

Abschlussbericht Teilvorhaben Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung der RWTH Aachen

Projektträger: Projektträger Jülich (PTJ)

Förderkennzeichen: 03XP0382B

Akronym: ReHyComPro

F&E-Thema: Entwicklung eines recyclingfähigen hybriden Composite-Profilsystems für Fenster- und Türanwendungen

Laufzeit: 01.03.2021 - 31.03.2024

Projektpartner:

1. REHAU Industries SE & Co. KG, Rehau
2. Steinhuder Werkzeug- und Apparatebau H. Wöfll GmbH, Wunstorf
3. RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung, Aachen

Assoziierte Partner:

1. Hamos GmbH Recycling- und Separationstechnik, Penzberg
2. Arkema S.A., Colombes, Frankreich
3. Fraunhofer Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV), Augsburg



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung	3
2. Voraussetzung unter der das Vorhaben durchgeführt wurde (z. B. Ressourcen, Einbindung in die Unternehmensstrategie, Vorarbeiten und Vorkenntnisse).....	6
3. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und Ende des Vorhabens	8
4. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	12
5. Erzieltes Ergebnis	15
6. Fazit	60
7. Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses ..	61
8. Zusammenarbeit mit anderen Stellen oder außerhalb des Verbundprojektes (Schulung, Beratung, Erfahrungsaustausch u. a.).....	61
9. Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen.....	62
10. Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.....	62
11. Literaturliste	62

1. Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des Verbundvorhabens war die Entwicklung eines nachhaltigen hybriden Composite-Profilsystems zur Herstellung großformatiger Fenster und Türen mit optimierten mechanischen und thermischen Eigenschaften sowie der Möglichkeit des vollständigen stofflichen Recyclings. Abbildung 1 stellt neben den Arbeitsinhalten des Vorhabens, die Anforderungen an das beschriebene hybride Profilsystem sowie die Komponenten zum Aufbau eines Fenster- oder Türprofils dar.

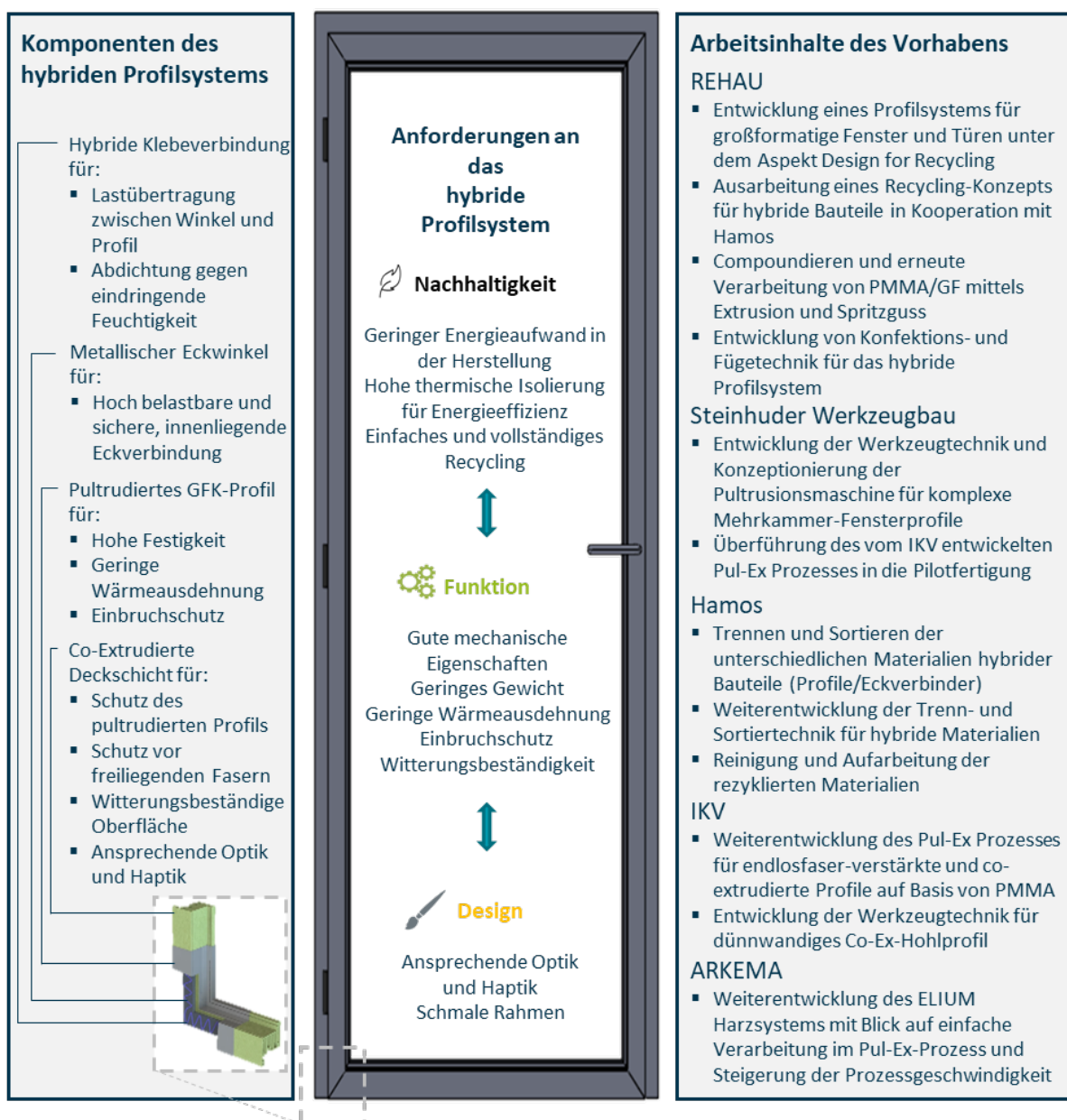


Abbildung 1: Arbeitsinhalte und Anforderungen an hybride Profilsysteme

Bestehende Profilsysteme weisen in Bezug auf Wärmedämmung, Rezyklierbarkeit oder Oberflächeneigenschaften Nachteile auf, deren Beseitigung die Motivation für das vorliegende Vorhaben darstellt. Aktuell verfügbare Technologien und Materialien für die Herstellung großformatiger Fenster und Türen befinden sich in einem Zielkonflikt, wenn es darum geht, die Aspekte Nachhaltigkeit, Funktion und Design bestmöglich zu vereinen.

Bei großformatigen Fenstern stoßen klassische Kunststofffenster an ihre Grenzen. Bis zu einer bestimmten Fenstergröße lässt sich der geringe E-Modul von Polyvinylchlorid (PVC) durch den Einsatz von Stahlarmierungen im Fensterrahmen kompensieren. Die Verwendung von Stahleinlegern bringt jedoch Nachteile, wie ein erhöhtes Gewicht und eine schlechte thermische Isolierung des Einlegers, mit sich. Darüber hinaus bestehen große Unterschiede in der thermischen Ausdehnung von PVC und Stahl, wodurch bei Temperaturänderung Eigenspannungen entstehen.

Aus diesem Grund kommen für großformatige Fenster nahezu ausschließlich metallische Bauweisen, vorzugsweise aus Aluminium, zum Einsatz. Nachteilig ist hierbei die hohe Wärmeleitfähigkeit von Aluminium, die nur zum Teil durch den Einsatz thermischer Trennprofile kompensiert werden kann. Im Vergleich zu Aluminiumprofilen konnte bereits ein FVK-Fensterprofil mit Duroplastmatrix die Wärmedämmung in Form des U-Werts verdoppeln [URL20a]. Neben vergleichsweise hohen Wärmeverlusten über die Nutzungsdauer des Fenstersystems erfordern auch die Herstellung und das Recycling der Aluminiumprofile große Mengen an Energie [URL20b]. Aus diesem Grund schneiden derartige Alu-Fenster im Hinblick auf die Energieeffizienz wesentlich schlechter ab als die Varianten aus Holz oder Kunststoff.

Pultrudierte Profile mit Endlosfaserverstärkung lösen die beschriebenen Probleme durch die Kombination sehr guter mechanischer Eigenschaften bei geringem Gewicht und guter thermischer Isolierung. Üblicherweise werden hierfür duroplastische Matrixmaterialien verwendet, die aufgrund ihrer niedrigen Verarbeitungsviskosität vor der Aushärtungsreaktion einfach zu verarbeiten sind. Nachteilig ist allerdings die fehlende Möglichkeit, das Matrixmaterial aufzuschmelzen und damit zu schweißen. Auch eine Ummantelung des Profils durch eine Coextrusions (Coex) Schicht zur Abdeckung von Freifasern und zum Schutz gegen UV-Strahlung und Bewitterung lässt sich bei duroplastischen Materialien aufgrund von

eingeschränkten Möglichkeiten der stoffschlüssigen Verbindung i. d. R. nicht ohne weiteres realisieren, weshalb derartige Profile üblicherweise lackiert werden. Darüber hinaus stellen die bei dieser Materialklasse sehr limitierten Recyclingmöglichkeiten einen großen Nachteil dar. Das Material lässt sich nur als Füllstoff verwenden oder thermisch verwerten.

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein System entwickelt, welches die vorteilhaften mechanischen und thermischen Eigenschaften der Composite-Bauweise mit einer vollständigen stofflichen Rezyklierbarkeit verbindet. Diesbezüglich bietet ein endlosfaserverstärktes Profil mit thermoplastischer Matrix deutliche Vorteile, da dieses im Zuge der Wiederverwertung zerkleinert, compoundiert und in Form von faserverstärktem Granulat erneut dem Rohstoffkreislauf zugeführt werden kann. Das rezyklierte Material lässt sich mittels Extrusion oder Spritzguss zur Herstellung kurzfaserverstärkter Kunststoffteile verarbeiten.

Zur Herstellung großformatiger Fenster und Türen müssen die Profile mit hochfesten Eckwinkeln zu einer Rahmenstruktur verbunden werden. Dabei bestehen sowohl hohe Anforderungen an die Mechanik als auch an die Schlagzähigkeit der Winkel. Metallwinkel, in der Regel aus Aluminium, entsprechen diesem Anforderungsprofil sehr gut und lassen sich mit geringem technischem Aufwand und hohen Festigkeiten verkleben oder verstiften. Der Klebstoff übernimmt dabei neben der Kraftübertragung gleichzeitig eine abdichtende Funktion. Im Bereich der Eckwinkel ist die höhere Wärmeleitfähigkeit gegenüber den Composite Profilen weniger kritisch, da der Bereich lokal sehr begrenzt ist.

Obwohl das beschriebene System mit thermoplastischen Composite Profilen in Kombination mit Metallwinkeln die Anforderungen an großformatige Fenster und Türen aufgrund seiner Materialauswahl besonders gut erfüllt, hat die Wiederverwertung eines solchen Systems am Ende der Nutzungsdauer wesentlichen Einfluss auf dessen Nachhaltigkeit.

Aus diesem Grund lag ein Schwerpunkt der Entwicklung auf dem Design for Recycling, um die Demontage und Trennung der einzelnen Materialien am Ende der Nutzungszeit von 25 bis 40 Jahren zu erleichtern [CJSX19]. Das im Projekt entwickelte Konzept umfasste zwei Hauptkomponenten: Das Profil und die Eckverbinder. Das Design for Recycling des Profilsystems berücksichtigt sowohl die montage- und demontagegerechte Ausführung der Fügeverbindung des Fensterprofilsystems als auch die Rezyklierbarkeit der

Einzelkomponenten. Darüber hinaus wurden insbesondere der Aufbereitungsprozess und die daraus resultierenden Eigenschaften des Profilmaterials (Polymethylmethacrylat [PMMA] und Glasfasern [GF]) als Sekundärmaterial untersucht.

Das IKV verantwortete im Rahmen des Projektes die Weiterentwicklung des kombinierten Pultrusions- und Extrusionsprozesses. Dabei waren die Bereitstellung einer geeigneten Werkzeugtechnologie sowie die Identifikation eines Prozessfensters zur Gewährleistung der anwendungsrelevanten Eigenschaften durch gezielte Analyse der Einflussfaktoren auf die Bauteilperformance die wesentlichen Ziele des IKV. Begleitende Arbeiten fanden im Rahmen des werkstofflichen Recyclings durch Analyse einer Wiederaufbereitungsstrategie und deren Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften statt, sodass ein ganzheitliches Konzept für ein nachhaltiges Fenstersystem entwickelt wurde.

2. Voraussetzung unter der das Vorhaben durchgeführt wurde (z. B. Ressourcen, Einbindung in die Unternehmensstrategie, Vorarbeiten und Vorkenntnisse)

Der **Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung (IKV) der RWTH Aachen** verfügt als etabliertes Forschungsinstitut über ein breitgefächertes Wissen sowie umfangreiche Kompetenzen im Bereich der Kunststoffverarbeitung. Dieses Wissen umfasst sowohl die Simulation von Kunststoffverarbeitungsprozessen als auch die Möglichkeit der Materialcharakterisierung im Zentrum für Kunststoffanalyse und -prüfung. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist insbesondere hervorzuheben, dass das IKV im Rahmen eines öffentlich geförderten Forschungsprojekts (AiF 18247N) bereits erfolgreich einen Duroplast-Pultrusionsprozess mit integrierter Extrusion entwickelt hat [HSB15]. Bei dieser Entwicklung konnten bereits die umfangreichen Kompetenzen im Bereich Composite-Verarbeitung und Extrusion synergetisch genutzt werden. Die Extrusionskompetenzen am IKV umfassen unter anderem die Auslegung von Werkzeugen sowie die reaktive Extrusion. Im Bereich der Composite-Herstellung sind umfassende Erfahrungen im Bereich Prozessentwicklung mit Reaktivmaterialien vorhanden, so beschäftigt man sich bereits seit über 30 Jahren mit der Pultrusion.

Die **REHAU Industries SE & Co. KG** bietet mit ihrem breit gefächertem Produktportfolio von der Automobil-, über die Bau- und Fensterbranche bis zur Industrietechnik über eine erhebliche Erfahrung in den verschiedensten Bereichen. Vor allem in der Fensterherstellung hat REHAU mit dem vollarmierten Fensterprofil GENE0 und seinem Material RAU-FIPRO einen industriellen Maßstab gesetzt. Daher verfügt das Unternehmen über außerordentliche Kompetenzen in der Konstruktion und Herstellung von Fenstern und Türen. Bereits seit über 35 Jahren arbeitet Rehau an nachhaltigen Lösungen für alle Unternehmensbereiche und ist daher für die Erforschung und Entwicklung nachhaltiger Alternativen für die heute schwer zu recycelnden Fenster- und Türprofile prädestiniert.

Die **Steinhuder Werkzeug- und Apparatebau H. Wölfl GmbH** ist ein Spezialist im Bau von Werkzeugen und Vorrichtungen für die verarbeitende Industrie und unter anderen auch für den Bau von Pultrusionswerkzeugen. Daher ist der Steinhuder Werkzeugbau der ideale Partner für die Auslegung und Herstellung der im Projekt benötigten Pultrusionswerkzeuge.

Die **hamos GmbH Recycling- und Separationstechnik** ist ein globaler Pionier in der Herstellung von elektrostatischen Separatoren für Kunststoffe oder Metalle und Recyclinganlagen. Die Expertise von hamos liegt unter anderem im Recycling von alten Fensterprofilen aus PVC, wodurch hamos auch im Projekt seine langjährigen Erfahrungen in diesem Bereich in das Projekt einfließen lassen kann und bei der Trennung der neuen hybriden Fensterprofile im Rahmen von Separationsversuchen unterstützen kann.

Arkema ist ein globaler Designer von Materialien und innovativen Lösungen und bietet mit seinem thermoplastischen Harz ELIUM auf Methylmethacrylat-Basis (MMA) den idealen Grundstein für ein langfristig recycelbares und thermoplastisches Fensterprofil für den Pultrusionsprozess. Das Harz kann in der Pultrusion zu thermoplastischem Polymethylmethacrylat (PMMA) vernetzt werden und ist in Folgeprozessen mit anderen PMMA-Typen kompatibel und im Anschluss wieder aufschmelzbar. Im Recycling ergibt sich somit ein gravierender Vorteil zu pultrudierten Profilen mit duroplastischer Matrix.

Das **Fraunhofer Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV)** bietet die Möglichkeit der Skalierung von Pultrusionsversuchen in den industriellen Maßstab und kann somit die Versuche über den Labormaßstab hinaus und die Versuche im Pilotmaßstab begleiten.

3. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und Ende des Vorhabens

Pultrudierte hochverstärkte Verbundwerkstoffprofile bieten viele rentable Anwendungen in verschiedenen Märkten wie dem Bauwesen, der Windenergie und dem Transportwesen [VST+20]. Darüber hinaus stellt das Pultrusionsverfahren eine kosteneffiziente Methode zur Herstellung von Verbundwerkstoffstrukturen mit konstanten Querschnitten bei gleichzeitig vergleichsweise geringer Energieintensität [VYB+22, MVSA21] und hoher Produktivität dar. Daher weist das Pultrusionsverfahren ein hervorragendes Potenzial für eine energieeffiziente industrielle Serienfertigung, auch für nachwachsende Rohstoffe, auf [VYB+22].

Ein Sonderfall ist die thermoplastische Pultrusion, die es ermöglicht, die Polymerisationsreaktion im Werkzeug ablaufen zu lassen und damit einen Prozess, der in erster Linie Duroplasten vorbehalten ist, für thermoplastische Materialien wie Caprolactam, das zu Polyamid 6 (PA-6) führt, und flüssiges reaktives Acrylharz zu öffnen. Darüber hinaus bietet der thermoplastische Charakter der Matrixmaterialien folgende Vorteile gegenüber einem duroplastischen Profil: Höhere Schlagzähigkeit [NSNM15], Verarbeitbarkeit durch Schweißen [EB14], geringere Umweltbelastung [MVSA21, LN12] und umfassendere Recyclingmöglichkeiten [MVSA21, VBW+22].

Trotz der Vorteile ist die Oberflächenqualität von pultrudierten Profilen für kosmetische Anwendungen ohne anschließende Nachbearbeitung oft ungeeignet [Sta00]. Darüber hinaus kann es durch Umwelteinflüsse zu einem "Faser-Blooming" der freigelegten Fasern kommen, das vor allem an exponierten Stellen auftritt [KBV07] und zu einer Degradation der Verbundstruktur selbst führen kann [Sta00]. Dennoch ist ein anschließender kostenintensiver Veredelungsprozess erforderlich, um Oberflächen der Klasse A" zu gewährleisten, was mit der

Emission von umweltschädlichen flüchtigen organischen Verbindungen einhergeht [Kim11]. Um das Problem der Oberflächenqualität zu überwinden und die Schweißbarkeit der Profile zu ermöglichen, wurde eine Verfahrenskombination aus einem Pultrusions- und einem Extrusionsverfahren (PulEx) entwickelt [Kim11, Sch20]. Es wurde gezeigt, dass pultrudierte glasfaserverstärkte Polymerprofile (GFK) mit Polyurethanmatrix inline mit einer Deckschicht aus thermoplastischem Polyethylen (PE) und PA-6 coextrudiert werden können [Sch20].

Für angestrebte Außenanwendungen (z. B. Brückendecks, Treppengeländer, Fenster- und Türelemente), die eine hohe Steifigkeit und gleichzeitig eine hohe Umweltbeständigkeit und hervorragende Oberflächeneigenschaften erfordern, stellt das PulEx-Verfahren eine geeignete Technologie dar. Für das PulEx-Verfahren ist ein thermoplastisches Material anstelle des duroplastischen Kernmaterials wünschenswert, um umfassende Ansätze für das mechanische Recycling zu ermöglichen. Gleichzeitig erspart die Verwendung eines ähnlichen Polymermaterials als Deckschicht die Trennung von Deckschicht und Kern im Recyclingprozess.

Im Gegensatz zu thermischen und chemischen Recyclingverfahren gilt das werkstoffliche Recycling als ausgereifte Technologie zur Rückgewinnung von Rohstoffen [CSM+19]. Das werkstoffliche Recycling ist kostengünstig, weniger energieintensiv und kommt ohne umweltschädliche Stoffe aus. Glasfasern werden meist mechanisch recycelt, was mit Downcycling und einer starken Verringerung der Faserlänge einhergeht [BLP+21]. Die resultierende Faserlänge hängt vom Zerkleinerungs- oder Mahlprozess [ATO14, PKK+00], dem Compoundierprozess [YCO2, IVG+11] und der Weiterverarbeitung [BGY+21, CLK+08, KHZ+20] ab. Ein wichtiger Aspekt ist die Tatsache, dass die Effizienz der mechanischen Zerkleinerung mit dem Durchsatz steigt [CSM+19, SM16], wodurch sich diese Anwendung besonders für das großtechnische Recycling eignet. In der Literatur wurde bereits viel über das Recyclingpotenzial von thermoplastischen Acrylglas-FRP geschrieben [BLP+21]. Der Schwerpunkt lag jedoch auf der Solvolyse und Depolymerisation. Da das werkstoffliche Recycling eine wirtschaftliche Option darstellen könnte, wird im vorliegenden Beitrag das werkstoffliche Recycling eines vollthermoplastischen Hybridprofils untersucht.

Die Prozesse Duroplast-Pultrusion und Extrusion sind etablierte Prozesse, deren Produkte vielfältig Anwendung finden [HM17]. Die Pultrusion mit in-situ polymerisierenden

Thermoplasten befindet sich vielerorts sowohl in universitärer als auch industrieller Forschung [Epp18, ZEG19]. So wurden am IKV Aachen in Kooperation mit REHAU AG + Co. bereits Untersuchungen durchgeführt und die Funktionsfähigkeit des Prozesses nachgewiesen. Auch ein weiterer Kooperationspartner von REHAU fertigt pultrudierte Profile mit reaktiver thermoplastischer Matrix.

Am IKV in Aachen wurden sowohl Systeme auf Basis von Polyamid (PA) als auch Polymethylmethacrylat (PMMA) untersucht. Die in-situ Reaktion von ϵ -Caprolactam zu Polyamid 6 ist im RTM-Bereich etabliert und findet auch im Bereich der Pultrusion Anwendung. ϵ -Caprolactam ist hierbei der Ausgangsstoff für die ringöffnende Polymerisation von Polyamid 6. Eine wesentliche Herausforderung bei der Verarbeitung dieses Materials ist die Prozessführung, da die anionische Polymerisation von ϵ -Caprolactam zu PA6 sehr feuchtigkeitsempfindlich ist. Aus diesem Grund erfordert der Prozess eine verhältnismäßig aufwändige Anlagentechnik, um die in-situ Reaktion mit hohem Umsatzgrad und unter Ausschluss von Luftfeuchtigkeit zu ermöglichen.

Obwohl die Einzelprozesse weit entwickelt und etabliert sind, ist ein industrielles Verfahren zur Herstellung pultrudierter und coextrudierter Profile aus thermoplastischen Kunststoffen zum derzeitigen Zeitpunkt aufgrund einer Kombination technischer und wirtschaftlicher Gründe noch nicht verfügbar. Im Rahmen des beantragten Vorhabens wurden die Prozesse der Pultrusion und der Coextrusion auf Basis thermoplastischer Werkstoffe in einer integrierten Prozesskette vereinigt. Die Funktionalität einer integrierten Prozesskette konnte bislang im Labor am IKV Aachen in einem abgeschlossenen Forschungsprojekt (AiF 18247N) nachgewiesen werden [HSB15].

Der Pultrusionsprozess wurde während der Laufzeit des Projekts in diversen Forschungsarbeiten kontinuierlich weiterentwickelt und der Einsatz in verschiedenen Anwendungen wie z. B. dem Bausektor untersucht. Das Projekt konnte einen großen Beitrag zu dieser Thematik beitragen, indem der Pultrusionsprozess mit einer thermoplastischen Matrix und einer coextrudierten Außenschicht des gleichen Materials entwickelt wurde. Die vollthermoplastischen hybriden Profile können kontinuierlich und wirtschaftlich hergestellt werden und weisen eine verbesserte Oberflächenqualität und Schlagzähigkeit auf und sind zudem schweißbar.

Dies eröffnet neue Einsatzmöglichkeiten und trägt durch den Einsatz eines einzigen Polymers dazu bei den Kunststoffkreislauf langfristig zu schließen. Daher sind die pultrudierten Profile sehr gut recycelbar, da die thermoplastische Matrix im Recyclingprozess einfach aufgeschmolzen werden kann und die Fasern somit in neuem kurzfaserverstärktem Granulat wiederverwendet werden können.

4. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Antrag sah im Projekt insgesamt fünf Arbeitspakete vor. Das IKV war in den Arbeitspaketen zwei, drei und vier maßgeblich beteiligt.

