



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria



hirtenberger
Automotive Safety

DIPLOMARBEIT

Weiterentwicklung eines pyrotechnischen Schlossaktuators im Fußgängerschutz

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
Master of Science unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Vasiliki-Maria Archodoulaki

Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie
Fachbereich Polymer- und Verbundwerkstoffe

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

Silvia Grafinger, BSc



12. November 2020

Unterschrift StudentIn

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht. Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich unterstützt haben, damit diese Arbeit entstehen konnte.

Ich möchte mich bei Frau Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Vasiliki-Maria Archodoulaki bedanken, die meine Arbeit betreut hat und immer ein offenes Ohr und hilfreichen Input hatte.

Für das spannende Thema und die fortwährende Unterstützung möchte ich mich bei der Firma Hirtenberger Automotive Safety GmbH & Co KG bedanken. Im Besonderen bei Dr. Robert Raab, der diese Arbeit von Seiten der Firma betreut hat und mir immer unterstützend zur Seite stand. Sowie bei meinem Kollegen Daniel Merstallinger, MSc, der als Produktentwickler des Schlossaktuators immer ein offenes Ohr für mich hatte und meinem Vorgesetzten Dr. Gunter Feik, der mir immer wieder sehr guten Input gab und alle meine Ideen unterstützte.

Ein besonderer Dank gebührt auch meinen Eltern (Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Grafinger und Mag.phil.Mag.rer.nat Gyöngyi Grafinger), die mir mein Studium ermöglicht haben, mich dabei immer unterstützt haben und mir Kraft gegeben haben meinen Traum zu verwirklichen. Zusätzlich möchte ich mich bei meinem Vater für das Korrekturlesen der Arbeit bedanken.

Meinem Freund Dipl.-Ing. Florian Spreitzer möchte ich ebenso für die Unterstützung im gesamten Masterstudium als auch für das Korrekturlesen der Arbeit danken.

Ich möchte mich auch bei meinen Studienkollegen sowohl im Bachelor- als auch im Masterstudium bedanken, die mit mir gemeinsam diesen Weg gegangen sind.

Abstract

A pyrotechnic object was evaluated according to the sealing effect. The aim was to find a material which still has the required sealing effect after a thermal load of 150 hours at 120°C + 2000 hours at 110 ° C. For this purpose, methods of material characterization such as dynamic differential calorimetry and thermogravimetry were used to understand the melting and decomposition behavior of the materials. The fulfillment of the requirements was checked by a performance check on the component over the entire thermal load. At the same time, mechanical tests were carried out (notched bar impact test and tensile test) to determine the decisive material properties for a positive completion of the performance test.

It was shown that from the tested materials only the polyphthalamide Zytel HTNFE8200 meets the requirements according to the total thermal load. Possible materials could be identified through additional tests, but these were not run through all tests. It turns out that the best way to check the material is to test the component itself. The results of the impact test do not correlate with the results of the component test. The results of the tensile test, on the other hand, can provide information about the probability of failure in the unaged state. The material change observed due to the thermal load in the component could not be identified with any of the standardized test methods.

Kurzfassung

Im Zuge der Arbeit wurde ein Dichtelement in einem pyrotechnischen Gegenstand untersucht. Es galt einen Werkstoff zu finden, welcher nach einer thermischen Belastung von 150h bei 120°C + 2000h bei 110°C immer noch die geforderte Dichtwirkung besitzt. Hierfür wurden Methoden der Werkstoffcharakterisierung wie Dynamische Differenzkalorimetrie und Thermogravimetrie angewendet um das Schmelz- sowie Zersetzungsverhalten der Werkstoffe zu verstehen. Mittels Leistungsüberprüfung am Bauteil über die gesamte thermische Belastung wurde die Erfüllung der Dichtheitsanforderung geprüft. Parallel dazu wurden mechanische Tests durchgeführt (Kerbschlagbiegeversuch und Zugversuch) um die ausschlaggebenden Werkstoffeigenschaften für eine positive Absolvierung der Leistungsüberprüfung zu eruieren.

Es zeigte sich, dass aus den getesteten Werkstoffen nur das Polyphthalamid Zytel HTNFE8200 die Dichtigkeitsanforderungen nach der gesamten thermischen Belastung erfüllt. Durch ergänzende Tests konnten weitere mögliche Werkstoffe identifiziert werden, diese haben aber nicht alle Tests durchlaufen. Es zeigt sich, dass die beste Möglichkeit für eine Überprüfung des Werkstoffes der Bauteilversuch selbst ist. Die Ergebnisse des Kerbschlagbiegeversuch korrelieren nicht mit den Ergebnissen der Bauteilprüfung. Die Ergebnisse des Zugversuches hingegen können Aussagen darüber liefern wie wahrscheinlich ein Versagen im ungealterten Zustand ist. Die beobachtete Werkstoffveränderung durch die thermische Belastung im Bauteil konnte mit keiner der genormten Prüfverfahren identifiziert werden.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Problemstellung	1
1.2. Vorgehensweise	1
2. Grundlagen des Produktes	2
2.1. Beschreibung Produkt	2
2.2. Anforderungen nach AK-LV34	3
2.3. Werkstoffanforderungen	3
2.3.1. Simulation Temperatureinwirkung	5
3. Grundlagen der Messmethoden	6
3.1. Validierung Temperatursimulation	6
3.2. Leistungsprüfung	6
3.3. Rückstellkraft	8
3.4. Kerbschlagbiegeversuch	9
3.5. Zugversuch	12
3.6. Dynamische Differenzkalorimetrie	16
3.7. Thermogravimetrie	19
4. Werkstoffauswahl	22
4.1. Werkstoffanforderungen	23
4.1.1. Auswahlkriterien für Werkstoffe	23
4.1.2. Verarbeitbarkeit	24
4.1.3. Schlagzähigkeit	25
4.1.4. Alterung	25
4.1.5. Rückstellkraft	27
4.2. Beschreibung getesteter Werkstoffe	27
4.2.1. Polyamide	27
4.2.2. PA6+ABS - AkromidB3-23RMD	31
4.2.3. Polyketon - Akrotek PK VM 4774	32
4.2.4. Polybutylenterephthalat - Crastin ST820	32
4.2.5. Thermoplastische Elastomere	33
5. Ergebnisse	35
5.1. Validierung Temperatursimulation	35
5.2. Leistungsüberprüfung	36
5.2.1. Ungealterte Aktuatoren	38

5.2.2. Gealterte Aktuatoren	42
5.3. Rückstellkraft	50
5.4. Zugversuch	51
5.4.1. Ungealterte Proben	54
5.4.2. Gealterte Proben	56
5.5. Kerbschlagbiegeversuch	60
5.6. Dynamische Differenzkalorimetrie	63
5.7. Thermogravimetrie	68
5.8. Ergänzende Untersuchungen	69
6. Conclusio	71
6.1. Zusammenfassung	71
6.2. Interpretation	73
6.3. Weiterführende Untersuchungsmöglichkeiten	73
A. Datenblätter	75
B. DSC-Messungen	101
C. Zugversuch	103
D. Kerbschlagbiegeversuch	106

Abbildungsverzeichnis

2.1. Schnittbild Schlossaktuator	2
2.2. Pyramide Kunststoffe	4
2.3. Temperatursimulation PA6.6	5
3.1. Aufbau Leistungsüberprüfung	7
3.2. Leistungsgrenzen bei der Leistungsüberprüfung	8
3.3. Kerbschlagbiegeversuch Probenpositionierung	9
3.4. Versuchsaufbau Schlagbiegeversuch Charpy	10
3.5. Schlagbiegeproben temperieren	11
3.6. Zugversuch Umgebungseinfluss	13
3.7. Probengeometrie Zugversuch	14
3.8. Zugversuch Werkstoffarten	16
3.9. Versuchsaufbau DSC	17
3.10. Versuchsaufbau TGA-Messung	19
4.1. Aufbau Kunststoffe	22
4.2. Amidgruppe	28
4.3. Aufbau Polyamide mit einem Ausgangsstoff	28
4.4. Aufbau Polyamide mit zwei Ausgangsstoffen	28
4.5. Aufbau PA6.6	29
4.6. Benzol	29
4.7. Aufbau ABS	32
4.8. Aufbau Polyketon	32
4.9. Streckdehnung unterschiedlicher Polymere	33
4.10. Aufbau PBT	33
4.11. Thermoplastische Elastomere	34
5.1. Temperaturmesslack Positionen	35
5.2. Wulst Kolbenaufsatz innen	37
5.3. Kolbenaufsatz Bruchbild PA6+ABS	38
5.4. Kolbenaufsätze aus Polyketon	39
5.5. Schadensbild Kolbenaufatz TPE Basis-PP	40
5.6. Schadensbild Kolbenaufatz PPA	41
5.7. Schadensbild Kolbenaufatz TPE - Basis PS	42
5.8. Spritzfehler bei Kolbenaufsatz aus PA12	43
5.9. Leistungsüberprüfung PA12	44
5.10. Schadensbild Kolbenaufatz PA6.6	44
5.11. Leistungsüberprüfung PA6.6	45

5.12. Schadensbild Kolbenaufsatz PA6.6	46
5.13. Leistungsüberprüfung PA6.6	46
5.14. Leistungsüberprüfung PPA	47
5.15. Kolbenaufsatz PPA nach thermischer Alterung	47
5.16. Schadensbild Kolbenaufsatz TPU	48
5.17. Leistungsüberprüfung TPU	49
5.18. Schadensbild Kolbenaufsatz TPEE	49
5.19. Leistungsüberprüfung TPEE	50
5.20. Zusammenfassung Rückstellkräfte	51
5.21. Ergebnisse Zugversuch bei Raumtemperatur	52
5.22. Ergebnisse Zugversuch bei -40°C	52
5.23. Ergebnisse Zugversuch thermoplastische Elastomere	53
5.24. Unterschied Zugversuche verschiedene Alterungsstufen	56
5.25. Ergebnisse Kerbschlagbiegeversuch - Temperaturen	60
5.26. Ergebnisse Kerbschlagbiegeversuch - Auflageabstand	62
5.27. Ergebnis DSC-Messung von PA6+ABS und PBT	64
5.28. Ergebnis DSC-Messung von Polyketon	64
5.29. Ergebnis DSC-Messung Thermoplastischer Elastomere	65
5.30. Ergebnisse DSC-Messungen Polyamide	67
5.31. TGA Messungen	69
 B.1. DSC Messung Polyamid 12	 101
B.2. DSC Messung TPE mit PP-Basis	102
B.3. DSC Messung Polyamid 66	102
 C.1. Bruchfläche PA6+ABS	 103
C.2. Bruchfläche Polyketon	103
C.3. Bruchfläche PBT	103
C.4. Zugprüfkörper verschiedene TPE	104
C.5. Zugprüfkörper PPA (Grivory HT3Z)	104
C.6. Bruchfläche PA12	104
C.7. Bruchfläche PA66 (Zytel)	105
C.8. Verfärbung durch Alterung PA66 (Zytel)	105
C.9. Zugstäbe aus Zytel HTNFE8200	105
 D.1. Kerbschlagbiegeversuch Zytel HTNFE8200	 106
D.2. Kerbschlagbiegeversuch Grilamid L20G	106

1. Einleitung

1.1. Problemstellung

In einem von der Firma (Hirtenberger Automotive Safety GmbH & Co KG) entwickelten Schlossaktuator befindet sich eine Kunststoff Dichtlippe. (siehe Kapitel 2) Die Dichtfunktion muss zwischen -40°C und $+110^{\circ}\text{C}$ Prüftemperatur über die gesamte Lebensdauer gegeben sein. (siehe Kapitel 2.2) Ziel der Arbeit ist im Zuge der Weiterentwicklung des pyrotechnischen Aktuators die Optimierung des thermoplastischen Dichtelements (genannt Kolbenaufsatz) mit dem Fokus auf Rückstellbarkeit und thermische Alterung.

1.2. Vorgehensweise

Das Ziel der Arbeit wurde im Vorfeld in Teilziele unterteilt, demnach galt es die Vorgeschichte des Kolbenaufsatzes aufzuarbeiten und daraus gemeinsam mit den theoretischen Anforderungen an das Produkt aus der AKLV-34 (siehe Kapitel 2.2) und den Empfehlungen der Lieferanten eine Werkstoffauswahl für die thermische und mechanische Werkstoffcharakterisierung auszuwählen. Hierfür wurden die Datenblätter von über 70 Werkstoffen verglichen und 11 für die Analysen ausgewählt. Durch die Identifizierung der Eigenschaften dieser Werkstoffe, durch unterschiedliche Untersuchungen und der Absicherung im Produkt auf die Erfüllung der gestellten Anforderungen, konnte ein weiteres Teilziel erreicht werden. Im Zuge der produktbezogenen Untersuchungen zeigte sich, dass nur einer der gewählten Werkstoffe die gewünschten thermischen Anforderungen erfüllen kann. Durch die Identifizierung der abweichenden Eigenschaften dieses Werkstoffes im Gegensatz zu den anderen Werkstoffen und ergänzende Untersuchungen mit drei weiteren Werkstoffen, die zum Teil ebenso diese Eigenschaften besitzen, konnte der nächste Teilschritt die Ableitung der Werkstoffanforderungen abgeschlossen werden. Durch die positive Absolvierung der Tests eines ausgewählten Werkstoffes bezüglich der gestellten Anforderungen und der Identifizierung der ausschlaggebenden Werkstoffeigenschaften ist das Ziel der Arbeit somit erfüllt. Weiterführende Untersuchungen, welche auf den Erkenntnissen dieser Arbeit beruhen und Werkstoffe mit den identifizierten ausschlaggebenden Werkstoffeigenschaften betrachten, können als Ergebnis weitere Werkstoffe bringen, welche die Produktanforderungen erfüllen können.

2. Grundlagen des Produktes

Bei dem untersuchten Produkt handelt es sich um einen so genannten Schlossaktuator. Aktuatoren im Allgemeinen dienen dazu, ein elektrisches Signal in mechanische Bewegung umzusetzen [20]. Der in dieser Arbeit beschriebene Schlossaktuator im Speziellen ist Teil eines aktiven Fußgängerschutzsystems, welches bei Detektion eines Fußgängeraufpralls am Stoßfänger die Motorhaube in wenigen Millisekunden anhebt. Dadurch entsteht zusätzlicher Deformationsraum, welcher das Verletzungsrisiko beim primären Kopfaufprall auf die Motorhaube eines Personenkraftwagen und der sich darunter befindenden harten Komponenten vermindern soll. Grundsätzlich wird dies durch Scharnieraktuatoren im hinteren Bereich der Motorhaube erreicht. Ist der Deformationsraum im vorderen Bereich, welcher vor allem beim Aufprall von Kindern ausschlaggebend ist, unzureichend groß, können Schloßaktuatoren die zusätzlich nötige Anhebung gewährleisten. [13].

2.1. Beschreibung Produkt

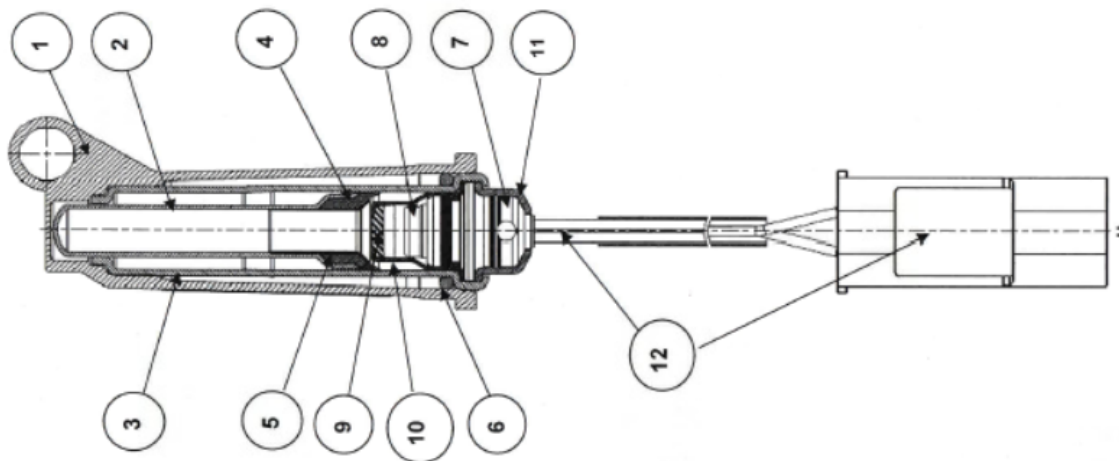


Abbildung 2.1.: Querschnitt eines Schloßaktuators PL7

Das Produkt besteht aus einem Kolben (Abb.2.1-2) mit Dichtungskomponente (in Folge Kolbenaufsatz genannt)(Abb.2.1-4), einem Rohr (Abb.2.1-3), einem Gasgenerator (Zünder plus Treibmittel)(Abb.2.1-7ff) und einem Kunststoffgehäuse(Abb.2.1-1) mit

Dichtung (Abb.2.1-6). Letzteres wird als Abdeckkappe bezeichnet und ist für den Verbau im aktiven Schloss notwendig. Diese Arbeit handelt über den Kolbenaufsatz, der Aufbau des Gesamtsystems wird in Folge nicht weiter erläutert. Durch die Umsetzung des zweistufigen Zünders, ausgelöst durch das elektrische Signal der ECU (electronic control unit), wird das erste Glied der Zündkette gestartet und damit die Schnittstelle zwischen Fahrzeugelektronik und mechanischen Komponenten eingeleitet. Das heißt ein Stromimpuls erhitzt einen elektrischen Widerstand im Zünder (Glühbrücke, Chip), dessen Hitze reicht aus, um die Primärladung und in weiterer Folge auch die Sekundärladung zu zünden. Durch die Umsetzung der Sekundärladung (auch Boosterladung genannt), wird die notwendige Wärmemenge frei, um das innerhalb des so genannten Treibladungsgehäuses befindliche Treibladungsmittel zu zünden.

Durch die Verbrennung entsteht der nötige Gasdruck, um den Kolben im Rohr nach vorne zu befördern. Dieser durchbricht die Abdeckkappe und löst im Ernstfall die Kinematik eines aktiven Motorhaubenschlosses aus. Bei Versuchen wird in einem Ersatzprüfaufbau getestet (siehe Kapitel 3.2) und mit der Energie des Kolbens ein Prüfgewicht beschleunigt. Die notwendige Abdichtung gegen das Rohr, um eine ausreichende Kraftübertragung zu gewährleisten, garantiert der Kolbenaufsatz aus Kunststoff. Die Weiterentwicklung dieses Kolbenaufsatzes ist das Kernthema dieser Arbeit.

2.2. Anforderungen nach AK-LV34

AK-LV34 steht für Arbeitskreisليفervorschrift und ist eine Konzernnorm. Diese Norm wurde von den Automobilherstellern AUDI AG, BMW AG, Daimler AG, Porsche AG und Volkswagen AG erarbeitet und legt Anforderungen und Prüfbedingungen an einen Aktuator für Fußgängerschutz fest. Die Erfüllung der Funktion sowie die Qualität innerhalb des Gesamtsystems soll dadurch abgesichert werden. Die Anforderungen nach AK-LV34 an einen pyrotechnischen Fußgängerschutzaktuator sind im Anhang zu finden. Da durch die in Kapitel 2.1 beschriebene Einbausituation der Kolbenaufsatz vor etwaigen Medien von außen relativ gut geschützt ist, ist der kritische Test im Bezug auf den Kolbenaufsatz die Hoch-Temperaturlagerung (infolge mit HT-Lagerung abgekürzt). Unter anderem dient diese Umweltsimulation dazu, die Lebensdauer von 15 Jahren durch eine erhöhte Temperatur in einem kürzeren Zeitraum abzubilden. Um Motorraumbedingungen erfüllen zu können entspricht dies einer seriellen Belastung von 150h bei 120°C und 2000h bei 110°C [62]. Der Aktuator muss nach dieser HT-Lagerung beim Auslösen die erforderliche Performance weiterhin liefern.

2.3. Werkstoffanforderungen

Neben dem in Kapitel 2.2 beschriebenen Temperaturkollektiv unterliegt der Kolbenaufsatz beim Beschuss weiteren Belastungen. Diese Belastungen sind nicht messbar und können nur simulativ angenähert werden (siehe Kapitel 2.3.1). Durch den Abbrand des Treibladungspulvers herrschen kurzfristig ein enormer Druck sowie sehr hohe Tempera-

turen. Zeitgleich muss der Werkstoff einer Schlagbeanspruchung standhalten. Die Leistungsüberprüfung wird bei -40°C , bei Raumtemperatur (im Folgenden RT abgekürzt) sowie bei $+110^{\circ}\text{C}$ durchgeführt. Der Werkstoff muss somit von -40°C bis $+110^{\circ}\text{C}$ relativ stabile Werkstoffeigenschaften besitzen. Je höher die Temperatur bei der Anwendung des Kunststoffes, desto weniger Werkstoffe gibt es, welche die entsprechenden Kriterien erfüllen (siehe Abb. 2.2). Nur wenige der üblicherweise eingesetzten Kunststoffe weisen eine Langzeittemperaturgrenze für die Anwendung von über 120°C auf. [25] Zusätzlich wird durch die geforderte Kaltzähigkeit die Auswahl an möglichen Kunststoffen weiter eingeschränkt.

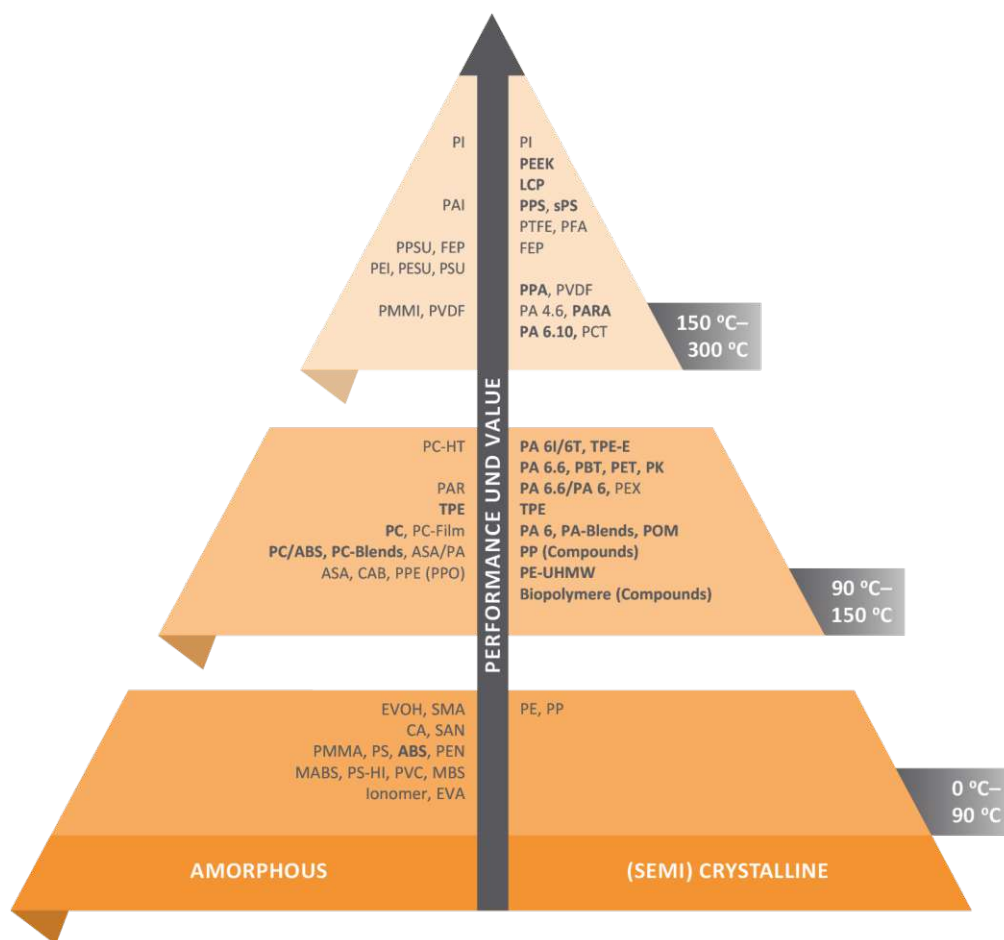


Abbildung 2.2.: Einteilung verschiedener Kunststoffe nach ihrer Gebrauchstemperatur [31]

2.3.1. Simulation Temperatureinwirkung

Die Simulation wurde firmenintern von einer anderen Abteilung durchgeführt. Für die Simulation wurde eine kurzfristig erwartete Innentemperatur beim Abbrand der pyrotechnischen Treibladung von 2500K angenommen. Diese Temperatur ergibt sich nicht aus einer vollständigen Abbrandsimulation, sondern aus Erfahrungswerten, sowie anderen firmeninternen Versuchen und Simulationen. Die Temperatur wurde simulativ auf die Oberfläche eines Zylinders mit 1mm Radius aus dem Referenzmaterial (PA6.6 siehe Kapitel 4.2.1) aufgetragen. In Abb. 2.3a ist klar zu erkennen, dass nur die äußerste Randschicht durch die Erwärmung betroffen ist. Bei einer Temperatureinwirkung von 10ms sind 0.15mm der Oberfläche aufgeschmolzen, doch der Kern bleibt stabil. Ein tieferes Eindringen der Temperatur ist nicht möglich, da die Wärmeleitung in PA6.6 nicht schnell genug ist. Die Darstellung der Temperatur über die Zeit und der Position im Zylinder verändert sich langsam. Auch diese Darstellung zeigt, dass sich die Wärme nur sehr langsam nach innen verteilt. Die kurze Zeit von 10ms wurde gewählt, da bis dahin der Abbrand des pyrotechnischen Treibladungsmittels vollständig erfolgt ist und es dadurch zu keinem weiteren Wärmeeintrag von außen kommen kann.

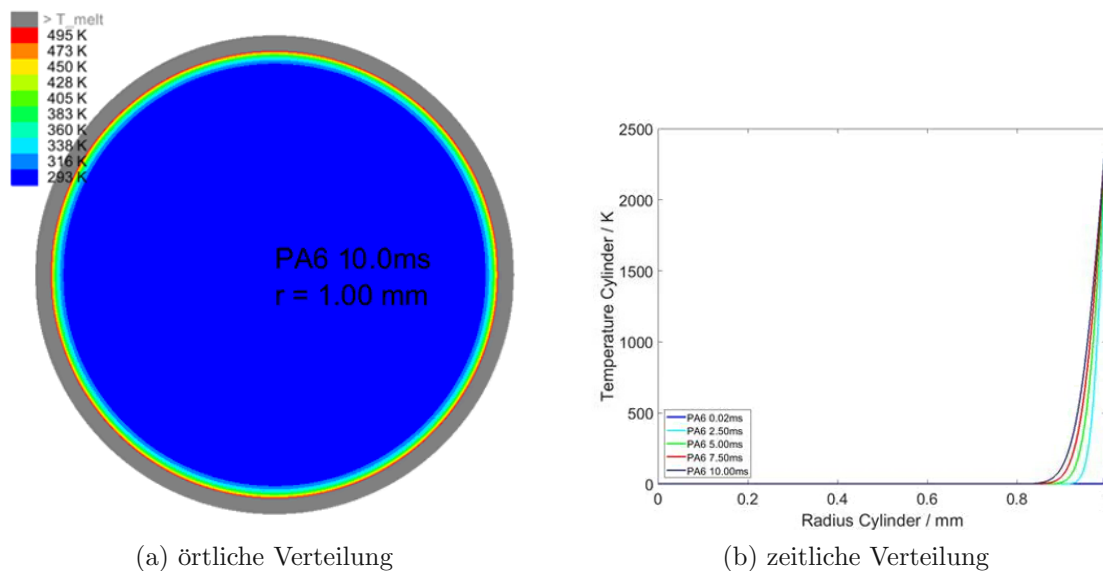


Abbildung 2.3.: Simulatives Drahtmodell zur Temperaturverteilung in GrilonAZ3 (PA6.6)

Auf das Produkt bezogen bedeutet diese Temperatursimulation, dass nur der innere, der Treibladung zugewandte Teil des Kolbenaufsatzes eine oberflächliche Temperaturbelastung erfährt.

3. Grundlagen der Messmethoden

Im Zuge der Arbeit wurden neben verbreiteten Materialprüfmethode n auch Tests direkt am Produkt durchgeführt. Letztere sind unablässig, da die notwendigen Werkstoffeigenschaften in der Theorie schwer abbildbar sind. Die Materialprüfmethode n wurden ebenfalls möglichst anwendungsnah definiert. Es galt eine dynamische Beanspruchung bei verschiedenen Temperaturen abzubilden, hierfür wurde die Charpy-Schlagzähigkeit gewählt. Um allgemeine mechanische Eigenschaften der unterschiedlichen Werkstoffe untersuchen und vergleichen zu können, ist der Zugversuch herangezogen worden. Um die Temperaturbelastbarkeit sowie die Werkstoffeigenschaftsänderungen bei verschiedenen Temperaturen abbilden zu können wurden DSC-Messungen (Dynamische Differenzkalorimetrie) durchgeführt. Da bei bestimmten Werkstoffen die Vermutung bestand, dass sie bei längeren HT-Lagerungen ausgasen, wurden zusätzlich einzelne TGA-Messungen (Thermogravimetrie) durchgeführt.

3.1. Validierung Temperatursimulation

Um die Simulation zu validieren wurden Messungen mit einem so genannten Temperaturmesslack durchgeführt. Dieser Lack hat je nach Messbereich verschiedene Farben. Wenn die Aktivierungstemperatur erreicht wird, dann schlägt die Farbe des Lacks von farbig matt auf durchsichtig glänzend um. Dem Datenblatt zufolge beträgt die Reaktionszeit der einzelnen Temperaturmesslacke 1ms. Um das Auftragen der Lacke gewährleisten zu können besteht die Möglichkeit bei diesen mit einem passenden Verdünner die gewünschte Konsistenz einzustellen [57].

Es wurden Lacke verschiedener Temperaturen an unterschiedlichsten Stellen des Aktuators getestet. Dies dient dazu zu testen, ob und in welchem Bereich diese Messmethode in dieser aggressiven Umgebung anwendbar ist. Wenn unterschiedliche Messpunkte möglich sind, kann dadurch die Simulation an unterschiedlichen Punkten überprüft werden.

3.2. Leistungsprüfung

Die Funktion, sowie die Leistung des Schlossaktuators muss unter allen Umständen gewährleistet sein. Um dies sicherzustellen werden die verschiedenen Werkstoffe (in Kapitel 4.2 beschrieben) im Aktuator verbaut und anschließend einer Leistungsprüfung nach AK-LV34 [62] unterzogen. Diese Prüfung wird für ungealterte, als auch gealterte Aktuatoren durchgeführt.

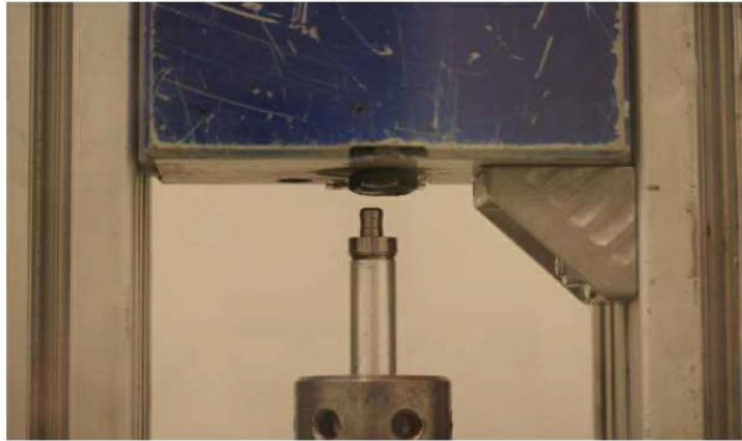


Abbildung 3.1.: Ausgelöster Aktuator in Ersatzsystem Fallturm mit gehobenem Gewicht [62]

Messprinzip

Vor dem Test wird der fertig aufgebaute Aktuator für mindestens 2 Stunden im gewünschten Klima temperiert. Die Prüftemperaturen für den untersuchten Schlossaktuator betragen -40°C , $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ und 110°C . Die Umgebungstemperatur bei der Zündung beträgt Raumtemperatur, der Aktuator sollte nach dem Herausnehmen aus dem Ofen/der Tiefkühltruhe möglichst schnell in die Prüfvorrichtung eingespannt und geschossen werden. [62] Durch stichprobenartige Messungen der Zeit von Kühltruhe bis zum Beschuss konnte festgestellt werden, dass diese Zeit unter 30s liegt.

Der Aktuator ist mit seiner Abdeckkappe in die Prüfvorrichtung eingespannt. Der Dämpfer, welcher an das zu hebende Gewicht montiert ist, liegt auf der Außenseite der Abdeckkappe auf. Durch das Auslösen des Aktuators mittels Zündimpuls wird die Kunststoffkappe durchschlagen, der Dämpfer getroffen und das Gewicht gehoben (siehe Abb.3.1).

Auswertung

Die durch das Auslösen des Aktuators erzeugte Kraft wird ebenso aufgezeichnet, wie der von dem Gewicht zurückgelegte Weg. Für die Auswertung der Leistungsüberprüfung wird eine Kraft[N]-Zeit[ms], sowie eine Weg[mm]-Zeit[ms] Kurve dargestellt, welche innerhalb definierter Grenzen liegen muss (siehe Abb. 3.2).

Das Hauptkriterium ist ein definierter Weg, bei einem bestimmten Zeitpunkt. In dem Aufbau, welcher in dieser Arbeit getestet wird, sind es 23mm Hub bei 20ms.

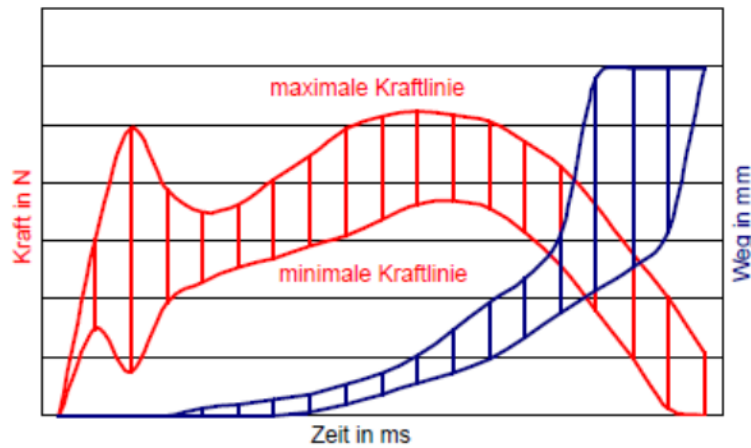


Abbildung 3.2.: Beispiel eines Kraft- bzw. Wegkennfeldes für eine Prüftemperatur [62]

3.3. Rückstellkraft

Es sollte gewährleistet werden, dass die Motorhaube nach dem Auslösen des aktiven Fußgängerschutzsystems wieder geschlossen werden kann. Dafür darf die benötigte Kraft um den Aktuator in Anfangsposition zurückzuschieben eine definierte Größe nicht überschreiten.

Messprinzip

In einer Einspannvorrichtung wird der Aktuator nach dem Auslösen innerhalb von einer Stunde senkrecht auf einer Zwick-Prüfmaschine platziert. In weiterer Folge wird mit 25mm/min mit einer Platte auf den ausgefahrenen Kolben des Aktuators gedrückt. Es wird die Kraft gemessen, welche benötigt wird um den Kolben des Aktuators zurück zu drücken.

Auswertung

Durch den erhaltenen Zusammenhang zwischen Weg[mm] und Kraft[N] kann einerseits die Maximalkraft, sowie deren Position innerhalb des Aktuators bestimmt werden. Dadurch können etwaige Probleme wie Kraftspitzen auf einen bestimmten Bereich im Aktuator eingegrenzt werden. Durch die Analyse der Gesamtkurve, sowie mehrerer Aktuatoren des gleichen Werkstoffes kann außerdem festgestellt werden, ob statistisch verteilte Verbrennungsrückstände oder der Aufbau die notwendigen Kräfte in die Höhe treibt.

3.4. Kerbschlagbiegeversuch

Der Schlagbiegeversuch nach Charpy dient zur Beurteilung der Zähigkeit von Kunststoffen bei schlagartiger Beanspruchung. Dieser Versuch zählt auch heute zu den am weitest verbreiteten Verfahren in der industriellen Prüfpraxis [52]. Die genormte Vorgehensweise für Schlagzähigkeit nach Charpy ist in [14] zu finden. Für die Werkstoffcharakterisierung wurde dieses Verfahren gewählt, da es sich um eine schlagartige Beanspruchung handelt. Durch die Kerbe kommt es zu verschärften Prüfbedingungen.

Messprinzip

Beim Schlagbiegeversuch nach Charpy wird die zu messende Probe auf zwei Widerlager mittig positioniert, im Falle einer Kerbe ist die Genauigkeit der Positionierung noch kritischer um gewährleisten zu können, dass der Schlag die Probe an der schwächsten Stelle trifft. Die Kerbe ist hierfür auf der dem Hammer entgegengesetzten Seite zu positionieren (siehe Abb. 3.3).

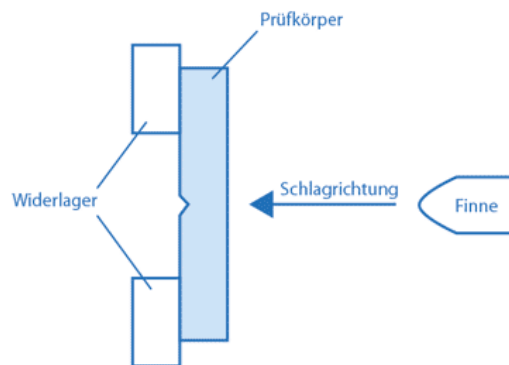


Abbildung 3.3.: Positionierung eines Probekörpers bei Schlagbiegeversuchen nach Charpy [68]

Je nach Werkstoff wird eine passende Hammergröße ausgewählt. Dieser ist oberhalb der Probe mittig gelagert und wird ausgelenkt. Durch plötzliches Lösen der Halterung wird der Hammer freigesetzt und durch die auf ihn wirkende Schwerkraft in Richtung Probe beschleunigt. (siehe Abb. 3.4)

Um die Kerbschlagbiegeprüfung bei unterschiedlichen Temperaturen durchführen zu können wurde vergällter Ethanol mit Trockeneis angemischt. Mittels Thermometer und Trockeneiszugabe wurde die gewünschte Temperatur eingestellt. Die Proben wurden anschließend für etwa 30 Minuten in das Bad eingelegt (siehe Abb.3.5), gegebenenfalls wurde die Temperatur nachjustiert. Die Platzierung der Prüfkörper im Versuchsaufbau erfolgte innerhalb weniger Sekunden mit Handschuhen.

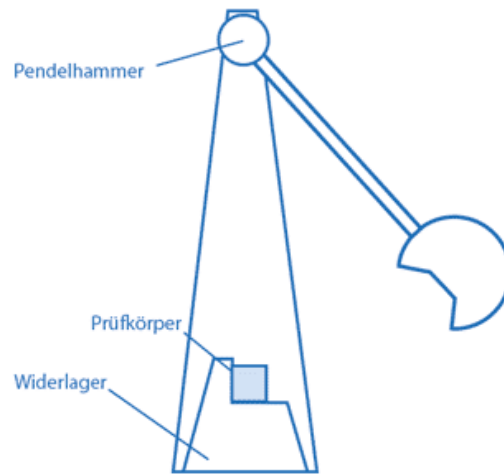


Abbildung 3.4.: Versuchsaufbau für Schlagbiegeversuche nach Charpy [69]

Messprogramm

Für die Bestimmung der Materialparameter wurden normgerecht Schlagprüfstäbe (siehe Tabelle 3.1 aus Typ 1 Standardprüfkörpern (siehe Tabelle 3.4) herausgeschnitten.

