zeiten wird die Viskositätszahl nach der nachfolgenden Formel bestimmt. Als Analyseergebnis wird diese dann als reduzierte Viskosität VZ in cm^3/g ausgewertet (Phoenix Contact, 2015a):

$$\left[\frac{\eta}{\eta_0} - 1 \right] \frac{1}{C_P} = VN$$

Die Analyse der MVR erfolgte mittels eines Viskositätsmessgeräts. Während der Messung wird der Kunststoff aufgeschmolzen, mit konstanter Kraft belastet und durch eine Kapillare gedrückt. Das verdrängte Schmelzevolumen innerhalb von 10 min ist ein Maß für die Fließfähigkeit. Die Messung erfolgt fünfmal, die Messgröße ist $\text{cm}^3/10 \text{ min}$ und wird mit der nachfolgenden Formel berechnet (Phoenix Contact, 2016a)

$$\text{MVR} = \frac{\text{Volumen}}{10 \text{ min}} = \text{cm}^3/10 \text{ min}$$

Anhang 8: Prüfbedingungen „Rheologische Analyse“

Messgerät: HKR Rheograph 2002

Hersteller: Göttfert

Prüfverfahren: -

Prüfmenge: -

Prüfdauer: -

Versuchsbeschreibung:

„Die rheologische Charakterisierung erfolgt im Hochdruckkapillarrheometer (Hersteller: Göttfert) isotherm bei einer Temperatur abhängig von der Kunststofftype in einem definierten Schergeschwindigkeitsbereich.“ (IKV, 2023a, S. 2) Die Messungen erfolgten mit drei Düsen (Durchmesser = 1 mm; Länge: 10 mm, 20 mm und 30 mm) (IKV, 2023b, S. 3). Dabei sind die Temperaturen sowie die Schwergeschwindigkeitsbereiche prozess- und materialabhängig und wurden im Vorfeld als Untersuchungsbereich festgelegt (s. Tabelle). Als Temperatur wurde die mittlere Verarbeitungstemperatur der jeweiligen Kunststofftypen herangezogen. Die Schwergeschwindigkeiten wurden anhand vorliegender Modelldaten (Moldflow-Daten bzw. Daten der CAMPUS Datenbank/Campusdaten) in Verbindung mit materialabhängigen Machbarkeitsprüfungen am Institut für Kunststoffverarbeitung abgestimmt. Hierbei waren nicht alle theoretischen Schwergeschwindigkeiten messbar und im Rahmen der Projektarbeit wurden diese mehrfach neu bewertet sowie angepasst, sodass nach technischer Machbarkeit bis zu fünf Messstellen festgelegt wurden.

Tabelle Anhang 8: Messparameter rheometrische Analyse (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an IKV, 2023b, S. 4–9)

Probe	Klasse	T _{Schmelze} (Datenblatt Hersteller)	T _{HKR-Messung}	Schergeschwindigkeiten _{HKR}
1.1–1.3	PA 6.6	265–290 °C	275 °C	4.000 / 3.000 / 2.000 / 1.000 s ⁻¹
2.1	PBT	250–270 °C	260 °C	2.000 / 1.000 / 500 / 250 / 125 s ⁻¹
2.2		240–260 °C	250 °C	2.000 / 1.000 / 100 / 10 / 1 s ⁻¹
3	PC	280–300 °C	290 °C	8.000 / 2.830 / 1.000 / 350 / 125 s ⁻¹
4	LCP	345–350 °C	350 °C	3.000 / 1.500 / 750 / 350 / 150 s ⁻¹
5	TPU	205–220 °C	230 °C (Anpassung T erfolgt)	3.000 / 720 / 175 / 40 / 10 s ⁻¹

HKR = Hochdruckkapillarrheometer

Zur Bewertung der Ergebnisse ist ein vielfach eingesetztes Viskositäts-Modell das des Carreau-Ansatzes. Dieser Ansatz beschreibt sowohl den strukturviskosen als auch den Newton'schen Bereich (Bonten, 2020, S. 74). Dieses Modell bedarf Messwerte als Stützstellen um den Kurvenverlauf eines Materials zu parametrieren und eine reziproke Übergangs-

Schergeschwindigkeit zu ermitteln. Aufgrund der technischen Möglichkeiten konnten nicht alle Messwerte für die Auswertung herangezogen werden. „Einzelne Messpunkte mussten für die Auswertung bzw. Ermittlung der Carreau-Parameter entfernt werden.“ (IKV, 2023b, S. 6) Daraus folgte in der weiteren Betrachtung, dass die berechneten Daten mittels dem Carreau-Ansatz nur bedingt genutzt werden konnte und somit für die weitere Bewertung nicht durchgängig belastbar war. Aus diesem Grund wurden neben dem Carreau-Modell auch Vergleiche der Viskositätskurven vorgenommen und in der Ergebnisdarstellung aufgeführt.