Das erste Arbeitspaket sah die Entwicklung und Gestaltung des hybriden Composite-Profilsystems vor. Der Fokus lag hierbei auf einer recyclingoptimierten Bauweise -Design for Recycling- welche die Demontage des hybriden Systems und die Trennung der einzelnen Materialien vereinfacht. Teil des Arbeitspaketes ist die Ausarbeitung eines Anforderungskatalogs für alle Einzelkomponenten des Fensters. Dies beinhaltet Profile, Eckverbinder, Beschläge, Klebstoffe, Schrauben sowie alle weiteren benötigten Teile.

Das IKV hat die Arbeiten in diesem Arbeitspaket mit seiner Expertise und Erfahrung zum kombinierten Pultrusions- und Extrusionsprozess sowie dem Recycling von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen beratend begleitet. Die Unterstützung erfolgte insbesondere bezüglich der Bewertung der Herstellbarkeit der Profilfeatures im vorgesehenen Produktionsprozess und der Aufbereitung der Post-Industrial Abfälle zu einem neuen Werkstoff.

Im Rahmen des AP 2 sollte der kombinierte Pultrusions- und Extrusionsprozess für die Verarbeitung eines in-situ polymerisierenden Thermoplasts und anschließend zur Herstellung von Hohlprofilen angepasst, untersucht und optimiert werden. Dazu identifizierte das IKV zunächst Optimierungspotenziale hinsichtlich der Verarbeitungs- und Materialeigenschaften des in-situ polymerisierendem Material, sodass der assoziierte Partner Arkema das Material für das Verarbeitungsverfahren und das Produkt optimieren konnte.

Darauf aufbauend wurden initiale Verarbeitungsversuche mit der aus einem vorhergehenden Projekt vorhandenen Werkzeugtechnik für den kombinierten Pultrusions- und Extrusionsprozess mit Glasfasern durchgeführt. Das vorhandene Profil stellte ein einfaches Flachprofil dar, das mit einem Thermoplast ummantelt wurde, und wurde für die initiale Untersuchung des Prozessfensters herangezogen.

Da das angestrebte Produktionskonzept die Faserimprägnierung in der Injektionsbox zur Minimierung der Emission flüchtiger Harzbestandteile umfasste, untersuchte das IKV das Materialverhalten des in-situ polymerisierenden Materials in Zusammenhang mit der Imprägnierung der Fasern in der Injektionsbox detailliert und evaluierte die

Imprägnierqualität mithilfe von mikroskopischen Aufnahmen. In Kooperation mit dem assoziierten Kooperationspartner Arkema wurden Ansatzpunkte zur Materialoptimierung hinsichtlich Verarbeitbarkeit mit einer Injektionsbox identifiziert und evaluiert.

Im Rahmen des Projekts sollte eine Profilgeometrie mit mehreren Kammern umgesetzt werden. Deswegen untersuchte das IKV im nächsten Schritt die Herstellung pultrudierter Ein-Kammer-Hohlprofile im Detail, da dieser Prozessschritt entscheidend für die Produktgeometrie ist. Darüber hinaus bildet das umfassende Prozesswissen die Grundlage für die erfolgreiche Kombination der Pultrusion und Extrusion. Aus diesem Grund wurden die Profile insbesondere hinsichtlich ihrer resultierenden Konturform und dem Polymerisationsgrad des Materials untersucht.

Parallel zu den Arbeiten an der Pultrusion wurde mit den Kooperationspartnern die Werkzeugtechnik für den kombinierten Pultrusions- und Extrusionsprozess eines Hohlprofils entwickelt. Die Entwicklung erfolgte unter besonderer Berücksichtigung des thermischen Managements im Werkzeug, da das Pultrusions- und Extrusionswerkzeug große Temperaturdifferenzen aufweisen können. Die Fertigung der Werkzeugtechnik erfolgte auf Basis der Konstruktion von REHAU durch den Kooperationspartner Steinhuder Werkzeugbau. Im weiteren Verlauf wurde die entwickelte Werkzeugtechnik für den kombinierten Prozess in Betrieb genommen und ein Prozessfenster ermittelt. Anschließend erfolgte eine Prozessoptimierung hinsichtlich der Prozessgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der in AP1 definierten Qualitätskriterien.

Abschließend führte das IKV umfangreiche Untersuchungen zum Materialverhalten des im Rahmen von AP2.7 hergestellten, ummantelten Ein-Kammer-Hohlprofils durch. Diese umfassten die Untersuchung der Anbindung des extrudierten an dem pultrudierten Material. Darüber hinaus werden die Profile hinsichtlich mechanischer Eigenschaften auf Material- und Bauteilebene untersucht.

Im Arbeitspaket 3 wurde die Recyclingfähigkeit der hergestellten Profile untersucht. Die Profile wurden hierbei über mehrere Zerkleinerungsverfahren zerkleinert, um die ideale Beschaffenheit des Mahlguts für die Folgeversuche (Dosierbarkeit mit einem gravimetrischen Dosierer) zu erhalten. Die Einarbeitung der geschredderten Profile in verschiedene Matrixmaterialien wurde untersucht. Anschließend wurden die compoundierten Materialien

im Spritzgießen und in der Extrusion zu Prüfkörpern verarbeitet und mechanisch charakterisiert. Auf die Untersuchungen zur kontinuierlichen Depolymerisation des Mahlguts im Doppelschneckenextruder (DSE) wurde aus verschiedenen Gründen verzichtet. Zum einen führt die Depolymerisation des glasfaserverstärkten Materials aufgrund der Entfernung des Matrixmaterials zu einem erheblichen Verschleiß des DSE. Da die Gehäuseelemente des DSE am IKV nicht gehärtet sind, würden durch die Depolymerisationsversuche erhebliche Mehrkosten entstehen, die im Projekt nicht vorgesehen wurden. Zum anderen würden die Glasfasern durch die mechanische Belastung im Prozess stark geschädigt werden, sodass die resultierende Faserlänge der Glasfasern stark verringert werden würde. Im Hinblick auf die Verlängerung der Lebensdauer der Glasfasern in kurzglasfaserverstärkten Compounds, wären die erreichbaren mechanischen Eigenschaften, welche maßgeblich durch die Faserlänge bestimmt werden, im Vergleich zu einem schonenderen Prozess stark abnehmen. Die Depolymerisationsversuche wurden stattdessen bei dem Partner Arkema in einem Reaktor durchgeführt. Die hierdurch frei gewordenen Kapazitäten wurden am IKV für eine Ausweitung des Versuchsraums und zusätzliche Untersuchungen (z. B. Faserlängenbestimmung) genutzt. Basierend auf den Ergebnissen aus AP 2 wurden in Arbeitspaket 4 alle notwendigen profilspezifischen Komponenten für ein komplex geformtes Fensterprofil mit coextrudierter Ummantelung konstruiert und hergestellt. Mit Hilfe dieser Komponenten wurden im Technikum Pultrusionsversuche zur Herstellung der Composite-Fensterprofile entsprechend des Anforderungskatalogs aus AP 1 durchgeführt. Außerdem wurden notwendige Modifikationen an den Pultrusionsmaschinen konzeptioniert.

Das IKV unterstützte hierbei hinsichtlich der Konzeptionierung des kombinierten Pultrusions- und Extrusionswerkzeugs sowie bei der Inbetriebnahme der Werkzeugtechnologie sowohl bei Arkema als auch beim Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) in Augsburg. Weiterführend wurden die Anbindungseigenschaften des Extrudats auf dem Pultrudat bei komplex geformten Fensterprofilen analysiert, um den Herstellungsprozess bewerten und iterativ optimieren zu können.

5. Erzieltes Ergebnis

AP 1: Ausarbeitung eines Anforderungskataloges für hybride Composite-Fenstersysteme

Seitens REHAU wurde ein umfassender Anforderungskatalog mit insgesamt 32 Punkten ausgearbeitet, welche durch das hybride Profilsystem erfüllt werden müssen. Dieser umfasst unter anderem mechanische als auch thermische Eigenschaften des Profils. Es werden jedoch auch Punkte in Bezug auf Verarbeitung, Oberflächenqualität, Glanzgrad, Geruchsentwicklung usw. definiert. Das IKV definierte die prozess- und anlagenspezifischen Randbedingungen wie z. B. den auf der Versuchsanlage realisierbaren Profilquerschnitt und die maximal zulässige Abzugskraft.

AP 2: Material- und Prozessentwicklung zur Fertigung endlosfaserverstärkter thermoplastischer Hohlprofile

Eine Übersicht der im Rahmen des laufenden Forschungsvorhabens hergestellten und geplanten coextrudierten und pultrudierten Profile ist in Abbildung 2 dargestellt.

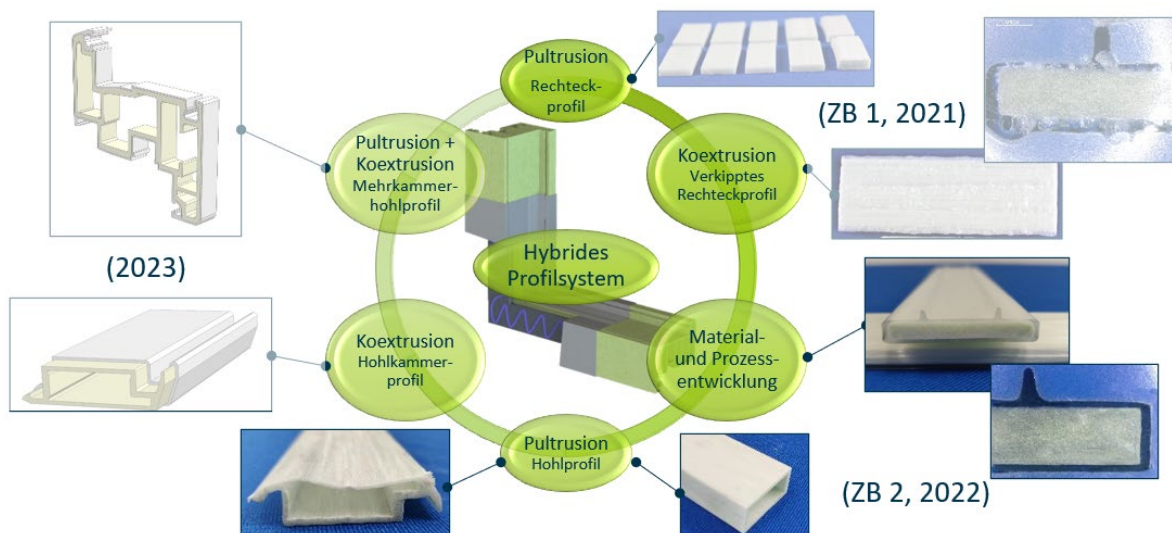


Abbildung 2 Übersicht der hergestellten sowie geplanten coextrudierten und pultrudierten Profile

Basierend auf den in AP 1 formulierten anwendungsspezifischen Anforderungen wurde das Harzsystem Elium 591 des assoziierten Partners Arkema S.A., Colombes, Frankreich, mit der vom Hersteller empfohlenen Peroxidkombination (P16, Laurox, Tx 21S von Nouryon N.V.,

Amsterdam, Niederlande) ausgewählt und die Verarbeitung des in-situ-polymerisierenden Harzes im Pultrusionsprozess untersucht. Dazu wurden zunächst Rechteckprofile (35 x 4 mm²) im Pultrusionsprozess unter Verwendung einer Injektionsbox hergestellt, um ein Prozessfenster (Verarbeitungstemperatur, Abzugsgeschwindigkeit bzw. Verweilzeit im Werkzeug) zu identifizieren und die resultierenden Profileigenschaften (AP 2.1) und die Faserimprägnierung (AP 2.3) zu untersuchen. Die Profilqualität wurde durch Untersuchung der Maßhaltigkeit, der Oberflächenrauheit (DIN EN ISO 4287) und der mechanischen Eigenschaften der Profile durch 3-Punkt-Biegeversuche (DIN EN ISO 14125) sowie Schlagbiegeversuche (ISO 179-1/1eU^b) analysiert.

Maßhaltigkeit: Für Verweilzeiten > 140 s konnte eine ausreichende Maßhaltigkeit der Profile erzielt werden. Bei geringeren Verweilzeiten ist die Polymerisationsreaktion voraussichtlich nicht vollständig abgelaufen, sodass ein Aufquellen der Profile und somit ein Übermaß der Profile resultierte (Abbildung 3).

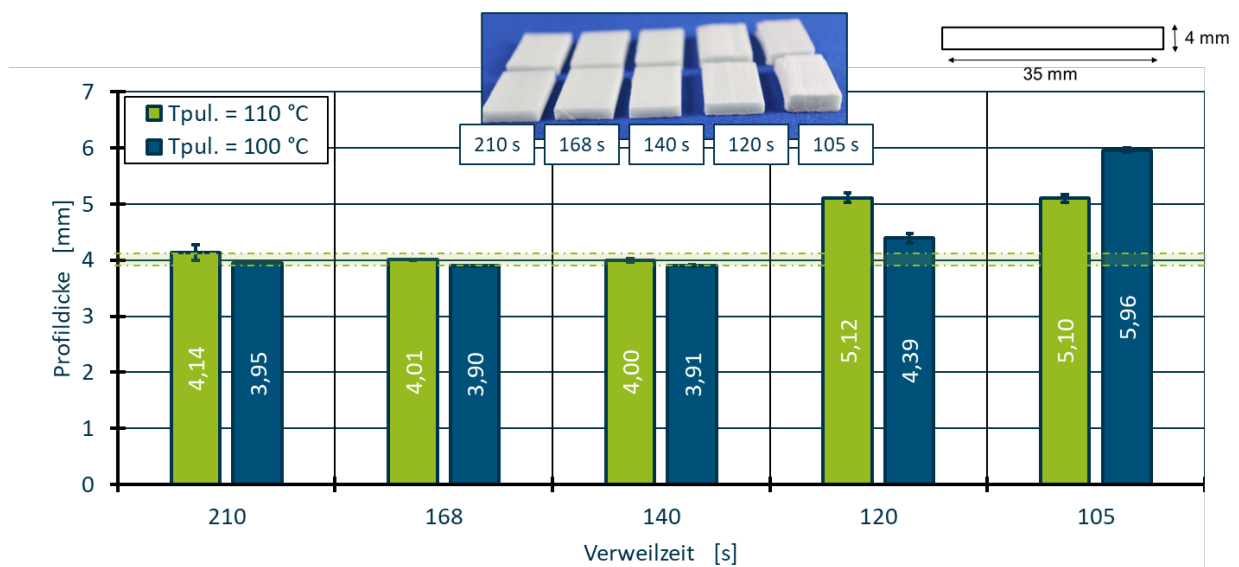
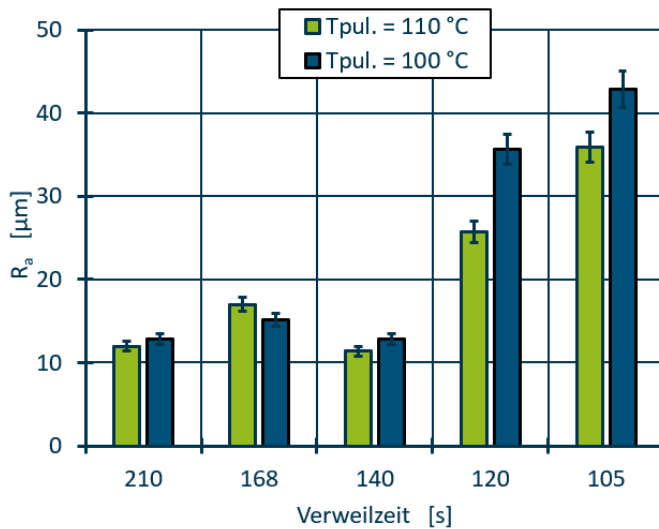


Abbildung 3 Einfluss der Verweilzeit im Werkzeug und der Werkzeugtemperatur auf die Maßhaltigkeit der Profile gemessen mittels Messschieber

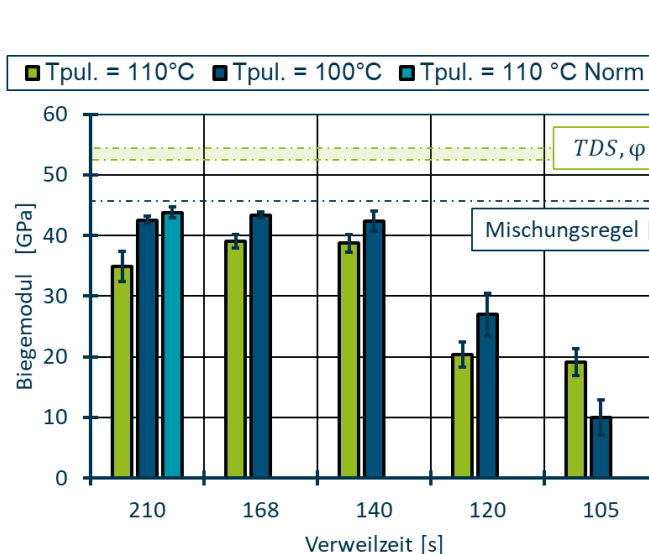
Oberflächenrauheit: Die Untersuchungen der Oberflächenrauheit (Abbildung 4) zeigen einen ähnlichen Effekt. Bei Verweilzeiten < 140 s wurde eine sprunghafte Zunahme der Rauheit gemessen, welche auf den o. g. Effekt zurückzuführen ist.



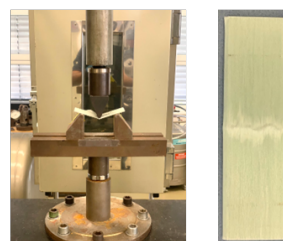
- Konfokales Laserscanning-Mikroskop VK-X200 der Firma Keyence, Osaka, Japan
- Oberflächenmessung nach DIN EN ISO 4287 mit $\lambda_s = 2,5 \mu m$ und $\lambda_c = 0,25 mm$
- Messstrecke: 5 mm quer zur Pultrusionsrichtung
- Bei Verweilzeiten < 140 s nimmt die Oberflächenrauheit sprunghaft zu

Abbildung 4 Einfluss der Verweilzeit im Werkzeug und der Werkzeugtemperatur auf die Oberflächenqualität der Profile

Mechanische Eigenschaften: Die gemessenen Biegemoduln liegen unter den Angaben im technischen Datenblatt (TDS) des Harzsystems, da diesen Angaben ein Faservolumengehalt (φ) von 72 Vol.-% zugrunde liegt und die Versuchsprofile am IKV mit $\varphi = 68$ Vol.-% hergestellt wurden. Unter Anwendung des Puck-Kriteriums und der Mischungsregel wurde für ein perfektes UD-Laminat ein Biegemodul von 48,5 GPa ermittelt. Die gemessenen Biegemoduln liegen unter den berechneten Werten für ein perfektes UD-Laminat, da mit Defekten wie nicht optimaler Faserimprägnierung zu rechnen ist.



- Anlehnung an Norm, da abweichende Profilbreite



- Zugprüfmaschine des Typs Z100 der Firma ZwickRoell, Ulm
- Halbierung der Biegemodule bei Verweilzeiten < 140 s

Abbildung 5 Einfluss der Verweilzeit im Werkzeug und der Werkzeugtemperatur auf den Biegemodul der Profile

Faserimprägnierung: Das Imprägnierverhalten der Fasern in der Injektionsbox wurde durch Variation der Harzviskosität durch Zugabe von stabilisiertem Methylmethacrylat (MMA), durch Variation der Werkzeugtemperatur und der Verweilzeit im Werkzeug untersucht und mittels mikroskopischer Untersuchungen analysiert. Bis zu Verweilzeiten von 140 s sind unabhängig von der Werkzeugtemperatur und bei einer Verarbeitungsviskosität von 500 mPas keine signifikanten Trockenstellen erkennbar. Ein Absenken der Verarbeitungsviskosität führte zu keiner messbaren Verbesserung der Imprägnierqualität. Aus diesem Grund und aufgrund der Praktikabilität (Viskosität der Standardtype Elium 595 beträgt 500 mPas) wurde im weiteren Verlauf des Projektes mit einer Verarbeitungsviskosität von 500 mPas gearbeitet.

Neben den Untersuchungen am Pultrusionsprozess wurden Profile in einem kombinierten Pultrusions- und Extrusionsprozess (Pul-Ex) hergestellt. Die verwendete Werkzeugtechnik, bestehend aus Injektionsbox, Pultrusionswerkzeug sowie Coextrusionswerkzeug ist in Abbildung 6 dargestellt. Zur Untersuchung des Anbindungsverhaltens von Pultrudat und Coextrudat (AP 2.2) wurden die pultrudierten thermoplastischen Profile unmittelbar nach dem Pultrusionswerkzeug mit einer thermoplastischen Deckschicht im Coextrusionswerkzeug ummantelt. Die Coextrusionsschicht wies eine Dicke von 1 mm auf und enthält zusätzlich zwei Rippenstrukturen.

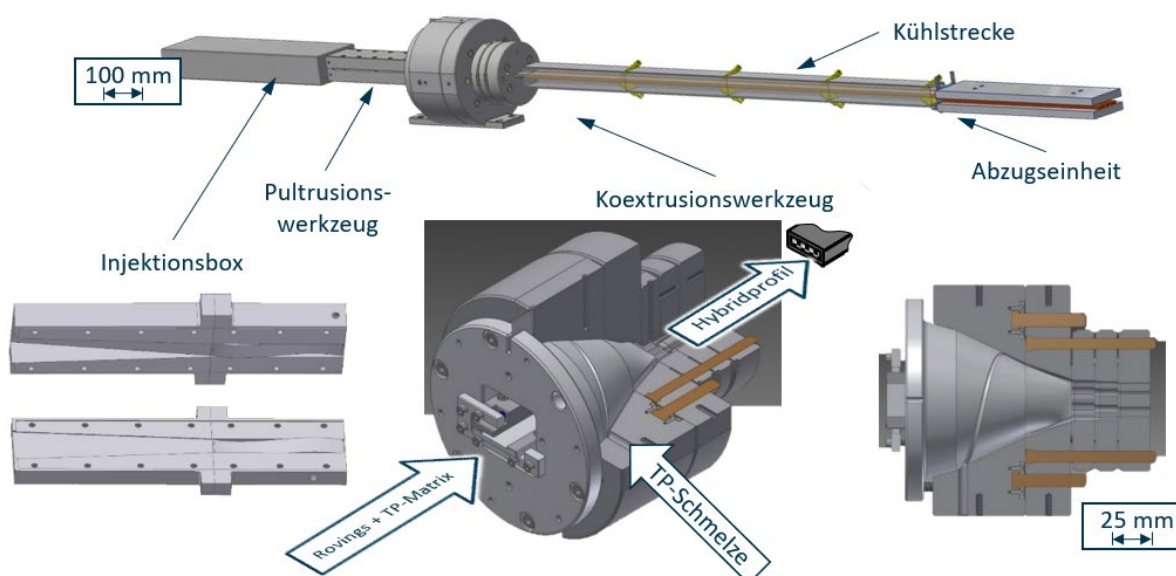


Abbildung 6 Werkzeugtechnik für den kombinierten Pultrusions- und Extrusionsprozess

Als Extrusionsmaterial wurde das schlagzähmodifizierte PMMA „zk6hf“ der Röhm GmbH, Darmstadt mit einer Schmelzevolumenrate (MVR) von $0,42 \text{ cm}^3/\text{min}$ verwendet. Durch systematische Variation der Verarbeitungstemperatur des PMMA und der Verweilzeit wurden hybride Profile gefertigt und ein Prozessfenster des kombinierten Prozesses aufgespannt (vgl. Abbildung 7). Das Verarbeitungsfenster ist durch eine minimale notwendige Temperatur des Extrusionswerkzeuges $T_{Ex.}$ zur Gewährung der Fließfähigkeit des Extrusionsmaterials nach unten und durch den Abbau des Materials auf eine maximale Temperatur von 260 °C nach oben beschränkt. Die Abzugsgeschwindigkeit v_{ab} ist nach unten durch eine notwendige Produktivität des Prozesses und nach oben durch die zur vollständigen Polymerisation notwendige Zeit beschränkt.