Tabelle 3.1.: Abmessungen der Probekörper für Schlagprüfung nach Charpy

	Maß[mm]
Länge	80 ± 2
Breite	$10 \pm 0,2$
Dicke	$4 \pm 0,2$

Nachdem Vorversuche zur Einstellung der Prüfbedingungen ergeben haben, dass die Werkstoffe auch bei einem Hammer mit einem erhöhtem Gewicht von 25kN (im Gegensatz zur Norm von 4kN) ohne Kerbe keinen Bruch zeigen, wurden gekerbte Proben gewählt. Durch die Kerbe wird eine Spannungskonzentration, sowie eine Erhöhung der Rissausbreitungsgeschwindigkeit im Kerbgrund erreicht. Dadurch können gekerbte Proben bei Belastungen brechen, bei denen ungekerbte Proben ohne Bruch überstehen [32]. Im Anwendungsfall ist zwar nicht mit einer Kerbwirkung zu rechnen, doch durch die Kerbe wird der Probekörper aufgrund der geringeren Breite geschwächt und es können vergleichende Messungen durchgeführt werden. Restbreite und Dicke wurde für alle Prüfkörper einzeln bestimmt, da diese für die Berechnung der Schlagzähigkeit relevant sind. Da anfangs kein geeigneter Stift zur Beschriftung vorhanden war, welcher durch das Kältebad nicht entfernt wird, wurde einheitlich die Restbreite durch die Messung der Probenbreite mit Abzug der eingestellten Kerbtiefe (2mm) bestimmt. Die Länge der Prüfkörper wurde nur stichprobenartig überprüft. Die einzelnen Probenkörperrabmessungen sowie deren aufgenommene Schlagenergie ist im Anhang zu finden.



Abbildung 3.5.: Kältebad zum Temperieren von Kerbschlagbiegeproben

Auswertung

Durch den Schlagbiegeversuch gibt es unterschiedliche Versagensarten, diese sind in Tabelle 3.2 kurz zusammengefasst. Wenn der getestete Werkstoff sehr elastisch ist, dann wird er durch die Wucht des Hammers zwischen den beiden Widerlagern durchgezogen und nimmt in Folge wieder annähernd die Anfangsgeometrie an. Bei diesen Werkstoffen ist das Ergebnis kein Bruch (üblicherweise n.B. abgekürzt), in diesem Fall kann eine Schlag- bzw. Kerbschlagzähigkeit nicht explizit berechnet werden.

Eine weitere Möglichkeit für den Ausgang eines Schlagbiegeversuchs ist ein teilweiser Bruch. Von dieser Versagensart gibt es noch einen Sonderfall, wenn die beiden Hälften der Probe nur mehr an einem dünnen Stück aneinanderhängen wird dies als Scharnierbruch bezeichnet, anderenfalls als teilweiser Bruch (üblicherweise p.B. abgekürzt)

Um eine zahlwertige Schlagzähigkeit, wie in Gleichung 3.1 beschrieben, berechnen zu können muss ein vollständiger Bruch vorliegen.

Tabelle 3.2.: Versagensarten bei Schlagbiegeversuch nach Charpy [14]

Abkürzung	Art	Erklärung
N	kein Bruch	Probekörper ohne nennenswerten Einriss
H	Scharnierbruch	Probekörper bis auf dünne Verbindung durchgerissen
P	teilweise Bruch	teilweiser Bruch, welcher nicht Scharnierbruch ist
C	vollständiger Bruch	Probekörper in zwei Teilen

Aus der gemessenen Probengeometrie, sowie der aufgenommenen Schlagenergie wurde mittels Gleichung 3.1 die Schlagzähigkeit der Materialien bei unterschiedlichen Temperaturen und unterschiedlicher Alterung berechnet.

$$a_{CN} = \frac{E_C}{h * b_N} * 10^3 \tag{3.1}$$

a_{CN}	Schlagzähigkeit gekerbt [J/m ²]
E_C	korrigierte Arbeit [J]
h	Dicke des Probekörpers [mm]
b_N	Restbreite des Probekörpers [mm]

3.5. Zugversuch

Der Zugversuch ist ein genormtes Standardverfahren um Werkstoffkennwerte wie Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Streckgrenze zu bestimmen. Die Zähigkeit kann aus den gemessenen Werten berechnet werden. Es handelt sich um ein zerstörendes Prüfverfahren, da der Werkstoff über die Streckgrenze hinaus belastet wird. [2] Neben der Härteprüfung ist es eine der am Häufigsten angewendeten Prüfmethoden [54]. Nach Norm sind Geschwindigkeiten zwischen 1mm/min und 500mm/min zu wählen. Nachdem Werkstoffeigenschaften stark von der Prüfgeschwindigkeit abhängig sind, können für gewisse Anwendungen viel höhere Geschwindigkeiten von einigen m/s interessant sein. [26] Da für Hochgeschwindigkeitszugversuche eigene, spezielle Zugprüfmaschinen notwendig sind [59] konnten im Laufe der Arbeit nur klassische quasistatische Zugprüfungen durchgeführt werden. Der Vergleich unterschiedlicher Werkstoffe ist auch mit diesen, unter gleichbleibenden Versuchsbedingungen, möglich.

Quasistatisch bedeutet, dass die Belastung langsam, stoßfrei und stetig ansteigend aufgebracht wird. [51] Durch die kontinuierliche Messung der Kraft über die Verlängerung hat der Zugversuch im Gegensatz zu vielen anderen Prüfmethoden den Vorteil, dass mehr Daten zur Interpretation des Werkstoffes zur Verfügung stehen. Das Verformungsverhalten von Kunststoffen beim Zugversuch lässt sich in drei Verformungsarten unterteilen, welche sich überlagern (siehe Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3.: Verformungsarten [25]

Art der Verformung	Erklärung
spontan,elastisch	Abstandsänderung Atomen/Valenzwinkelverschiebung
zeitabhängig, viskoelastisch	Gleichgewichtszustand entsprechend dem Spannungszustand
zeitabhängig, viskos	irreversibel-Spannungsfließzonen

Bei Zugversuchen mit Kunststoffen ist zu beachten, dass die Messergebnisse von Prüftemperatur, Prüfgeschwindigkeit und Feuchtigkeitsgehalt des Probekörpers sehr stark abhängig sind. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten müssen demnach die Versuchsbedingungen möglichst konstant gehalten werden. Des Weiteren ist zu beachten, dass in der Temperaturabhängigkeit die Prüftemperatur relativ zur Glasübergangstemperatur eine große Bedeutung hat [25]. Der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit und der Einfluss der Temperatur verlaufen entgegengesetzt. Durch niedrige Temperaturen und durch hohe Geschwindigkeiten steigt die Zugfestigkeit der Werkstoffe jeweils an und die Bruchdehnung sinkt [26]. (siehe Abb. 3.6)

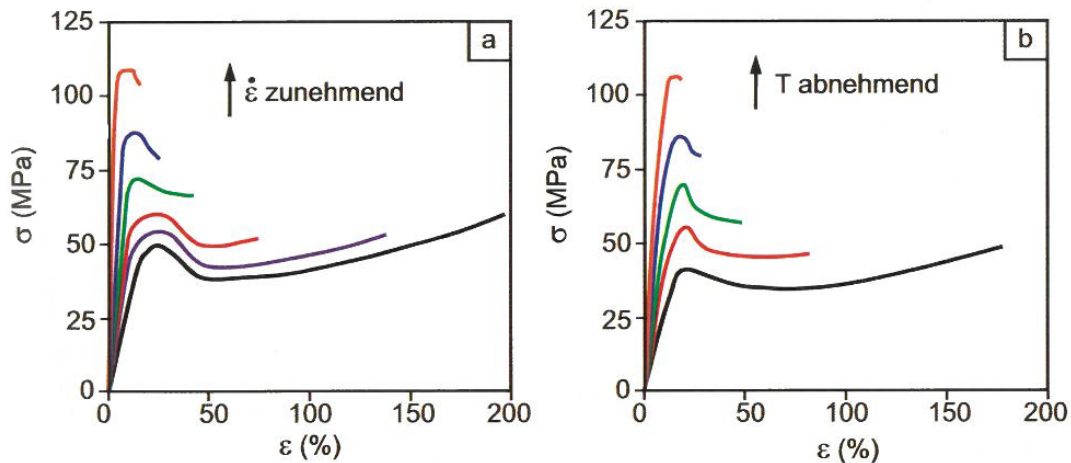


Abbildung 3.6.: Spannungs-Dehnungskurven in Abhängigkeit von (a) Prüfgeschwindigkeit und (b) Prüftemperatur [26]

Im Aktivierungsfall des aktiven Fußgängerschutzes wirken aufgrund der Pyrotechnik innerhalb des Schlossaktuators hohe Belastungsgeschwindigkeiten und bei den Prüfungen bei -40°C zusätzlich niedrige Temperaturen. Dadurch ist zu erwarten, dass die Zugfestigkeit der Werkstoffe im Produkt höher ist und die Streckdehnung entsprechend unter den Datenblattwerten liegt.

Messprinzip

Im Zugversuch wird ein Zugprüfstab zwischen zwei Backen eingespannt. Dabei ist darauf zu achten, dass der Probekörper gut fixiert ist und während der gesamten Messung nicht verrutschen kann. Zwischen den beiden Backen sind die Feinmessaufnehmer angebracht, welche die Längenänderung der Probe messen. Nach Norm EN-ISO-527 ist für die Bestimmung der Zugeigenschaften von spritzgegossenen Kunststoffen der Prüfkörper Typ 1 zu wählen (Definierte Abmessungen siehe Abb.3.7 und Tabelle 3.4) [15].

Die Kraftmessung ist vor dem Einspannen auf Null zu kalibrieren, da die Kräfte beim Einspannen tatsächlich auf den Probekörper wirken.

Tabelle 3.4.: Bemaßung nach Norm für gespritzte Typ 1 Probekörper [Maße in mm] [16]

l_3	Gesamtlänge	170
l_1	Länge des engen parallelen Teils	80 ± 2
r	Radius	24 ± 1
l_2	Entfernung zwischen den breiten parallelen Seiten	$109,3 \pm 3,2$
b_2	Breite an den Enden	$20 \pm 0,2$
b_1	Breite des engen Teils	$10 \pm 0,2$
h	Bevorzugte Dicke	$4 \pm 0,2$
L_0	Messlänge	$75 \pm 0,5$
L	Anfangsabstand der Klemmen	115 ± 1

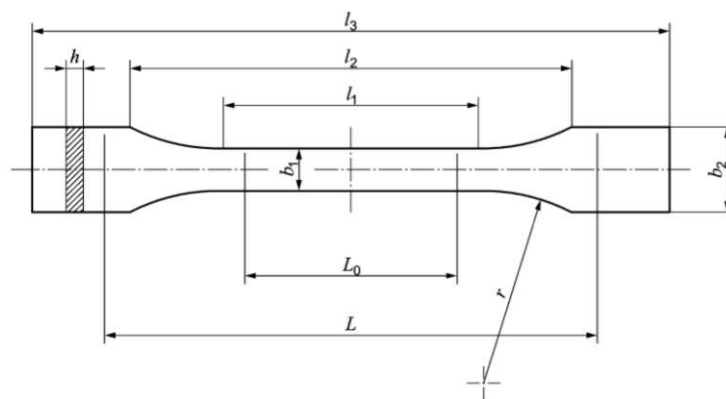


Abbildung 3.7.: Definierte Größen eines gespritzten Typ1 Probekörpers [16]

Außerdem ist darauf zu achten, dass der Prüfstab während der gesamten Prüfung nicht verrutschen kann. Mit einer definierten Geschwindigkeit bewegen sich die beiden Backen auseinander und dehnen den Prüfkörper dadurch. Mit dem Bruch des Kunststoffprüfkörpers ist die Messung beendet. Bei Schulterstäben kann es vorkommen, dass der Bruch in eben diesen vonstatten geht. Ist dies der Fall sollten die Werte besagter Messung verworfen werden. [27] Bei Thermoplasten fehlt am Anfang (zwischen 0.05% und 0.25% Dehnung) der lineare Hook'sche Bereich, welcher den Elastizitätsmodul definiert. Um dennoch einen Wert hierfür zu erhalten kann die so genannte Sekantenmethode verwendet werden.[26] (siehe Auswertung)

Abweichend zur Norm wurde eine geringere Einspannlänge von 90mm statt 115mm gewählt, um mit bisherigen firmeninternen Messungen vergleichbar zu bleiben. Zusätzlich kann dadurch, bei eingeschränktem Messweg durch die Kühlkammer, bei Messungen bei -40°C , die messbare Dehnung vergrößert werden.

Messprogramm

Aufgrund vorhandener Kapazitäten wurde eine quasistatische Prüfmethode gewählt. Die Bestimmung des Zugmoduls muss normgerecht bei unter 1% Dehnung pro Minute erfolgen. Deshalb wurde für die Bestimmung des Moduls der Probekörper mit 1mm/min gedehnt. Nach der Bestimmung des Zugmoduls sollte bei einer Dehnung unter 0,3% die Umschaltung der Prüfgeschwindigkeit auf die geforderten Parameter während des gesamten Versuchs durchgeführt werden. [27] Um trotz quasistatischer Prüfmethode möglichst dynamisch zu prüfen, wurde die höchste nach Norm empfohlene Prüfgeschwindigkeit von 500mm/min für den Rest der Prüfung gewählt.

Da wie beschrieben tiefere Temperaturen einen negativen Einfluss auf die Dehnung der Werkstoffe haben wurden die Versuche grundsätzlich bei -40°C durchgeführt. Ein Problem damit ist, dass der Prüfweg durch die Klimakammer begrenzt wird und es somit Werkstoffe geben kann, welche nicht bis zum Bruch gedehnt werden können. Um den Einfluss der Temperatur auch mittels Versuchen abschätzen zu können, wurden zusätzlich einzelne Versuche bei Raumtemperatur durchgeführt. In Tabelle 3.5 sind alle Prüfparameter zusammengefasst zu finden.

Tabelle 3.5.: Prüfparameter für Zugversuche

Probenhalterabstand	90mm
Prüfgeschwindigkeit bis 0.3/Dehnung	1mm/min
Prüfgeschwindigkeit ab 0.3/Dehnung	500mm/min
Prüftemperatur	-40°C

Auswertung

Für die Auswertung wird aus dem gemessenen Kraft-Verlängerungsdiagramm ein Spannungs-Dehnungsdiagramm berechnet. Die Dehnung gibt die Verlängerung in Prozent an. Die Spannung entspricht der Kraft pro Fläche. [45]

Anhand der Form der gemessenen Kurve können Werkstoffe in unterschiedliche Gruppen unterteilt werden (siehe Abb. 3.8).

Die Streckspannung eines Werkstoffes ist als jene Spannung definiert, bei der ein Zuwachs der Dehnung ohne Steigerung der Spannung auftritt. Die Zugfestigkeit entspricht der maximalen Spannung, welche während des Versuches gemessen wird. Diese kann in Abhängigkeit vom Werkstoffverhalten der Streckspannung oder der Bruchspannung entsprechen. Für eine Vergleichbarkeit von Werkstoffen besteht die Möglichkeit die Spannung bei einer definierten Dehnung anzugeben, falls keine makroskopisch sichtbare Streckgrenze vorhanden ist. Die Bruchspannung entspricht der Spannung, welche beim Bruch ermittelt wird. Nachdem dieser Wert von maschinentechnischen Parametern, wie der Bruchabschaltswelle abhängt, können größere statistische Schwankungen auftreten. [32]

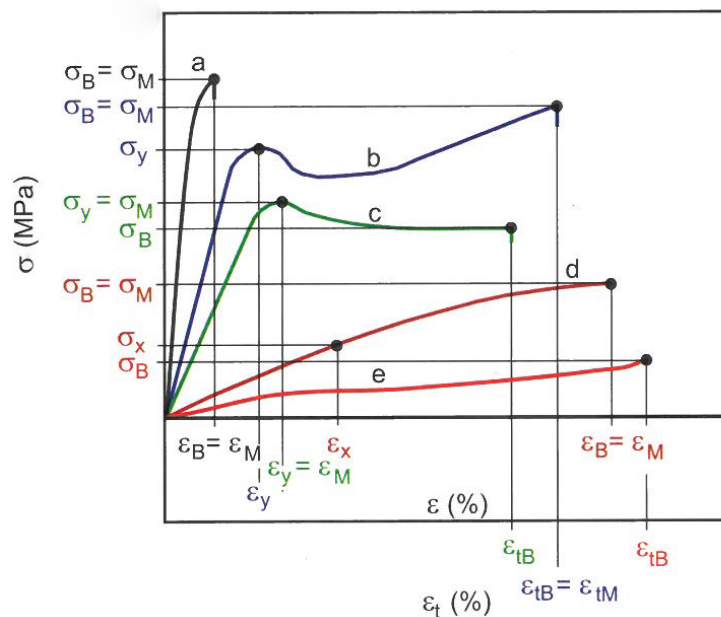


Abbildung 3.8.: Spannungs-Dehnungs-Diagramm verschiedener Kunststoffe: a spröde Werkstoffe, b/c zähe Werkstoffe mit Streckpunkt, d zähe Werkstoffe ohne Streckpunkt, e elastomere Werkstoffe

Für die Berechnung wird allgemein der Anfangsquerschnitt als Fläche genommen. Da es im Laufe des Versuches zu einer Einschnürung kommt, nimmt die auf den Werkstoff wirkende tatsächliche Spannung zu. [25]

Da wie oben beschrieben die Hook'sche Gerade bei Thermoplasten nicht ausgeprägt ist, wird für die Berechnung des Elastizitätsmodul eine Sekante zwischen 0.05% und 0.25% Dehnung gelegt. [25].

Je nach Verlauf der Spannungs- Dehnungskurve werden Werkstoffe nach ihren Zugeigenschaften in spröde und zähe Werkstoffe unterteilt (siehe Abb.3.6).

3.6. Dynamische Differenzkalorimetrie

Chemische und physikalische Umwandlungsprozesse sind Änderungen der inneren Energie und können durch ein Kalorimeter als abweichender Verlauf des Wärmestroms von der Basislinie gemessen werden. [22] Die Prozesse können entweder exotherm (Wärme wird freigesetzt) oder endotherm (Wärme wird benötigt) ablaufen. Mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (kurz DSC) kann die bei diesen Prozessen frei werdende Wärmeenergie bestimmt werden, wodurch Rückschlüsse auf den Werkstoff und dessen thermische Vorgeschichte gemacht werden können. [46]

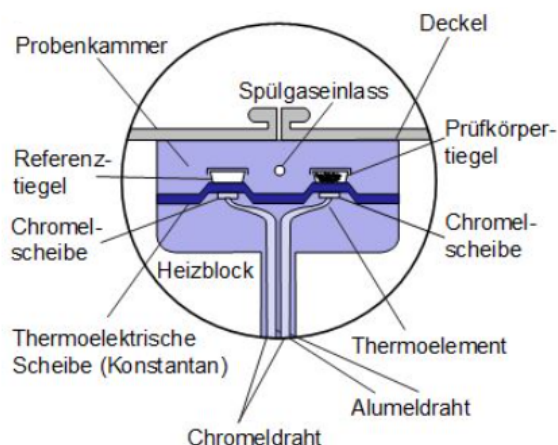


Abbildung 3.9.: Schematische Darstellung des Messaufbaus einer DSC-Messung nach Wärmestromprinzip

Messprinzip

Bei DSC-Messungen gibt es zwei Messprinzipien: Wärmestromprinzip und Leistungsstromprinzip. Alle DSC-Messungen in dieser Arbeit sind mittels Wärmestromprinzip durchgeführt worden.

Beim Wärmestromprinzip werden zwei Tiegel gleichermaßen aufgeheizt. In einem Tiegel befindet sich der zu untersuchende Kunststoff und im anderen Tiegel eine Referenzprobe. Beim Heizen des Ofens tritt eine Temperaturdifferenz auf, sobald die Wärmekapazität der Probe von der Wärmekapazität der Referenz abweicht. Durch die Messung der Wärmekapazität der Probe über das definierte Temperaturprofil können Umwandlungsprozesse analysiert werden. [32]

Um Reaktionen mit der Umgebung zu vermeiden wird der gesamte Aufbau (siehe Abb.3.9) mit einem inerten Gas (Stickstoff) gefüllt.[22]

Das erste Aufheizen gibt Informationen über den Ist-Zustand der Probe. Thermische und mechanische Vorgeschichte des Werkstücks, sowie werkstoffspezifische Eigenschaften sind in dieser Kurve zu finden. Beim zweiten Aufheizvorgang, nach einer geregelten Abkühlung, ist die Probenvorgeschichte bekannt und demnach können werkstoffspezifische Eigenschaften eruiert werden.[22]

Messprogramm

Die Probenentnahme sollte am kritischen Bereich des jeweiligen Bauteils geschehen. Für die Darstellung der Schmelz- bzw. Kristallisationseffekte ist eine Probenmenge von 1-10mg und eine Heizrate von etwa 20K/min empfohlen. Für die Darstellung der Glasübergangstemperatur ist eine Probenmenge von 10-20mg sowie eine Heizrate von 10K/min empfohlen. Eine hohe Heizrate bringt eine deutlichere Darstellung kleiner Effekte mit sich, geht aber mit einer schlechteren Auflösung einher. Allgemein sollte die Starttem-

peratur mindestens 50°C unterhalb des ersten zu messenden Effektes angesetzt werden. Bei Temperaturen von etwa -100° ist eine Anpassungszeit von ca. 20 min empfohlen. Die Endtemperatur sollte max. 30°C über der Schmelztemperatur gewählt werden, damit die Zersetzung des Werkstoffs noch nicht einsetzt. [22] Die Probenentnahme für alle Messungen erfolgte am oberen Teil der Dichtlippe, da dieser Bereich der kritische Bereich für das Bauteil ist. Für alle Proben wurde etwa 5mg Material eingewogen. Die Werkstoffe wurden je nach thermischen Eigenschaften in vier Gruppen geteilt und mit einem jeweils entsprechenden Messprogramm gemessen (siehe Tab. 3.6) Bei allen Messungen wurden Aluminiumtiegel verwendet und als Referenzmaterial wurde Luft verwendet.

Tabelle 3.6.: Prüfparameter für Dynamische Differenz Kalorimetrie

Werkstoffe	Starttemp.	Haltezeit	Heizrate	Endtemp.	Haltezeit	Kühlrate
PK,PBT,PA12	-20°C	20min	10K/min	250°C	5min	3K/min
PPA,PA46	-20°C	20min	10K/min	350°C	5min	3K/min
PA66	-20°C	20min	10K/min	300°C	5min	3K/min
PA6+ABS,TPE	-90°C	20min	10K/min	250°C	5min	3K/min

Auswertung

Es gibt sehr viele Einflussfaktoren auf die Ergebnisse von DSC-Messungen. Neben dem Probenmaterial und dessen thermische, sowie mechanische Vorgeschichte hat auch die Probenpräparation und das Messprogramm einen Einfluss auf die Ergebnisse. Die vorwiegend betrachteten Phänomene sind der Glasübergang, die Rekristallisation, sowie der Schmelzvorgang der einzelnen Werkstoffe.

Der Glasübergang entspricht einer stufenförmigen Änderung der Wärmekapazität, hierbei handelt es sich um keine echte Phasenumwandlung. [22] Die Glasübergangstemperatur ist für den amorphen Bereich der Kunststoffe von Bedeutung. Bei dieser Temperatur gehen ganz oder teilweise amorphe Polymere vom hochviskosen, flexiblen Zustand (oberhalb der Glasübergangstemperatur) in den glasartigen, spröden Zustand (unterhalb der Glasübergangstemperatur) über. [43] Der Wert der Glasübergangstemperatur hängt neben den Werkstoffeigenschaften auch von der verarbeitungsbeeinflussten Morphologie (z.B.: Orientierung, Kristallisation, Vernetzung sowie Eigenspannungen) ab. [22] Beim Schmelzen handelt es sich um den Übergang vom festen (kristallinen) Werkstoff in den flüssigen (amorphen) Werkstoff. Da teilkristalline Kunststoffe aus Kristalliten unterschiedlicher Lamellendicke aufgebaut sind, ergibt sich ein breiter Schmelzbereich, welcher diese uneinheitliche Struktur wiedergibt. Außerdem ist die Schmelztemperatur von verarbeitungsbedingter Morphologie und den Prüfbedingungen (z.B.: Heizrate) abhängig. [22]

3.7. Thermogravimetrie

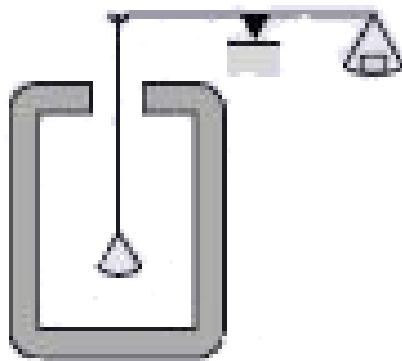


Abbildung 3.10.: Schematische Darstellung des Messaufbaus mit horizontaler Thermowaage für die TGA Messungen [67]

Thermogravimetrie, kurz TGA ist eine thermische Analyse, welche bei Kunststoffen vielfach angewendet wird. Untersucht werden können Pellets, Granulat, Pulver oder geeignet kleine Probekörper aus Fertigteilen herausgeschnitten. [4] TGA dient unter anderem zur Quantifizierung der Werkstoffzusammensetzung, zur Bestimmung der Zersetzungstemperatur und zur Messung von flüchtigen Anteilen, wie Zusatzstoffe und Füllstoffe z.B.: Weichmacher. [22] Die thermische Langzeitbeständigkeit, welche in dieser Arbeit von großem Interesse ist, kann durch TGA Messungen allein nicht eruiert werden, da die Abbaumechanismen im Realfall viel komplexer sind. [4] Im Zuge dieser Arbeit wurden einzelne TGA Messungen durchgeführt, um die Zusammensetzung ausgewählter Werkstoffe besser zu verstehen.

Messprinzip

Prinzipiell gibt es zwei mögliche Messmethoden. Bei der dynamischen Messung wird die Probe mit definiertem Temperaturgradienten auf eine vorgegebene Endtemperatur aufgeheizt. Bei der isothermen Methode hingegen wird eine definierte Temperatur über eine bestimmte Zeit gehalten. Um etwaige Effekte, welche bei der dynamischen Methode überlagert sind, auseinanderhalten zu können, ist es auch möglich dynamische Messungen mit isothermen Bereichen zu unterbrechen. In beiden Methoden wird die Änderung der Masse über die Zeit bzw. Temperatur bestimmt. [4] Bei einer horizontalen Thermowaage (siehe Abb. 3.10) wird die Auslenkung durch die Massenänderung des Probekörpers elektromechanisch oder elektromagnetisch kompensiert. Alle Messungen wurden an einer TGA mit horizontaler Thermowaage durchgeführt. Durch die Größe der notwendigen Kompensation kann die Masse bestimmt werden.

In der Messzelle wird während der gesamten Messung die Atmosphäre kontrolliert. In einer inerten Atmosphäre, zum Beispiel Stickstoff, kann die Zersetzung nur thermisch

geschehen, in einer oxidativen Umgebung wie zum Beispiel unter Luft, kann die Zersetzung oxidativ und thermisch ablaufen. Das Spülgas wird der Anforderung entsprechend gewählt. Polyamide zum Beispiel zersetzen bei oxidativer Atmosphäre wesentlich früher.

Bei dynamischer Messung können unterschiedliche Effekte überlagert auftreten. Zur Trennung dieser Effekte kann das differenzielle Messsignal (DTG) betrachtet werden, da dieses zusätzliche Informationen zur Abbaukinetik enthält. [22].

Messprogramm

Die Messung wird in der Regel bei Raumtemperatur gestartet und je nach zu messendem Werkstoff bei 600-1000°C beendet. Das Tiegelmaterial ist der Temperatur und dem Probenmaterial entsprechend zu wählen, da sonst die Gefahr besteht, dass es zu Reaktionen vom getesteten Werkstoff mit dem Tiegel kommen kann. Im vorliegenden Fall wurde bei allen Messungen ein Aluminiumoxidtiegel verwendet.

Sowohl Probenmenge, als auch Heizrate haben einen messbaren Einfluss auf die Ergebnisse. Es wird eine Mindesteinwaage von 10mg empfohlen, da bei geringeren Mengen die gemessenen Temperaturkennwerte von der Probenmasse stark abhängig sind. Eine maximale Einwaage von 100mg ist zulässig, doch bei größeren Probenmassen kann es zu einer Beeinträchtigung des Ergebnisses durch thermische Trägheit der Probe kommen. [22] Für diese Arbeit wurde zu Anfang 10mg gewählt. Da die ersten Messergebnisse auf ein Aufschäumen der Probe hindeutet (aufgrund von negativ gemessenem Gewicht), wurden alle weiteren Messungen mit 8mg durchgeführt. Die definierte Heizrate kann normgerecht zwischen 0,5-20K/min gewählt werden. Da DSC Messungen mit einer Heizrate von 10K/min gemacht wurden, ist auch für alle TGA Messungen eine Heizrate von 10K/min gewählt worden.

Auswertung

Die gemessene Massenänderung kann ein oder mehrstufig erfolgen. Mehrstufige TGA Kurven ergeben sich, wenn dicht aufeinanderfolgende, oder sich überlagernde Massenänderungen auftreten. Eine Trennung dieser kann, wie oben beschrieben, durch isotherme Messungen bzw. der Betrachtung der DTG erfolgen. Für die Analyse werden die einzelnen Stufen verschiedenen Reaktionen zugeordnet. [22]. Typische Reaktionen, welche eine Massenänderung hervorrufen sind Verdampfen, Zersetzen, chemische Reaktionen, Umwandlungen verschiedener Art sowie Aufnahme von Gasen. [32] Wenn eine Massenzunahme festgestellt wird, ist von einer Aufnahme von Gasen auszugehen. Dies passiert hauptsächlich in Sauerstoff oder Luftatmosphäre, da der Werkstoff hierbei Sauerstoff aufnehmen kann. [22] TGA-Messungen reichen nicht aus um eine Aussage über die thermische Langzeitbeständigkeit von Werkstoffen zu beschreiben, da die Alterungsmechanismen hierbei viel komplexerer Natur sind. [4]

Bei der Analyse der Ergebnisse ist des Weiteren zu beachten, dass leicht flüchtige Bestandteile schon während der Probenpräparation abdampfen können. Bei Fertigteilen kann der Füllstoffgehalt innerhalb eines Bauteils variieren. Beides führt zu verfälschten Ergebnissen. [22] Keiner dieser beiden Fälle wird in den Messungen für diese Arbeit

erwartet, da weder leicht flüchtige Bestandteile, noch Füllstoffe in den getesteten Materialien vorhanden sind.

Ein weiterer Aspekt, der auch in dieser Arbeit von Bedeutung ist, ist der Einfluss der Oberflächengröße auf das Ergebnis. [4] Aufgrund der runden Form des Kolbenaufsatzes kann ein idealer Kontakt zum Tiegelboden nicht sichergestellt werden. Um Messunterschiede durch Probenpräparation ausschließen zu können wird darauf geachtet, dass die entnommene Probe bei jedem Werkstück von der gleichen Stelle kommt und auch ungefähr die gleiche Form hat.

4. Werkstoffauswahl

Kunststoffe (Polymere) sind sehr junge Werkstoffe und haben in 100 Jahren seit ihrer Entdeckung viele Anwendungsbereiche erobert. Polymere sind nichtmetallische, organische Werkstoffe aus Kohlenstoffverbindungen. Aus Kohlenstoffketten mit angehängten Atomen bilden sich Makromoleküle. [63] Diese Makromoleküle werden nach ihrem chemischen Aufbau in drei verschiedene Gruppen eingeteilt. Durch die chemische Struktur bedingt ergibt sich eine unterschiedliche Positionierung der Makromoleküle zueinander (siehe Abb. 4.1).

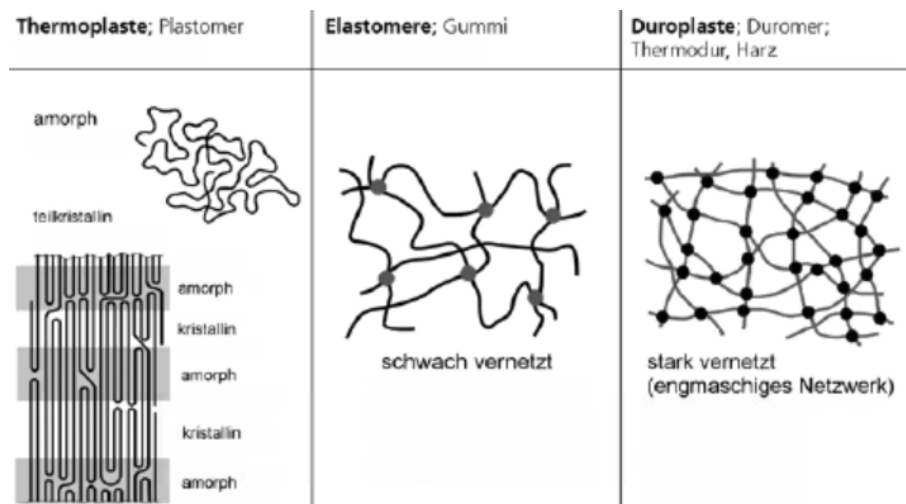


Abbildung 4.1.: Einteilung unterschiedlicher Polymere nach ihrem Aufbau [24]

Thermoplaste

Bei Thermoplasten handelt es sich um lineare oder wenig verzweigte Makromoleküle, welche nicht miteinander vernetzt sind. [6] Eine weitere Unterteilung innerhalb der Thermoplaste geschieht aufgrund ihrer Kristallinität. Thermoplaste können in amorpher, sowie in teilkristalliner Form vorliegen, ihr Kristallinitätsgrad ist stark von der Verarbeitung und der Abkühlgeschwindigkeit in weiterer Folge abhängig. Im Falle einer Teilkristallinität sind einige Teilbereiche amorph und andere kristallin. Der Zusammenhalt zwischen den Molekülen ist durch sekundäre Bindungen, wie zum Beispiel Wasserstoffbrückenbindungen, gegeben. Bei hohen Temperaturen können die einzelnen Moleküle aneinander abgleiten. Ein mehrfaches Wiederaufschmelzen bringt demnach keine gravierenden Materialschädigungen mit sich, da durch das Aufschmelzen nur die Verbindung zwischen

den Molekülen gelöst wird. Erst mit Erreichen der Zersetzungstemperatur zerfallen die einzelnen Moleküle. [24]

Elastomere

Bei Elastomeren handelt es sich um weitmaschig vernetzte Makromoleküle, demnach sind die Verbindungen zwischen den einzelnen Molekülen nicht nur durch sekundäre Bindungen, sondern ebenso durch primäre Bindungen gegeben. Diese verhindern ein Abgleiten der Moleküle aneinander und somit ein Aufschmelzen ohne Zersetzung der einzelnen Moleküle. Aufgrund der weitmaschigen Vernetzung sind diese Kunststoffe elastisch verformbar und nehmen im Anschluss ihre ursprüngliche Form wieder an. Unterhalb der Glasübergangstemperatur sind diese Verbindungen „eingefroren“ und der Werkstoff wird spröde. [6] [24]

Duroplaste

Bei Duroplasten handelt es sich um engmaschig vernetzte Makromoleküle, im Gegensatz zu Elastomeren ist ihre Beweglichkeit dadurch eingeschränkt. Wie bei Elastomeren ist auch bei dieser Kunststoffgruppe ein Aufschmelzen nicht möglich. Nachdem die benötigte Energie zum Aufbrechen der Bindungen höher ist als bei den anderen Kunststoffgruppen sind Duroplaste deutlich wärmebeständiger. [6] [24]

4.1. Werkstoffanforderungen

4.1.1. Auswahlkriterien für Werkstoffe

Die Auswahlkriterien können in drei essenzielle Punkte und einen wünschenswerten Zusatz unterteilt werden.

- 1. Der Werkstoff muss mit den firmeninternen Methoden verarbeitbar sein.**
- 2. Der Werkstoff muss eine thermische Belastung von 150h bei 120°C + 2000h bei 110°C ohne signifikante mechanische Änderung überstehen.**
- 3. Der Werkstoff muss eine einmalige dynamische Schlagwirkung standhalten ohne Einbußen der Dichtwirkung.**

Ein wünschenswerter Zusatz wäre eine möglichst kleine Rückstellkraft.

Neben den obenstehenden theoretischen Auswahlkriterien für neue Werkstoffe wurden von der Firma (Hirtenberger Automotive Safety GmbH & Co KG) sechs schon gespritzte Materialien zur Verfügung gestellt. Es wurden Vorversuche mit diesen Materialien gemacht, um davon ausgehend die Werkstoffauswahl eingrenzen zu können. Anschließend

wurden die Anforderungen auch mit Lieferanten diskutiert und über 70 Datenblätter gesichtet. Aus diesen wurde anhand der unten erklärten Vorgehensweise neben den sechs vorhandenen noch fünf weitere Werkstoffe ausgewählt, die getestet wurden. Aus den Ergebnissen heraus wurden in weiterer Folge drei zusätzliche Werkstoffe getestet.

Tabelle 4.1.: Zusammenfassung der Werkstoffauswahl

Vorhandene Werkstoffe	Gewählte Werkstoffe	Zusätzliche Werkstoffe
PA6+ABS (Akromid)	PA6.6 (Zytel ST801)	PPA (Grivory HT3Z)
Polyketon (Akrotek)	PPA (Zytel HTNFE)	PA4.6 (Stanyl)
PBT (Crastin)	TPE (PU)(Elastollan)	PAMACM12 (Grilamid TR90)
PA12 (Grilamid L20G)	TPE (PE)(Hytrel)	
PA6.6 (Grilon)	TPE (PS) (TV9LVZ)	
TPE (PP)		

In den folgenden Kapiteln werden die Hintergründe der genannten Kriterien genauer beleuchtet.

4.1.2. Verarbeitbarkeit

Aktuell wird der Kolbenaufsatz firmenintern mittels Spritzguss hergestellt. Um eine sichere Verarbeitbarkeit zu gewährleisten und eine Beschädigung des Werkzeuges zu verhindern, sollten keine korrosiven Werkstoffe verarbeitet werden, sowie die höchstzulässige Werkzeugtemperatur von 90°C nicht überschritten werden.

Duroplaste konnten trotz ihrer guten Wärmebeständigkeit nicht in Betracht gezogen werden, da sich diese nicht thermoplastisch verarbeiten lassen und somit nicht mit herkömmlichen Spritzgussmaschinen herstellbar sind. [5]

Fluorkunststoffe wie PTFE zeichnen sich durch universelle Chemikalienbeständigkeit, sowie durch eine sehr hohe Dauergebrauchstemperatur von bis zu 260°C aus. Die geringe mechanische Festigkeit kann durch Füllstoffe kompensiert werden. [42] Seit 2010 gibt es modifizierte PTFE-Werkstoffe auf dem Markt, welche sich nicht mehr nur durch spezielle Press- und Sintertechniken verarbeiten lassen, sondern auch durch Spritzguss verarbeitbar sind. [60] Fluorkunststoffe konnten dennoch nicht gewählt werden, da sie hochkorrosiv gegenüber dem Spritzgusswerkzeug sind. [60]

Nachbehandlung

Da bei einzelnen Werkstoffen die empfohlene Werkzeugtemperatur nicht eingehalten werden konnte, wurden einige Kolbenaufsätze dieser Werkstoffe getempert um unter anderem eine Erhöhung der Kristallinität, sowie eine Reduktion von werkstoffinternen Spannungen zu erreichen. [49] In weiterer Folge wurden diese Kolbenaufsätze ebenfalls einer Leistungsüberprüfung unterzogen.

Die Zeiten und Temperaturen für das Tempern wurden wie vom Hersteller empfohlen gewählt (siehe Tabelle 4.2)

Tabelle 4.2.: Getemperte Proben

Buchstabe	Handelsname	Heizrate	Haltetemperatur	Haltezeit
H	Zytel HTNFE 8200	1°C/min	175°C	1,5h
K	Grivory HT3Z	langsam	205°C	ca.5h

4.1.3. Schlagzähigkeit

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben dient die Schlagzähigkeit nach Charpy dazu, die dynamischen Eigenschaften von Werkstoffen zu testen. Es wurden nur Werkstoffe gewählt, welche bei Raumtemperatur nach Norm [14] getestet keinen Bruch ohne Kerbe aufweisen. Für die Auswahl der Werkstoffe wurde auch die Schlagzähigkeit und bei vorhandenen Werten auch die Kerbschlagzähigkeit bei -30°C betrachtet. Aufgrund fehlender Vergleichswerte konnte kein Grenzwert für die Schlag-/ bzw. Kerbschlagzähigkeit bestimmt werden. Werkstoffe mit einer höheren Bruchdehnung und Kerbschlagzähigkeit sind aufgrund der höheren Festigkeit und geringeren Kerbempfindlichkeit besser geeignet für Stoßbelastungen. [1] Da beim Beschuss eine große Schlagbeanspruchung wirkt, wurden Werkstoffe mit höherer Schlagzähigkeit bevorzugt ausgewählt.

4.1.4. Alterung

Alterungsvorgänge

Unter Alterung versteht man alle irreversiblen Vorgänge die im Laufe der Zeit in einem Werkstoff auftreten. Darüber hinaus unterscheidet man in physikalische und chemische Alterungsvorgänge.