Anhang 9: Prüfbedingungen „Zugprüfungen“

Messgerät: inspekt table 100 kN

Hersteller: Hegewald & Peschke

Prüfverfahren: ISO 527-1

Probekörper: Zugstab (Probekörper 1A nach der ISO 527-2/1A)

Abmessungen: Gesamtlänge 170 mm, Einspannlänge 115 mm

Prüfdauer: -

Versuchsbeschreibung:

Die Zugprüfungen wurden in Anlehnung an die ISO 527-1 durchgeführt. Hierzu wurden als Probekörper Zugstäbe im Spritzgießverfahren hergestellt (Maße s. Tabelle und Abbildung). Die mechanische Prüfung wurden gemäß Nr. 7 der ISO 527-1 mit fünf Probekörper durchgeführt und der arithmetische Mittelwert der Prüfergebnisse wurde berechnet. Für die Auswertung wurde das Zugmodul bzw. Elastizitätsmodul (E-Modul) ermittelt. Des Weiteren wurde die Zugfestigkeit ermittelt. Alle Auswertungen und Berechnungen wurden mit der Prüfsoftware LabMaster durchgeführt. Die Messungen erfolgten im trockenen Zustand bei Raumtemperatur.

Tabelle Anhang 9: Abmessungen Zugstab (Quelle: eigene Darstellung)

Zugstab 1A – Abmessungen nach ISO 527-2									
Probekörper-Typ	Bemerkung	l_3 [mm]	L_2 [mm]	l_1 [mm]	b_2 [mm]	b_1 [mm]	h [mm]	L_0 [mm]	L [mm]
1A	Probekörper durch Spritzgießen hergestellt	170	110	80 ± 2	$20 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$	$50 \pm 0,5$	115 ± 1

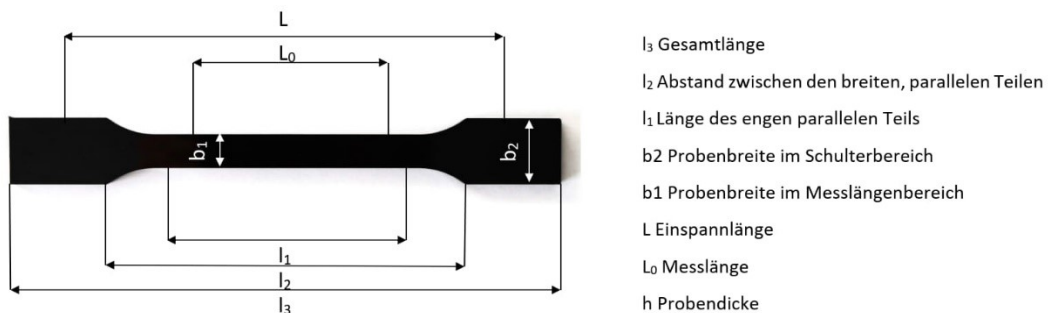


Abbildung Anhang 8: Zugstab Probekörper A1 nach ISO 527-2 (Quelle: eigene Darstellung)

Anhang 10: Prüfbedingungen „Kerbschlagbiegeprüfungen“

Messgerät: Pendelschlagwerk HIT 5.5P
 Hersteller: ZwickRoell
 Prüfverfahren: ISO 179-1
 Pendelschlagwerk: 2 J

Probekörper: Stabprobekörper (nach der ISO 179-1)
 Abmessungen: Gesamtlänge 80 mm
 Prüfdauer: -

Versuchsbeschreibung:

Für die Prüfung der Zähigkeit wird ein Stabprobekörper mit eingelassener Kerbe (Maße s. Tabelle 8 und Abbildung 22) durch ein Pendelschlagwerk auf Biegung beansprucht. In den Stabprobekörper wird vor der Prüfung eine Kerbe der Art A eingebracht. Die sogenannte Charpy-Schlagzähigkeits-Prüfung basiert auf der ISO 179-1. Die Prüfung erfolgte bei Raumtemperatur mit trockenen Prüfkörpern. Es wurden gemäß Nr. 6.4 der ISO 179-1 zehn Probekörper geprüft und der arithmetische Mittelwert der Prüfergebnisse wurde berechnet.

Tabelle Anhang 10: Abmessungen Stabprobekörper (Quelle: eigene Darstellung)

Probekörper – Abmessungen nach ISO 179-1				
Probekörper-Typ	Bemerkung	l [mm]	b ₁ [mm]	h [mm]
Stabprobekörper	Probekörper durch Spritzgießen	80 ± 2	10 ± 0,2	4,0 ± 0,2



- l Gesamtlänge
- b Breite
- Rb Restbreite
- h Probendicke

Abbildung Anhang 9: Stabprobekörper Kerbschlagbiegeprüfung nach ISO 179 (Quelle: eigene Darstellung)

Mithilfe der Prüfung lässt sich die Schlagarbeit messen, die ein Pendelschlaghammer zum Durchschlagen eines bestimmten Probekörpers braucht. Dabei wird die zum Durchschlag benötigte Energie, bezogen auf den ursprünglichen Querschnitt des Probekörpers unter der Kerbe, als Kerbschlagzähigkeit (a_k) bezeichnet. Letztere lässt sich mit der nachfolgenden Formel ermitteln und wird in kJ/m^2 angegeben. Die Berechnung findet in der Software testXpert III des Herstellers ZwickRoell statt.

