Fraunhofer IGCV

Fraunhofer-Institut für
Gießerei-, Composite- und
Verarbeitungstechnik IGCV

Abschlussbericht Projekt »MAI RIGATONI«

Effiziente Kreislaufführung von End-of-Life Faserverbundstrukturen sowie Demonstration der Second-Life Einsatzfähigkeit

Projektinfo
Projekt RIGATONI

Veröffentlicht am
30. April 2026

Projektlaufzeit
1. September 2023 bis 31. Oktober 2025

Das Forschungsprojekt wird gefördert vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie.

Impressum

Diese Publikation ist dauerhaft nachgewiesen im Repositorium der Fraunhofer-Gesellschaft unter https://doi.org/10.24406/publica-9772.

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.de abrufbar.

Herausgeber
Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV
Am Technologiezentrum 10
86159 Augsburg

Über das Projekt »RIGATONI«
Weitere Informationen zum Projekt:
https://s.fhg.de/rigatoni

Bildnachweise
Titelbild © Aerials Sydney1/Wirestock, stock.adobe.com
Sonstige Abbildungen, soweit nicht anders angegeben: © Fraunhofer IGCV

Geförderte Projektpartner
BWF Kunststoffe GmbH & Co. KG
Fisco GmbH
Fraunhofer IGCV

Assoziierte Partner
AESOLAR Energy GmbH
SGL Carbon SE
Butzbach GmbH Industrietore
Brose SE

Autorinnen und Autoren:
Fabian Rechsteiner, *korrespondierender Autor* (Fraunhofer IGCV)

Bernhard Leitner (Fraunhofer IGCV)
Florian Bisle (BWF Profiles)
Maximilian Herzog (BWF Profiles)
Franziska Schneck (fisco)
David Thull (fisco)

Nutzungshinweis
Der Text dieses Leitfadens wird freigegeben unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen, Version 3.0 Deutschland (CC BY-SA 3.0 de).

Unter der Bedingung, dass die Publikation als »Rechsteiner, et al. (2026). Abschlussbericht MAI RIGATONI« sowie die Lizenz als »Lizenz: CC BY-SA 3.0 de« einschließlich der unten stehenden Lizenz-URL genannt werden, darf der Text dieser Broschüre vervielfältigt, weitergereicht und auf beliebige Weise genutzt werden, auch kommerziell und ebenso online wie in gedruckter oder anderer Form. Auch die Bearbeitung ist erlaubt unter der zusätzlichen Bedingung, dass das neu entstandene Werk als Bearbeitung gekennzeichnet wird und im Falle einer Veröffentlichung unter derselben Lizenz wie diese Broschüre freigegeben wird.

Die vollständigen Lizenzbedingungen sind zu finden unter der URL
https://creativecommons.org/licen-ses/by-sa/3.0/de/legalcode
Eine vereinfachte Darstellung der durch die Lizenz gegebenen Freiheiten ist zu finden unter
https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/

Dieser Abschlussbericht informiert über die Ergebnisse des Forschungsprojektes *Effiziente Kreislaufführung von End-of-Life Faserverbundstrukturen sowie Demonstration der Second-Life Einsatzfähigkeit (MAI RIGATONI)*. Ziel des Projekts ist es kostengünstige Verfahren für das Recycling von Faserverbundmaterialien zu entwickeln und validieren. Der Fokus liegt hierbei insbesondere auf dem Recycling von glasfaserverstärkten Kunststoffen, da für dieses Material bisher keine etablierten Recyclingwege zu Verfügung stehen. Der Fokus von MAI RIGATONI liegt dabei auf der Zerkleinerung sowie verschiedener Faser-Matrix-Separation Prozesse, namentlich Pyrolyse und Hydrolyse, des Materials. Zudem werden geeignete Verarbeitungsrouten entwickelt, um die recycelten Fasern in neuen Produkten zu inkludieren.

Danksagung und Vorwort

Das Forschungsprojekt MAI RIGATONI wurde durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie gefördert. Wir danken dem Fördergeber für das entgegengebrachte Vertrauen und die finanzielle Unterstützung, die dieses Vorhaben ermöglicht hat. Ebenso gilt unser Dank dem Projektträger für die konstruktive Begleitung und reibungslose administrative Abwicklung während der gesamten Projektlaufzeit. Ein besonderer Dank richtet sich an die Projektpartner BWF Profiles, fisco und Fraunhofer IGCV für die engagierte und vertrauensvolle Zusammenarbeit, den offenen Wissensaustausch und die gemeinsame Entwicklungsarbeit, die maßgeblich zum Gelingen dieses Projekts beigetragen haben.

Darüber hinaus danken wir herzlich den Firmen AE Solar, Brose, Butzbach, SGL Carbon, Envalior sowie K&L Laminier- und Kaschiertechnik für die Bereitstellung von Materialien und Bauteilen sowie für die fachliche Unterstützung. Ohne ihre Kooperationsbereitschaft und ihr Engagement wäre die praxisnahe Umsetzung der Forschungsarbeiten nicht möglich gewesen.

Kurzzusammenfassung

Das Projekt MAI RIGATONI entwickelte und validierte Recyclingverfahren für glasfaserverstärkte Kunststoffe entlang der gesamten Prozesskette: von der Demontage und Zerkleinerung über die Faser-Matrix-Separation bis zur Wiederverarbeitung in marktfähigen Produkten. Das Konsortium aus Fraunhofer IGCV, BWF Profiles und fisco adressiert damit eine zentrale Lücke der bayerischen Verbundwerkstoffindustrie: das Fehlen etablierter Recyclingwege für GFK, die rund 95 % des europäischen Composites-Marktes ausmachen. Für die Faser-Matrix-Separation wurden Pyrolyse und Hydrolyse untersucht. Die Pyrolyse erhält bei Temperaturen unter 500 °C die Glasfaserfestigkeit nahezu vollständig, während die Hydrolyse mit subkritischem Wasser insbesondere für GF-PET (220–240 °C) hervorragende Ergebnisse liefert. Die recycelten Glasfasern wurden anschließend in zwei industriellen Verarbeitungsrouten erprobt: In der Extrusion konnten Compounds mit bis zu 50 % Recyclinganteil hergestellt werden, wobei die Prozessstabilität aufgrund von Materialinhomogenitäten eine zentrale Herausforderung bleibt. In der Pultrusion gelang die erfolgreiche Verarbeitung von rGF-Nassvliesen (350 g/m²) über 10 Laufmeter prozessstabil – mit einer Zugfestigkeit von nur 3 % unter dem Referenzwert. Die ökonomische und ökologische Bewertung zeigt das Potenzial des Ansatzes: Ein PV-Modulrahmen aus rGF-PP reduziert das Treibhauspotenzial um 87 % gegenüber Aluminium bei 19 % niedrigeren Kosten. Für Extrusionsprofile erweist sich ein Recyclinganteil von 10 % als industriell tragfähiger Kompromiss mit nur 16 % Festigkeitsreduktion. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für das Folgeprojekt RAILS sowie für die industrielle Umsetzung bei den Projektpartnern.

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
ASTM	American Society for Testing and Materials
BI	Berstindex
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CO_2eq	CO_2-Äquivalente
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie (Differential Scanning Calorimetry)
EN	Europäische Norm
EoL	End-of-Life
EP	Epoxidharz
ESPR	Ecodesign for Sustainable Products Regulation
EU	Europäische Union
FVK	Faserverstärkte Kunststoffe
FVW	Faserverbundwerkstoffe
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
IGCV	Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik
IEC	International Electrotechnical Commission
IR	Infrarot
ISO	International Organization for Standardization
LGW	Langgutwanne
lfm	Laufmeter
PA6	Polyamid 6
PC	Polycarbonat
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
rGF	Recycelte Glasfasern
SSbD	Safe and Sustainable by Design
TPA	Terephthalsäure
UP	Ungesättigtes Polyesterharz
UV	Ultraviolett
vGF	Virgin-Glasfasern (Neufasern)
WHO	World Health Organization
τ_{app}	Scheinbare Grenzflächenscherfestigkeit

Inhalt

Danksagung und Vorwort ... 3
Kurzzusammenfassung ... 3
Abkürzungsverzeichnis ... 4

1 Aufgabenstellung und Ziel des Vorhabens ... 6
1.1 Fehlendes Recyclingkonzept für Faserverbundstoffe (FVW) ... 6
1.2 MAI RIGATONI ... 6

2 Ablauf der Arbeiten und erzielte Ergebnisse ... 8
2.1 Arbeitspaket 1: Demontage und Zerkleinerung sowie Faser-Matrix-Separation ... 8
2.1.1 Zerkleinerungsversuche und Demontage ... 9
2.1.2 Pyrolyseversuche ... 13
2.1.3 Solvolyseversuche ... 17
2.1.4 Faser-Matrix Haftung ... 22
2.2 Arbeitspaket 2: Konstruktion nachhaltiger Materialien und Prozesse und Betrachtung der Kostenstruktur ... 25
2.2.1 Werkzeugentwicklung BWF ... 27
2.2.2 Kostenberechnung ... 28
2.3 Arbeitspaket 3: Entwicklung geeigneter Extrusionsverfahren für recycelte Materialien ... 30
2.3.1 Compoundierversuche Fraunhofer ... 30
2.3.2 Versuche zu Butzbach-Steg-Profil ... 31
2.3.3 Versuche zu PV-Modul Rahmenprofil ... 32
2.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung geeigneter Pultrusionsverfahren für das recycelte Material ... 35
2.4.1 Herstellung von Nassvliesen aus rGF ... 35
2.4.2 Verarbeitung der rGF-Nassvliese in der Pultrusion als Ersatz des Oberflächenvlies ... 37
2.4.3 Verarbeitung der Nassvliese in der Pultrusion als Ersatz der Langfaserwirrmatte ... 39
2.5 Arbeitspaket 5: Charakterisierung und Datenmanagement ... 43
2.5.1 Mechanische Prüfungen und Evaluierung im Anwendungsfall der Butzbach Profile ... 43
2.5.2 Mechanische Prüfungen und Evaluierung im Anwendungsfall der LGW ... 47

3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse für die mittelständische bayerische Wirtschaft und Transfermaßnahmen ... 57
3.1 Wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse ... 57
3.2 Transfermaßnahmen ... 58

4 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen ... 60

5 Zusammenfassung ... 62

1 Aufgabenstellung und Ziel des Vorhabens

1.1 Fehlendes Recyclingkonzept für Faserverbundstoffe (FVW)

Der Einsatz faserverstärkter Kunststoffe (FVK), insbesondere von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK), bringt enorme Vorteile hinsichtlich Leichtbaupotential, ausgezeichneten Korrosions-, problemlosen Verarbeitungs- sowie guten spezifischen Festigkeitseigenschaften. Deshalb nimmt dieser Werkstoff ca. 95 % des Marktanteils des europäischen Verbundwerkstoffmarktes ein. Das Recycling von Produkten, die aus FVW bestehen, stellt derzeit eine große Herausforderung an Forschung, Industrie und Gesellschaft. Aktuell ist es für die meisten Recyclingunternehmen nicht möglich Produkte und Materialien, die aus FVK bestehen, in einem geeigneten Recyclingprozess zu verwerten. Dies betrifft die anfänglichen Demontage- und Zerkleinerungsprozesse sowie die nachfolgenden weiterverarbeitenden Prozessschritte wie Faser-Matrix Separation sowie den Wiedereinsatz der Fasern in neuen Produkten. Die meisten FVK-Bauteile, die das Ende ihres Lebenszyklus erreicht haben, sowie ein Großteil der Produktionsreste, werden derzeit keiner stofflichen Verwertung zugeführt, sondern landen oft im Rest- und Sondermüll; im europäischen Ausland auch auf der Deponie. In Müllverbrennungsanlagen können beispielsweise Carbonfasern aufgrund der vorherrschenden Temperaturen und Verweilzeiten nicht vollständig zersetzt werden und enden als eingekürzte und verjüngte Faser (teilweise WHO-Faser, d.h. Faserstaub) im Abluftstrom und in der Schlacke. Dies kann zu technischen und viel schlimmer, zu gesundheitlichen Schäden führen und stellt keine zufriedenstellende Lösung einer Kreislaufführung dar. Aufgrund des jahrelangen Einsatzes von FVW ohne geeignetes Recyclingkonzept für dieses Material drängt es, geeignete Recyclingverfahren zu entwickeln, welche nicht nur technisch möglich, sondern auch wirtschaftlich rentabel sind.

Der Einsatz an FVW steigt deutlich an, ohne dass diese nach dem Ende des Lebenszyklus verwertet werden kann. Der Materialeinsatz ohne Recyclingkonzept für FVW ist aufgrund der sich immer mehr verschärfenden Klimakrise und der nur endlichen Verfügbarkeit von Rohstoffen nicht länger hinnehmbar. Im Projekt MAI RIGATONI wurden daher Prozesse und Technologien entwickelt, die nicht nur einen theoretischen Beitrag zum Recycling von FVW, insbesondere von GFK, sondern auch eine technisch und ökonomisch effiziente Realisierung der stofflichen Kreislaufführung ermöglicht. Um einen ökonomisch rentablen Prozess zu entwickeln wird das Recycling der FVW daher besonders effizient gestaltet. Das langfristige Ziel des Forschungsvorhabens MAI RIGATONI ist das Bereitstellen kreislauffähiger FVW, um den Einsatz nicht-recyclingfähiger bzw. nicht-recycelter Materialien zu senken und dadurch eine Belastung für Umwelt und Klima zu vermeiden.

1.2 MAI RIGATONI

Das Forschungsvorhaben MAI RIGATONI entwickelt neue Verfahren zum Recycling von FVW sowie Fertigungstechnologien zum Einsatz der recycelten Materialien und hilft damit erheblich dem Schließen von Stoffkreisläufen in Bayern. Eine Übersicht über die untersuchten Prozesse und beteiligten Firmen sind in Abbildung 1 dargestellt. Diese zu recycelten Produkte bestehen zu großen Teilen aus GFK (thermoplastisch und duromer) mit einem geringen Anteil an Metall.

Im Fokus des Vorhabens liegen verschiedene Verfahren zur Demontage und Zerkleinerung der genannten Produkte sowie ein innovatives Verfahren zu Faser-Matrix Separation. Darüber hinaus wird untersucht, inwieweit der Einsatz der recycelten Fasern in den Verarbeitungsprozessen Pultrusion und Extrusion sowie deren Produkten möglich ist.

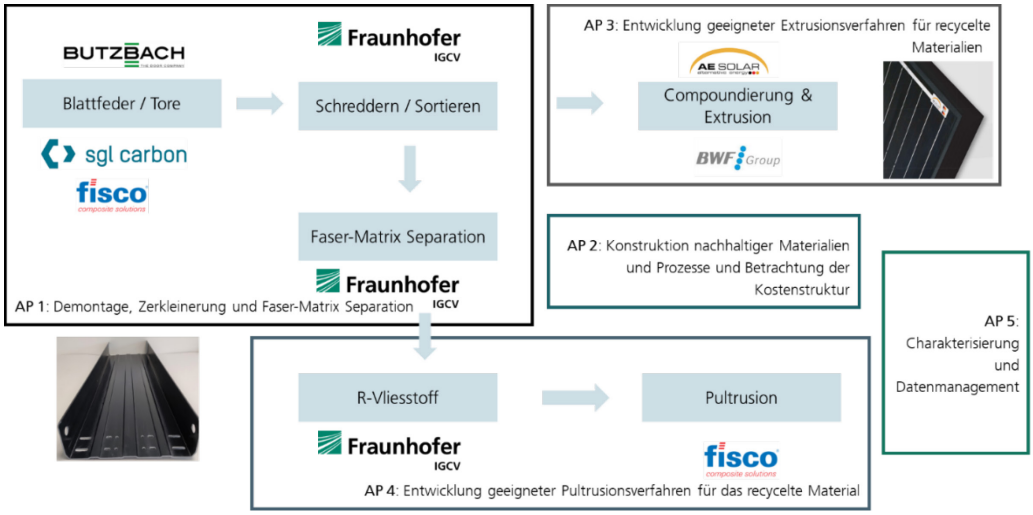


Abb. 1: Übersicht über die Arbeitspakete, die beteiligten Partner und verwendeten Prozesse.

Im ersten Arbeitspaket wurden die eingereichten Faserverbundbauteile (Blattfedern, Industrietore, Langgutwannen) demontiert, zerkleinert und in geeignete Materialfraktionen klassiert. Verschiedene Zerkleinerungsaggregate wurden erprobt, um geringe Materialverluste und definierte Faserlängen sicherzustellen. Parallel wurde ein Hydrolyseverfahren mit subkritischem Wasser entwickelt, um Glasfasern möglichst schonend aus Duromermatrixsystemen zu lösen und Kunststoff-Oligomere zurückzugewinnen. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Materialrouten Extrusion (Compound) und Pultrusion (Nassvlies).

In AP 2 wurden Produktdesigns und konstruktive Anpassungen für zwei Demonstratoren – PV-Modulrahmen und Langgutwanne – erarbeitet. Das Ziel war die Optimierung der Geometrien für den Einsatz der recycelten Materialien sowie die Ableitung von Designprinzipien für rGF-basierte Produkte.

Zusätzlich wurde eine umfassende Kostenanalyse der Prozesskette erstellt, die sowohl Recycling- als auch Fertigungskosten abbildet und die ökonomische Machbarkeit der entwickelten Technologien bewertet. AP 3 fokussierte sich auf die Compoundierung der geshredderten GFK-Materialien und die Weiterverarbeitung in Extrusionsprozessen. Es wurden Compounds mit bis zu 70 % Recyclinganteil entwickelt und auf Extrusionsanlagen zu Profilen, Platten und Demonstratoren verarbeitet. Neben der Prozessparameteroptimierung wurden auch Funktionalisierungen wie UV-Schutzschichten oder Coextrusionsprozesse untersucht. Hauptziel war die Fertigung eines funktionsfähigen PV-Rahmen-Demonstrators aus Recyclingmaterial. Im vierten AP wurden aus den recycelten Glasfasern am Fraunhofer IGCV Nassvliese hergestellt, die anschließend im Pultrusionsprozess bei fisco getestet wurden. Zentrale Aufgaben waren die Entwicklung geeigneter Faserdispersionen, Bindersysteme und Textilführungen sowie die Bewertung der mechanischen Eigenschaften der resultierenden Profile. Ein Langzeitversuch bestätigte die Prozessstabilität der Vlies-basierten Pultrusion. Ziel war hier der Einsatz von Recyclingvliesen als Ersatz für Neuware bei der Langgutwanne.

Abschließend wurden die mechanischen, thermischen und optischen Eigenschaften aller recycelten Materialien, Halbzeuge und Endprodukte umfassend charakterisiert. Dazu zählten u. a. Einzelfaserzugversuche, Matrixhaftungsanalysen, Bauteilprüfungen (Zug, Biegung, Impact) und UV-Stabilitätstests. Alle Materialkennwerte wurden für die Fraunhofer-Datenbank aufbereitet, um Vergleiche mit bestehenden Materialien und zukünftige Entwicklungen zu unterstützen.

2 Ablauf der Arbeiten und erzielte Ergebnisse

2.1 Arbeitspaket 1: Demontage und Zerkleinerung sowieFaser-Matrix-Separation

Zentrale Erkenntnisse AP 1

- Zweistufige Zerkleinerung (Vor- und Feinzerkleinerung) liefert die besten Ergebnisse; gewebeverstärkte Materialien ergeben eine homogenere Partikelgrößenverteilung als gelegeverstärkte.
- Pyrolyse unter 500 °C erhält die Glasfaserfestigkeit nahezu vollständig; oberhalb sinkt sie um bis zu 60 %. Die Fasersteifigkeit bleibt unabhängig von der Temperatur konstant.
- Hydrolyse ist ideal für GF-PET (220–240 °C, vollständige Matrixzersetzung bei minimaler Faserschädigung). Für EP/UP sind höhere Temperaturen (>300 °C) nötig, was zu stärkeren Festigkeitsverlusten (60–80%) führt.
- Faser-Matrix-Haftung sinkt nach Recycling um 20–40% für die meisten Matrixsysteme. Ausnahme: PET zeigt keine signifikante Reduktion.
- Matrixrückgewinnung ist grundsätzlich möglich: IR- und DSC-Analysen belegen unvernetzte Polymerketten (UP) bzw. TPA-Monomere (PET) in den Prozessrückständen.

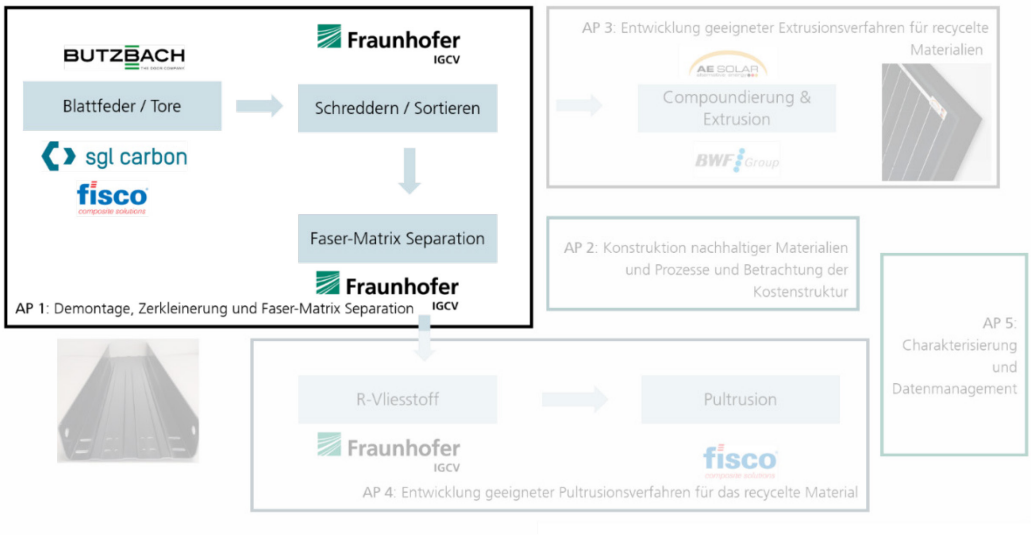


Abb. 2: Übersicht der Prozesskette.

Die Ziele des Arbeitspakets umfassen die Verfahrensentwicklung für die Demontage, das Screening und die Auswahl zur Verfügung stehender Zerkleinerungsverfahren sowie die Verfahrensentwicklung für einen optimalen Aufschluss von Faser und Matrix bei bestmöglichen Fasereigenschaften.

Die Arbeit in AP 1 umfasst die Entwicklung der ersten Prozessschritte des Recyclingprozesses: Demontage und Zerkleinerung. Des Weiteren werden zwei verschiedene Faser-Matrix Separationsprozesse auf die Eignung für GFK untersucht, um einen optimalen Aufschluss von Faser und Matrix zu ermöglich und dabei die bestmöglichen Fasereigenschaften erhalten. Darüber hinaus wird ein Lastenheft für die unterschiedlichen Anwendungen definiert. Die Leitung des AP 1 oblag dem Fraunhofer IGCV. Eine Übersicht mit den verarbeiteten Materialien ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

Bezeichnung	Lieferant	Faser	Matrix	Verarbeitet in
Industrietor	Butzbach	Glasfaser	Polyester/ PMMA	Zerkleinerung, Pyrolyse, Hydrolyse
Organoblech_PP	Envalior/Brose	Glasfaser	PP	Zerkleinerung, Pyrolyse, Hydrolyse
Organoblech_PA6	Envalior/Brose	Glasfaser	PA6	Zerkleinerung, Pyrolyse, Hydrolyse
Tape_PET	K&L Laminier	Glasfaser	PET	Pyrolyse, Hydrolyse

Tab. 1: Übersicht der verwendeten Materialien in AP1.

2.1.1 Zerkleinerungsversuche und Demontage

Im Rahmen der Zerkleinerung von GFK wurde mit verschiedenen Partnern zusammengearbeitet, um unterschiedliche Zerkleinerungsaggregate zu testen und einen Prozess zu identifizieren, der einen bestmöglichen Aufschluss des Materials ermöglicht. Zum einen wurden dafür Versuche bei Erdwich Zerkleinerungs-Systeme (Igling, Deutschland) an Ein- und Zweiwellenzerkleinerern[1] und bei Hosokawa Alpine (Augsburg, Deutschland) an Schneidmühlen[2] durchgeführt. Bei Erdwich wurde ein zweistufiger Prozess verwendet, da dadurch bessere Ergebnisse zu erwarten sind. Das Material wurde durch einen Zweiwellenzerkleinerer vorzerkleinert und in längliche Streifen geschnitten.

Abb. 3: Die verwendeten Zerkleinerungsmaschinen mit der Schneidmühle von Hosokawa Alpine[2] (links) und den Zweiwellenzerkleinerern von Erdwich[1] (Mitte) und den Aufbau für den zweistufigen Prozess (rechts).

[1] https://www.erdwich.com/maschinen/zerkleinerungsmaschinen/zweiwellen-zerkleinerer
[2] https://www.hosokawa-alpine.de/mechanische-verfahrenstechnik/technologien/mahlen-und-sichten/schneidmuehlen-schredder

Durch ein Förderband wird das Material dann auf einem Einwellenzerkleinerer transportiert und durch ein passend angebrachtes Sieb auf die gewünschte Größe zerkleinert. Bei Hosokawa wurde das Material auf einer Schneidmühle verarbeitet. Jedoch wurde auch mit einem zweistufigen Prozess gearbeitet bei dem das Material zuerst mit einem Sieb mit einer größeren Lochgröße (z.B. 10 mm) und anschließend auf die Zielgrößer (z.B. 6 mm) verarbeitet wurde.