Chemische Alterungsvorgänge sind unter anderem Nachkondensation, Nachpolymerisation sowie Abbau und Oxidation. Allgemein werden unter dem Begriff chemische Alterungsvorgänge alle Änderungen der Moleküle (chemische Zusammensetzung, Struktur, Größe,...) zusammengefasst.

Unter dem Begriff physikalischer Alterung werden alle Vorgänge die zur Veränderung des Gefüges, des Ordnungszustandes, sowie zur Änderung des Konzentrationsverhältnisses führen, zusammengefasst. Hierzu zählen unter anderem Relaxation, Nachkristallisation sowie Weichmacherverlust. Des weiteren werden auch alle Alterungsvorgänge, welche zu einer Änderung messbarer physikalischer Eigenschaften, Form oder Struktur führen und nicht chemische Alterungsvorgänge sind, zu physikalischen Alterungsvorgängen gezählt.

Die Ursachen für Alterung werden in zwei Gruppen unterteilt. Von inneren Alterungsursachen ist die Rede, wenn thermodynamisch instabile Zustände des Werkstoffs

zu Alterungsvorgängen führen. Äußere Alterungsursachen sind chemisch-physikalische und mikrobiologische Einwirkungen der Umgebung auf den Werkstoff. [3]

Alterung kann sich sowohl in mechanischer, als auch in optischer Veränderung wieder spiegeln. Diese Veränderung der Oberflächeneigenschaften, wie zum Beispiel Glanzänderung, Verfärbung oder Rissbildung, können in einer Skala zur visuellen Beurteilung von Alterungserscheinungen (von 5: keine Veränderung bis 1: starke Alterung) zusammengefasst werden (siehe Tabelle 4.3 [21]). Da diese Einteilung nach subjektiver Farbwahrnehmung vorgenommen wird, handelt es sich hierbei um Richtwerte.

Tabelle 4.3.: Merkmale der visuellen Beurteilung und deren Beurteilungsgrundlagen und Alterungsskala [21]

Alterungsstufe	Erscheinungsform
	Vergilben
5	keine Veränderung zur Referenzprobe
4	spurenhafte Gelb- oder Grünfärbung
3	schwach gelb, schwach orange
2	mittelgelb, bräunlich
1	kräftig gelb

Alterung in der Praxis

Nachdem im Allgemeinen eine Lebensdauer von vielen Jahren abgebildet werden soll, wurden Prüfmethoden entwickelt um Prüfzeiten zu verkürzen. Gängige Methoden hierfür sind Anheben der Prüftemperatur, Reduktion der Prüfkörperdicke, Einsatz von reinem Sauerstoff, Überdruck sowie zeitraffende Belichtungsgeräte. Wie oben beschrieben zählen all diese Methoden zu äußeren Alterungsursachen. Alle Beschreibungen von Alterung in dieser Arbeit beziehen sich ausschließlich auf äußere Alterungsursachen.

Nach AK-LV34 (siehe Kapitel 2.2) wird für die Verkürzung der Prüfzeiten auf eine Alterung durch Energiezufuhr (150h 120°C + 2000h 110°C) zurückgegriffen. Es wurden bevorzugt Werkstoffe gewählt, welche in etwa diese Werte als Dauergebrauchstemperatur erfüllen. Eine klare Abgrenzung kann auch die Dauergebrauchstemperatur nicht geben, da diese je nach Bestimmungsmethode stark schwankt.

Dauergebrauchstemperatur

Eine Bestimmung der Gebrauchsdauer bei bestimmten Gebrauchstemperaturen kann mittels thermischen Messmethoden wie zum Beispiel DSC als auch durch Alterung im Umluftofen und anschließenden mechanischen Tests bestimmt werden. [41]

Eine Bestimmung der Dauergebrauchstemperatur wird nach DIN-EN-ISO2578 mittels Ofenalterung durchgeführt.

Die Dauergebrauchstemperatur wird so definiert, dass die für die Verwendung vermutlich ausschlaggebende physikalische Größe nach Arrheniusplot nach 20.000h die Hälfte des ursprünglichen Wertes angenommen hat. [17]

Nachdem der Hersteller des Granulates selbst definiert welche physikalische Eigenschaft des Werkstoffs die Ausschlaggebende ist, können sich andere nicht gemessene Eigenschaften anders verhalten. Deshalb wurden teilweise auch Werkstoffe getestet, welche leicht unterhalb der Temperaturbelastung ihre Dauergebrauchstemperatur hatten.

4.1.5. Rückstellkraft

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben ist auch die Rückstellkraft eine Produktanforderung. Mit den von der Firma (Hirtenberger Automotive Safety GmbH & Co KG) im Vorfeld zur Verfügung gestellten Kolbenaufsätzen wurden viele Rückstellkraftmessungen durchgeführt. (siehe Kapitel 5.3)

Durch die Erkenntnisse wurde die Rückstellkraft im Bezug auf die Werkstoffauswahl als weniger kritisch eingestuft.

4.2. Beschreibung getesteter Werkstoffe

Neben den zur Verfügung gestellten Kolbenaufsätzen wurden den Auswahlkriterien entsprechend (siehe Kapitel 4.1) weitere fünf Werkstoffe (siehe Tab.4.1) gewählt und getestet. Aufgrund der Vorversuche wurde das Hauptaugenmerk auf elastische Werkstoffe gelegt, welche für höhere Temperaturen (100-150°C) beständig sind. In nachfolgender Beschreibung der Werkstoffe wird der Fokus auf jene Werkstoffeigenschaften gelegt, welche für das getestete Produkt relevant sind. Dadurch ist keine Vollständigkeit an Werkstoffeigenschaften gegeben.

Die Werkstoffe wurden ihrer Struktur entsprechend in Gruppen behandelt.

4.2.1. Polyamide

Polyamide wurden erstmals 1937 synthetisiert und sind Polymere, welche aus sich wiederholenden Amidgruppen (siehe Abb.4.2) bestehen.

Teilkristalline thermoplastische Polyamide, zu denen die Mehrzahl technisch bedeutender Polyamide zählt, weisen eine hohe Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit sowie eine gute chemische Beständigkeit auf. Die Amidgruppen und deren Wechselwirkung über Wasserstoffbrückenbindungen dominieren viele Eigenschaften. [65]

Grundsätzlich kann man Polyamide in aliphatische und aromatische Polyamide unterteilen. Aliphatische Polyamide sind lineare, verzweigte oder unverzweigte Polymerketten. Eine Ausnahme stellen die sogenannten alizyklischen Verbindungen dar. Diese sind zyklische (ringförmige) Verbindungen, welche aber die Aromatizitätskriterien nicht erfüllen [64]. In dieser Arbeit werden unter den aliphatischen Polymeren nur lineare betrachtet.

Aliphatische Polyamide können weiter unterteilt werden, ob sie aus einem oder zwei Ausgangsstoffen bestehen. Die beiden Arten unterscheiden sich im Aufbau vom Monomer (siehe Abb. 4.3 und 4.4).

Die beiden technisch am häufigsten verwendeten Polyamide sind PA6 und PA6.6, sie haben dieselbe Summenformel (aber einen unterschiedlichen Aufbau), aufgrund des symmetrischen Aufbau von PA 6.6 können sich hier Wasserstoffbrücken von der Molekülausrichtung unabhängig bilden (siehe Abb. 4.5).[24] Durch die erhöhte Anzahl an Wasserstoffbrückenbindungen sind demnach Polyamide aus zwei Ausgangsstoffen stabiler, sie besitzen eine höhere Glasübergangstemperatur, sowie einen höheren Schmelzpunkt und ein gutes mechanisches Erscheinungsbild, vor allem in Bezug auf die Zähigkeit und das Verschleißverhalten [39]. Neben den Wasserstoffbrückenbindungen hat auch die Verteilung der CH₂-Gruppen einen großen Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften.

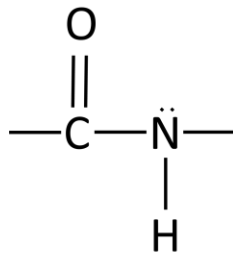
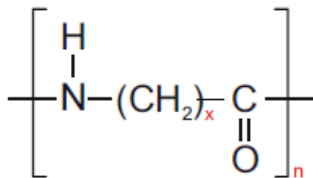
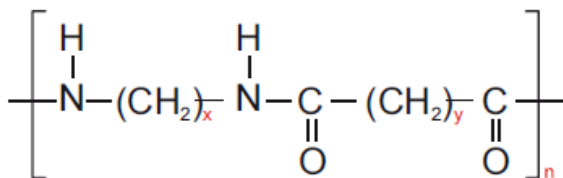


Abbildung 4.2.: Strukturformel der Amidgruppe[18]



PA 6: $x = 5$
PA 11: $x = 10$
PA 12: $x = 11$

Abbildung 4.3.: Monomere von Polyamiden mit einem Ausgangsstoff (Bsp. PA6) [39]



PA 66: $x = 6, y = 4$
PA 610: $x = 6, y = 8$
PA 612: $x = 6, y = 10$
PA 46: $x = 4, y = 4$

Abbildung 4.4.: Monomere von Polyamiden mit zwei Ausgangsstoffen (Bsp. PA6.6) [39]

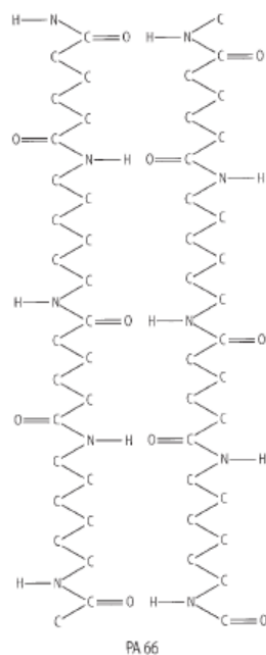


Abbildung 4.5.: Schematischer Aufbau von PA66 [24]

Die Wasseraufnahme sowie viele mechanische Eigenschaften werden unter anderem von dem Verhältnis der CH_2 -Gruppen je Amidgruppe bestimmt. [10]

Teilaromatische Polyamide bestehen zu einem Teil aus aromatischen (ringförmigen) Grundbausteinen (Säure oder Amin). Die einfachste aromatische Verbindung ist Benzol (siehe Abb. 4.6) Durch die größere Bindungsenergie von aromatischen C-C Bindungen mit 560kJ/mol im Gegensatz zu aliphatischen C-C Bindungen mit 350kJ/mol sind diese ringförmigen Strukturen stabiler. [26]

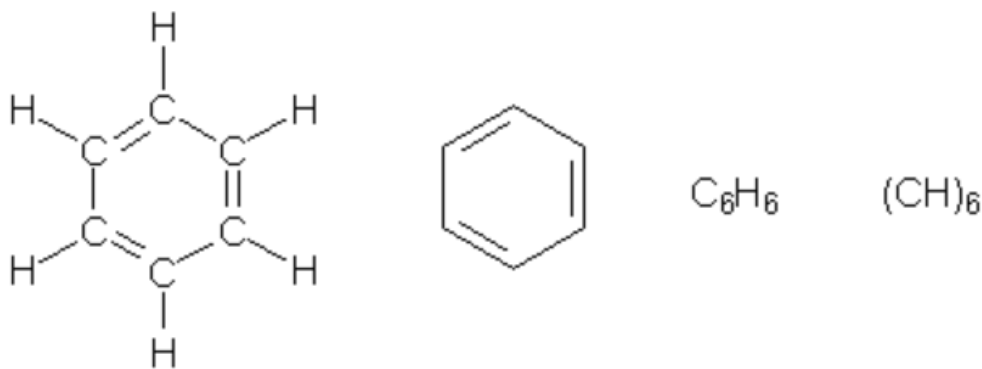


Abbildung 4.6.: Verschiedene Schreibweisen von Benzol [35]

Für teilaromatische Polymere heißt das, dass sie im Gegensatz zu aliphatischen Polyamiden bessere mechanische Eigenschaften, höhere Temperatureinsatzgrenzen und ein günstigeres Brandverhalten besitzen. Dafür verfügen sie über eine etwas niedrigere Schlagzähigkeit und sind in der Herstellung etwas teurer. [39]

PA6.6 - GrilonAZ3 - Zytel ST801

PA6.6 zählt zu den aliphatischen Polyamiden mit zwei Ausgangsstoffen (siehe Abb. 4.4). PA 6.6 hat eine große Härte, Steifigkeit, Abriebfestigkeit und Wärmeformbeständigkeit. Diese Eigenschaften werden unter den unverstärkten aliphatischen Polyamiden nur von Polyamid 4.6 übertroffen. [10]

PA6.6 ist das bevorzugte Polyamid für hoch belastete und wärmebeanspruchte Teile in der Elektrotechnik, im Maschinen-, Fahrzeug- und Apparatebau. Beispiele hierfür sind Spulen, Gleitlager und Zahnräder.

Grilon AZ3 und Zytel ST801 sind beides schlagzähmodifizierte PA6.6 Typen. Wobei sie laut Lieferant (Biesterfeld) unterschiedliche Schlagzähmodifikatoren aufweisen. Eine Verbesserung der Schlagzähigkeit kann unter anderem erreicht werden, wenn ein Polymer mit entsprechend guten Schlagzähseigenschaften eingearbeitet wird. [29] Eine weitere Möglichkeit der Schlagzähmodifikation ist die Einarbeitung von Blends aus PP (Polypropylen) und EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk). Diese verbessern die Schlagzähigkeit auch bei niedrigen Temperaturen, steigern die Elastizität des Polymers und sind mit den meisten Kunststoffarten kompatibel. [23] Unter Umständen können durch Alterungsvorgänge (siehe Kapitel 4.1.4) Schlagzähmodifikatoren betroffen sein und in ihrer Wirksamkeit beeinträchtigt werden.

Da etwaige Modifikatoren in Datenblättern nicht explizit definiert sind, kann man nicht herausfinden welche Schlagzähmodifikationen gemacht wurden, dadurch kann nicht nachvollzogen werden, ob diese bei erhöhten Temperaturen womöglich abbauen oder sich verändern. Deshalb wurden mit Grilon AZ3 und Zytel ST801 zwei grundsätzlich gleiche Polyamide (PA6.6) mit unterschiedlichen Schlagzähmodifikatoren untersucht.

Polyamid 12 - Grillamid L20G

Polyamid 12 (PA12) ist ein thermoplastischer, teilkristalliner aliphatischer Kunststoff mit einem Ausgangsstoff (siehe Abb.4.3). [11] PA12 hat mit einer Glasübergangstemperatur von 49°C, einen niedrigeren Glasübergang, als die bisher diskutierten Polyamidtypen wie PA6.6 Typen. [24] Die Schmelztemperatur ist mit 174 – 178°C ebenso deutlich tiefer, als von PA6.6 Typen. [10] Demnach ist PA12 weniger temperaturstabil wie PA6.6. Der Vorteil von PA12 ist die sehr geringe Wasseraufnahme und damit verbundene gute Dimensionsstabilität, auch unter wechselnden Umgebungsbedingungen und die relativ gute Schlagzähigkeit. [24] Das getestete PA12 Grillamid L20G besitzt aufgrund der ohnehin besseren Schlagzähigkeit keinen Schlagzähmodifikator. Ein Versagen durch Alterung aufgrund von Beeinträchtigungen der Schlagzähmodifikatoren ist somit in diesem Werkstoff nicht möglich.

Polyphthalamid - Zytel HTNFE8200 - Grivory HT3Z

Polyphthalamide sind teilaromatische Polyamide, das bedeutet sie enthalten sowohl aliphatische als auch aromatische Monomere. Wie schon in Kapitel 4.2.1 beschrieben ist die Bindungsenergie von aromatischen Bindungen höher als jene von aliphatischen Verbindungen. Dadurch ergibt sich eine höhere Wärmeformbeständigkeit, sowie eine hohe Festigkeit. Eine gute chemische Beständigkeit sowie eine geringe Wasseraufnahme sind auch eine Folge der stabilen Bindungen. [24]

Polyphthalamide besitzen Schmelztemperaturen um ca. 300°C. [66] Die hohen Schmelztemperaturen setzten auch hohe Verarbeitungstemperaturen voraus. Werkzeugtemperaturen von mindestens 135°C sind keine Seltenheit. Eine Produktion mit diesen Temperaturen ist mit dem vorhandenen Equipment nicht zulässig (siehe 4.1.2). Eine Verarbeitung mit geringerer Temperatur hat zur Folge, dass die Abkühlgeschwindigkeiten erhöht sind. Diese haben zur Folge, dass eine Kristallisation zum Teil unterdrückt werden kann, sowie, dass der Kristallisationspeak sich zu niedrigeren Temperaturen verschiebt. [19] Die Formteilqualität ist aufgrund der Kristallinität und eingefrorenen Spannungen stark abhängig von der Kühlzeit. [58]

Das getestete Werkstoff Zytel HTNFE8200 konnte mit einer Werkzeugtemperatur von 90°C verarbeitet werden und konnte ohne Probleme im Produkt verbaut und getestet werden. Bei diesem Werkstoff handelt es sich um ein hitzestabilisiertes Copolyamid PA6T/XT-I. Der Werkstoff Grivory HT3Z benötigt etwas höhere Verarbeitungstemperaturen als Zytel HTNFE8200 und wurde aber dennoch ebenfalls mit einer Werkzeugtemperatur von nur 90°C gespritzt. Grivory HT3Z ist ebenfalls ein partiell aromatisches Copolyamid PA10T/X. Die Bezeichnung 10T zeigt, dass das Basispolymer längere Ketten hat, als Zytel HTNFE 8200 mit 6T. Die Glasübergangstemperatur ist nach Literaturwerten bei 125°C zu finden. [38] Kolbenaufsätze aus diesem Werkstoff sind zum Teil schon beim Einbau in das Produkt gebrochen. Durch Tempern wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, konnte eine leichte Verbesserung erreicht werden.

4.2.2. PA6+ABS - AkromidB3-23RMD

Bei dem getesteten Werkstoff Akromid B3-23RMD handelt es sich um ein Polymerblend aus Polyamid 6 (Beschreibung siehe Kapitel 4.2.1) und Acrylnitril-Butadien-Styrol. Bei Acrylnitril-Butadien-Styrol (kurz ABS) handelt es sich um einen amorphen thermoplastischen Standardkunststoff bestehend aus drei Monomersorten (siehe 4.7) [48]

Durch den Butadienanteil wird eine Abwandlung der Glasübergangstemperatur und dadurch eine Verbesserung der Kallschlagzähigkeit erreicht. Je nach Typ können Eigenschaften einer hohen Schlagzähigkeit in der Kälte, hohen Formbeständigkeit in der Wärme, verhältnismäßig geringe Wasseraufnahme, sowie hohe Chemikalienbeständigkeit erreicht werden. [24] Diese Eigenschaften sind im Produkt von Vorteil.

Um Polymerblends aus ABS und PA herstellen zu können ist eine Zugabe von Additiven notwendig um eine Verbindung zu gewährleisten. [61]. Durch die Zugabe des amorphen ABS mit seinen Eigenschaften werden die für PA typischerweise hohe Maßänderungen verringert, zusätzlich wird die Kallschlagzähigkeit erhöht. [7]

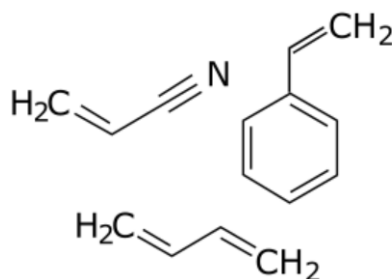


Abbildung 4.7.: Monomere von ABS [48]

Typische Anwendungsgebiete für PA+ABS-Blends sind Haushalts-/ und Gartengeräte, Motorwerkzeuge und Teile für die Elektrotechnik [10].

4.2.3. Polyketon - Akrotek PK VM 4774

Polyketon ist ein teilkristallines Polymer. Die meisten Akrotek PK Formulierungen bilden sich aus den Basis Ethylen und Propylen mit dem Comonomer CO (siehe Abb. 4.8). Die Bezeichnung VM im getesteten Polyketon bedeutet, dass dieser Kunststoff vom Hersteller als sehr gut fließend eingestuft wird. Der in Abb. 4.9 gezeigte Werkstoff PK-HM unterscheidet sich demnach in der Fließfähigkeit.

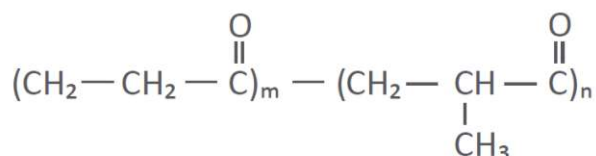


Abbildung 4.8.: Aufbau von Polyketon (Akrotek) [8]

Mit über 30% besitzt spritzfrisches Polyketon eine sehr hohe Streckdehnung im Vergleich zu anderen teilkristallinen Polymeren (siehe Abb.4.9)[8].

Neben der Streckdehnung hat Polyketon noch weitere gute Eigenschaften, wie gute Hydrolysestabilität aufgrund von geringer Feuchtigkeitsaufnahme sowie Chemikalienbeständigkeit. [30]

4.2.4. Polybutylenterephthalat - Crastin ST820

Polybutylenterephthalat (kurz PBT) ist ein thermoplastisches Polyester auf Basis von Terephthalsäure und 1,4 Butandiol (siehe Abb. 4.10)

PBT besitzt eine ausgewogene Kombination aus Steifigkeit und Festigkeit bei guter Zähigkeit, Wärmeformbeständigkeit sowie hervorragender Dimensionsstabilität. Den größten Anwendungsanteil findet PBT in der Automobilbranche. [24] Die gute dynami-

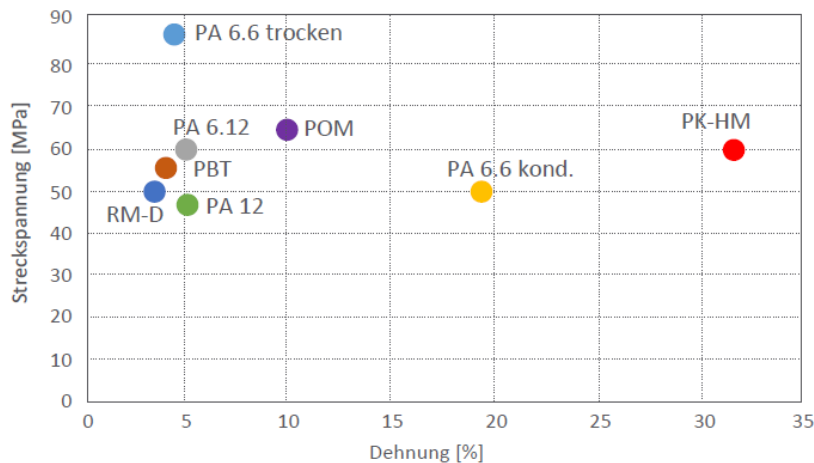


Abbildung 4.9.: Streckdehnung verschiedener teilkristalliner Polymere im Vergleich [8]

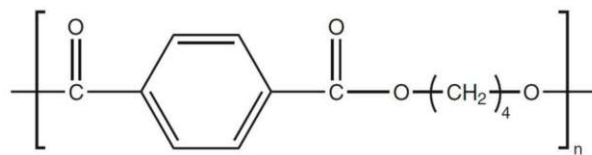


Abbildung 4.10.: Schematischer Aufbau von Polybutylterephthalat

sche Belastbarkeit, sowie gute Chemikalienbeständigkeit (ausgenommen starke Säuren und konzentrierte Laugen) sind für das untersuchte Produkt von großem Vorteil. [10][41]

Die Glasübergangstemperatur liegt je nach Kristallinität zwischen 30°C und 50°C und die Schmelztemperatur etwa bei 230°C. Die Dauergebrauchstemperatur liegt je nach Type bei etwa 120 – 130°C. [10]

PBT besitzt eine hohe Beständigkeit gegen thermische Zersetzung und ist somit im Sinne des untersuchten Produktes gut alterungsbeständig. Ein Abbau wird wie bei vielen Werkstoffen auch bei PBT von einer Vergilbung mit nachfolgender Dunkelfärbung begleitet. [41]

Da die Verarbeitungsparameter für die Kolbenaufsätze aus diesem Werkstoff nicht bekannt sind, können etwaige Versager, welche durch falsche Behandlung entstehen können, nicht identifiziert werden.

4.2.5. Thermoplastische Elastomere

In diesem Kapitel werden alle getesteten thermoplastischen Elastomere zusammengefasst. Aufgrund der Kriterien wurden diese Werkstoffe von den Werkstofflieferanten empfohlen. Nachdem bei den unterschiedlichen getesteten thermoplastischen Elastomeren ein ähnlicher Versagensablauf festzustellen war, wird auf die Unterschiede im Aufbau dieser

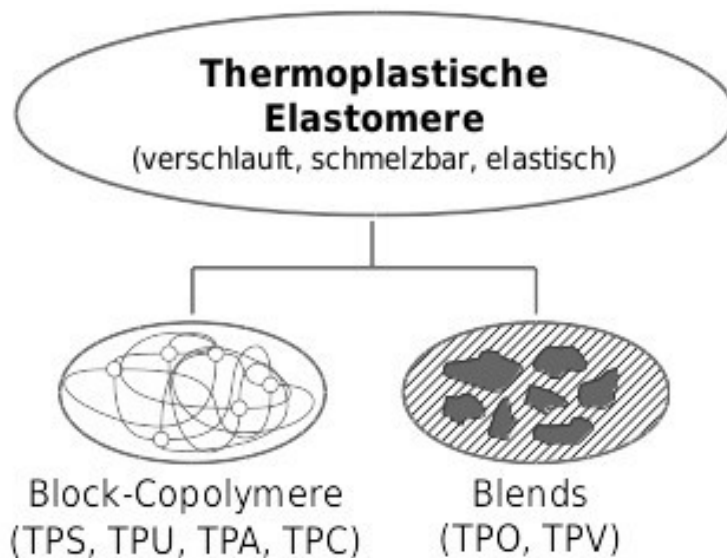


Abbildung 4.11.: Einteilung und schematischer Aufbau von thermoplastischen Elastomeren [40]

Werkstoffe nicht genauer eingegangen.

Thermoplastische Elastomere vereinen die elastischen Eigenschaften von Elastomeren mit der Verarbeitbarkeit von Thermoplasten.[24]

Um diese Eigenschaften kombinieren zu können, besteht einerseits die Möglichkeit harte und weiche Blöcke durch Copolymerisation zu verbinden, oder eine thermoplastische Matrix mit Kautschuk zu blenden. (siehe Abb.4.11 [44])

Thermoplastische Elastomere sind im Gegensatz zu Elastomeren chemisch nicht vernetzt. Dadurch ist keine Verweilzeit für Vernetzungsreaktionen im Werkzeug notwendig. Ein erneutes Aufschmelzen ist möglich und Produktionsrückstände sind wiederverwertbar. [63]

Es wurden thermoplastische Elastomere unterschiedlicher Basis untersucht (siehe Tab. 4.4)

Tabelle 4.4.: Untersuchte thermoplastische Elastomere

Handelsname	Basis	Abkürzung
Sarlink B3190	Polypropylen	
Elastollan 794A 15CS	Polyurethan	TPU
Hytrel5556	Polyester	TPC
TV9LVZ	Polystyrol	TPS

5. Ergebnisse

5.1. Validierung Temperatursimulation

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben wurde mit unterschiedlichen Temperaturmesslacken an verschiedenen Positionen am Aktuator getestet. Die Stellen an denen die Tests durchgeführt wurden sind in Abb. 5.1 abgebildet.



Abbildung 5.1.: Positionen an denen der Temperaturmesslack angebracht wurde

Eine Messung am Hals (Position A) hat ergeben, dass die Temperatur im Zuge der Leistungsüberprüfung hier nicht einmal 79°C erreicht und somit nicht durch den Messbereich besagter Messlacke abgedeckt ist.

Bei der Messung am Kopf (Position B) wird der Lack im Zuge der Leistungsüberprüfung durch die Reibung an der Rohrwand stark beansprucht. Auf dem mit dem Rohr abschließenden Teil der Dichtung fehlt nach dem Beschuss der Temperaturmesslack gänzlich. Nachdem im unteren Bereich der Lack noch vorhanden und nicht ausgelöst ist, deutet dies auf eine mechanische und nicht thermische Beanspruchung des Lackes hin. Die Vermutung liegt nahe, dass dieser abgerieben wurde. Ist der Lack zu zähflüssig, wie bei den Temperaturen (184°C und 253°C), dann ist eine Aussage nicht möglich, da einige Stellen bei beiden Temperaturen schimmernd ausgelöste Stellen vermuten lassen, doch bei anderen Bereichen der Lack noch farbig ist. Um das Abschaben des Lackes zu verhindern wurde der Kolbenaufsatz einseitig so eingeschnitten, dass eine flache Vertiefung zum Auftragen des Lackes zur Verfügung steht. Leider brachte dies auch keine fundierten Erkenntnisse, da auch hier große Teile vom Lack fehlen. Der Simulation nach zu urteilen, erfährt dieser Bereich keine messbare Temperaturänderung, deshalb wurden mit diesem Aufbau keine weiteren Versuche mit Lacken geringerer Aktivierungstemperatur durchgeführt.

Bei Messungen im Inneren des Kolbens (Position C) besteht die Schwierigkeit, dass durch die aggressiven Gase und den hohen Druck, der angebrachte Temperaturmess-

lack stark beansprucht wird. Bei Betrachtung dieser Ergebnisse zeigt sich, dass der Lack nach dem Beschuss durch den hohen Innendruck, durch Verbrennungsgase, sowie durch Verbrennungsrückstände und Rußpartikel unkenntlich geworden ist. In diesem Bereich konnte durch Aufrauen der Innenoberfläche eine bessere Haftung des Lackes gewährleistet werden. Dennoch konnten auch dadurch keine verwertbaren Ergebnisse erhalten werden, da nach dem Beschuss nur noch kleine Teile des Lackes übrig waren und diese nicht ausgelöst haben, obwohl eine viel höhere Temperatur vorhanden sein müsste. Um die Messung bei weniger aggressiven Umgebungsbedingungen in einem Bereich mit messbarer Temperaturänderung durchzuführen, wurde der Kolbenaufsatz angebohrt und der Messlack in dieser Bohrung aufgetragen (Position D). Leider führte auch dieser Aufbau zu keinem messbaren Ergebnis, da der angebohrte Bereich beim Beschuss durch den hohen Innendruck gänzlich aufreißt und somit der Lack nachher nicht mehr vorhanden ist.

5.2. Leistungsüberprüfung

Für die Leistungsüberprüfung wurden aus allen Werkstoffen auf der firmeneigenen Spritzgussmaschine Kolbenaufsätze gespritzt. Die Spritzparameter wurden nach Möglichkeit (siehe Kapitel 4.1.2) den empfohlenen Spritzparametern der einzelnen Werkstoffe angepasst. Die Werkstoffe PA6+ABS, PK, PBT, PA12 sowie TPE auf PP Basis wurden vor dem Beginn dieser Arbeit gespritzt und dadurch sind die eingestellten Spritzparameter unbekannt. Diese Kolbenaufsätze sind 2018 gespritzt worden und sind seitdem im Büro gelagert worden. Die weiteren Kolbenaufsätze wurden innerhalb einiger Tage maximal 1-2 Wochen nach dem Spritzguss verbaut.

Von einer Konditionierung im Vorfeld wurde abgesehen, da die ausschlaggebenden mechanischen Eigenschaften wie Schlagzähigkeit und Dehnung konditioniert einen besseren Wert aufweisen als trocken. (siehe Datenblätter im Anhang A) Durch die geforderte thermische Alterung muss der Werkstoff auch im trockenen Zustand funktionieren. Dieser wurde im Lauf der thermischen Alterung abgetestet.

Die ungealterten Versuche wurden demnach mit einem unbekannten Feuchtigkeitszustand durchgeführt, der aber nicht trocken war, um die Einsatzfähigkeit allgemein abzutesten. Erst wenn diese Versuche gelungen sind ist der trockene (kritischere) Zustand durch die Alterung abgetestet worden. Es ist zu beachten, dass aufgrund der Vorgehensweise nicht differenziert werden kann ob Werkstoffe, welche nach 150h bei 120°C versagt haben aufgrund von Alterungserscheinungen oder Aufgrund des trockenen Zustandes versagen.

Anfangs wurden Kolbenaufsätze aus allen Werkstoffen ohne thermische Alterung getestet. (siehe Kapitel 3.2) Werkstoffe welche dieser Belastung bei -40°C , Raumtemperatur und $+110^{\circ}\text{C}$ standgehalten haben, wurden einer thermischen Alterung unterzogen (siehe Kapitel 4.1.4) anschließend wurden diese belasteten Aktuatoren getestet.

Tabelle 5.1.: Einteilung der Beschussergebnisse

Benennung	Ergebnis	Leistungsgrenze	Schadensbild Kolbenaufsatz
gut	i.O.	innerhalb	keine größere Schäden
schlecht	n.i.O.	knapp außerhalb	Einriss oder Einbrand
sehr schlecht	n.i.O.	deutlich außerhalb	Löcher oder große Risse
Totalversager	n.i.O.	kein Hub	durchgehender Riss oder Bruch

Die Ergebnisse der getesteten Aktuatoren wurden je nach Performance grob in vier Gruppen eingeteilt (siehe Tabelle 5.1). Da auch der Bruchzeitpunkt einen Einfluss auf das Schadensbild hat sind die beschriebenen Schadensbilder am Kolbenaufsatz, vor allem bei sehr schlecht und „Totalversager“ als Richtwert zu verstehen.

Es konnten auch Schadensbilder identifiziert werden, welche keinen Einfluss auf die Performance haben. Anschließend werden nur jene dieser Schadensbilder diskutiert, welche in der Regel auftreten.

Bei einer Leistungsüberprüfung kommt es bei $+110^{\circ}\text{C}$ bei einigen Werkstoffen zu einer Wulstbildung im inneren Bereich (siehe Abb. 5.2). In weiterer Analyse konnte festgestellt werden, dass eine direkte Korrelation zwischen oben genanntem Wulst und der Performance nicht feststellbar ist. Doch es zeigte sich, dass Werkstoffe, welche dazu neigen einen größeren Wulst zu bilden versagensanfälliger sind.



Abbildung 5.2.: Schadensbild im Inneren des Kolbenaufsatzes ohne Einfluss auf die Performance

Ein weiteres Schadensbild, welches bei der Leistungsüberprüfung üblicherweise auftritt ist eine ca. 1.5 mm breite Rille außen am Kolbenaufsatz, welche je nach Ausprägung nur als ein oberflächliche Kratzer oder als fehlendes Material auftritt. In Analysen konnte festgestellt werden, dass auch ausgeprägte Auswaschungen dieser Art keinen Einfluss auf die Performance haben, da die Beschädigung durch die Abströmbohrung am Ende der Leistungsüberprüfung passiert. Wie schon beim inneren Wulst beschrieben konnte

auch hier eine Tendenz festgestellt werden, dass jene Werkstoffe, welche eine geringere Neigung zu diesem Schadensbild haben im Allgemeinen robuster sind.

5.2.1. Ungealterte Aktuatoren

In diesem Kapitel werden jene Werkstoffe diskutiert, welche auch ohne thermische Alterung ein Versagen aufweisen. Eine Zusammenfassung aller Ergebnisse ist in Tabelle 5.2 zu finden.

Tabelle 5.2.: Zusammenfassung der Ergebnisse ungealterter Aktuatoren

Werkstoff	Handelsnahme	−40°C	+23°C	+110°C
PA6+ABS	Akromid B3-23RMD	n.i.O	n.i.O	i.O
Polyketon	Akrotek PK VM 4774	n.i.O	i.O	i.O
PBT	Crastin ST820	n.i.O.	i.O	i.O
TPE mit PP Basis	Sarlink B3190	i.O	i.O	n.i.O.
PPA	Grivory HT3Z	n.i.O	n.i.O	i.O
TPE mit PS	TV9LVZ	i.O	i.O	n.i.O

Einige der Werkstoffe wurden mit zwei unterschiedlichen Treibladungsgehäusen (Design A und B) getestet. Design A weist Simulationen zufolge, welche nicht Teil dieser Arbeit sind, einen höheren Berstdruck als Design B auf. Design B hat im Gegensatz zu Design A vordefinierte Sollbruchstellen.

Unterschiede der beiden Treibladungsgehäusedesigns konnten nur bei den Werkstoffen PA6+ABS, Polyketon und Polybutylentheraphtalat festgestellt werden.

PA6+ABS



Abbildung 5.3.: Bruchbild eines Kolbenaufsatzes aus PA6+ABS

Trotz der theoretisch guten mechanischen Eigenschaften von PA6+ABS (siehe Kapitel 4.2.2) musste festgestellt werden, dass die Anforderungen im Produkt nicht eingehalten werden. Einzelne der getesteten Aktuatoren versagen sowohl bei Raumtemperatur, als auch bei -40°C . Die Versager sind als „sehr schlecht“ eingestuft worden (siehe Tabelle 5.1)

Die Versager konnten als punktuelle Überlastung des Kolbenaufsatz an den Stellen des sich öffnenden Treibladungsgehäuse identifiziert werden, da dieses Schadensbild nur bei Design B mit vordefinierten Sollbruchstellen auftritt. (siehe Abb. 5.3).

Betrachtet man zur Analyse den Zugversuch aus PA6+ABS zeigt sich, dass trotz zähen Werkstoffverhaltens an den Bruchflächen nur eine sehr geringe Verformung eintritt. Dieses Phänomen könnte bei punktueller Belastung auf ein sprödes Verhalten schließen lassen.

Die getesteten Aktuatoren weisen durchwegs eine Vergilbung der Oberfläche auf.

Da trotz weniger Tests teilweise „sehr schlechte“ Beschussergebnisse erzielt wurden, wurde Akromid B3-23RMD keiner thermischen Alterung unterzogen.

Etwaige Ausfälle aufgrund von falschen Spritzparametern konnten nicht identifiziert oder ausgewertet werden, da die eingestellten Spritzparameter nicht bekannt sind.

Polyketon



(a) Inhomogenitäten



(b) Beispiel für „Totalversager“

Abbildung 5.4.: Kolbenaufsätze aus Polyketon

Der Kolbenaufsatz aus Polyketon weist im Neuzustand schlierenartige Verfärbungen auf. (siehe Abb.5.4a) Nachdem die Vorgeschichte der Proben nicht bekannt ist, kann die Herkunft dieser Schlieren nicht eruiert werden.

Um mögliche Korrelationen zwischen Inhomogenitäten und Versagen zu finden, wurden einige Kolbenaufsätze vor und nach dem Testen mittels Lichtmikroskop untersucht. Es konnte keine Korrelation zwischen Schlierenverteilung und Bruchverhalten festgestellt werden.

Polyketon konnte zwar bei Raumtemperatur und bei $+110^{\circ}\text{C}$ überzeugen. Bei -40°C konnten wie schon bei PA6+ABS beschrieben (siehe Kapitel 5.2.1) einige Versager auf punktuelle Überlastung des Kolbenaufsatzes zurückgeführt werden. Der Zugversuch zeigt

ebenso wie schon bei PA6+ABS trotz zähen Werkstoffverhaltens nur sehr geringe Verformungen an der Bruchfläche.

Nicht alle „Totalversager“ konnten punktueller Überbelastung durch das Treibladungsgehäuse zugeordnet werden, da auch Schadensbilder auftraten, welche auf ein Vorbeiblasen durch einen undichten Bereich an der Dichtlippe schließen lassen (siehe Abb.5.4b).

Nachdem die Leistungsüberprüfung bei -40°C mit dem angedachten Design B des Treibladungsgehäuses negativ ausgefallen ist, wird auch dieser Werkstoff nicht nach einer thermischen Alterung getestet.

Etwaige Ausfälle aufgrund von falschen Spritzparametern konnten auch hier nicht identifiziert oder ausgewertet werden, da die eingestellten Spritzparameter nicht bekannt sind.

Polybuthylentheraphtalat

Auch bei PBT (Crastin ST820) konnte festgestellt werden, dass Tests bei Raumtemperatur, sowie bei $+110^{\circ}\text{C}$ durchwegs gute Ergebnisse liefern. Bei -40° sind die Ergebnisse wie schon bei PA6+ABS und bei Polyketon mit Design A gut, doch bei Design B versagen fünf von sechs Kolbenaufsätzen. Diese wurden stichprobenartig einer optischen Analyse unterzogen und zeigten teilweise große Ausbrüche der Kolbenaufsätze. Hierbei konnten die Sollbruchstellen des Treibladungsgehäuses nicht direkt den Bruchbildern zugeordnet werden, doch da nur bei Design B Brüche auftreten liegt, wie schon bei PA6+ABS sowie PK, eine punktuelle Überlastung in der Nähe der Sollbruchstellen nahe.