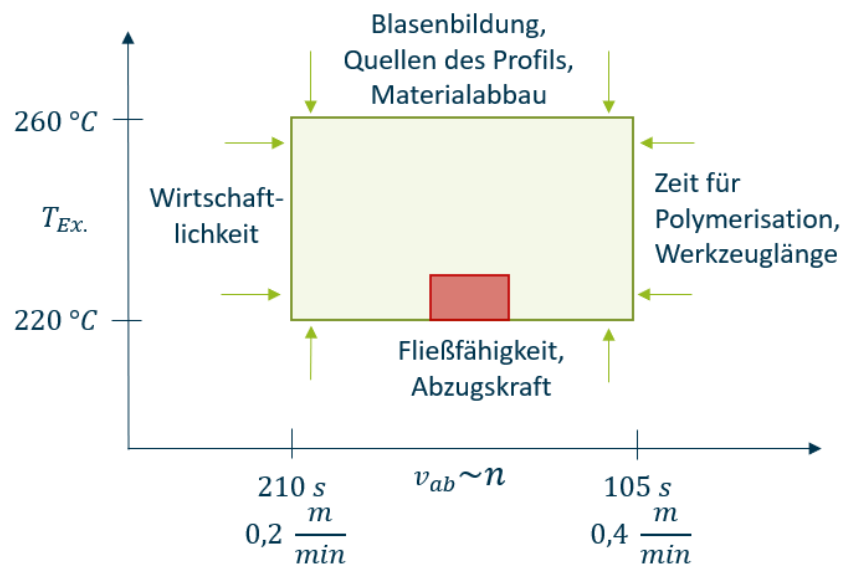


Abbildung 7 Prozessfenster des Pul-Ex-Prozesses aufgespannt durch Temperatur des Extrusionswerkzeuges $T_{Ex.}$ und Abzugsgeschwindigkeit v_{ab} bzw. Verweilzeit im Werkzeug.

Bestehende Herausforderungen zur Fertigung hybrider Profile waren die Verhinderung von Blasenbildung in der Grenzschicht zwischen Pultrudat und Coextrusionsschicht und die nicht ausreichende Temperaturstabilität der Pultrudate insbesondere bei hohen Temperaturen des Extrusionswerkzeuges. Aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen Pultrusions- ($100 - 140 \text{ °C}$) und Extrusionsprozess ($220 - 260 \text{ °C}$) ging das PMMA im Pultrusionsprofil durch Überschreiten der Glasübergangstemperatur ($T_g = 117 \text{ °C}$) in den gummi-elastischen Zustand über, wodurch sowohl Eigenspannungen durch die Faserondulation im Profil relaxieren sowie ein Aufquellen des Profils resultiert und das Profil zusätzlich durch den

Schmelzedruck plastisch verformt werden kann. Durch Verwendung eines Additivs zur Erhöhung der Temperaturstabilität konnte die Formhaltigkeit der Profile gesteigert werden (vgl. Abbildung 8). Basierend auf den o. g. Erkenntnissen wurde im Konsortium der Beschluss getroffen, dass alle weiteren Versuche unter Verwendung dieses Additivs durchgeführt werden, um die notwendige Temperaturstabilität zu gewährleisten.

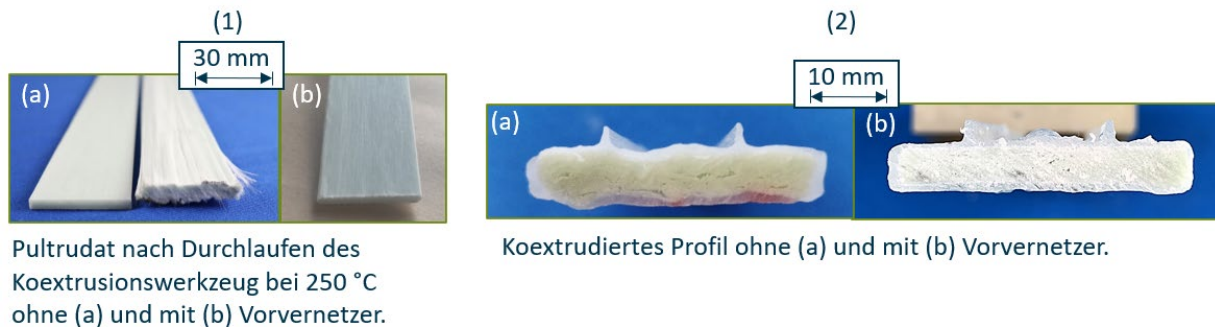


Abbildung 8 Einsatz eines Additivs zur Erhöhung der Temperaturstabilität

Die Blasenbildung an der Grenzfläche zwischen Pultrudat und Deckschicht kann auf das nicht in der Reaktion umgesetzte MMA im Pultrusionsprofil zurückgeführt werden. Das im Profil vorhandene Restmonomer verdampft beim Überschreiten des Siedepunktes ($T_s = 101 \text{ °C}$ bei Atmosphärendruck) und lagert sich an der Deckschicht ab. Bei geringeren Schmelzetemperaturen und entsprechend höherer Schmelzeviskosität bilden sich vermehrt kleine Gasblasen an der direkten Grenzfläche, dringen aber nicht bis zur Oberfläche vor (Abbildung 9 (a)). Ist die Schmelzviskosität der Deckschicht bei hohen Werkzeugtemperaturen gering, kommt es zu einer Ausbildung von sichtbaren Blasen an der Profiloberfläche (Abbildung 9 (b)).

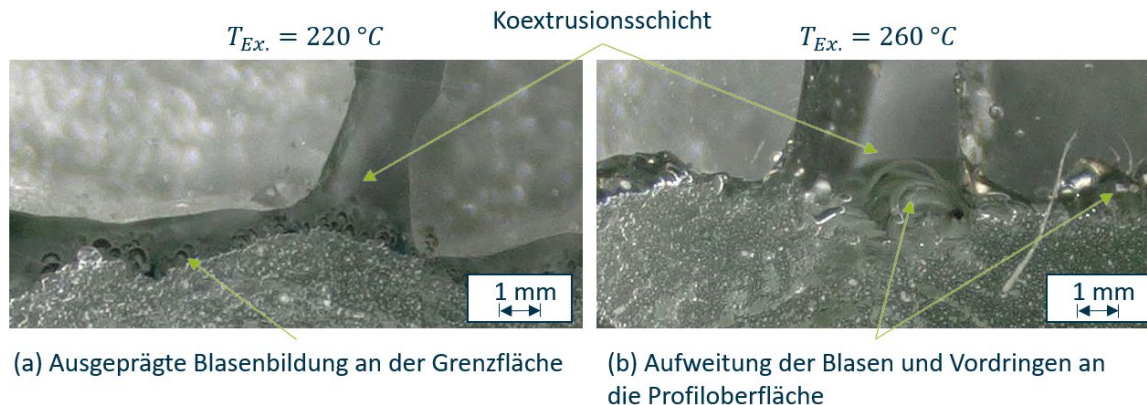


Abbildung 9 Blasenbildung im Coextrusionsprozess an der Grenzfläche von Pultrudat und Extrusionsschicht (a) und Aufweitung der Blasen und Vordringen an die Profiloberfläche (b)

Als weitere Herausforderung zur Fertigung hybrider Profile ergab sich somit die Reduzierung des Restmonomergehaltes im Pultrusionsprofil und die Reduzierung des Wärmeeintrages durch den Coextrusionsprozess, um das für die Ausbildung der Blasen ursächliche Verdampfen des Monomers zu eliminieren. Dies sollte durch die zusätzliche Integration einer UV-Härtestrecke und Verwendung eines entsprechenden Photoinitiators (z. B. SpeedCure BPO, Arkema S.A., Colombes, Frankreich) vor dem Eintritt in das Coextrusionswerkzeug und Minimierung der Wärmeeinflusszone durch ein möglichst kurzes Coextrusionswerkzeug und hohe Abzugsgeschwindigkeiten realisiert werden.

Zusätzlich zu den Untersuchungen am Rechteckprofil wurden Untersuchungen zur Herstellung einfacher Hohlprofile mit Elium-Harzmatrix (AP 2.4) durchgeführt. Neben der geänderten Profilgeometrie wurde auch eine alternative Peroxidkombination (P16, Tx 21S, Tx 131 von Nouryon N.V., Amsterdam, Niederlande) zur Steigerung der Produktionsgeschwindigkeit bei höheren Werkzeugtemperaturen analysiert. Durch Anpassung der Peroxidkombination war es möglich, bei erhöhter Werkzeugtemperatur die Abzugsgeschwindigkeit auf dem vorhandenen Versuchswerkzeug (0,5 m Länge) von 0,35 auf 0,5 m/min zu steigern. Um eine wirtschaftliche Produktion der Profile zu gewährleisten, wurde im Projektkonsortium festgelegt, die schnell reagierende Peroxidkombination zu verwenden.

Im Folgenden lag der Schwerpunkt der Untersuchungen weiterhin in der Eliminierung der Blasenbildung, der Bewertung der erzielten Profilqualität (Maßhaltigkeit, Oberflächenrauigkeit, mechanisches Verhalten) und der Steigerung der Profilkomplexität. Die Blasenbildung an der Grenzfläche zwischen Pultrudat und Deckschicht ist wie bereits erwähnt

auf das nicht in der Polymerisationsreaktion umgesetzte Methylmethacrylat (MMA) im Pultrusionsprofil zurückzuführen. Da die im Rahmen des Projektes zu entwickelnde Zielanwendung (Fenster- und Türprofile) erstklassige Oberflächeneigenschaften benötigen, wurde im Folgenden der Prozess weiterentwickelt, um die Blasenbildung zu eliminieren. Daher war es projektiertes Ziel, den Restmonomergehalt im Pultrusionsprofil und den Wärmeeintrag durch den Coextrusionsprozess zu minimieren, um das für die Ausbildung der Blasen ursächliche Verdampfen des Monomers zu verhindern. Dies wurde durch die Integration einer zusätzlichen UV-Härtestrecke und Verwendung eines entsprechenden Photoinitiators vor dem Eintritt in das Coextrusionswerkzeug und Minimierung der Wärmeeinflusszone durch ein möglichst hohe Abzugsgeschwindigkeiten realisiert. Die UV-Härtestrecke in Kombination mit einer Absaugung wurde zwischen dem Pultrusions- und dem Coextrusionswerkzeug integriert (vgl. Abbildung 10). Unter Verwendung eines entsprechenden Photoinitiators (SpeedCure BPO, Arkema S.A., Colombes, Frankreich), welcher zusätzlich der Reaktivmischung zugegeben wurde, wurden weitere Coextrusionsversuche am Rechteckprofile (35 x 4 mm²) durchgeführt. Das Harzsystem Elium 591 des assoziierten Partners Arkema S.A., Colombes, Frankreich, mit der vom Hersteller empfohlenen Peroxidkombination (P16, Laurox, Tx 21S von Nouryon N.V., Amsterdam, Niederlande) und dem Additiv zur Erhöhung der Temperaturstabilität wurde entsprechend der Erkenntnisse aus ZB 1 verwendet. Als Coextrusionsmaterial wurde, wie in vorangegangenen Versuchen, das schlagzähmodifizierte Polymethylmethacrylat (PMMA) *zk6hf* der Röhm GmbH, Darmstadt, mit einer Schmelzevolumenrate (MVR) von 0,42 cm³/min in den Extruder gespeist. Weiterhin wurde ein internes Trennmittel Pul24 von AXEL Plastics, Monroe, USA, zur Reduzierung der Abzugskraft der Reaktivmischung hinzugegeben. Eine schematische Darstellung inkl. der verwendeten Materialien ist in Abbildung 11 dargestellt.

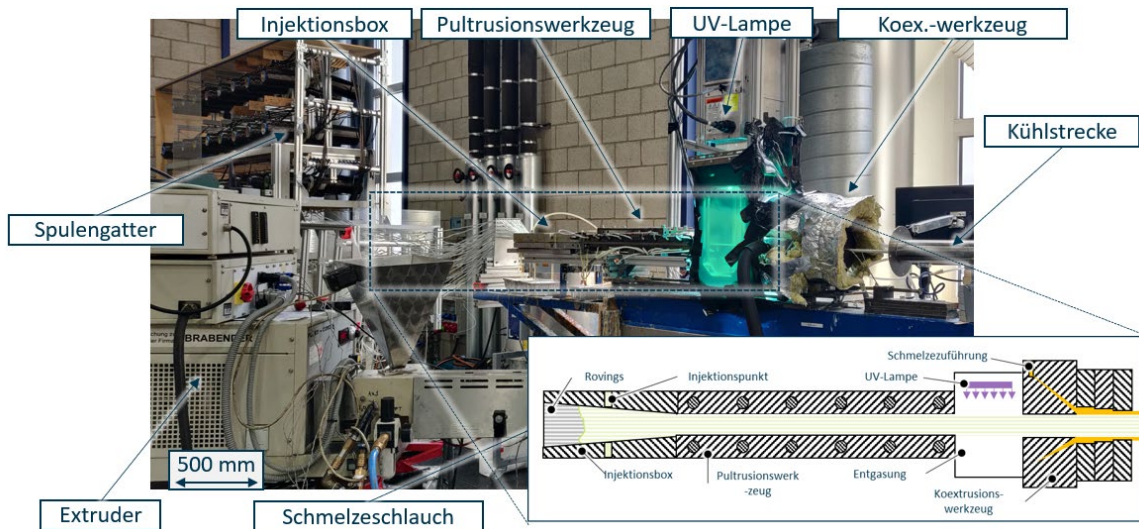


Abbildung 10 Anlagentechnik zur Coextrusion von Pultrudaten und integrierter UV-Härtung

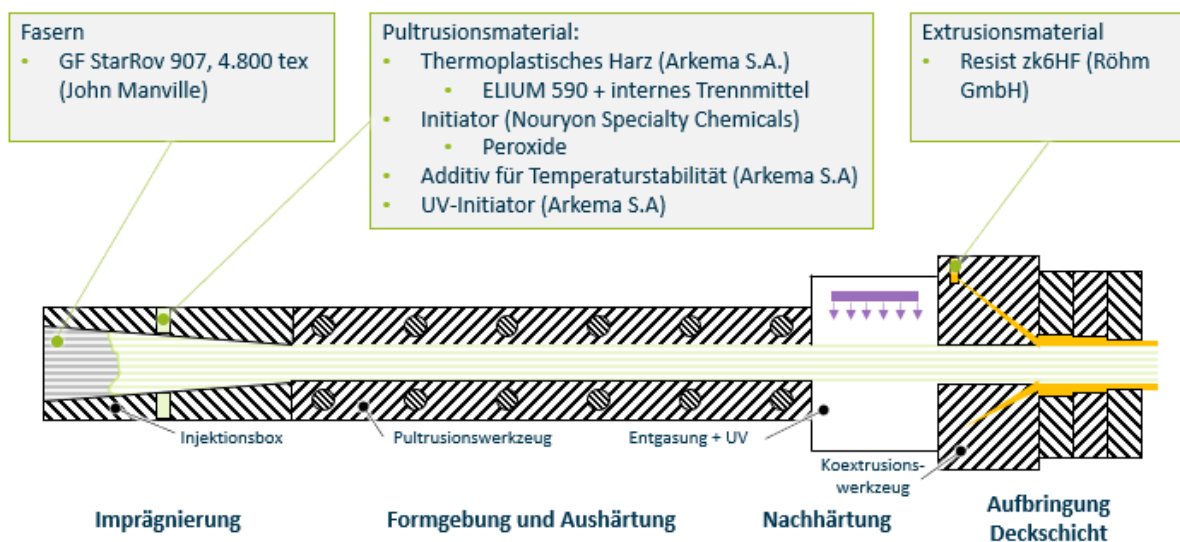


Abbildung 11 Schematische Darstellung des Coextrusionsprozesses und verwendete Materialien

Zunächst wurden Profile im zuvor identifizierten Prozessfenster (Abbildung 13) hergestellt. Bei Abzugsgeschwindigkeiten von 0,35 m/min wurde nur eine geringe Reduzierung der Blasenanzahl- und Größe (vgl. Abbildung 12) gefunden. Dies liegt nahe, dass das für die Ausbildung der Blasen ursächliche Verdampfen des Monomers durch die Integration einer zusätzlichen UV-Härtstrecke nicht gänzlich eliminiert werden kann.

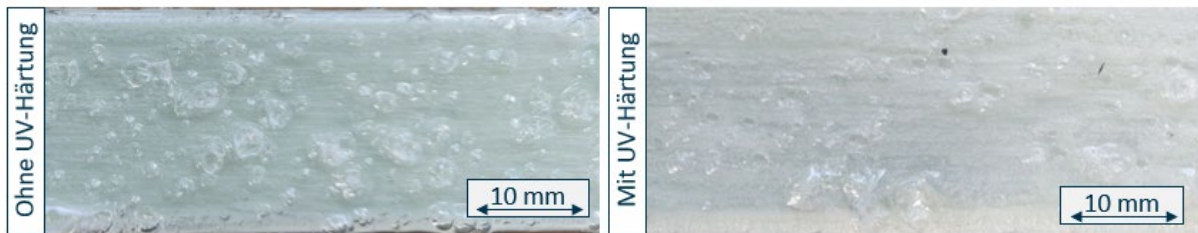


Abbildung 12 Blasenbildung auf der Bauteiloberfläche bei Anzugsgeschwindigkeiten von 0,35 m/min mit und ohne UV-Härtung

Um die Wärmeeinflusszone des Coextrusionswerkzeugs ($T_{Ex.} = 230 - 250 \text{ °C}$) zu verringern, wurde die Abzugsgeschwindigkeit bis auf 0,55 m/min gesteigert und zusätzlich eine Absaugung unmittelbar nach dem Austritt aus dem Pultrusionswerkzeug am pultrudierten Profil integriert. Die an diesem Prozesspunkt hergestellten Profile sind in Abb. 6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Profilqualität signifikant gesteigert und die Blasenausbildung vollständig eliminiert werden konnte. Aufgrund der Durchsatzlimitierung des vorhandenen Extruders konnte die Abzugsgeschwindigkeit nicht weiter gesteigert werden, da bei weiterer Steigerung der Liniengeschwindigkeit kein ausreichender Volumenstrom zur vollständigen Ummantelung des Pultrudats von Extruder zur Verfügung gestellt werden konnte. Um diese Beschränkung in Zukunft aufzuheben, wurde eine Flanschverbindung konstruiert, welche den Schmelzeschlauch und den damit verbundenen hohen Druckverlust ersetzt und somit höhere Durchsätze ermöglicht.

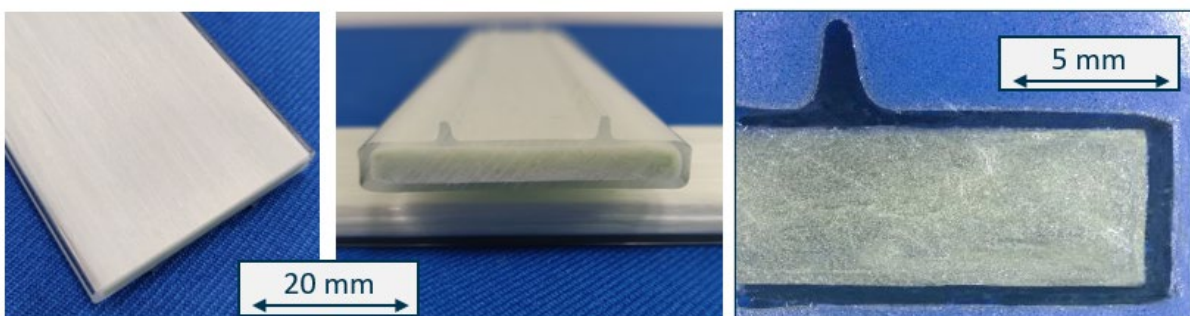


Abbildung 13 Coextrudierte Profile bei einer Abzugsgeschwindigkeit von 0,55 m/min und integrierter Absaugung

Die Temperaturprofile, die während des Prozesses im Pultrudat vorliegen, sind in Abbildung 14 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch Integration der UV-Lampe nicht nur der Aushärtevorgang (bzw. Initiatorzerfall) initiiert wird, sondern es auch zur Wärmegeneration

im Pultrusionsprofil kommt, welche eine deutliche Temperaturerhöhung auf bis zu 200 °C im hybriden Profil zur Folge hat. Außerdem ist ersichtlich, dass sich die Absoluttemperatur im Coextrusionswerkzeug trotz deutlich gesteigerter Abzugsgeschwindigkeit (und erwarteten verringerten thermischen Einflussbereich des Coextrusionswerkzeuges) durch die Integration der UV-Lampe erhöht. Somit bewirkt die UV-Lampe die folgenden komplementären Effekte:

- Verbesserte Profilqualität durch Eliminierung der Blasenbildung basierend auf:
 - o Temperaturerhöhung im Pultrusionsprofil und daraus resultierendes Verdampfen des Restmonomers, welches durch die profilenaher Absaugung abgeführt werden kann.
 - o Kombiniertes thermische und UV-initiiertes Zerfall der Initiatoren und somit erhöhter Umsatz und vermindertes Restmonomergehalt.
- Signifikante Steigerung der Abzugsgeschwindigkeit durch zusätzlichen Wärmeeintrag.

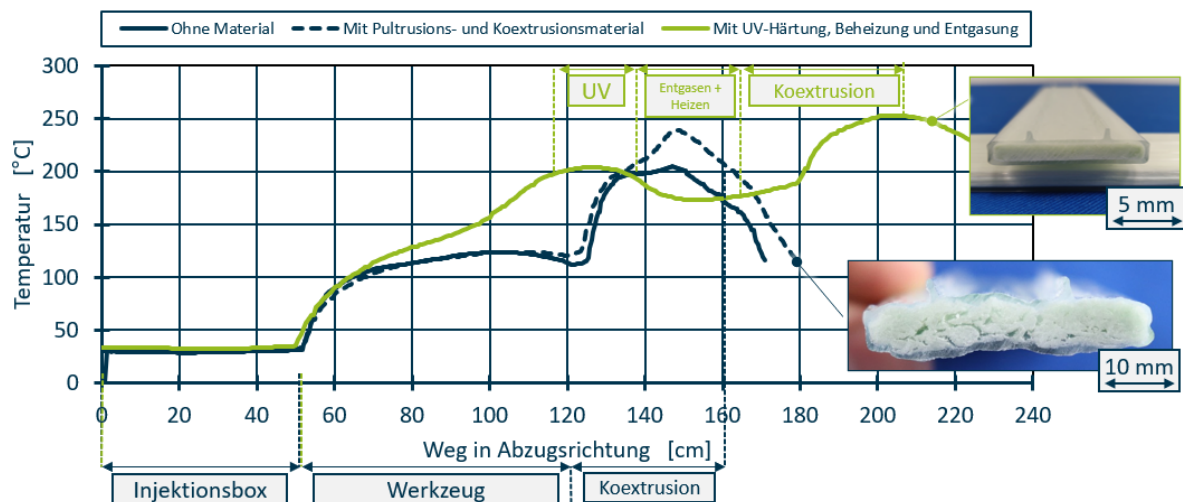


Abbildung 14 Coextrudierte Profile bei einer Abzugsgeschwindigkeit von 0,55 m/min und integrierter Absaugung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die umgesetzten Maßnahmen bestehend aus Rezepturanpassung, Integration der UV-Härtstrecke und zusätzlicher durch die UV-Lampe eingebrachte Wärme das ursprüngliche Prozessfenster zu höheren Abzugsgeschwindigkeiten von bis zu 0,55 m/min verschoben werden und die Wirtschaftlichkeit des Prozesses deutlich gesteigert werden konnte (vgl. Abbildung 15).

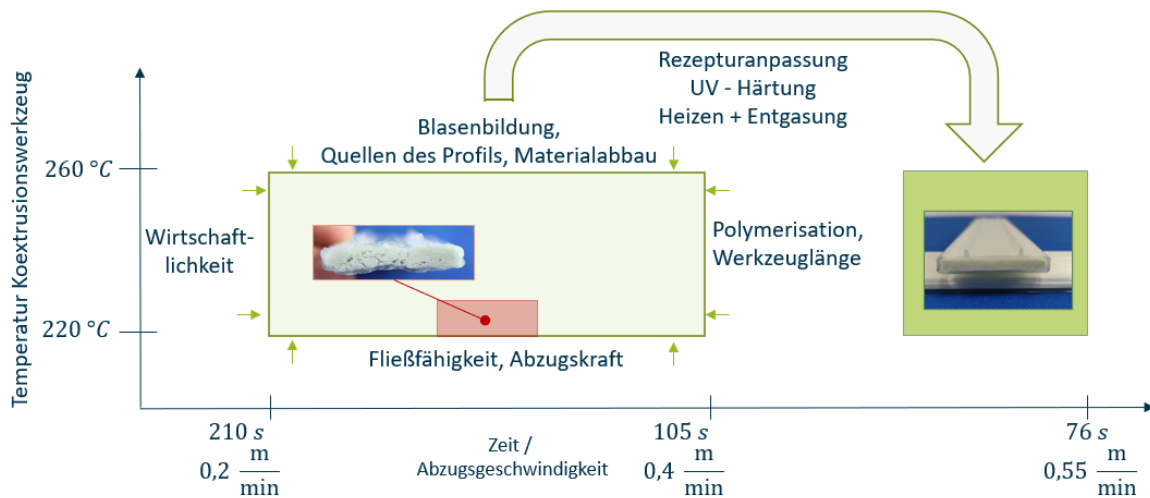


Abbildung 15 Prozessfenster des Pul-Ex-Prozesses (mit und ohne UV-Härtestrecke) aufgespannt durch Temperatur des Extrusionswerkzeuges $T_{Ex.}$ und Abzugsgeschwindigkeit v_{ab} bzw. Verweilzeit im Werkzeug.