Zerkleinerungsversuche thermoplastisches GFK

Zwei unterschiedliche Organobleche, bestehend aus Glasfaser-Gewebe und Thermoplastmatrix (PP und PA6) wurden bei Erdwich in einem zweistufigen Zerkleinerungsprozess verarbeitet (Organoblech_PP und Organoblech_PA6). Die Zerkleinerung der beiden thermoplastischen Materialien verlief problemlos. Durch den textilen Aufbau des Materials wurden die Organobleche in eher rechteckige als längliche Streifen zerschnitten, wodurch die Zerkleinerung auf dem Einwellenzerkleinerer etwas schneller verlief. Eine Zerkleinerung wurde mit einem 6 und in 10 mm Sieb vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. Es konnten keine eklatanten Unterschiede zwischen den beiden thermoplastischen Materialien festgestellt werden.

Die gleichen Materialien wurden bei der Firma Hosokawa Alpine an einer Schneidmühle verarbeitet. Das eine Material besteht aus glasfaserverstärktem Polypropylen Abbildung 1 (links), das andere Material aus glasfaserverstärktem Polyamid 6 Abbildung 1 (rechts). Material 1 bricht deutlich weniger spröde und wird dadurch bauschig, was die Förderfähigkeit des Materials stark beeinträchtigt. Material 2 bricht spröder und bauscht kaum auf. Dies ermöglicht eine bessere Förderung und Verarbeitung bei den Folgeprozessen.

Abb. 4: Zerkleinertes Organoblech nach der Vorzerkleinerung (links) und nach der Feinzerkleinerung (rechts).

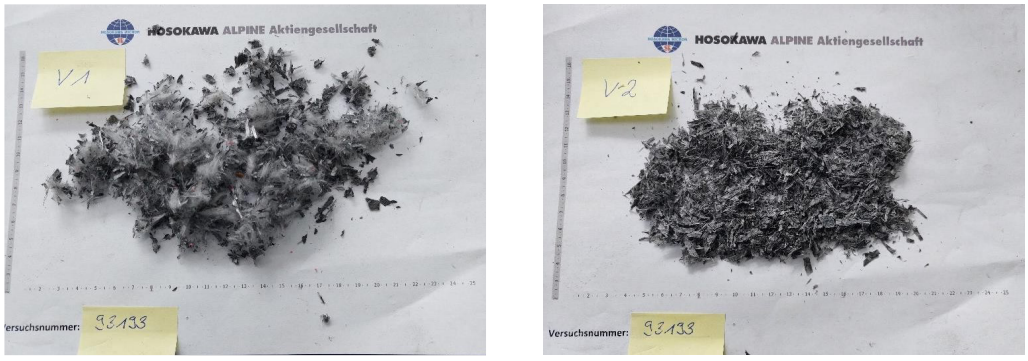


Abb. 5: Zerkleinertes Organoblech nach der Verarbeitung auf der Schneidmühle von Hosokawa mit GF-PP (links) und GF-PA6 (rechts) mit einem 6 mm Lochsieb.

Langgutwanne von fisco

Bei der Firma Erdwich Zerkleinerungssysteme wurden Versuche zur Zerkleinerung der Langgutwanne von fisco durchgeführt. Diese besteht aus duromeren endlosfaserverstärktes GFK aus dem Pultrusionsprozess. Die Zerkleinerung der LGW stellte keine Probleme für die beiden Wellenzerkleinerer dar. Das Material wurde durch ein 6 mm Sieb auf die geeignete Größe zerkleinert. Bilder zu den Versuchen sind in Abbildung 6 zu sehen.

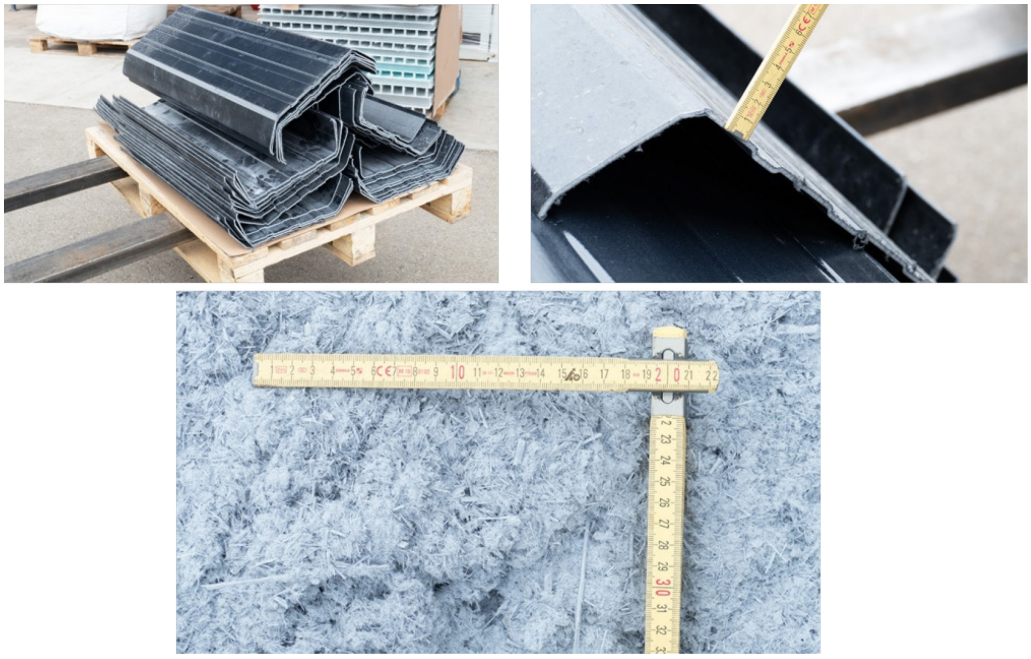


Abb. 6: Bilder der Langgutwanne (oben) vor der Zerkleinerung und nach der Zerkleinerung (unten).

Butzbach Industrietore

Die Zerkleinerung der Torpaneele aus einem zweischichtigen duromeren GFK-Verbund mit Stegplatten aus PMMA bei Erdwich verlief problemlos. Die Vorzerkleinerung hat die GFK-Platten in längliche Streifen geschnitten und die thermoplastischen Stegplatten dabei abgetrennt. Im Einwellenzerkleinerer erfolgte die Zerkleinerung auf die gewünschte Größe mit dem 10 mm Sieb. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt.

Abb. 7: Die vorzerkleinerten Industrietore der Firma Butzbach (links) und feinzerkleinert (rechts).

Zusätzlich wurden die Industrietore bei Hosokawa Alpine auf einer Schneidmühle zerkleinert. Dafür wurden zuerst verschiedene Siebeinsätze (3, 6 und 10 mm) in die Schneidmühle eingesetzt und das Ergebnis untereinander verglichen. Daraufhin wurde ein

zweistufiger Prozess mit einer Vorzerkleinerung mit einem 10 mm Sieb und im Anschluss eine feine Zerkleinerung mit einem 3 mm Sieb durchgeführt. Das zweistufig zerkleinerte Material weist einen geringen Anteil an fluffig agglomeriertem Material auf und sollte somit besser für die Folgeprozesse geeignet sein, da eine bessere Förderung in der Zuführung zum Verarbeitungsprozess zu erwarten ist (siehe Abbildung 8).

Abb. 8: Einstufig (oben) und zweistufig (unten) zerkleinertes Material der Firma Butzbach und die verwendete Schneidmühle der Firma Hosokawa Alpine (rechts).

Materialsiebung zerkleinertes GFK

Ein Teil des zerkleinerten Materials wurde auf der Vibrationsmaschine AS 300 Control von Retsch mit Sieben der Größe 1 mm, 2,8 mm und 5,6 mm für 5 min gesiebt, wie in Abbildung 9 und 10 dargestellt). Dabei wurde für das thermoplastische Organoblech (PA6) eine gleichmäßige Verteilung erreicht. Aufgrund der textilen Struktur (Gewebe) war einer eher quadratisches als längliches Bruchverhalten des Materials möglich, was zu einer guten Separierung des Materials führte. Die einzelnen Fragmente konnten so durch das Sieb fallen und haben sich nicht ineinander verhakt und Agglomerate gebildet.

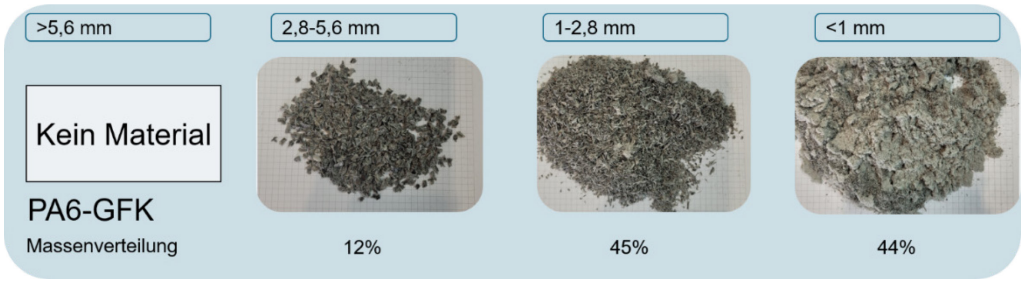


Abb. 9: Ergebnisse des Siebens der zerkleinertem PA6-GFK.

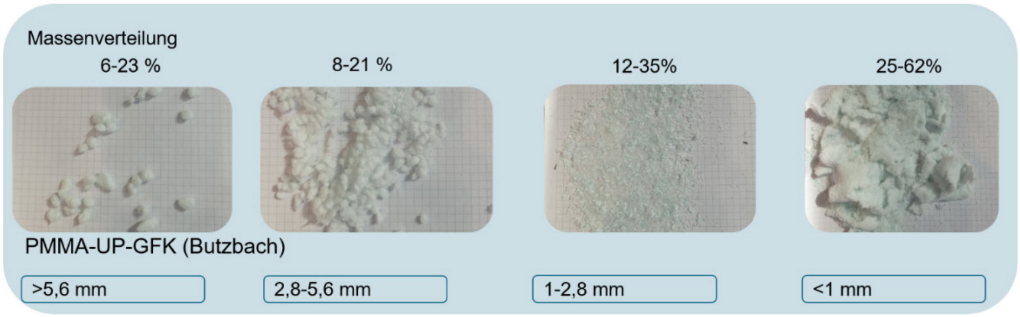


Abb. 10: Ergebnisse des Siebens der zerkleinertem PMMA-UP-GFK.

Das PMMA-Ungesättigtes Polyesterharz-GFK der Firma Butzbach ist aufgrund der textilen Struktur (Gelege) vor allem längs und weniger quadratische gebrochen beim

Zerkleinerungsprozess. Dies führt zu vermehrter Knäulchen Bildung/Agglomeraten, was das Material dabei hindert durch das Sieb zu fallen. Dies führt dazu, dass kleinere Partikel auch in den größeren Fraktionen aufzufinden sind. Zusätzlich schwanken die Ergebnisse der Massenverteilungen recht stark.

Grundsätzlich zeigen gewebeverstärkte Materialien eine homogenere Längenverteilung als Verstärkungen in nur eine Vorzugsuchrichtung, da diese Materialien in dieser Richtung brechen, was zu eher rechteckigen als quadratischen Partikeln führt.

2.1.2 Pyrolyseversuche

Nach der Zerkleinerung von GFK kann das Material zur Trennung von Faser und Matrix dem Pyrolyseprozess unterzogen werden. Hierbei wird das Material unter Stickstoffatmosphäre erhitzt, wobei der Kunststoff zersetzt wird und die Glasfasern mit geringen Koksrückständen freigelegt werden. Im Anschluss kann das entstandene Koks durch eine zweiten oxidativen Prozessschritt entfernt werden. Dabei wurden zwei verschiedene Materialien im Prozess untersucht. Die duromere Langgutwanne von fisco und die thermoplastischen Organobleche von Envalior. Die Übersicht der Versuche sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Duromeres Material

Die Auswertung zeigt eine Gewichtsabnahme zwischen 25 % und 42 % bei dem Recyclingprozess. Der Grund für die Gewichtsabnahme ist die Zersetzung der Kunststoffmatrix während des Pyrolyseprozesses. Die Matrix wird zu gasförmigen Bestandteilen zersetzt und durch ein Spülgas aus dem Ofen transportiert, wodurch die Glasfasern als fester Bestandteil zurückbleiben. Mit steigender Pyrolyse- und Oxidationstemperatur ist tendenziell eine höhere Gewichtsabnahme zu beobachten, da bei höheren Temperaturen eine größere Menge an Kunststoff zersetzt wird.

Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die Ergebnisse der Einzelfasercharakterisierung der recycelten Glasfasern aus der Langgutwanne. Es ist zu erkennen, dass durch die thermische Behandlung die Zugfestigkeit der Glasfasern zwischen 33% und 53% abnimmt. Zusätzlich zeigen die Ergebnisse eine hohe Streuung der Werte, was charakteristisch ist für den Einzelfaserzugversuch.

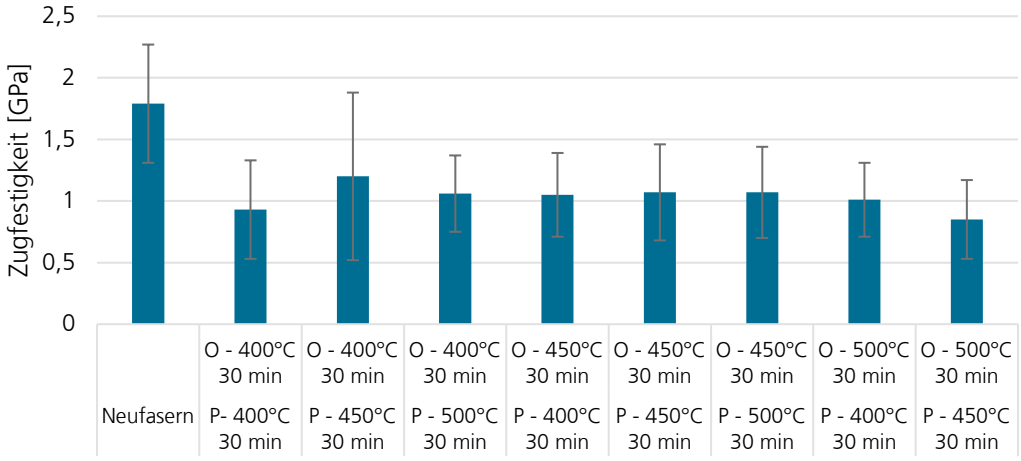


Abb. 11: Glasfaserzugfestigkeit des Duromeren Materials nach Pyrolyse und Oxidation.

Die Steifigkeit der Glasfasern bleibt weitestgehend unberührt und nimmt in einige Fällen sogar leicht zu. Eine klare Tendenz, bei welchen Temperaturen die Schädigung stärker oder geringer ist, lässt sich aus diesen Ergebnissen nicht schließen.

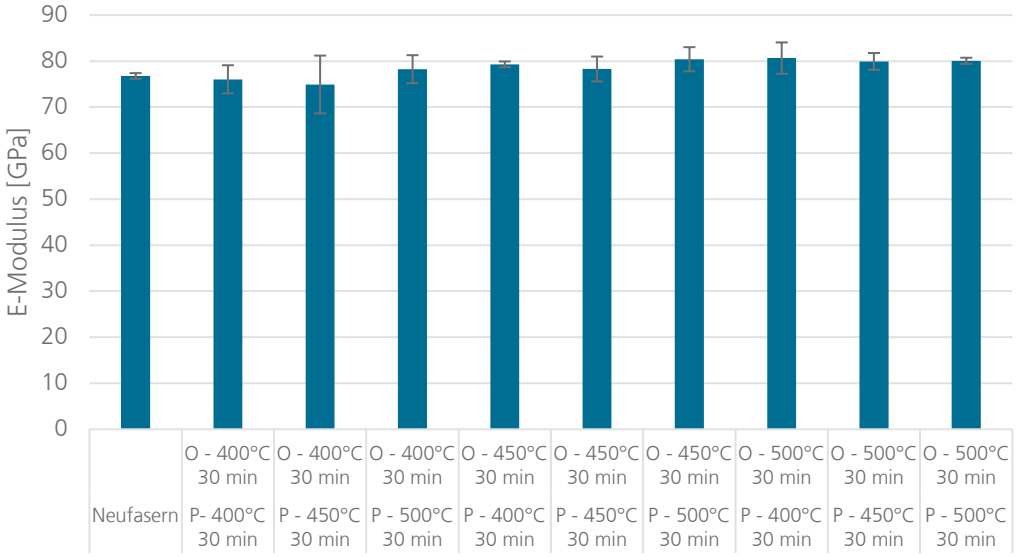


Abb. 12: Glasfaser E-Modul des Duromeren Materials nach Pyrolyse und Oxidation.

Tabelle 2: Pyrolyseversuche

Versuch	Temperatur [°C]	Haltezeit [min]	Atmosphäre	Gewicht vorher [g]	Gewicht nachher [g]	Verlust [%]	Gewichtsverlust Pyrolyse + Oxidation [%]
Langgutwanne (Duromer)							
Pyrolyse	450	30	Stickstoff	275.34	204.05	26	
	500	30		161.84	123.82	23	
	400	30		177.79	127.8	28	
Pyrolyse + Oxidation	400	30	technische Luft	27.1	26.88	1	27
	400	30		25.38	25.1	1	25
	400	30		23.9	23.4	2	30
	450	30		19.6	19.01	3	29
	450	30		24.66	22.77	8	3
	450	30		26.99	25.94	4	32
	500	30		34.63	33.71	3	29
	500	30		17.69	17.36	2	25
	500	30		24.83	23.15	7	35
Organoblech (Thermoplast)							
Pyrolyse	500	30	Stickstoff	24,52	15,76	36	
	550	30		17,63	11,55	35	
	500	60		29,01	18,94	35	
	450	30		33,31	21,82	35	
Pyrolyse + Oxidation	450	30	technische Luft	4,48	4,48	0	36
	450	30		4,87	4,87	0	35
	450	30		5,02	5,02	0	35
	450	30		4,64	4,62	0,43	35,43

Thermoplastisches Material

Die Ergebnisse für die recycelten Glasfasern aus den thermoplastischen Organoblechen sind der Abbildung 13 und Abbildung 14 zu entnehmen. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die thermische Behandlung des Materials die Faser geschädigt werden kann. Mit höheren Prozesstemperaturen nimmt die Faserfestigkeit ab, wie in Abbildung 13 zu sehen. Nach einer zweiten thermischen Behandlung unter 20 %-iger Sauerstoffatmosphäre (Oxidation) nimmt die Faserfestigkeit weiter ab und sinkt auf unter 50 % der Neufasereigenschaften. Allein bei einer Behandlung unter 500 °C wird die Faserfestigkeit nur geringfügig beeinflusst und Eigenschaften nahe den der Neufasern erhalten.

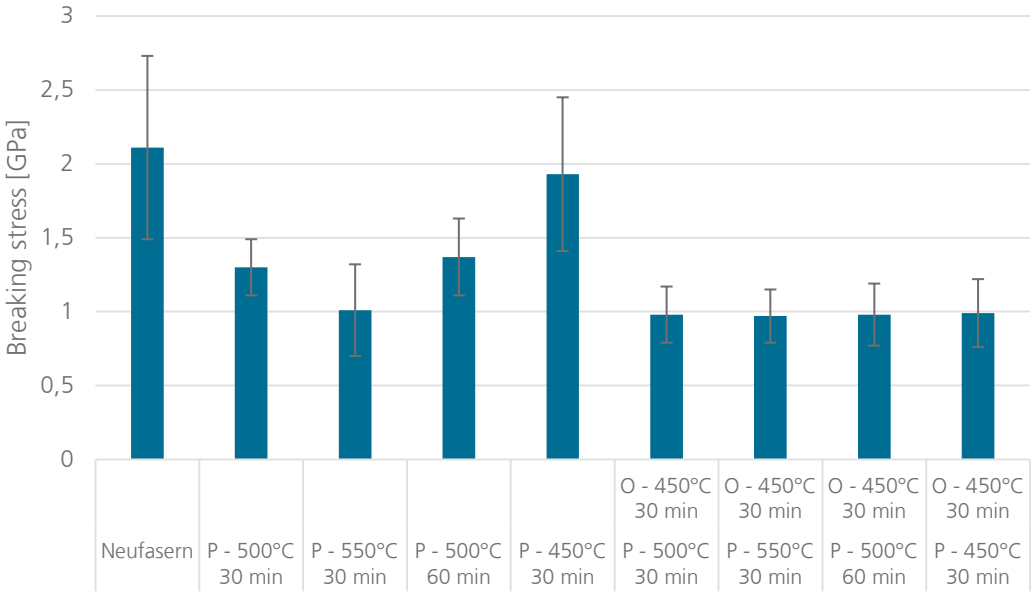


Abb. 13: Glasfaserzugfestigkeit des thermoplastischen Materials nach Pyrolyse und Oxidation.

Abbildung 14 zeigt die Steifigkeit des Materials nach Pyrolyse und nach Oxidation. Hier ist zu sehen, dass weder nach Pyrolyse noch nach der Oxidation Steifigkeitseinbußen zu verzeichnen sind. Die Steifigkeit der Einzelfaser bleibt über verschiedene Temperaturen hinweg konstant und steigt sogar leicht an.

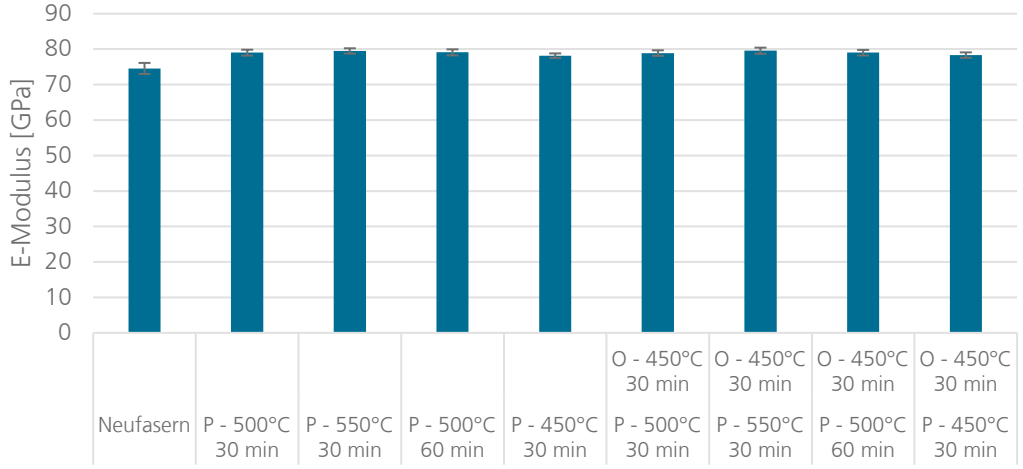


Abb. 14: Glasfaser E-Modul des thermoplastischen Materials nach Pyrolyse und Oxidation.

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass der Pyrolyseprozess zur Freilegung der Glasfaser im Recycling einen starken Einfluss auf die Eigenschaften der Glasfasern haben kann und die Festigkeit um bis zu 60% reduzieren kann. Wenn die Trennung von Faser und Kunststoff jedoch unter 500 °C erfolgt, bleiben die mechanischen Eigenschaften vergleichbar zu Neufasereigenschaften.

2.1.3 Solvolyseversuche

Ein weiterer Prozess zur Trennung von Faser und Matrix ist die Solvolyse, wo die Trennung durch ein Lösemittel erfolgt. In diesem Projekt ist die Hydrolyse im Fokus, wo Wasser durch erhöhte Temperatur und Druck im subkritischen Zustand als Lösemittel eingesetzt wird und Kunststoffketten aufbricht. Eine Übersicht über die durchgeführten Versuche ist Tabelle 3 zu entnehmen. Abbildung 15 zeigt den verwendeten Druckreaktor von Büchi (Uster, Schweiz). Das Ziel der Versuche ist eine geringe Schädigung der Faserfestigkeit durch den Faser-Matrix Separationsprozess aufgrund der geringeren Temperaturen (< 350 °C).

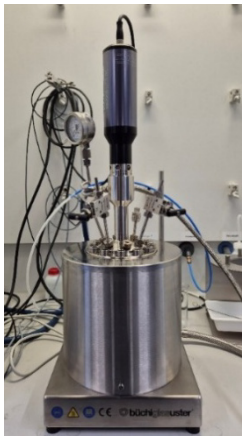


Abb. 15: Druckreaktor »novoclave« der Firma Büchi

Medium	Volumen [ml]	Material	Menge [g]	Reaktortemperatur [°C]	Haltezeit [min]	p [bar]	Zersetzung der Matrix [%]
Vollentsalztes Wasser	150	UP-Reinharz	0,50	238	45	28-33	0
	150		0,50	263	60	45-50	37
	150		0,50	271	60	50-55	68
	250	UP-GFK (Butzbach)	1,40	305	75	85	90
	250		1,62	281	77	64	66
	150	Epoxy-GFK	0,50	284	60	60-70	31
	150		0,41	292	66	75	58
	150		0,50	293	75	75	61
	250		1,12	315	80	103	100
	250		1,43	304	85	90	90
	250	GF-PET	0,79	220	30	25	97
	250		0,86	240	30	35	100

Tab. 3: Übersicht der durchgeführten Hydrolyseversuche.

Zu Beginn wurden Versuche mit unverstärktem ungesättigten Polyesterharz (UP-Harz) durchgeführt, um geeignete Parameter für die Zersetzung des Polymers zu identifizieren. Sobald ein geeigneter Zersetzungsgrad erreicht war, wurden Versuche mit GFK mit UP-Harz durchgeführt, um die Glasfasern aus dem Polyester zu lösen. Dies war bei einer

Temperatur von 305 °C und einer Haltezeit von 75 Minuten mithilfe des Reaktors möglich. Der Kunststoff wurde hier zu 90 % zersetzt, was ausreichend ist, um die Fasern aus dem Verbund zu lösen.

Reste wurden von den Fasern mithilfe von Aceton gelöst. Im nächsten Schritt wurde die Zersetzung von glasfaserverstärktem Epoxidharz untersucht. Hierfür sind höhere Temperaturen notwendig. Eine 100 %-ige Zersetzung des Polymers war bei 315 °C und einer Haltezeit von 80 Minuten möglich.