Thermoplastisches Elastomere auf Polypropylenbasis



Abbildung 5.5.: Schadensbild eines TPE (Basis PP) Kolbenaufsatzes nach Leistungsüberprüfung mit Ergebnis: gut

Kolbenaufsätze aus TPE mit PP Basis haben bei -40°C und Raumtemperatur gute Ergebnisse geliefert. Bei diesem Werkstoff traten Probleme bei der Leistungsüberprüfung

bei +110°C auf.

Das Schadensbild der TPE Kolbenaufsätze war abweichend, als die bisher diskutierten. Hierbei verformte sich der Kolbenaufsatz sehr stark. Eine Verformung tritt zum Teil auch bei guten Teilen ein (siehe Abb. 5.5).

Nachdem das Ergebnis der Leistungsüberprüfung teilweise mit „sehr schlecht„ bewertet wurde, ist auch mit Kolbenaufsätzen aus diesem Werkstoff keine Leistungsüberprüfung nach thermischer Alterung durchgeführt worden. Da aber nur drei von zehn Kolbenaufsätzen bei +110°C n.i.O Ergebnisse geliefert haben, wurden ähnliche Werkstoffe untersucht, welche etwas höhere Temperaturen vertragen sollten (siehe Kapitel 5.2.2).

Teilaromatisches Polyamid - Grivory HT3Z



Abbildung 5.6.: Bruchbild von Kolbenaufsätzen aus Grivory HT3Z

Der Werkstoff Grivory HT3Z konnte im spritzfrischen Zustand schlecht verbaut werden, da einige der Kolbenaufsätze bei der Montage schon gebrochen sind. Die Leistungsüberprüfung wurde mit jenen durchgeführt, welche keine optischen Schäden durch das Einpressen erlitten haben. Die Leistungsüberprüfung war negativ, Brüche verliefen meist radial am Umfang des Kolbenaufsatzes entlang. Aufgrund der Annahme, dass das Versagen durch einen geringen Kristallisationsgrad durch zu kalte Werkzeugtemperaturen hervorgerufen wurde, wurde der Kolbenaufsatz getempert. (siehe Kapitel 4.1.2) Diese Annahme konnte durch die durchgeführten DSC-Messungen nicht nachgewiesen werden. Die getemperten Kolbenaufsätze konnten unproblematisch verbaut werden. Die Leistungsüberprüfung lieferte für +110°C ein gutes Ergebnis, doch bei Raumtemperatur und –40°C mussten die Ergebnisse als „schlecht“ und „sehr schlecht“ eingestuft werden.

Das Schadensbild dieses Werkstoffs unterscheidet sich deutlich von den bisherigen Schadensbildern. Im ungetemperten Zustand zeigt sich wie schon bei der Montage ein einzelner radialer Bruch (siehe Abb.5.6a). Die Leistungsüberprüfung zeigte im getemperten Zustand bessere Ergebnisse und das Bruchbild veränderte sich auch. Im getemperten Zustand verlief der Bruch verzweigter. (siehe Abb.5.6b)

Da trotz getemperten Kolbenaufsätzen einige Versager aufgetreten sind, wird auch dieser Werkstoff keiner thermischen Alterung unterzogen.

Thermoplastisches Elastomere auf Polystyrolbasis

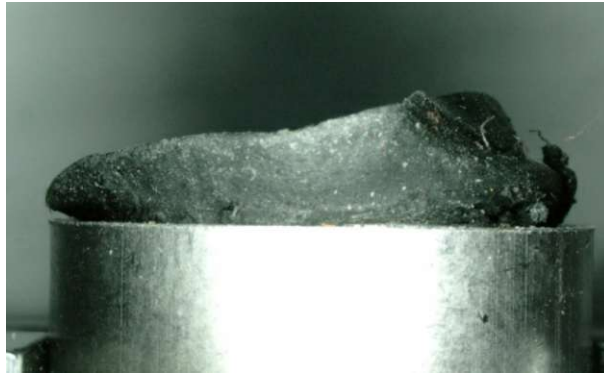


Abbildung 5.7.: Schadensbild eines TPE (Basis PS) Kolbenaufsatzes nach Leistungsüberprüfung bei +110°C

Nachdem TV9LVZ laut Hersteller eine gute Temperaturbeständigkeit bis +140°C aufweist, wurde dieses TPE als womöglich hitzebeständigerer Werkstoff mit elastischen Eigenschaften getestet. Bei der Leistungsüberprüfung zeigte sich, dass die Überprüfung bei –40°C und bei Raumtemperatur gute Ergebnisse liefert. Durch stichprobenartige optische Analysen konnte festgestellt werden, dass schon bei Raumtemperatur Veränderungen des Kolbenaufsatzes (Wulstbildung; Beschädigung durch Abströmbohrung siehe Kapitel 5.2) erkennbar sind, welche normalerweise erst bei +110°C auftreten, die Leistung aber nicht beeinflussen.

Die Prüfung bei +110°C brachte nur n.i.O Ergebnisse, größtenteils „sehr schlechte“, sowie „Totalversager“. Der Kolbenaufsatz ist hier sehr stark verformt (siehe Abb. 5.7)

5.2.2. Gealterte Aktuatoren

Tabelle 5.3.: Zusammenfassung der Ergebnisse bei Raumtemperatur der Leistungsüberprüfung

Werkstoff	Handelsname	150h+	500h	750h	1000h	1500h	2000h
PA12	Grillamid L20G	i.O	n.i.O.	i.O	i.O	n.i.O.	i.O.
PA6.6	Grilon AZ3	i.O	i.O	i.O	i.O	i.O	i.O
PA6.6	Zytel ST801	i.O	i.O	i.O	i.O	i.O	i.O
PPA	Zytel HTNFE 8200	i.O	i.O	i.O	i.O	i.O	i.O
TPU	Elastollan 794A 15CS	i.O	i.O	i.O	i.O	i.O	i.O
TPEE	Hytrel 5556	i.O	i.O	i.O			

Tests mit thermisch gealterten Aktuatoren wurden nur mit Design B (mit definierter Sollbruchstelle des Treibladungsgehäuse) durchgeführt. In diesem Kapitel werden nur

all jene Werkstoffe betrachtet, welche unbelastet bei der Leistungsüberprüfung über das gesamte Temperaturband gute Ergebnisse erzielt hatten.

Polyamid 12

Die gespritzten Kolbenaufsätze aus Polyamid 12 zeigten schon im spritzfrischen Zustand deutliche Verfärbungen und mit freiem Auge erkennbare Bindenähte (siehe Abb. 5.8).



Abbildung 5.8.: Gespritzter Kolbenaufsatz aus PA12 mit eindeutigen Spritzfehlern

Es wurden Leistungsüberprüfungen sowohl mit optisch auffälligen, als auch mit optisch unauffälligen Kolbenaufsätzen durchgeführt. Im ungealterten Zustand hatten alle durchwegs gute Ergebnisse. Um einen Einfluss des schlecht gespritzten Zustandes auch über die Zeit der thermischen Alterung überwachen zu können, wurden die Kolbenaufsätze mit optisch sichtbarer Bindenaht markiert und in weiterer Folge bei den Untersuchungen statistisch verteilt. Nach Vorbelastung (150h 120°C) erzielten alle PA12 Kolbenaufsätze gute Ergebnisse (siehe Abb. 5.9). Der erkennbar größere Hub nach der Vorbelastung ist auf das Treibladungspulver zurückzuführen und wird in dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Nach weiteren 500h bei +110°C sind die Anforderungen an die Leistungsüberprüfung nicht mehr erfüllt. Drei von fünf Kolbenaufsätzen sind als sehr schlecht einzustufen. Im weiteren Verlauf bei thermischer Alterung bis inkl. 2000h sind die Ergebnisse unterschiedlich. Nur bei einer Testtemperatur von +110°C sind die Ergebnisse abweichend. Hier zeigt sich, dass trotz durchlaufener Alterung (150h +120°C und 2000h +110°C) die Leistungsüberprüfung positiv verläuft.

Eine Korrelation zwischen den markierten Bindenähten und den Brüchen konnte nicht gefunden werden. Das Schadensbild dieser Kolbenaufsätze erstreckt sich von Bindenahttrissen bis hin zu großen Brüchen. Neben den vorhandenen Verfärbungen treten durch die Leistungsüberprüfung zusätzliche Verfärbungen auf.

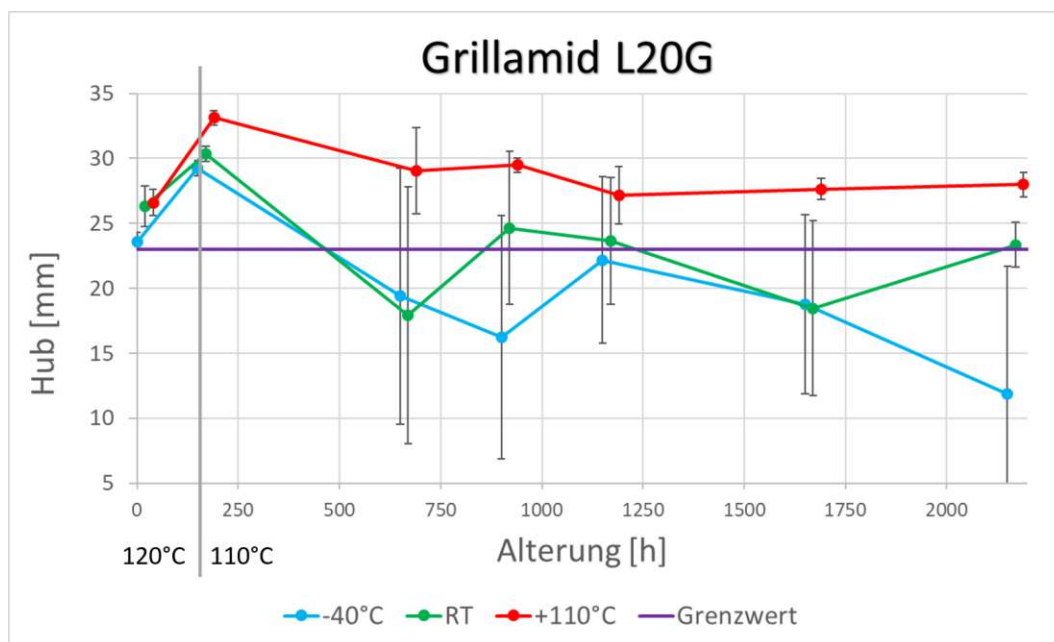


Abbildung 5.9.: Gemessene Leistungsanforderung bei PA12 - Grillamid L20G über den Zeitraum der Alterung hinweg

Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass auch die makroskopisch intakten Teile mikroskopische Fehlstellen aufweisen. Dadurch kann nicht ausgeschlossen werden, dass einwandfrei gespritzte Kolbenaufsätze aus PA12 die Leistungsüberprüfung auch nach thermischer Alterung bestehen würden.

Polyamid 6.6

Wie schon in Kapitel 4.2.1 beschrieben wurden zwei PA6.6 Typen mit unterschiedlichem Schlagzähmodifikator getestet (Grilon AZ3 sowie Zytel ST801).

Grilon AZ3 - Referenz



Abbildung 5.10.: Schadensbild bei PA6.6 Grilon AZ3 Kolbenaufsatz bei guter Leistungsperformance, getestet bei -40°C

Polyamid 6.6 bringt gute Voraussetzungen mit sich um eine thermische Alterung ohne Werkstoffveränderung zu durchlaufen. Die Leistungsüberprüfung verlief bei Raumtemperatur und Hochtemperatur durchwegs unauffällig (siehe Abb. 5.11). Bei Hochtemperaturbeschüssen konnten die üblichen Schäden am Kolbenaufsatz (Wulstbildung; Beschädigung durch Abströmbohrung siehe Kapitel 5.2) nachgewiesen werden. Diese beeinflussen die Leistungsperformance jedoch nicht.

Bei der Leistungsüberprüfung bei -40°C konnten im Verlauf der thermischen Alterung vermehrt unterschiedliche Einbrände identifiziert werden (siehe Abb. 5.10).

Nach vollständig durchlaufener Alterung kam es bei einem einzigen Kolbenaufsatz zum Bruch, dadurch wird die Performance nach thermischer Alterung bei -40° nicht mehr erfüllt.

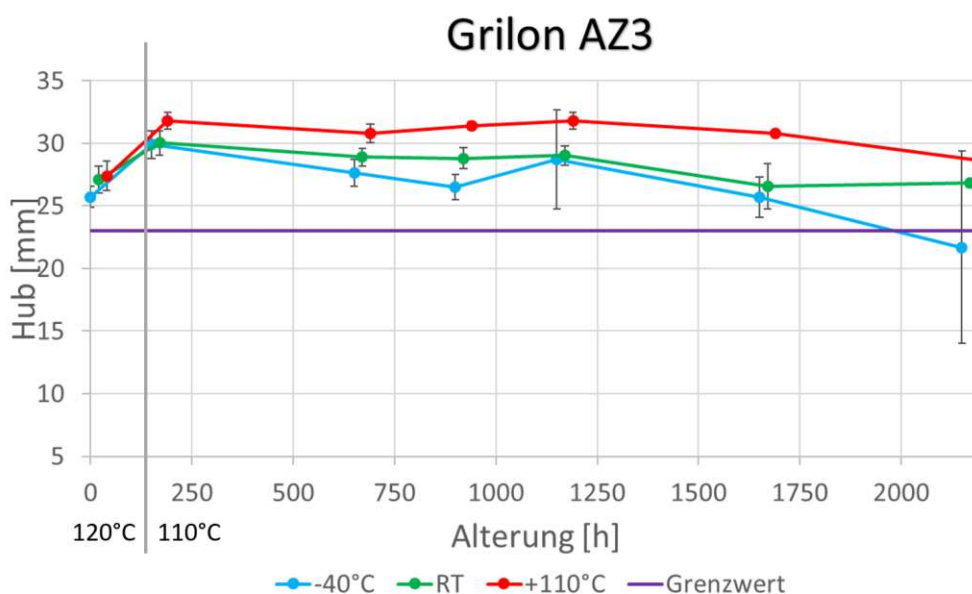


Abbildung 5.11.: Gemessene Leistungsanforderung bei PA6.6 - Grilon AZ3 über den Zeitraum der Alterung hinweg

Zytel ST801

Bei dem zweiten getesteten Polyamid 6.6, zeigte sich ein etwas anderes Ergebnis. Bei Raumtemperatur und $+110^{\circ}\text{C}$ konnten auch hier großteils gute Ergebnisse erreicht werden (siehe Abb. 5.13). Doch die Leistungsüberprüfung bei -40°C fiel deutlich schlechter aus. Schon nach einem Teil der thermischen Belastung (150h bei 120°C + 500h bei 110°C) konnten nach dem Beschuss große Beschädigungen am Kolbenaufsatz nachgewiesen werden. Anfangs zeigten sich nur vereinzelt Bindenahttrisse. Identifiziert wurden die Bindenahttrisse durch ihre Position gegenüber vom Anspritzpunkt. Im spritzfrischen Zustand war die Bindenaht optisch unauffällig. Die Bindenahttrisse beeinflussen das Er-

gebnis je nach Tiefe mehr oder weniger stark. (siehe Abb. 5.12a) Bindenahttrisse traten meistens bei einer Testtemperatur von -40°C und nur vereinzelt bei Raumtemperatur auf. Nachdem es ab 1500h zu weiteren Schadensbildern kam (siehe Abb. 5.12b), wurde von einer Bindenahtoptimierung abgesehen. Bei der vollständig durchlaufenen Alterung von 150h bei 120°C und 2000h bei 110°C gab es auch bei der Leistungsüberprüfung bei Raumtemperatur einen gebrochenen Kolbenaufsatz.



(a) Bindenahttriss mit geringfügigem Einfluss auf die Leistungsüberprüfung



(b) Bruchbild nach einer thermischen Alterung von 150h bei 120°C und 1500h bei 110°C

Abbildung 5.12.: Kolbenaufsatzes aus PA6.6 - Zytel ST801

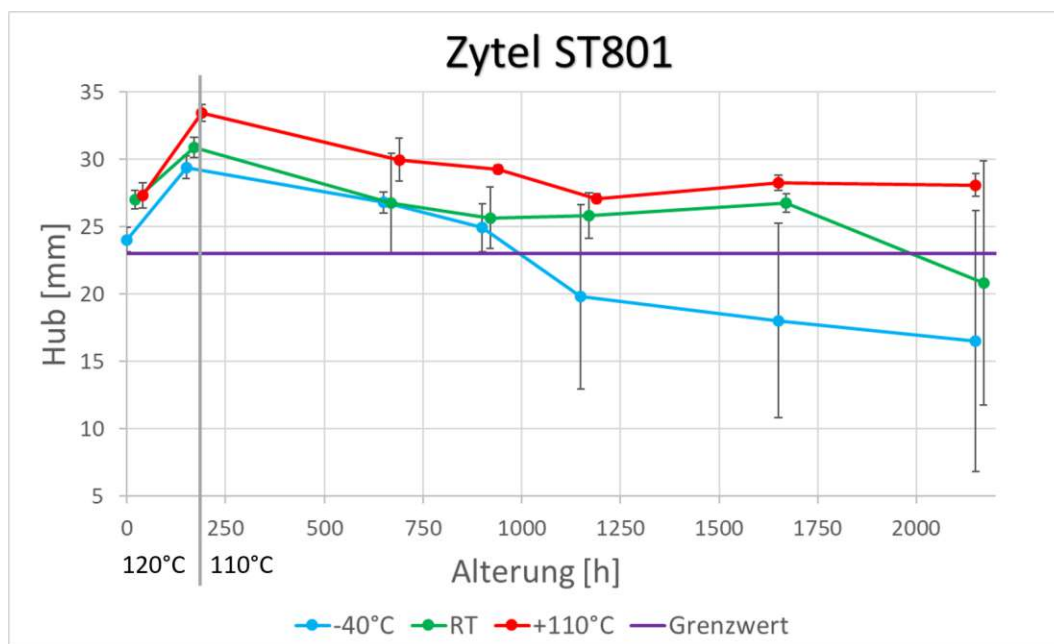


Abbildung 5.13.: Gemessene Leistungsanforderung bei PA66 - Zytel ST801 über den Zeitraum der Alterung hinweg

Teilaromatisches Polyamid - Zytel HTNFE 8200

Im Gegensatz zum anderen getesteten teilaromatischen Polyamid (siehe Kapitel 5.2.1) konnte Zytel HTNFE 8200 bei allen Temperaturen das Leistungskriterium erfüllen. Bei stichprobenartiger optischer Kontrolle wurde festgestellt, dass die bekannten Auswirkungen der Leistungsüberprüfung bei +110°C (siehe Kapitel 5.2) auch bei diesem Werkstoff auftreten.

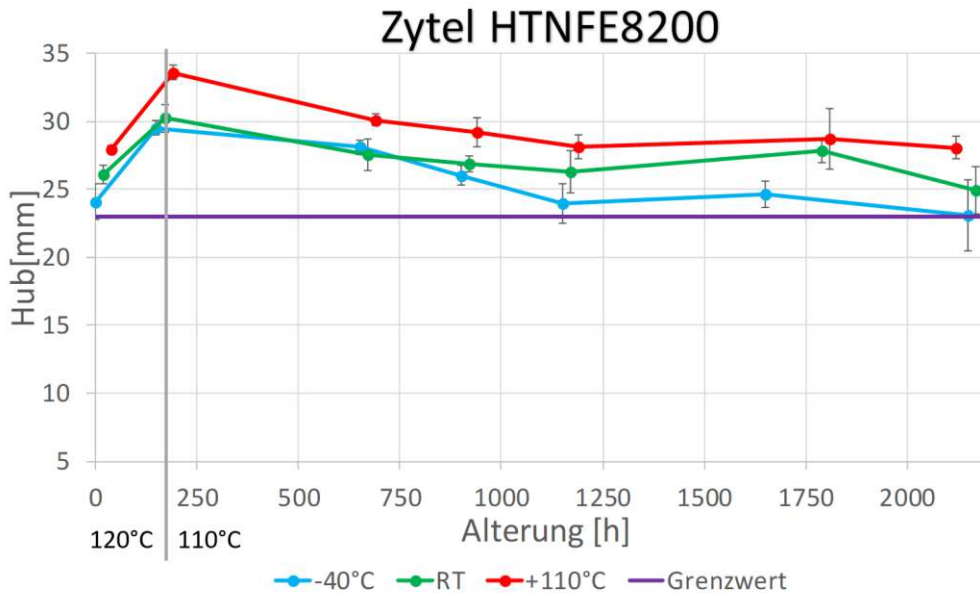


Abbildung 5.14.: Gemessene Leistungsanforderung bei PPA - Zytel HTNFE8200 über den Zeitraum der Alterung hinweg

Über den gesamten Zeitraum der Alterung konnte die Leistungsüberprüfung großteils positiv absolviert werden. Bei 150h 120°C und 2000h 110°C streuen die Ergebnisse etwas stärker und sind vereinzelt unterhalb der Leistungsgrenze.



Abbildung 5.15.: Intakter Kolbenaufsatz aus Zytel HTNFE8200 nach thermischer Alterung trotz Leistungsverlust

Optische Analysen der Kolbenaufsätze haben ergeben, dass dieser Leistungsverlust nicht auf Schäden am Kolbenaufsatz zurückzuführen ist. Dieser weist auch nach der gesamten Alterung keine Schäden auf. (siehe Abb. 5.15). Daraus ist zu schließen, dass der Leistungsverlust eine andere Ursache hat, welche in dieser Arbeit nicht näher betrachtet wird.

Thermoplastisches Polyurethan - Elastollan 794A 15 CS



(a) Versuchstemperatur +110°C



(b) Versuchstemperatur -40°C

Abbildung 5.16.: Schadensbild eines Kolbenaufsatzes aus TPU nach thermischer Alterung bei Leistungsüberprüfung

Das thermoplastische Polyurethan (kurz TPU) Elastollan 794A 15 CS wurde als temperaturstabilerer elastischer Kunststoff geprüft, da unbelastet alle Leistungsüberprüfungen positiv ausgefallen sind.

Schon nach einer Vorbelastung von 150h bei 120°C entsprechen die Tests bei -40°C und +110°C nicht mehr den Leistungsanforderungen (siehe Abb. 5.17), stichprobenartige optische Analysen haben ergeben, dass einzelne Kolbenaufsätze sehr stark beschädigt werden und dadurch der abgebildete Mittelwert stark abnimmt und die Streuung sehr groß ist. Sogar bei vollständig durchlaufener thermischer Alterung gab es noch einen aus fünf, welcher die Leistungsüberprüfung ohne Beschädigung positiv absolviert hat.

Die Schadensbilder können eindeutig Versagern bei +110° und -40° zugeordnet werden. Bei Hochtemperatur kommt es hauptsächlich zu großen aufgeschmolzenen Bereichen der Kolbenaufsätze (siehe Abb.5.16a). Bei Tieftemperaturtests kommt es zu Brüchen des Kolbenaufsatzes, wobei große Teile herausbrechen (siehe Abb. 5.16b). Eine punktuelle Überbelastung durch das Treibladungsgehäuse wäre denkbar und wird in einem Folgeprojekt behandelt.

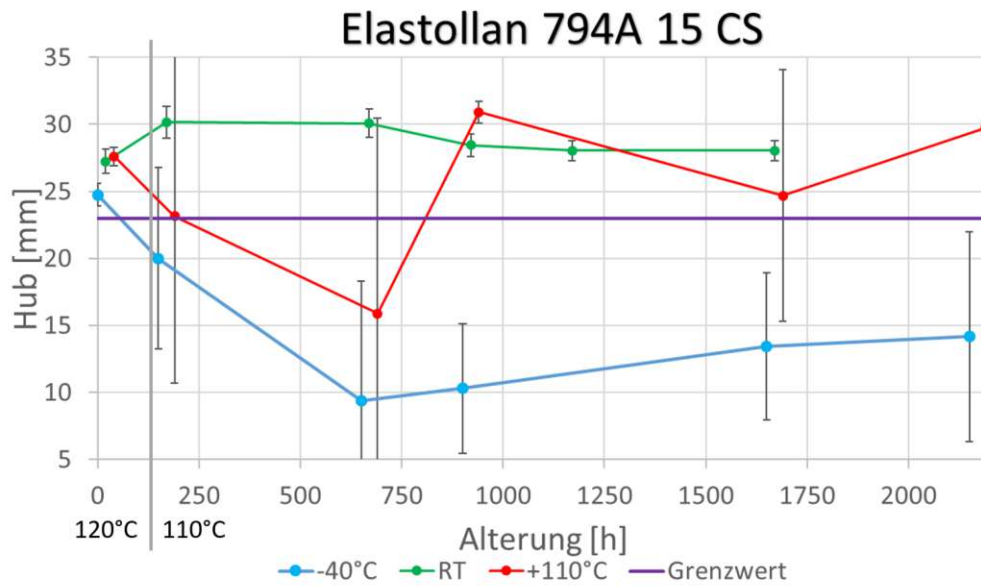


Abbildung 5.17.: Gemessene Leistungsanforderung bei TPU - Elastollan 794A 15 CS über den Zeitraum der Alterung hinweg

Thermoplastisches Polyester Elastomere - Hytrel 5556



Abbildung 5.18.: Gebrochener Kolbenaufsatz nach 150h bei 120°C bei Leistungsanforderung gemessen bei -40°C

Das thermoplastische Polyester Elastomere (kurz TPEE) wurde ebenso als temperaturstabiler elastischer Kunststoff gewählt. Die Leistungsüberprüfung zeigte bei Raumtemperatur einen Versager, dieser wurde jedoch nach weiteren Versuchen als Ausreißer eingestuft.

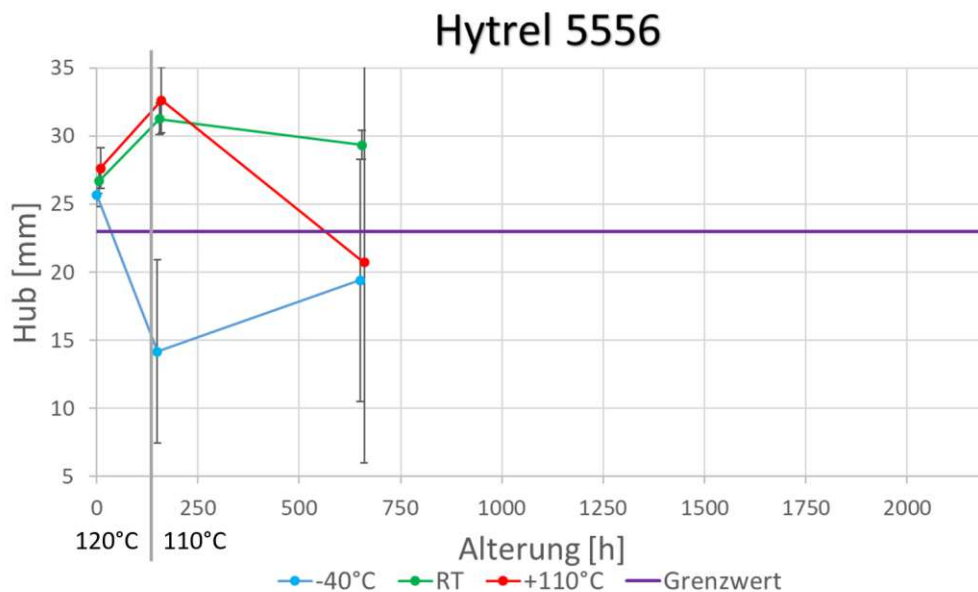


Abbildung 5.19.: Gemessene Leistungsanforderung bei TPEE - Hytrel 5556 über den Zeitraum der Alterung hinweg

Die thermische Alterung wurde aufgrund der Erfahrungen mit TPU (siehe Kapitel 5.2.2) nur inklusive 500h bei 110°C durchgeführt. TPEE hat allgemein bessere Ergebnisse als TPU geliefert. Dennoch ist nach einer Vorbelastung von 150h bei 120°C, die Leistungsüberprüfung bei -40°C negativ (siehe Abb 5.19). Das Schadensbild sind Risse, die teilweise einzeln und teilweise mehrfach auftreten (siehe Abb.5.18). Das zeigt sich auch in der recht großen Streuung der Ergebnisse.

Bei der Leistungsüberprüfung bei +110°C gab es nach 150h bei 120°C und 500h bei 110°C zwei Aktuatoren welche als Totalversager eingestuft werden müssen, dies spiegelt sich auch deutlich in dem verminderten Hub sowie der großen Streuung wieder.

Nachdem die Leistungsüberprüfung nur bei Raumtemperatur gut war, wurden keine weiteren Leistungsüberprüfungen mit diesem Werkstoff durchgeführt.

5.3. Rückstellkraft

Wie schon in Kapitel 3.3 beschrieben wurden mit den im Vorfeld bereitgestellten Kolbenaufsätzen Rückstellkraftmessungen durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Höhe der Rückstellkraft sehr stark von der Temperatur abhängig ist, bei welcher die Leistungsüberprüfung durchgeführt wird. Je kälter die Temperatur, desto höher ist die Rückstellkraft für alle Werkstoffe (siehe Abb.5.20). Bei -40°C sind die Werkstoffe durchwegs weniger elastisch (siehe Kapitel 5.4). Dadurch kann sich der Kolbenaufsatz bei der Leistungsüberprüfung weniger verformen, dies hat zur Folge, dass etwaige Unebenheiten im Rohr durch Verbrennungsrückstände einen größeren Effekt auf die Rückstellkraft haben.

Zwischen den meisten getesteten Werkstoffen konnte kein signifikanter Effekt festgestellt werden. Zwei Werkstoffe zeigen ein leicht abweichendes Verhalten. Polyketon (Akrotek PK VM 4774) weist bei allen Temperaturen eine signifikant höhere Rückstellkraft auf als die anderen Werkstoffe. Nachdem dieser Werkstoff „sehr schlechte“ Ergebnisse bei der Leistungsüberprüfung hatte (siehe Kapitel 5.2.1), wird er nicht weiter untersucht und sein Einfluss auf die Rückstellkraft wird nicht betrachtet.

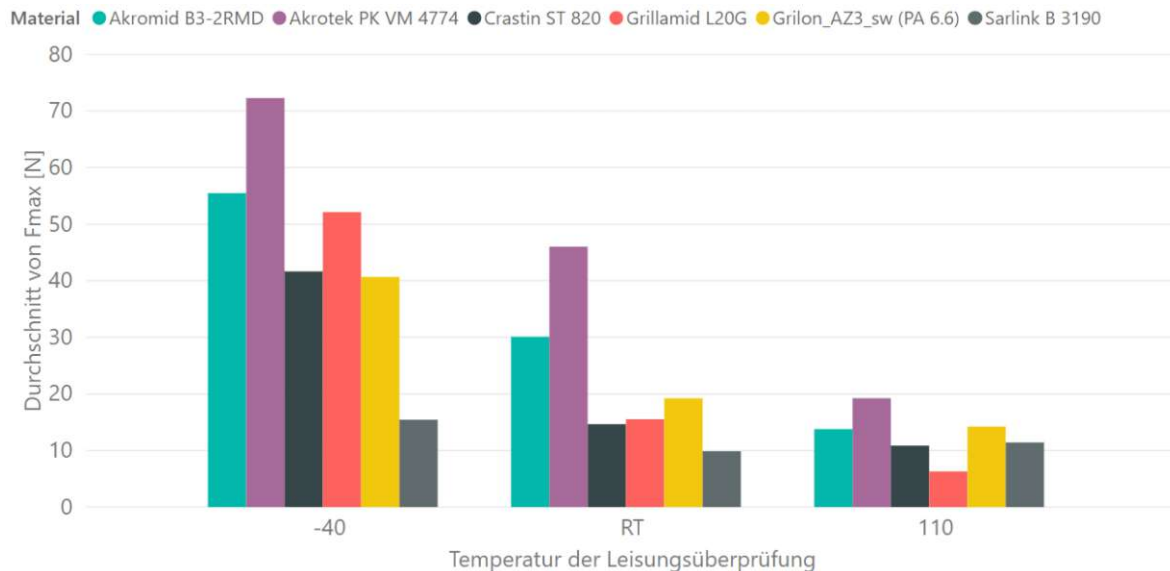


Abbildung 5.20.: Durchschnitt der Maximalwerte der benötigten Rückstellkräfte bei unterschiedlichen Werkstoffen bei unterschiedlicher Temperatur der vorhergehenden Leistungsüberprüfung

TPE mit PP Basis zeigt hingegen durchwegs niedrigere Rückstellkräfte. Dies deckt sich mit der Annahme, welche bei den unterschiedlichen Prüfbedingungen aufgestellt wurde, dass elastischere Werkstoffe eine geringere Rückstellkraft aufweisen.

Daraus wurde die Erkenntnis gewonnen, dass der Fokus im Zuge der Arbeit auf die Leistungsüberprüfung nach thermischer Alterung gelenkt wird, da die Rückstellkraft bei der Werkstoffauswahl keine große Auswirkung macht, es wurden aber auch einige temperaturstabile TPEs für weitere Untersuchungen ausgewählt.

5.4. Zugversuch

Messungen im Zugversuch wurden ungealtert bei Raumtemperatur und bei -40°C durchgeführt. Im gealterten Zustand wurden alle Prüfkörper bei -40°C getestet. Allgemein hat sich gezeigt, dass sich die gemessenen Werkstoffe wie erwartet bei -40°C spröder verhalten.

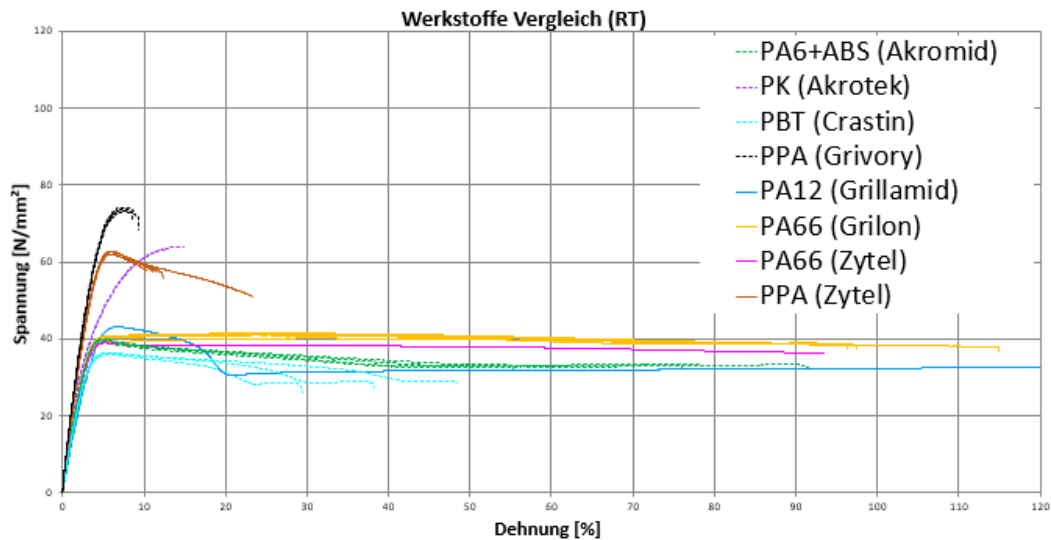


Abbildung 5.21.: Zugversuche der gemessenen Werkstoffe (ausgenommen TPEs) bei Raumtemperatur. Strichlierte Linie: Werkstoffe, welche die Leistungsüberprüfung ungealtert nicht bestanden haben - Durchgehende Linie: Werkstoffe, welche die Leistungsüberprüfung ungealtert bestanden haben

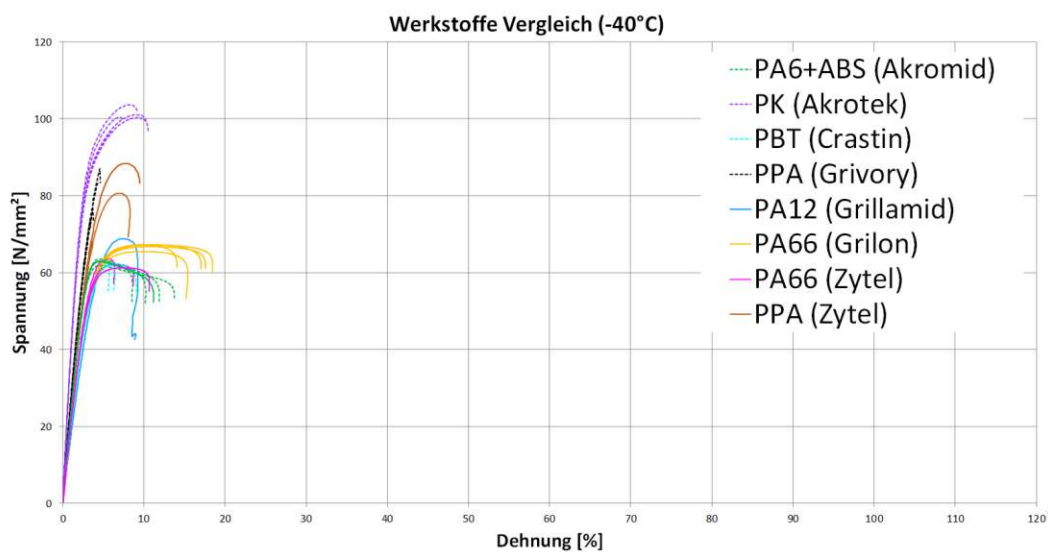


Abbildung 5.22.: Zugversuche der gemessenen Werkstoffe (ausnahme TPEs) bei -40°C. Strichlierte Linie: Werkstoffe, welche die Leistungsüberprüfung ungealtert nicht bestanden haben - Durchgehende Linie: Werkstoffe, welche die Leistungsüberprüfung ungealtert bestanden haben

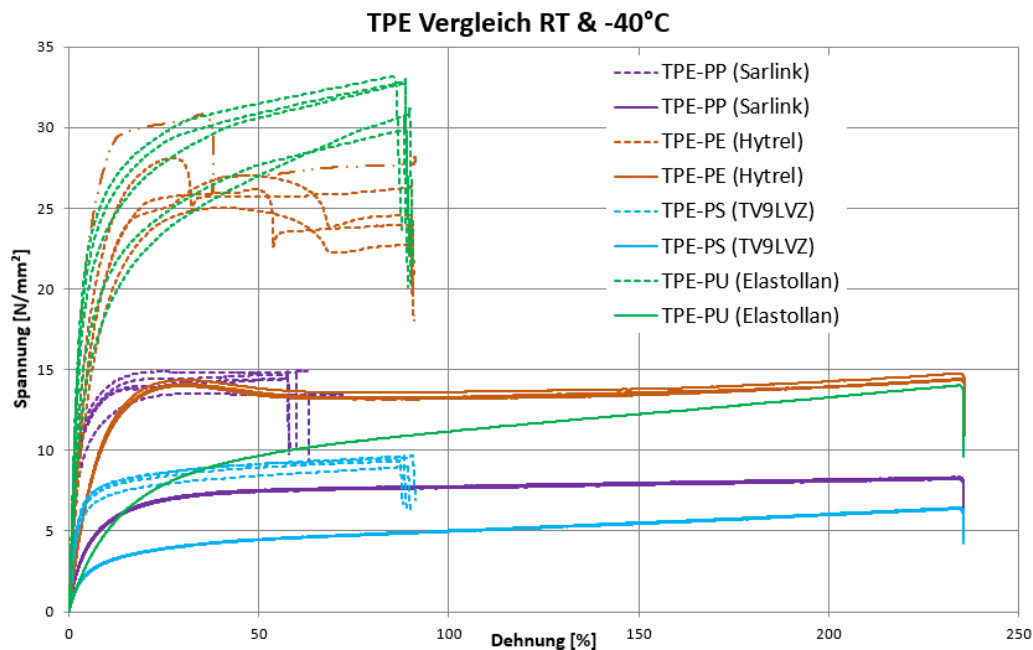


Abbildung 5.23.: Zugversuche der thermoplastischen Elastomere bei Raumtemperatur (durchgehende Linie) und bei -40°C (strichlierte Linie)

Es wurden alle Zugprüfungen innerhalb weniger Wochen durchgeführt. Ungealterte Zugprüfstäbe sind demnach nach dem Spritzguss einige Monate gelegen, bevor sie getestet wurden. Zugprüfkörper welche nach 150h bei 120°C getestet wurden sind in etwa 2-3 Monate nach der Alterung gelegen, bevor sie getestet wurden. Zugprüfkörper, welche 150h bei 120°C + 2000h bei 110°C gealtert wurden, sind nur 2-3 Wochen gelegen.