Im Folgenden wurde die Profilqualität der weiterentwickelten Prozesse durch Untersuchung der Maßhaltigkeit, der Oberflächenrauheit (DIN EN ISO 4287) und der mechanischen Eigenschaften der Profile durch 3-Punkt-Biegeversuche (DIN EN ISO 14125) sowie Schlagbiegeversuche (ISO 179-1/1eU^b) analysiert.

Maßhaltigkeit der Profile:

In Abbildung 16 ist der Einfluss der Abzugsgeschwindigkeit sowie der Einfluss der Prozesskonfiguration auf die resultierende Profildicke dargestellt. Ohne die UV-Aushärtestrecke kommt es (auch bei erhöhten Abzugsgeschwindigkeiten) zum Aufquellen der Profile und ausgeprägter Blasenbildung an der Bauteiloberfläche (vgl. Abbildung 12) durch unvollständige Polymerisation, sodass sowohl Eigenspannungen durch die Faserondulation im Profil relaxieren sowie ein Aufquellen des Profils resultiert. Ab einer Abzugsgeschwindigkeit von 0,4 m/min liegen die gemessenen Dicken der coextrudierten Profile in tolerierbaren Bereichen. Die Toleranzfeldbreite nach DIN 16941 ist in grün dargestellt. Nach Rücksprache und Praxiserfahrung des Projektpartners REHAU Industries SE & Co. KG, Rehau, wurde gemeinsam mit den Projektpartnern definiert, dass für einen stationären und stabilen Coextrusionsserienprozess eine geringere Toleranzfeldbreite von $\pm 0,1$ mm für das Coextrudat anzustreben ist. Dies kann z. B. durch Beaufschlagung von Übermaßen zur Kompensation

thermischer und chemischer Schwindungsvorgänge bei der Werkzeugauslegung und -konstruktion berücksichtigt werden.

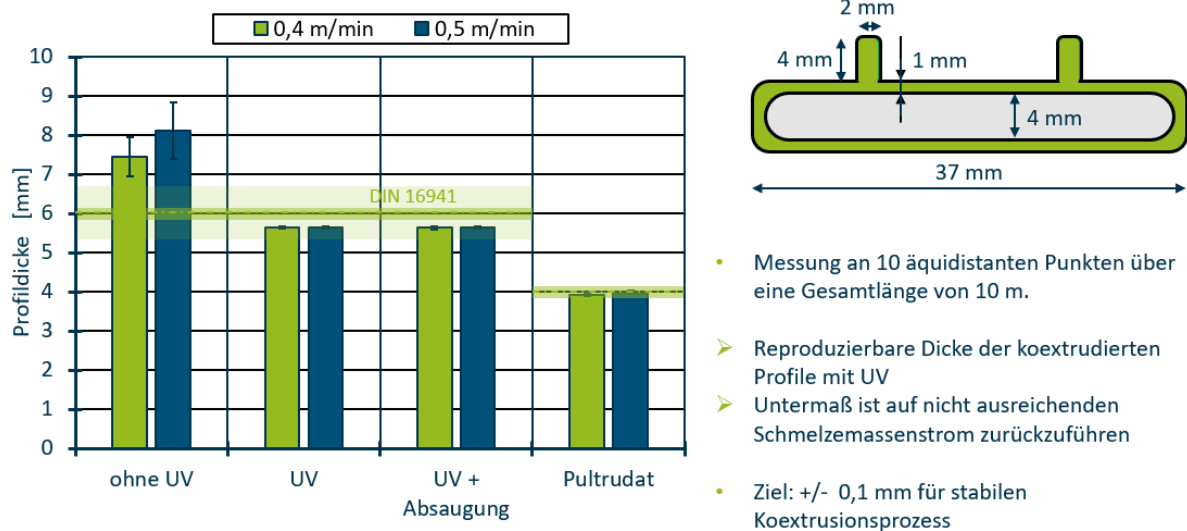


Abbildung 16 Einfluss der Abzugsgeschwindigkeit und Prozesskonfiguration auf die erzielte Maßhaltigkeit der Profile gemessen mittels Messschieber.

Oberflächenrauigkeit der Profile

Die Charakterisierung der Oberfläche erfolgt mittels dem Rauigkeitsmessgerät MarSurf M 310 der Mahr GmbH, Göttingen. Es wurde jeweils die Rauigkeiten quer und in Abzugsrichtung gemessen. Die primären Oberflächenprofile wurden nach ISO 16610 mit den in Abbildung 17 gelisteten Wellenlängen λ gefiltert. In Abbildung 17 sind die richtungsgemittelten Rauigkeiten (R_a) für unterschiedliche Abzugsgeschwindigkeiten und Prozesskonfigurationen angegeben. Mit Abzugsgeschwindigkeiten $v_{ab} \geq 0,45$ m/min und unter Verwendung eines Abzugs (Ab.) ist eine deutliche Verbesserung der Oberflächenqualität zu verzeichnen. Mit weiterer Steigerung der Abzugsgeschwindigkeit auf 0,55 m/min nahm die Rauigkeit zunehmend ab und lag im Bereich eines extrudierten PVC-Profiles ohne Faserverstärkung. An dieser Stelle soll vermerkt werden, dass auch noch weitere Eigenschaften wie Farbgenauigkeit und Glanzgrad von Relevanz für das optische Erscheinungsbild sind, über welche an dieser Stelle noch keine Aussage getroffen werden kann.

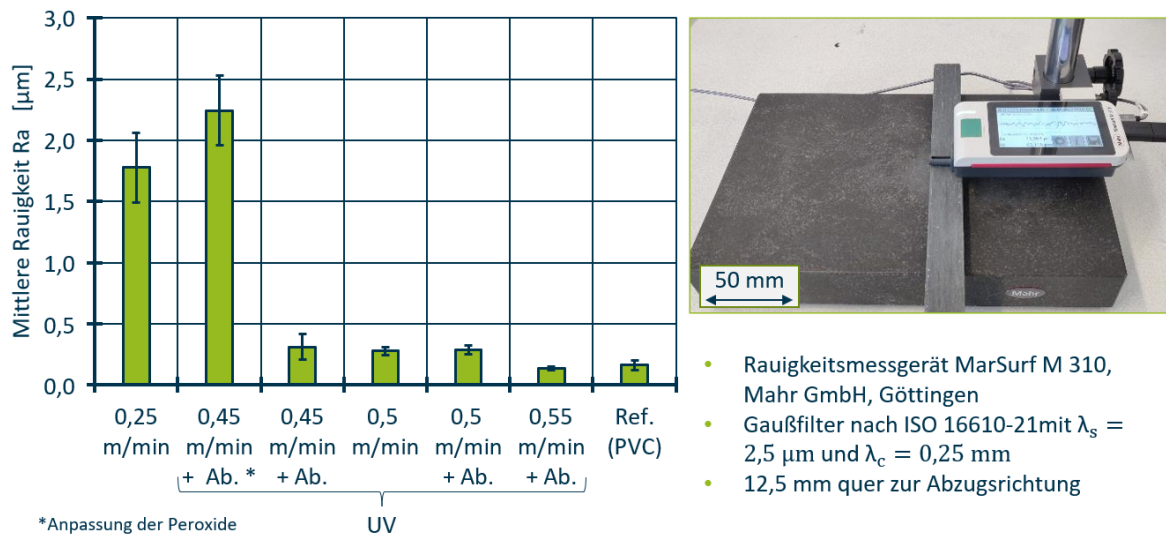
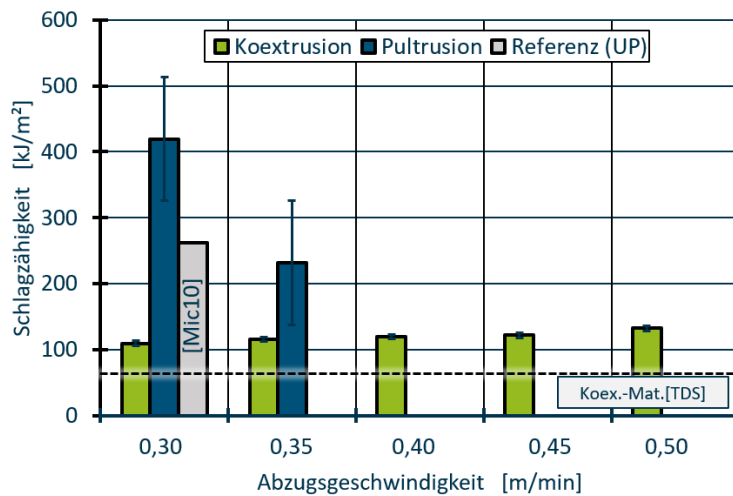


Abbildung 17 Einfluss der Abzugsgeschwindigkeit und Prozesskonfiguration (Ab.: mit Abzug) auf die Oberflächenqualität der coextrudierten Profile.

Mechanische Eigenschaften (3-Punkt-Biegeeigenschaften, Schlagbiegeversuche)

Neben den zuvor dargelegten Ergebnissen wurden aus den coextrudierten Profilen Prüfkörper sowohl für Schlagbiegeversuche als auch für 3-Punkt-Biegeuntersuchungen präpariert. Die Ergebnisse der Schlagbiegeversuche sind in Abbildung 18 dargestellt. Die FVK-Profile wurden mit pultrudierten endlosfaserverstärkten Profilen mit ungesättigten Polyesterharzen aus [Mic10] gebenchmarkt. Es ist zu erkennen, dass sich der thermoplastische Charakter der Matrix zeigt und am reinen Pultrusionsprofil deutlich höhere Schlagzähigkeiten als mit einem duroplastischen Werkstoff erzielt werden können. Durch die coextrudierte Deckschicht nimmt die Schlagzähigkeit sprunghaft ab. Diese Entwicklung ist unter Einbeziehung der Mischungsregel, nach der sich die mechanischen Eigenschaften richtungsabhängig als Summe der Einzelkonstituenten ergeben, zu erwarten. Die ermittelten Schlagzähigkeiten des hybriden Profils mit bis zu 132 kJ/m² bei einer Abzugsgeschwindigkeit von 0,55 m/min liegen deutlich über den in der Anforderungsliste (AP 1) definierten Werten von 60 kJ/m².



- DIN EN ISO 179-1, 25 J Schlaghammer
- Pendelschlagwerk des Typs S101 der Firma ZwickRoell, Ulm
- Abfall der Schlagzähigkeit aufgrund von Quellen des Profils ab 0,35 m/min
- Anforderungen (> 60 kJ/m²) werden übertroffen

Abbildung 18 Einfluss der Abzugsgeschwindigkeit und auf die Schlagzähigkeit für pultrudierte und coextrudierte Profile

Zuletzt wurde der im 3-Punkt-Biegeversuch ermittelte Biegemodul und die Bruchdehnung betrachtet. Die Profile wurden mit einer Abzugsgeschwindigkeit von 0,5 m/min hergestellt. Weiterhin wurde eine andere Rezeptur (Elium C595 E) untersucht, welche sich zusätzlich für die Verarbeitung im offenen Bad eignet. Hintergrund ist, dass eine Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften durch den in der C595 E enthaltenen Wachs ausgeschlossen werden kann und gleichzeitig eine Kompatibilität mit dem UV-Prozess sichergestellt werden sollte.

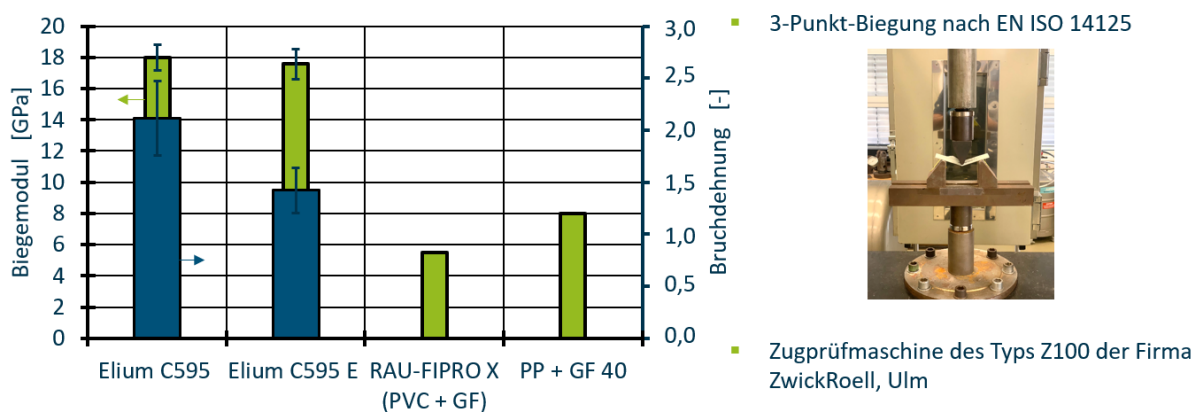


Abbildung 19 Einfluss des Harzsystems auf die Biegemoduli und die Bruchdehnung für coextrudierte Profile

Die Ergebnisse zeigen, dass beide Rezepturen in einem Biegemodul von ca. 18 GPa resultieren und kein signifikanter Unterschied gefunden werden konnte. Im Vergleich der ermittelten

Moduli mit aus FVK gefertigten Fenstern (RAU-FIBRO X) wird der Vorteil der Endlosfaserverstärkung im Gegensatz zu einer Kurzfaserverstärkung deutlich. Die Bruchdehnung liegt im Bereich von 2 %, wobei das C595 E Profil eine geringere Bruchdehnung von 1,4 % aufweist.

Herstellung von einfachen thermoplastischen Hohlprofilen

Im Folgenden wird auf die Herstellung von endlosfaserverstärkten Hohlprofilen eingegangen. Zunächst wurden einfache Hohlprofile mit dem vom Projektpartner Steinhuder Werkzeugbau GmbH, Wunstorf, gefertigten Werkzeug hergestellt. Eine Herausforderung bestand darin, die Fasern symmetrisch in das Werkzeug einzuführen, um so ein Verschieben des schwimmend gelagerten Kerns und daraus resultierende ungleichmäßige Wanddickenverteilung auszuschließen. Weiterhin wurde auf der Unterseite der Injektionsbox eine zusätzliche Bohrung für die Injektion des Harzes vorgesehen, um die Faserimprägnierung zu verbessern. Der Versuchsaufbau und die hergestellten Profile sind in Abbildung 20 dargestellt.

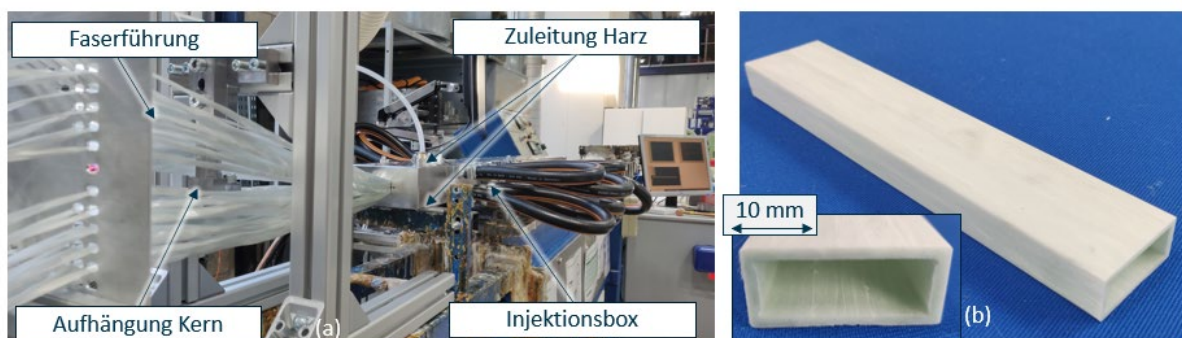


Abbildung 20 Versuchsaufbau zur Fertigung endlosfaserverstärkter Hohlprofile (a) und hergestellte Pultrusionsprofile (b).

Bei Zugabe des Additivs zur Erhöhung der Temperaturstabilität während des Produktionsprozesses von Hohlprofilen wurde ein sprunghafter Anstieg der Abzugskraft, welcher Letzen Endes zu einem Abbruch des Prozesses führt, beobachtet (Abbildung 21 (a)).

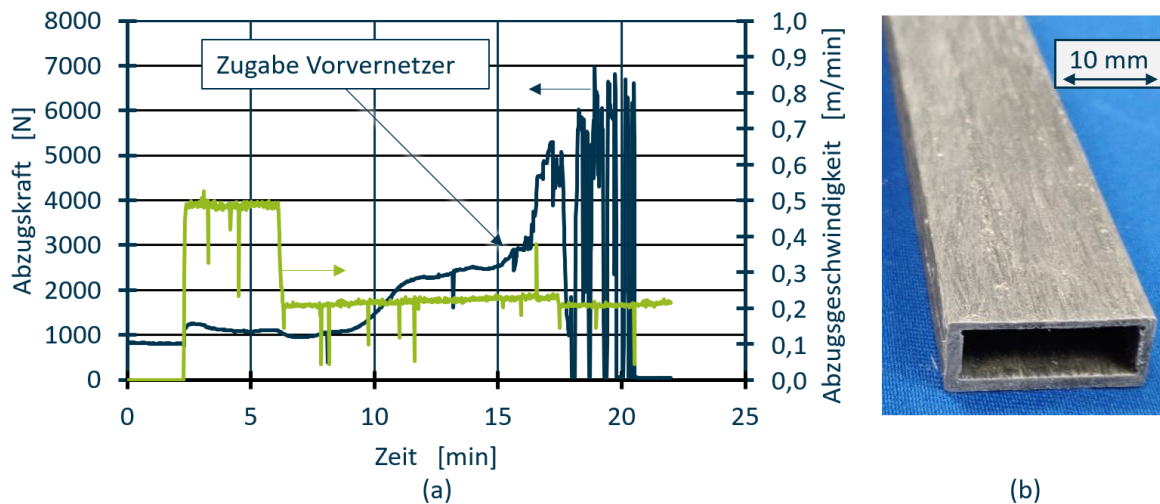


Abbildung 21 Verlauf von Abzugsgeschwindigkeit und -kraft während des Pultrusionsprozesses von Hohlprofilen. Bei Zugabe des Additivs zur Erhöhung der Temperaturstabilität ist ein sprunghafter Anstieg der Abzugskraft zu verzeichnen (a). Hohlprofile mit eingefärbter Matrix (b).

Eine mögliche Ursache könnte eine adhäsive Wechselwirkung des Reaktionsgemischs und der (im Vergleich zum Rechteckprofil deutlich größeren kontaktierten) Werkzeugoberfläche darstellen. Daher wurde vom Projektkonsortium beschlossen, dass im weiteren Verlauf die Werkzeuge verchromt werden, um die Anhaftung am Werkzeug und somit die Abzugskräfte zu minimieren. Um die Machbarkeit zum Einfärben des Profils zu untersuchen, wurden Hohlprofile mit einem einer für das Matrixsystem geeigneten Farbe der Firma Chromaflo Technologies B.V., Maastricht, Niederlande, in RAL 7016 (Anthrazit) eingefärbt (Abbildung 21 (b)).

Herstellung von komplexen thermoplastischen Hohlprofilen

Neben dem einfachen und punktsymmetrischen Hohlprofil, wurde auch die Herstellung komplex geformter Pultrusionsprofile (vgl. Abbildung 22) untersucht. Es wurden sowohl Versuche am IKV als auch Versuche im Technikum des assoziierten Partner Arkema S.A in Porcellette, Frankreich, durchgeführt.

Einwellenzerkleinerer und der Prallreaktor. Zunächst wurde die am IKV vorhandene Schneidmühle 3545-KUP der Rapid Granulier-Systeme GmbH & Co. KG, Kleinostheim, verwendet. Das Mahlgut wurde mittels eines Siebs in drei Fraktionen aufgeteilt. Die Siebdurchmesser sind

- Schneidmühle: 3545-KUP, Rapid Holding AG, Dietikon, Schweiz
- Unterschiedliche Siebdurchmesser \varnothing

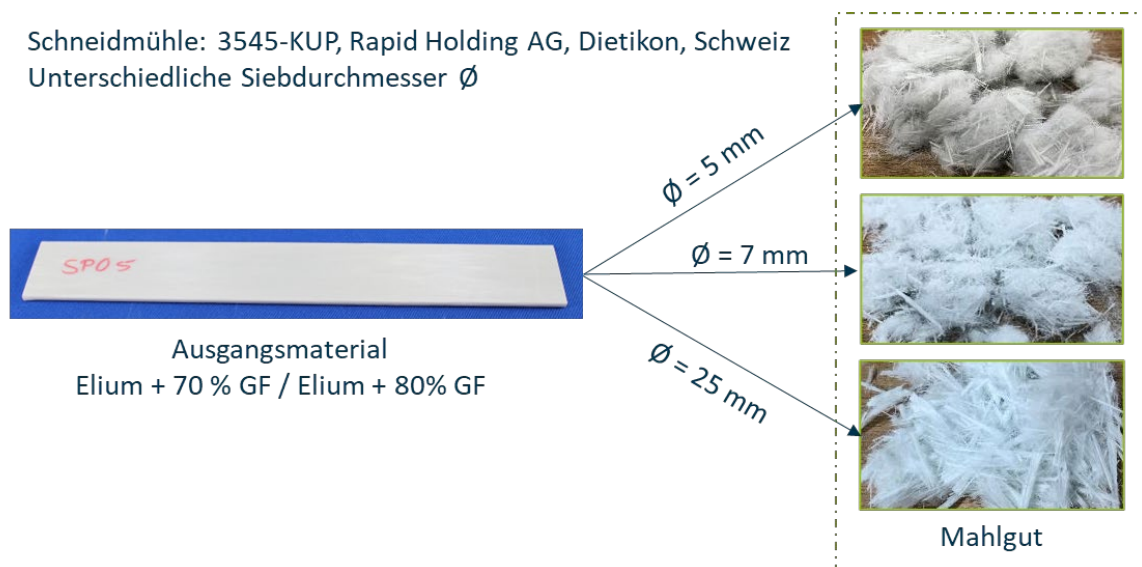


Abbildung 23 zu entnehmen. Auffällig ist, dass die Glasfasern größtenteils zur Hauptorientierungsrichtung abgeschert wurden und nicht brachen. Weiterhin war ein „Aufbauschen“ der Fasern zu beobachten. Um den Einfluss der Profilgeometrie auf den Zerkleinerungsprozess zu untersuchen, wurden Profile mit unterschiedlichen FVG und zusätzlich Flachprofile mit einer Dicke von 2 mm (Referenzprofil: 4 mm) zerkleinert. Dabei konnte kein Einfluss der Profilgeometrie auf das Mahlgut festgestellt werden. Das Mahlgut ist

in

- Schneidmühle: 3545-KUP, Rapid Holding AG, Dietikon, Schweiz
- Unterschiedliche Siebdurchmesser \emptyset

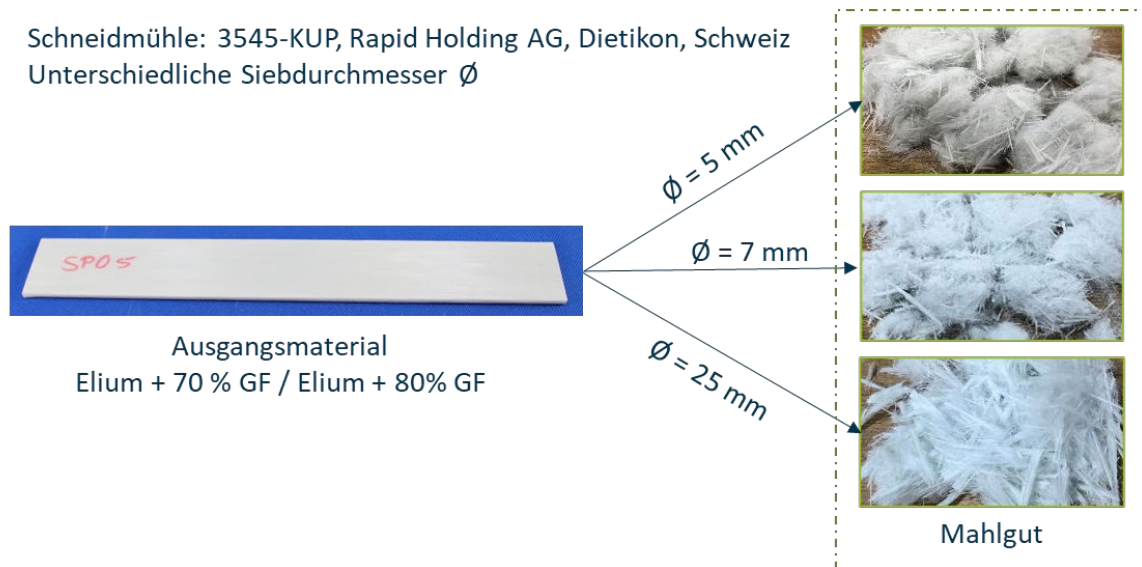


Abbildung 23 dargestellt.