Abbildung 16 zeigt Glasfasern nach einem Hydrolyseprozess bei 281 °C, bei der das Polyester gelb verfärbt und nicht vollständig zersetzt wird. Abbildung 17 zeigt eine Glasfaser nach einem Hydrolyseprozess bei 315 °C, die vollständig von dem Kunststoff gelöst wurden.

Das thermoplastische PET zersetzt sich bei deutlich geringeren Temperaturen zwischen 220 °C und 240 °C. Die Trennung von GF und PP ist durch die Hydrolyse nicht möglich, da PP zu unpolar ist und keine Möglichkeiten zur Hydrolyse bietet. Auch die Verarbeitung verschiedener GF-PA6 Materialien war nicht erfolgreich. Bei den notwendigen Temperaturen zwischen 240 °C und 260 °C zur Trennung von PA6 und GF kamen die GF brüchig aus dem Prozess, wodurch ein Testen oder Verarbeiten nicht möglich ist.

Abb. 16: Solvolysierte Glasfasern mit nicht vollständig zersetzen Polyesterharzresten führt zu gelblicher Verfärbung.

Ergebnisse Hydrolyse von duromeren GFK

Abbildung 18 zeigt den Zersetzungsgrad von Polyester und Epoxy über die verschiedenen Temperaturen im Hydrolysereaktor. Dies lässt deutlich erkennen, dass mit höheren Temperaturen ein höherer Zersetzungsgrad erreicht werden kann. Zusätzlich ist zu sehen, dass für Epoxy etwas höhere Temperaturen über 315 °C notwendig sind für eine Zersetzung als bei Polyester (~300 °C).

Abbildung 19 stellt die Eigenschaften der Glasfasern nach dem Hydrolyseprozess im Vergleich zu den Neufasereigenschaften dar. Die Faserfestigkeit sinkt hierbei um zwischen 60–80 % im Vergleich zu den Neufasern. Dabei sind bei den höchsten Temperaturen die stärksten Schädigungen zu sehen. Die Fasersteifigkeit bleibt über die verschiedenen Prozessparameter relativ konstant und wird nicht vom Hydrolyseprozess beeinträchtigt. Die Fasern bilden durch die Behandlung in Wasser wahrscheinlich Spannungskorrosionsrisse, was zu einer frühen Risseinleitung bei Zugbelastung führt, wodurch die Faserfestigkeit dementsprechend stark sinkt.

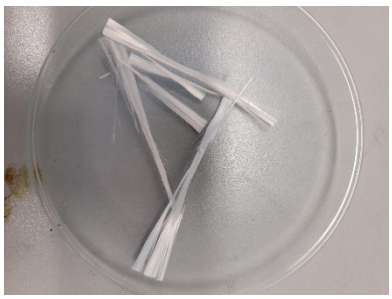


Abb. 17: Vollständig freigelegte Glasfasern aus einer Epoxy-Matrix.

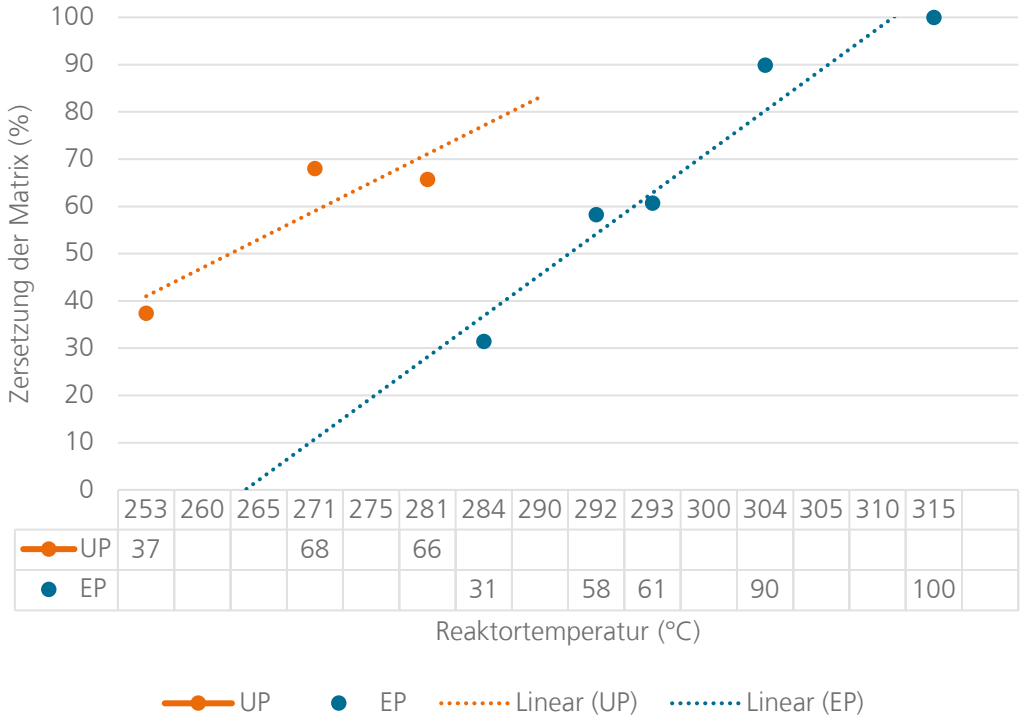


Abb. 18: Zersetzungsgrad der Matrix über verschiedene Reaktortemperaturen für Polyester und für Epoxy.

Aus Versuch 4 (305 °C Reaktortemperatur) wurden die vom UP-Harz im Wasser zurückbleibenden Reste in der DSC analysiert (siehe Abbildung 19), hier lässt sich feststellen, dass die Glasübergangstemperatur bei 128°C liegt und damit genauso hoch wie bei den unbehandelten Polyesterproben. Hieraus lässt sich schließen, dass noch ein Polymer vorliegt.

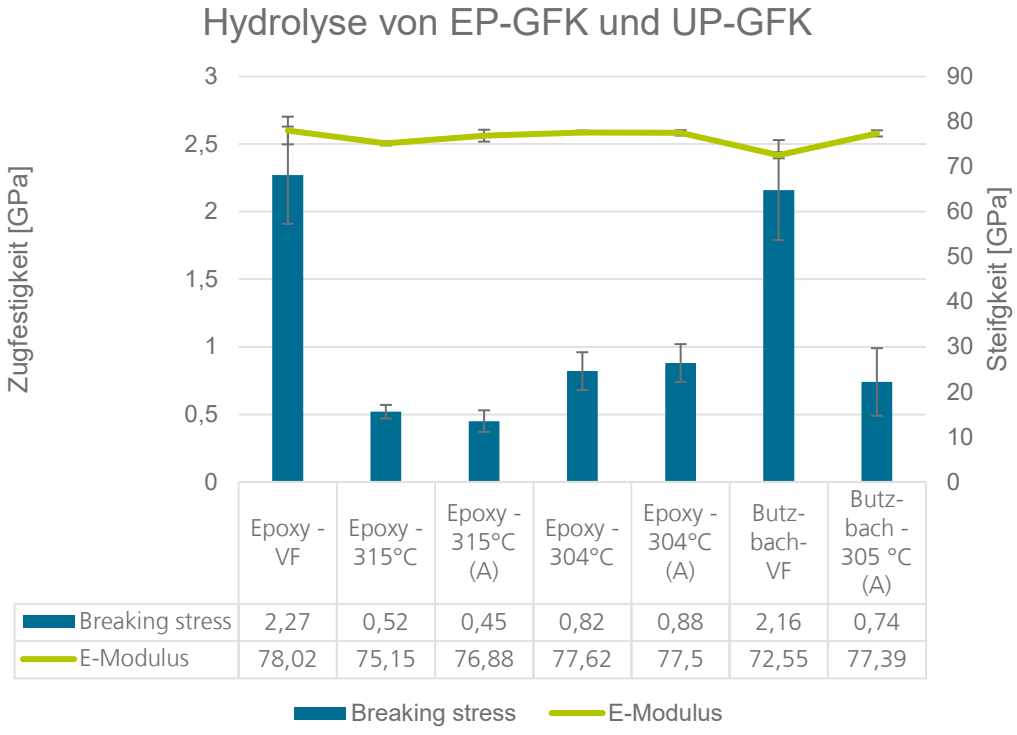


Abb. 19: Eigenschaften der recycelten Glasfasern (duromer) nach der Hydrolyse.

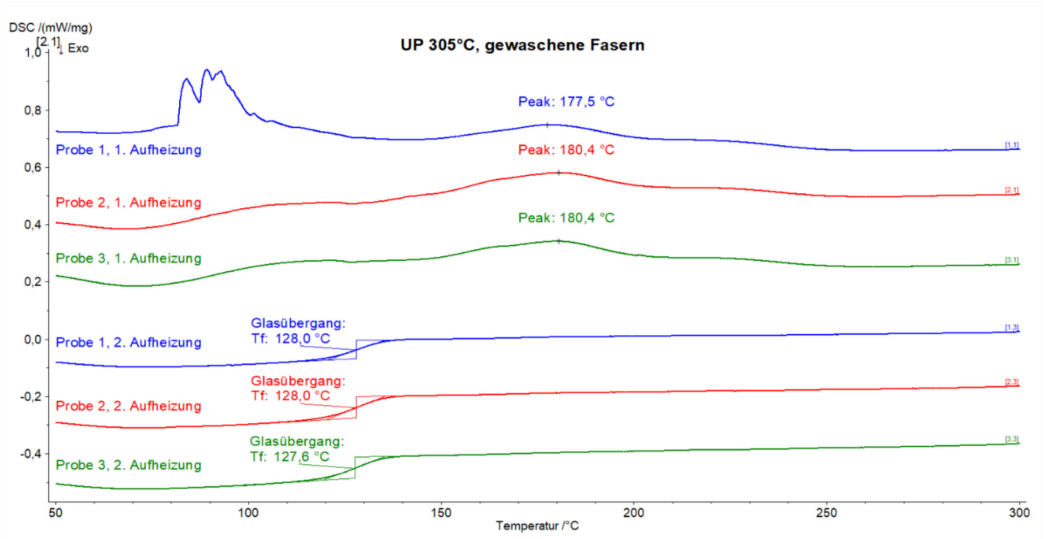


Abb. 20: DSC-Messung der UP-Harz Rückstände bei 305 °C Reaktortemperatur.

Eine Analyse der durch Aceton gelösten Rückstände des UP-Harzes mittels IR-Spektroskopie ergibt, dass die wiedergewonnen Matrixreste sowohl mit Literaturwerten für mit Wasser zersetztes UP-Harz gut übereinstimmen als auch, dass Polystyrol sehr ähnliche Peaks aufweist wie die wiedergewonnen Polymerreste (vgl. Abbildung 20). Denn das untersuchte Material zeigt bei den gleichen Wellenlängen Peaks wie Polystyrol und zusätzlich bei einer Wellenzahl von etwa 1700 cm^{-1}. Was dafür spricht, dass neben Polystyrolketten auch Polymerketten mit Carboxylgruppen vorhanden sind, was ebenfalls mit Literaturdaten aus der genannten Quelle übereinstimmt. Diese Polymerketten liegen zudem mit hoher Wahrscheinlichkeit unvernetzt oder nur mit geringer Vernetzung vor. Eine Wiedergewinnung des zersetzen Kunststoffes und die thermoplastische Weiterverarbeitung sollte somit daher grundsätzlich möglich sein.

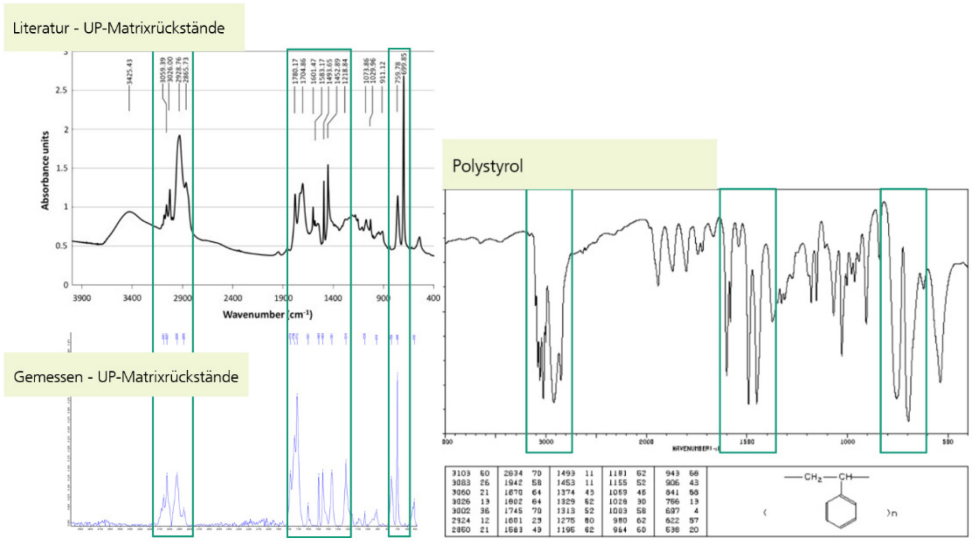


Abb. 21: Ergebnisse aus der IR-Spektroskopie der Rückstände im Wasser. Literatur/Werte siehe [1] und [2].

[1] Oliveux, Géraldine, Jean-Luc Bailleul, and Eric Le Gal La Salle. "Chemical recycling of glass fibre reinforced composites using subcritical water." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 43.11 (2012): 1809-1818.

2 AIST, spectral database, https://sdbs.db.aist.go.jp/IrSpectralView.aspx?fname=NIDA5943&sdbsno=1957, aufgerufen am 28.04.2026.

Ergebnisse Hydrolyse von thermoplastischem GFK

Die Verarbeitung von den getesteten thermoplastischem GFK im Hydrolyseprozess ist generell bei geringeren Temperaturen möglich als bei duromeren GFK im Bereich von 210 °C bis 260 °C. Abbildung 22 zeigt das Verhältnis von Matrixzersetzung zu den Verarbeitungstemperaturen. Die Eigenschaften der hydrolysierten Glasfasern aus dem GF-PET sind in Abbildung 23 dargestellt. Hier wird ersichtlich, dass die Hydrolyse einen geringeren Effekt auf die Faserfestigkeit bei GF-PET hat. Im Vergleich zu den Duromeren Materialien sinkt die Faserfestigkeit bei 210 °C um nur 27 % im Durchschnitt und bei 240 °C gibt es keinen signifikanten Unterschied in der Faserfestigkeit zwischen neuen und recycelten Fasern. Grund hier ist zum einen die geringere Temperatur des Hydrolyseprozesses sowie möglicherweise eine saure Umgebung durch die Terephthalsäure aus dem gelösten PET.

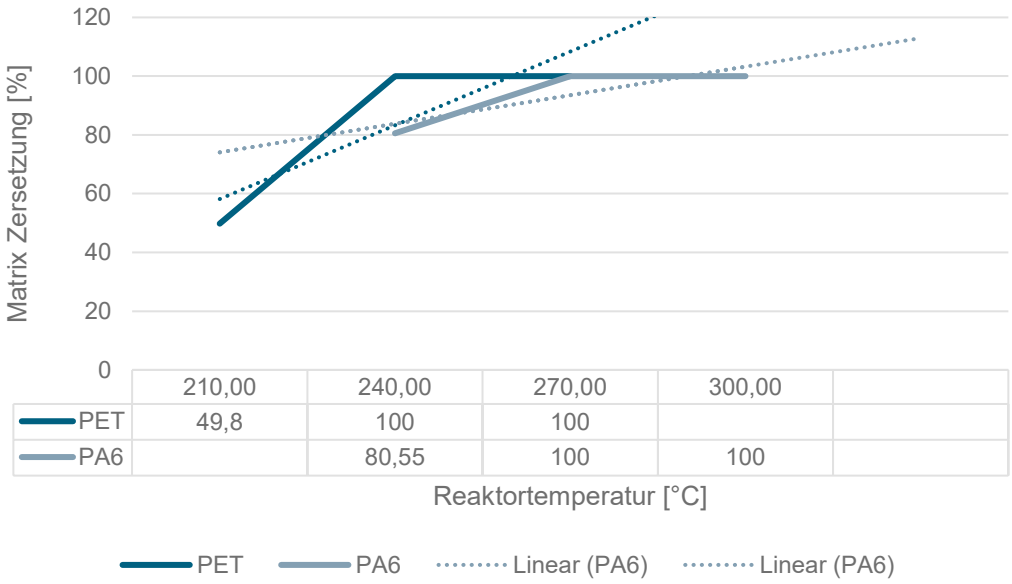


Abb. 22: Zersetzungsgrad der Matrix über verschiedene Reaktortemperaturen für PET und PA6.

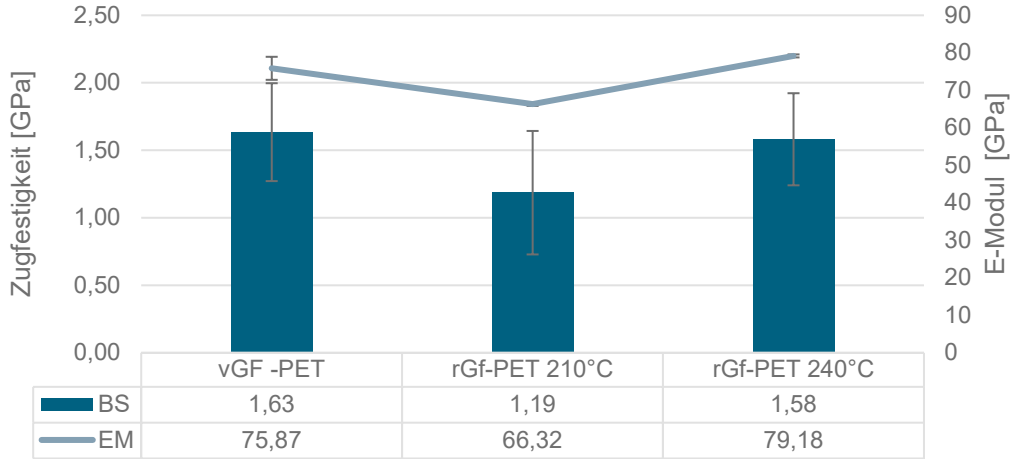


Abb. 23: Eigenschaften der recycelten Glasfasern (thermoplastisch) nach der Hydrolyse.

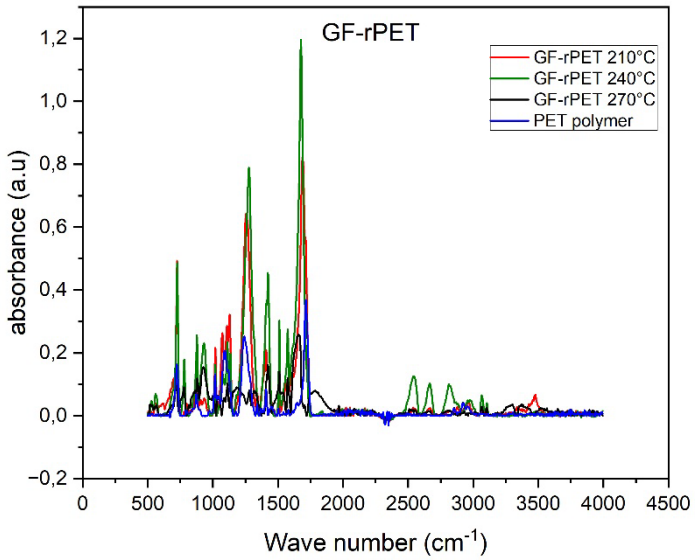


Abb. 24: IR-Spektrum des wiedergewonnen Matrix-rückstands von den GF-PET Proben[1].

Die Spektren der aus GF-rPET bei 210 °C, 240 °C und 270 °C gewonnenen festen Rückstände sind in Abbildung 24 dargestellt. Der gewonnene Feststoff weist eine vom Ausgangspolymer abweichende chemische Struktur auf, was die Hydrolyse bestätigt. Der Carbonylpeak (C=O), der im Polymer ursprünglich bei 1715 cm^{-1} lag, verschiebt sich im Rückstand zu niedrigeren Wellenzahlen (1680–1690 cm^{-1}), dieser Peak wurde bei 1673 cm^{-1} ebenfalls für das Abbauprodukt TPA bei dem PET-Recycling von Rubios et. al. gefunden[2]. Die schärfsten und deutlichsten Monomerspektren wurden bei 240 °C erhalten. Bei 270 °C nimmt die Signalintensität jedoch deutlich ab. Dies könnte auf einen thermischen Abbau des zurückgewonnenen Monomers hindeuten. Grundsätzlich zeigt sich das Hydrolyseverfahren daher als Faser-Matrix Separationsprozess für spezifische Materialkombinationen, wie GF-PET, als sehr geeignet, da hier hochwertige Sekundärrohstoffe hervorgebracht werden. Für die meisten getesteten Materialkombinationen führt die Hydrolyse jedoch zu starken Festigkeitseinbußen, weshalb dieser Prozess weniger geeignet erscheint. Die Verwendung von Säuren als Lösemitteln anstatt Wasser erscheint hier als mögliche Alternative.

2.1.4 Faser-Matrix Haftung

Während der Verarbeitung von GFK im Pyrolyse- oder Hydrolyseprozess wird nicht nur die Kunststoffmatrix von der Faser gelöst, sondern auch die haftvermittelnde Schlichte auf der Faseroberfläche. Dadurch kann sich die Faser-Matrix Haftung zwischen den recycelten Glasfasern und der Polymermatrix verringern. Um dies zu überprüfen wurden verschiedene Glasfasern (recycelt und neu) im Faserauszugsversuch[3] getestet und die Ergebnisse verglichen. Es wurden verschiedene recycelte Fasern aus dem Pyrolyse- und dem Solvolyseprozess untersucht, um etwaige Unterschiede zu identifizieren. Ein weiteres Ziel war zu verstehen, ob der Koksgehalt auf den Fasern nach dem Pyrolyseprozess einen

[1] Veralikkattil Assainar, Mohammed Hafis (2025). Chemical recycling of fiber reinforced plastics via subcritical water hydrolysis, Master thesis Hamburg University of Technology, Hamburg, 2025.

[2] Rubio Arias, J.J., Barnard, E., Thielemans, W. (2022). Ultrafast simultaneous and selective depolymerization of heterogeneous streams of polyethylene terephthalate and polycarbonate: Towards industrially feasible chemical recycling, *ChemSusChem*, Vol. 15, No. 15, e202200625, doi: 10.1002/cssc.202200625

[3] ISO 19375:2024-11

Einfluss auf die Faser-Matrix-Haftung hat und ob eine fehlende Schlichte einen negativen Einfluss auf die Anhaftung hat.

Tab. 4: Ergebnisse der Faser-Matrix Haftung recycelter Glasfasern im Vergleich zu neuen, beschlichteten Glasfasern.

Fasertyp	Matrixtyp	τ_{app} [MPa]	Standard-abweichung
Neu	Epoxy	58,19	14,99
Pyro mit hohem Koksgehalt		42,46	6,74
Pyro mit mittlerem Koksgehalt		44,42	7,29
Pyro mit geringem Koksgehalt		43,59	12,62
Neu	UP	51,31	9,26
Pyro mit hohem Koksgehalt		32,08	7,88
Pyro mit geringem Koksgehalt		32,73	15,21
Hydrolysierte GF		37,73	14,24
Neu	PET	54,57	16,24
Pyro mit hohem Koksgehalt		49,72	24,92
Pyro mit geringem Koksgehalt		51,8	11,07
Neu	PA6	37,08	4,29
Pyro mit geringem Koksgehalt		28,91	13,12
Desized		25,35	5,49
Neu	PP	7,72	1,01
Pyro mit hohem Koksgehalt		5,51	0,98
Pyro mit geringem Koksgehalt		5,34	1,58

Während der Verarbeitung von GFK im Pyrolyse- oder Hydrolyseprozess wird nicht nur die Kunststoffmatrix von der Faser gelöst, sondern auch die haftvermittelnde Schlichte auf der Faseroberfläche. Dadurch kann sich die Faser-Matrix Haftung zwischen den recycelten Glasfasern und der Polymermatrix verringern. Um dies zu überprüfen wurden verschiedene Glasfasern (recycelt und neu) im Faserauszugsversuch getestet und die Ergebnisse verglichen. Es wurden verschiedene recycelte Fasern aus dem Pyrolyse- und dem Solvolyseprozess untersucht, um etwaige Unterschiede zu identifizieren. Ein weiteres Ziel war zu verstehen, ob der Koksgehalt auf den Fasern nach dem Pyrolyseprozess einen Einfluss auf die Faser-Matrix Haftung hat und ob eine fehlende Schlichte einen negativen Einfluss auf die Anhaftung hat.

Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Faserauszugsversuche von verschiedenen recycelten Glasfasern und Polymeren im Vergleich zu neuen (beschlichteten) Glasfasern. Die Faser-Matrix Haftung wird gemessen in der sogenannten scheinbaren Grenzflächenscherfestigkeit τ_{app}. Diese sinkt bei den meisten recycelten Glasfasern im Vergleich zu den Neufasern.

Im Fall von Epoxy zeigt sich für recycelte Fasern eine mittlere Reduktion der scheinbaren Scherfestigkeit (τ_{app}) von durchschnittlich 20 %. Hinsichtlich variierender Koksgehalte lassen sich dabei keine signifikanten Unterschiede in der Faser-Matrix-Haftung feststellen. Für Polyester wurde eine Abnahme der Haftung von ca. 40 % gegenüber Neufasern ermittelt. Auch hier zeigen weder unterschiedliche Koksgehalte noch Fasern aus dem Hydrolyseprozess einen signifikanten Einfluss auf die Faser-Matrix-Haftung. Vergleichbare Ergebnisse wurden für die Materialkombinationen PA6 und PP mit Glasfasern beobachtet. Lediglich für PET ergibt sich keine signifikante Reduktion der Haftung recycelter Fasern gegenüber Neufasern.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für die Mehrzahl der untersuchten rGF-Matrix-Kombinationen ein moderater Verlust der τ_{app} im Bereich von 20–40 % zu

verzeichnen ist. In Anwendungsfällen mit erhöhten mechanischen Anforderungen kann daher eine Schlichtung der Fasern zur Kompensation der Haftungsreduktion sinnvoll sein. Eine Ausnahme bildet PET, bei dem die Haftung der recycelten Glasfasern auf dem Niveau von Neufasern verbleibt.