Tabelle 5.4.: Ergebnisse des Zugversuches bei -40°C ohne Alterung

Material	Streckspannung [N/mm ²]	Streckdehnung [%]	Bruchspannung [N/mm ²]	Bruchdehnung [%]
PA6+ABS	62,84	4,6	52,3	11,1
PK			98,8	8,7
PBT	62,83	6,03	53,79	7,2
PPA (Grivory)			68,77	7,8
PA12	43,1	6,9	kein Bruch	kein Bruch
PA6.6 (Grilon)	66,7	10,5	59,38	16,5
PA6.6 (Zytel)	62,28	6,5	56,30	8,5
PPA (Zytel)	84,30	6,1	72,62	7,0

5.4.1. Ungealterte Proben

In folgendem Kapitel werden die Zugversuche jener Werkstoffe beschrieben, welche bei der Leistungsüberprüfung ungealtert versagt haben. In Abb. 5.21 und Abb. 5.22 sind jene Werkstoffe, die die Leistungsüberprüfung ungealtert nicht bestanden haben, mit gestrichelter Linie gekennzeichnet.

Obwohl diese Werkstoffe alle gemeinsam haben, dass die Leistungsüberprüfung ungenügend war, sind die Spannungs-Dehnungsdiagramme sehr unterschiedlich. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tabelle 5.4 zu finden.

PA6+ABS - AkromidB3-23RMD

Dieser Werkstoff zeigt bei Raumtemperatur das Verhalten eines zähen Werkstoffes mit Streckgrenze (siehe Vergleich Abb. 3.8 und Abb. 5.21 bzw. Abb. 5.22). Die gemessenen Kennwerte stimmen mit jenen im Datenblatt etwa überein, obwohl deutlich schneller, mit 500mm/min statt mit 50mm/min, getestet wurde und demnach ein Anstieg der Zugspannung und ein Absinken der Bruchdehnung zu erwarten war. (siehe Kapitel 3.5)

Bei Raumtemperatur kommt es zu einer Einschnürung, welche sich über einen großen Bereich der Prüfkörper vollzieht. Die Bruchfläche zeigt, im Gegensatz zu anderen Brüchen mit vorangehender Einschnürung, wenig Verformung.

Bei der optischen Analyse der Zugprüfstäbe konnte festgestellt werden, dass drei von fünf Probekörpern bei Raumtemperatur kleine Einfallstellen aufweisen (siehe Anhang C.1). Nachdem diese keine Korrelation mit dem Ergebnis der Zugprüfung gezeigt haben wurden sie nicht aus der Betrachtung ausgenommen.

Bei -40°C ist die Bruchdehnung deutlich geringer, dies zeigt sich auch im makroskopischen Bruchverhalten, da die Einschnürung nur in einem kleinen Bereich lokal um den Bruch herum geschieht. Eine leichte Verfärbung der eingeschnürten Bereiche ist ebenfalls zu beobachten.

Zugprüfkörper bei -40°C zeigten keine der oben genannten Einfallstellen.

Polyketon - Aktrotek PK VM4774

Aufgrund der Anzahl der vorhandenen Prüfstäbe konnten bei Polyketon nur zwei Versuche bei Raumtemperatur durchgeführt werden. In diesen Messungen verhält sich Polyketon wie ein zäher Werkstoff ohne Streckpunkt (siehe Vergleich Abb. 3.8 und Abb. 5.22 sowie Abb. 5.21). Doch beide Zugprüfkörper zeigten an der Bruchfläche Löcher mit einer Größe von etwa 2mm Länge, somit sind diese beiden Messungen nicht aussagekräftig genug (siehe Anhang C.2).

Die Unterschiede in den Zugversuchen bei Raumtemperatur bzw. bei -40°C sind auch hier signifikant, dennoch fallen sie deutlich geringer aus, als bei anderen Werkstoffen. Makroskopisch sind keine Unterschiede der Brüche bei Raumtemperatur oder bei -40°C zu erkennen. Es kommt in keinem der beiden Fällen zu nennenswerten Einschnürungen oder anderen optischen Verformungen bevor es zum Bruch kommt. Der optischen Analyse nach handelt es sich trotz der recht zähen Spannungs-Dehnungskurve um einen

Sprödbbruch des Materials. Bei den Versuchen bei -40°C konnten optisch keine signifikanten Fehlstellen an der Bruchfläche eruiert werden.

Das Verhalten und die gemessenen Werte unterscheiden sich grundlegend von den Datenblattwerten. Laut Datenblatt sollte sich Polyketon PK VM4774 wie ein zäher Werkstoff mit Streckgrenze verhalten und eine Bruchdehnung von $>50\%$ haben.

Polybuthylentheraphtalat - Crastin ST820

Bei PBT sind die Unterschiede zwischen den Ergebnissen bei Raumtemperatur und jenen bei -40°C sehr stark ausgeprägt.

PBT verhält sich bei Raumtemperatur ähnlich dem PA6+ABS wie ein zäher Werkstoff mit Streckgrenze. Die Streckdehnung, sowie Streckspannung ist bei allen Prüfkörpern etwa gleich, doch die Bruchdehnung und Bruchspannung schwankt zwischen den einzelnen Messungen sehr stark.

Der Zugprüfkörper zeigt eine deutliche lokale Einschnürung und eine große Verformung an der Bruchfläche. Die Bruchfläche bei Raumtemperatur kann optisch mit einem Kaugummi verglichen werden. (siehe Anhang C.3)

Bei -40°C kommt es nach einer minimalen lokalen Einschnürung sofort zum Bruch, die Bruchflächen zeigen hier keine Verformung.

Die gemessenen Werte passen gut zu den angegebenen Werten im Datenblatt obwohl auch hier durch die schnelle Prüfung ein Verschieben der Werte zu erwarten war (siehe Kapitel 3.5). Der einzige Unterschied war, dass einige der Prüfkörper mit $>30\%$ eine geringere Bruchdehnung, als im Datenblatt mit $>50\%$ angegeben, aufweisen.

Thermoplastische Elastomere

Sowohl Sarlink B3190, als auch TV9LVZ konnten bei den Zugversuchen weder bei Raumtemperatur noch bei -40°C bis zum Bruch belastet werden (siehe Abb.5.23). Bei TPE mit PP Basis (Sarlink) tritt eine Einschnürung und dadurch etwas größere plastische Verformung ein, welche bei Raumtemperatur über den gesamten Probenkörper zu beobachten ist und bei -40°C deutlich lokaler auftritt. Im Gegensatz dazu ist die plastische Verformung bei TPE mit PS Basis (TV9LVZ) bei gleichen Prüfparametern etwas geringer (siehe Anhang C.4). Die Spannungs-Dehnungskurve zeigt bei beiden Materialien mit beiden Prüftemperaturen das Verhalten eines zähen Werkstoffes. Bei -40°C ist die Dehnung geringer, da die Prüfung aufgrund der beengten Klimakammer noch früher abgebrochen werden musste.

Da diese Werkstoffe aufgrund des Testequipments nicht bis zum Bruch getestet werden konnten, kann ein Vergleich mit den Datenblattwerten nicht erfolgen.

Teilaromatisches Polyamid (Grivory HT3Z)

Dieses teilaromatische Polyamid verhält sich bei -40°C der Spannungs-Dehnungskurve zufolge wie ein spröder Werkstoff (siehe Vergleich Abb. 3.8 und Abb. 5.21 bzw. Abb. 5.22). Bei Raumtemperatur ist der Werkstoff noch etwas zäher und es kann eine Streckgrenze festgestellt werden, die Dehnung ist dennoch sehr gering. Makroskopisch kommt

es zu keiner Einschnürung vor dem Bruch, die Bruchflächen zeigen ebenso spröde Bruchbilder.

Die Ergebnisse dieser Werkstoffe müssen infrage gestellt werden, da nur ein einziger Zugprüfstab keine Löcher in der Bruchfläche aufweist. (siehe Anhang C.5)

Trotz eindeutiger Fehlstellen in den meisten Zugprüfkörpern und einer schnelleren Prüfung im Gegensatz zu den Datenblattwerten zeigte sich gemessen eine höhere Bruchdehnung als spezifiziert. Da es bei diesem Werkstoff schon bei der Montage der Kolbenaufsätze zu Brüchen kam wurde kein weiterer Versuch gestartet um fehlerstellenfreie Probekörper zu spritzen.

5.4.2. Gealterte Proben

Als allgemeines Phänomen konnte festgestellt werden, dass alle getesteten gealterten Zugversuche (mit Ausnahme von den thermoplastischen Elastomeren) nach 150h bei 120°C eine Verfestigung im Gegensatz zu nicht gealterten aufweisen. Die weitere Temperaturbelastung bei +110°C zeigte über den gesamten Alterungsverlauf keine weitere mechanische Veränderung. (siehe beispielhaft an PA66 in Abb.5.24)

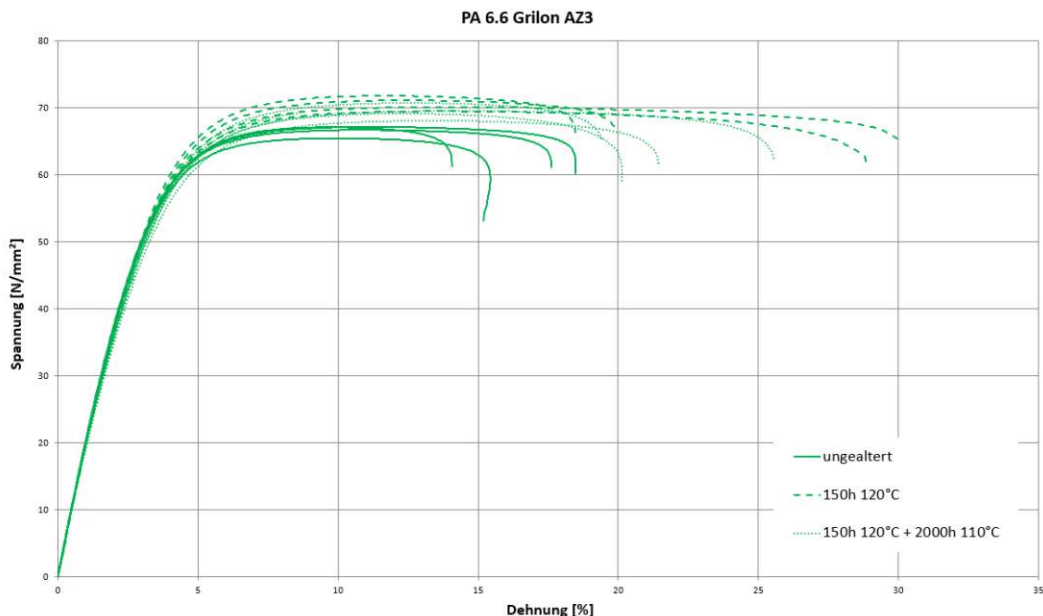


Abbildung 5.24.: Zugversuche von PA66 verschieden stark gealtert

Die Vermutung liegt nahe, dass es sich hierbei nicht um einen Trocknungsprozess handelt, da die gealterten Zugprüfkörper (150h bei 120°C) nach der Alterung noch einige Zeit (ca.2-3 Monate) im Büro gelegen sind und dadurch wieder Feuchtigkeit aufnehmen würden. Eine mögliche Ursache für die beobachtete Verfestigung können molekulare Änderungen wie zum Beispiel Nachkristallisation sein. In den DSC-Messungen der Kolbenaufsätze ist jedoch keine Nachkristallisation festgestellt worden.

Bei naturfarbenen Werkstoffen konnten durch die optische Verfärbung eine Alterung festgestellt werden. Andere optische Alterungen, unter anderem Rissbildung, konnten nicht festgestellt werden.

Polyamid 12

Im Gegensatz zu den Kolbenaufsätzen aus PA12 weisen die Zugprüfstäbe keine optisch erkennbaren Spritzfehler auf. Bei Raumtemperatur konnte aufgrund der Prüfkörperanzahl nur eine Messung durchgeführt werden, diese zeigte bis zur maschinell maximal erreichbaren Dehnung von ca. 230% keinen Bruch. Der Großteil der Verformung ist plastisch, es kommt zu einer Einschnürung über den gesamten Bereich. Bei -40°C ist eine Einschnürung nur lokal zu beobachten, die Bruchflächen weisen dennoch eine große Verformung auf. Die Streckdehnung ist in beiden Fällen etwa gleich und relativ gering, doch die Bruchdehnung ist um Größenordnungen verschieden. Bei der Messung bei Raumtemperatur kommt es nach der Streckspannung zu einem Spannungsabfall und anschließend zu einer sehr großen Dehnung bei konstanter Spannung. Bei Messungen bei -40°C kommt es unmittelbar nach dem Spannungsabfall zum Bruch.

Die Zugprüfstäbe zeigen im ungealterten Zustand eine weiße Färbung. Im Laufe der thermischen Alterung verfärbt sich der Werkstoff zu einem kräftigen Gelb, dies entspricht nach Tabelle 4.3 einer Alterungsstufe 1. Also einer starken Alterung. (siehe Anhang (Abb.C.6)) Die Kolbenaufsätze werden unter diesem Aspekt nicht untersucht, da dort schon im spritzfrischen Zustand Farbunterschiede vorhanden waren.

Streckdehnung und Streckspannung entsprechen auch hier trotz schneller Prüfung den Datenblattwerten. Bruchdehnung und Bruchspannung konnten nicht analysiert werden, da der Versuchsaufbau bei diesem Werkstoff bei Raumtemperatur keine Dehnung bis zum Bruch zulässt.

Polyamid 6.6

Die beiden getesteten PA6.6 weisen, wie schon bei der Dynamischen Differenzkalorimetrie, keine signifikanten Unterschiede auf (siehe Kapitel 5.6).

Bei Raumtemperatur ist die gemessene Bruchdehnung bei einer Größenordnung von 100%. Bei Messungen bei -40°C wird gerade einmal ein Fünftel davon erreicht. Diese Unterschiede sind auch optisch an den Prüfkörpern zu erkennen. Bei den Tests bei Raumtemperatur kommt es zu einer Einschnürung über einen großen Bereich der Probe. Bei Zytel ST801 ist der belastete Bereich durch die Verfärbung des Werkstoffes noch besser erkennbar. Bei Versuchen bei -40°C kommt es bei beiden Werkstoffen zu deutlich kleineren Dehnungen. Eine Einschnürung ist nur direkt am Bruch zu beobachten.

Die Bruchflächen selbst weisen in allen Fällen eine geringe Verformung auf. Ein Zugprüfstab des Werkstoffes Grilon AZ3 weist gealtert ein kleines Loch in der Bruchfläche von etwa 0.5mm Größe auf. Doch nachdem die Kurve des Zugversuches keine signifikanten Abweichungen zu den gleich behandelten anderen Proben aufweist, wurde die Messung trotzdem in die Auswertung mit einbezogen.

Bei Zytel ST801 haben drei Prüfkörper bei der Prüfung nach 150h bei 120°C bis zu 3mm lange Löcher (siehe Anhang C.7). Bei der Auswertung der Ergebnisse zeigt sich, dass die gemessene Bruchdehnung dadurch geringer ist.

Durch die Verfärbung im Laufe des Zugversuches ist deutlich zu erkennen, dass auch in anderen lokalen Bereichen des Zugprüfkörpers eine Dehnung stattfindet, bevor es an einer Stelle zum Bruch kommt.

Die Prüfkörper aus Zytel ST801 sind zu Beginn hellbeige und verfärben sich im Laufe der thermischen Alterung bräunlich. Damit können sie nach Tabelle 4.3 in die Alterungsstufe 2 eingeteilt werden. (siehe Anhang C.8) Aufgrund der schwarzen Färbung können bei Grilon AZ3 keine optischen Alterungserscheinungen zugeordnet werden.

Bei Grilon AZ3 entsprechen die gemessenen Werte trotz höherer Prüfgeschwindigkeit in etwa den Datenblattwerten, nur die Streckspannung sowie die Bruchspannung ist etwas geringer. Bei Zytel ST801 verhält sich der Werkstoff ebenfalls Datenblatt entsprechend, doch eine genauere Analyse der Werte ist nicht möglich, da nur ein Zugversuch bei Raumtemperatur gemacht werden konnte und dies keine statistische Aussage liefern kann.

Teilaromatisches Polyamid - Zytel HTNFE8200

Aufgrund des stark unterschiedlichen mechanischen Verhaltens, wird Zytel HTNFE8200 nicht gemeinsam mit dem ebenso teilaromatischen Polyamid Grivory HT3Z behandelt (siehe Kapitel 5.4.1).

Zytel HTNFE8200 verhält sich bei Raumtemperatur wie ein zäher Werkstoff mit Streckgrenze. Der Unterschied in der Streckspannung zwischen Zugversuchen bei Raumtemperatur und bei -40°C ist weniger markant als bei anderen Werkstoffen.

Die meisten Zugprüfkörper bei Raumtemperatur weisen Löcher an der Bruchfläche von der Größe von etwa 0.5mm-1mm Größe auf. In Abb. 5.21 ist deutlich zu erkennen, dass der Zugprüfstab ohne Lunker (mit strichpunktierter Markierung - Bruchflächen siehe Anhang C.9a und C.9b) eine fast doppelt so hohe Bruchdehnung aufweist, als jene mit Fehlstellen. Aufgrund der geringen Anzahl der fehlerlosen Zugprüfstäbe bei Raumtemperatur, kann dieses Ergebnis aber nicht eindeutig belegt werden.

Im Allgemeinen konnte bei -40°C festgestellt werden, dass sich hier der Werkstoff spröder verhält als bei Raumtemperatur und der Bruch kurz nach dem Erreichen der Streckgrenze eintritt.

Bei gealterten Probekörper nach 150h bei 120°C konnten zwei der fünf Probekörper festgestellt werden, welche Löcher aufwiesen, dieser waren mit einer Größe von etwa 0.5mm sehr klein und hatten keine signifikante Auswirkung auf die Messergebnisse. Ein Probekörper brach in der Einspannung und musste demnach aus der Analyse ausgeschlossen werden.

Nach vollständig durchlaufener Alterung gab es keine Lunker, doch es gab zwei Probekörper mit optisch identifizierbaren Inhomogenitäten. Bei der Analyse der Ergebnisse zeigte sich, dass diese Inhomogenitäten keinen Einfluss auf die Spannungs-Dehnungskurven haben. Dadurch wurden sie nicht aus der Auswertung ausgeschlossen.

Die Bruchflächen weisen durchwegs eine geringe Verformung auf, dennoch unterscheiden sie sich im Einzelnen stark voneinander. Bei Raumtemperatur kommt es zu lokaler Einschnürung im Bereich des Bruches. Die Bruchfläche weist ein bis mehrere Bruchausgänge aufgrund von unterschiedlichen Inhomogenitäten (Lunker, Verunreinigungen) auf. Im Gegensatz zu anderen Werkstoffen kommt es bei Zytel HTNFE8200 auch bei -40°C zu einer den Versuchen bei Raumtemperatur sehr ähnlichen Einschnürung (bei jenen Prüfkörpern, welche in der Spannungs-Dehnungskurve eine Streckgrenze zeigen). Einige der Prüfkörper weisen jedoch einen Sprödbbruch auf, dies zeigt sich sowohl in dem Spannungs-Dehnungsdiagramm, als auch an der Bruchfläche. Aufgrund der geringen Prüfkörperzahl kann dieses Phänomen nicht genauer betrachtet werden, da sowohl gealterte als auch ungealterte Prüfkörper beide Versagensarten aufweisen.

Thermoplastische Elastomere

Die beiden thermoplastischen Elastomere, welche die ungealterte Leistungsüberprüfung positiv bestanden haben waren Elastollan 794A 15 CS (Polyurethanbasis) und Hytrel 5556 (Polyesterbasis) (siehe Kapitel 5.2.2). Von diesen Werkstoffen wurden auch Zugprüfkörper gealtert und getestet. Bei TPEs kommt es allgemein weder im gealterten noch im ungealterten Zustand zum Bruch.

TPE mit Polyurethanbasis

Elastolan 794A 15CS verhält sich wie ein elastomerer Werkstoff. Bei -40°C ist die gesamte Verformung elastisch, nach Entlasten der Zugprüfkörper nehmen all diese Prüfkörper wieder die Ausgangsgröße an. Bei Versuchen bei Raumtemperatur bleibt nach der Entlastung eine geringfügige plastische Verformung über. Eine eindeutige Einschnürung kann aber auch hier nicht beobachtet werden, vielmehr kommt es zu einer Streckung am gesamten Prüfkörper. Das mechanische Verhalten ändert sich durch die Alterung nicht, optisch kann dennoch eine Alterung festgestellt werden. Bezieht man sich auf die optische Beurteilung der Alterung an die Beurteilungskriterien nach Tabelle 4.3, ist Elastolan nach 150h bei 110°C schwach gelb und entspricht demnach einer Alterungsstufe 3 und nach zusätzlichen 1000h bei 110°C kräftig gelb und demnach mit Alterungsstufe 1 stark gealtert.

TPE mit Polyesterbasis

Eine Ausnahme zeigt ein Prüfstab, welcher bei einer thermischen Alterung von 150h bei 120°C zeitgleich mit dem Abschalten der Maschine, aufgrund des Endes des Prüfweges, gebrochen ist (siehe Abb. 5.23 strich punktierte Linie). Nachdem die Alterung mit diesem Werkstoff schon mit den Aktuatoren unterbrochen wurde, wurden die Zugprüfstäbe nicht weiter der gesamten Alterung ausgesetzt und es gibt keine Werte zu einer thermischen Alterung von 150h bei 120°C + 2000h bei 110°C . Im Allgemeinen verhält sich der Werkstoff wie ein zäher Werkstoff mit Streckgrenze. Bei Versuchen bei -40°C ist der Anstieg der Spannung bei gleicher Dehnung viel größer als bei Raumtemperatur. Des

weiteren fällt auf, dass die Streuung bei -40°C deutlich größer ist als bei Raumtemperatur, wo alle gemessenen Kurven exakt übereinanderliegen. Bei allen Prüfmethoden kommt es zu einer großflächigen Einschnürung im Probekörper. Bei Raumtemperatur zieht sich diese Einschnürung über die gesamte Probe. Bei -40°C ist nur ein Teilbereich der Probe von der Einschnürung betroffen, nachdem die erreichbare Dehnung bei den beiden Temperaturen verschieden groß ist, ist anzunehmen, dass die Unterschiede in der Einschnürung auf das Testequipment zurückzuführen sind. Die Beurteilung der Vergilbung zeigt nach der Alterung bei von 150h bei 120°C nur eine leichte Gelbfärbung und ist somit in die Alterungsstufe 4 einzuordnen. Das zeigt, dass nur eine leichte Alterung auftritt, die Leistungsüberprüfung konnte nach dieser Alterung dennoch nicht positiv abgeschlossen werden (siehe Kapitel 5.2.2)

5.5. Kerbschlagbiegeversuch

Die Prüfkörper der Kerbschlagbiegeversuche wurden aus den gespritzten Standardprüfkörpern (Typ 1) herausgeschnitten. Wie auch im Zugversuch sichtbar (siehe Kapitel 5.4) zeigten einige der Prüfkörper Lunker. Befindet sich ein Lunker in der Nähe der Kerbe, so kann dieser zusätzlich zur Kerbe den Werkstoff, aufgrund der geringeren realen Breite, schwächen. Aus diesem Grund sind alle nachfolgenden Ergebnisse als Richtwert zu sehen und können nicht für Werkstoffcharakterisierung herangezogen werden.

Kerbschlagbiegeversuch im ungealterten Zustand

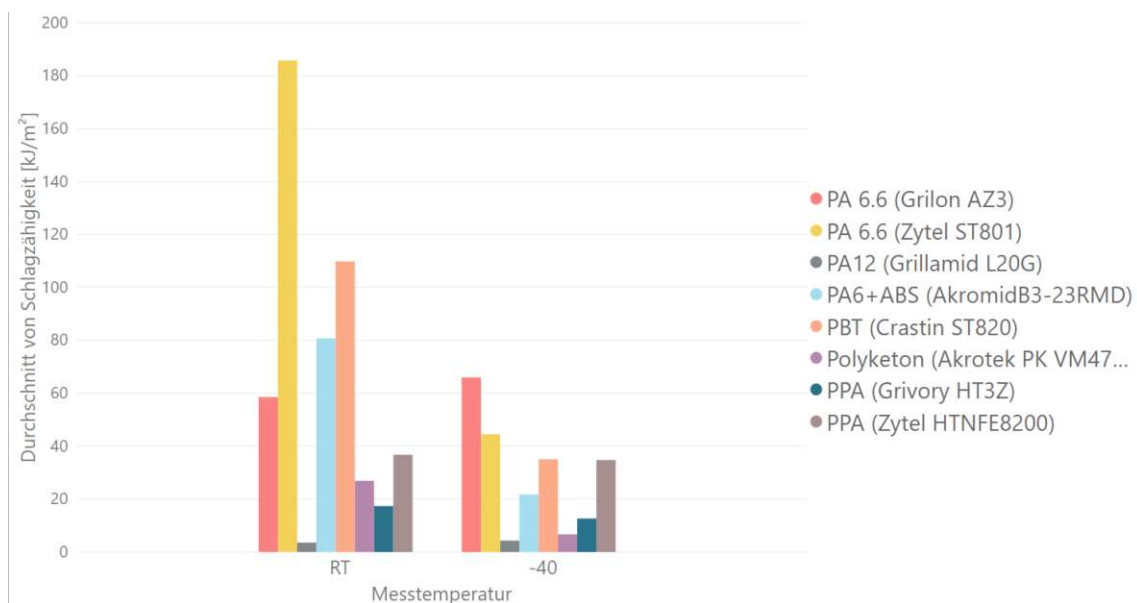


Abbildung 5.25.: Durchschnittswerte beim Kerbschlagbiegeversuch bei Raumtemperatur bzw. bei -40°C

Betrachtet man die getesteten thermoplastischen Elastomere, zeigt sich nur zum Teil ein Anreißen von der Kerbe ausgehend. Sowohl ungealtert als auch nach vollständiger thermischer Belastung von 150h bei 120°C + 2000h bei 110°C konnte bei keiner der Prüftemperaturen (-40°C, -30°C, RT) ein Bruch festgestellt werden. Dies zeigt, dass diese Werkstoffe sowohl gealtert, als auch ungealtert eine sehr hohe Kerbschlagzähigkeit aufweisen.

Vergleicht man die gemessene Kerbschlagzähigkeit der getesteten Werkstoffe im ungealterten Zustand miteinander, fällt wie erwartet ein deutlicher Unterschied zwischen den Messungen bei -40°C sowie bei Raumtemperaturmessungen auf. (siehe Abb.5.25) Einzelne Werkstoffe wie PA 12, PA6.6 (Grilon AZ3) und PPA (Zytel HTNFE 8200) weisen einen geringen Unterschied in der Kerbschlagzähigkeit abhängig von der Prüftemperatur auf. Bei den getesteten thermoplastischen Elastomeren ist der Unterschied nicht gegeben, da diese weder bei Raumtemperatur noch bei -40°C gebrochen sind. In beiden Fällen hat der Hammer sie durch den gegebenen Spalt durchgezogen und die Probekörper waren nur geknickt und hatten keine Risse.

Betrachtet man die Messungen bei Raumtemperatur stechen die Werkstoffe PA6.6 (Zytel ST801), PBT und PA6+ABS mit Kerbschlagzähigkeiten von $\geq 60 \text{ kJ/m}^2$ heraus. Den geringsten Wert zeigt PA 12 mit 3.5 kJ/m^2 . Des weiteren zeigt sich, dass die beiden getesteten PA6.6, welche jeweils einen anderen Schlagzähmodifikator haben, einen großen Unterschied aufweisen. Während Zytel ST801 herausragend gute Werte bei Raumtemperatur liefert, liegt Grilon AZ3 hierbei nur im Mittelfeld und weist dafür bei -40°C die größte Kerbschlagzähigkeit aller Werkstoffe auf. Bei allen anderen Prüfungen zeigten diese beiden Werkstoffe viel geringere Unterschiede.

Die erwartete Tendenz, dass Werkstoffe mit geringer Kerbschlagzähigkeit im Produkt bei der Leistungsüberprüfung schlechter performen, konnte nicht nachgewiesen werden. PA6+ABS zeigt trotz guter Kerbschlagzähigkeit ein schlechtes Ergebnis und im Gegensatz dazu wurden mit PA 12 trotz geringer Kerbschlagzähigkeit alle ungealterten Leistungsüberprüfungen positiv absolviert. (siehe Kapitel 5.2) Die Festigkeit und Zähigkeit eines Werkstoffes hängt von der Art der Beanspruchung ab [36]. Dieses Ergebnis zeigt somit, dass die Belastung bei der Kerbschlagprüfung nicht der Belastung in Anwendungssituation entspricht.

Wie schon bei den Kerbschlagbiegeversuchen welche bei Raumtemperatur durchgeführt wurden, kann auch bei -40°C Testtemperatur eine geringe Kerbschlagzähigkeit nicht mit einem schlechtem Ergebnis in der Leistungsüberprüfung korreliert werden. Ebenso umgekehrt, bei guten Kerbschlagzähigkeiten kommt es nicht nur zu guten Ergebnissen in der Leistungsüberprüfung.

Thermische Alterung von Kerbschlagbiegeproben

Die Messungen der thermisch gealterten Kerbschlagbiegeversuchsproben erfolgte nach 150h bei 120°C, weitere Messzeitpunkte waren bei zusätzlichen 750h bzw. 1000h und nach voller Alterung bei 2000h bei 110°C bei jeweils -40°C Prüftemperatur.

Aufgrund einer Fehleinstellung der Messparameter wurden einzelne Messungen mit einer geringeren Stützweite (40mm statt 62mm) durchgeführt. Hierbei handelt es sich

überwiegend um jene Proben, welche die volle thermische Alterung (150h bei 120°C + 2000h bei 110°C) durchlaufen haben. Aufgrund der geringen Stützweite ist die notwendige elastische Verformung um durchgezogen zu werden höher, da ein geringerer Abstand vorhanden ist. Dadurch wird ein Sprödbbruch bevorzugt und somit ist dieser Prüfaufbau kritischer.

Wenn zwei gleiche Messungen mit unterschiedlichem Auflageabstand betrachtet werden (siehe Abb.5.26) zeigt sich, dass der größere Auflageabstand mit höheren Werten der Schlagzähigkeit einhergeht. Die untenstehenden Vergleiche wurden jeweils unter gleichen Bedingungen durchgeführt.

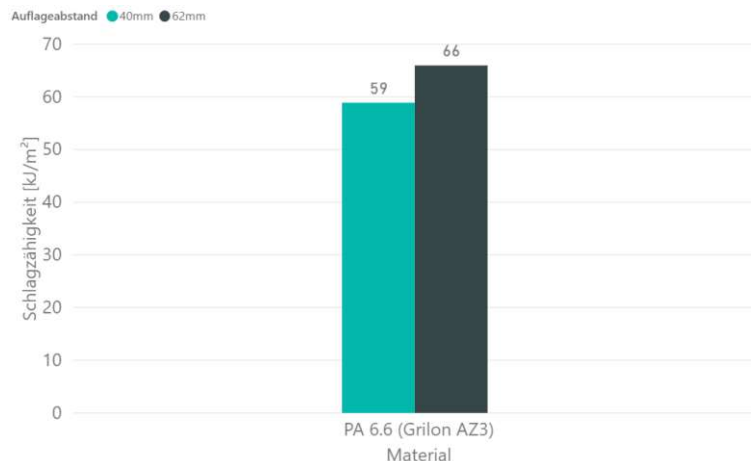


Abbildung 5.26.: Durchschnittswerte beim Kerbschlagbiegeversuch bei -40°C mit unterschiedlichem Auflageabstand

Es zeigte sich, dass mit Ausnahme von Zytel HTNFE8200 (PPA) und Grillamid L20G (PA12) keine signifikante Änderung der Kerbschlagzähigkeit über die thermische Alterung festzustellen war. PA 6.6 (Grilon AZ3) schwankt in einem Bereich von $\pm 6.5\%$. Eine zeitliche Tendenz ist der Schwankung nicht zuzuordnen. Das gleiche gilt für PA 6.6 (Zytel ST801) hierbei ist nur die Schwankung mit $\pm 10.5\%$ etwas größer. Diese Schwankungen sind auf den Mittelwert bezogen, die einzelnen Messungen untereinander schwanken etwa im gleichen Ausmaß.

Bei PPA Zytel HTNFE8200 zeigt sich, dass schon im ungealterten Zustand bei -30 und -40°C unabhängig von der eingestellten Stützweite einzelne Messungen eine Kerbschlagzähigkeit von $\geq 5 \text{ kJ/m}^2$ aufweisen. Das Bruchbild ist hierbei ein glatter gerader Bruch von der Kerbe ausgehend durch den Prüfkörper. Dieses Phänomen tritt im Laufe der Alterung verstärkt auf. In den anderen Fällen bricht der Prüfkörper in mehreren Ebenen und hat zum Teil bis zu 30-fache Schlagzähigkeiten. (siehe Anhang Abb. D.1)

Bei Grillamid L20G ist ein anderes Phänomen erkennbar, hier werden im Laufe der Alterung vermehrt einzelne Messungen mit höherer Schlagzähigkeit festgestellt, hier ist der Unterschied nur ein Faktor 4. Das Bruchbild verhält sich aber ähnlich, auch hier ist zu sehen, dass bei geringen Werten der Kerbschlagzähigkeit ein gerader Schnitt durch die

Probe beobachtet wird und bei höheren Messwerten die Bruchlinie verwinkelt verläuft. (siehe Anhang Abb. D.2)

Nachdem die Verteilung der verschiedenen Bruchmechanismen über die thermische Alterung hinweg nicht signifikant ist, kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei diesen beiden Werkstoffen verarbeitungsbedingte Probleme zu den großen Unterschieden führen. Es konnten jedoch keine Fehlstellen direkt den Bruchmechanismen zugeordnet werden.

Da aus den Messungen und den Literaturwerten dennoch klar wird, dass dieser Werkstoffversuch das Verhalten im Produkt nicht widerspiegeln kann, wurden keine neuen Probekörper gespritzt, um die Möglichkeit der Spritzgussprobleme auszuschließen.

5.6. Dynamische Differenzkalorimetrie

Die Messprogramme der dynamischen Differenzkalorimetrie sind in Kapitel 3.6 beschrieben. Vereinzelt wurden auch gealterte Kolbenaufsätze geprüft um eine etwaige Nachkristallisation oder grobe chemische Alterung ausschließen zu können.

Bei den meisten Werkstoffen konnte zwar der Schmelzvorgang beim Aufheizen mit etwaiger Nachkristallisation, sowie der Kristallisationsvorgang beim Abkühlen analysiert werden, doch die Glasübergangstemperatur konnte in den meisten Fällen nicht gemessen werden. Um die Glasübergangstemperatur bestimmen zu können müssten weitere Messungen mit unterschiedlichen Einwaagemengen und Heizraten gemacht werden.

Die Abkühlgeschwindigkeit von 3K/min ist eine langsame Abkühlung, dadurch können alle Werkstoffe bestmöglich kristallisieren. Die etwas breitere Form des Kristallisationspeak zeigt auch, dass es zu einer Erstarrung ohne Unterkühlung kommt. Bei schlagartigem Freiwerden der Kristallisationswärme wäre dieser Peak deutlich schmaler. [34]

Der erste Aufheizvorgang zeigt bei einzelnen Werkstoffen einen kleinen endothermen Effekt mit einem Peakmaximum bei etwa 60°C, da dieser nur ungealtert und im ersten Aufheizvorgang auftritt könnte es sich hierbei um etwaige Additive wie Entformungshilfsmittel oder ähnliches handeln. Dafür spricht, dass ein endothermer Peak unter anderem durch Verdampfen entstehen kann [32] und die Ursache für die Wärmestromänderung beim zweiten Aufheizen sichtlich nicht mehr vorhanden ist. Nachdem die theoretisch vollständige Kristallisation einiger Materialien nicht bekannt ist, kann die prozentuale Kristallinität nicht berechnet werden. Durch die Form und Höhe des Schmelzpeaks wird vergleichend analysiert wie kristallin einzelne Werkstoffe im Gegensatz zu den anderen Werkstoffen sind.

Bei PA6+ABS (Akromid) und PBT (Crastin) gibt es nur geringe Unterschiede in den DSC-Kurven zwischen erstem und zweitem Aufheizen (siehe Abb.5.27). Beim ersten Aufheizen zeigt sich kurz vor dem Schmelzpeak eine leichte Rekristallisation. Nachdem dieser Effekt nur beim ersten Aufheizen auftritt ist er der thermischen Vorgeschichte des Kolbenaufsatzes zuzuschreiben. [22]

Betrachtet man die DSC-Kurve des zweiten Aufheizvorganges von Akromid (Abb.5.27 grüne Kurve) kann die für den amorphen Kunststoff ABS typische endotherme Wärmestromänderung mit zwei Maxima zwischen 100°C und 150°C [28] identifiziert werden. Die Glasübergangstemperatur von PA6 (nach Literaturwerten bei ca. 75°C [12] [50]) scheint

in der durchgeführten Messung nicht auf. Die gemessene Schmelztemperatur entspricht mit einem Wert von 217°C in etwa der im Datenblatt (siehe Anhang A) gegebenen Schmelztemperatur von 220°C.

Die Glasübergangstemperatur von PBT (Abb.5.27 blaue Kurve) ist im Datenblatt nicht gegeben, laut Literatur liegt die Glasübergangstemperatur bei etwa 60°C [9]. Eine Stufe in der DSC-Messung bei etwa dieser Temperatur konnte somit der Glasübergangstemperatur zugeordnet werden.