- Schneidmühle: 3545-KUP, Rapid Holding AG, Dietikon, Schweiz
- Unterschiedliche Siebdurchmesser \emptyset

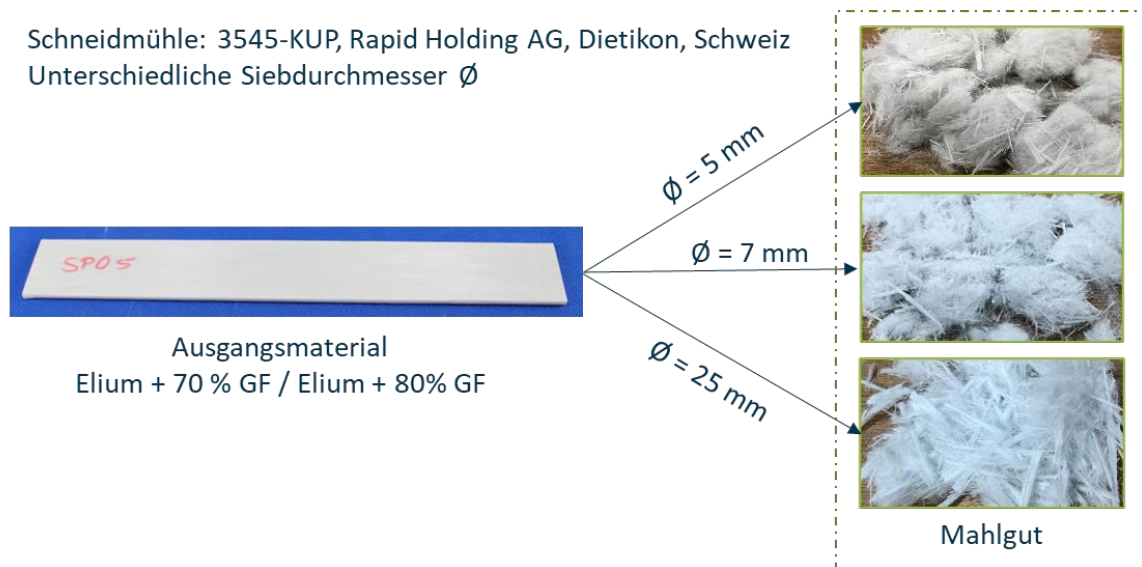


Abbildung 23 Mit der Schneidmühle zerkleinerte und mittels Siebs fraktionierte Profile

Das Mahlgut aus der Schneidmühle eignete sich aufgrund der geringen Schüttdichte nur bedingt zur Herstellung von kurzfaserverstärkten Compounds auf den Laboranlagen des IKV. Durch die Beschaffenheit des Mahlguts konnten die vorhandenen gravimetrischen Dosierer auch bei maximaler Leistung keine ausreichende Menge an Fasern zudosieren. Somit konnten lediglich Compounds mit einem Fasergewichtsgehalt von maximal 15 Gew.-% hergestellt werden. Der E-Modul konnte hier zwar um 40 % gesteigert werden, im Projekt wurden jedoch

Fasergehalte von bis 50 Gew.-% angestrebt, sodass nach einem alternativen Zerkleinerungsverfahren gesucht wurde.

Als weiteres Verfahren wurde die Zerkleinerung in einem Einwellenzerkleinerer extern bei der Untha Deutschland GmbH, beauftragt und untersucht. Auch hier erwies sich das Zerkleinerungsverfahren als ungünstig. Nach dem Zerkleinerungsschritt war das Mahlgut nur teilweise gut zerkleinert. Das Mahlgut wies sehr viele große Stücke auf, die teilweise im Durchmesser 10 mm und in der Länge 20 cm überschritten (vgl. Abbildung 24).



Abbildung 24: Mahlgut aus dem Einwellenzerkleinerer

Allein dadurch wurde das Material durch die am IKV vorhandenen Materialien undosierbar und von dem Doppelschneckenextruder nicht einziehbar. Eine erneute Zerkleinerung des erhaltenen Mahlguts könnte dieses Problem beheben, wäre in einem großindustriellen Prozess jedoch nicht wirtschaftlich. Aus diesem Grund wurde darauf verzichtet. Zudem war das Material nach dem Zerkleinerungsprozess mit Metallteilen, welche die Anlagentechnik beschädigen können, verunreinigt. Hierdurch konnte das Material nicht mehr weiterverarbeitet werden.

Als dritte Möglichkeit zur Zerkleinerung der Profile wurde der Prallreaktor untersucht. Hierfür wurden die hergestellten Pultrusionsprofile extern bei der Firma Schäfer Elektrotechnik und

Sondermaschinen GmbH, Rüssingen, Deutschland, zerkleinert. Das hieraus erhaltene Mahlgut wies eine Partikelgröße von bis zu 20 mm Länge und einem Durchmesser von maximal 4 mm auf, sodass dieses problemlos weiterverarbeitet werden konnte (vgl. Abbildung 25).

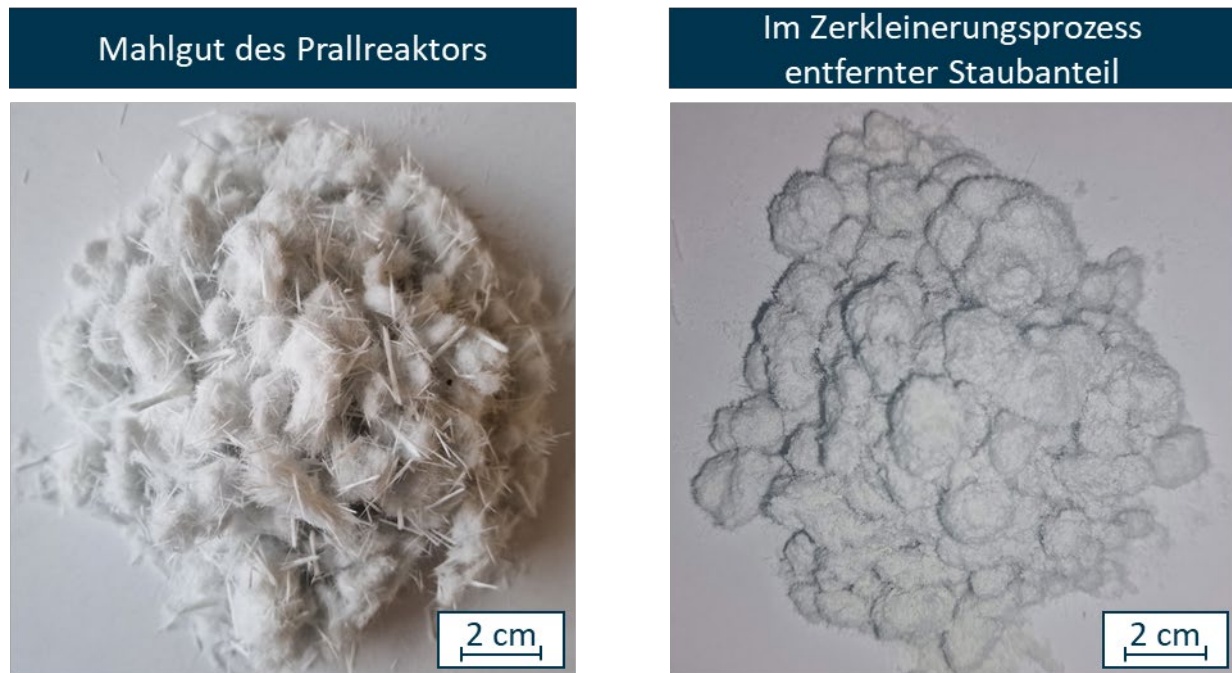


Abbildung 25: Mahlgut und Staubanteil aus dem Prallreaktor

Daher wurde in den nachfolgenden Versuchen in allen Versuchspunkten dieses Mahlgut verwendet. Zur Bestimmung des realen Faseranteils wurde die Matrix und die Schlichte durch Pyrolyse bei 650 °C entfernt (K1253-KAT von Heraeus GmbH, Deutschland). Durch Wiegen der Fraktionen vor und nach der Veraschung der Matrix konnte der Anteil der übrig gebliebenen Fasern ermittelt werden. Aus vier verschiedenen Messungen ergab sich im Mittel ein Fasergewichtsanteil von 87,6 Gew.-% für das in den Folgeversuchen verwendete Mahlgut und zu 79,8 Gew.-% für den im Zerkleinerungsprozess entfernten Staubanteil.

Vorversuche zur Findung der optimalen Zugabestrategie des Mahlguts

Anders als bei Neufasern, welche im Lieferzustand eine definierte Länge aufweisen, weist das Material nach dem Zerkleinerungsprozess, bereits eine Faserlängenverteilung auf. Dies hat einen deutlichen Einfluss auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften. Neufasern

wurden im Compoundierprozess zur Verringerung der Faserlängendegradation und damit auch zum Erhalt der mechanischen Eigenschaften erst in der zweiten Hälfte oder dem letzten Drittel dem Doppelschneckenextruder zudosiert (vgl. Abb. 16). Aufgrund der uneinheitlichen Faserlänge und der Existenz von Faseragglomeraten im zermahlenden Pultrudat, konnte der Einfluss des Zugabeorts des Pultrudats nicht direkt abgeschätzt werden. Hier steht eine schonende Faserverarbeitung durch spätere Faserzugabe in Konkurrenz zu einer ausreichenden Zerteilung der Faseragglomerate und einem hinreichenden Aufschmelzen des noch am Pultrudat haftenden Matrixmaterials sowie einer homogenen Faserverteilung. Daher wurde in Vorversuchen zunächst die optimale Zugabestrategie für das Mahlgut ermittelt.

Der Aufbau der verwendeten Compoundierstrecke ist in Abbildung 26 dargestellt:

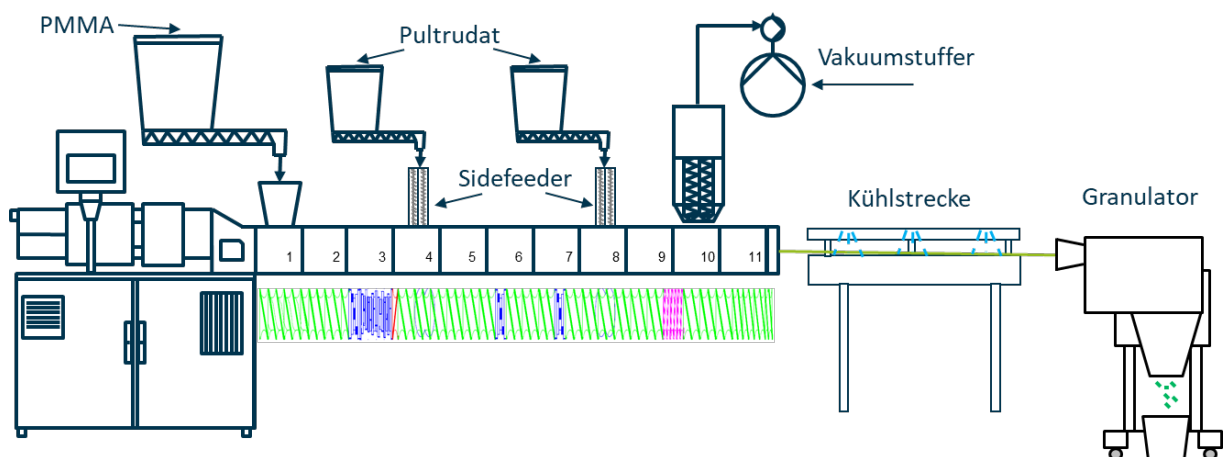


Abbildung 26: Aufbau der Compoundierstrecke in den Vorversuchen

Als Matrixmaterial wurde hierfür ein PMMA des Typs Plexiglas Resist zk6HF der Röhm GmbH, Darmstadt, ausgewählt. Dieses wurde in den Haupttrichter des Doppelschneckenextruders hinzugegeben. Das Material wurde mit 0,5 Gew.-% des Thermostabilisators Irganox B225 der Firma BASF SE, Ludwigshafen, vorgemischt. In Gehäuse drei befand sich eine Plastifizierzone (vgl. Abbildung 26), in welchem das Matrixmaterial durch Knetelemente aufgeschmolzen wird. In Gehäuse sechs und sieben wurden jeweils ein Knetelement zur Erhöhung der dispersiven Mischwirkung und möglichst hohen Homogenisierung des Materials eingebracht. Zwischen Gehäuse neun und zehn wurde ein Mischelement eingesetzt, um die distributive Mischwirkung zu erhöhen und eine ausreichende Homogenität des Granulats zu gewährleisten.

Es wurden zunächst Compounds mit einem Fasergewichtsanteil von 30 Gew.-% Glasfasern hergestellt. Das zerkleinerte Pultrudat wurde gravimetrisch und mittels eines Sidefeeders dem Doppelschneckenextruder zugeführt. Das Mahlgut wurde in drei Versuchspunkten an verschiedenen Stellen zudosiert. Zum einen wird das Mahlgut ausschließlich in Gehäuse acht (Düse) und zum anderen ausschließlich in Gehäuse vier (Trichter) zudosiert. Zusätzlich wurde in einem Versuchspunkt noch eine Zugabestrategie untersucht, bei der die Hälfte des Dosiergewichts jeweils auf Gehäuse vier und acht verteilt wurde (50/50). Der Gesamtdurchsatz wurde auf 8 kg/h und die Schneckendrehzahl auf 180 U/min festgelegt.

Um die mechanischen Eigenschaften zu prüfen, wurden kleine Zugprüfkörper des Typs 1 BA nach DIN EN ISO 527 auf einer Spritzgießmaschine des Typs Babyplast 6/10P der Christmann Kunststofftechnik GmbH, Kierspe, hergestellt. Der Vorteil dieser Mikrospritzgießmaschine ist, dass es sich hierbei um eine Zwei-Kolben-Maschine handelt. Die Plastifizierung erfolgt hier ausschließlich durch Wärmeleitung in den beiden Spritzkolben. Dadurch kann eine weitere Faserschädigung durch eine Plastifizierschnecke ausgeschlossen werden.

Die hergestellten Bauteile wurden in Zugprüfungen nach DIN EN ISO 527 auf einer Prüfmaschine des Typs Z10 der Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, geprüft.

Die Abbildung 27 zeigt die E-Module für die drei Versuchspunkte. Auch hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Zugfestigkeiten. Die Zugabe in der Nähe der Düse weist auch die höchsten Moduln auf.

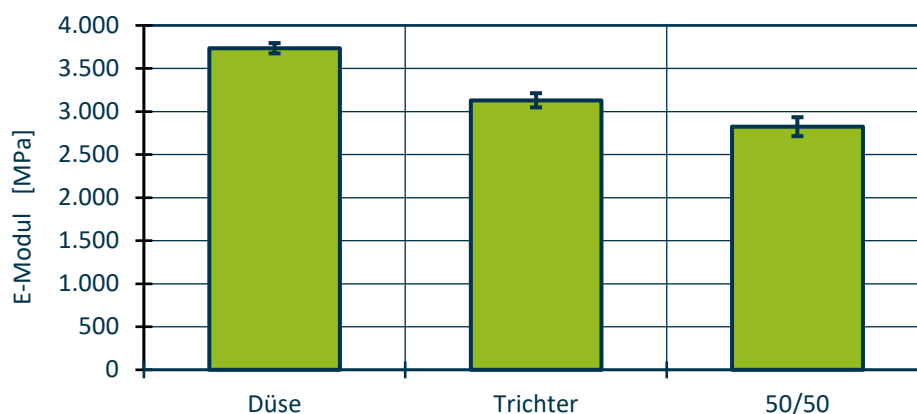


Abbildung 27: E-Modul in Abhängigkeit des Zugabeorts

Es konnte ein E-Modul von maximal $3735,18 \pm 59,66$ MPa erreicht werden. Eine reine Zugabe des zerkleinerten Pultrudats stromaufwärts in Richtung des Trichters liegt mit

3130,09 ± 82,36 MPa bereits 16,2 % unterhalb der Düsenzugabe. Eine Aufteilung der Dosierung des Mahlguts bewirkt hier ebenfalls eine deutliche Reduzierung des E-Moduls um 24,5 % auf 2823,35 ± 110,17 MPa. Der Anstieg der Standardabweichung weist außerdem auf starke Schwankungen in der Faserlängenverteilung und der Homogenität der Faserverteilung hin. Für die folgenden Versuche wurde daher die Zugabe zum spätestmöglichen Zeitpunkt in Gehäuse 8 gewählt.

Verwendete Materialien, Anlagentechnik und Versuchsdurchführung

Materialien

In der Hauptversuchsreihe wurde das Material nach der Zerkleinerung auf dem Doppelschneckenextruder zu neuen kurzfaserverstärkten Granulaten oder zu kurzfaserverstärkten Profilen verarbeitet. Hierzu wurden verschiedene Matrixmaterialien untersucht. Dazu gehören Polymethylmethacrylat (PMMA), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und Polyvinylchlorid (PVC). Die genauen Typenbezeichnungen und Hersteller sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Material	Typ	Hersteller
PMMA	Plexiglas Resist zk6HF	Röhm GmbH, Darmstadt, Deutschland
ABS	SKYLONITRILE rABS25-16BK	SKYTECH, Le Val d'Hayez, Frankreich
PVC	Rehau Dryblend	REHAU Industries SE & Co. KG, Rehau, Deutschland

Tabelle 1: Verwendete Matrixmaterialien

Zum Vergleich mit konventionell erhältlichen Materialien wurden für die mechanischen Untersuchungen ebenfalls zwei Glasfaserverstärkte ABS-Typen (ALTECH ABS A 2020/100 GF20 und ALTECH ABS Eco 2017/500 GF17) der Firma Mocom Compounds GmbH & Co. KG, Hamburg, durchgeführt.

Als Fasermaterialien wurde zum einen die recycelte Faser aus den pultrudierten Profilen und zum anderen zum Vergleich für die Versuche mit dem PMMA-Material von Röhm auch zwei Neufasertypen (ThermoFlow CS EC 13 636 4 mm (n1) und ThermoFlow CS EC 10 672 4 mm (n2)) der Firma Johns Manville Corp., Denver, USA, verwendet.

Zusätzlich wurden in einigen Versuchspunkten Additive zugesetzt. Dies bezieht sich auf alle Versuchspunkte mit dem Röhm PMMA-Material, in welchen ein Thermostabilisator des Typs Irganox B225 der BASF SE, Ludwigshafen, eingearbeitet wurde. In den Versuchen mit den Neufasern wurden ebenfalls drei verschiedene zusätzliche Additive bzw. Schlagzähmodifikatoren, welche auch als Kompatibilisatoren, Haftvermittler oder Dispergierungsmittel dienen, eingesetzt. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Bezeichnung	Typenbezeichnung / Hersteller	Wirkung
HVA	Modiper A4300, / NOF Corp., Japan	Kompatibilisator, Schlagzähmodifikator
HVB	Scona TSEV 6113 GB / BYK GmbH, Deutschland	Haftvermittler, Schlagzähmodifikator
HVC	Scona TSEV 2113 GB / BYK GmbH, Deutschland	Dispergierungsmittel, Schlagzähmodifikator

Tabelle 2: In den PMMA-Versuchen verwendete Additive

Bei einigen ABS-Versuchspunkten wurde ebenfalls der Einsatz eines ABS-basierten Maleinsäureanhydrid gepfropften Kompatibilisators des Typs BONDYRAM 6000 der IMCD Deutschland GmbH & Co. KG, Köln, untersucht. In den Ergebnissen sind die Versuchspunkte mit den eingesetzten Additiven jeweils durch ihre Bezeichnung gekennzeichnet.

Aufbau der Compoundierversuche

Die Compoundierversuche wurden auf einem Doppelschneckenextruder (DSE) des Typs ZSK26Mc der Firma Coperion GmbH, Stuttgart, durchgeführt. Der Aufbau der verwendeten Compoundierstrecke für die PMMA- und ABS-Matrixmaterialien ist in Abbildung 28 dargestellt:

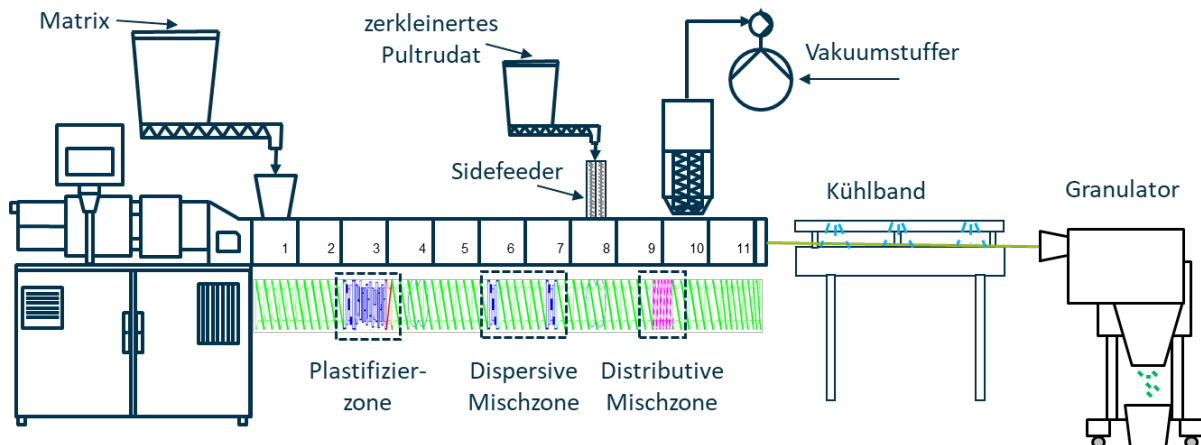


Abbildung 28: Aufbau der Compoundierstrecke für die ABS- und PMMA-Versuchspunkte

Die Matrixmaterialien wurden in den Haupttrichter des Doppelschneckenextruders hinzugegeben. Die Additive wurden mit den jeweiligen Matrixmaterialien vor der Zugabe vorgemischt. In Gehäuse drei (vgl. Abbildung 28) befand sich eine Plastifizierzone, in welcher das Matrixmaterial durch Knetelemente aufgeschmolzen wurde. In Gehäuse sechs und sieben wurde jeweils ein Knetelement zur Erhöhung der dispersiven Mischwirkung und möglichst hohen Homogenisierung des Materials eingebracht. Zwischen Gehäuse neun und zehn wurde ein Mischelement eingesetzt, um die distributive Mischwirkung zu erhöhen und eine ausreichende Homogenität des Granulats zu gewährleisten.

Es wurden Compounds mit einem Fasergewichtsanteil von 10 - 50 Gew.-% Glasfasern in 10 Gew.-% Abstufungen hergestellt. Das zerkleinerte Pultrudat wurde gravimetrisch und mittels eines Sidefeeders dem Doppelschneckenextruder zugeführt. Über einen Vakuumsuffer wurden die im Prozess eingebrachte Luft, zur Herstellung eines möglichst kompakten Compounds, und flüchtige Bestandteile aus dem Granulat entfernt. Über ein Kühlband mit einer kombinierten Luft- und Wasserkühlung wurden die Stränge abgekühlt und anschließend mittels eines Stranggranulators granuliert. Der Gesamtdurchsatz wurde für alle Versuche auf 8 kg/h und die Drehzahl zur schonenden Einarbeitung der Fasern auf 180 U/min festgelegt.

Das verwendete Temperaturprofil des Doppelschneckenextruders ist abhängig vom verwendeten Matrixmaterial. Die Gehäusetemperatur wird vom Haupttrichter zur Düse hin stetig erhöht, bis die gewünschte Temperatur erreicht ist. Die in der Tabelle 3 angegebenen Temperaturen beziehen sich dabei auf die maximal eingestellte Temperatur am Werkzeug.