2.2 Arbeitspaket 2: Konstruktion nachhaltiger Materialien und Prozesse und Betrachtung der Kostenstruktur

Die Ziele des Arbeitspakets umfassen die Entwicklung von Design- und Konstruktionsansätzen für recycelte Materialien sowie die kostenseitige Evaluation der Prozesse und Materialien.

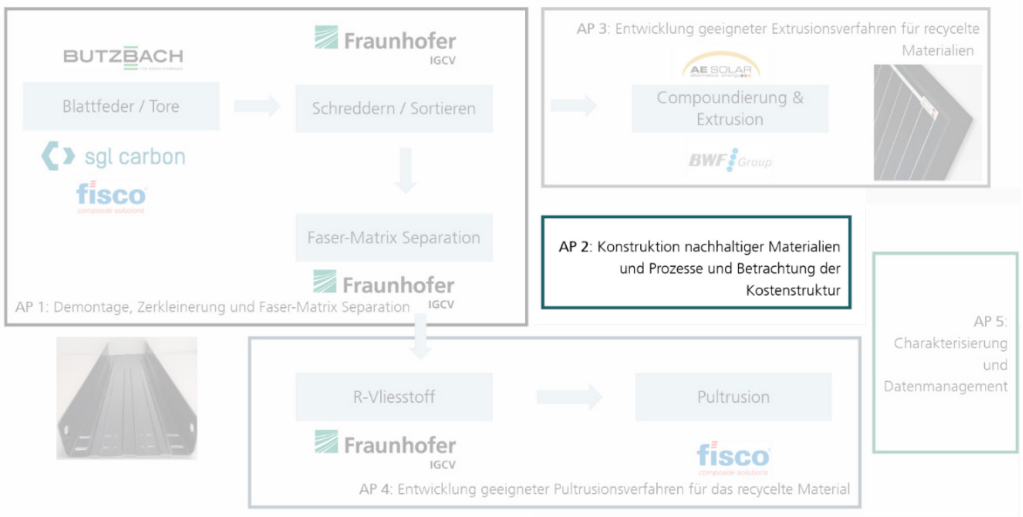
Definition des Lastenheftes

Diese Lastenhefte dienen dazu, die notwendigen Anforderungen der Bauteile zu definieren und die vorgeschalteten Prozesse danach auszurichten.

Abb. 25: Übersicht der Prozesskette.

Zentrale Erkenntnisse AP 2

- PV-Rahmen aus rGF-PP: 87 % geringeres Treibhauspotenzial als Aluminium bei 19 % niedrigeren Kosten: wirtschaftlich und ökologisch attraktivste Variante.
- Stegprofil (Butzbach): 40 % CO_2-Reduktion gegenüber Virgin-PMMA, jedoch 31 % höhere Materialkosten.
- Nassvlies (Pultrusion): Aktuell +14 % Kosten und +12 % GWP gegenüber konventionellem CSM
- Werkzeugauslegung: Mindestwandstärke 0,8 mm, großzügige Radien und angepasste Parallelzonen sind kritische Designparameter für rGF-Profile.



Langgutwanne

Die Anforderungen an die Nassvliese aus den recycelten Glasfasern wurden in dem Lastenheft festgelegt. Die wichtigsten Punkt sind der Tabelle 5 zu entnehmen.

Tab. 5: Die Anforderungen für das Nassvlies aus rGF.

Parameter	Wert / Kommentar
Grammatur	ca. 34 g/m²
Dicke	0,24 mm
Bindersystem	Aktuell nicht vorhanden, da thermische Verfestigung vorliegt
Höchstzugkraft in Faserrichtung (nach EN 29073-3)	85 N/50mm
Mullen-Bruch (nach ASTM D3786)	133 kPa
Faserlänge	k.A.
Recyclinganteil	100% gewünscht
Reproduzierbarkeit	gleichbleibende Qualität muss gewährleistet werden
Imprägnierfähigkeit	Pultrusionsfähigkeit muss gegeben sein; wird bis dato nach Gefühl entschieden

PV-Rahmen

Die Anforderungen an das Material für den PV-Rahmen wurden in dem Lastenheft zusammengestellt. In Tabelle 6 sind die wichtigsten Kriterien für den Rahmen des PV-Moduls zusammengefasst.

Tab. 6: Anforderungen des PV-Rahmens.

Parameter	Wert / Kommentar
Wärmeausdehnung	Wärmeausdehnung vergleichbar mit Aluminium (ca α=23,1*10-6 1/K)
Mechanische Lasten an Verbindungselementen	Hohe Lasten auf den Rahmen dort, wo die Klemmen sitzen → dort könnte der Kunststoff aufgrund des hohen Drucks und hoher Temperaturen anfangen zu fließen (Schrumpfung); in manchen Ländern erhitzen sich die PV-Module auf 60°C (nicht unbedingt der Rahmen) → Coating für eine geringere Erwärmung des Materials
Mechanische Belastung	5400 Pa statische und 2800 Pa dynamische mechanische Belastungen ausgehalten werden (Schneelast und Windlast) IEC61215
Feuerwiderstandsfähigkeit	Feuerwiderstandsfähig (UL790, DIN13501, IEC61730-2)
Toxizität	Nicht toxisch, kein Schadstoffeintrag in den Boden, mind. 30 Jahre Lebensdauer (insbesondere UV-resistent)
Farbe	Nicht farbverändernd (falls nicht ohnehin schwarz)
Erdung	Pv-Modul muss eine Erdung haben

2.2.1 Werkzeugentwicklung BWF

Zu Beginn des Projekts wurden erste Querschnittskonzepte für einen extrudierten, faserverstärkten Kunststoffrahmen für Solarmodule der Firma AE Solar entwickelt und mittels 3D-Druck umgesetzt. In einem Vor-Ort-Termin wurden die zentralen Produkteigenschaften definiert und in einem Lastenheft festgehalten, wobei die Wirtschaftlichkeit als wesentliche Randbedingung hervorgehoben wurde. Parallel wurden in der Kooperation mit der Firma Butzbach erste Ansätze zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften bestehender Torprofile diskutiert. Als Ausgangspunkt wurde ein 80-mm-Bandprofil definiert, das im weiteren Projektverlauf hinsichtlich Verarbeitung und Belastbarkeit untersucht werden soll. Darüber hinaus wurde der Einsatz recycelter Glasfasermaterialien in extrudierten Jalousieprofilen mit einem Hersteller für Verschattungslösungen erörtert. Für erste Verarbeitungstests wurde anschließend ein Testwerkzeug, s. Abbildung 24 (BWF Nr. 15417) konstruiert und gefertigt.

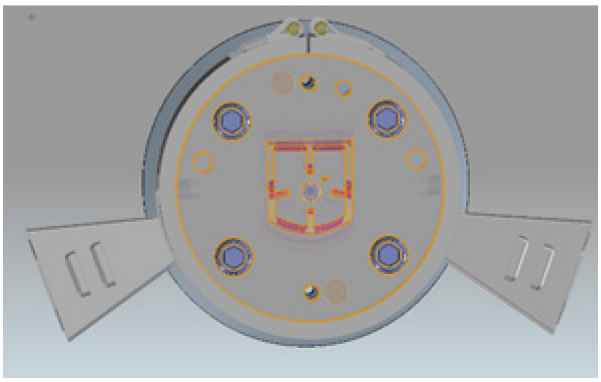


Abb. 26: Querschnitt (Wz. Nr. 15417) (links).

Der Fließkanal wurde hinterschneidungsfrei ausgelegt, um Materialschädigungen zu vermeiden. Als wesentliche Auslegungskriterien für faserverstärkte Profile wurden eine Mindestwandstärke von 0,8 mm, großzügige Radien zur Reduzierung von Spannungsspitzen sowie die Länge der Parallelzone als Einflussgröße für die Faserausrichtung identifiziert. Letztere soll in weiteren Varianten untersucht werden.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde der faserverstärkte Kunststoffrahmen für die Solarmodule der Firma AE Solar weiterentwickelt. Nach Abstimmung mit AE Solar konnte ein finaler, extrudierbarer Profilquerschnitt definiert werden, der funktionale Anforderungen und Fertigbarkeit vereint.

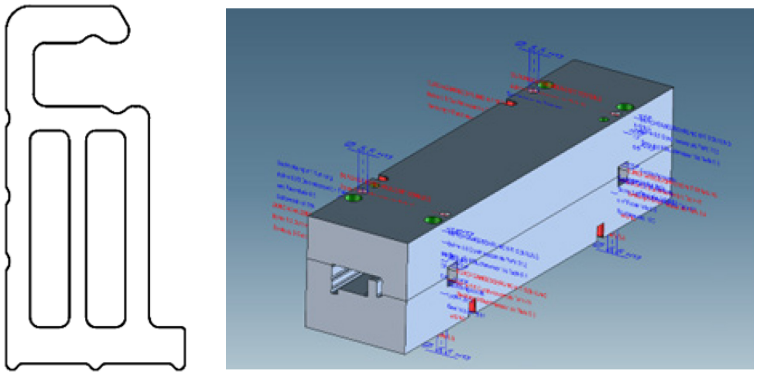


Abb. 27: Querschnitt des Profilrahmens für die PV-Module (links) und Darstellung des Werkzeugs (rechts).

Der Querschnitt , zu sehen in Abbildung 27 (links), besteht aus zwei Hohlkammern mit mittigem Steg zur Erhöhung von Festigkeit und Steifigkeit; weiche Radien minimieren

die glasfaserbedingte Sprödigkeit. Das Profil ist für die Extrusion aus PMMA GF und PP GF vorgesehen und soll über Gehrungsschnitte und 3D-gedruckte Eckverbinder gefügt werden. Ergänzend wurde eine Kalibrierung für den Hohlkammerquerschnitt ausgelegt, um die Profilgeometrie während der Abkühlung sicherzustellen. Kaliberlänge und Kühlkanäle wurden als maßgebliche Einflussfaktoren identifiziert; die Extrudierbarkeit der rGF-Materialien wird in weiteren Tests bewertet.

Parallel dazu wurden im Rahmen der Kooperation mit der Firma Butzbach Materialstreifen extrudiert und zu Zugstäben verarbeitet. Die mechanische Prüfung gemäß DIN EN ISO 527-2 erfolgte am IGCV und zeigte ein erhöhtes E-Modul bei gleichzeitig verringerter Bruchspannung. Zur Einordnung dieser Ergebnisse wurden ergänzend Zugversuche an extrudierten Zugstäben aus PMMA-7H-Neuware durchgeführt. Dabei lagen sowohl E-Modul (ca. –5 %) als auch Bruchspannung (ca. –13 %) unter den Datenblattwerten, was zeigt, dass extrudierte Proben generell reduzierte mechanische Kennwerte als Materialien aus dem Spritzguss aufweisen. Dadurch konnten die zuvor beobachteten Abweichungen der rGF-Materialien relativiert und differenzierter bewertet werden.

2.2.2 Kostenberechnung

Methodik und Annahmen

Die Kostenberechnung der im Projekt MAI RIGATONI entwickelten Prozessketten basiert auf folgenden Grundannahmen:

- Berechnung auf Basis von Maschinenstundensätzen
- 30 % Gewinnmarge auf alle Rigatoni-Prozesse aufgeschlagen zur besseren Vergleichbarkeit mit Benchmarks
- Ökologische Bewertung auf Basis des deutschen Strommixes 2022
- »Ökologischer Rucksack« des Recyclingmaterials wird mit 0 kg CO_2eq angesetzt (Cut-off-Ansatz)
- Keine optimierten Szenarien (z. B. Grünstrom, reduzierte Materialverluste)

Ergebnisse je Anwendungsfall

1 – Pultrusion – Nassvlies für Langgutwanne (fisco)

Funktionelle Einheit: 1 kg Nassvlies
Substituiertes Material: GF-Wirrfasermatte (Virgin)

Kenngröße	Rigatoni (rGF-Nassvlies)	Benchmark (Virgin-GF-Wirrmatte)
Kosten	5,03 €/kg	4,40 €/kg
GWP	+12 % gegenüber Benchmark	Referenz

Fazit: Der Rigatoni-Prozess ist mit rGF-Nassvlies 14 % teurer als das konventionelle Wirrvlies und weist ein um 12 % höheres Treibhauspotenzial auf. Dies ist u. a. auf den energieintensiven Trocknungsprozess während der Nassvliesherstellung zurückzuführen.

2 – Extrusion – Stegprofil für Industrietor (Butzbach / BWF)

Funktionelle Einheit: 1 kg Stegprofil
Substituiertes Material: PMMA (unverstärkt, 100 %)
Rigatoni-Rezeptur: ~50 % Recycling-GFK + 50 % neues PMMA

Kenngröße	**Rigatoni (Compound mit rGF)**	**Benchmark (Virgin-PMMA)**
Materialkosten	3,68 €/kg	2,80 €/kg
GWP – Material	2,28 kg CO_2eq/kg	3,75 kg CO_2eq/kg
GWP – Extrusion	0,24 kg CO_2eq/kg	0,41 kg CO_2eq/kg
GWP – Gesamt	2,52 kg CO_2eq/kg	4,16 kg CO_2eq/kg

Fazit: Der Rigatoni-Prozess reduziert das Treibhauspotenzial um ca. 40 %, ist jedoch mit 31 % höheren Materialkosten verbunden.

3 – Extrusion – PV-Modulrahmen (AE Solar / BWF)

Funktionelle Einheit: 1 kg PV-Rahmen
Substituiertes Material: Aluminiumrahmen
Rigatoni-Rezeptur: ~50 % Recycling-GF-PP + 50 % neues PP

Kenngröße	**Rigatoni (Compound mit rGF)**	**Virgin GF-PP**	**Aluminiumrahmen**
Kosten	2,83 €/kg	2,50 €/kg	3,50 €/kg
GWP – Gesamt	0,41 kg CO_2eq/kg	–	6,71 kg CO_2eq/kg

Zusammenfassung

Die Kostenanalyse zeigt, dass compoundierte und extrudierte rGF-Materialien 15–30 % höhere Kosten als Neumaterialien verursachen, gleichzeitig aber das Treibhauspotenzial um 40–80 % senken können. Lediglich beim Nassvliesprozess für die Pultrusion ergibt sich aktuell noch kein ökologischer Vorteil, was weiteren Optimierungsbedarf in der Prozessführung (z. B. Energieeinsatz im Pyrolyseschritt) signalisiert.

Anwendungsfall	**Kostendifferenz (Rigatoni vs. Benchmark)**	**GWP-Veränderung**
Nassvlies / Pultrusion (fisco)	+14 %	+12 %
Stegprofil / Extrusion (Butzbach)	+31 %	–40 %
PV-Rahmen / Extrusion (AE Solar)	+13 % vs. Virgin GF-PP / –19 % vs. Alu	–87 % vs. Alu

2.3 Arbeitspaket 3: Entwicklung geeigneter Extrusionsverfahren für recycelte Materialien

Zentrale Erkenntnisse AP 3

- Compoundierung mit bis zu 50 % Recyclinganteil (rPMMA-GF) ist technisch möglich und wurde erfolgreich am Fraunhofer ICT durchgeführt.
- Freie Extrusion von rGF-Compounds ist aktuell nicht prozesssicher: Starke Massedruckschwankungen durch Materialinhomogenität führen zu unzureichender Maßhaltigkeit.
- Werkzeugoptimierungen (angepasste Parallelzonen, konische Verjüngung) verbessern die Formtreue, lösen das Grundproblem der Materialhomogenität jedoch nicht.
- Referenzversuche mit PC-GF30 verliefen prozessstabil; die Ursache der Instabilität liegt im Recyclingmaterial selbst, nicht in der Werkzeugkonstruktion.
- Vorgelagerte Compoundierung ist zwingend notwendig; direkte Extrusion von Schreddermaterial scheitert am »Müsli-Effekt« (Entmischung im Trichter).

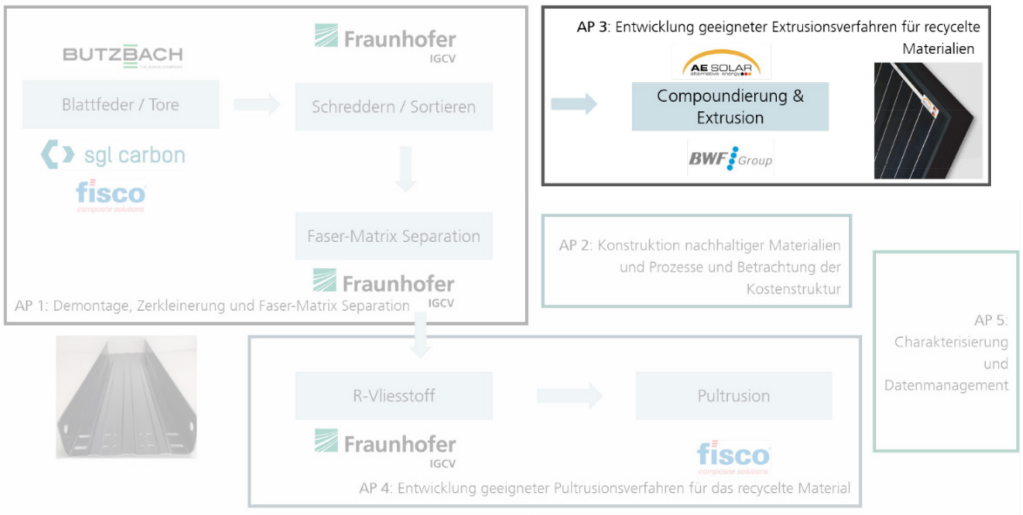


Abb. 28: Übersicht der Prozesskette.

Die Ziele des Arbeitspakets umfassen die Verfahrensentwicklung für geshredderte GFK-Materialien sowie die Fertigung des Demonstrators.

2.3.1 Compoundierversuche Fraunhofer

Am Fraunhofer ICT wurden Compoundierversuche mit dem zerkleinerten GFK-Material der Firma Butzbach und Neu-PMMA-Granulat erfolgreich durchgeführt (wie in Tabelle 7 dargestellt). Es wurden zwei Compounds hergestellt:

- 30% Rezyklat-Anteil
- 50% Rezyklat-Anteil

Das Material wurde im Anschluss bei der Firma BWF für Extrusionsversuche verwendet. Prüfkörper aus dem Material wurden in AP 5 am Fh IGCV getestet.

Extruder Temperatur [°C]	**Dosierung**	**Durchsatz** [kg/h]	**Schnecken-geschwindigkeit** [U*min^{-1}]	**Schmelze-druck** [bar]
210-245	Rüttelrinne von Brabender	45-50	400	36-46

Tab. 7: Übersicht über die Parameter zum Compoundieren des Materials.

2.3.2 Versuche zu Butzbach-Steg-Profil

Auf Basis von Laboruntersuchungen und eines ersten Produktionsversuchs konnte für das »Butzbach«-Material zunächst ein geeignetes Verarbeitungsfenster definiert werden. Der Einsatz des Testwerkzeugs zeigte eine ausreichende Plastifizierung, eine konstante Materialaufnahme sowie eine gute Schmelzestabilität ohne signifikante Maßschwankungen. Schliffanalysen (s. Abbildung 29) bestätigten eine ausgeprägte Faserorientierung in Extrusionsrichtung, zeigten jedoch auch Duromeranteile (UP-Harz) und Lufteinschlüsse, deren Ursachen im weiteren Projektverlauf untersucht wurden.

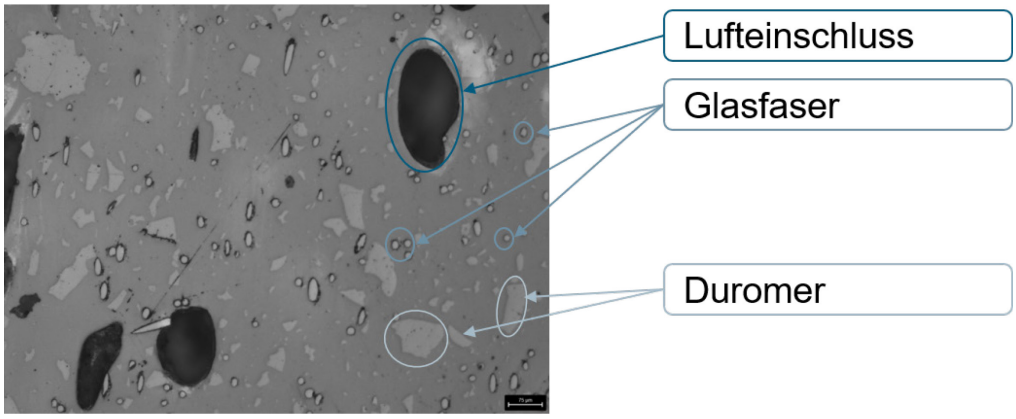


Abb. 29: Schliffbild einer Probe des Butzbach-Materials.

Parallel dazu wurde der Extruderverschleiß als relevanter Einflussfaktor identifiziert, sodass geeignete Beschichtungs- und Schutzkonzepte zu bewerten sind.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden weiterführende Extrusionsversuche mit dem Original-Steg der Firma Butzbach in der finalen Profilgeometrie durchgeführt. Die Versuche erfolgten mit Recyclinganteilen von 30 % und 50 % unter Verwendung des bestehenden BWF-Werkzeugsystems für PMMA-Neuware. Obwohl Materialaufnahme und Plastifizierung zufriedenstellend waren, konnte der angestrebte Profilquerschnitt nicht realisiert werden. Ursache hierfür waren die veränderten rheologischen Eigenschaften der Matrixsysteme mit Recyclinganteil, die zu Wellenbildung, schwankendem Schubverhalten nach dem Düsenaustritt und einer unzureichenden Profilgeometrie führten.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde die Notwendigkeit einer gezielten Anpassung des Werkzeugsystems abgeleitet und ein neues Extrusionswerkzeug, s. Abbildung 27, (BWF Nr. 20773) konstruiert. Die neue Skalierung des Werkzeugs ist in Weiß zu sehen; die alte Auslegung in Schwarz. Der Fokus lag dabei auf der Optimierung der letzten Werkzeugplatte, um die erhöhte Schmelzestabilität des glasfaserverstärkten Materials gezielt

auszunutzen. Mit der angepassten Werkzeuggeometrie wurde eine verbesserte Formtreue, Dimensionsstabilität und Prozesssicherheit angestrebt.

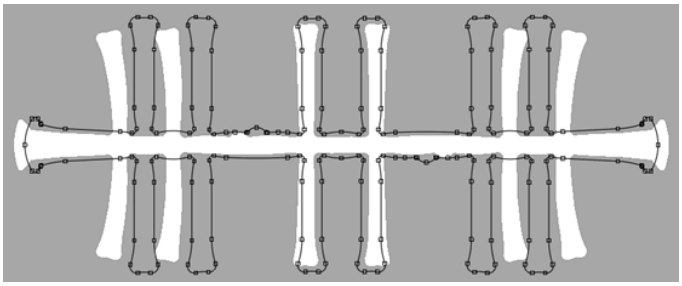


Abb. 30: Optimierung des Werkzeugs 20773.

Weitere Extrusionsversuche mit dem WZ 20773 zeigten, dass die Werkzeugtemperatur einen entscheidenden Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und Profilqualität hat, während Änderungen der Zylindertemperatur nur geringe Effekte aufwiesen. Höhere Abzugsgeschwindigkeiten verbesserten die Profiloberfläche, waren jedoch nicht durchgängig prozesssicher.

Ein wesentliches Problem stellte die unzureichende Homogenität der Materialmischungen dar. Insbesondere bei höheren Recycling- bzw. Glasfaseranteilen traten Inhomogenitäten, instabile Maschinenläufe sowie Bartbildung und Stegaufreißen auf, was die kontinuierliche Extrusion einschränkte (s. Abbildung 31). Eine Reduzierung des Compoundanteils führte zu einer deutlichen Verbesserung der Prozessstabilität und einer Verringerung der Bartbildung.

Abb. 31: Bartbildung bei der Extrusion.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass auf Grund der hohen Massedruckschwankungen im Extruder auf Grund der hohen Inhomogenität, das rPMMA GF Material in der bisherigen Qualität nicht für die freie Extrusion geeignet ist. Dadurch kann die Maßhaltigkeit des Profils nicht eingehalten werden. Geeignetere Prozesse wie Spritzguss können zu besseren Materialqualität führen.

2.3.3 Versuche zu PV-Modul Rahmenprofil

Im Rahmen der Materialaufbereitung wurden zunächst Zerkleinerungsversuche mit PP-GF-Organoblechen durchgeführt. Die direkte Verarbeitung des zerkleinerten Materials im Laborextruder erwies sich als nicht zielführend (s. Abbildung 32, linkes Profil), da sowohl die Prozessstabilität als auch die Schmelzehomogenität unzureichend waren. Zudem zeigte sich eine eingeschränkte Materialaufnahme durch die Extruderschnecke

infolge des sogenannten »Müsli-Effekts«, bei dem sich feine Partikel im Zuführtrichter absetzen und grobe Faseranteile nicht gleichmäßig nachrutschen. Die resultierende inhomogene Materialverteilung machte eine vorgelagerte Compoundierung erforderlich.