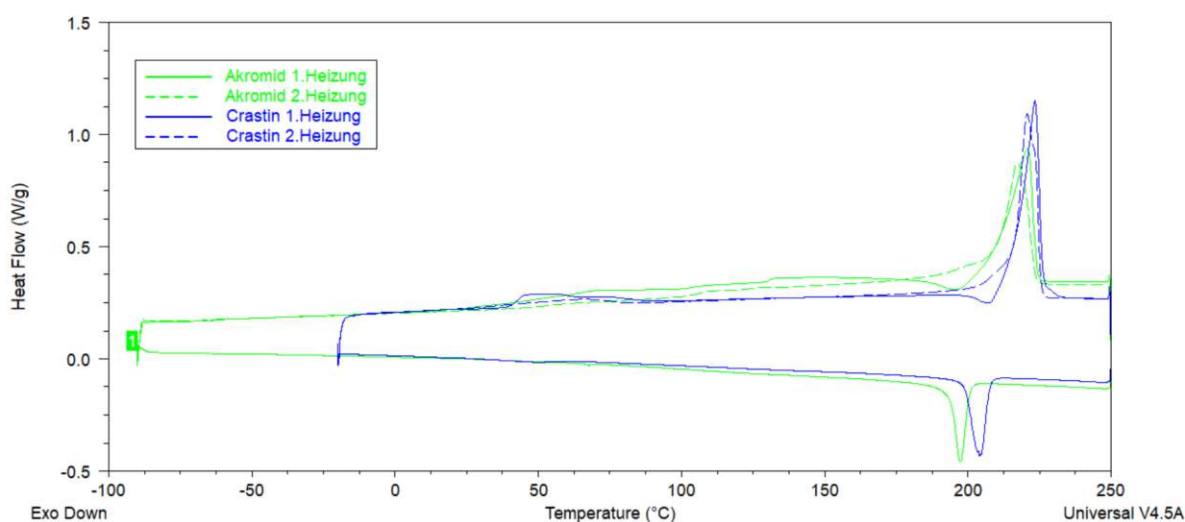


Abbildung 5.27.: Beide Aufheizkurven der DSC Messungen von PA6+ABS (Akromid) sowie PBT (Crastin)

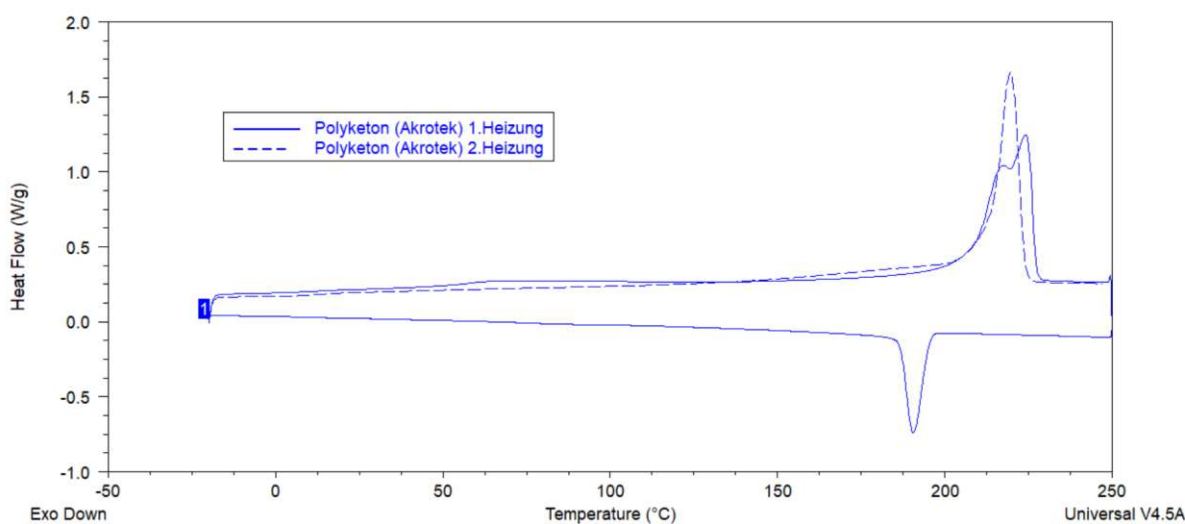


Abbildung 5.28.: Beide Aufheizkurven der DSC Messungen von Polyketon (Akrotek)

Die gemessene Schmelztemperatur schwang je nach Vorgeschichte zwischen 220°C und 224°C und entspricht somit ebenso in etwa der im Datenblatt gegebenen Temperatur von 225°C. (siehe Anhang A)

Im Gegensatz zu den bisher diskutierten Werkstoffen zeigt Polyketon beim ersten Aufheizen einen Doppelppeak (siehe Abb.5.28). Da die zweite Aufheizung nur einen Peak zeigt ist dieser Effekt der thermischen Vorgeschichte durch den Spritzgussprozess zuzuschreiben. Es ist anzunehmen, dass dieser Effekt auf unterschiedliche Kristallorientierungen [22], hervorgerufen durch das Abkühlprofil im Spritzgussprozess, zurückzuführen ist. Die Fläche unter dem Schmelzpeak, welche proportional zur Kristallisation ist, ist bei beiden Aufheizvorgängen etwa gleich. Die Kristallisation tritt bei etwa 190°C ein und verläuft ohne Unterkühlung. [34]

Thermoplastische Elastomere

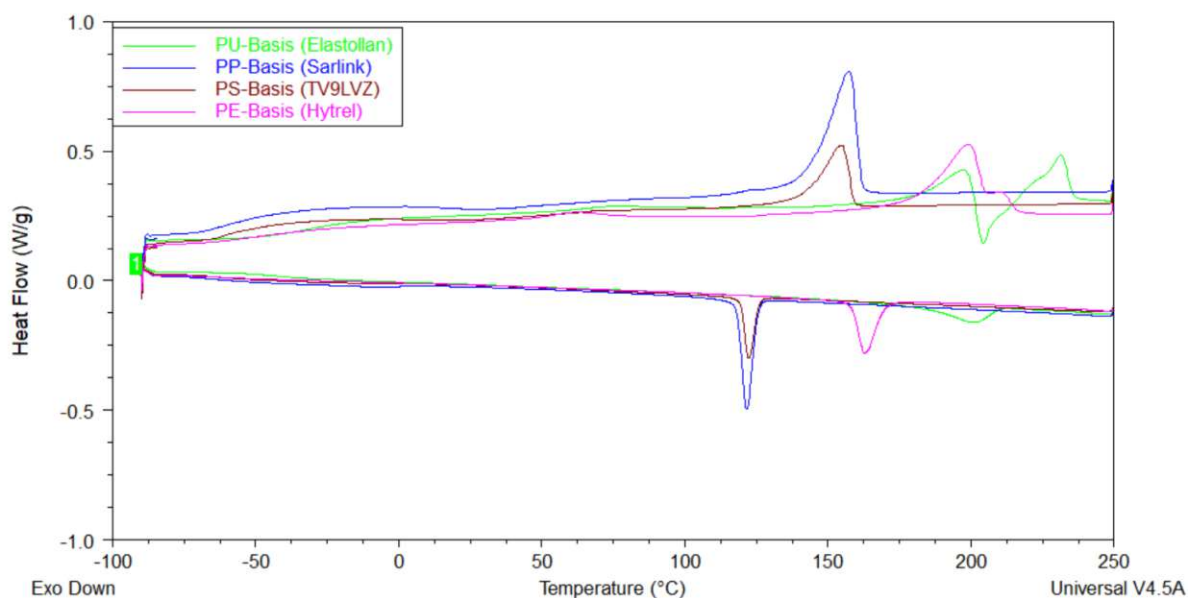


Abbildung 5.29.: Erster Aufheizvorgang DSC Messungen unterschiedlicher thermoplastischer Elastomere

Die Starttemperatur für die unterschiedlichen elastischen Werkstoffe betrug -90°C. Obwohl diese Werkstoffe bei der Leistungsüberprüfung ähnliches Verhalten zeigen (siehe Kapitel 5.2) sind die gemessenen DSC Kurven stark unterschiedlich (siehe Abb.5.29). Nur die Schmelztemperaturen sind sehr ähnlich.

TPE auf PS-Basis (TV9LVZ - Abb.5.29 braune Kurve)) und TPE auf PP Basis (Sarlink B3190 - Abb.5.29 blaue Kurve) haben eine Schmelztemperatur von unter 160°C. Obwohl TV9LVZ zum Beispiel in den Datenblättern als temperaturstabil bis 140°C geführt wird (siehe Anhang A). Diese Werkstoffe zeigten bei der Leistungsüberprüfung im ungealterten Zustand negative Ergebnisse (siehe Kapitel 5.2.1).

Die beiden anderen TPEs mit der Basis Polyurethan (Abb.5.29 grüne Kurve) bzw. Polyester (Abb.5.29 rosa) haben eine Schmelztemperatur von etwa 200°C (siehe Anhang A). Diese Werkstoffe absolvieren die Leistungsüberprüfung ungealtert positiv.

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen TPEs sind hauptsächlich im Kristallisationsverhalten zu finden.

Bei Sarlink B3190 (blau) ist der Kristallinitätsunterschied zwischen den beiden Aufheizvorgängen deutlich zu erkennen (siehe Anhang B.2). Die größere Fläche unter der Kurve bedeutet, dass mehr Energie notwendig ist um den Werkstoff aufzuschmelzen, die Kristallinität ist demnach wie erwartet bei langsamer Abkühlung (3K/min) größer. Die kristallinen Bereiche haben mehr Zeit zum Wachsen. Doch schon nach dem Spritzguss (erstes Aufheizen) ist Sarlink im Gegensatz zu den anderen gemessenen TPEs stärker kristallin, dies zeigt sich in der Schmelzkurve. Sarlink tendiert generell zu einer stärkeren Kristallisation, dass sieht man beim Abkühlen in der Kristallisation, welche bei gleicher Temperatur wie bei TV9LVZ auftritt, aber größer ist.

Betrachtet man die Kristallisation bei der Abkühlung ist das Polyurethan (Elastollan 794A 15CS - grün) in Relation wenig kristallin. Ein weiteres Phänomen sticht bei diesem Werkstoff bei dem Aufschmelzvorgang hervor. Beim ersten Aufheizvorgang kommt es zu zwei vollständig separierten Schmelzpeaks. Thermoplastisches Polyurethan wird als Blockpolymer betrachtet und besteht aus thermodynamisch inkompatiblen Bereichen [55]. Durch diese separaten Bereiche können die vollständig separierten Schmelzpeaks hervorgerufen werden. Beim zweiten Aufheizvorgang lassen sich zwei überlagerte Schmelzbereiche erkennen, welche aber ein gemeinsames Maximum haben. Durch das langsame Abkühlen bilden sich demnach ganz andere kristalline Strukturen als durch die Verarbeitung mittels Spritzguss.

Der Schmelzpeak von TPE mit PE Basis (Hytrel 5556 - rosa) besteht aus mehreren Teilpeaks, die Position der Teilpeaks bleibt bei den Aufheizvorgängen gleich. Die Höhe der Teilpeaks ist abhängig von der thermischen Vorgeschichte des Werkstoffes. Diese Form ist für diesen Werkstoff in anderen Literaturwerken ebenfalls zu finden [47].

Polyamide

Es wurden die Polyamide PA6.6, PA12, sowie teilaromatische Polyamide untersucht. Von PA6.6 sowie von teilaromatischen Polyamiden wurden jeweils zwei verschiedene Werkstoffe getestet und analysiert. Die DSC-Kurven sind in Abb. 5.30 dargestellt.

Polyamid 6.6 (Abb.5.30 grüne und rosa Kurve)

Bei den beiden PA6.6 konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Die beobachteten Wärmestromänderungen über die Zeit zeigten sowohl beim ersten (Vorgeschichte + Werkstoff) als auch beim zweiten Aufheizen (Werkstoff) keine werkstoffspezifischen Abhängigkeiten (siehe Abb.5.30 und Anhang B.3). Der unterschiedliche Schlagzähmodifikator hat demnach keinen Einfluss auf das thermische Verhalten der Probe.

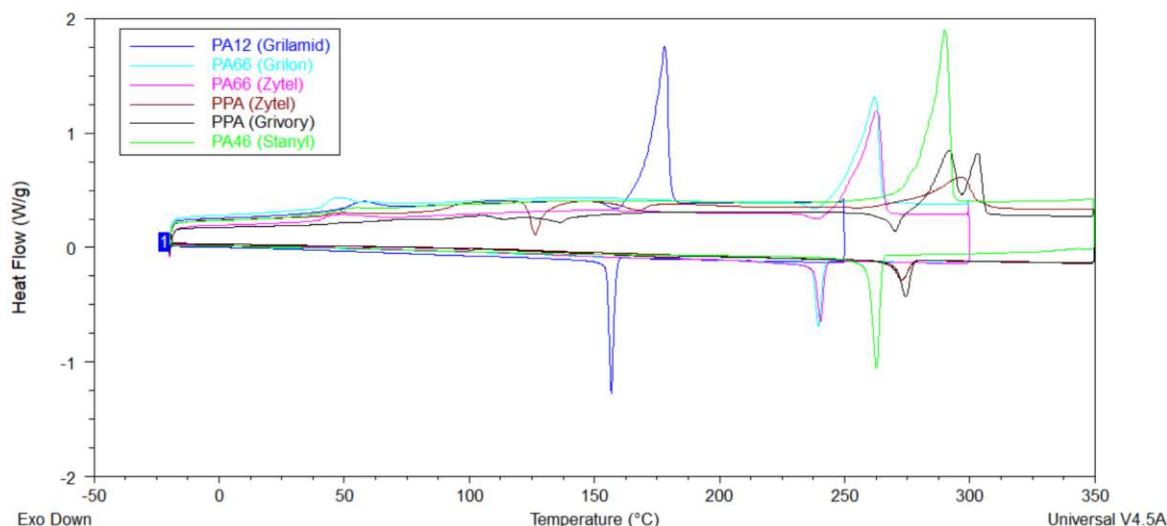


Abbildung 5.30.: Erste Aufheizkurve der DSC Messungen unterschiedlicher Polyamide

Dies zeigt sich auch im Kapitel 5.2, denn auch in der Leistungsüberprüfung zeigen diese beiden Werkstoffe ein sehr ähnliches Verhalten, wenn von Bindenahtfehlern, welche durch Spritzgussoptimierung noch verbessert werden könnten, abgesehen wird. Bei etwa 240°C zeigt sich eine geringe Rekristallisation (exothermer Effekt) bevor dann alle kristallinen Teile aufschmelzen. Eine Schmelztemperatur von 262°C konnte eruiert werden. Beim zweiten Aufheizen zeigen sich zwei überlagerte Schmelzpeaks (siehe Anhang B.3). Zu solchen Doppelpeaks kommt es, wenn während des Schmelzverlaufes ein Schmelz-, Rekristallisations- und erneuter Schmelzprozess aufeinander folgen. Die Höhe der Peaks verhält sich proportional zu der Kristallisationstemperatur der Kristalle. [37]

Polyamid 12 (Abb.5.30 blaue Kurve)

Aufgrund der unterschiedlichen Färbungen der gespritzten Kolbenaufsätze und der daraus resultierenden Annahme, dass diese auf Temperaturunregelmäßigkeiten während des Spritzprozesses zurückzuführen sind, wurden Proben für DSC-Messungen aus unterschiedlich gefärbten Kolbenaufsätzen entnommen. Die Ergebnisse der DSC-Messung zeigen keinen signifikanten Unterschied, welcher auf eine abweichende thermische Vorgeschichte schließen lassen könnte. (siehe Anhang B.1)

Bei etwa 160°C kommt es auch hier, wie schon bei anderen Werkstoffen zu beobachten war, zu einer leichten Rekristallisation, bevor es bei etwa 178°C zum Aufschmelzen der Kristalle kommt. Je nach Behandlungstemperatur kommt es zu verschiedenen Kristallmodifikationen [56]. Beim zweiten Aufheizvorgang sind zwei voneinander getrennte Schmelzpeaks zu beobachten, welche auf die unterschiedliche Kristallmodifikation zurückzuführen sind.

Polyphthalamide (Abb.5.30 braune und schwarze Kurve)

Es wurden zwei unterschiedliche Polyphthalamide untersucht (siehe Kapitel 4.2.1). Die Schmelztemperatur ist gemessen mit 292°C und 299°C sehr ähnlich. Bei beiden Werkstoffen zeigen sich in der Aufheizkurve zwei kleine exotherme Effekte oberhalb von 100°C. Diese Effekte können auf eine Rekristallisation während des Aufheizvorganges zurückgeführt werden. Aus der Fläche der Kurve lässt sich ablesen, dass dieser Effekt bei Zytel HTNFE8200 deutlich größer ist. Grivory HT3Z weist dafür kurz vor dem Schmelzpeak einen weiteren exothermen Rekristallisationspeak auf. Es ist anzunehmen, dass aufgrund der relativ kalten Verarbeitung für diese Werkstoffklasse die Kristallisation bei dem Abkühlvorgang im Werkzeug nicht vollständig erfolgen kann und eine deutlichere Rekristallisation als bei anderen Werkstoffen auftritt.

Betrachtet man die Größe des Schmelzpeaks bei der zweiten Aufheizphase, zeigt sich, dass der Schmelzpeak von Grivory HT3Z eine größere Fläche aufweist. Das bedeutet, dass der Werkstoff kristalliner ist. Obwohl die Schmelztemperatur in etwa die gleiche ist, zeigt der Schmelzpeak eine deutlich abweichende Form. Während Zytel HTNFE8200 einen breiten runden Peak aufweist, zeigt Grivory einen schmalen spitzen Peak. Wie in Kapitel 3.6 ist die Breite des Schmelzpeaks von den unterschiedlichen Lamellendicken abhängig. Somit ist zu erkennen, dass Grivory HT3Z bei gleicher Temperaturbehandlung eine gleichmäßigere Lamellendickeverteilung aufweist.

Beim Abkühlvorgang tritt die Kristallisation beider Werkstoffe bei einer Temperatur von etwa 273°C ein, bei diesem Effekt ist klar ersichtlich, dass bei Zytel HTNFE8200 im Gegensatz zu Grivory HT3Z deutlich weniger Kristallisationsenergie frei wird, demnach der Kristallisationsgrad ebenfalls geringer ausfällt.

Polyamid 4.6 (Abb.5.30 grüne Kurve)

Polyamid 4.6 wurde im Zuge der ergänzenden Untersuchungen eingeführt. In der DSC Messung fällt auf, dass Stanyl sowohl einen sehr großen Schmelzpeak, als auch einen großen Kristallisationspeak aufweist und demnach kristalliner ist als die anderen Polyamide mit ähnlichen Schmelztemperaturen.

5.7. Thermogravimetrie

Wie in Kapitel 5.31 beschrieben sind nur einzelne Werkstoffe mittels TGA untersucht worden. Es galt herauszufinden wie sich die beiden untersuchten teilaromatischen Polyamide durch Füllstoffe unterscheiden. Zusätzlich wurde noch das Referenzmaterial aus PA6.6 (Grilon AZ3) gemessen. Um möglichst anwendungsnah zu bleiben, wurde unter Luftatmosphäre geprüft. Weder zwischen den unterschiedlichen teilaromatischen Polyamiden, noch im Vergleich mit PA6.6 konnte ein Unterschied festgestellt werden. Ab etwa 400°C kommt es zu einer schlagartigen Zersetzung, wobei der Werkstoff sich sofort bis auf wenige Prozent zersetzt. Ein weiterer Zersetzungsschritt läuft überlappend ab. (siehe Abb.5.31)

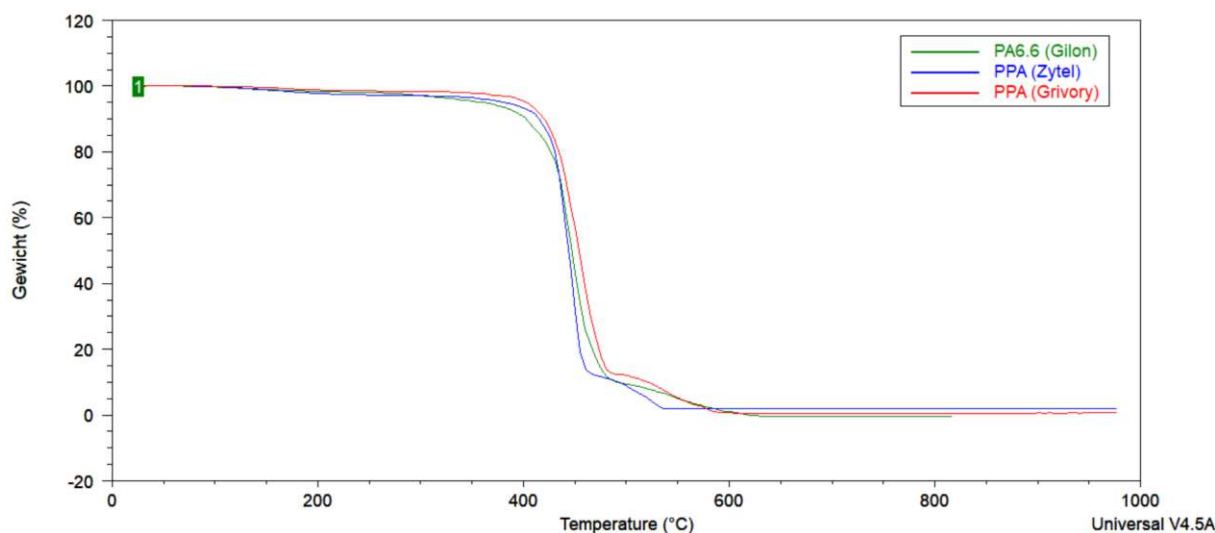


Abbildung 5.31.: TGA Messungen von PA6.6 (Grilon) sowie PPA (Zytel und Grivory)

Um die beiden Effekte möglichst zu trennen um eine bessere Interpretation möglich zu machen könnte man die Messungen mit anderen Prüfparametern (zb.: langsamere Heizrate oder isotherme Methode) wiederholen ([34]) Nachdem dieser Effekt jedoch bei allen drei Werkstoffen gleichermaßen auftritt wird das in dieser Arbeit nicht näher betrachtet. In zukünftigen Untersuchungen kann auch durch die thermogravimetrische Analyse von gealterten Proben der Abbau der Werkstoffe im Laufe der Alterung eruiert werden.

5.8. Ergänzende Untersuchungen

In folgendem Abschnitt werden einzelne Werkstoffe kurz beschrieben, die anhand der Erkenntnisse aus oben beschriebenen Versuchen zusätzlich untersucht wurden, da sie in einzelnen Eigenschaften dem Polyphtalamid Zytel HTNFE 8200 ähnlich sind. Bei diesen Werkstoffen wurden nur einzelne ausgewählte Untersuchungen durchgeführt.

Polyamid 4.6 wurde aufgrund der ähnlich guten Temperaturstabilität und dem hohen Schmelzpunkt gewählt. Der Aufbau von PA 4.6 ist zwar dem Aufbau von PA 6.6 sehr ähnlich, unterscheidet sich jedoch in der Anzahl der Amidgruppen pro Kettenlänge und hat eine größere Symmetrie. Dies führt zu einer besseren Kristallisation und einem höheren Schmelzpunkt von etwa 295°C. Es wurden Aktuatoren für die Leistungsüberprüfung aufgebaut und es zeigte sich, dass besagte Kolbenaufsätze schon bei der Montage gebrochen sind.

Da das gering kristalline Polyphtalamid (Zytel HTNFE 8200) sehr gute Ergebnisse geliefert hat und die weiteren Werkstoffe mit ähnlich guter Hitzestabilität schlechte Ergebnisse geliefert haben, wurde ein amorphes Polyamid (Grillamid TR90) untersucht, dessen Glasübergangstemperatur mit etwa 155°C etwa der Glasübergangstemperatur von Zytel HTNFE 8200 entspricht.

Die Vorversuche sind mit dem amorphen Polyamid Grillamid TR90 positiv verlaufen. Zusätzlich wurde, um Erfahrungswerte zu sammeln eine beschleunigte thermische Belastung umgerechnet nach Arrhenius [53] mit einigen Aktuatoren durchgeführt. Der Beschleunigungsfaktor ist der Treibladung entsprechend berechnet worden, diese Berechnung ist nicht Teil dieser Arbeit. Alle getesteten Aktuatoren haben nach dieser beschleunigten thermischen Alterung die Leistungsüberprüfung positiv absolviert. Aufgrund der geringen Anzahl an Tests können diese Ergebnisse nur als Anhaltspunkt für weitere Untersuchungen betrachtet werden, da statistisch gesehen keine Sicherheit garantiert werden kann.

6. Conclusio

6.1. Zusammenfassung

Produktbezogen

Bei der Leistungsüberprüfung (siehe Kapitel 5.2) wird durch das Auslösen des Akutators ein Gewicht beschleunigt. Durch den in dieser Arbeit diskutierten Kolbenaufsatz wird die Dichtheit erreicht, um die notwendige Energie zu bündeln. Die Messung der wirkenden Temperatur auf den Kolbenaufsatz im Zuge der Leistungsüberprüfung mittels Temperaturmesslack brachte kein Ergebnis. Durch Versuche (siehe Kapitel 5.1) konnte keine geeignete Stelle auf dem Kolbenaufsatz gefunden werden, an welcher der Lack während der thermischen Belastung eine ausreichende Haftfestigkeit aufweist. Aufgrund mangelnden Informationsgewinnes wurde der Versuch abgebrochen.

Durch die Bauteiluntersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Rückstellkraft bei thermoplastischen Elastomeren geringer ausfällt, als bei Thermoplasten. Der Unterschied zwischen den jeweiligen Thermoplasten ist aber sehr gering. Nachdem keiner der thermoplastischen Elastomere der thermischen Alterung standhalten konnte, gibt es für die Werkstoffauswahl in Bezug auf die Rückstellbarkeit keine Präferenzen.

Bei der Leistungsüberprüfung zeigte sich, dass einige der getesteten Werkstoffe bei definierter Sollbruchstelle im Treibladungsgehäuse brechen, doch bei einem homogenen Berstboden im Treibladungsgehäuse keine Schäden aufweisen. Das zeigt, dass durch die definierten Sollbruchstellen der Kolbenaufsatz punktuell belastet wird.

Bei der Leistungsüberprüfung über die gesamte Lebensdauerprüfung (verkürzt durchlaufen mit erhöhten Temperaturen (150h120°C + 2000h110°C)) zeigte sich, dass der Werkstoff Zytel HTNFE8200 die besten Ergebnisse liefert. Zytel HTNFE8200 hat drei besondere Eigenschaften. Es ist ein teilaromatisches Polyamid und besitzt somit sowohl aliphatische als auch aromatische Bausteine. Die Schmelztemperatur liegt durch die höhere Bindungsenergie bei knapp 300°C. Des Weiteren haben die Ergebnisse der DSC-Messungen gezeigt, dass Zytel HTNFE8200 im Gegensatz zu den anderen gemessenen Werkstoffen eine relativ geringe Kristallinität aufweist.

Aufgrund der ersten vielversprechenden Ergebnisse von Zytel HTNFE8200 wurde schon im Zuge der ersten Versuchsreihe ein weiteres teilaromatisches Polyamid (Grivory HT3Z) getestet. Hierbei zeigte sich, dass die Eigenschaften dieses Werkstoffes unzureichend waren, da es vermehrt schon bei der Montage zu Brüchen kam. (siehe Kapitel

5.2.1)

Die anderen beiden herausstehenden Eigenschaften von Zytel HTNFE 8200 wurden mit anderen Werkstoffen (siehe Kapitel 5.8) abgetestet. Es galt dadurch zu untersuchen, welche Werkstoffeigenschaften ausschlaggebend für die positive Absolvierung der Bauteilüberprüfung sind.

Werkstoffanalyse

Durch die DSC-Messungen aller getesteter Werkstoffe konnten die jeweiligen Schmelztemperaturen ermittelt werden. Die Glasübergangstemperaturen konnte nur in einzelnen Fällen eruiert werden. Allgemein zeigt sich, dass die meisten Werkstoffe vor dem Schmelzvorgang eine geringe Rekristallisation aufweisen.

Im Bezug auf die Schmelztemperatur musste festgestellt werden, dass die im Datenblatt angegebene Hitzestabilität (bei TV9LVZ 140°C) zum Teil nur sehr knapp unterhalb der Schmelztemperatur (bei TV9LVZ 155°C) ist (siehe Kapitel 5.2.1). Diese Angabe kann nicht als Grundlage für die Temperaturbeständigkeit im Produkt gewählt werden, da in der Leistungsüberprüfung (wenn auch nur für einige Millisekunden) die Oberfläche des Kolbenaufsatzes einer erhöhten Temperatur ausgesetzt ist. Bei der Leistungsüberprüfung bei +110°C kann besagter Werkstoff seine Schmelztemperatur erreichen bzw. überschreiten und dadurch seine Formstabilität verlieren.

Das Werkstoffverhalten im Zugversuch konnte der Performance in der Leistungsüberprüfung großteils zugeordnet werden. Je spröder der Werkstoff, desto eher versagt dieser in der Leistungsüberprüfung. Nur zwei Werkstoffe (PA6+ABS (Akromid) und PBT (Crastin)) weisen trotz zähen Verhaltens ein negatives Ergebnis auf. Bei -40°C zeigen beide Werkstoffe im Zugversuch trotz Einschnürung eine geringe Verformung an der Bruchfläche. Diese lokal geringe Verformung könnte im Beschuss zu lokaler Überbelastung und in weiterer Folge zum Bruch führen. Die Ergebnisse der Zugversuche (siehe Kapitel 5.4) zeigten, dass die Zugprüfkörper trotz gesamter thermischer Belastung und zum Teil völligen Versagens im Bauteil, keine signifikanten mechanischen Unterschiede zwischen gealtertem und ungealtertem Zustand zeigten. Eine mögliche Ursache hierfür ist, dass die verwendeten Standardprüfkörper mit einer Dicke von 4mm deutlich dicker als das Bauteil waren. Nachdem die thermooxidative Alterung von der Bauteildicke abhängig ist, können dadurch die Zugprüfstäbe geringere Alterungserscheinungen aufweisen, als der Kolbenaufsatz bei identer Behandlung [33]. Des weiteren besteht die Möglichkeit, dass der spröde Effekt durch die Prüftemperatur bei -40°C stärker hervortritt als die Versprödung durch eine thermische Belastung.

Da es sich im Produkt um eine schlagartige Beanspruchung handelt, wurde als Prüfmethode der Schlagbiegeversuch nach Charpy ausgewählt. Aufgrund der Ergebnisse aus Vorversuchen wurde entschieden, dass gekerbte Proben untersucht werden. Außerdem wurde ein größerer Hammer (25kN), als in der Norm für die Prüfung empfohlen, gewählt. Bei den ungealterten Versuchen unterschiedlicher Werkstoffe (siehe Kapitel 5.5) konnte kein direkter Zusammenhang zwischen Versagen im Bauteil und einer geringen Kerb-

schlagzähigkeit festgestellt werden. Die Versuche mit gealterten Kerbschlagbiegeproben zeigten, dass die Alterung auch nach gesamter durchlaufener thermischer Belastung nur in geringem Maß bei einzelnen Werkstoffen sichtbar waren. Eine Korrelation zwischen der Verschlechterung der Kerbschlagbiegewerte und dem Versagen im Produkt konnte auch hier nicht eindeutig festgestellt werden. Daraus resultiert, dass der Schlagbiegeversuch nach Charpy keine fundierte Aussage über die Einsatzfähigkeit eines gewählten Werkstoffes im Produkt liefern kann.

Einzelne Werkstoffe wurden mittels TGA Messungen untersucht, um einen möglichen Abbau beigemengter Additive zu untersuchen. Diese Messungen brachten für den Anwendungsfall keine weiteren Erkenntnisse.

6.2. Interpretation

Aufgrund der außergewöhnlichen Werkstoffanwendung in der Leistungsüberprüfung durch die extrem kurze, dafür umso stärkere Belastung, ist die Bauteilprüfung die beste Möglichkeit um die Erfüllung der Anforderungen abzutesten.

Der Erfolg der ungealterten Leistungsüberprüfung kann durch das mechanische Verhalten in der Spannungs-Dehnungskurve angenähert werden. Der Kerbschlagbiegeversuch hingegen konnte nicht mit den Bauteilversuchen korreliert werden.

Die Werkstoffänderung durch die thermische Belastung bei der Alterung konnte durch keine der genormten Prüfungen gemessen werden, zeigte sich jedoch in der Bauteilprüfung stark.

Es gibt somit keine Möglichkeit ohne Bauteilprüfung eine Werkstoffauswahl zu treffen, welche die obigen Anforderungen erfüllt.

Da je Werkstoff nur eine Spritzgießcharge getestet wurde sind die Erkenntnisse dieser Arbeit in der Annahme getätigt, dass der Spritzgussprozess von allen Kolbenaufsatzwerkstoffen dem Werkstoff entsprechend bestmöglich durchgeführt wurden. Eine Interpretation möglicher Spritzgießeinstellungen war nicht Teil dieser Arbeit.

6.3. Weiterführende Untersuchungsmöglichkeiten

Aus den Erkenntnissen der Ergebnisse der Untersuchungen (siehe Kapitel 5.2) und der daraus resultierenden ergänzenden Untersuchungen (siehe Kapitel 5.8) zeigte sich, dass für die Anwendung im Produkt eine geringe Kristallinität von Vorteil ist.

Doch im Zuge der Arbeit konnte das Verhalten der wenig kristallinen Werkstoffe nicht genau analysiert werden, da nur wenige amorphe Werkstoffe bzw. Werkstoffe geringer Kristallinität untersucht wurden.

Für weiterführende Untersuchungen wäre es demnach möglich noch weitere wenig kristalline oder amorphe Polyamide zu untersuchen. Andere Polymerwerkstoffe mit geringer Kristallinität wie Polysulfon oder Polycarbonat sind ebenso in tiefergehenden Untersuchungen zu behandeln, um die Wirkung der geringen Kristallinität im Produkt zu

verstehen.

Nachdem Standardprüfkörper bei keinem der Werkstoffe dem Produkt entsprechende Ergebnisse geliefert haben, kann empfohlen werden kleinere (dünnere) Prüfkörper wie zum Beispiel Typ A13 aus DIN EN ISO 20753 zu nehmen, um ähnliche Abmessungen wie im Bauteil selbst untersuchen zu können.

Des weiteren sollten gealterte Prüfkörper zusätzlich zum Worst-Case bei -40°C auch bei Raumtemperatur überprüft werden. Dadurch kann auch eine geringere Versprödung, welche bei einer Prüftemperatur von -40°C womöglich nicht messbar hervortreten würde, dennoch untersucht werden.

A. Datenblätter

PA6 – Polyamide 6 PA6 + ABS

AKROMID® B3 2 RM-D schwarz (3255)

Zug-E-Modul

2000 MPa

1 mm/min

ISO 527-2

Streckspannung

47 MPa

50 mm/min

ISO 527-2

Charpy Schlagzähigkeit

n.b.

23°C

ISO 179-1/1eU

AKROMID® B3 2 RM-D schwarz (3255) ist ein unverstärktes, UV-stabilisiertes Polyamid 6 mit verringerter Feuchtigkeitsaufnahme

Typische Anwendungsgebiete

Spritzgussteile für den Interieur- und Exterieurbereich in der Automobilindustrie.



Mechanische Eigenschaften

Zug-E-Modul (1 mm/min ISO 527-2)	
trocken	2000 MPa
konditioniert	1100 MPa
Streckspannung (50 mm/min ISO 527-2)	
trocken	47 MPa
konditioniert	30 MPa
Streckdehnung (50 mm/min ISO 527-2)	
trocken	3,5 %
konditioniert	15 %
Bruchdehnung (50 mm/min ISO 527-2)	
trocken	> 50 %
konditioniert	> 100 %
Biege-E-Modul (2 mm/min ISO 178)	
trocken	2100 MPa
Normbiegespannung RP 3,5 (2 mm/min ISO 178)	
trocken	70 MPa
Charpy Schlagzähigkeit (23°C ISO 179-1/1eU)	
trocken	n.b.
konditioniert	n.b.
Charpy Schlagzähigkeit (-30°C ISO 179-1/1eU)	
trocken	n.b.
konditioniert	n.b.
Charpy Kerbschlagzähigkeit (23°C ISO 179-1/1eA)	
trocken	60 kJ/m ²
konditioniert	85 kJ/m ²
Charpy Kerbschlagzähigkeit (-30°C ISO 179-1/1eA)	
trocken	15 kJ/m ²
konditioniert	17 kJ/m ²



Thermische Eigenschaften

Wärmeformbeständigkeit HDT/A (1,8 MPa ISO 75)	67 °C
Wärmeformbeständigkeit HDT/B (0,45 MPa ISO 75)	100 °C
Schmelzpunkt (DSC, 10K/min DIN EN 11357-1)	225 °C

Haftungsausschluss:

Alle auf dieser Website gemachten Angaben basieren auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Eine rechtlich verbindliche Zusicherung bestimmter Eigenschaften oder Eignung für einen konkreten Einzelfall kann aus unseren Angaben nicht abgeleitet werden. Die Verarbeiter und Anwender werden durch unsere Angaben nicht von Versuchen und eigenen Prüfungen für den konkreten Einsatzfall befreit. AKRO®, AKROMID®, AKROLEN®, AKROLOY®, AKROTEK®, ICX® und PRECITE® sind registrierte Marken der Feddersen-Gruppe.

**Brandverhalten**
 Brennbarkeit (UL 94)
 0,8mm Wandstärke

HB Klasse

Brennrate (<100 mm/min) (> 1 mm Dicke | FMVSS 302)

+

**Allgemeine Eigenschaften**

Dichte (23°C | ISO 1183)

1,07 g/cm³

Feuchtaufnahme Gleichgewicht (70°C, 62% r.F. | ISO 1110)

1,6 %

Verarbeitungsschwindung (längs | ISO 294-4)

0,9 %

Verarbeitungsschwindung (quer | ISO 294-4)

1,1 %

Haftungsausschluss:

Alle auf dieser Website gemachten Angaben basieren auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Eine rechtlich verbindliche Zusicherung bestimmter Eigenschaften oder Eignung für einen konkreten Einzelfall kann aus unseren Angaben nicht abgeleitet werden. Die Verarbeiter und Anwender werden durch unsere Angaben nicht von Versuchen und eigenen Prüfungen für den konkreten Einsatzfall befreit. AKRO®, AKROMID®, AKROLEN®, AKROLOY®, AKROTEK®, ICX® und PRECITE® sind registrierte Marken der Feddersen-Gruppe.

AKROTEK®

PK-VM natur (4774)

Polyketon

**AKRO-PLASTIC GmbH****Ein Unternehmen der Feddersen-Gruppe**

Industriegebiet Brohlal Ost
Im Stiefelfeld 1
D-56651 Niederzissen
Telefon +49 2636/9742-0
Telefax +49 2636/9742-31
info@akro-plastic.com
www.akro-plastic.com

Datenblatt

Charakterisierung:

AKROTEK® PK-VM natur (4774) ist ein unverstärktes Polyketon mit hoher Fließfähigkeit.

Anwendungen:

Anwendungsgebiete sind technische Bauteile im Maschinenbau und in der Automobilindustrie.

Eigenschaften	Prüfbedingungen	Methode	Einheit	Richtwerte
				trocken

Mechanische Eigenschaften

Zug-E-Modul	1 mm/min	ISO 527-2	MPa	1500
Streckspannung	50 mm/min	ISO 527-2	MPa	60
Bruchdehnung	50 mm/min	ISO 527-2	%	>200
Charpy Schlagzähigkeit	23°C	ISO 179-1/1eU	kJ/m ²	o.B.
Charpy Kerbschlagzähigkeit	23°C	ISO 179-1/1eA	kJ/m ²	10

Thermische Eigenschaften

Schmelzpunkt	DSC, 10K/min	DIN EN 11357-1	°C	220
--------------	--------------	----------------	----	-----

Allgemeine Eigenschaften

Dichte	23°C	ISO 1183	g/cm ³	1,24
--------	------	----------	-------------------	------

* kond. = Prüfkörper nach ISO 1110 gelagert; o.B. = ohne Bruch

² = in Abhängigkeit der gewählten Stabilisierung, siehe Anwendungsbeispiele

AKRO-PLASTIC GmbH

Sitz der Gesellschaft: Niederzissen

Handelsregister: Amtsgericht Koblenz HRB 12227

Geschäftsführer: Andreas Stuber, Dirk Steinbrück

Aufsichtsratsvorsitzender: Dr. Matthias von Rönn

Die vorstehend gemachten Angaben basieren auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Eine rechtlich verbindliche Zusicherung bestimmter Eigenschaften oder Eignung für einen konkreten Einzelfall kann aus unseren Angaben nicht abgeleitet werden. Die Verarbeiter und Anwender werden durch unsere Angaben nicht von Versuchen und eigenen Prüfungen für den konkreten Einsatzfall befreit. AKRO®, AKROMID®, AKROLEN®, AKROLOY® und AKROTEK® sind registrierte bzw. angemeldete Marken der Feddersen Gruppe.

CAMPUS® Datenblatt



The miracles of science™

Crastin® ST820 NC010 - PBT-I DuPont Engineering Polymers

Produkttext

Common features of Crastin® thermoplastic polyester resin include mechanical and physical properties such as stiffness and toughness, heat resistance, friction and wear resistance, excellent surface finishes and good colourability. Crastin® thermoplastic polyester resin has excellent electrical insulation characteristics and high arc-resistant grades are available. Many flame retardant grades have UL recognition (class V-0). Crastin® thermoplastic polyester resin typically has high chemical and heat ageing resistance.

The good melt stability of Crastin® thermoplastic polyester resin normally enables the recycling of properly handled production waste.

If recycling is not possible, DuPont recommends, as the preferred option, incineration with energy recovery (-24 kJ/g of base polymer) in appropriately equipped installations. For disposal, local regulations have to be observed.

Crastin® thermoplastic polyester resin typically is used in demanding applications in the electronics, electrical, automotive, mechanical engineering, chemical, domestic appliances and sporting goods industry.

Crastin® ST820 NC010 is an unreinforced, Super Tough polybutylene terephthalate resin for injection molding.