Für die verschiedenen Matrixmaterialien ergeben sich insgesamt die folgenden Temperaturprofile:

Matrix- material	Gehäuse 1 [°C]	Gehäuse 2 [°C]	Gehäuse 3 [°C]	Gehäuse 4 [°C]	Gehäuse 5 – 7 [°C]	Gehäuse 8 – 11 [°C]	Werkzeug [°C]
PMMA	40	80	120	200	220	230	230
ABS	40	80	120	200	220	230	230
PVC	80	100	120	130	180	190	190

Tabelle 3: Temperaturprofile des Doppelschneckenextruders für die verschiedenen Matrixmaterialien

Zur Prüfung der mechanischen Eigenschaften wurden Zugprüfkörper nach der Norm DIN 527 auf einer Spritzgießmaschine des Typs Ergotech 80/42-310, der Demag Plastics Group, Schwaig, hergestellt. Für die Biege- und Schlagzähigkeitsversuche wurden die Schultern der Prüfkörper entfernt und die Prüfkörper auf eine Länge von 80 mm zugeschnitten.

Für die Untersuchung des PVC wurde kein Granulat hergestellt, da dieses unter Temperatureinfluss zu Degradation neigt und somit durch die erneute Erwärmung im Spritzgießprozess und die dort auftretenden hohen Scherungen degradiert werden würde. Daher wurden aus dem PVC, welches im Ausgangszustand als Pulver vorliegt, zunächst Flachprofile mittels des DSE extrudiert. Das zugehörige Werkzeug wies eine Schlitzbreite von 30 mm und eine Schlitzhöhe von 5 mm auf. Zur Vermeidung einer thermischen und mechanischen Schädigung des Materials wurde die Drehzahl des Doppelschneckenextruders auf das anlagentechnische Minimum von 60 U/min reduziert. Zusätzlich wurde die Verfahrenslänge zur Reduktion der Verweilzeit verringert und die Schneckenkonfiguration angepasst. Die angepasste Schneckenkonfiguration ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

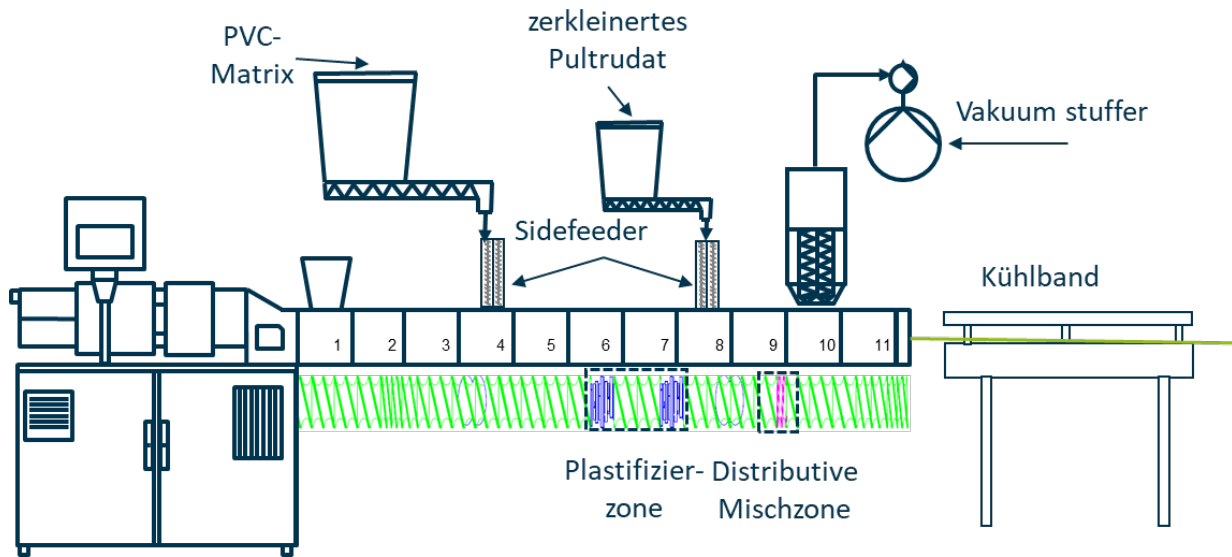


Abbildung 29: Aufbau der Compoundierstrecke für die PVC-Versuchspunkte

Das PVC-Pulver wurde über einen Sidefeeder in Gehäuse vier zugegeben und über zwei kurze getrennte Plastifizierzonen mit dreigängigen Schneckenelementen, zur Vermeidung von Druckspitzen, aufgeschmolzen. In Gehäuse 8 wurde, wie zuvor, das Pultrudat zugegeben und die Schmelze mittels eines Mischelements homogenisiert. Anschließend folgte die Entgasung mittels Vakuumbuffer und die Ausformung des Profils. Für die PVC-Versuche wurde das Kühlband auf eine ausschließliche Luftkühlung umgestellt.

Die hergestellten Profile wurden anschließend auf einer Heizpresse des Typs URKEM 200 der Firma LAUFFER GmbH & Co. KG, Horb, zu 4 mm dicken Platten verpresst. Die Heizpresse wurde dabei auf 180 °C aufgeheizt und diese Temperatur wurde anschließend für 12 Minuten gehalten, bevor die Presse wieder abgekühlt wurde. Aus den Platten wurden anschließend Prüfkörper des Typs 1 BA der Norm DIN EN ISO 527 herausgefräst. Die kleineren Prüfkörper wurden gewählt, um die mechanischen Eigenschaften der extrudierten Profile mit den recycelten Fasern mit konventionell hergestellten gewalzten PVC-Platten vergleichen zu können. Da die Platten der Firma REHAU Industries SE & Co. KG, Rehau, einen Durchmesser von lediglich 15 cm aufweisen, wäre es lediglich möglich einen großen Prüfkörper des Typs 1 A aus einer Platte zu präparieren.

Zudem wurden einige ausgewählte Versuchspunkte einer Konditionierung unter 62 % relativer Luftfeuchtigkeit und einer erhöhten Temperatur von 70 °C unterzogen und geprüft.

Mechanische Prüfungen

Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften bei wurden die hergestellten Probekörper im Kurzzeitzugversuchen (nach DIN EN ISO 527), Drei-Punkt-Biegeversuchen (nach DIN EN ISO 178) und ungekerbten Schlagzähigkeitsversuchen nach Charpy (DIN EN ISO 179-1/1eAb) geprüft. Die Probekörper vom Typ 1A wurden im Zugversuch mit einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min geprüft, wobei der E-Modul bei einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min ermittelt wurde. Die Zugprüfungen wurden auf einer Prüfmaschine des Typs Z150 der Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, durchgeführt. Bei den Schlagzähigkeitsversuchen erfolgte der Schlag schmalseitig und je nach Material wurden Pendelhammer mit einer Schlagenergie von 2J, 7,5J oder 15 J verwendet. Zudem wurden einige ausgewählte Versuchspunkte einer Konditionierung unter 62 % relativer Luftfeuchtigkeit und einer erhöhten Temperatur von 70 °C unterzogen und geprüft.

Versuchsplan und Nomenklatur der Versuchspunkte

Der Versuchsplan der Compoundierversuche ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Matrix-material	Faser-material	Faseranteil [Gew.-%]	Haft-vermittler	Durchsatz [kg/h]	Drehzahl [1/min]	Temperatur-profil [°C]
PMMA	NF1	10	-	8	180	230
PMMA	NF1	20	-	8	180	230
PMMA	NF1	30	-	8	180	230
PMMA	NF1	40	-	8	180	230
PMMA	NF1	50	-	8	180	230
PMMA	NF1	30	HVA	8	180	230
PMMA	NF1	30	HVB	8	180	230
PMMA	NF1	30	HVC	8	180	230
PMMA	rGF	10	-	8	180	230
PMMA	rGF	20	-	8	180	230
PMMA	rGF	30	-	8	180	230
PMMA	rGF	40	-	8	180	230
PMMA	rGF	50	-	8	180	230
PVC	rGF	0	-	8	60	190
PVC	rGF	10	-	8	60	190
PVC	rGF	20	-	8	60	190
ABS	rGF	10	-	8	180	230
ABS	rGF	20	-	8	180	230
ABS	rGF	40	-	8	180	230
ABS	rGF	50	-	8	180	230
ABS	rGF	0	BONDYRAM 6000	8	180	230
ABS	rGF	10	BONDYRAM 6000	8	180	230
ABS	rGF	20	BONDYRAM 6000	8	180	230

Tabelle 4: Versuchsplan der Compoundierversuche

Die im Nachfolgenden verwendeten Versuchspunktbezeichnungen der Prüfungen setzen sich gemäß der folgenden Tabelle zusammen:

Bezeichnung	Bedeutung
Röhm	Matrix aus PMMA Plexiglas Resist zk6hf
PVC	Matrix aus PVC der Firma Rehau
rABS	Matrix aus recyceltem ABS der Firma Skytech
Kond.	Konditionierte Prüfkörper
rGFX	Compound mit recycelten Fasern aus pultrudierten Profilen mit einem Faseranteil von X Gew.-%
n1GFX	Compound mit Neufaser 1 (JM ThermoFlow CS EC 13 636) mit einem Faseranteil von X Gew.-%
+A	ABS Compound mit BONDYRAM 6000 Kompatibilisator
HVA	PMMA Compound mit Modiper A4300 Additiv
HVB	PMMA Compound mit Scona TSEV 6113 GB Additiv
HVC	PMMA Compound mit Scona TSEV 2113 GB Additiv
PVC Rehau Raufipro	Prüfkörper aus von Rehau hergestellten gewalzten PVC-Fellen mit einem Faseranteil von 17 Gew.-%
Mocom	Kommerzielle, von der Firma Mocom hergestellte, Neuwaren ABS-Compounds mit einem Faseranteil von 17 oder 20 Gew.-%

Tabelle 5: Nomenklatur der Versuchspunkte

Ergebnisdiskussion

Da sich die Ergebnisse der Zugprüfung und Biegeprüfung der untersuchten Materialien nahezu identisch verhalten, wird im Folgenden lediglich auf die Zugfestigkeit, den Zugmodul und Schlagzähigkeit eingegangen.

Die Zugmodule ausgewählter Versuchspunkte der PMMA-Matrix sind in Abbildung 30 dargestellt:

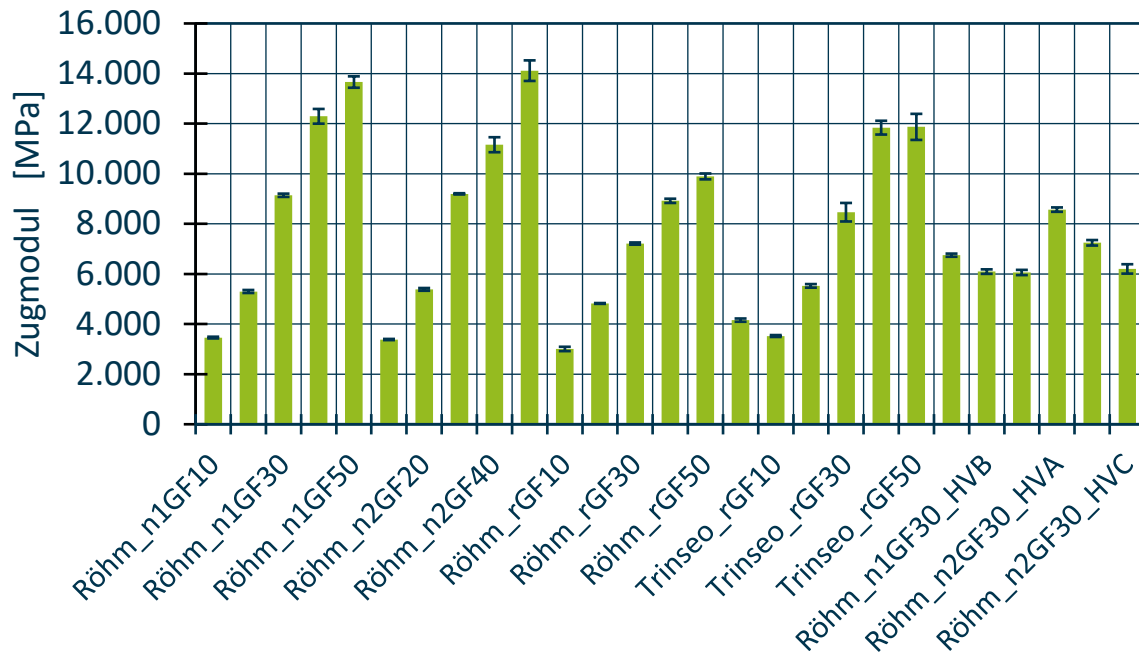


Abbildung 30: Zugmodule der PMMA-Versuchspunkte

Anhand der Abbildung 30 ist zu erkennen, dass beim PMMA für alle Fasermaterialien mit steigendem Faseranteil der Zugmodul zunimmt. Die Zugmoduln der Neufasern liegt in allen Versuchspunkten erwartungsgemäß über denen der recycelten Fasern, da die Fasern sowohl im Compound als auch im Prüfkörper mit höheren Faserlängen vorliegen und somit eine höhere Verstärkungswirkung erzielen können. Bis zu einem Faseranteil von 20 Gew.-% liegt der Unterschied zwischen den Neufasern und den recycelten Fasern bei unter 10 % mit Absolutwerten von ca. 5300 MPa für die Neufasern und ca. 4820 MPa für die Recyclingfasern. Dieser nimmt bei höheren Gewichtsanteilen zu und liegt bei 50 Gew.-% Faseranteil bei fast 43 %. Während die Verstärkungswirkung der Neufasern mit dem Faseranteil nahezu linear ansteigt, scheint diese bei den Recyclingfasern gegen einen Grenzwert zu laufen. Dies ist durch den abnehmenden Gradienten zwischen den Versuchspunkten mit 40 und 50 Gew.-% Recyclingfasern erkennbar. Alle Additive haben bei beiden Neufasern einen negativen Einfluss auf den Zugmodul, wobei das Additiv HVA die höchsten Werte liefert. Der Zugmodul sinkt beim Einsatz des Haftvermittlers HVA von ca. 9140 MPa auf ca. 6750 MPa.

In Abbildung 31 sind die Zugfestigkeiten der PMMA-Versuchspunkte dargestellt:

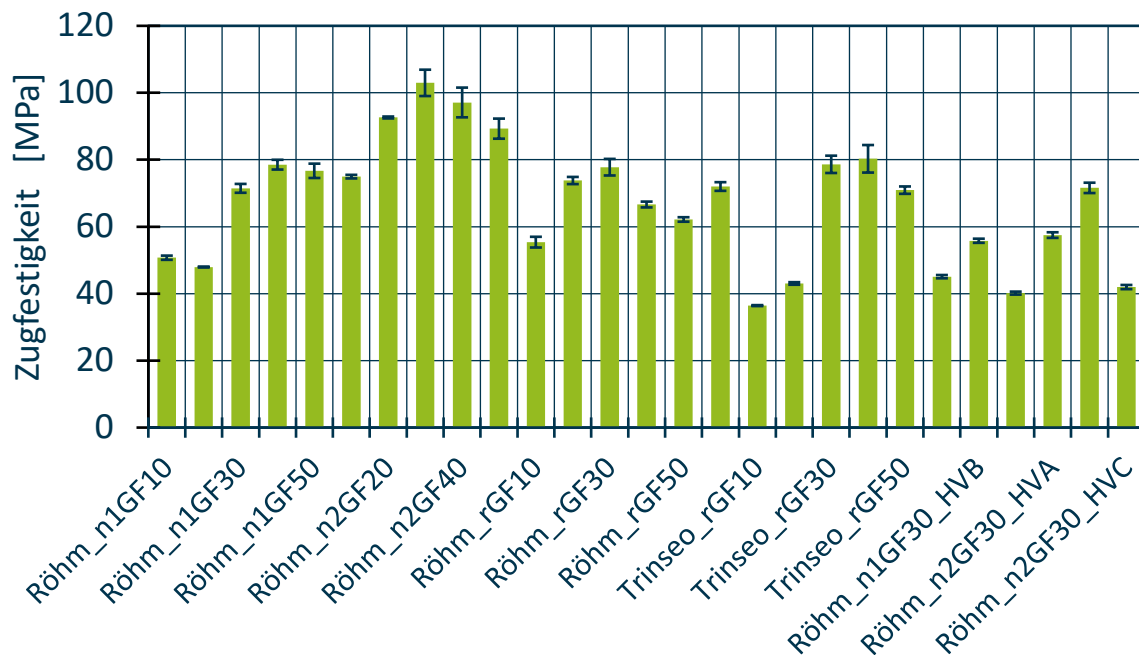


Abbildung 31: Zugfestigkeiten der PMMA-Versuchspunkte

Bei der Zugfestigkeit zeigt sich ein etwas anderes Bild als beim Zugmodul. Die Zugfestigkeit nimmt nicht grundsätzlich mit dem Fasergewichtsgehalt zu, sondern erreicht sein Maximum bei allen Materialkombinationen bei 30 oder 40 Gew.-% Glasfasern. Die Maximalwerte liegen hier bei den Neufasern bei ca. 78,5 MPa (40 Gew.-% Faseranteil) und bei den Recyclingfasern bei ca. 77,8 MPa (30 Gew.-% Faseranteil). Bei niedrigen Fasergehalten von bis 20 Gew.-% liegen die Werte des Röhmm_rGF um 50 bis 70 % höher, werden jedoch bei über 30 Gew.-% Faseranteil leicht übertroffen. Insgesamt ist die Differenz der Zugfestigkeiten der recycelten Fasern zu den Neufasern deutlich geringer ausgeprägt. Die Additive haben ebenfalls einen negativen Einfluss auf die Zugfestigkeit. Anders als beim Zugmodul weist hier der Haftvermittler HVB den höchsten Wert auf (55,8 MPa).

Bei der Schlagzähigkeit ist ebenfalls ein Unterschied zwischen den Neufasern und den recycelten Fasern zu erkennen. Die Schlagzähigkeit nimmt bei beiden Fasermaterialien erwartungsgemäß mit dem Faseranteil ab. Bei geringen Faseranteilen von 10 Gew.-% übertreffen die Neufasern (ca. 28,8 kJ/m²) die recycelten Fasern (ca. 18,1 kJ/m²) um etwa 60 %. Diese Differenz nimmt mit dem Faseranteil stetig ab. Bei 30 Gew.-% Fasern übertrifft die

Schlagzähigkeit der Recyclingfasern (ca. 12,9 kJ/m²) die der Neufasern (ca. 11,6 kJ/m²) um ca. 10 % bei ähnlichen Standardabweichungen (vgl. Abbildung 32). Der Einsatz der Haftvermittler steigert die Schlagzähigkeit der Versuche mit 30 Gew.-% Neufasern unabhängig vom Haftvermittlertypen. Der Haftvermittler HVA steigert die Schlagzähigkeit hier im Vergleich zum Versuchspunkt ohne Additiv (11,6 kJ/m²) auf ca. 22,6 kJ/m², was fast dem Wert der Verstärkung mit 20 Gew.-% (23,4 kJ/m²) entspricht. Der Haftvermittler HVB weist hier mit ca. 14,1 kJ/m² den geringsten Verstärkungseffekt aller Haftvermittler auf.

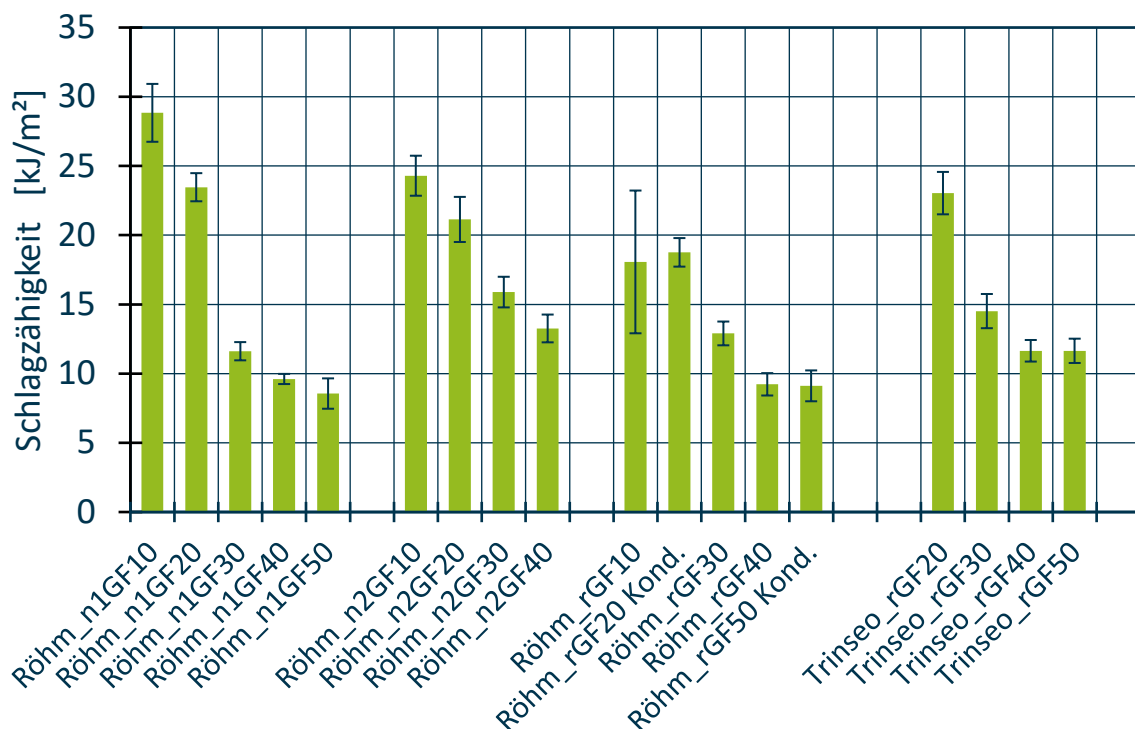


Abbildung 32: Schlagzähigkeiten der PMMA-Versuchspunkte

Die Abbildung 33 bis 36 zeigen die Zugfestigkeiten, Zugmodule und Schlagzähigkeiten der PMMA-Versuchspunkte mit den recycelten Fasern bei 20 und 50 Gew.-% bei Prüfung spritzfrischer und konditionierter Prüfkörper (70 °C und 63 % rel. Feuchtigkeit für 2 Wochen).