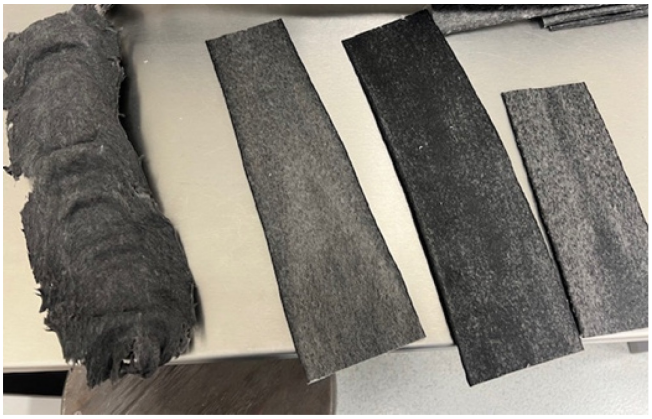


Abb. 32: Extrusionsversuche mit rPPGF.

Die konkrete Ausgestaltung der Compoundierung konnte über den gesamten Projektverlauf nicht abschließend geklärt werden. Es hat sich bis zuletzt kein Compoundeur bereit erklärt das Material zu verarbeiten. Grund hierfür ist der rGF Anteil in den Werkstoffen, welcher Zurückhaltung bei den Verarbeitern auslöst. Im Rahmen der Verfahrensentwicklung wurde das Extrusionswerkzeug 20777 für AE Solar aufgebaut und für umfangreiche Extrusionsversuche mit unterschiedlichen Polymeren eingesetzt. Ziel war die Bewertung der grundsätzlichen Verarbeitbarkeit sowie der Werkzeug- und Prozessauslegung. Bei der Verarbeitung von rPMMA Butzbach konnte der Profilquerschnitt grundsätzlich extrudiert werden, jedoch zeigte sich eine eingeschränkte Prozessstabilität. Ursache hierfür war vor allem eine unzureichende Materialhomogenität, die zu schwankendem Massedruck, zeitweiligem Profilabriss sowie Ablagerungen und Agglomerationen von PMMA 7H führte. Zusätzlich trat Bartbildung am Düsenaustritt auf. Trotz dieser Effekte wurde die grundsätzliche Verarbeitbarkeit des Materials nachgewiesen, wobei die Maßhaltigkeit der Profile aktuell noch nicht den Zielvorgaben entspricht.

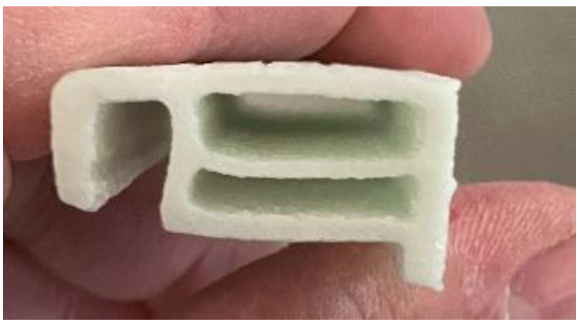


Abb. 33: AE Solar Rahmenprofil mit rPMMA-GF (Butzbach).

Die prinzipielle Eignung des untersuchten Materials für die vorgesehenen Verarbeitungsprozesse wurde erfolgreich nachgewiesen. Ein Beispiel des extrudierten Querschnitts ist in Abbildung 33 zu sehen. Die Verarbeitung des AE-Solar-Profilquerschnitts mit der BWF-Verfahrenseinheit konnte unter den gegebenen Bedingungen realisiert werden. Die Maßhaltigkeit des erzeugten Querschnitts entspricht nicht vollständig den spezifizierten Zielwerten. Herausfordernd ist das Verhalten des schwankenden Massedrucks, welcher in der Inhomogenität des Materials liegt.

Bei den Versuchen mit rPP GF Compound traten deutliche werkzeugbedingte Schwächen auf. Die Werkzeugkonstruktion führte zu einer Trennung der Stege und damit zu einem

unzureichenden Verbund der Profilsegmente. Konstruktive Details, wie ein überdimensionierter Haken, verhinderten zudem ein vollständiges Schließen der Kalibrierung. Während der Extrusion wurden Ausdünstungen, Ablagerungen am Düsenaustritt sowie eine inhomogene Wandstärkenverteilung beobachtet. Eine erste Nacharbeit der Werkzeugplatte durch Verlängerung der Glättzone verbesserte den Materialfluss, die Zielkontur konnte jedoch weiterhin nicht erreicht werden (s. Abbildung 34). Die Ergebnisse hinsichtlich Materialhomogenität, Massedruckstabilität, Wandstärkenverteilung und Profilverbund zeigen, dass die bestehende Werkzeugauslegung für faserverstärkte Materialien nicht geeignet ist, weshalb ein weiteres, optimiertes Werkzeug (WZ.-Nr. 21312) hierfür konstruiert und gefertigt wurde.

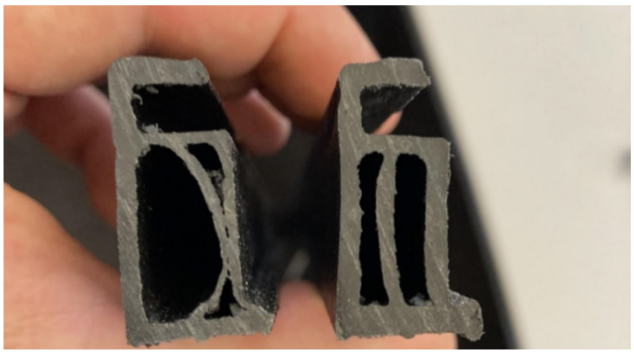


Abb. 34: PV-Rahmenprofil mit rPP-GF.

Bei dem Bau des Werkzeuges 21312 wurde vor allem auf die Verarbeitung von kurzen Fasern geachtet. Die wesentlichen Optimierungen im Werkzeugsystem sind dabei das kurz halten von Stegen sowie eine konische Verjüngung des Schmelzekanals im Werkzeug zur Konturaustritts-Platte. Die Versuche mit dem Werkzeug 21312 zeigten, dass eine stabile Verarbeitung des rPP-GF-Materials nicht möglich ist. Nach dem Werkzeugaustritt trat ein ungleichmäßiger Materialfluss auf, der sich bei Einsatz der Kalibrierung weiter verstärkte. Der Einsatz von Stützluft führte zum Aufplatzen des Profils und anschließendem Profilabriss. Ohne Kalibrierung war zwar ein gleichmäßiger Materialfluss gegeben, jedoch ist für den Prozess eine Kalibrierung erforderlich.

Als zwingend notwendig erwies sich eine Wasserbeträufelung vor dem Eintritt in die Kalibrierung. Ohne diese Maßnahme blieb das Profil in der Kalibrierung hängen und riss ab, sodass keine Extrusion möglich war. Eine Reduzierung der Abzugsgeschwindigkeit um 50 % zur Erhöhung der Verweilzeit in der Kalibrierung führte zwar zu einer verbesserten Oberflächenglättung, jedoch klappte das Profil dabei unkontrolliert ein.

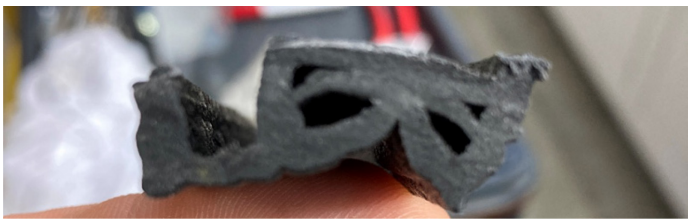


Abb. 35: Verarbeitung des rPPGF.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse, dass das rPP-GF-Material mit dem Werkzeug 21312 nicht prozesssicher verarbeitet werden kann (s. Abbildung 32). Zur Einordnung der Ergebnisse wurden anschließend Referenzversuche mit PC GF30-Neuware durchgeführt. Diese konnten positiv bewertet werden und die Extrusion verlief durchweg prozessstabil. Auf Grund dieser Erkenntnis konnte darauf geschlossen werden, dass die Materialien sowohl das rPP-GF als auch rPMMA-GF zu den negativen Einflüssen auf das Extrusionsverhalten führen.

2.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung geeigneter Pultrusionsverfahren für das recycelte Material

Zentrale Erkenntnisse AP 4

- Nassvliese aus rGF sind grundsätzlich pultrusionsfähig: ein prozessstabiler Lauf über 10 lfm wurde mit 350 g/m²-Vlies erfolgreich demonstriert.
- Ersatz der Langfaserwirrmatte (300 g/m²) statt des Oberflächenvlieses (34 g/m²) → 10-fach höherer Recyclinganteil im Bauteil, keine Einfärbung nötig.
- Mindestgramatur von 350 g/m² ist erforderlich, um ausreichende Zugstabilität für den Pultrusionsprozess zu gewährleisten (320 g/m² führte zu Prozessabbruch).
- Geringe Komprimierbarkeit der Nassvliese ist eine zentrale Herausforderung: Nur 20 lfm pro Rolle vs. 240 lfm bei konventioneller Wirrmatte; kritischer Faktor für Serienfertigung.
- rGF dispergieren homogener als lange vGF im Nassvliesprozess – die kürzeren Fasern führen zu gleichmäßigerer Vliesstruktur.

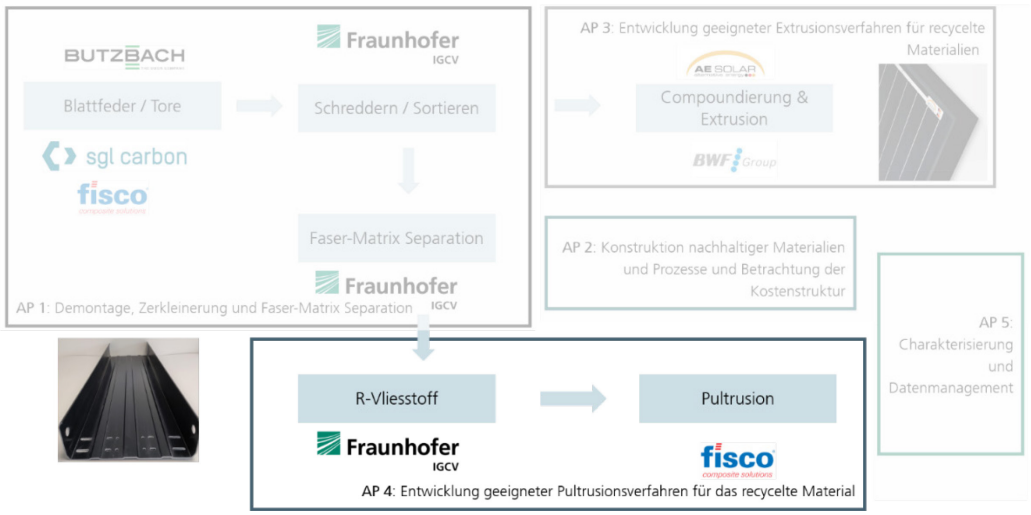


Abb. 36: Übersicht der Prozesskette.

Die Ziele des Arbeitspakets umfassen die Fertigung von Nassvliesen aus rGF, deren Verarbeitung im Pultrusionsprozess, eine funktionierende Textilführung der rGF-Vliese sowie das Erreichen einer Prozessstabilität mit rGF-Vlies.

2.4.1 Herstellung von Nassvliesen aus rGF

Im Rahmen des Arbeitspakets 4 wurden Nassvliese aus GF an der Nassvliesanlage des Fraunhofer IGCV entwickelt und erprobt. Ziel war die Herstellung qualitativ hochwertiger Vliesstoffe, die als Halbzeug für den nachgelagerten Pultrusionsprozess geeignet sind.

Untersucht wurden sowohl vGF (3B GF) in den Schnittlängen 6 mm und 12 mm als auch pyrolytisch recycelte Glasfasern (Pyro_rGF) bei variierenden Binder- und Flächengewichten. Die durchgeführten Versuche sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tab. 8: Übersicht der hergestellten Nassvliese für den Pultrusionsprozess.

WetIGCV	**Faser**	**Binderanteil** [%]	**Flächengewicht** [g/m²]
336	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6	3	34
337	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6	10	34
376	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/13	13	–
377	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6	13	39
378	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6	20	32
379	Pyro_rGF	20	–
380	Pyro_rGF	20	64
428	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/13	10	300
481	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6	10	160
482	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6	3	300
522	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6	3	250
523	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6	3	250
524	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6	3	200
565	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6/pyro	3	250
566	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/13	3	300
567	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/13/pyro	3	300
568	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/13/pyro	3	300
569	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/13/pyro	3	300
570	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6/pyro	3	300
571	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6/pyro	3	300
572	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6/pyro	3	300
573	GF_BROSE_Organo_PP_pyro(500C,30)	3	100
574	GF_BROSE_Organo_PP_pyro(500C,30)	3	150
632	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6/pyro	3	150
633	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6/pyro	6	150
634	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6/pyro	6	150
635	27_GF_3B fibreglass _WS 6050_/13 mm	6	~150
643	30 mm	3	300
759	26_GF_3B fibreglass _WS 6050_/6/pyro	10	150

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verarbeitbarkeit der Fasern stark vom Zerkleinerungsgrad und der Fasergeometrie abhängt. Übermäßig geschredderte pyrolytische Fasern führten in mehreren Versuchen zu einem unzureichenden Vliestransfer, was auf eine zu geringe Faserlänge und daraus resultierende mangelnde Faserverschlingung zurückzuführen ist. Durch den Verzicht auf den Pulperschritt konnte dieses Problem in nachfolgenden Versuchen reduziert werden. Abbildung 37 zeigt exemplarisch zwei der produzierten Vliese.

Ein wesentlicher Befund der Untersuchungen betrifft das Verhalten recycelter Fasern im Dispersionsprozess: Im Gegensatz zu langen vGF, die zu inhomogenen Vliesstrukturen neigen, werden recycelte Fasern im Dispergierprozess stärker verkürzt, was zu einer homogeneren Faserverteilung im Vlies führt. Dieser Effekt wirkt sich positiv auf die Gleichmäßigkeit des Endprodukts aus. Bei der Verarbeitung pyrolytisch gewonnener Fasern aus GF-PP-Organoblechen zeigte sich ein stabiler Prozess; eine leicht gräuliche Verfärbung der Vliese ist auf verbleibende Koksrückstände zurückzuführen und stellt ein charakteristisches Merkmal dieses Fasertyps dar.

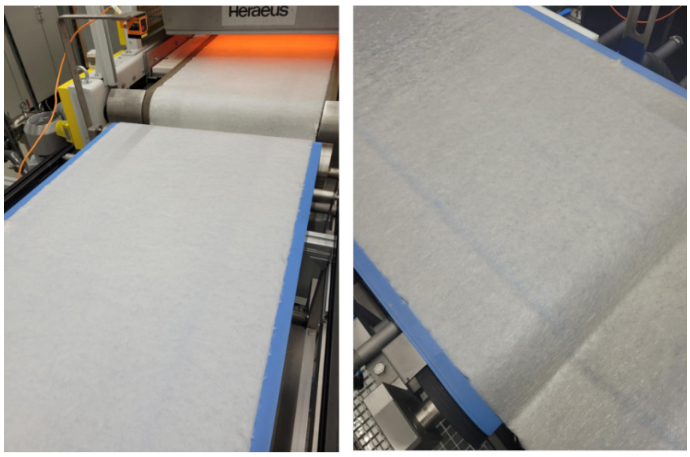


Abb. 37: rGF von Versuch 565 (links) und recycelte GF aus dem Pyrolyseprozess von Versuch 573 (rechts).

2.4.2 Verarbeitung der rGF-Nassvliese in der Pultrusion als Ersatz des Oberflächenvlies

Im ersten Schritt mussten die verschiedenen Nassvliese für die Funktionserprobung vorbereitet werden. Es wurden Spulenkerne aus abgeschlossenen Produktionen wiederverwendet. Ein Problem stellte sich bei der Aufspulung der Vliese auf den Spulenkern heraus. Die Nassvliese konnten nicht mit Spannung und somit nicht gleichmäßig auf den Spulenkern abgelegt werden. Hieraus war keine genaue Positionierung des Vlieses im Infeedbereich der Pultrusion möglich. Weiterhin konnten die Maßablängung nicht erfolgen, da das Nassvlies nicht am Spulenkern fixierbar war.

Es war somit notwendig, die Nassvliese vor der Verarbeitung in der Pultrusion umzuspulen und von Hand Testmengen abzulängen (siehe Abbildung 38).

Abb. 38: Vorbereitung des Nassvlieses für die Pultrusion.

Die ersten Pultrusionsergebnisse zeigten einen deutlichen Unterschied zum herkömmlichen Prozess auf. Die Nassvliesbeschaffenheit ist im Grundsatz starrer im Vergleich zu Vliesstoffen anderer Herstellungsverfahren. Wird das Nassvlies nicht exakt und mit gleichmäßigem Zug positioniert, wirft dieses als nachfolgend im Infeedbereich falten. In Abbildung 39 sind drei exemplarische Fehlerbilder, welche den Faltenwurf widerspiegeln. Diese Falten sind im fertigen Produkt sichtbar und deshalb unerwünscht. Sobald die Falten ein bestimmtes Ausmaß erreicht haben, kam es zum Einreißen des Vlieses.

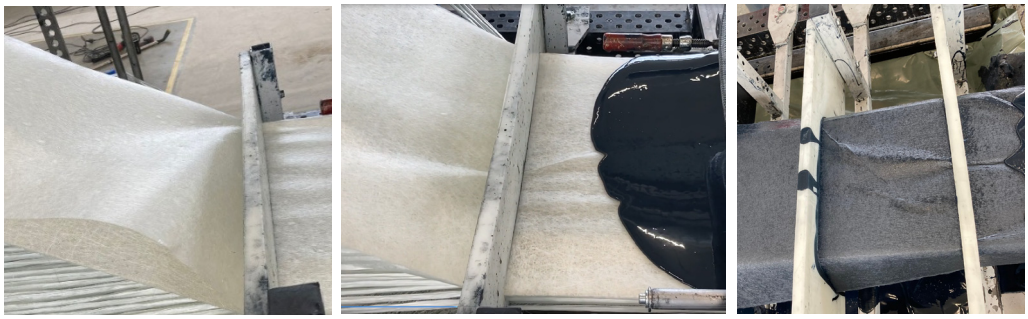


Abb. 39: Faltenwurf als Fehlerbild während der Nassvlieseumformung.

Das oben beschriebene Problem mit dem maschinellen Ablängen, spiegelt sich an den Schnittkanten des Vlieses wider. Eine unsaubere Schnittkante führt zum weiteren Einreißen des Vliesstoffes innerhalb des Infeedbereiches, siehe Abbildung 40.

Abb. 40: Randfaserbrüche und Einreißen des Nassvlieses als Fehlerbild während der Nassvliesumformung.

Wird die Vliesstruktur näher betrachtet, so fällt auf, dass diese bei allen Varianten recht ungleichmäßig ist, siehe Abbildung 37. Für die Mechanik spielt dies keine Rolle, da ein Vlies im vorliegenden Grammaturbereich als Oberflächenvlies kaum Festigkeiten aufnimmt. Dies stellt jedoch die Reproduzierbarkeit in Frage und eine mögliche Marktannahme durch Endkunden bzw. Verarbeiter.

Ein direkter Vergleich ist in der Abbildung 42 zu sehen, wobei der obere Bereich das Nassvlies und der untere Bereich das herkömmliche PA-Vlies darstellt. Die Farbgestaltung muss hierbei außer Betracht gelassen werden, da das PA-Vlies von vornherein schwarz eingefärbt ist. Jedoch zeigt dies, die Dringlichkeit der Vorpigmentierung mancher Faserhalbzeuge für den Pultrusionsprozess. Wird die Oberflächenstruktur betrachtet, so fallen in Bereichen ohne Vliesfaltung keine gravierenden Unterschiede auf. Beide Vliese lassen die Struktur der darunterliegenden Langfaserwirrmatte durch und glätten lediglich diese Oberfläche in gewissem Maße.

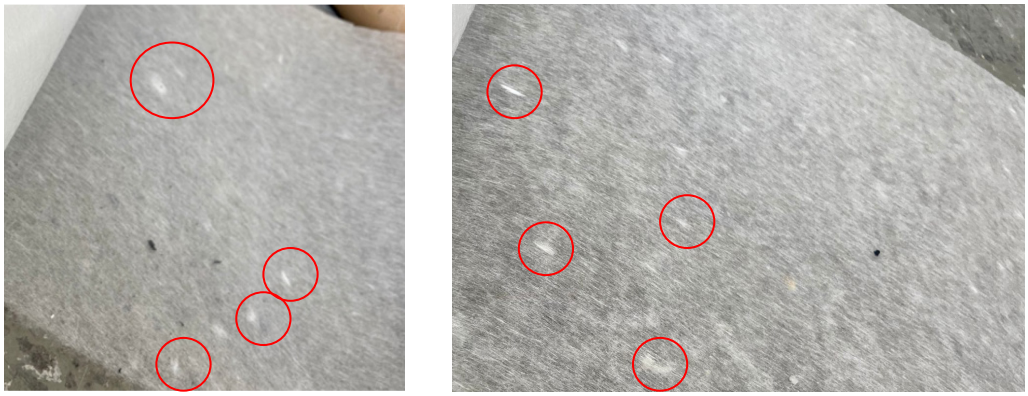


Abb. 41: Lokale Faseranhäufungen im Nassvlies.

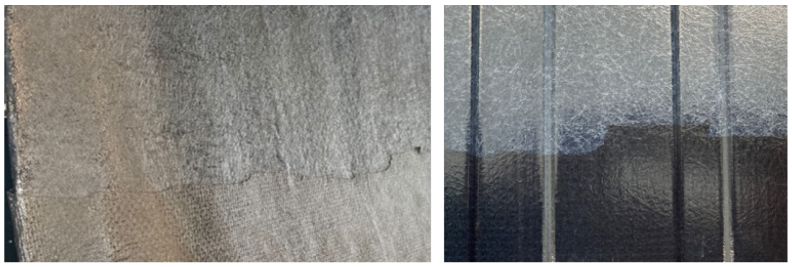


Abb. 42: Übergang rGF-Nassvlies (oben) zu PA-Vlies (unten), sowie im nassen Bereich (links) zum ausgehärteten Profil (rechts).

Folgende fünf Nassvliese wurden Anfangs zur Verarbeitung in der Pultrusion bereitgestellt: WetIGCV0336, WetIGCV0378, WetIGCV0377, WetIGCV0337 und WetIGCV0380. Hiervon konnte das Nassvlies mit der Nummer WetIGCV0336 von vornherein ausgeschlossen werden, da nicht die notwendige Zugfestigkeit aufweist. Das Nassvlies mit der Nummer WetIGCV0380 war deutlich steifer als die Vergleichsproben. Dies lässt sich durch den hohen Binderanteil von 20% und das Flächengewicht von 64 g/m² erklären. Im Vergleich hierzu lagen die restlichen Nassvliese bei etwa 30 bis 40 g/m², mit einem Binderanteil von 13 % bis 20 %.

Eine grundsätzliche Verarbeitbarkeit von rGF-Nassvliesen in der Pultrusion konnte bestätigt werden. Im laufenden Projekt wurde das Ziel auf Basis der ersten gewonnen Erkenntnisse jedoch angepasst. Im vorliegenden Lagenaufbau der Langgutwanne, sollte nicht das 32 g/m² schwere PA-Vlies auf der Bauteiloberfläche ersetzt werden, sondern die darunter liegende Langfaserwirrmatte. Diese ist im Bauteil zweimal enthalten und bringt eine Grammatur von 300 g/m² mit sich. Die Vorteile ergeben sich aus einem rechnerisch um das 10-fache höheren Recyclinganteil im Bauteil, außerdem ist das Einfärben des Nassvlieses an dieser Stelle nicht mehr notwendig.

2.4.3 Verarbeitung der Nassvliese in der Pultrusion als Ersatz der Langfaserwirrmatte

Für die Auslegung eines angepassten Lagenaufbaus musste der theoretische Faservolumengehalt des IST-Zustandes bestimmt werden, welcher die Grundbasis darstellt (siehe Berechnungstabelle in Tabelle 9). Die Berechnung des IST-Zustandes ergibt einen Faservolumengehalt von 57,7 %. Auf der Nassvliesanlage des Fraunhofer Instituts IGCV wurden erste Nassvliese mit den Grammaturen 320 g/m² und 350 g/m² hergestellt.

IST-Zustand

Stück	Bezeichnung	Grammatur	F.Vol%
1 x	WM_300_unten	300 g/m²	4,7336 %
1 x	WM_300_oben	300 g/m²	4,6334 %
2 x	PA_Vlies	34 g/m²	1,1497 %
296	Rovinge	2400 tex	47,197 %
			57,7 Vol.%

Tab. 9: Theoretische Auslegung des Faservolumengehalts des vorliegenden Referenzproduktes.

Da die Kompression dieser Halbzeuge stark vom Referenzprodukt ins Negative abweicht und unbekannt ist, muss der Aufbau mit der Reduzierung der Rovinge ausgeglichen werden. In den praktischen Pultrusionsversuchen bestätigte sich die abweichende Komprimierbarkeit der Nassvliese, wodurch ein 3,8-faches der errechneten Rovinganzahl herausgeschnitten werden musste (siehe Berechnungstabellen in Tabelle 10. Eine Reduzierung der Rovinganzahl führt jedoch ebenfalls zur Reduzierung der mechanischen Eigenschaften des Bauteils in Faserrichtung, worauf im Nachfolgenden nochmals eingegangen wird.