$$a_k = \frac{Ak}{b \cdot h}$$

Anhang 11: Prüfbedingungen „Bruchprüfungen“

Messgerät: Großmaßschie 35,3 mm

Hersteller: -

Prüfverfahren: Phoenix Contact

Probekörper: Kunststoffgehäuse mit Fuß

Abmessungen: -

Prüfdauer: -

Versuchsbeschreibung:

Das Gehäuse wird auf einer Großmaßschiene mit einer Breite von 35,3 mm spritzfrisch nach ca. 15 bis 60 min Abkühlzeit geprüft. Bei der Fußbruchprüfung werden das Auf- und Abrasten des Gehäuses getestet. Zuerst wird der feste Fuß auf die Tragschiene gesetzt. Daraufhin wird eine gleichmäßige Kraft von oben auf den beweglichen Fuß aufgebracht, sodass dieser auf der gegenüberliegenden Seite der Schienen aufrastet. Wenn das Gehäuse fehlerfrei aufgerastet ist, umschließen beide Rasthaken die Schiene (s. Abbildung). Daraufhin wird das Abrasten des Gehäuses getestet. Zum Abrasten wird der für das Bauteil empfohlene Schraubendreher in die entsprechende Tasche an dem Gehäuse gesteckt und so weit ausgelenkt, bis der Schraubendreher am Gehäuse anliegt. Ist daraufhin der bewegliche Fuß so weit angehoben, dass der Rasthaken nicht mehr unterhalb der Schiene liegt, kann das Gehäuse angehoben und von der Schiene entfernt werden. (Phoenix Contact, 2022b, S. 11–14)

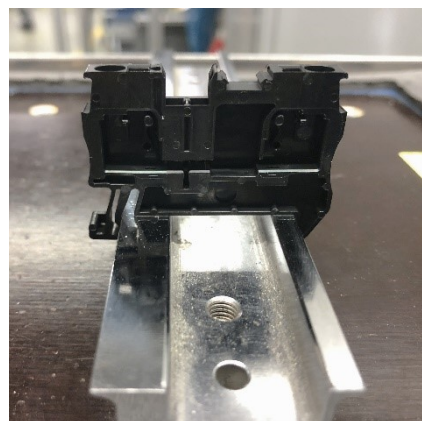
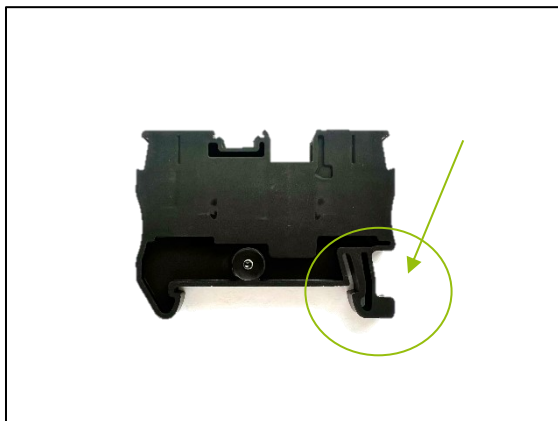


Abbildung Anhang 10: Kunststoffgehäuse mit Fuß und auf der Tragschiene (Quelle: eigene Darstellung)

Anhang 12: Berechnungsgrundlage „Die Säulen der Recyclingfähigkeit am Fallbeispiel Phoenix Contact“

Die Berechnung der Recyclingfähigkeit basiert auf Unternehmensdaten von Phoenix Contact aus dem Jahr 2021 und Forschungsdaten dieser Arbeit. In der Tabelle Anhang 12 werden die Massenflüsse dargestellt, die der Berechnung zur Recyclingfähigkeit zu Grunde liegen.

Tabelle Anhang 12: Auswertung und Berechnung der Daten zur Grundlagenermittlung (eigene Darstellung)

	Jahresmenge 2021*	Berechnung	Forschungsergebnis**	Einstufung Recyclingfähigkeit
Kunststoffabfallmenge gesamt	100 %			
Produktionsabfall Kunststoff „sortenrein“	63,34 %			
Produktionsabfall „vermischt“	10,13 %	100 % - 10,13% = 89,87 %		theoretische Recyclingfähigkeit
Einsatz Rezyklate PA 6.6 (Interner Wiederverwendung von Mahlgut)	26,53 %			reale Recyclingfähigkeit
PA 6.6 Rezyklat gesamt			73,10 %	
PBT Rezyklat gesamt			8,44 %	
Rezyklatanteil gesamt			81,54	technische Recyclingfähigkeit

*Aufgrund sensibler Unternehmensdaten werden die Massenflüsse nur in % dargestellt und es wird auf die Darlegung der Mengen verzichtet.

** Anteil der Kunststoffabfälle von der Gesamtkunststoffabfallmenge nach Kunststofftyp