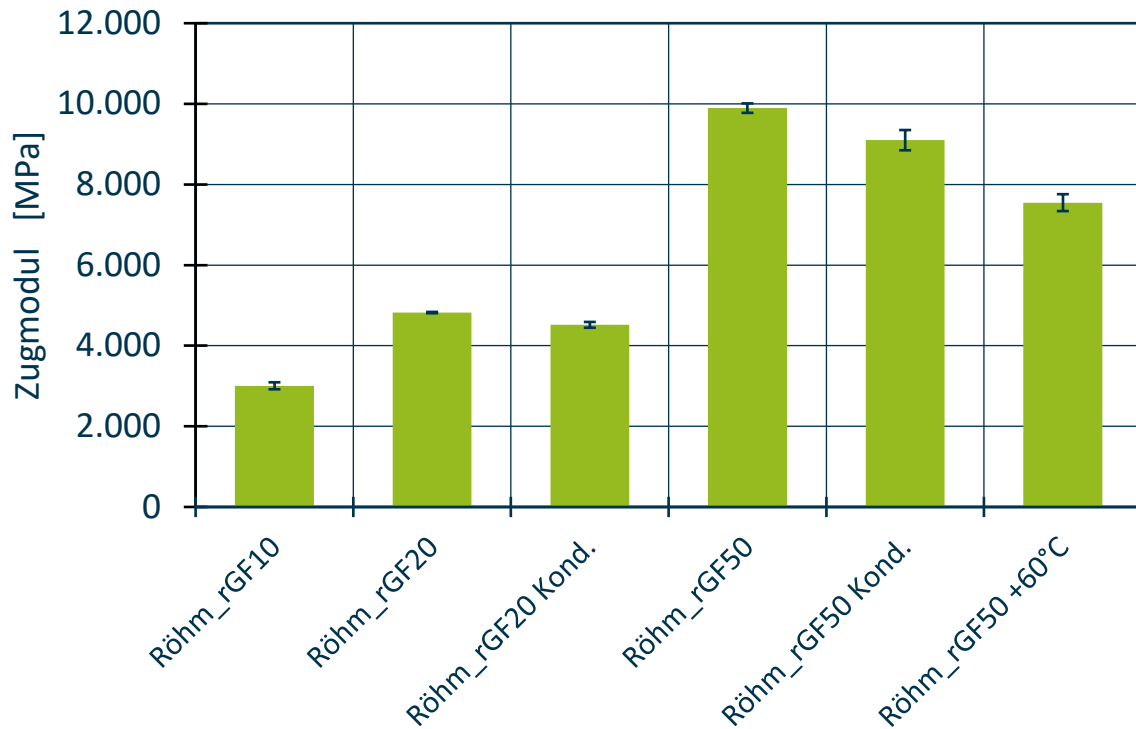


Abbildung 33: Zugmodule der PMMA-Versuchspunkte mit 20 und 50 Gew.-% Recyclingfasern für konditionierte und unkonditionierte Prüfkörper

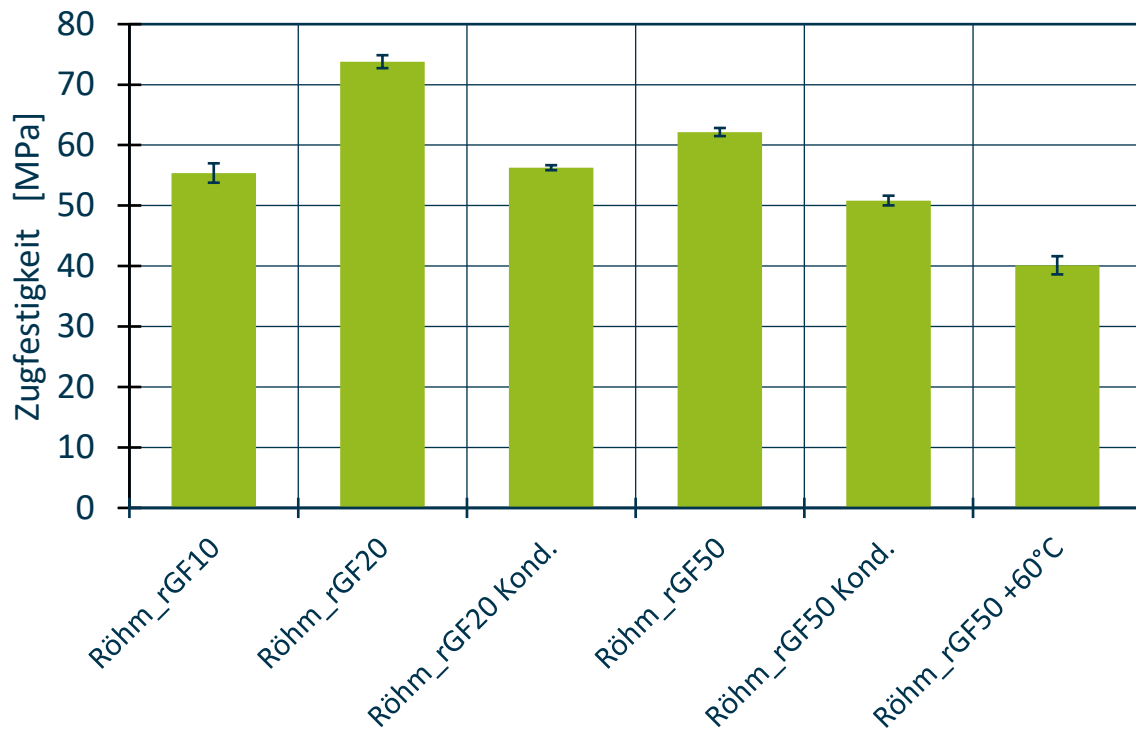


Abbildung 34: Zugfestigkeiten der PMMA-Versuchspunkte mit 20 und 50 Gew.-% Recyclingfasern für konditionierte und unkonditionierte Prüfkörper

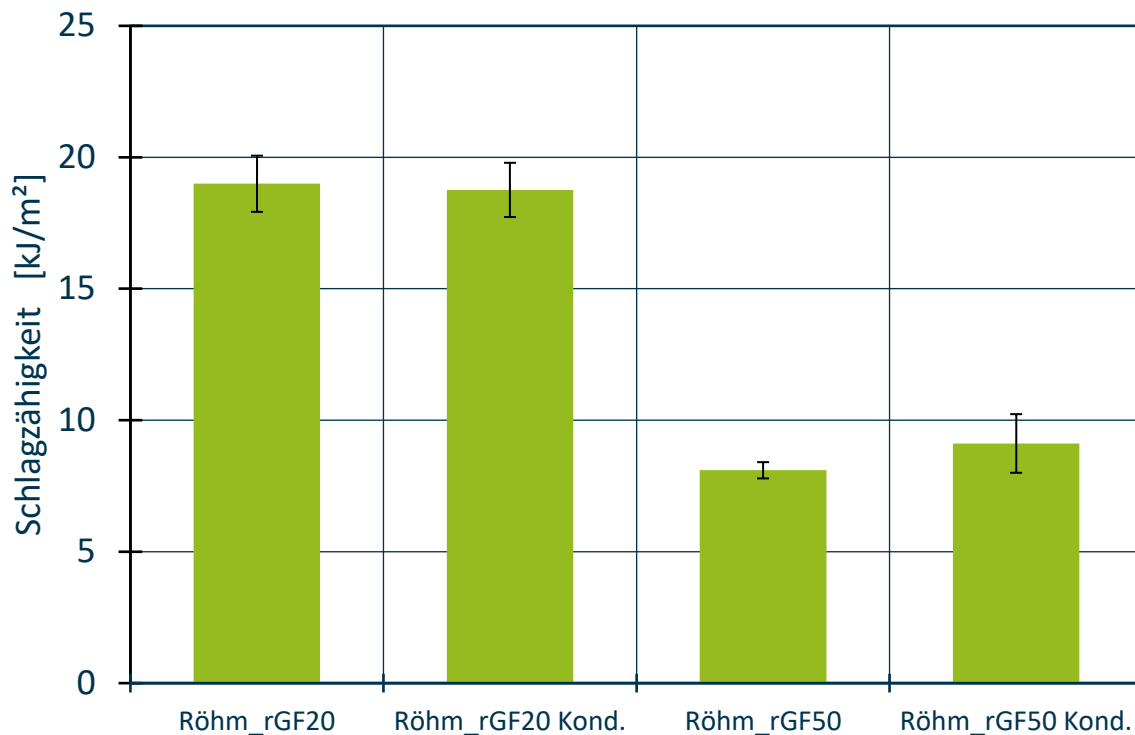


Abbildung 35: Schlagzähigkeiten der PMMA-Versuchspunkte mit 20 und 50 Gew.-% Recyclingfasern für konditionierte und unkonditionierte Prüfkörper

Ein Konditionierung der Prüfkörper führt in allen Prüfungen zu einer Abnahme der mechanischen Eigenschaften. Für den Zugmodul ist die relative Abnahme der Absolutwerte bei 50 Gew.-% stärker ausgeprägt (vgl. Abbildung 33), wohingegen die Zugfestigkeit bei geringerem Faseranteil die höhere relative Abnahme aufweist (vgl. Abbildung 34). Die Schlagzähigkeit scheint bei geringen Faseranteilen keine Abhängigkeit aufzuweisen. Bei 50 Gew.-% Fasern liegt die durchschnittliche Schlagzähigkeit nach erfolgter Konditionierung zwar um ca. 12 % höher (9,1 kJ/m² von ursprünglich 8,1 kJ/m²), jedoch liegen Absolutwerte innerhalb der Standardabweichungen und können somit auch auf statistische Schwankungen zurückgeführt werden (vgl. Abbildung 35).

Die Zugmodule der PVC-Versuchspunkte sind in Abbildung 36 dargestellt.

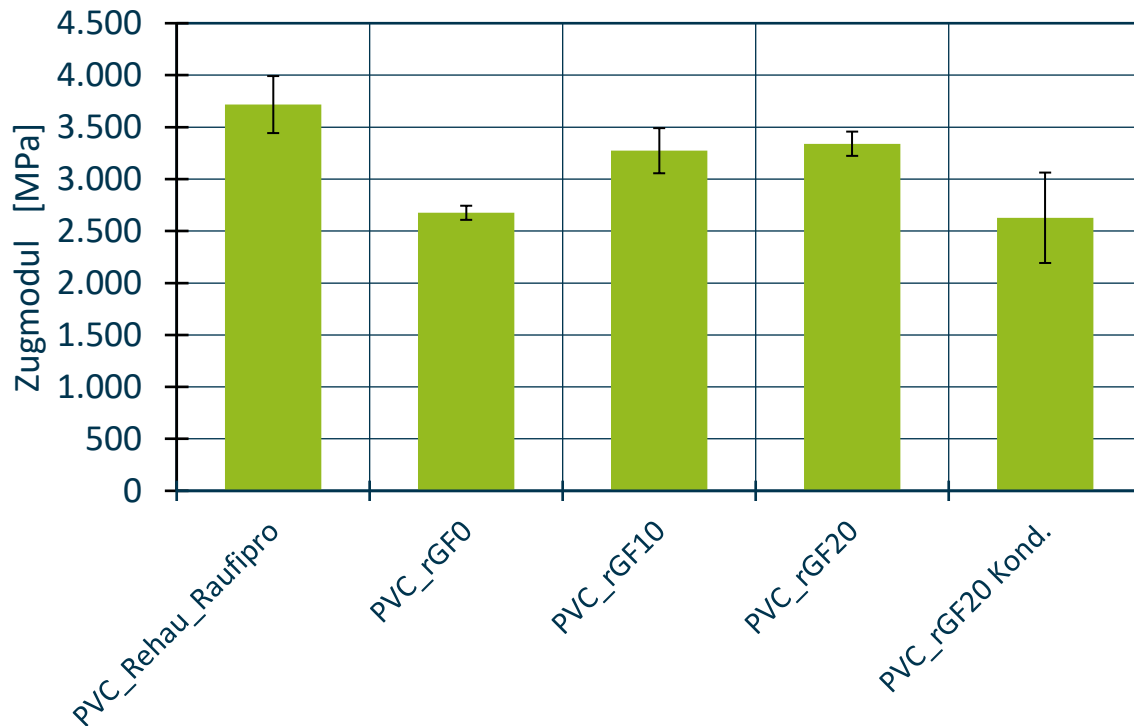


Abbildung 36: Zugmodule der PVC-Versuchspunkte

Der Zugmodul der extrudierten Profile steigt mit dem Faseranteil an, wobei sich diese zwischen 10 (3273 MPa) und 20 Gew.-% (3340 MPa) kaum unterscheiden, da diese jeweils ebenfalls im Bereich der Standardabweichungen liegen. Der Wert der Prüfkörper aus gewalzten PVC-Fellen mit 17 Gew.-% Fasern weisen mit ca. 3717 MPa den höchsten Wert auf. Dies deutet darauf hin, dass der Fertigungsprozess des Walzens faserschonender ist als das Extrudieren. Da die Abweichung jedoch lediglich ca. 12 % beträgt, können die extrudierten Profile durchaus mit dem konventionellen Verfahren konkurrieren. Eine Konditionierung hat auch auf die extrudierten Prüfkörper einen negativen Einfluss. Der Zugmodul sinkt nach erfolgter Konditionierung von 3340 MPa auf ca. 2627 MPa.

Bei der Zugfestigkeit zeigt sich ein etwas anderes Bild auf. Die Werte der ermittelten Zugfestigkeiten sind in Abbildung 37 dargestellt.

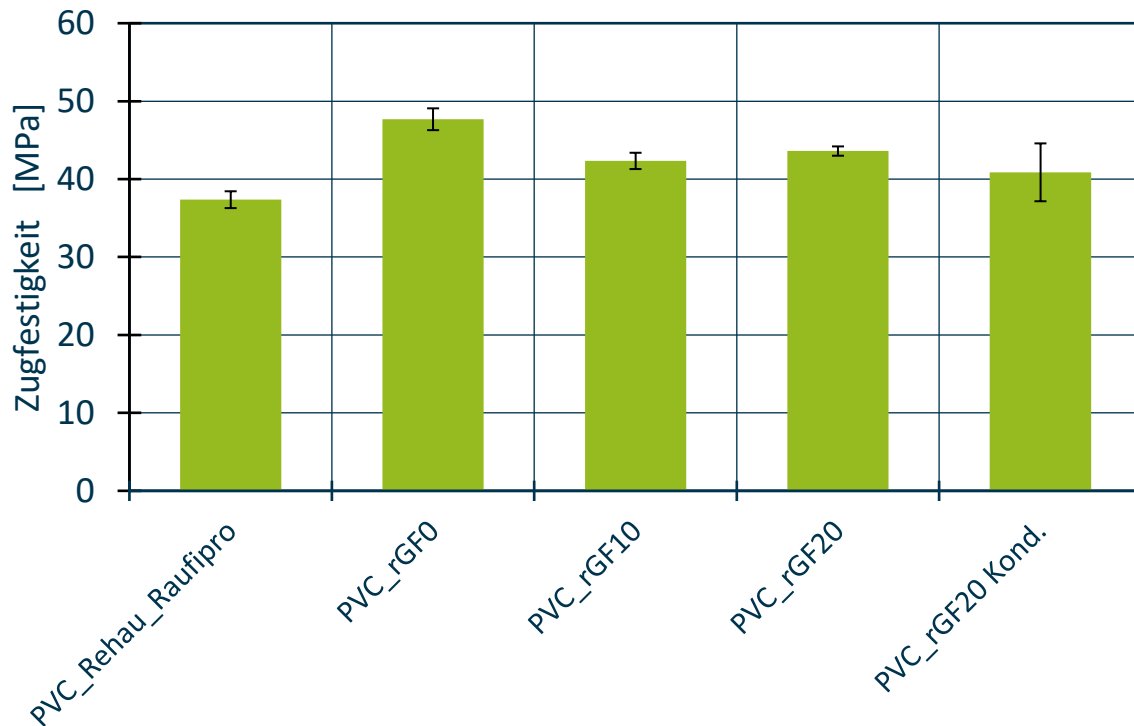


Abbildung 37: Zugfestigkeiten der PVC-Versuchspunkte

Die konventionell gewalzten PVC-Felle weisen mit ca. 37,4 MPa den niedrigsten Wert der Zugfestigkeiten auf. Der höchste Wert wird durch das unverstärkte extrudierte Profil (PVC_rGF0) mit ca. 47,7 MPa erreicht. Eine Verstärkung des Materials mit 10 Gew.-% Recyclingglasfasern senkt die Zugfestigkeit zunächst auf ca. 42,3 MPa. Durch eine Steigerung des Faseranteils auf 20 Gew.-% wird dieser Wert auf 43,6 MPa angehoben. Eine Konditionierung der Prüfkörper zeigt auch hier einen negativen Einfluss auf. Der Wert des konditionierten Prüfkörper sinkt auf durchschnittlich 40,9 MPa, wobei die statistische Streuung ebenfalls stark ansteigt.

Die Schlagzähigkeiten der extrudierten Profile liegen mit durchschnittlich ca. 22 bis 28 kJ/m² deutlich unterhalb der der gewalzten Platten mit ca. 59 kJ/m² (vgl. Abbildung 38). Die Standardabweichung ist bei dem PVC Rehau Raufipro Versuchspunkt mit $\pm 21,4$ kJ/m² jedoch sehr hoch und entspricht damit ca. einem Drittel des Mittelwerts. Eine Konditionierung der Prüfkörper mit einem Faseranteil von 20 Gew.-% senkt die Schlagzähigkeit auch hier leicht ab.

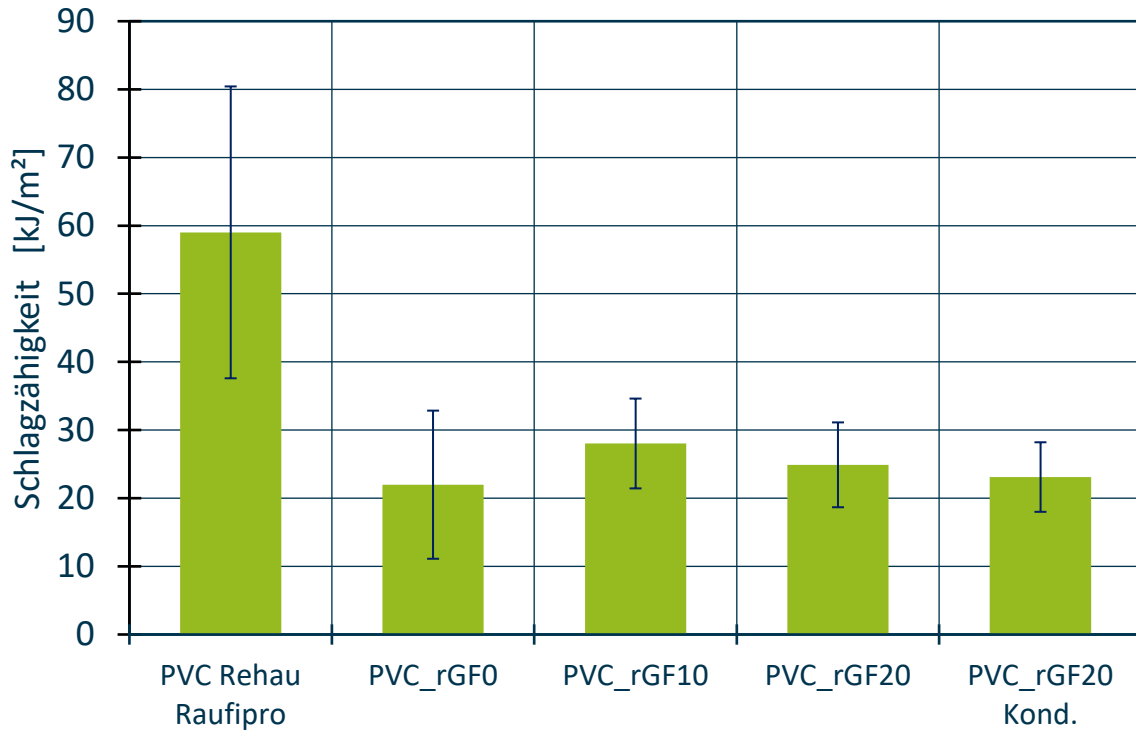


Abbildung 38: Schlagzähigkeiten der PVC-Versuchspunkte

Die Zugmodule der ABS-Versuchspunkte sind in der Abbildung 39 dargestellt:

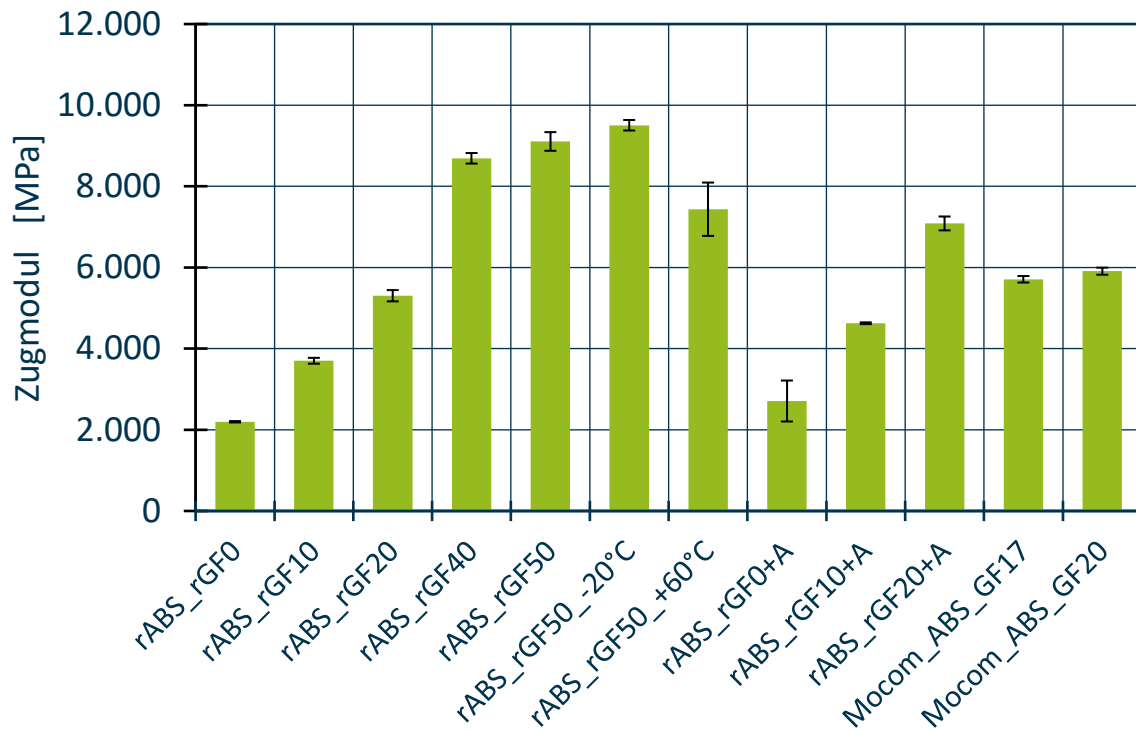


Abbildung 39: Zugmodule der ABS-Versuchspunkte

Wie bei den anderen Materialien steigt der Zugmodul für die Prüfkörper mit der ABS-Matrix mit steigendem Fasergehalt an. Dieser scheint jedoch bei hohen Faseranteilen gegen einen Grenzwert zu laufen. Eine Erhöhung des Faseranteils von 40 auf 50 Gew.-% steigert den Zugmodul um lediglich knapp 5 % von 8691 MPa auf 9107 MPa, während die Erhöhung zwischen 30 und 40 Gew.-% Fasern bei über 60 % liegt (5394 MPa auf 8691 MPa). Eine Additivierung des Compounds mit dem BONDYRAM6000 Haftvermittler erhöht den Zugmodul des Compounds mit 20 Gew.-% Faseranteil von ca. 5304 MPa auf ca. 7086 MPa, was einer Zunahme von etwa 33,5 entspricht. Durch den Einsatz des Haftvermittlers übersteigt der Zugmodul auch die der kommerziellen Mocom ABS-Compounds (ca. 5909 MPa).

Die Zugfestigkeit weist ein etwas anderes Verhalten auf. Zunächst erhöht sich diese nicht grundsätzlich mit dem Faseranteil, sondern steigt erst und sinkt bei hohen Anteilen wieder ab. Die höchste Zugfestigkeit wird bei einem Faseranteil von 20 Gew.-% mit ca. 60 MPa erreicht (vgl. Abbildung 40). Eine Additivierung hebt diesen Wert erneut etwas an. Das kommerzielle ABS-Compound mit 20 Gew.-% Fasern liegt in diesem Fall minimal höher, wobei die Differenz hier lediglich 1,8 MPa beträgt.

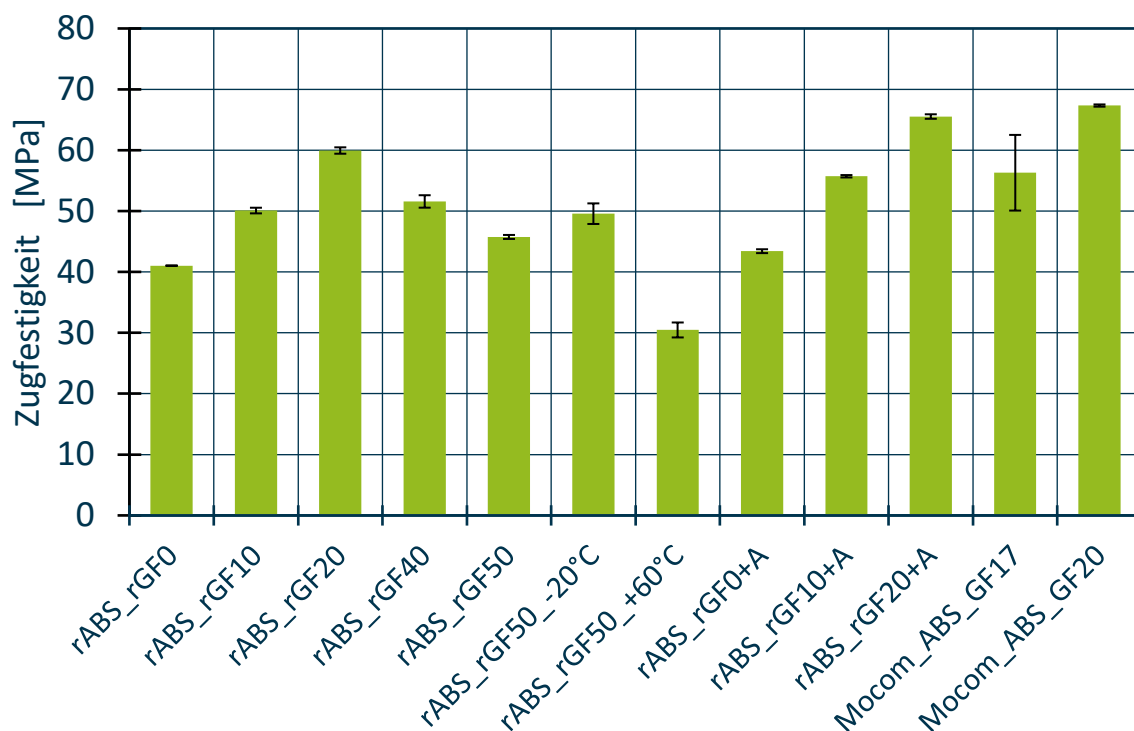


Abbildung 40: Zugfestigkeiten der ABS-Versuchspunkte

Die Schlagzähigkeit der ABS-Versuchspunkte verhält sich ähnlich zu den anderen Matrixmaterialien (vgl. Abbildung 41). Mit steigendem Fasergehalt wird die Schlagzähigkeit abgesenkt und erreicht bei einem Fasergehalt von 50 Gew.-% mit 8,1 kJ/m² ihr Minimum. Auffällig ist hier die starke Abnahme der Schlagzähigkeit durch die Einbringung der Fasern. Unverstärkt wird hier zunächst im Mittel ein Wert von ca. 59 kJ/m² erreicht. Eine Verstärkung mit 10 Gew.-% Glasfasern senkt diesen Wert bereits auf ca. 22,6 kJ/m² ab, was einer relativen Abnahme um mehr als 60 % entspricht. Anders als bei den Zugeigenschaften wird die Schlagzähigkeit durch den Haftvermittler abgesenkt. Dies äußert sich bereits beim Einsatz des Additivs im unverstärkten Matrixmaterial durch eine Abnahme auf lediglich 22 MPa. Ein Vergleich mit den kommerziellen ABS-Compounds zeigt jedoch, dass diese Werte trotzdem überschritten werden und das recycelte Material mit diesen konkurrieren kann.