Theorie

rGF Nassvlies/Matte 320

	Bezeichnung	Grammatur	F.Vol%
1 x	NV_320_unten	320 g/m²	4,94 %
1 x	NV_320_oben	320 g/m²	5,05 %
2 x	PA_Vlies	34 g/m²	1,15 %
292	Rovinge	2400 tex	47,20 %
			57,7 % Faservolumengehalt

rGF Nassvlies/Matte 350

	Bezeichnung	Grammatur	F.Vol%
1 x	NV_350_unten	350 g/m²	5,41 %
1 x	NV_350_oben	350 g/m²	5,52 %
2 x	PA_Vlies	34 g/m²	1,15 %
286	Rovinge	2400 tex	47,20 %
			57,7 % Faservolumengehalt

rGF Nassvlies/Matte 320

	Bezeichnung	Grammatur	F.Vol%
1 x	NV_320_unten	320 g/m²	4,94 %
1 x	NV_320_oben	320 g/m²	5,05 %
2 x	PA_Vlies	34 g/m²	1,15 %
259	Rovinge	2400 tex	47,20 %
			57,7 % Faservolumengehalt

rGF Nassvlies/Matte 350

	Bezeichnung	Grammatur	F.Vol%
1 x	NV_350_unten	350 g/m²	5,41 %
1 x	NV_350_oben	350 g/m²	5,52 %
2 x	PA_Vlies	34 g/m²	1,15 %
247	Rovinge	2400 tex	47,20 %
			51,64% Faservolumengehalt

Tab. 10: Auslegung des Faseraufbaus mit Nassvliesen als Halbzeug.

Abb. 43: Vergleich der Faserdichte und des -volumen von Referenzprodukt und Nassvlies.

Die schlechte Komprimierbarkeit des Nassvlieses spiegelt sich ebenfalls auf der Rollenkonfektionierung wider. Eine neue Langfaserwirrmatte enthält 240 Laufmeter (lfm). Wird eine Rolle 350 g/m² Nassvlies mit gleichem Rollenumfang als Vergleich genommen, so können hier gerade einmal 20 lfm abgewickelt werden (siehe Abbildung 43). Dies ist ein erheblicher negativer Faktor für einen späteren Nutzen in einer Serienfertigung und bedarf weiteren Entwicklungsaufwand.

Da für die Produktion der Nassvliese mit hohem Flächengewicht erhebliche Mengen an rGF (> 10 kg) erforderlich gewesen wären und weder das verfügbare Schreddermaterial noch die Kapazitäten des Pyrolyseofens am Fraunhofer IGCV hierfür ausreichten, wurden die initialen Nassvliesproduktionen mit gekürzten vGF durchgeführt. Im weiteren Projektverlauf konnten jedoch Nassvliese hergestellt werden, bei denen die gekürzten Fasern einer Pyrolysebehandlung unterzogen wurden. Durch die prozessbedingte thermische Schädigung der Faseroberfläche weisen diese Fasern vergleichbare Eigenschaften wie rGF auf und stellen damit ein repräsentatives Substitut für das Recyclingmaterial dar. Diese Fasern werden im Folgenden als recycelt bezeichnet.

Verarbeitung des ersten 320g/m² Nassvlieses (WetIGCV_320_neu):

Es waren zwei Rollen der Vliesvariante mit 320 g/m² vorhanden, es wurde eine je Ober- bzw. Unterseite des Bauteils verwendet. Es stellte sich heraus, dass eine Rolle davon keine ausreichende Zugstabilität hatte und deshalb nicht in der Pultrusion verarbeitet werden konnte (siehe Abbildung 44).

Abb. 44: Prozessabbruch aufgrund einer zu niedrigen Zugfestigkeit des 320 g/m² Nassvlieses.

Verarbeitung des ersten 350 g/m² Nassvlieses (WetIGCV_350_neu):

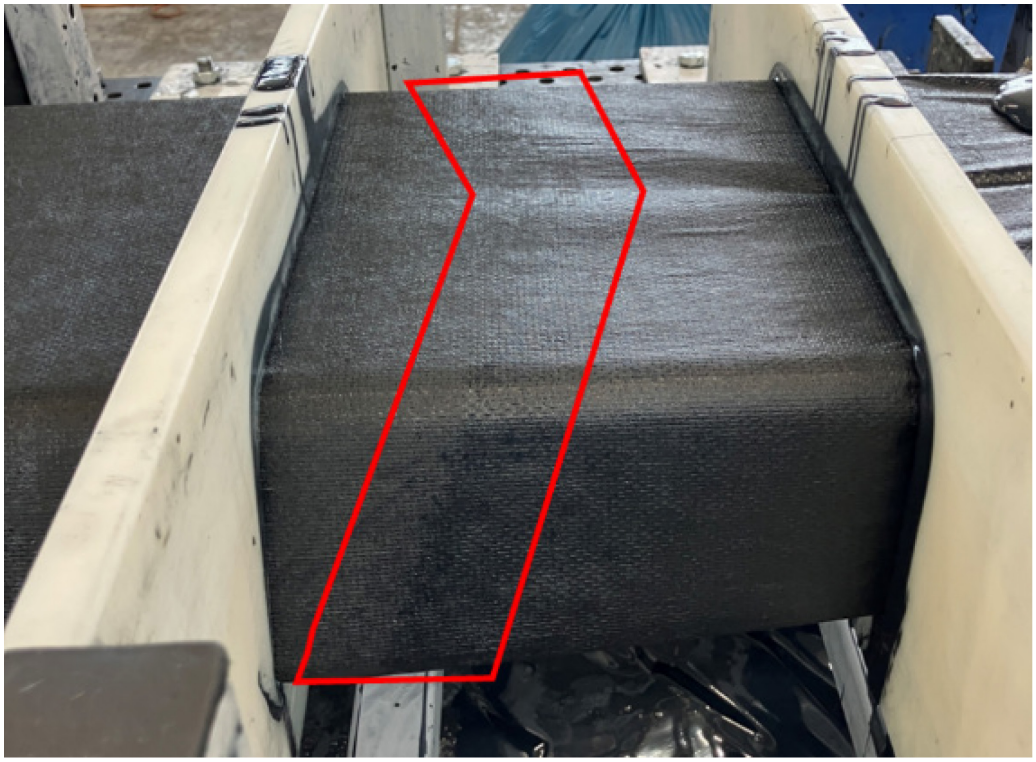


Abb. 45: Erfolgreicher Mattenwechsel zwischen Referenzprodukt und dem Nassvlies WetIGCV_350_neu.

Bei der 350g-Variante (WetIGCV_350_neu) konnten erfolgreiche Mattenwechsel durchgeführt werden (siehe Abbildung 47). Durch das zusätzliche Führen konnte auch eine gute Umformbarkeit gewährleistet werden, sowie Knickfalten vermieden werden. Die vorhandenen 10 Meter liefen prozessstabil und zeigen eine erste erfolgreiche Verarbeitung auf. Durch die Erhöhung der Grammatur um 30g/m² war die Zugstabilität der Halbzeuge ausreichend genug, um dem Pultrusionsdruck standzuhalten. Bei der Vorkonfektionierung der Matte konnte ein Ausfransen der Randfasern verringert werden. Durch das erhebliche Volumen ist wird jedoch die Umformbarkeit etwas eingeschränkt und es kommt zu geringer Faltenbildung. Dies beeinflusste jedoch lediglich die Oberflächengüte, nicht die Prozessfähigkeit, da hier keine komplexe Mattenumformung vorliegt. Sollten Profile mit komplexen Geometrien ausgearbeitet werden, so kann die starre Eigenschaft Schwierigkeiten in der Ausformung darstellen. Ein solch dickes Nassvlies ist somit prinzipiell verarbeitbar, solange die gegebene Profilform keine komplexen Hinterschnitte besitzt.

2.5 Arbeitspaket 5: Charakterisierung und Datenmanagement

Zentrale Erkenntnisse AP 5

- Butzbach-Profile: 10 % Recyclinganteil ist industriell einsetzbar: Nur –16 % Festigkeit und –7 % Steifigkeit gegenüber Neuware.
- 30 % Recyclinganteil führt zu –55 % Festigkeit; Ursache: progressive Zunahme von Porosität und UP-Harzresten (mikroskopisch bestätigt).
- Steifigkeit ist robust gegenüber dem Recyclinganteil (nur 7–8 % Reduktion bei 10–30 % rGF); primär durch Faservolumengehalt bestimmt.
- LGW-Pultrusion: Zugfestigkeit nahezu gleichwertig – WetIGCV_350_vGF erreicht 505 MPa vs. 522 MPa (Referenz), d. h. nur –3 %.
- Biegefestigkeit der rGF-Variante (519 MPa) liegt überraschend über der vGF-Variante (416 MPa)
- Berstfestigkeit der Nassvliese ist kritisch niedrig (BI = 0,06–0,07 vs. 1,27 bei Unifilo); sprödes Versagen, das zur Rissbildung im Infeed führt.

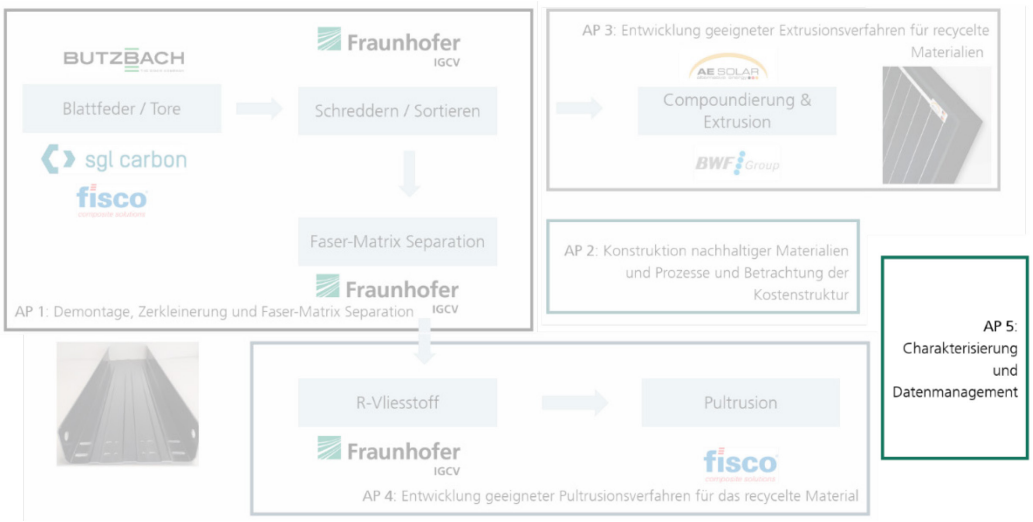


Abb. 46: Übersicht der Prozesskette.

Das Ziel des Arbeitspakets ist die Charakterisierung der Fasern, Halbzeuge und Endprodukte nach mechanischen, thermischen und optischen Kriterien.

2.5.1 Mechanische Prüfungen und Evaluierung im Anwendungsfall der Butzbach Profile

Im Rahmen von Arbeitspaket 5 wurden Extrusionsprofile (Butzbach) mit variierenden Recyclinganteilen (10% und 30%) mechanisch charakterisiert und mit Neuware verglichen.

Ziel war die quantitative Bewertung des Einflusses von recyceltem Compound auf die mechanischen Eigenschaften der extrudierten Profile. Für die mechanische Prüfung wurde ein 3-Punkt-Biegeversuch gewählt. Ein erster Versuchsansatz, bei dem der reale Lastfall des Butzbach-Profils abgebildet werden sollte, konnte aufgrund fehlender geeigneter Probenaufnahmen nicht erfolgreich durchgeführt werden. In einem zweiten Versuchsansatz wurde der 3-Punkt-Biegetest direkt auf den Profilstegen durchgeführt, was einen qualitativen und quantitativen Vergleich zwischen Neuware und Profilen mit Recyclinganteil ermöglichte. Untersucht wurden drei Varianten mit unterschiedlichen Gehältern an Recyclinganteil.

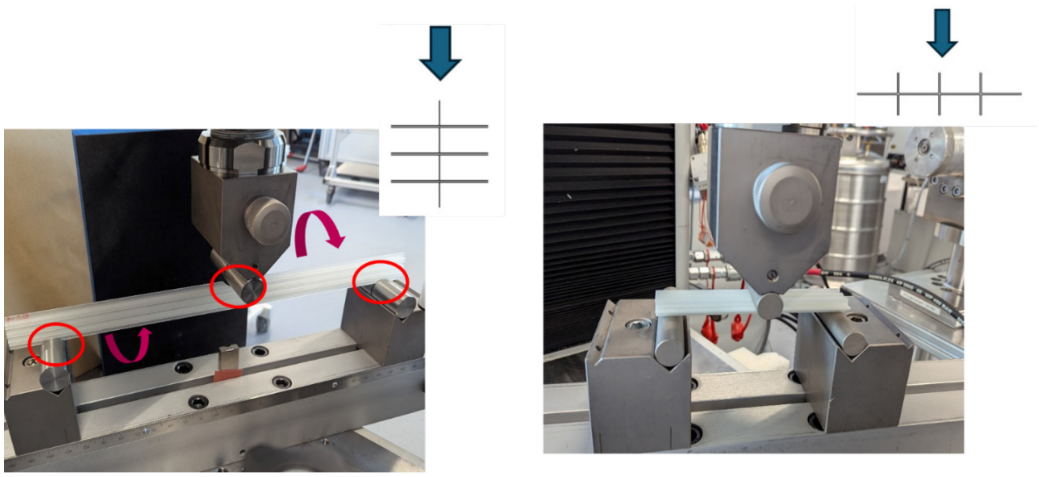


Abb. 47: Die beiden unterschiedlichen Testaufbauten zur mechanischen Prüfung des Extrusionsprofils.

Ergänzend zur mechanischen Prüfung wurden mikroskopische Querschnittsanalysen durchgeführt, um die Ursachen der festgestellten Eigenschaftsveränderungen auf Mikrostrukturebene zu untersuchen.

Ergebnisse der mechanischen Prüfung

a) Festigkeit

Die Ergebnisse der Biegefestigkeitsprüfung sind Tabelle 11 dargestellt.

Variante	Festigkeit [MPa]	Abnahme gegenüber Neuware
Neuware	11,33 ± 0,21	–
10 % Recyclinganteil	9,49 ± 0,08	-16 %
30 % Recyclinganteil	5,13 ± 0,20	-55 %

Tab. 11: Biegefestigkeit der Butzbach-Profile in Abhängigkeit des Recyclinganteils.

Es zeigt sich eine deutliche, mit zunehmendem Recyclinganteil progressiv ansteigende Abnahme der Biegefestigkeit. Während ein Recyclinganteil von 10 % zu einer moderaten Festigkeitsreduktion von 16 % führt, resultiert ein Anteil von 30 % in einer erheblichen Abnahme von 55 % gegenüber der Neuware. Diese ausgeprägte Nichtlinearität deutet darauf hin, dass ab einem bestimmten Recyclinganteil prozessbedingte Fehlstellen

überproportional zunehmen und die mechanischen Eigenschaften des Verbunds maßgeblich beeinträchtigen.

b) Steifigkeit

Im Gegensatz zur Festigkeit zeigt die Biegesteifigkeit eine deutlich geringere Sensitivität gegenüber dem Recyclinganteil (siehe Tabelle 12):

Variante	Festigkeit [MPa]	Abnahme gegenüber Neuware
Neuware	~105,0	–
10 % Recyclinganteil	~96,6	-7 %
30 % Recyclinganteil	~97,6	-8 %

Tab. 12: Biegesteifigkeit der Butzbach-Profile in Abhängigkeit des Recyclinganteils.

Die Steifigkeitsabnahme ist mit ca. 7–8 % für beide Recyclingvarianten vergleichbar gering und verändert sich zwischen 10 % und 30 % Recyclinganteil kaum. Dies legt nahe, dass die Steifigkeit primär durch den Faservolumengehalt und die Faserorientierung bestimmt wird und weniger durch prozessbedingte Fehlstellen beeinflusst wird als die Festigkeit. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Steifigkeit des Bauteils durch den Einsatz von Recyclingmaterial nur marginal beeinträchtigt wird.

c) Mikroskopische Analyse

Zur Aufklärung der Ursachen der festgestellten mechanischen Eigenschaftsreduktionen wurden Querschnittsschliffe der drei Probenvarianten lichtmikroskopisch analysiert.

Neuware: Die Querschnittsaufnahmen der Referenzprofile aus unverstärktem PMMA zeigen eine homogene, fehlerstellenfreie Mikrostruktur ohne erkennbare Poren oder Einschlüsse, wie in Abbildung 48 dargestellt. Diese dienen als Referenz für die Bewertung der Recyclingvarianten.

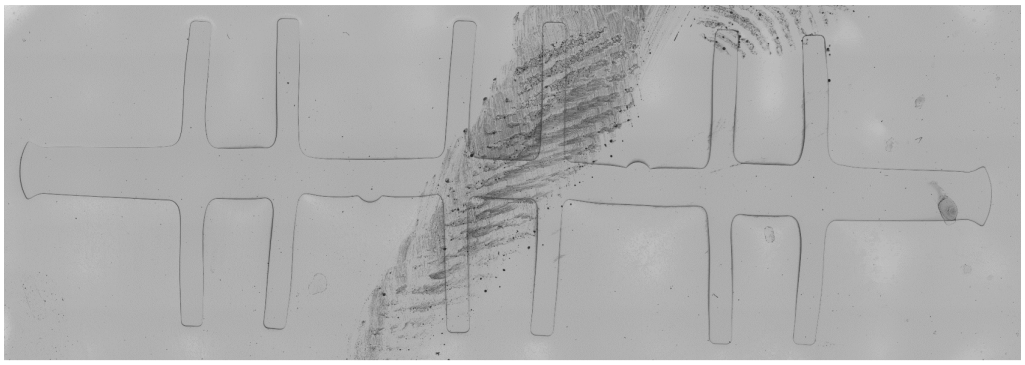


Abb. 48: Querschnitt des Extrusionsprofils mit Neuware.

10 % Recyclinganteil: Bei einem Recyclinganteil von 10 % sind vereinzelte Lufteinschlüsse sowie Reste von UP-Harz aus dem Recyclingprozess erkennbar. Die Glasfasern erscheinen weitgehend intakt und gut in die Matrix eingebettet. Die Anzahl der Fehlstellen ist im Verhältnis zu den festgestellten mechanischen Einbußen gering, was darauf hindeutet, dass neben den Poren auch die Harzreste aus dem Recyclingprozess zur

Verschlechterung der Faser-Matrix-Anbindung und damit der mechanischen Eigenschaften beitragen (siehe Abbildung 49).

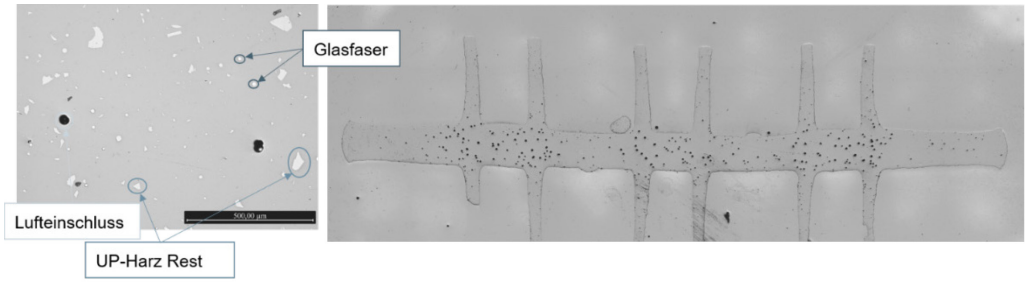


Abb. 49: Querschnitt des Extrusionsprofils mit 10% Recyclinganteil.

30 % Recyclinganteil: Bei einem Recyclinganteil von 30 % zeigt die Mikrostruktur eine signifikant erhöhte Porosität sowie eine ungleichmäßige, unebene Oberflächenbeschaffenheit (Abbildung 50). Die Vielzahl der Poren und Fehlstellen korreliert direkt mit der festgestellten starken Festigkeitsreduktion von 55 % und macht die beobachteten mechanischen Einbußen auf mikrostruktureller Ebene nachvollziehbar.

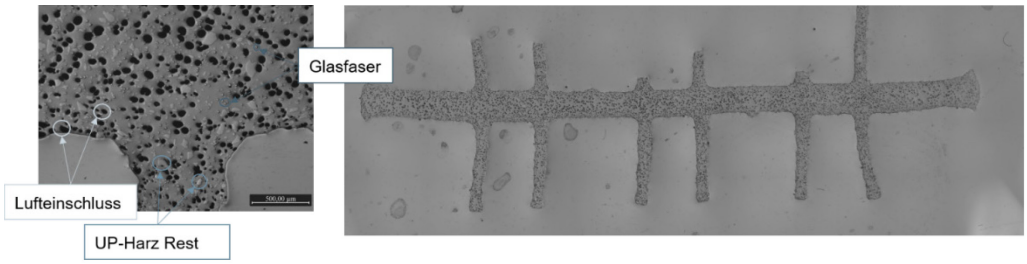


Abb. 50: Querschnitt des Extrusionsprofils mit 30% Recyclinganteil.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von Recyclingcompound in den Butzbach-Profilen zu einer deutlichen Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften vom Recyclinganteil führt. Während die Steifigkeit mit einer Abnahme von lediglich 7–8 % als weitgehend robust gegenüber dem Recyclinganteil bewertet werden kann, zeigt die Festigkeit eine ausgeprägte Sensitivität und nimmt bei 30 % Recyclinganteil um mehr als die Hälfte ab.

Als primäre Ursache der Eigenschaftsreduktion konnte anhand der Mikroskopieuntersuchungen der Poreneinschluss bei der Verarbeitung des Recyclingcompounds identifiziert werden. Mit steigendem Recyclinganteil nehmen sowohl die Anzahl als auch die Größe der Poren zu, was zu einer progressiven Schwächung des Verbundgefüges führt. Zusätzlich tragen Harzreste aus dem Recyclingprozess zur Beeinträchtigung der Faser-Matrix-Haftung bei.

Für den industriellen Einsatz von Recyclingmaterial in Butzbach-Profilen empfiehlt sich auf Basis der vorliegenden Ergebnisse eine Begrenzung des Recyclinganteils auf maximal 10 %, um akzeptable mechanische Eigenschaften bei gleichzeitiger Nutzung von Sekundärmaterialien zu gewährleisten. Darüber hinaus sollten prozesstechnische Maßnahmen zur Reduzierung der Porosität, beispielsweise durch optimierte Compoundierparameter oder eine verbesserte Entgasung während der Extrusion, untersucht werden, um die Potenziale höherer Recyclinganteile zukünftig besser ausschöpfen zu können.

2.5.2 Mechanische Prüfungen und Evaluierung im Anwendungsfall der LGW

Bei fisco wurden sowohl die verschiedenen Nassvliese als trockenes Halbzeug, als auch das fertige Bauteil geprüft. Für ersteres wurde sowohl die Höchstzugkraft in Faserrichtung nach EN 29073-3, als auch die Berstfestigkeit in Anlehnung an die ASTM D3786 getestet. Das fertige Bauteil wurde auf Biegebelastung (DIN ISO 14125) und Zugbelastung (DIN ISO 527) geprüft. Die Prüfungen wurden bei fisco an einer Universalprüfmaschine der Fa. Hegewald & Peschke mit maximal Belastung von 100kN durchgeführt. Zum Abschluss wurden mehrere Schliffbildanalysen durchgeführt.

2.5.2.1 Höchstzugkraft in Faserrichtung nach EN 29073-3

Art	Spezifikation
Norm	EN 29703-3
Probengeometrie	100 mm x 50 mm
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min
Aufbau	Zur Einspannung wurden herkömmlich Klemmvorrichtung mit Keilspannwirkung verwendet.

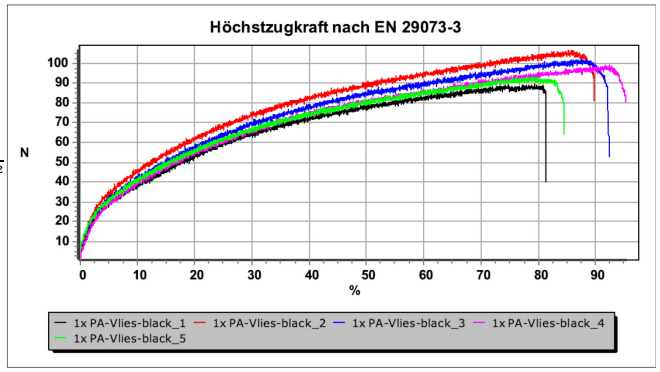
Tab. 13: Verfahren zur Ermittlung der Höchstzugkraft am Vlies.

Hierbei wurde die maximal Kraft F_{max} detektiert, welche zugleich die Bruchkraft des Vlieses darstellt. Für einen besseren Vergleich untereinander wurde im Anschluss die spezifische Höchstzugkraft $F_{max/m'}$, in Abhängigkeit des jeweils vorliegenden Flächengewichtes, angegeben. Die Daten und Grafiken für einerseits die Vlies-Stoffe im 35g-Bereich sind der nachstehenden Tabelle 14 zu entnehmen und andererseits für die Vlies-Stoffe im 300-g- bzw. 350-g-Bereich der Tabelle 15.

Vergleich der Nassvliese als Oberflächenvlies

PA-Vlies (Referenz, 34 g/m²)

- F_{max} = 87 N
  - → 6,8 % Streuung
- $F_{max/m'} = \frac{87\,N}{34\,\frac{g}{m^2}} = 2{,}5588\,\frac{N}{g/m^2}$
- Verhalten
  - → Hohe Elastizität
  - → Elastischer Bereich vorhanden

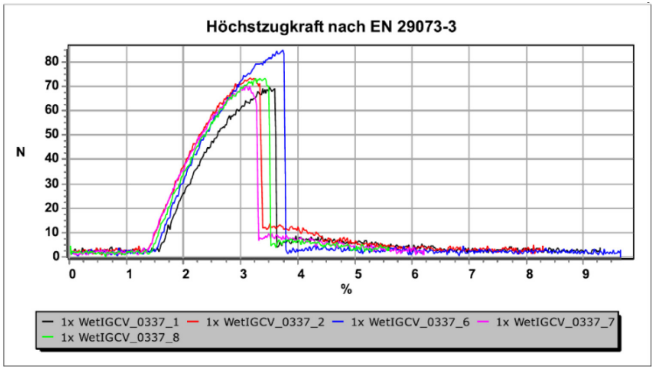


Tab. 14: Daten und Grafiken der Höchstzugkraft bei den Materialien PA-Vlies, WetIGCV_0337, WetIGCV_0377.