Rheologische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Verarbeitungsschwindigkeit, parallel	2.4	%	ISO 294-4, 2577
Verarbeitungsschwindigkeit, senkrecht	1.9	%	ISO 294-4, 2577
Mechanische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Zug-Modul	1700	MPa	ISO 527-1/-2
Streckspannung	38	MPa	ISO 527-1/-2
Streckdehnung	7	%	ISO 527-1/-2
Nominelle Bruchdehnung	>50	%	ISO 527-1/-2
Charpy-Schlagzähigkeit, +23°C	N	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy-Schlagzähigkeit, -30°C	N	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy-Kerbschlagzähigkeit, +23°C	85	kJ/m²	ISO 179/1eA
Charpy-Kerbschlagzähigkeit, -30°C	10	kJ/m²	ISO 179/1eA
Thermische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Schmelztemperatur, 10°C/min	225	°C	ISO 11357-1/-3
Formbeständigkeitstemperatur, 1.80 MPa	50	°C	ISO 75-1/-2
Formbeständigkeitstemperatur, 0.45 MPa	100	°C	ISO 75-1/-2
Vicat-Erweichungstemperatur, 50°C/h 50N	125	°C	ISO 306
Längenausdehnungskoeffizient, parallel	147	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Längenausdehnungskoeffizient, senkrecht	155	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Brennbarkeit bei Dicke h	HB	class	IEC 60695-11-10
geprüfte Probekörperdicke	0.8	mm	IEC 60695-11-10
Yellow Card vorhanden	Yes	-	-
Brennverhalten, Probendicke 1 mm	38	mm/min	ISO 3795 (FMVSS 302)
FMVSS	B	-	ISO 3795 (FMVSS 302)
Brennbarkeit-Sauerstoff-Index	19	%	ISO 4589-1/-2
Elektrische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Dielektrizitätszahl, 1MHz	3.4	-	IEC 62631-2-1
Dielektr. Verlustfaktor, 100Hz	200	E-4	IEC 62631-2-1
Dielektr. Verlustfaktor, 1MHz	190	E-4	IEC 62631-2-1
Spezifischer Durchgangswiderstand	>1E13	Ohm*m	IEC 62631-3-1
Spezifischer Oberflächenwiderstand	1E15	Ohm	IEC 62631-3-2
Elektrische Durchschlagfestigkeit	27	kV/mm	IEC 60243-1

Crastin® ST820 NC010 - PBT-I

DuPont Engineering Polymers

Vergleichszahl der Kriechwegbildung

600

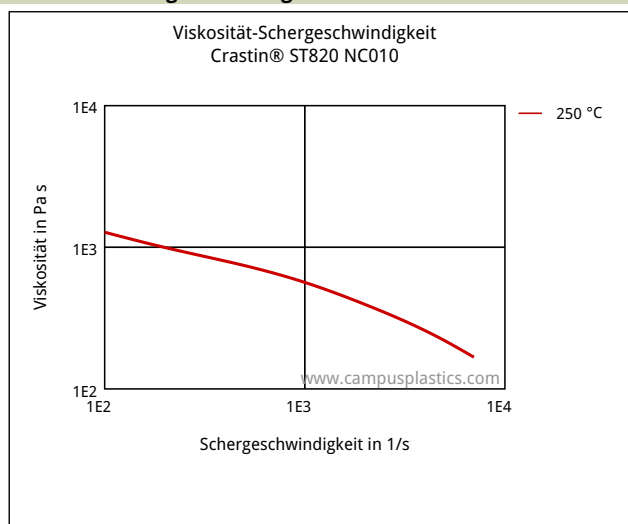
-

IEC 60112

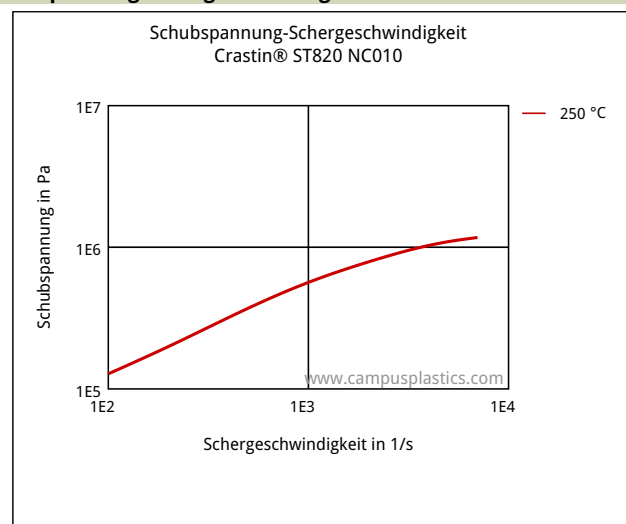
Andere Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Wasseraufnahme	0.31	%	Ähnlich ISO 62
Feuchtaufnahme	0.12	%	Ähnlich ISO 62
Dichte	1220	kg/m ³	ISO 1183
Kennwerte f. rheologische Berechn.	Wert	Einheit	Prüfnorm
Dichte der Schmelze	1030	kg/m ³	-
Wärmeleitfähigkeit der Schmelze	0.2	W/(m K)	-
Spez. Wärmekapazität der Schmelze	2100	J/(kg K)	-
Ejection-Temperatur	170	°C	-

Diagramme

Viskosität-Schergeschwindigkeit



Schubspannung-Schergeschwindigkeit



Grilamid L 20 G nat 6507 PA12

EMS-GRIVORY | a unit of EMS-CHEMIE AG

Produkttext

Produkt-Bezeichnung nach ISO 1874:
PA12, MH, 16-010

Mechanische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Test Standard
Zug-Modul	1600 / 1100	MPa	ISO 527-1/-2
Streckspannung	45 / 40	MPa	ISO 527-1/-2
Streckdehnung	5 / 12	%	ISO 527-1/-2
Nominelle Bruchdehnung	>50 / >50	%	ISO 527-1/-2
Bruchspannung	50 / 45	MPa	ISO 527-1/-2
Charpy-Schlagzähigkeit (+23°C)	N / N	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy-Schlagzähigkeit (-30°C)	N / N	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (+23°C)	6 / 6	kJ/m²	ISO 179/1eA
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (-30°C)	6 / 6	kJ/m²	ISO 179/1eA

Mechanische Eigenschaften (TPE)	tr. / kond.	Einheit	Test Standard
Kugeleindruckhärte	75 / 70	MPa	ISO 2039-1

Thermische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Test Standard
Schmelztemperatur (10°C/min)	178 / -	°C	ISO 11357-1/-3
Formbeständigkeitstemperatur (1.80 MPa)	45 / -	°C	ISO 75-1/-2
Formbeständigkeitstemperatur (0.45 MPa)	115 / -	°C	ISO 75-1/-2
Brennbarkeit bei Dicke h	HB / -	class	IEC 60695-11-10
geprüfte Probekörperdicke	0.8 / -	mm	IEC 60695-11-10
Max. Gebrauchstemperatur (dauernd)	90 - 110	°C	EMS
Max. Gebrauchstemperatur (kurzzeitig)	150	°C	EMS

Elektrische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Test Standard
Spezifischer Durchgangswiderstand	1E11 / 1E11	Ohm*m	IEC 60093
Spezifischer Oberflächenwiderstand	- / 1E12	Ohm	IEC 60093
Elektrische Durchschlagfestigkeit	34 / 32	kV/mm	IEC 60243-1
Vergleichszahl der Kriechwegbildung	- / 600	-	IEC 60112

Andere Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Test Standard
Wasseraufnahme	1.5 / -	%	Ähnlich ISO 62
Feuchtaufnahme	0.7 / -	%	Ähnlich ISO 62
Dichte	1010 / -	kg/m³	ISO 1183

Rheol./Phys. Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Test Standard
Verarbeitungsschwindung (parallel)	0.8 / -	%	ISO 294-4, 2577
Verarbeitungsschwindung (senkrecht)	0.8 / -	%	ISO 294-4, 2577

Merkmale

Verarbeitungsmethoden

Spritzgießen, übrige Extrusion

Lieferformen

Granulat

Industrie & Konsumgüter

Haushaltswaren, Medizintechnik, Sanitär, Wasser- und Gasversorgung

Lebensmittelkontakt

EU Anforderungen, FDA

Quelle: www.materialdatacenter.com - Stand: 2011-12-20

Seite: 1/2

Nach unserem besten Wissen sind die hier enthaltenen Informationen zum Veröffentlichungsdatum dieser Unterlage korrekt. Weder EMS-CHEMIE AG, noch deren Tochtergesellschaften geben ausdrückliche oder mittelbare Garantien bzw. übernehmen Haftungen beliebiger Art in Zusammenhang mit diesen Informationen oder deren Anwendung. Weder unterstützt noch erlaubt EMS-CHEMIE AG die Verwendung ihrer Produkte für medizinische Implantate.

Diese Informationen sind für technisches Fachpersonal vorgesehen und müssen von diesem Personal nach eigenem Ermessen und Risiko verwendet werden. Diese Informationen beziehen sich nicht auf den Einsatz dieses Produkts gemeinsam mit beliebigen anderen Stoffen oder Prozessen. Dies ist keine Lizenz unter einem Patent oder anderen Rechten zum Schutz von geistigem Eigentum. Der Anwender muss die Eignung aller Informationen bzw. des Materials für vorgesehene Verwendungszwecke, Art der Verwendung und die Einhaltung aller Patentrechte selbst bestimmen. Diese Informationen enthalten nur typische Eigenschaften und dürfen nicht für Spezifikationszwecke verwendet werden. EMS-CHEMIE AG behält sich das Recht vor, jederzeit und ohne vorherige Bekanntmachung Veränderungen, Streichungen oder Modifizierungen an diesen Informationen vorzunehmen.

Regionale Verfügbarkeit

Nordamerika, Europa, Asien/Pazifik, Süd und Zentral-Amerika,
Nahost/Afrika

Wasserkontakt

NSF 61, KTW, WRAS, ACS, DVGW W270

Grilon AZ 3 PA66

EMS-GRIVORY | a unit of EMS-CHEMIE AG

Produkttext

Produkt-Bezeichnung nach ISO 1874:
PA66-HI, MHR, 14-020 N

Mechanische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Test Standard
Zug-Modul	1800 / 700	MPa	ISO 527-1/-2
Streckspannung	45 / 30	MPa	ISO 527-1/-2
Streckdehnung	5 / 15	%	ISO 527-1/-2
Nominelle Bruchdehnung	45 / >50	%	ISO 527-1/-2
Bruchspannung	45 / -	MPa	ISO 527-1/-2
Charpy-Schlagzähigkeit (+23°C)	N / N	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy-Schlagzähigkeit (-30°C)	N / N	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (+23°C)	90 / N	kJ/m²	ISO 179/1eA
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (-30°C)	20 / 20	kJ/m²	ISO 179/1eA

Mechanische Eigenschaften (TPE)	tr. / kond.	Einheit	Test Standard
Kugeleindruckhärte	95 / 55	MPa	ISO 2039-1

Thermische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Test Standard
Schmelztemperatur (10°C/min)	260 / -	°C	ISO 11357-1/-3
Formbeständigkeitstemperatur (1.80 MPa)	65 / -	°C	ISO 75-1/-2
Formbeständigkeitstemperatur (0.45 MPa)	180 / -	°C	ISO 75-1/-2
Brennbarkeit bei Dicke h	HB / -	class	IEC 60695-11-10
geprüfte Probekörperdicke	0.8 / -	mm	IEC 60695-11-10
Max. Gebrauchstemperatur (dauernd)	90 - 110	°C	EMS
Max. Gebrauchstemperatur (kurzzeitig)	220	°C	EMS

Elektrische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Test Standard
Spezifischer Durchgangswiderstand	1E12 / 1E10	Ohm*m	IEC 60093
Spezifischer Oberflächenwiderstand	- / 1E12	Ohm	IEC 60093
Elektrische Durchschlagfestigkeit	29 / 28	kV/mm	IEC 60243-1
Vergleichszahl der Kriechwegbildung	- / 600	-	IEC 60112

Andere Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Test Standard
Wasseraufnahme	8 / -	%	Ähnlich ISO 62
Feuchtigkeitsaufnahme	2 / -	%	Ähnlich ISO 62
Dichte	1070 / -	kg/m³	ISO 1183

Rheol./Phys. Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Test Standard
Verarbeitungsschwindung (parallel)	1.6 / -	%	ISO 294-4, 2577
Verarbeitungsschwindung (senkrecht)	1.8 / -	%	ISO 294-4, 2577

Diagramme

Quelle: www.materialdatacenter.com - Stand: 2011-12-20

Seite: 1/4

Nach unserem besten Wissen sind die hier enthaltenen Informationen zum Veröffentlichungsdatum dieser Unterlage korrekt. Weder EMS-CHEMIE AG, noch deren Tochtergesellschaften geben ausdrückliche oder mittelbare Garantien bzw. übernehmen Haftungen beliebiger Art in Zusammenhang mit diesen Informationen oder deren Anwendung. Weder unterstützt noch erlaubt EMS-CHEMIE AG die Verwendung ihrer Produkte für medizinische Implantate.

Diese Informationen sind für technisches Fachpersonal vorgesehen und müssen von diesem Personal nach eigenem Ermessen und Risiko verwendet werden. Diese Informationen beziehen sich nicht auf den Einsatz dieses Produkts gemeinsam mit beliebigen anderen Stoffen oder Prozessen. Dies ist keine Lizenz unter einem Patent oder anderen Rechten zum Schutz von geistigem Eigentum. Der Anwender muss die Eignung aller Informationen bzw. des Materials für vorgesehene Verwendungszwecke, Art der Verwendung und die Einhaltung aller Patentrechte selbst bestimmen. Diese Informationen enthalten nur typische Eigenschaften und dürfen nicht für Spezifikationszwecke verwendet werden. EMS-CHEMIE AG behält sich das Recht vor, jederzeit und ohne vorherige Bekanntmachung Veränderungen, Streichungen oder Modifizierungen an diesen Informationen vorzunehmen.

SARLINK® 3190 is a multi-purpose, thermoplastic elastomer featuring excellent flex fatigue resistance, heat aging and resilience. SARLINK® 3190 is a high hardness grade for use in injection molded parts, sheet and profile extrusions such as weather-stripping. It can be also blow molded into boots and ducts.

Typical properties *	Test method	Typical value	Units S.I.
Density	ISO 1183	940	Kg/m ³
Hardness shore A (5 sec) Extruded sample Injection molded sample	ISO 868	90A 94A/33D	
Stress/strain properties <u>Flow direction</u> Modulus 100% Tensile strength Elongation at break <u>Cross direction</u> Modulus 100% Tensile strength Elongation at break	ISO 37 (II)	11.8 12.1 426 6.9 14.0 740	MPa MPa % MPa MPa %
Tear strength (cross direction) Trouser Unnicked angle	ISO 34 A ISO 34 B (a)	33 81	kN/m kN/m
Compression set 72h/23°C 22h/70°C 22h/100°C	ISO 815	50 61 70	% % %
Hot air aging <u>1000h/125°C</u> Change in hardness Retention tensile strength Retention elongation at break <u>336h/150°C</u> Change in hardness Retention tensile strength Retention elongation at break	ISO 188	0 95 88 +2 86 81	pts % % pts % %
Volume swell 72h/100°C water 168h/100°C ASTM oil 1 168h/23°C ref. fuel B	ISO 1817	+1 +16 +46	% % %

* Tests are conducted on injection-moulded plaques unless indicated otherwise.

** With the exception of contact with foods of type V, low moisture fat and oils, as identified in table 1 of §176.170(c). This material does not comply with any European food contact regulations.

SARLINK® 3190 complies with FDA regulation 21 CFR 177.2600** and can therefore be used for repeated use food packaging and house ware applications such as seals, dispensing valves, gaskets and profiles.

All information supplied by or on behalf of DSM in relation to its products, whether in nature of data, recommendations or otherwise, is supported by research and believed reliable, but DSM assumes no liability whatsoever in respect of application, processing or use made of the aforementioned information or products, or any consequence thereof. The buyer undertakes all liability in respect of the application, processing or use of the aforementioned information or products, whose quality and other properties he shall verify, or any consequence thereof. No liability whatsoever shall attach to DSM for any infringement of the rights owned or controlled by a third party in intellectual, industrial or other property by reason of the application, processing or use of the aforementioned information or products by the buyer.
© SARLINK® is a registered trademark of DSM, The Netherlands

SARLINK® 3190 is a polypropylene based elastomer which can be processed on conventional thermoplastic equipment for injection molding, extrusion and blow molding. This product has a wide processing window in most applications. Melt temperatures from 185°C to 220°C can be used. Do not exceed 260°C. Drying is recommended for extrusion and blow molding (3 hours at 80°C). Drying is best accomplished in a desiccant dryer.

INJECTION MOULDING CONDITIONS			EXTRUSION CONDITIONS		
Melt temperature		185-220°C	Melt temperature		195-215°C
Barrel Temperatures	Rear Middle Front Nozzle	180-215°C 180-215°C 180-215°C 187-220°C	Barrel Temperatures	Rear Transition Metering Front Die	180-200°C 180-205°C 187-210°C 187-210°C 195-215°C
Mould temperature		10-55°C			
Screw Speed		100-200 RPM	Roll Temperature		20-50°C
Back Pressure		0.1-1 MPa	Screen Pack		20 to 60 mesh
Screw	General Purpose		Screw	General Purpose 3:1 compression ratio	

PURGING

SARLINK® 3190 has excellent melt stability. Empty the barrel for idle periods of 30 minutes or longer. Purge thoroughly before and after use of this product with polyethylene or polypropylene.

RECYCLING/REGRIND

This product can be reprocessed. Physical properties are generally not degraded. Dry regrind prior to reprocessing. Drying is best accomplished in a desiccant dryer.

COLOURING

The use of polyolefin based color concentrates is recommended. Apply backpressure in injection molding to disperse color.

BONDING/ASSEMBLY

Thermal bonding techniques can be used to form high strength bonds. Adhesive bonding can be achieved with specialized adhesives. Adhesive bond strength is limited due to the polypropylene base of this material.

STORAGE & HANDLING

SARLINK® 3190 is available in 20 kg polyethylene bags (1000 kg per pallet). It has a storage life at normal temperatures of several years. Please refer to the Material Safety Data Sheet for this grade prior to first time handling.

DuPont™ Zytel®

nylon resin

Zytel® ST801 NC010A

Zytel® ST801 is an unreinforced, super tough polyamide 66 for injection molding and extrusion. It offers outstanding break resistance over a wide temperature and humidity range and high productivity.

Property	Test Method	Units	Value	
			DAM	50%RH
Identification				
Resin Identification	ISO 1043		PA66-HI	
Part Marking Code	ISO 11469		>PA66-HI<	
Mechanical				
Yield Stress	ISO 527	MPa (kpsi)	50 (7.3)	43 (6.2)
Tensile Stress	ISO 527	MPa (kpsi)		
@ 50% Strain				39 (5.7)
Nominal Strain at Break	ISO 527	%	32	>50
Yield Strain	ISO 527	%	5.7	37
Tensile Modulus	ISO 527	MPa (kpsi)	2000 (290)	900 (131)
Tensile Creep Modulus	ISO 899	MPa (kpsi)		
1h				1200 (174)
1000h				750 (109)
Notched Charpy Impact Strength	ISO 179/1eA	kJ/m ²		
-30°C (-22°F)			18	17
23°C (73°F)			80	115
Unnotched Charpy Impact Strength	ISO 179/1eU	kJ/m ²		
-30°C (-22°F)			NB	NB
23°C (73°F)			NB	NB

Contact DuPont for Material Safety Data Sheet, general guides and/or additional information about ventilation, handling, purging, drying, etc.

ISO Mechanical properties measured at 4.0mm, ISO Electrical properties measured at 2.0mm, and all ASTM properties measured at 3.2mm.

Test temperatures are 23°C unless otherwise stated.

The DuPont Oval Logo, DuPont™, The miracles of science™ and Zytel® are trademarks or registered trademarks of DuPont Company. Copyright© 2005.

040730/050907

The information provided in this data sheet corresponds to our knowledge on the subject at the date of its publication. This information may be subject to revision as new knowledge and experience becomes available. The data provided fall within the normal range of product properties and relate only to the specific material designated; these data may not be valid for such material used in combination with any other materials, additives or pigments or in any process, unless expressly indicated otherwise. The data provided should not be used to establish specification limits or used alone as the basis of design; they are not intended to substitute for any testing you may need to conduct to determine for yourself the suitability of a specific material for your particular purposes. Since DuPont cannot anticipate all variations in actual end-use conditions DuPont makes no warranties and assumes no liability in connection with any use of this information. Nothing in this publication is to be considered as a license to operate under or a recommendation to infringe any patent rights. DuPont advises you to seek independent counsel for a freedom to practice opinion on the intended application or end-use of our products. Caution: Do not use this product in medical applications involving permanent implantation in the human body. For other medical applications see "DuPont Medical Caution Statement", H-50102.

Zytel® ST801 NC010A

Property	Test Method	Units	Value	
			DAM	50%RH
Thermal				
Deflection Temperature 0.45MPa	ISO 75f	°C (°F)	132 (270)	
1.80MPa			64 (147)	
Melting Temperature 10°C/min	ISO 11357-1/-3	°C (°F)	263 (505)	
CLTE, Normal 23 - 55°C (73 - 130°F)	ISO 11359-1/-2	E-4/C (E-4/F)	0.9 (0.5)	
CLTE, Parallel 23 - 55°C (73 - 130°F)	ISO 11359-1/-2	E-4/C (E-4/F)	1.2 (0.67)	
Vicat Softening Temperature 50N	ISO 306	°C (°F)	205 (401)	
Electrical				
Surface Resistivity	IEC 60093	ohm	1E15	>1E15
Relative Permittivity	IEC 60250			
1E2 Hz			3.2	8
1E6 Hz			2.9	3.6
Volume Resistivity	IEC 60093	ohm m	1E13	1E11
Dissipation Factor	IEC 60250	E-4		
1E2 Hz			80	1800
1E6 Hz			140	550
Electric Strength	IEC 60243-1	kV/mm (V/mil)		
1.0mm			31 (787)	39 (990)
CTI	IEC 60112	V	600	
CTI	UL 746A	V		
3.0mm			>600	

Contact DuPont for Material Safety Data Sheet, general guides and/or additional information about ventilation, handling, purging, drying, etc.
ISO Mechanical properties measured at 4.0mm, ISO Electrical properties measured at 2.0mm, and all ASTM properties measured at 3.2mm.
Test temperatures are 23°C unless otherwise stated.

The DuPont Oval Logo, DuPont™, The miracles of science™ and Zytel® are trademarks or registered trademarks of DuPont Company. Copyright© 2005.

040730/050907

The information provided in this data sheet corresponds to our knowledge on the subject at the date of its publication. This information may be subject to revision as new knowledge and experience becomes available. The data provided fall within the normal range of product properties and relate only to the specific material designated; these data may not be valid for such material used in combination with any other materials, additives or pigments or in any process, unless expressly indicated otherwise. The data provided should not be used to establish specification limits or used alone as the basis of design; they are not intended to substitute for any testing you may need to conduct to determine for yourself the suitability of a specific material for your particular purposes. Since DuPont cannot anticipate all variations in actual end-use conditions DuPont makes no warranties and assumes no liability in connection with any use of this information. Nothing in this publication is to be considered as a license to operate under or a recommendation to infringe any patent rights. DuPont advises you to seek independent counsel for a freedom to practice opinion on the intended application or end-use of our products. Caution: Do not use this product in medical applications involving permanent implantation in the human body. For other medical applications see "DuPont Medical Caution Statement", H-50102.

Zytel® ST801 NC010A

Property	Test Method	Units	Value	
			DAM	50%RH
Flammability				
Flammability Classification	IEC 60695-11-10			
0.81mm			HB	
1.5mm			HB	
3.0mm			HB	
Flammability Classification	UL94			
0.81mm			HB	
1.5mm			HB	
3.0mm			HB	
Oxygen Index	ISO 4589-1/-2	%	20	
Glow Wire Flammability Index	IEC 60695-2-12	°C		
0.81mm			725	
1.5mm			675	
3.0mm			650	
Glow Wire Ignition Temperature	IEC 60695-2-13	°C		
0.81mm			675	
1.5mm			675	
3.0mm			675	
High Amperage Arc Ignition Resistance	UL 746A	arcs		
0.81mm			>200	
1.5mm			>200	
3.0mm			>200	
Hot Wire Ignition	UL 746A	s		
0.81mm			9	
1.5mm			15	
3.0mm			20	

Contact DuPont for Material Safety Data Sheet, general guides and/or additional information about ventilation, handling, purging, drying, etc.
 ISO Mechanical properties measured at 4.0mm, ISO Electrical properties measured at 2.0mm, and all ASTM properties measured at 3.2mm.
 Test temperatures are 23°C unless otherwise stated.

The DuPont Oval Logo, DuPont™, The miracles of science™ and Zytel® are trademarks or registered trademarks of DuPont Company. Copyright© 2005.

040730/050907

The information provided in this data sheet corresponds to our knowledge on the subject at the date of its publication. This information may be subject to revision as new knowledge and experience becomes available. The data provided fall within the normal range of product properties and relate only to the specific material designated; these data may not be valid for such material used in combination with any other materials, additives or pigments or in any process, unless expressly indicated otherwise. The data provided should not be used to establish specification limits or used alone as the basis of design; they are not intended to substitute for any testing you may need to conduct to determine for yourself the suitability of a specific material for your particular purposes. Since DuPont cannot anticipate all variations in actual end-use conditions DuPont makes no warranties and assumes no liability in connection with any use of this information. Nothing in this publication is to be considered as a license to operate under or a recommendation to infringe any patent rights. DuPont advises you to seek independent counsel for a freedom to practice opinion on the intended application or end-use of our products. Caution: Do not use this product in medical applications involving permanent implantation in the human body. For other medical applications see "DuPont Medical Caution Statement", H-50102.

Zytel® ST801 NC010A

Property	Test Method	Units	Value	
			DAM	50%RH
Temperature Index				
RTI, Electrical	UL 746B	°C		
0.81mm			125	
1.5mm			125	
3.0mm			125	
RTI, Impact	UL 746B	°C		
0.81mm			75	
1.5mm			75	
3.0mm			75	
RTI, Strength	UL 746B	°C		
0.81mm			85	
1.5mm			85	
3.0mm			85	
Other				
Density	ISO 1183	kg/m ³ (g/cm ³)	1080 (1.08)	
Water Absorption	ISO 62, Similar to	%		
Equilibrium 50%RH			2.2	
Saturation, immersed			6.7	
Molding Shrinkage	ISO 294-4	%		
Parallel, 2.0mm			1.7	
Processing				
Melt Temperature Range		°C (°F)	280-300 (535-570)	
Melt Temperature Optimum		°C (°F)	290 (555)	
Mold Temperature Range		°C (°F)	50-90 (120-190)	
Mold Temperature Optimum		°C (°F)	70 (160)	
Drying Time, Dehumidified Dryer		h	2-4	
Drying Temperature		°C (°F)	80 (175)	
Processing Moisture Content		%	<0.20	

Contact DuPont for Material Safety Data Sheet, general guides and/or additional information about ventilation, handling, purging, drying, etc.

ISO Mechanical properties measured at 4.0mm, ISO Electrical properties measured at 2.0mm, and all ASTM properties measured at 3.2mm.

Test temperatures are 23°C unless otherwise stated.

The DuPont Oval Logo, DuPont™, The miracles of science™ and Zytel® are trademarks or registered trademarks of DuPont Company. Copyright© 2005.

040730/050907

The information provided in this data sheet corresponds to our knowledge on the subject at the date of its publication. This information may be subject to revision as new knowledge and experience becomes available. The data provided fall within the normal range of product properties and relate only to the specific material designated; these data may not be valid for such material used in combination with any other materials, additives or pigments or in any process, unless expressly indicated otherwise. The data provided should not be used to establish specification limits or used alone as the basis of design; they are not intended to substitute for any testing you may need to conduct to determine for yourself the suitability of a specific material for your particular purposes. Since DuPont cannot anticipate all variations in actual end-use conditions DuPont makes no warranties and assumes no liability in connection with any use of this information. Nothing in this publication is to be considered as a license to operate under or a recommendation to infringe any patent rights. DuPont advises you to seek independent counsel for a freedom to practice opinion on the intended application or end-use of our products. Caution: Do not use this product in medical applications involving permanent implantation in the human body. For other medical applications see "DuPont Medical Caution Statement", H-50102.

CAMPUS® Datenblatt

Zytel® HTNFE8200 BK431 - PA6T/XT-I
DuPont Engineering Polymers



The miracles of science™

Produkttext

Zytel® HTN high performance polyamide resins feature high retention of properties upon exposure to elevated temperature, to high moisture, and to harsh chemical environments. Polymer families and grades of Zytel® HTN are tailored to optimize performance as well as processability.

Typical applications with Zytel® HTN include demanding applications in the automotive, electrical and electronics, domestic appliances, and construction industries.

Zytel® HTNFE8200 BK431 is an unreinforced, toughened, heat stabilized high performance polyamide resin for injection molding. It is also a PPA resin.

Rheologische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Prüfnorm
Verarbeitungsschwindigkeit, parallel	1.0 / *	%	ISO 294-4, 2577
Verarbeitungsschwindigkeit, senkrecht	1.0 / *	%	ISO 294-4, 2577
Mechanische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Prüfnorm
Zug-Modul	2200 / -	MPa	ISO 527-1/-2
Streckspannung	69 / -	MPa	ISO 527-1/-2
Streckdehnung	5.5 / -	%	ISO 527-1/-2
Nominelle Bruchdehnung	14 / -	%	ISO 527-1/-2
Charpy-Schlagzähigkeit, +23°C	N / N	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy-Schlagzähigkeit, -30°C	N / N	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy-Kerbschlagzähigkeit, +23°C	80 / -	kJ/m²	ISO 179/1eA
Thermische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Prüfnorm
Formbeständigkeitstemperatur, 1.80 MPa	125 / *	°C	ISO 75-1/-2
Formbeständigkeitstemperatur, 0.45 MPa	138 / *	°C	ISO 75-1/-2
FMVSS	B	-	ISO 3795 (FMVSS 302)
Elektrische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Prüfnorm
Spezifischer Durchgangswiderstand	>1E13 / -	Ohm*m	IEC 62631-3-1
Andere Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Prüfnorm
Dichte	1130 / -	kg/m³	ISO 1183

Merkmale

Verarbeitungsmethoden

Spritzgießen

Besondere Kennwerte

Stabilisiert/stabil Wärmeeinwirkung

Regionale Verfügbarkeit

Nordamerika, Europa, Asien/Pazifik, Süd und Zentral-Amerika, Nahost/Afrika

Weitere Informationen

Spritzgießen

During molding, use proper protective equipment and adequate ventilation. Avoid exposure to fumes and limit the hold up time and temperature of the resin in the machine. Purge degraded resin carefully with HDPE.

[Molding guide](#)

All data provided according to ISO 10350 for single points and ISO 11403 for multipoints.

Contact DuPont for Material Safety Data Sheet, general guides and/or additional information about ventilation, handling, purging, drying, etc.

Test temperatures are 23°C unless otherwise stated.

Zytel® HTNFE8200 BK431 - PA6T/XT-I

DuPont Engineering Polymers

DuPont™, the DuPont Oval Logo, and all products, unless otherwise noted, denoted with ™, □ or ® are trademarks, service marks or registered trademarks of affiliates of DuPont de Nemours, Inc. © 2019 DuPont de Nemours, Inc. All rights reserved.

The information provided in this data sheet corresponds to our knowledge on the subject at the date of its publication.

This information may be subject to revision as new knowledge and experience becomes available.

The information set forth herein is furnished free of charge and is based on technical data that DuPont believes to be reliable and falls within the normal range of properties. It is intended for use by persons having technical skill, at their own discretion and risk. This data should not be used to establish specification limits nor used alone as the basis of design. Handling precaution information is given with the understanding that those using it will satisfy themselves that their particular conditions of use present no health or safety hazards. Since conditions of product use and disposal are outside our control, we make no warranties, express or implied, and assume no liability in connection with any use of this information. As with any product, evaluation under end-use conditions prior to specification is essential. Nothing herein is to be taken as a license to operate or a recommendation to infringe on patents.

DuPont advises you to seek independent counsel for a freedom to practice opinion on the intended application or end-use of our products.

CAUTION: DO NOT USE DUPONT MATERIALS IN MEDICAL APPLICATIONS INVOLVING IMPLANTATION IN THE HUMAN BODY OR CONTACT WITH INTERNAL BODY FLUIDS OR TISSUES UNLESS THE MATERIAL HAS BEEN PROVIDED FROM DUPONT UNDER A WRITTEN CONTRACT THAT IS CONSISTENT WITH DUPONT POLICY REGARDING MEDICAL APPLICATIONS AND EXPRESSLY ACKNOWLEDGES THE CONTEMPLATED USE.

For further information, please contact your DuPont representative. You may also request a copy of DuPont POLICY Regarding Medical Applications... H-50103-5 and DuPont CAUTION Regarding Medical Applications... H-50102-5.

Allgemeine Produktinformation

Elastollan® 794 A 15 CS 000

® = Eingetragenes Warenzeichen der BASF Polyurethanes GmbH



Charakteristik:

Thermoplastisches Polyester-Polyurethan mit ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften wie guter Verschleißfestigkeit, gutem Dämpfungs- und Rückstellverhalten und sehr guter Hydrolysebeständigkeit.

Merkmal	Einheit	Wertebereich	Prüfverfahren in Anlehnung an
Dichte	g/cm ³	1,2	DIN EN ISO 1183-1-A
Härte	Shore A	94	DIN ISO 7619-1 (3s)
Härte	Shore D	44	DIN ISO 7619-1 (3s)
Zugfestigkeit	MPa	38	DIN 53504-S2
Reißdehnung	%	480	DIN EN ISO 527
Weiterreißwiderstand	N/mm	100	DIN ISO 34-1Bb
Abrieb	mm ³	40	DIN ISO 4649-A
Druckverformungsrest 23°C / 72 Stunden	%	22	DIN ISO 815
Druckverformungsrest 70°C / 24 Stunden	%	30	DIN ISO 815
Druckverformungsrest 100°C / 24 Stunden	%	40	DIN ISO 815

Die Testplatten wurden aus Granulat mit weniger als 0,02% Wassergehalt gespritzt. Die Testplatten wurden 20 Stunden bei 100°C getempert. Die Probekörper wurden aus 2mm bzw. 6mm starken Testplatten gestanzt. Die Prüfungen wurden bei 23 ± 2°C und 50 ± 6% rel. Luftfeuchte durchgeführt.

Bei den Werten handelt es sich um allgemeine Orientierungswerte (Mittelwerte), keine Beschaffenheitsangaben! Lieferungen erfolgen nur aufgrund konkreter, im Einzelfall vereinbarter Produktspezifikationen und den darin angegebenen Bandbreiten.

Lieferform und Verpackung:

Granulat; die Art der Verpackung erfolgt produktspezifisch und nach Absprache.

Trocknung:

Elastollan® 794 A 15 CS 000 ist hygroskopisch.

Vor der Verarbeitung ist es erforderlich Elastollan® 794 A 15 CS 000 4-5 Stunden bei 90-110°C möglichst im Trockenlufttrockner zu trocknen.

Additive unbedingt mitrocknen. Der Wassergehalt des Granulats sollte bei der Verarbeitung unter 0,02% liegen.

Spritzgussverfahren:

Verarbeitungstemperaturen: Die Schmelze sollte beim Ausspritzen blasen- und schaumfrei sein. Im Bedarfsfall müssen die Trocknungstemperaturen angepasst werden.

Die Temperaturen sind Richtwerte und können in Abhängigkeit von Maschine und Werkzeug abweichen.

Einzug [°C]	Zone1 [°C]	Zone2 [°C]	Zone3 [°C]	Zone4 [°C]	Düse [°C]	Massetemp. [°C]	Werkzeug-temp. [°C]
40	195-215	200-220	205-225	210-230	215-235	210-230	20-50

Allgemeine Empfehlungen:

Umfangsgeschwindigkeit (Schneckendrehzahl)	< 0,2 m/s 12 m/min
--	----------------------

CAMPUS® Datenblatt

Hytrel® 5556 - TPC

DuPont Engineering Polymers



Produkttext

Common features of Hytrel® thermoplastic polyester elastomer include mechanical and physical properties such as exceptional toughness and resilience, high resistance to creep, impact and flex fatigue, flexibility at low temperatures and good retention of properties at elevated temperatures. In addition, it resists many industrial chemicals, oils and solvents. Special grades include heat stabilised, flame retardant, food contact compliant, blow molding and extrusion grades. Concentrates offered include black pigments, UV protection additives, heat stabilisers, and flame retardants.

Hytrel® thermoplastic polyester elastomer is plasticiser free.

The good melt stability of Hytrel® thermoplastic polyester elastomer normally enables the recycling of properly handled production waste. If recycling is not possible, DuPont recommends, as the preferred option, incineration with energy recovery (-24 kJ/g of base polymer) in appropriately equipped installations.

For disposal, local regulations have to be observed.

Hytrel® thermoplastic polyester elastomer typically is used in demanding applications in the automotive, fluid power, electrical/electronic, consumer goods, appliance and power tool, sporting goods, furniture, industrial and off-road transportation/equipment industry.

Hytrel® 5556 is a medium modulus Hytrel® grade with nominal durometer hardness of 55D. It contains non-discoloring stabilizer. It can be processed by many conventional thermoplastic processing techniques like injection moulding and extrusion.

Typical applications:

Hose and tubing, wire and cable, film and sheeting, belting.