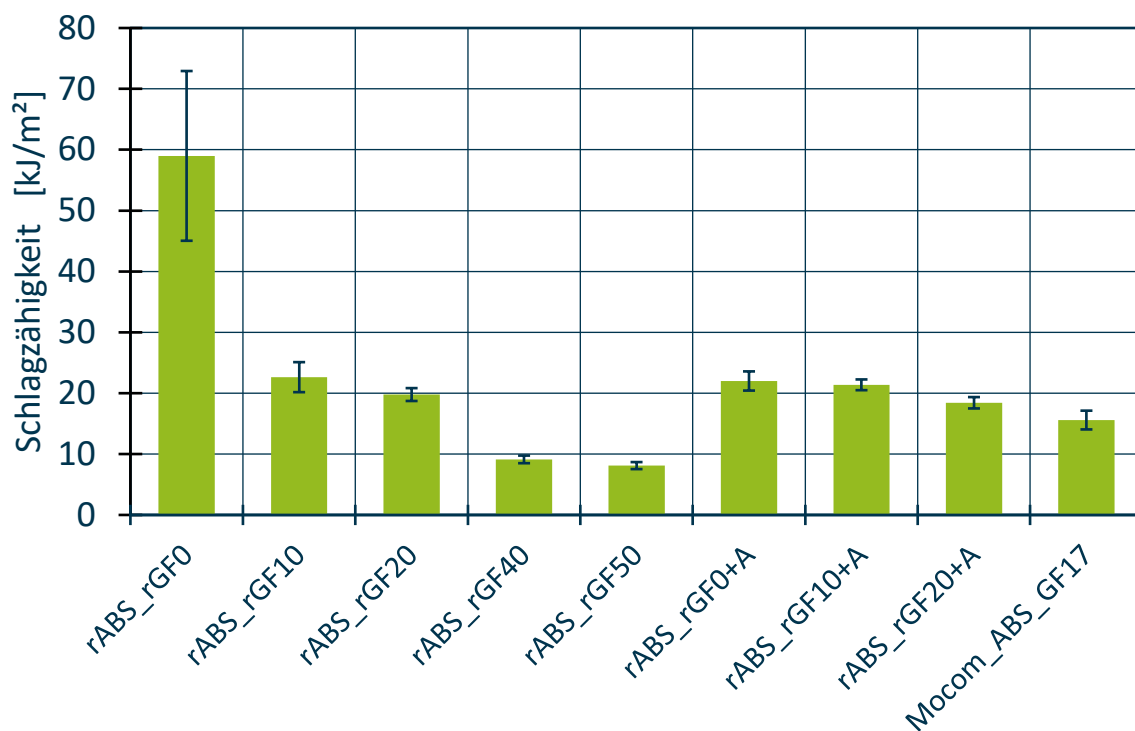


Abbildung 41: Schlagzähigkeiten der ABS-Versuchspunkte

Bestimmung der Faserlänge des Mahlguts und der Prüfkörper

Die Faserlänge des zerkleinerten und des neuen Fasermaterials wurde zunächst charakterisiert, um die Faserlängenverringerung während des Recyclingprozesses zu klassifizieren. Zur Bestimmung der optischen Faserlänge wurde das kommerziell erhältliche

FASEP-System (IDM Systems, Deutschland) verwendet. Im ersten Schritt wurden die Matrix und die Schlichte durch Pyrolyse bei 650 °C entfernt (K1253-KAT von Heraeus GmbH, Deutschland). Die Bilder der Fasern wurden durch Flachbettscannern einer Petrischale mit der verdünnten Faser aufgenommen. Faserlängen unter 50 µm wurden ausgeschlossen, da diese auch Verunreinigungen, Staubpartikel oder Kratzer auf der Petrischale darstellen und das Ergebnis verfälschen können [LHB20]. Für jede Messung werden mindestens 5000 Fasern ausgewertet. Die Algorithmen der FASEP-Software führen die Fasererkennung durch und werten die Längenverteilung aus.

Zur Auswertung wird die gewichtsgemittelte Faserlänge herangezogen, um den Einfluss vieler kurzer Fasern auf die mittlere Faserlänge zu minimieren. Die Ergebnisse der ermittelten Faserlängen sind in Abbildung 42 dargestellt.

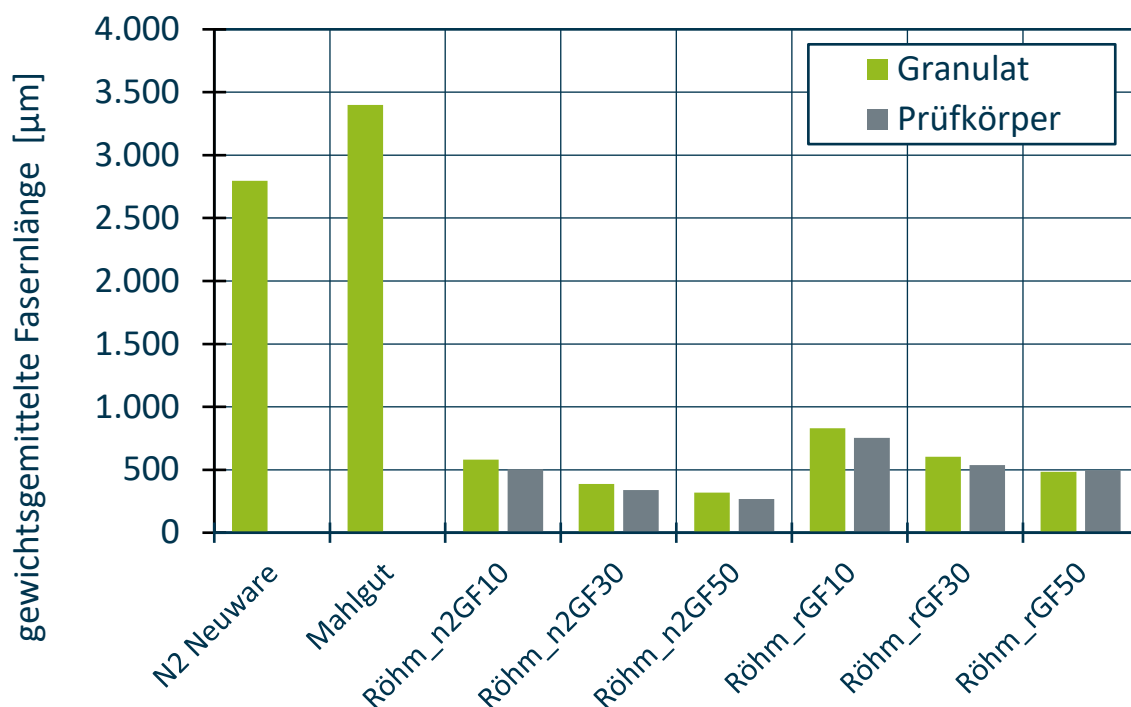


Abbildung 42: Gemittelte Faserlängen des

Es ist zu erkennen, dass das Mahlgut eine höhere Faserausgangslänge aufweist als die Neufasern N2. Dies äußert sich auch im compoundierten Granulat, in welchem die resultierenden Faserlängen der recycelten Fasern um mehr als 40 % höher sind als bei den Neufasern. Für beide Fasermaterialien nimmt die Faserlänge mit steigendem Faseranteil aufgrund der zunehmenden Faser-Faser-Interaktion im Prozess ab. Zudem ist ein Einfluss des

zusätzlichen Verarbeitungsschritts im Spritzgießen durch eine Abnahme der Faserlänge erkennbar.

Mikroskopische Untersuchungen

Zur Prüfung der Faserverteilung und der erfolgten Auflösung der Faseragglomerate wurden mikroskopische Untersuchungen an den spritzgegossenen Prüfkörpern durchgeführt. Hierzu wurden die Prüfkörper in einem Harz eingebettet und auf die gewünschte Betrachtungsebene abgeschliffen. Betrachtet wurde sowohl eine Ebene in Fließrichtung als auch quer zur Fließrichtung. Für die Mikroskopischen Untersuchungen wurde ein Mikroskop des Typs VHX-5000 der Firma Keyence Deutschland GmbH, Neu-Isenburg, Deutschland, verwendet.

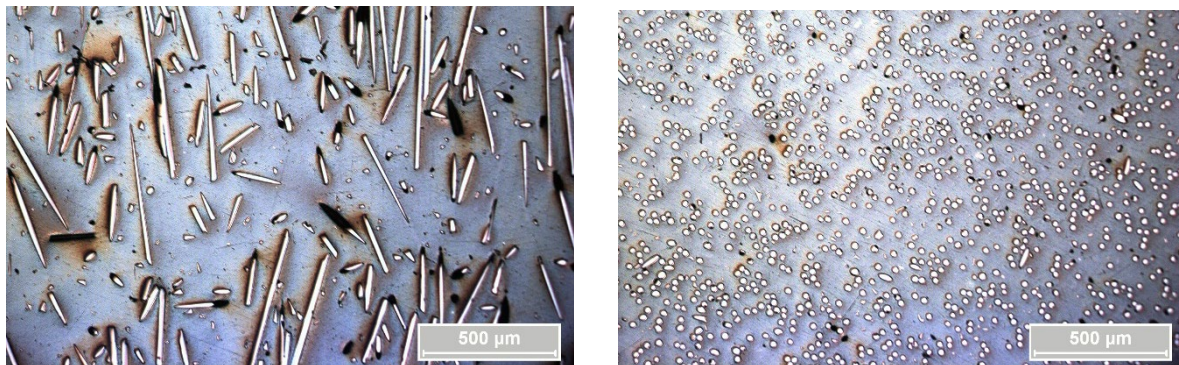


Abbildung 43: Mikroskopische Aufnahmen eines Prüfkörpers des Versuchspunkts Röh_m_rGF30 in Fließrichtung (links) und quer zur Fließrichtung (rechts)

Die Aufnahmen zeigen, dass die Fasern des Mahlguts im Compoundier- und Spritzgießprozess sehr gut voneinander getrennt werden können und im Prüfkörper vereinzelt vorliegen.

Die Fasern werden zudem über den kompletten Querschnitt der Prüfkörper im Prozess in Fließ- und Belastungsrichtung orientiert, sodass die maximale Verstärkungswirkung erzielt werden kann. Darüber hinaus sind im Vergleich zum Querschnitt des pultrudierten Profils keine Hohlräume im Probekörper zu erkennen. Die dunklen Stellen in resultieren aus den beim Polieren herausgerissenen Fasern.

Fazit

Zusammenfassend konnte die Recyclingfähigkeit der pultrudierten Profile nachgewiesen werden. Über eine Zerkleinerung der Profile und eine Einarbeitung der zerkleinerten Fasern kann der Lebenszyklus der Materialien nach ihrem Einsatz in den pultrudierten Profilen (z. B. in Fensterrahmen) verlängert werden. Die aus den recycelten Fasern hergestellten

Compounds sind mit konventionellen kurzfaserverstärkten Materialien vergleichbar und können mit diesen konkurrieren, auch wenn die mechanischen Eigenschaften teilweise minimal unter denen der kommerziell erhältlichen Materialien liegen. Auch höhere Füllgrade von 50 Gew.-% lassen sich mit den recycelten Fasern realisieren. Insgesamt konnte das Ziel des Arbeitspakets erreicht werden.

AP4: Werkzeugentwicklung und Herstellung eines komplex geformten Fensterprofils mit coextrudierter Ummantelung und Qualifizierung des Fenstersystems

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden aufbauend auf den durchgeführten Versuchen in AP2 Anforderungen an Versuchswerkzeug zur Herstellung komplex geformter Fensterprofile formuliert:

- Möglichst kurze Ausführung des Coextrusionswerkzeuges zur Minimierung der Wärmeeinflusszone.
- Integration einer UV-Härtestecke.
- Konturnahe Entgasung des Profils vor dem Eintritt in das Coextrusionswerkzeug
- Unmittelbar an das Coextrusionswerkzeug angeschlossene Kühlzone bzw. Kalibrierung
- Möglichst gleichmäßige und Wanddickenverteilung mit einer minimalen Wanddicke von 2 mm.
- Vermeiden kleiner und scharfkantiger Radien ($R > 1,5$ mm).

AP5: Anwendungstechnische Prüfung und Systemaufbau

Neben der Material- und Prozessentwicklung in AP 2, wurden die verwendeten Hohlprofile zum Testen der Eckwinkel verwendet. Die Innenkonturgeometrie der in AP 2.4 gefertigten Hohlprofile ist so gewählt, dass der Einsatz der Eckwickel bei REHAU in Punkto Maßhaltigkeit und Montierbarkeit überprüft werden kann. Die gefertigten Profile erfüllen die gegebenen Maßtoleranzen (vgl. Abbildung 44).

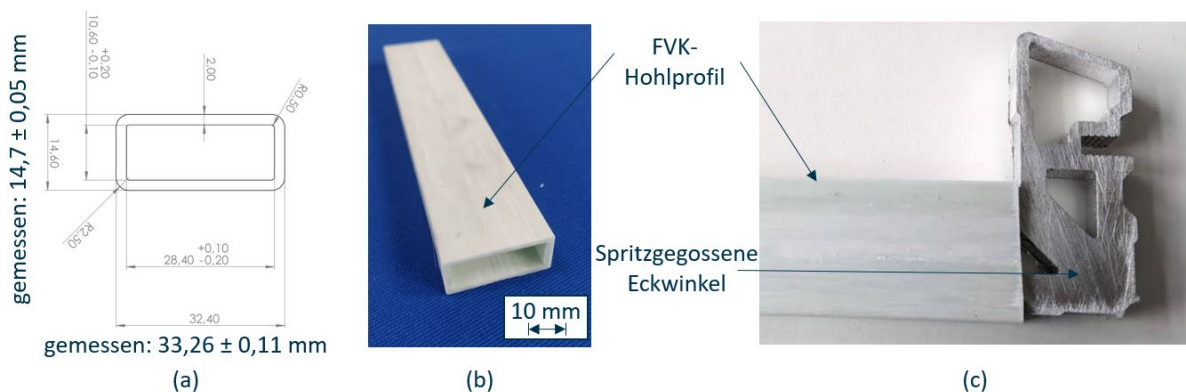


Abbildung 44: Zeichnung und gemessene Dimensionen des Hohlprofils (a). Gefertigte FVK-Hohlprofile (b) und Montage mittels spritzgegossener Eckwinkel (c).

6. Fazit

Insgesamt konnte im Projektverlauf gezeigt werden, dass sich der kombinierte vollthermoplastische Pultrusions- und Extrusionsprozess für die Herstellung von Hohlprofilen eignet. Die Co-Extrusion des thermoplastischen Mantels wird mit steigender Komplexität der Profile zunehmend schwieriger. Es wurden Hybridprofile hergestellt und hinsichtlich ihrer Dimensionsstabilität, Oberfläche und mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Durch die Integration einer zusätzlichen Doppelhärtestrecke wird die Abzugsgeschwindigkeit des Hybridverfahrens um bis zu 50 % erhöht und die Profileigenschaften verbessert. Das Verfahren hält die Maßtoleranzen für die Profilextrusion nach DIN 16941 ein.

Die neue Prozesshybridisierung eröffnet das Potenzial für die wirtschaftliche Herstellung von thermoplastischen Profilen mit verbesserter Oberflächenqualität, Schlagzähigkeit und zusätzlicher Schweißbarkeit in einem Schritt.

Die hergestellten Profile sind zudem sehr gut recyclebar, sodass die Materialien der Profile nach Ende ihrer Lebenszeit wiederverwendet werden können. Die im Recycling hergestellten Compounds können bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften mit konventionellen kurzfaserverstärkten Materialien mit Neufasern oder kommerziell erhältlichen Compounds konkurrieren.

7. Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die Erkenntnisse des Projekts haben am IKV zu einem starken Wissenszuwachs beigetragen. Vor allem im Bereich der Pultrusion mit coextrudierter Außenschicht konnten über das Projekt erhebliche Kompetenzen aufgebaut werden, die zukünftig in weiteren Forschungsprojekten, aber auch beratenden Tätigkeiten in der Industrie eingesetzt werden können. Vor allem die aufgetretenen Probleme ermöglichen es zukünftig Troubleshooting in bilateralen Projekten mit Industriepartnern zu betreiben.

Auch die Lehre am IKV profitiert stark von dem Projekt. Die gewonnenen Erkenntnisse können in die Vorlesungen und Übungen der Fächer der Vertiefungsrichtung Kunststofftechnik des Studiengangs Maschinenbau an der RWTH Aachen integriert werden (z. B. in den Modulen Kunststoffverarbeitung I-III und in Faserverstärkte Werkstoffe I und II) und das erlangte Wissen somit an die Studierenden weitergegeben werden.

8. Zusammenarbeit mit anderen Stellen oder außerhalb des Verbundprojektes (Schulung, Beratung, Erfahrungsaustausch u. a.)

Das IKV als Forschungsinstitut ist vertraut mit der Durchführung von öffentlich geförderten Forschungsprojekten, kennt die strukturierte Vorgehensweise und kann Versuchspläne stichhaltig ausarbeiten. Versuchspläne werden benötigt, um zu überprüfen, ob die Anforderungen, die an den das Profil und den zugrundeliegenden kombinierten Produktionsprozess gestellt werden, auch messbar erfüllt werden. Diese Vorgehensweise unterscheidet sich vom Vorgehen in der Produktion, wo oft nur anhand von Stichproben vorgegebene Qualitätsgrößen überprüft werden, nicht aber verschiedene Einflussparameter auf den Prozess bewertet werden. Das IKV unterstützte hier die Projektpartner in der Planung und Durchführung der wissenschaftlichen Fragestellungen.

Die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurde durch regelmäßige Projekt- und Partnertreffen gestärkt. In wöchentlich stattfindenden Online-Meetings wurden alle Partner

über den aktuellen Projektstand auf dem Laufenden gehalten. Nach dem Kick-Off-Treffen haben regelmäßige Partnertreffen mit dem gesamten Konsortium stattgefunden. Die Partnertreffen wurden abwechselnd bei den Partnern durchgeführt und der Folgetermin jeweils gemeinsam definiert.

9. Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind keine Forschungs- und Entwicklungsergebnisse Dritter mit Bezug zu diesem Vorhaben bekannt geworden. Zwar ist der Einsatz von pultrudierten faserverstärkten Profilen in der Baubranche und auch die Kombination von Pultrusion und Coextrusion zur Kaschierung der rauen Oberflächen bereits seit vielen Jahren Stand der Technik, jedoch ist die Anwendung dieser Technologie als recyclebare Alternative zu bestehenden Systemen in der Fenster- und Türanwendung unter Verwendung einer reaktiven thermoplastischen Matrix ein völlig neuer Ansatz.

10. Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.

Am IKV wurden zwei Veranstaltungen mit externen Gästen aus der Industrie (Fachbeiratsgruppensitzungen im November 2021, 2022 und 2023) durchgeführt, bei denen die Projektarbeiten und -ergebnisse bzw. ausgewählte Zwischenergebnisse vorgestellt wurden.

Die Ergebnisse wurden innerhalb der Laufzeit des Projekts auf mehreren internationalen und nationalen Konferenzen vorgestellt. Hierzu zählen die 16. World Pultrusion Conference (WPC) in Paris im Mai 2022, die MatFo in Köln im November 2022, die 38. International Conference of the Polymer Processing Society (PPS) in St. Gallen im Mai 2023 und die 23. International Conference on Composite Materials (ICCM) in Belfast im Juli 2023.

11. Literaturliste

[ATO14] E. Asmatulu, J. Twomey, and M. Overcash, *Journal of Composite Materials* 48, 593 (2014).

[BGY+21] A. Bechara, S. Goris, A. Yanev, D. Brands, and T. Osswald, *Physics of Fluids* 33, 73318 (2021).

- [BLP+21] H. Bel Haj Frej, R. Léger, D. Perrin, P. Ienny, P. Gérard, and J.-F. Devaux, Resources, Conservation and Recycling 173, 105705 (2021).
- [CJSX19] CHEN, K.; JIA, M.; SUN, H.; XUE, P.: Thermoplastic Reaction Injection Pultrusion for Continuous Glass Fiber-Reinforced Polyamide-6 Composites. *Materials* 2019, 12(3), 463
- [CLK+08] L. Cilleruelo, E. Lafranche, P. Krawczak, P. Pardo, and P. Lucas, Polymers and Polymer Composites 16, 577 (2008).
- [CSM+19] D. S. Cousins, Y. Suzuki, R. E. Murray, J. R. Samaniuk, and A. P. Stebner, Journal of Cleaner Production 209, 1252 (2019).
- [EP14] S. Epple and C. Bonten, "Production of continuous fiber thermoplastic composites by in-situ pultrusion," in (American Institute of Physics, 2014), p. 454.
- [HSB15] HOPMANN, CH.; SCHNEIDER, P.; BÖTTCHER, A.: Von der Injektionsbox zum komplexen Werkzeug zur Fertigung von Hybridprofilen. *Konstruktion* 7/8.2015
- [HSB16] C. Hopmann, P. Schneider, and A. Boettcher, Sampe Journal 52, 48 (2016).
- [IVG+11] F. Inceoglu, J. Ville, N. Ghamri, J. L. Pradel, A. Durin, R. Valette, and B. Vergnes, Polym. Compos. 32, 1842 (2011).
- [LHB20] B. M. Lekube, W. Hermann, and C. Burgstaller, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 135, 105939 (2020).
- [LN12] L. L. Lebel and A. Nakai, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 43, 1717 (2012).
- [KBV07] T. Keller, Y. Bai, and T. Vallée, J. Compos. Constr. 11, 99 (2007).
- [Kim11] B.-R. Kim, Environmental Engineering Research 16, 1 (2011).
- [MVSA21] K. MINCHENKOV, A. VEDERNIKOV, A. SAFONOV, AND I. AKHATOV, POLYMERS 13 (2021).
- [NSNM15] P. J. Novo, J. F. Silva, J. P. Nunes, and A. T. Marques, eds., Advances in thermoplastic pultruded composites (2015).
- [PKK+00] S. J. Pickering, R. M. Kelly, C. D. Kennerley, C. D. Rudd, and N. J. Fenwick, Composites Science and Technology 60, 509 (2000).
- [Sch20] P. Schneider, Thermoplastic coating of pultruded profiles by inline extrusion, Dissertation, RWTH Aachen University, 2020.
- [SM16] N. A. Shuaib and P. T. Mativenga, Journal of Cleaner Production 120, 198 (2016).
- [Sta00] T. F. Starr, ed., Pultrusion for Engineers (Elsevier, 2000).
- [URL20a] N.N.: *Pultruded window: Glass/polyurethane prototype wins award*, URL: <https://www.compositesworld.com/articles/pultruded-window-glasspolyurethane-prototype-wins-award> (abgerufen: 06.01.2020)

- [URL20b] N.N.: *Aluminiumfenster - Ökobilanz*, URL: <https://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Aluminiumfenster> (abgerufen: 02.01.2020)
- [VBW+22] G. A. Vincent, T. A. de Bruijn, S. Wijskamp, M. van Drongelen, and R. Akkerman, *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 35, 2530 (2022).
- [VST+20] A. VEDERNIKOV, A. SAFONOV, F. TUCCI, P. CARLONE, AND I. AKHATOV, *Journal of Composite Materials* 54, 4081 (2020).
- [VYB+22] M. VOLK, O. YUKSEL, I. BARAN, J. H. HATTEL, J. SPANGENBERG, AND M. SANDBERG, *COMPOSITES PART B: ENGINEERING* 246, 110135 (2022).
- [ZEG19] A. Zoller, P. Escalé, and P. Gérard, *Front. Mater.* 6 (2019).