(Forts. Tab. 14)

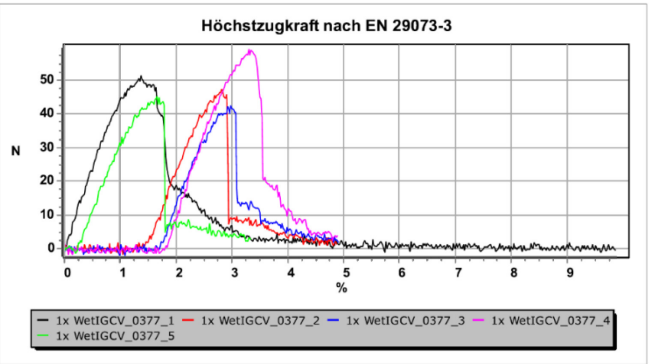
WetIGCV_0337 (34 g/m²)

- F_{max} = 75 N
  - → 8,2 % Streuung
- $F_{max/m'} = \frac{75\,N}{34\,\frac{g}{m^2}} = 2{,}2059\,\frac{N}{g/m^2}$
- Verhalten
  - → Statisch
  - → Direkter plastischer Bereich



WetIGCV_0337 (39 g/m²)

- F_{max} = 49 N
  - → 13,2 % Streuung
- $F_{max/m'} = \frac{49\,N}{39\,\frac{g}{m^2}} = 1{,}2564\,\frac{N}{g/m^2}$
- Verhalten
  - → Statisch
  - → Direkter plastischer Bereich
  - → Streuung im Nullpunkt



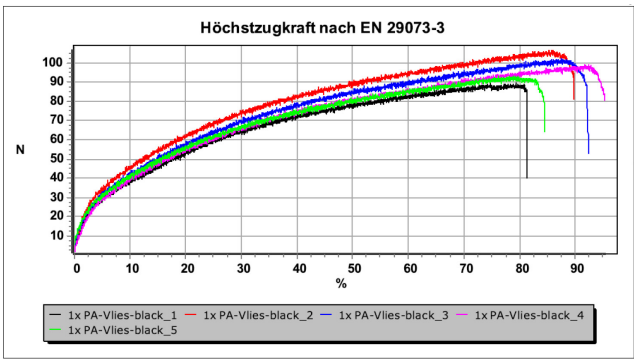
Im Vergleich zum herkömmlichen PA-Vlies (Polyamid Vlies) zeigen die Nassvlies-Varianten ein extrem statisches Verhalten. Das PA-Vlies erreicht im Mittel eine Gesamtdehnung von ca. 85 % bis zum Versagen. Hingegen ist bei den Nassvliesen bereits bei maximal 3,5 % das Ende erreicht. Diese Erscheinung ist primär dem Grundmaterial PA geschuldet. Polyamid ist von Grund auf ein höheres elastisches Verhalten zuzuordnen. Wird der Unterschied in der Verformung außer Betracht gelassen, so weisen die drei Varianten aber auch in der spezifischen Höchstzugkraft markante Unterschiede auf. Die Referenzproben hielten eine maximal Höchstzugkraft von $F_{max/m'} = 2{,}5588\,\frac{N}{g/m^2}$ stand, wobei das WetIGCV_0377 trotz des höheren Flächengewichtes von 39 g/m² mit $F_{max/m'} = 1{,}2564\,\frac{N}{g/m^2}$ gerade einmal die Hälfte erreichte. Das WetIGCV_0337 hingegen wich mit $F_{max/m'} = 2{,}2059\,\frac{N}{g/m^2}$ um knapp 14 % von der Referenz ab.

Die spezifischen Höchstzugkräfte der beiden Wirrmatten-Varianten Unifilo und WetIGCV_350_NG zeigen erstmal keinen erheblichen Unterschied. Die Unifilo erreichte $F_{max/m'} = 0{,}2514\,\frac{N}{g/m^2}$ und die WetIGCV_350_NG $F_{max/m'} = 0{,}2523\,\frac{N}{g/m^2}$. Beide Varianten versagen bei einer maximalen Dehnung von ca. 1,5 %. Die mechanische Formstabilität der trockenen 300 g/m² Faserhalbzeuge konnte somit, unter Berücksichtigung von der Verwendung von vGF, erfolgreich nachgestellt werden.

Vergleich zur 300 g/m² Langfaserwirrmatte

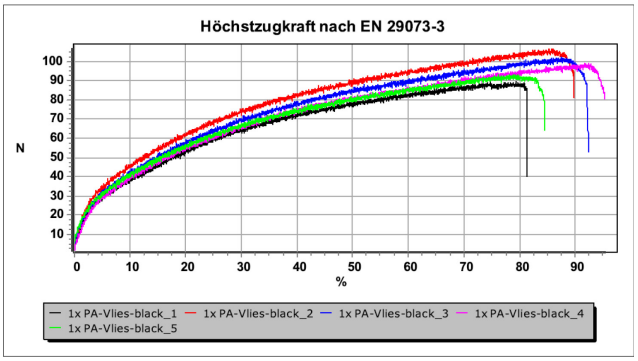
Unifilo (Referenz, 300 g/m²)

- F_{max} = 75 N
  → 15,3 % Streuung
- $F_{max/m'} = \frac{75{,}42\ N}{300\ \frac{g}{m^2}} = 0{,}2514\ \frac{N}{g/m^2}$
- Max. Dehnung = 1,5 %



WetIGCV_350g_NG (vGF)

- F_{max} = 88 N
  → 6,3 % Streuung
- $F_{max/m'} = \frac{88{,}32\ N}{300\ \frac{g}{m^2}} = 0{,}2523\ \frac{N}{g/m^2}$
- Max. Dehnung = 1,5 %



Tab. 15: Daten und Grafiken der Höchstzugkraft bei den Materialien Unifilo, WetIGCV_350g_Neu.

Die spezifischen Höchstzugkräfte der beiden Wirrmatten-Varianten Unifilo und WetIGCV_350_NG zeigen erstmal keinen erheblichen Unterschied. Die Unifilo erreichte $F_{max/m'} = 0{,}2514\ \frac{N}{g/m^2}$ und die WetIGCV_350_NG $F_{max/m'} = 0{,}2523\ \frac{N}{g/m^2}$. Beide Varianten versagen bei einer maximalen Dehnung von ca. 1,5 %. Die mechanische Formstabilität der trockenen 300 g/m² Faserhalbzeuge konnte somit, unter Berücksichtigung von der Verwendung von vGF, erfolgreich nachgestellt werden.

2.5.2.2 Berstfestigkeit in Anlehnung an ASTM D3786

Art	Spezifikation
Norm	In Anlehnung an ASTM D3786
Probengeometrie	Klemmfläche: $Ø_{ges}$ 125 mm Druckfläche: $Ø_{Druck}$ = 31,5 mm
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min

Tab. 16: Verfahren zur Ermittlung der Berstfestigkeit.

Der Berstfestigkeit nach ASTM D3786 ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit flächiger Materialien, gegenüber lotrecht zur Fläche ausgeübtem Druck. Die Berstfestigkeitsprüfung erfolgt mit einem Membran-Berstprüfgerät, bei dem die Textilprobe über einer elastischen Gummimembran eingespannt wird. Während der Prüfung wird die Membran hydraulisch oder pneumatisch gleichmäßig aufgeweitet, sodass sich die Probe wölbt, bis sie schließlich versagt. Das Gerät umfasst einen stabilen Probenhalter, ein Druckerzeugungssystem sowie eine Messeinheit zur Erfassung des maximalen Berstdrucks. Durch die standardisierte Konstruktion und Belastungsführung

ermöglicht das Verfahren eine reproduzierbare Bestimmung der Berstfestigkeit von gewebten, gestrickten und nicht gewebten Flächengebilden.

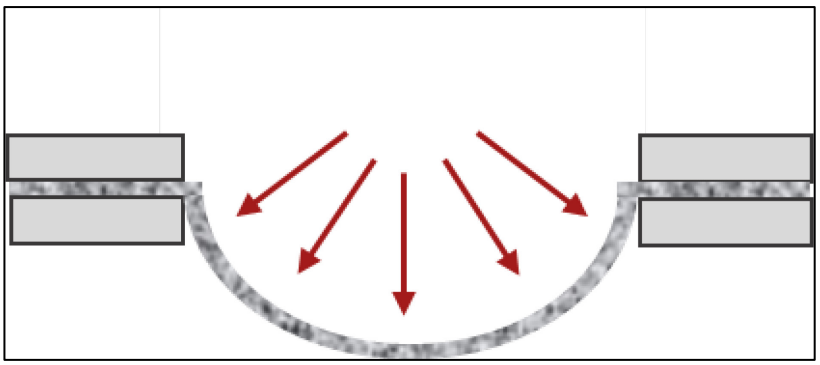


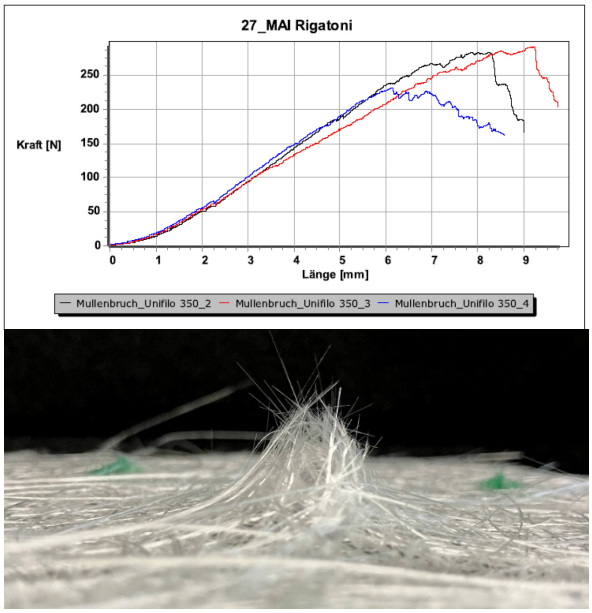
Abb. 51: Prüfaufbau der Berstfestigkeit In Anlehnung an ASTM D3786.

Für die Nachbildung des Prüfaufbaus wurde eine Universalprüfmaschine verwendet, die um einen eigens gefertigten Druckstempel ergänzt wurde. Der Druckstempel besitzt eine kreisrunde Geometrie und wurde mittels 3D-Druck hergestellt, um eine reproduzierbare und formstabile Belastungsfläche zu gewährleisten. Die Probe wird zwischen zwei Hohlringen eingespannt, deren Innendurchmesser exakt dem Durchmesser des Druckstempels entspricht. Durch diese konstruktive Auslegung wird erreicht, dass sich das Textil während der Belastung gleichmäßig wölbt und damit das Wirkprinzip des membranvermittelten Wasserdrucks aus der genormten Berstprüfung realitätsnah nachgebildet wird. Der Aufbau stellt eine technisch nachvollziehbare und funktionale Annäherung an das standardisierte Prüfverfahren dar und ermöglicht eine kontrollierte Ermittlung der Berstfestigkeit unter vergleichbaren mechanischen Bedingungen. Das Funktionsprinzip ist der Abbildung zu entnehmen.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden die mechanischen Eigenschaften eines Unifilo-Referenzmaterials (300 g/m²) sowie zweier Nassvliesvarianten auf Basis von WetIGCV (350 g/m², vGF und rGF) mittels Druck- bzw. Berstversuchen analysiert. Ziel war die vergleichende Bewertung des Kraft-Verformungs-Verhaltens, der Drucksteifigkeit sowie des Berstindexes.

<u>Unifilo (Referenz, 300 g/m²)</u>

- Berstindex BI = 1,267
- Drucksteifigkeit k bei 50 N/mm²
- Max. Kraft = um ein 16- bzw. 19-faches höher!
- Extrem elastisches Verhalten im Gegensatz zu den Nassvliesen

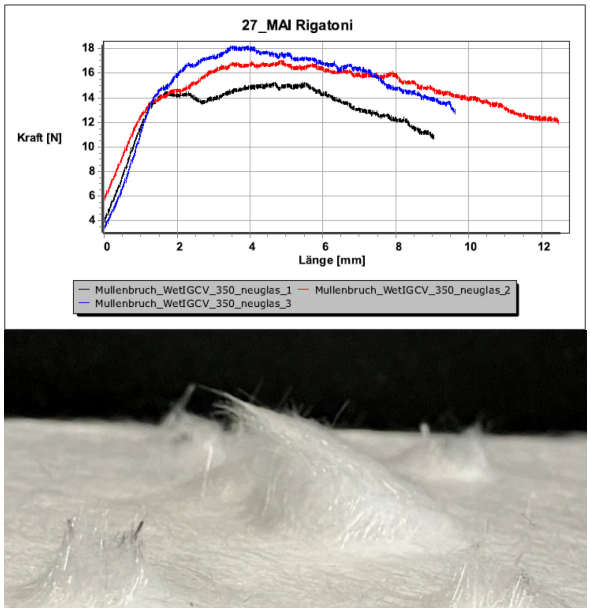


Tab. 17: Daten und Grafiken der Berstfestigkeit bei den Materialien Unifilo, WetIGCV_350g_Neu, WetIGCV_350g_therm.

(Forts. Tab. 17)

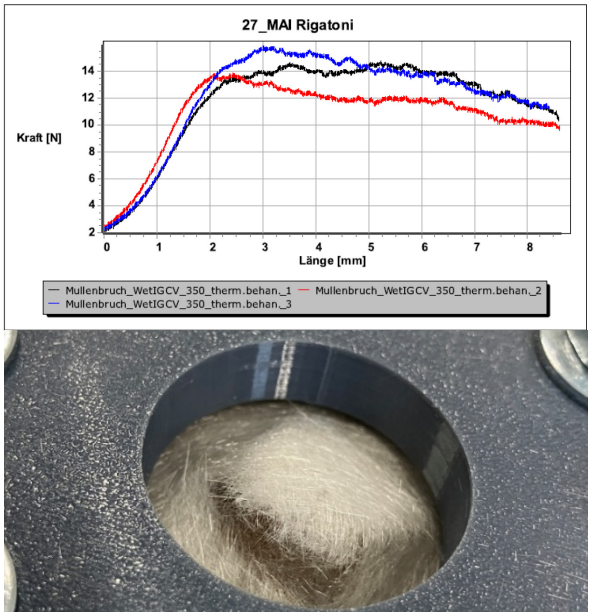
WetIGCV_350g_NG (vGF)

- Berstindex BI = 0,069
- Drucksteifigkeit k bei 7,8 N/mm²
  - → Sehr geringer Berstindex
  - → Kein elastisches Verhalten.
  - → Reißt bei Druckbelastung sofort ein



WetIGCV_350g_therm (rGF)

- Berstindex BI = 0,060
- Drucksteifigkeit k bei 7,3 N/mm²
  - → Sehr geringer Berstindex
  - → Kein elastisches Verhalten.
  - → Reißt bei Druckbelastung sofort ein



Das Unifilo-Referenzmaterial weist mit einem Berstindex von BI = 1,267 deutlich überlegene mechanische Eigenschaften auf. Die aufgezeichneten Kraft-Längen-Kurven zeigen einen kontinuierlichen, nahezu linearen Kraftanstieg über einen großen Verformungsbereich, gefolgt von einem ausgeprägten Maximum und einem verzögerten Kraftabfall. Dieses Verhalten ist charakteristisch für ein elastisch-duktiles Versagen mit hoher Energieaufnahme. Die maximale aufnehmbare Kraft liegt dabei um den Faktor 16 bis 19 höher als bei den untersuchten Nassvliesen. Das Material zeigt somit eine hohe Drucksteifigkeit sowie eine ausgeprägte Elastizität, wodurch es auch unter hohen mechanischen Belastungen formstabil bleibt. Dies ist auch auf den Bruchbildern Tabelle 17 zu entnehmen. Die Fasern weisen eine gleichmäßige Druckverteilung und einen festen Schaft auf. Hingegeben bei den beiden Nassvliesvarianten, bei denen die

Druckfinne das Material nahezu ausgestanzt hat – bei den rGF-Fasern mehr als bei den vGF-Fasern. Die beiden untersuchten Nassvliesvarianten auf Basis von WetIGCV (350 g/m², vGF sowie rGF) zeigen ein insgesamt sehr ähnliches mechanisches Verhalten. Beide Materialien weisen einen sehr niedrigen Berstindex auf (vGF: BI = 0,069, rGF: BI = 0,060) sowie eine vergleichbar geringe Drucksteifigkeit (k = 7,8 N/mm bzw. k = 7,3 N/mm). Die Kraft-Verformungs-Kurven beider Varianten sind durch einen steilen initialen Kraftanstieg bei geringer Dehnung gekennzeichnet, gefolgt von einem frühzeitigen Erreichen des Kraftmaximums und einem abrupten Kraftabfall. Ein ausgeprägtes elastisches oder plastisches Verformungsvermögen ist nicht erkennbar. Das Versagensverhalten ist in beiden Fällen spröde, wobei das Material unter Druckbelastung nahezu unmittelbar einreißt und nur eine sehr geringe Energieaufnahme zeigt. Nichtsdestotrotz kann positiv angemerkt werden, dass das Nassvlies mit den rGFen-Fasern nur minimale Verschlechterungen in den Kennwerten im Vergleich zum Nassvlies aus vGF aufzeigt.

Zusammengefasst führt das spröde Verhalten der Rohmaterialien zu einem erschwerten Verarbeitungsprozess im Pultrusionsprozess. Wie im Arbeitspaket 4 beschrieben, neigen die Nassvliesvarianten stark zum seitlichen Einreißen, was nur mit einer optimierten Peripherieauslegung zu handeln ist.

2.5.2.3 Biegefestigkeit und -modul nach DIN ISO 14125

Art	Spezifikation
Norm	DIN EN ISO 14125
Probengeometrie	90 mm x 15 mm x Bauteildicke
Prüfgeschwindigkeit	2 mm/min
Aufbau	Radius Auflager: 5 mm Radius Druckfinne: 5 mm

Tab. 18: Verfahren zur Ermittlung der Biegeeigenschaften.

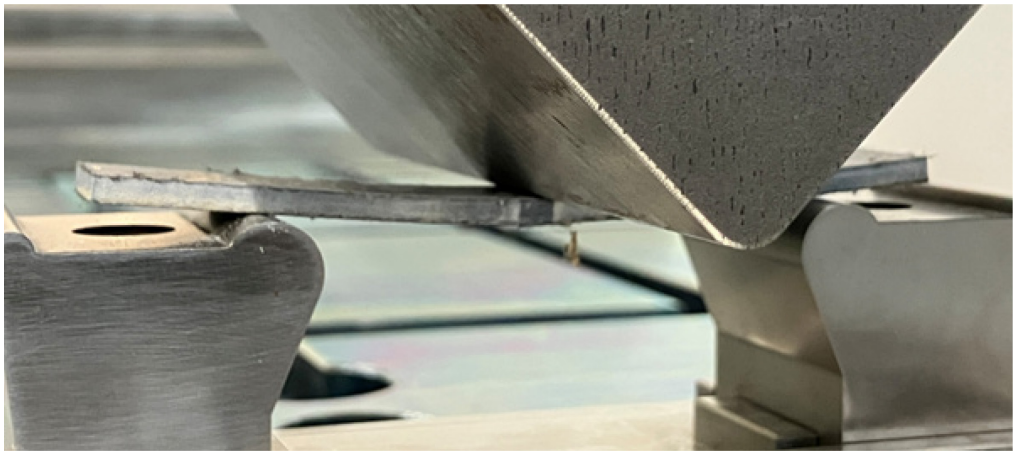


Abb. 52: 3-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 14125.

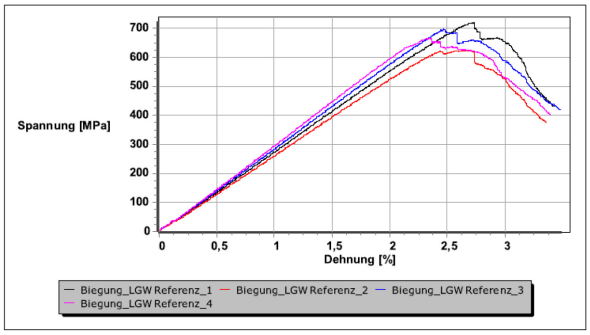
Die 3-Punkt-Biegeprüfung nach DIN EN ISO 14125 ist ein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Biege-Eigenschaften von faserverstärkten Kunststoffen (z. B. CFK, GFK).

Dabei wird ein rechteckiger Probekörper auf zwei Auflager gelegt und in der Mitte mit einer konzentrierten Prüfkraft belastet (siehe Abbildung 52). Aus der aufgezeichneten Kraft-Weg-Kurve werden die Biegefestigkeit, der Biegemodul ermittelt. Die Prüfung erfolgt üblicherweise bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit, wobei Stützweite, Probengeometrie und Belastungsrate normativ festgelegt sind.

Nachdem die Nassvlies im 30 g/m² keinen merklichen Einfluss auf die Bauteilmechanik besitzen, wurden die Biegeprüfungen an der Referenzprobe, sowie an den Nassvliesen WetIGCV_350 g_NG (vGF) und WetIGCV_350g_therm (rGF) zum Vergleich durchgeführt, nachstehend sind die Ergebnisse in Tabelle 19 aufgelistet.

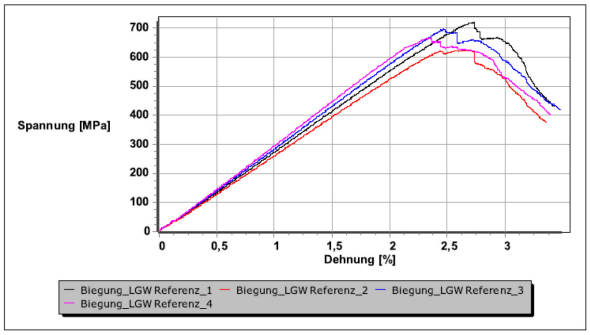
Unifilo (Referenz, 300 g/m²)

- Biegefestigkeiten σ: 676 MPa
- Max. Bruchdehnung ε = 2,549 %
- Biegemodul 26,7 GPa



WetIGCV_350g_NG (vGF)

- Biegefestigkeiten σ: 676 MPa
  -38% vs. Referenz
- Max. Bruchdehnung ε = 3,568 %
- Biegemodul 13,33 GPa
  → Niedrigerer E-Modul, elastischer



Tab. 19: Daten und Grafiken des 3-Punkt-Biegeversuchs der Materialien Unifilo, WetIGCV_350g_neu, WetIGCV_350g_therm.

Das Unifilo-Referenzlaminat zeigt mit einer Biegefestigkeit von 676 MPa und einem Biegemodul von 26,7 GPa die höchsten mechanischen Kennwerte. Die maximale Bruchdehnung beträgt 2,55 %, was auf ein vergleichsweise sprödes Versagensverhalten hinweist. Dieses Verhalten ist typisch für unidirektionale Faserverbunde mit effizienter Lastübertragung entlang der Faserrichtung. Das WetIGCV-Laminat aus vGF weist eine deutlich geringere Biegefestigkeit von 416 MPa sowie einen niedrigeren Biegemodul von 13,33 GPa auf, erreicht jedoch mit 3,57 % die höchste Bruchdehnung. Dies deutet auf ein elastischeres und duktileres Materialverhalten hin, sowie auf eine geringere Lastübertragungseffizienz im Vergleich zum unidirektionalen Referenzlaminat hin. Die Biegefestigkeit steigt auf 519 MPa, der Biegemodul auf 16,5 GPa, während die Bruchdehnung mit 3,26 % nur geringfügig reduziert ist. Insgesamt zeigt sich, dass das Unifilo-Laminat die höchsten Steifigkeits- und Festigkeitswerte aufweist, während die Nassvlies-Varianten eine höhere Dehnfähigkeit im Verbund besitzen.

2.5.2.4 Biegefestigkeit und -modul nach DIN ISO 14125

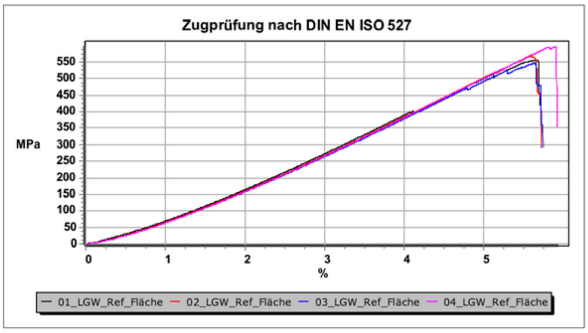
Art	Spezifikation
Norm	DIN EN ISO 527
Probengeometrie	250 mm x 50 mm x Bauteildicke
Prüfgeschwindigkeit	2 mm/min
Aufbau	Zur Einspannung wurden herkömmlich Klemmvorrichtung mit Keilspannwirkung verwendet.

Tab. 20: Verfahren zur Ermittlung der Zugeigenschaften.

Die Zugprüfung nach DIN EN ISO 527, insbesondere Teil 5, beschreibt ein genormtes Verfahren zur Bestimmung des Zugverhaltens faserverstärkter Kunststoffe mit unidirektionaler oder bevorzugter Faserausrichtung, wie sie typisch für Pultrudate sind. Die Prüfung dient der Ermittlung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens unter quasistatischer Zugbelastung entlang der Faserlängsrichtung.

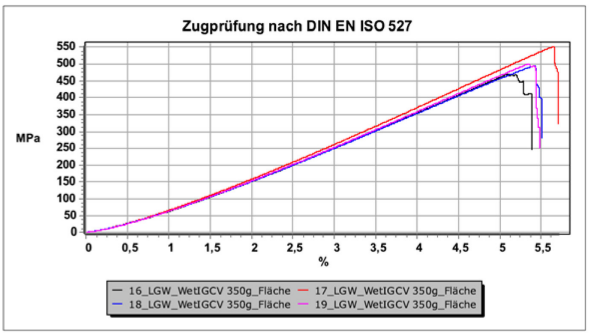
Unifilo (Referenz, 300 g/m²)

- Zugfestigkeit σM: 522 MPa
- Zugmodul E: 4,50 GPa



WetIGCV 350g NG (vGF)

- Zugfestigkeit σM: 505 MPa
- Zugmodul E: 4,33 GPa



Tab. 21: Daten und Grafiken der Zugprüfung der Materialien Unifilo, WetIGCV_350g_neu.