2-Pagers

Rheologische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Schmelzevolumenrate, MVR	7	cm³/10min	ISO 1133
Temperatur	220	°C	ISO 1133
Belastung	2.16	kg	ISO 1133
Verarbeitungsschwindigkeit, parallel	1.4	%	ISO 294-4, 2577
Verarbeitungsschwindigkeit, senkrecht	1.4	%	ISO 294-4, 2577
Mechanische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Zug-Modul	180	MPa	ISO 527-1/-2
Spannung bei 10% Dehnung	11	MPa	ISO 527-1/-2
Spannung bei 100% Dehnung	16	MPa	ISO 527-1/-2
Bruchspannung TPE	40	MPa	ISO 527-1/-2
Bruchdehnung TPE	>300	%	ISO 527-1/-2
Zug-Kriechmodul, 1h	170	MPa	ISO 899-1
Zug-Kriechmodul, 1000h	133	MPa	ISO 899-1
Charpy-Schlagzähigkeit, +23°C	N	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy-Schlagzähigkeit, -30°C	N	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy-Kerbschlagzähigkeit, +23°C	N	kJ/m²	ISO 179/1eA
Charpy-Kerbschlagzähigkeit, -30°C	145	kJ/m²	ISO 179/1eA
Zug-Kerbschlagzähigkeit, +23°C	320	kJ/m²	ISO 8256/1
Durchstoß - Maximalkraft, +23°C	2400	N	ISO 6603-2
Durchstoß - Maximalkraft, -30°C	3700	N	ISO 6603-2
Durchstoß - Arbeit, +23°C	27	J	ISO 6603-2
Durchstoß - Arbeit, -30°C	43	J	ISO 6603-2

Hytrel® 5556 - TPC

DuPont Engineering Polymers

Weiterreißwiderstand	137	kN/m	ISO 34-1
Abriebwiderstand	120	mm ³	ISO 4649
Shorehärte D, 15s	51	-	ISO 7619-1
Thermische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Schmelztemperatur, 10°C/min	201	°C	ISO 11357-1/-3
Glasübergangstemperatur, 10°C/min	-20	°C	ISO 11357-1/-2
Formbeständigkeitstemperatur, 1.80 MPa	45	°C	ISO 75-1/-2
Formbeständigkeitstemperatur, 0.45 MPa	70	°C	ISO 75-1/-2
Vicat-Erweichungstemperatur, 50°C/h 50N	75	°C	ISO 306
Längenausdehnungskoeffizient, parallel	180	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Längenausdehnungskoeffizient, senkrecht	180	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Brennbarkeit bei nominal 1.5mm	HB	class	IEC 60695-11-10
geprüfte Probekörperdicke	1.5	mm	IEC 60695-11-10
Yellow Card vorhanden	Yes	-	-
Brennbarkeit bei Dicke h	HB	class	IEC 60695-11-10
geprüfte Probekörperdicke	3.0	mm	IEC 60695-11-10
Yellow Card vorhanden	Yes	-	-
FMVSS	SE	-	ISO 3795 (FMVSS 302)
Brennbarkeit-Sauerstoff-Index	20	%	ISO 4589-1/-2
Elektrische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Dielektrizitätszahl, 100Hz	4.8	-	IEC 62631-2-1
Dielektrizitätszahl, 1MHz	4.4	-	IEC 62631-2-1
Dielektr. Verlustfaktor, 100Hz	90	E-4	IEC 62631-2-1
Dielektr. Verlustfaktor, 1MHz	375	E-4	IEC 62631-2-1
Spezifischer Durchgangswiderstand	4E11	Ohm*m	IEC 62631-3-1
Spezifischer Oberflächenwiderstand	>1E15	Ohm	IEC 62631-3-2
Elektrische Durchschlagfestigkeit	19	kV/mm	IEC 60243-1
Vergleichszahl der Kriechwegbildung	600	-	IEC 60112
Andere Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Wasseraufnahme	0.6	%	Ähnlich ISO 62
Feuchtigkeitsaufnahme	0.2	%	Ähnlich ISO 62
Dichte	1190	kg/m ³	ISO 1183
Folieneigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
WVTR, 23°C/85%r.h.	300	g/(m ² *d)	ISO 15106-1/-2
Sauerstoffdurchlässigkeit, 23°C/85%r.h.	6000	cm ³ /(m ² *d*bar)	ISO 15105-1/-2
Dicke des Probenmaterials	0.025	mm	-
Kennwerte f. rheologische Berechn.	Wert	Einheit	Prüfnorm
Dichte der Schmelze	1030	kg/m ³	-
Wärmeleitfähigkeit der Schmelze	0.16	W/(m K)	-
Spez. Wärmekapazität der Schmelze	2110	J/(kg K)	-
Effektive Temperaturleitf. a-effektiv	7E-8	m ² /s	-

Grivory HT3Z black 9564

PA*

EMS-GRIVORY | a unit of EMS-CHEMIE AG

Produkttext

Produkt-Bezeichnung nach ISO 1874:

PA10T/X, MH,12-030

Mechanische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Prüfnorm
Zug-Modul	2600 / 2600	MPa	ISO 527-1/-2
Streckspannung	80 / 80	MPa	ISO 527-1/-2
Streckdehnung	6 / 6	%	ISO 527-1/-2
Bruchspannung	60 / 60	MPa	ISO 527-1/-2
Bruchdehnung	11 / 11	%	ISO 527-1/-2
Charpy-Schlagzähigkeit (+23 °C)	N / N	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy-Schlagzähigkeit (-30 °C)	80 / 50	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (+23 °C)	12 / 12	kJ/m²	ISO 179/1eA
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (-30 °C)	12 / 12	kJ/m²	ISO 179/1eA

Mechanische Eigenschaften (TPE)	tr. / kond.	Einheit	Prüfnorm
Kugeleindruckhärte	140 / 140	MPa	ISO 2039-1

Thermische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Prüfnorm
Schmelztemperatur (10 °C/min)	295 / -	°C	ISO 11357-1/-3
Formbeständigkeitstemperatur (1.80 MPa)	115 / -	°C	ISO 75-1/-2
Formbeständigkeitstemperatur (0.45 MPa)	160 / -	°C	ISO 75-1/-2
Längenausdehnungskoeffizient (parallel)	80 / -	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Längenausdehnungskoeffizient (senkrecht)	80 / -	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Brennbarkeit bei Dicke h	HB / -	class	IEC 60695-11-10
geprüfte Probekörperdicke	0.8 / -	mm	IEC 60695-11-10
Max. Gebrauchstemperatur (dauernd)	140	°C	ISO 2578
Max. Gebrauchstemperatur (kurzzeitig)	240	°C	EMS

Elektrische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Prüfnorm
Spezifischer Durchgangswiderstand	1E10 / 1E10	Ohm*m	IEC 60093
Spezifischer Oberflächenwiderstand	- / 1E11	Ohm	IEC 60093
Elektrische Durchschlagfestigkeit	33 / 33	kV/mm	IEC 60243-1
Vergleichszahl der Kriechwegbildung	- / 600	-	IEC 60112

Andere Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Prüfnorm
Wasseraufnahme	2.6 / -	%	Ähnlich ISO 62
Feuchtigkeitsaufnahme	1.5 / -	%	Ähnlich ISO 62
Dichte	1130 / -	kg/m³	ISO 1183

Rheol./Phys. Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Prüfnorm
Verarbeitungsschwindigkeit (parallel)	2.0 / -	%	ISO 294-4, 2577
Verarbeitungsschwindigkeit (senkrecht)	1.8 / -	%	ISO 294-4, 2577

Merkmale

Verarbeitungsmethoden

Spritzgießen

Produkt Merkmale

Hydrolysebeständig, Verbesserte Fließeigenschaften, Verbesserte Alkoholbeständigkeit, Biobasierendes Polyamid, Co Polyamid, Partiiell aromatisches Polyamid

Erstellt: 2018-09-07 Quelle: www.materialdatacenter.com

Seite: 1/2

Die Werte sind zur Vorselektion von Werkstoffen und zur Übersicht über das Verkaufssortiment von EMS-GRIVORY gedacht. Die Angaben in dieser Veröffentlichung entsprechen dem heutigen Stand unserer Erkenntnisse und Erfahrungen. Sie sind als unverbindliche Richtwerte zu verstehen und stellen insbesondere keine Materialspezifikationen dar. Eine Garantie in Bezug auf Eigenschaften, Anwendung, Eignung, Design und Verarbeitung kann aus unseren Angaben nicht abgeleitet werden. Die Angaben befreien den Abnehmer nicht von eigenen Untersuchungen zur Eignung, zur Einhaltung gesetzlicher Vorschriften sowie etwaiger Schutzrechte. Wir behalten uns vor, die Angaben in dieser Veröffentlichung jederzeit ohne Ankündigung zu ändern. Die Angaben bedeuten keine vertragliche Verpflichtung unsererseits und jegliche Haftung wird ausdrücklich ausgeschlossen. Für weitergehende Fragen über unsere Produkte stehen Ihnen unsere Experten gerne zur Verfügung.

Lieferformen

Gieß

Besondere Kennwerte

Verbesserte Hitzebeständigkeit

Regionale VerfügbarkeitNordamerika, Europa, Asien/Pazifik, Süd und Zentral-Amerika,
Nahost/Afrika**Automobil**Luftführungssysteme, Hydrauliksysteme, Autoelektrik & -Elektronik,
Beleuchtung, Benzinssysteme, Antriebstrang und Fahrwerk**Elektrik / Elektronik**Elektrohaushaltsgeräte, Elektrogeräte, Steckverbinder,
Energieverteilung, Beleuchtung, Mobiltelefone und andere tragbare
Geräte**Industrie & Konsumgüter**

Hydraulik & Pneumatik, Maschinenbau, Antriebe

TV9LVZ (LTP Reihe)
THERMOLAST® V
Dichtungsanwendungen mit einer Langzeittemperaturbeständigkeit
Typische Anwendungen

- Dichtungen
- Halterungselemente
- Kabeldurchführungen

Materialvorteile

- Außergewöhnlicher Langzeit-Compression Set
- Exzellentes Hystereseverhalten
- Haftung auf PP
- Hervorragende mechanische Eigenschaften
- Hervorragende Temperaturstabilität bis 140 °C

Verarbeitungsmethode: Spritzguss

Produktmerkmale

Compound Name	TV9LVZ
Reihe	LTP
Farbe / RAL DESIGN	schwarz

Mechanische Eigenschaften

Härte	89 ShoreA	DIN ISO 7619-1
Dichte	1,050 g/cm ³	DIN EN ISO 1183-1
Zugfestigkeit ¹	12,5 MPa	DIN 53504/ISO 37
Bruchdehnung ¹	450 %	DIN 53504/ISO 37
Weiterreißwiderstand	27,0 N/mm	ISO 34-1 Methode B (b)(Graves)
DVR/CS 72 h/23 °C	26 %	DIN ISO 815-1 Methode A
DVR/CS 24 h/70 °C	52 %	DIN ISO 815-1 Methode A
DVR/CS 24 h/100 °C	52 %	DIN ISO 815-1 Methode A
DVR/CS 24 h/120 °C	60 %	DIN ISO 815-1 Methode A

¹ Abweichend zur ISO 37 wird der S2 Stab mit 200mm/min Vorschubgeschwindigkeit geprüft.

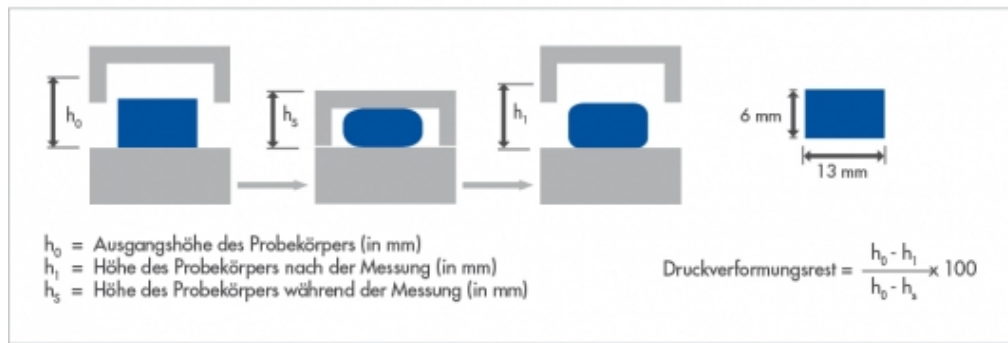
Diese Datenblätter zeigen nur einen kleinen Auszug aus dem gesamten Programm von KRAIBURG TPE. Bei der Auswahl des für Sie passenden Compounds ist Ihnen KRAIBURG TPE gerne behilflich.

Anmerkung: Die in diesem Dokument zur Verfügung gestellten Informationen entsprechen unserem Kenntnisstand am Tag der Veröffentlichung. Im Falle neuer Erkenntnisse und Erfahrungen können sich die vorliegenden Informationen ändern. Unsere Prüfberichte beruhen auf Messungen an Stichproben und stellen nur eine technische Beschreibung unserer Produkte dar. Sie eignen sich nicht für Spezifikationen und entbinden nicht von der Prüfung der Ware für Ihre Zwecke und Verfahren. Somit übernimmt KRAIBURG TPE keine Gewähr und keine Haftung in Verbindung mit der Nutzung dieser Informationen.

Druckverformungsrest

Druckverformungsrest (nach DIN ISO 815)

Folgender Prüfkörper wird für die Druckverformungsmessung verwendet:
Der Probekörper ist ein Zylinder mit der Höhe von 6 mm und einen Durchmesser von 13 mm.



Der Probekörper wird um 25 % verpresst. Der verpresste Probekörper wird auf die Test Temperatur erhitzt. In der DIN ISO 815 sind zwei Varianten der Messung beschrieben.

Methode A: Der Probekörper wird direkt nach der Alterung im Heißluftofen entspannt und anschließend auf Raumtemperatur abgekühlt. Nach dem Erreichen der Raumtemperatur wird nach weiteren 30 Minuten das Resultat bestimmt.

Methode B: Der Probekörper wird nach der Alterung im Heißluftofen auf Raumtemperatur abgekühlt und anschließend entspannt.

Die Ergebnisse bei Methode B sind höher als bei Methode A.

Diese Datenblätter zeigen nur einen kleinen Auszug aus dem gesamten Programm von KRAIBURG TPE. Bei der Auswahl des für Sie passenden Compounds ist Ihnen KRAIBURG TPE gerne behilflich.

Anmerkung: Die in diesem Dokument zur Verfügung gestellten Informationen entsprechen unserem Kenntnisstand am Tag der Veröffentlichung. Im Falle neuer Erkenntnisse und Erfahrungen können sich die vorliegenden Informationen ändern. Unsere Prüfberichte beruhen auf Messungen an Stichproben und stellen nur eine technische Beschreibung unserer Produkte dar. Sie eignen sich nicht für Spezifikationen und entbinden nicht von der Prüfung der Ware für Ihre Zwecke und Verfahren. Somit übernimmt KRAIBURG TPE keine Gewähr und keine Haftung in Verbindung mit der Nutzung dieser Informationen.

CAMPUS® Datenblatt

Stanyl® TW341 - PA46
DSM Engineering Plastics



Produkttext

Wärmestabilisiert, geschmiert

ISO 1043 PA46

Stanyl® TW341 is a V2 UL-rated, non-reinforced high heat polyamide that offers excellent wear & friction properties in combination with outstanding creep resistance, strength, stiffness and fatigue resistance especially at high temperatures in combination with cycle-time advantages and excellent flow.

Mechanische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Prüfnorm
Zug-Modul	3300 / 1000	MPa	ISO 527-1/-2
Streckspannung	100 / 55	MPa	ISO 527-1/-2
Streckdehnung	10 / 20	%	ISO 527-1/-2
Nominelle Bruchdehnung	40 / >50	%	ISO 527-1/-2
Zug-Kriechmodul, 1000h	* / 550	MPa	ISO 899-1
Charpy-Schlagzähigkeit, +23°C	N / N	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy-Schlagzähigkeit, -30°C	N / N	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy-Kerbschlagzähigkeit, +23°C	10 / 35	kJ/m²	ISO 179/1eA
Charpy-Kerbschlagzähigkeit, -30°C	4 / 4	kJ/m²	ISO 179/1eA
Thermische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Prüfnorm
Schmelztemperatur, 10°C/min	295 / *	°C	ISO 11357-1/-3
Glasübergangstemperatur, 10°C/min	75 / *	°C	ISO 11357-1/-2
Formbeständigkeitstemperatur, 1.80 MPa	190 / *	°C	ISO 75-1/-2
Formbeständigkeitstemperatur, 0.45 MPa	280 / *	°C	ISO 75-1/-2
Vicat-Erweichungstemperatur, 50°C/h 50N	290 / *	°C	ISO 306
Längenausdehnungskoeffizient, parallel	85 / *	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Längenausdehnungskoeffizient, senkrecht	110 / *	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Brennbarkeit bei nominal 1.5mm	V-2 / *	class	IEC 60695-11-10
geprüfte Probekörperdicke	1.5 / *	mm	IEC 60695-11-10
Yellow Card vorhanden	Yes / *	-	-
Brennbarkeit bei Dicke h	V-2 / *	class	IEC 60695-11-10
geprüfte Probekörperdicke	0.8 / *	mm	IEC 60695-11-10
Yellow Card vorhanden	Yes / *	-	-
Brennbarkeit-Sauerstoff-Index	27 / *	%	ISO 4589-1/-2
Elektrische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Prüfnorm
Dielektrizitätszahl, 100Hz	3.9 / 22	-	IEC 62631-2-1
Dielektrizitätszahl, 1MHz	3.6 / 4.5	-	IEC 62631-2-1
Dielektr. Verlustfaktor, 100Hz	70 / 8700	E-4	IEC 62631-2-1
Dielektr. Verlustfaktor, 1MHz	260 / 1200	E-4	IEC 62631-2-1
Spezifischer Durchgangswiderstand	1E13 / 1E7	Ohm*m	IEC 62631-3-1
Spezifischer Oberflächenwiderstand	* / 1E13	Ohm	IEC 62631-3-2
Elektrische Durchschlagfestigkeit	25 / 15	kV/mm	IEC 60243-1
Vergleichszahl der Kriechwegbildung	400 / -	-	IEC 60112

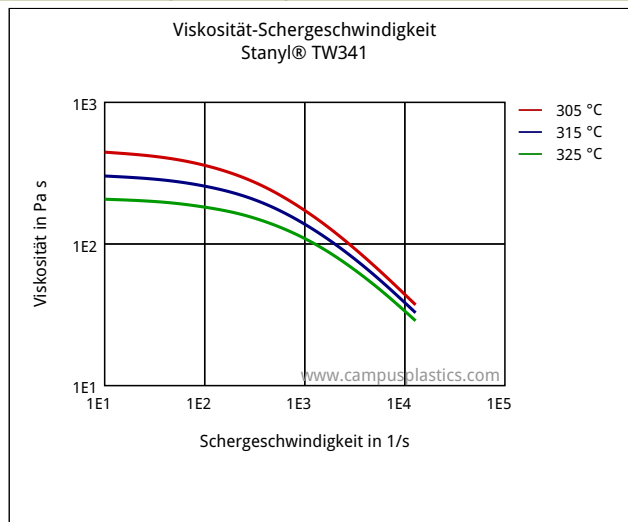
Stanyl® TW341 - PA46

DSM Engineering Plastics

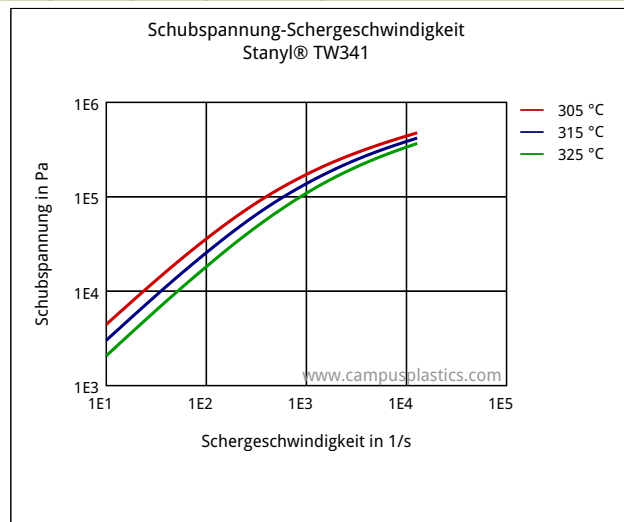
Andere Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Prüfnorm
Wasseraufnahme	13.5 / *	%	Ähnlich ISO 62
Feuchtaufnahme	3.7 / *	%	Ähnlich ISO 62
Dichte	1180 / -	kg/m ³	ISO 1183
Materialspezifische Eigenschaften	tr. / kond.	Einheit	Prüfnorm
Viskositätszahl	185 / *	cm ³ /g	ISO 307, 1157, 1628
Kennwerte f. rheologische Berechn.	Wert	Einheit	Prüfnorm
Dichte der Schmelze	990	kg/m ³	-
Wärmeleitfähigkeit der Schmelze	0.25	W/(m K)	-
Spez. Wärmekapazität der Schmelze	2670	J/(kg K)	-
Effektive Temperaturleitf. a-effektiv	9.21E-8	m ² /s	-

Diagramme

Viskosität-Schergeschwindigkeit



Schubspannung-Schergeschwindigkeit



B. DSC-Messungen

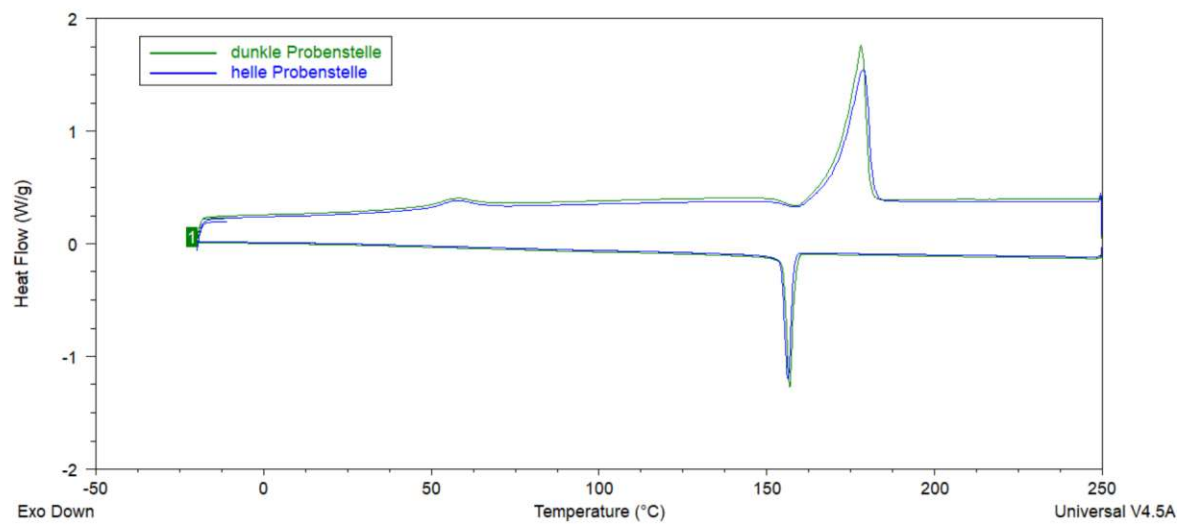


Abbildung B.1.: DSC Messung zweier unterschiedlich gefärbter Probenbereiche von Polyamid 12 nach dem Spritzgussprozess

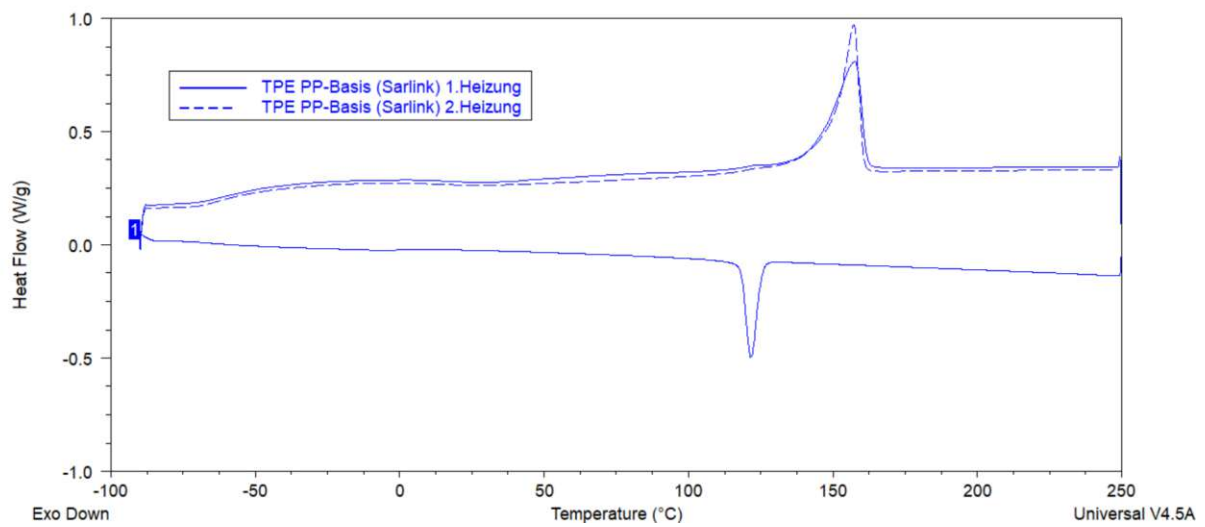


Abbildung B.2.: Beide Aufheizkurven der DSC Messungen von TPE mit PP-Basis (Sarlink)

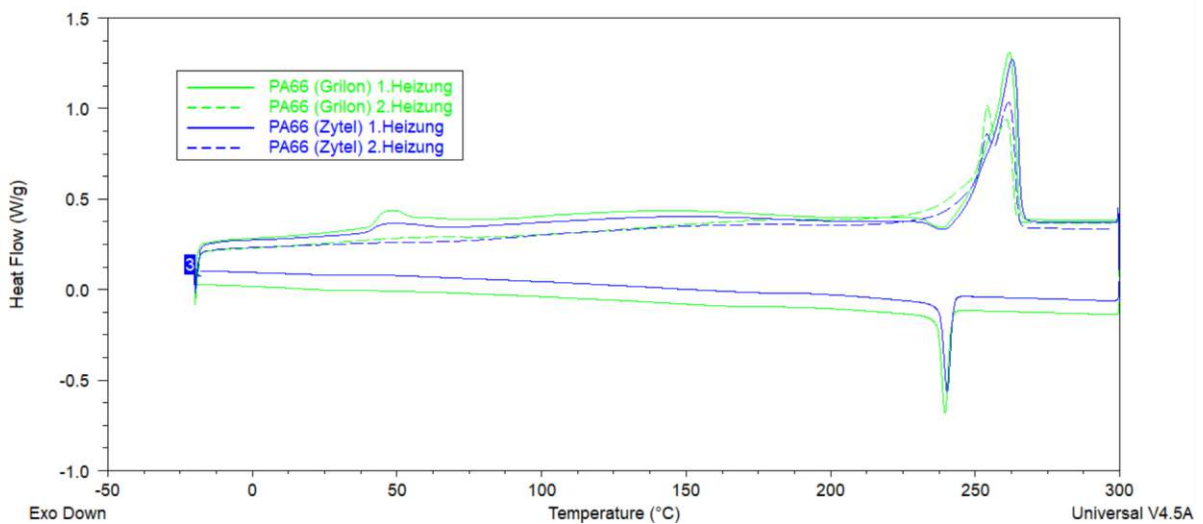


Abbildung B.3.: Beide Aufheizkurven der DSC Messungen von Polyamid 66 (Grilon)

C. Zugversuch



Abbildung C.1.: Bruchfläche im Zugversuch von PA6+ABS mit kleiner Einfallstelle (rechts unten im Bild)

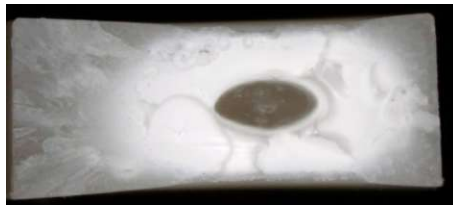


Abbildung C.2.: Bruchfläche im Zugversuch von Polyketon mit großem Lunker



Abbildung C.3.: Bruchfläche im Zugversuch von Polybutylenteraphtalat bei Raumtemperatur (oben) und -40°C (unten)



Abbildung C.4.: Zugprüfkörper (v.o.n.u.): TPE (PP-Basis) Raumtemperatur, TPE (PP-Basis) -40°C, TPE (PS-Basis) Raumtemperatur, TPE (PS-Basis) -40°C



Abbildung C.5.: Bruchfläche im Zugversuch von Grivory HT3Z



Abbildung C.6.: Bruchverhalten im Zugversuch von PA12 bei -40°C ungealtert (oben)
150h bei 120°C + 2000h bei 110°C (unten)

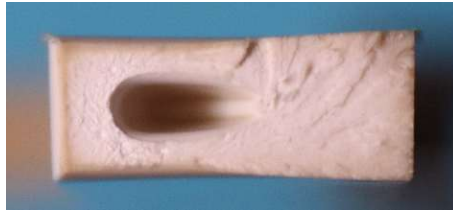


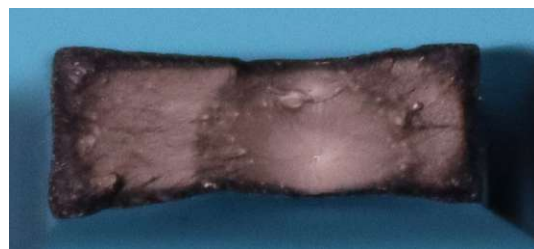
Abbildung C.7.: Bruchfläche im Zugversuch von PA12 bei -40°C nach 150h bei 120°C mit großem Lunker



Abbildung C.8.: Optische Alterungserscheinung durch Verfärbung bei Polyamid 66 (Zytel ST801)



(a) Zugprüfkörper mit Lunker



(b) Zugprüfkörper ohne Lunker

Abbildung C.9.: Bruchfläche der Zugprüfkörper aus Zytel HTNFE8200 bei Raumtemperatur

D. Kerbschlagbiegeversuch



Abbildung D.1.: Unterschiedliche Bruchmechanismen bei Kerbschlagbiegeversuch Zytel HTNFE8200

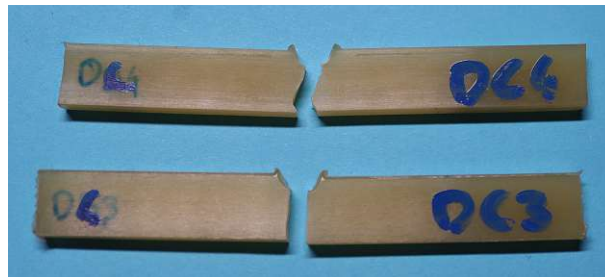


Abbildung D.2.: Unterschiedliche Bruchmechanismen bei Kerbschlagbiegeversuch Grilamid L20G

Literatur

- [1] REIFF Technische Produkte GmbH - Zugriff 08.04.2020. *Auswahlkriterien für Kunststoffanwendungen: Klassifizierung von Kunststoffen*. URL: <https://www.reiff-tp.de/home/kunststoffe>.
- [2] Maschinenbau Wissen - Zugriff 15.04.2020. *Zugversuch*. URL: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/metall/24-zugversuch>.
- [3] DIN 50035:2012-09. *Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien – Polymere Werkstoffe*.
- [4] DIN 51006:2005-07. *Thermische Analyse (TA)– Thermogravimetrie (TG)– Grundlagen*.
- [5] aareplast. *Duroplast Spritzguss* - Zugriff 07.04.2020. URL: <https://www.aareplast.ch/de/duroplast-verfahren/duroplast-spritzgiessen>.
- [6] abiweb. *Einteilung Kunststoffe* - Zugriff 07.04.2020. URL: <https://www.abiweb.de/organische-chemie/makromolekuele/kunststoffe/einteilung-der-kunststoffe.html>.
- [7] Georg Abts. *Kunststoff-Wissen für Einsteiger* -. M: Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2014. ISBN: 978-3-446-43929-0.
- [8] akro-plastic. *Akrotek PK - das Polyketon mit der universellen Qualifikation* - Zugriff 28.05.2020. URL: https://akro-plastic.com/fileadmin/akro-plastic/brochure/New_brochures/WEB_2017_AKROTEK_PK_de.pdf.
- [9] Erwin Baur, Tim A. Osswald und Natalie Rudolph. *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*. München: Hanser Fachbuchverlag, 2013. ISBN: 978-3-446-43442-4.
- [10] Bodo Carlowitz. *Kunststoff-Tabellen* -. München: Hanser, 1995. ISBN: 978-3-446-17603-4.
- [11] Reichelt Chemietechnik GmbH + Co. *PA12 - Polyamid 12* - Zugriff 20.05.2020. URL: <https://www.rct-online.de/de/RctGlossar/detail/id/>.
- [12] Dr.-Ing. Nenad Cvjeticanin. *Polyamid – Ein Standard-Polymerwerkstoff für technische Bauteile von Kraftfahrzeugen* - Zugriff 16.09.2020. URL: https://www.plastverarbeiter.de/wp-content/uploads/migrated/docs/1209_29710.pdf.
- [13] German Patent DE102017112054. *Pyrotechnischer Aktuator* - Zugriff: 08.09.2020. URL: <https://www.freepatentsonline.com/DE102017112054A1.html>.
- [14] DIN-EN-ISO-179:2010-11. *Kunststoffe – Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften – Teil 1: Nicht instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung*.

- [15] DIN-EN-ISO-527-1:2019-12. *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze.*
- [16] DIN-EN-ISO-527-2:2012-06. *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen.*
- [17] DIN-EN-ISO2578:1998-10. *Kunststoffe – Bestimmung der Temperatur-Zeit-Grenzen bei langanhaltender Wärmeeinwirkung.*
- [18] Balázs Lórántné Dr. und J. Balázs Katalin. *Kémia ennnyit kellene tudnod.* Budapest: Akkord Kiadón Kft und Panem Kft, 2010. ISBN: 978-963-545-525-6.
- [19] Dr.-Ing. Steve Meister; Christopher Fischer M.Sc. ; Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer. *Einfluss hoher Abkühlgeschwindigkeiten auf das kristallisationsverhalten nukleierter und nicht-nukleierter teilkristalliner Thermoplaste – Zugriff 20.05.2020.* URL: https://rebrand.ly/Kunststoffe-DE_Kristallisationsverhalten.
- [20] DUDEN. *Definition Aktuator – Zugriff:13.03.2020.* URL: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Aktuator>.
- [21] Gottfried W. Ehrenstein und Sonja Pongratz. *Beständigkeit von Kunststoffen –.* München: Hanser, 2006. ISBN: 978-3-446-21851-2.
- [22] Gottfried W. Ehrenstein, Gabriela Riedel und Pia Trawiel. *Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen –.* München: Hanser, 2003. ISBN: 978-3-446-22340-0.
- [23] Elastron. *Schlagzähmodifikation – Zugriff 13.05.2020.* URL: <https://www.elastron.com/schlagz-hmodifikation>.
- [24] Peter Elsner, Peter Eyerer und Thomas Hirth. *DOMININGHAUS – Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen.* Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2013. ISBN: 978-3-642-16173-5.
- [25] Gunter Erhard. *Konstruieren mit Kunststoffen – mit 62 Tabellen.* München: Hanser, 2004. ISBN: 978-3-446-22589-3.
- [26] Peter Eyerer, Thomas Hirth und Peter Elsner. *Polymer Engineering –.* Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2008. ISBN: 978-3-540-72402-5.
- [27] Helmut Fahrenholz. *DIN EN ISO 527 Kunststoffe: Bestimmung der Zugeigenschaften – Zugriff 21.04.2020.* Ulm, Oktober 2016. URL: https://rebrand.ly/zwick_zugversuch.
- [28] Achim Frick und Claudia Stern. *DSC-Prüfung in der Anwendung –.* M: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2013. ISBN: 978-3-446-43692-3.
- [29] Aurora GmbH. *Pa-compounds gibt es in unterschiedlichsten Zusammensetzungen – Zugriff 13.05.2020.* URL: <https://www.aurora-kunststoffe.de/wp/tag/schlagzaehmodifikator/>.
- [30] Claus Groth GmbH. *Polyketon – Das Comeback des Jahres – Zugriff 31.03.2020.* URL: <https://www.claus-groth.de/polyketon-das-comeback-des-jahres/>.

- [31] K.D. Feddersen Holding GmbH. *Eine große Auswahl weltweit verfügbarer Kunststoffcompounds - Das K.D. Feddersen-Produktportfolio* - Zugriff 11.05.2020. URL: <https://kdfeddersen.com/de/kompetenzen/technische-kunststoffe/polymere/>.
- [32] Wolfgang Grellmann und Sabine Seidler. *Kunststoffprüfung* -. M: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2015. ISBN: 978-3-446-44390-7.
- [33] Vogel Communications Group. *Alterungsprozesse bei Kunststoffen verringern die Formteilbelastbarkeit* - Zugriff 24.08.2020. 2006. URL: <https://rebrand.ly/maschinenmarkt/alterungsprozesse>.
- [34] Wolfgang F. Hemminger und Heiko K. Cammenga. *Methoden der Thermischen Analyse* -. Wiesbaden: Springer Berlin Heidelberg, 2011. ISBN: 978-3-642-70176-4.
- [35] Prof. Dr. Gregor Fels; Dr. Henry Hildebrandt. *Aromatic Compounds (Overview)* - Zugriff 14.05.2020. URL: <https://rebrand.ly/Chemgapedia-Aromaten>.
- [36] Sibylle Hoetzsch. *Erläuterungen und Definitionen* - Zugriff 29.09.2020. URL: <http://kunststoff-meister.de/definitionen.html>.
- [37] Georg Inrichsen. *Untersuchungen zu Struktur und Eigenschaften der Polyamide, Einkristalle aus Polyamid 6,6*. Die Makromolekulare Chemie 166 (1973) 291 -306. D-4047 Dormagen, BRD: Wissenschaftliches Laboratorium des Werkes Dormagen der Bayer AG, 1973.
- [38] Herwig Juster. *Hochleistungskunststoffe: Die verschiedenen Polyphthalamide (PPA) Typen* - Zugriff 21.07.2020. 2020. URL: https://www.youtube.com/watch?v=uv1v_ezK1p0.
- [39] Wolfgang Kaiser. *Kunststoffchemie für Ingenieure - Von der Synthese bis zur Anwendung*. M: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2015. ISBN: 978-3-446-44774-5.
- [40] ALLOD Werkstoff GmbH & Co. KG. *Was sind Thermoplastische Elastomere?* - Zugriff 08.06.2020. URL: <https://www.allod.com/tpe-wissen/>.
- [41] Christian Krebs und Kurt Werner Leu. *Langzeitverhalten von Thermoplasten - Alterungsverhalten und Chemikalienbeständigkeit*. München: Hanser, 1999. ISBN: 978-3-446-19328-4.
- [42] Polytron Kunststofftechnik. *Polytetrafluorethylen (PTFE)* - Zugriff 07.04.2020. URL: <https://www.polytron-gmbh.de/PTFE.aspx>.
- [43] Prof. Dr. Oskar Nuyken; Dr.-Ing. Heidi Samarian; Dagmar Kunzmann. *Glasübergang und Schmelzen* - Zugriff 08.06.2020. URL: http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/9/mac/polymere_werkstoff/molekulare_ordnung/glastemperatur/glastemperatur.vlu.html.
- [44] Prof. Dr. Oskar Nuyken; Dr.-Ing. Heidi Samarian; Dagmar Kunzmann. *Thermoplastische Elastomere* - Zugriff 08.06.2020. URL: http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/9/mac/polymere_werkstoff/thermoplastische_elastomere/tpe.vlu.html.

- [45] TEC. Lehrerfreund. *Werkstoffprüfung (1): Zugversuch* - Zugriff 21.04.2020. URL: <https://www.lehrerfreund.de/technik/1s/werkstoffpruefung-1-zugversuch/3826>.
- [46] KUZ - Kunststoff Zentrum Leipzig. *Welche Informationen liefert eine DSC-Messung?* - Zugriff 08.06.2020. URL: <https://www.kuz-leipzig.de/aktuelles/news/welche-informationen-liefert-eine-dsc-messung/>.
- [47] Young Hui Ko Manwar Hussain und YongHo Choa. *Significant Enhancement of Mechanical and Thermal Properties of Thermoplastic Polyester Elastomer by Polymer Blending and Nanoinclusion*. Journal of Nanomaterials, Volume 2016, Article ID 8515103, Hindawi Publishing Corporation, 2016.
- [48] Maschinenbau-Wissen. *Kunststoff ABS - Acrylnitril-Butadien-Styrol* - Zugriff 20.05.2020. URL: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/356-abs>.
- [49] maschinenbau-wissen. *Tempern von Kunststoffen* - Zugriff 01.09.2020. URL: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/443-tempern>.
- [50] Georg Menges u. a. *Menges Werkstoffkunde Kunststoffe* -. M: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2014. ISBN: 978-3-446-44353-2.
- [51] Polymer Service GmbH Merseburg. *Quasistatische Prüfverfahren* - Zugriff 15.04.2020. URL: https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Quasistatische_Pr%C3%BCfverfahren.
- [52] Polymer Service GmbH Merseburg. *Schlagbiegeversuch* - Zugriff 09.12.2019. 2019. URL: <https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Schlagbiegeversuch>.
- [53] Polymer Service GmbH Merseburg. *Zeit-Temperatur-Verschiebungsgesetz* - Zugriff 09.09.2020. URL: <https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Zeit-Temperatur-Verschiebungsgesetz>.
- [54] Polymer Service GmbH Merseburg. *Zugversuch* - Zugriff 15.04.2020. URL: <https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Zugversuch>.
- [55] Dipl.-Ing. Nikolaus Mirtschin. *Thermomechanisches Verhalten von semikristallinem Polyester-Urethan*. Berlin: BAM-Dissertationsreihe Band 156, 2019.
- [56] Lili Ma Suqin He Hao Liu Zhenya Zhang Ning Ma Wentao Liu u. a. *Crystal transition and thermal behavior of Nylon 12*. Research Article. DE GRUYTER, 2020.
- [57] OMEGALAQ-TAP. *Tempern von Kunststoffen* - Zugriff 07.09.2020. 4.2005. URL: <https://www.omega.de/temperature/pdf/LAQ.pdf>.
- [58] Plastverarbeiter. *Serie Kunststoffpraxis Teil 7: Richtige Werkzeugtemperatur - Optimal temperieren* - Zugriff 20.05.2020. URL: https://www.plastverarbeiter.de/wp-content/uploads/migrated/docs/847_28967.pdf.
- [59] Zwick Roell. *Hochgeschwindigkeitsprüfmaschinen von 25 bis 160 kN* - Zugriff 15.04.2020. URL: <https://www.zwickroell.com/de-de/servohydraulische-pruefmaschinen/hochgeschwindigkeitspruefmaschine>.

- [60] Dr.-Ing. Harald Sambale. *Thermoplastische Verarbeitung von PTFE* - Zugriff 07.04.2020. URL: <https://www.kunststoffe.de/fachinformationen/technik-trends/artikel/thermoplastische-verarbeitung-von-ptfe-611015.html>.
- [61] Alain Guinault; Cyrille Sollogoub. "Thermomechanical properties of ABS/PA and ABS/PC blends". In: *International Journal of Material Forming* (2009).
- [62] VW82034:2011-05. *Vorlage LV34- Fußgängerschutz-System Aktuator für Fußgängerschutz Anforderungen und Prüfbedingungen*.
- [63] Wolfgang Weißbach. *Werkstoffkunde - Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2010. ISBN: 978-3-834-80739-7.
- [64] Wikipedia. *Aliphatische Kohlenwasserstoffe* - Zugriff 13.05.2020. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Aliphatische_Kohlenwasserstoffe.
- [65] Wikipedia. *Polyamide* - Zugriff 11.05.2020. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyamide>.
- [66] Wikipedia. *Polyphthalamide* - Zugriff 20.05.2020. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyphthalamide>.
- [67] Deutsche Apotheker Zeitung. *Thermogravimetrie – Eine Analysenmethode des Arzneibuchs* - Zugriff 21.07.2020. 2005. URL: <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2005/daz-45-2005/uid-14893>.
- [68] zeros-berlin. *Kerbschlagbiegeversuch-Anordnung nach Charpy* - Zugriff 30.04.2020. URL: <https://zeros-berlin.de/kerbschlagbiegeversuch/kerbschlagbiegeversuch-nach-charpy.gif>.
- [69] zeros-berlin. *Kerbschlagbiegeversuch-Anordnung nach Charpy* - Zugriff 30.04.2020. URL: <https://zeros-berlin.de/kerbschlagbiegeversuch/kerbschlagbiegeversuch.gif>.