Das Unifilo-Referenzlaminat erreicht eine Zugfestigkeit von 522 MPa bei einem Zugmodul von 4,50 GPa. Die Spannung-Dehnungs-Kurven zeigen einen ausgeprägt linearen Verlauf bis kurz vor dem Bruch, was auf ein überwiegend elastisches Materialverhalten hinweist. Der Bruch erfolgt abrupt, was ein fasergetragenes und vergleichsweise sprödes Versagensverhalten nahelegt. Die geringe Streuung der

Einzelkurven deutet auf eine gute Reproduzierbarkeit und einen homogenen Laminataufbau hin.

Das WetGCV-Laminat aus vGF weist eine geringfügig niedrigere Zugfestigkeit von 505 MPa sowie einen leicht reduzierten Zugmodul von 4,33 GPa auf. Der Kurvenverlauf ist dem des Referenzlaminats ähnlich, zeigt jedoch eine etwas höhere Streuung im Bruchbereich. Dies lässt auf eine weniger gleichmäßige Lastübertragung und eine stärkere Beteiligung der Matrix am Versagensprozess schließen.

Die Bruchbilder der Zugproben bestätigen die Ergebnisse der mechanischen Auswertung (siehe Abbildung 53). Beim Unifilo-Laminat ist ein überwiegend geradliniger, faserparalleler Bruch erkennbar, während die WetGCV-Proben ein stärker ausgeprägtes Faser-Matrix-Versagen mit lokalen Aufsplitterungen zeigen.

Zusammenfassend zeigt das Unifilo-Referenzlaminat im Zugversuch eine geringfügig höhere Festigkeit und Steifigkeit sowie ein reproduzierbareres Versagensverhalten. Das WetGCV-vGF-Material erreicht vergleichbare Festigkeitswerte, weist jedoch eine etwas geringere Steifigkeit und eine größere Streuung im Bruchverhalten auf.

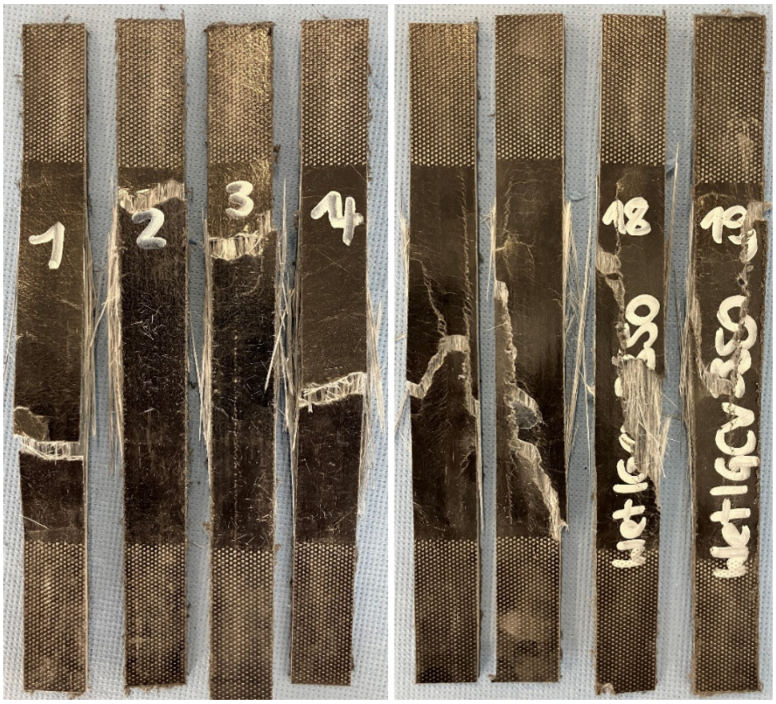


Abb. 53: Bruchbilder der Zugproben (links: Unifilo, rechts: WetIGCV_350g_neu).

2.5.2.5 Schliffbildanalyse

Die Schliffbilder (siehe Abbildung 54) der äußeren Lagen zeigen beim Referenzlaminat eine kompakte, gleichmäßig orientierte Faserstruktur (dunkelgrau) mit nur geringem Matrixanteil (hellgrau) zwischen den Fasern. Lufteinschlüsse (schwarz) treten nur vereinzelt auf. Die äußeren Lagen sind dünn, dicht gepackt und ermöglichen eine effiziente Lastübertagung, was die hohe Steifigkeits- und Festigkeitswerte in Biege- und Zugprüfungen erklärt.

Die äußeren Lagen des WetIGCV-Laminats aus vGF sind etwas dicker und weisen lokal größere Matrixanteile zwischen den Fasern auf. Lufteinschlüsse treten häufiger auf als bei der Referenzprobe, was auf Unterschiede in der Harzverteilung und Imprägnierung hinweist und die geringere Steifigkeit und Festigkeit erklärt.
Die rGF WetIGCV-Laminate zeigen eine ähnliche Mikrostruktur wie das vGF-Laminat, sind jedoch in der äußeren Lage leicht dünner. Matrixanteile und Lufteinschlüsse sind weiterhin sichtbar, und die Fasern sind vergleichbar orientiert. Es lassen sich keine deutlichen strukturellen Verbesserungen im Vergleich zum vGF erkennen.

Insgesamt verdeutlichen die Schliffbilder, dass die äußeren Lagen des Referenzlaminats besonders kompakt und faserreich sind, während die WetIGCV-Proben dickere Lagen mit mehr Matrixanteil und häufigeren Lufteinschlüssen aufweisen. Die rGF Variante ist etwas dünner als das vGF-Laminat, was die Unterschiede in Steifigkeit und Festigkeit zwischen den Laminaten teilweise erklärt.

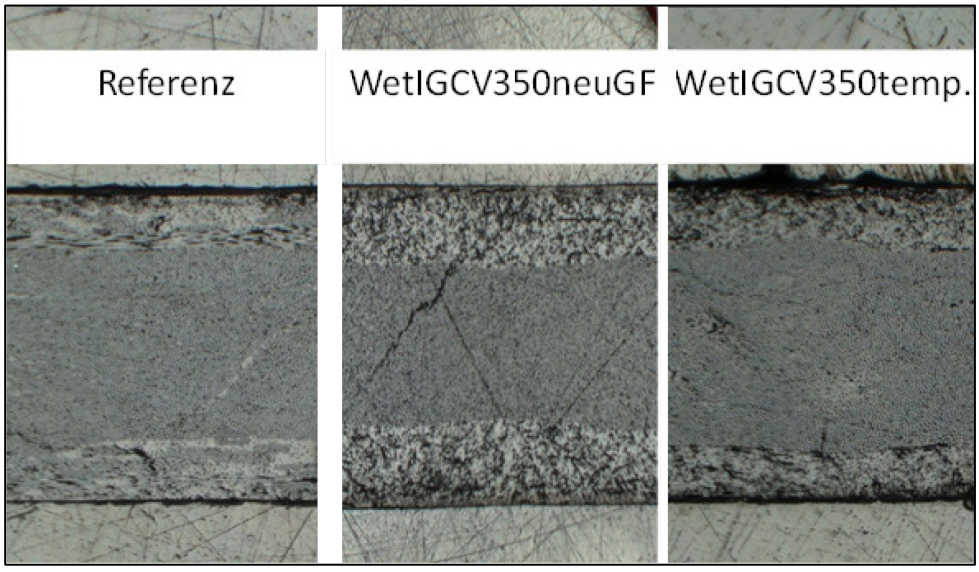


Abb. 54: Schliffbilder der Materialproben Unifilo, WetIGCV_350_neu, WetIGCV_350g_therm.

3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse für die mittelständische bayerische Wirtschaft und Transfermaßnahmen

3.1 Wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse

Das Forschungsprojekt MAI RIGATONI adressiert eine der zentralen Herausforderungen der bayerischen Verbundwerkstoffindustrie: die fehlende Kreislaufführung von glasfaserverstärkten Kunststoffen. Die im Projekt entwickelten Technologien und Erkenntnisse bieten den beteiligten Unternehmen und der bayerischen Wirtschaft im Allgemeinen einen erheblichen wirtschaftlichen Mehrwert.

Kosteneinsparungen durch Sekundärrohstoffe

Die entwickelten Recyclingprozesse, insbesondere die Zerkleinerung sowie die Pyrolyse und Hydrolyse, ermöglichen die Rückgewinnung von Glasfasern aus EoL-Bauteilen und Produktionsabfällen. Der Einsatz dieser Sekundärrohstoffe bietet den verarbeitenden Unternehmen das Potential, Materialkosten zu reduzieren und gleichzeitig ihre Nachhaltigkeitsziele zu erreichen. Dies ist insbesondere für die beteiligten Mittelständler, BWF Profiles, fisco und Butzbach, von direktem wirtschaftlichem Interesse, da diese Unternehmen erhebliche Mengen an Produktionsabfällen und EoL-Materialien generieren.

Erschließung neuer Märkte und Produkte

Die im Projekt entwickelten Demonstratoren, extrudierte PV-Rahmenprofile aus rGF-Compound sowie pultrudierte Langgutwannen mit Recyclingvliesanteil, belegen die prinzipielle technische Machbarkeit des Einsatzes von Sekundärmaterialien in marktfähigen Produkten. Für die Firma AE Solar würde sich durch den Einsatz von rGF-basierten Profilrahmen die Möglichkeit eröffnen nachhaltigere PV-Module anzubieten und damit auf die wachsende Nachfrage nach ökologisch produzierten Produkten zu reagieren. Für fisco ermöglicht der Einsatz von rGF-Nassvliesen in der Pultrusionsfertigung eine direkte Kreislaufführung der eigenen Produktionsabfälle, was sowohl Entsorgungskosten senken als auch den Ressourceneinsatz reduzieren kann.

Wettbewerbsvorteile durch Technologievorsprung

Die im Projekt entwickelten Prozesse und das aufgebaute Know-how stellen für die beteiligten Unternehmen einen wichtigen Wettbewerbsvorteil dar. Insbesondere die Erkenntnisse zur Verarbeitung von rGF in Extrusions- und Pultrusionsprozessen sowie die Materialdatenbank, die im Rahmen des Projekts aufgebaut wurde, sind für die Industrie von hohem Wert. Die beteiligten Unternehmen sind damit in der Lage, frühzeitig auf verschärfte regulatorische Anforderungen an die Kreislauffähigkeit von Produkten zu reagieren. Dies ist sehr relevant angesichts der sich weiterentwickelnden EU-Gesetzgebung zur Kreislaufwirtschaft und gewinnt zunehmend an Bedeutung.

Beitrag zur Rohstoffsouveränität

Glasfasern werden aktuell überwiegend aus primären Rohstoffen hergestellt. Angesichts der zunehmenden Abhängigkeit von internationalen Lieferketten und der Endlichkeit fossiler Ressourcen leistet die Entwicklung effizienter GFK-Recyclingtechnologien einen wichtigen Beitrag zur Stärkung der regionalen Rohstoffsouveränität Bayerns und Europas.

3.2 Transfermaßnahmen

Direkter Technologietransfer in die Partnerunternehmen

Der unmittelbarste Transferkanal des Projekts ist die enge Zusammenarbeit mit den Industriepartnern BWF Kunststoffe, fisco, Butzbach, AE Solar, Brose und SGL Carbon. Die Unternehmen waren aktiv in die Entwicklungsarbeiten eingebunden und können die Ergebnisse direkt in ihre Fertigungsprozesse integrieren bzw. für zukünftige Produktentwicklungen nutzen. Für den Transfer zu weiteren Industriepartnern hat sich herausgestellt, dass insbesondere die Bereitschaft einen höheren Preis für recycelte Produkte zu bezahlen ohne regulatorische Pflicht bei vielen Unternehmen auf Zurückhaltung stößt. Die Erkenntnisse zu den Verarbeitungsgrenzen von rGF-Materialien in der Extrusion sowie die erfolgreiche Demonstration der vliesbasierten Pultrusion bei fisco stellen direkte, praxisrelevante Ergebnisse dar, die unmittelbar für die industrielle Anwendung genutzt werden können. Der Einsatz von Vliesen aus rGF in dem Produkt Langgutwanne ist durchaus vorstellbar bei steigender Nachfrage oder regulatorischen Vorgaben. Der kontinuierliche Entwicklungsprozess sowie der damit verbundene Wissenszuwachs führen bereits während der Projektlaufzeit zu einer Stärkung der Unternehmensstruktur. Infolgedessen entstehen neue Arbeitsplätze in den Bereichen Entwicklung, Vertrieb und Fertigung am Standort Offingen.

Synergien zwischen MAI RIGATONI und den strategischen Vorgaben von BWF Profiles zur Etablierung einer Sparte für technische Profile unterstützen die Erschließung zukunftsrelevanter Anwendungsfelder, insbesondere in der Bus-, Bahn- und Luftfahrtindustrie (Leichtbau) sowie im Maschinenbau und der Produktionstechnik. Zur Umsetzung von Produktion und Vertrieb faserverstärkter technischer Profile wird innerhalb der ersten fünf Jahre nach Produktionsstart ein zusätzlicher Personalbedarf erwartet. Die thermoplastischen, faserverstärkten Materialien finden zudem Anwendung in bestehenden Märkten von BWF Profiles, beispielsweise in der Beleuchtungsindustrie sowie im Laden- und Messebau.

Aufbereitung von Materialdaten

Die im Projekt ermittelten Materialkennwerte, von den Einzelfasereigenschaften über die Halbzeug Eigenschaften bis hin zu den mechanischen Kennwerten von den faserverstärkten Kunststoffen, wurden für die Fraunhofer-Materialdatenbank aufbereitet. Dies ermöglicht auch Unternehmen, die nicht am Projekt beteiligt waren, Zugang zu validierten Kennwerten für rGF-basierte Materialien und unterstützt die Entwicklung weiterer Anwendungen.

Veröffentlichungen und Fachvorträge

Die Projektergebnisse werden im Rahmen von Fachpublikationen (wie auf der CIRP LCE 2026) und Konferenzbeiträgen (CU Projektforum, AVK Arbeitskreise) der wissenschaftlichen und industriellen Gemeinschaft zugänglich gemacht. Damit wird ein breiterer Transfer der entwickelten Erkenntnisse in die Fachöffentlichkeit sichergestellt. Die erarbeiteten Erkenntnisse und Inhalte fließen in die Lehre an der TU München und der Universität Augsburg ein.

Weiterführende Forschungsprojekte

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für weiterführende Forschungsvorhaben. Offene Fragen insbesondere hinsichtlich der Skalierung der Nassvliesproduktion auf industrielle Mengen, der Optimierung des Extrusionsprozesses für rGF-Materialien sowie der Entwicklung geeigneter Schlichtesysteme für recycelte

Glasfasern bieten konkrete Ansatzpunkte für Folgeprojekte, die eine weitere Vertiefung und Verbreiterung der Erkenntnisse ermöglichen.

In diesem Kontext wird die BWF im Anschluss ein weiteres Förderprojekt mit dem Namen RAILS im Rahmen des Calls »Material Neutral« verfolgen. Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung und Verarbeitung recycelter Materialien und Composites für die Pultrusion. Der Fokus liegt dabei auf der Reduzierung von Treibhausgasemissionen sowie der Substitution von Aluminium im Schienenverkehr durch nachhaltigere Werkstofflösungen.

Sortimo hat als Endanwender der von fisco hergestellten Langgutwanne als derzeit oberstes Unternehmensziel eine Nachhaltigkeitsstrategie definiert. Hier ist die Kreislauffähigkeit der Produkte stark in den Vordergrund gerückt worden. Das Ergebnis von MAI RIGATONI am Beispiel der Langgutwanne zahlt unmittelbar auf dieses Ziel ein. Es sind aktuell Gespräche im Umlauf, um an den Projektergebnissen weiterzuarbeiten. Als mögliche Förderprogramme zielen hierbei Programme mit den Themenschwerpunkten der Klimaneutralität ab.

4 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit von September 2023 bis Oktober 2025 wurden im Bereich des GFK-Recyclings sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene relevante Entwicklungen bekannt, die im Folgenden kurz dargestellt werden.

Regulatorische Entwicklungen

Die Europäische Union hat im Berichtszeitraum ihre Aktivitäten im Bereich der Kreislaufwirtschaft intensiviert (z.B. die neue Altautoverordnung der Europäischen Kommission). Die fortschreitende Umsetzung des European Green Deal sowie die Weiterentwicklung der EU-Abfallrahmenrichtlinie erhöhen den regulatorischen Druck auf die Verbundwerkstoffindustrie, geeignete Recyclinglösungen zu entwickeln und umzusetzen. Insbesondere die zunehmenden Anforderungen an die Kreislauffähigkeit von Produkten im Rahmen der Ökodesign-Verordnung sind für die Hersteller von GFK-Produkten von wachsender Bedeutung (z.B. ESPR – Ecodesign for Sustainable Products Regulation (EU) 2024/1781, Digital Product Passport, SSbD-Framework für Chemikalien und Materialien).

Windenergie und wachsendes Abfallaufkommen

Das Abfallaufkommen aus dem Rückbau von Windkraftanlagen hat im Berichtszeitraum weiter zugenommen. Mehrere europäische Länder, darunter Deutschland, Dänemark und die Niederlande, haben Initiativen gestartet, um das Recycling von Windrotorblättern aus GFK zu fördern. Einige Hersteller haben Pilotprojekte zur mechanischen Zerkleinerung und Weiterverwendung von Rotorblattmaterial in der Zementindustrie durchgeführt (z.B. Eolo-Hubs, Refresh, Blades2Build). Diese Entwicklungen unterstreichen die Relevanz der in MAI RIGATONI entwickelten Technologien und belegen den wachsenden Bedarf an hochwertigen Recyclinglösungen, die über die reine Energierückgewinnung hinausgehen.

Solvolytische Recyclingverfahren

Im Bereich der Solvolyse wurden während der Projektlaufzeit weitere Forschungsergebnisse publiziert, die die Eignung von Wasser und alternativen Lösemitteln zur schonenden Faser-Matrix-Trennung bei verschiedenen Matrixsystemen belegen[1]. Insbesondere die Verwendung von Säuren und organischen Lösemitteln als Alternative zu subkritischem Wasser wurde von verschiedenen Forschungsgruppen untersucht. Diese Erkenntnisse sind konsistent mit den im Projekt gewonnenen Befunden, wonach die Hydrolyse mit subkritischem Wasser für spezifische Materialkombinationen wie GF-PET sehr geeignet ist, für andere Systeme jedoch Grenzen aufweist.

[1] Siehe Publikationen mit folgenden DOI:
- 10.1016/j.clet.2025.100988
- 10.1016/j.conbuildmat.2025.143505
- 10.3390/polym17070843
- 10.1088/1742-6596/3051/1/01200

Nassvliestechnologie und Pultrusion

Im Bereich der Nassvliesherstellung aus rGF wurden während der Projektlaufzeit keine neuen Publikationen bekannt, die vergleichbare Ansätze verfolgen. Die Herausforderungen hinsichtlich der Prozessstabilität und der mechanischen Eigenschaften der hergestellten Vliese sind hier im Fokus der Forschung, um die Materialien industriereif zu entwickeln.

5 Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt MAI RIGATONI hatte das übergeordnete Ziel, den Stoffkreislauf für GFK in Bayern zu schließen. Im Projektzeitraum von September 2023 bis August 2025 wurden hierfür Recyclingtechnologien sowie Verarbeitungsrouten für rGF entwickelt, erprobt und charakterisiert. Die Ergebnisse der fünf Arbeitspakete lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Demontage, Zerkleinerung und Faser-Matrix-Separation (AP 1)

Im ersten Arbeitspaket wurden geeignete Prozesse zur Demontage und Zerkleinerung von GFK-Bauteilen, darunter Butzbach-Industrietore, fisco-Langgutwannen und thermoplastische Organobleche, erfolgreich entwickelt und erprobt. Sowohl ein- als auch zweistufige Zerkleinerungsprozesse an Ein- und Zweiwellenzerkleinerern sowie Schneidmühlen wurden evaluiert. Es zeigte sich, dass gewebeverstärkte Materialien eine homogenere Partikelgrößenverteilung ergeben als gelegeverstärkte Materialien. Für die Faser-Matrix-Separation wurden zwei Prozessrouten untersucht: Pyrolyse und Hydrolyse mit subkritischem Wasser. Die Pyrolyse ermöglicht eine vollständige Freilegung der Glasfasern, führt jedoch bei Temperaturen über 500 °C zu erheblichen Festigkeitseinbußen von bis zu 60 %. Unter 500 °C bleiben die mechanischen Eigenschaften der Fasern weitgehend erhalten. Die Hydrolyse erwies sich für GF-PET als besonders geeignet, da hier bei vergleichsweise geringen Temperaturen (220–240 °C) eine vollständige Matrixzersetzung bei gleichzeitig nur moderater Faserschädigung möglich ist. Für EP- und UP-Systeme sind höhere Temperaturen erforderlich, was zu stärkeren Festigkeitseinbußen führt. Die Untersuchungen zur Faser-Matrix-Haftung zeigten, dass recycelte Glasfasern gegenüber den meisten Matrixsystemen einen moderaten Haftungsverlust von 20–40 % aufweisen, wobei PET als Ausnahme eine vergleichbare Haftung wie Neufasern aufweist.

Konstruktion, Produktdesign und Kostenstruktur (AP 2)

Im zweiten Arbeitspaket wurden Lastenhefte für die beiden Demonstratoren, PV-Modulrahmen und Langgutwanne, erarbeitet sowie Produktdesigns für den Einsatz von rGF-Materialien entwickelt. Für den extrudierten PV-Rahmen wurde ein optimierter Profilquerschnitt mit zwei Hohlkammern definiert. Darüber hinaus wurde eine umfassende Kostenanalyse der entwickelten Prozessketten erstellt, die die ökonomische Machbarkeit der Recyclingtechnologien bewertet.

Extrusionsverfahren für recycelte Materialien (AP 3)

Im dritten Arbeitspaket wurden Compoundierungs- und Extrusionsversuche mit rGF-Materialien aus verschiedenen Matrixsystemen durchgeführt. Es konnten Compounds mit bis zu 50 % Recyclinganteil hergestellt werden. Die Extrusionsversuche zeigten, dass die hohe Inhomogenität der rGF-Compounds zu erheblichen Herausforderungen hinsichtlich Prozessstabilität und Maßhaltigkeit der Profile führt. Die starken Massedruckschwankungen im Extruder konnten trotz mehrerer Werkzeugoptimierungen nicht vollständig behoben werden, weshalb die freie Extrusion von rPMMA-GF und rPP-GF unter den gegebenen Bedingungen keine ausreichende Maßhaltigkeit erzielte. Die grundsätzliche Verarbeitbarkeit der Materialien wurde jedoch nachgewiesen.

Pultrusionsverfahren für recycelte Materialien (AP 4)

Im vierten Arbeitspaket wurden Nassvliese aus rGF an der Nassvliesanlage des Fraunhofer IGCV entwickelt und im Pultrusionsprozess bei fisco erprobt. Die Untersuchungen zeigten, dass pyrolytisch recycelte Fasern grundsätzlich zu Nassvliesen verarbeitet werden können, der Zerkleinerungsgrad der Fasern jedoch einen entscheidenden Einfluss auf die Vliesqualität hat. Nach einer Anpassung des

Prozessziels, vom Ersatz des Oberflächenvlieses (34 g/m²) auf den Ersatz der Langfaserwirrmatte (300–350 g/m²), konnten erste prozessstabile Pultrusionsversuche mit Nassvliesen aus GF und rGFen Fasern erfolgreich durchgeführt werden. Die geringe Komprimierbarkeit der Nassvliese im Vergleich zu konventionellen Wirrmatten wurde als wesentliche Herausforderung für den Serieneinsatz identifiziert.

Charakterisierung und Datenmanagement (AP 5)
Im fünften Arbeitspaket wurden alle entwickelten Materialien, Halbzeuge und Endprodukte umfassend mechanisch und optisch charakterisiert. Die mechanischen Prüfungen der Butzbach-Profile zeigten, dass ein Recyclinganteil von 10 % zu einer moderaten Festigkeitsreduktion von 16 % führt, während 30 % Recyclinganteil zu einer erheblichen Abnahme von 55 % führen, bei gleichzeitig nur geringer Reduktion der Steifigkeit von 7–8 %. Die Prüfungen der pultrudierten Langgutwannen-Profile zeigten, dass das Nassvlies im Zugversuch vergleichbare Eigenschaften wie das Unifilo-Referenzmaterial erreicht, im Biegeversuch die rGF-Materialien sogar eine höhere Festigkeit und Steifigkeit aufweisen als aus vGF.

MAI RIGATONI hat wesentliche Grundlagen für eine industriell umsetzbare Kreislaufführung von GFK-Materialien in Bayern geschaffen. Die Projektergebnisse belegen, dass rGF technisch in Extrusions- und Pultrusionsprozessen einsetzbar sind, wobei der jeweilige Anwendungsfall und die akzeptierten Eigenschaftseinbußen die Wahl der optimalen Recyclingroute bestimmen. Offene Herausforderungen, insbesondere die Prozessstabilität der rGF-Extrusion und die Skalierung der Nassvliesproduktion, bilden die Grundlage für weiterführende Forschungsarbeiten. Das im Projekt aufgebaute Know-how und die enge Einbindung der Industriepartner schaffen eine solide Basis für den Transfer der Ergebnisse in die industrielle Praxis.

Fraunhofer
IGCV

Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV
Am Technologiezentrum 2
86159 Augsburg

www.igcv.fraunhofer.de