

Sachbericht

Akronym: SuGraSu
Titel: „Substitution mineralischer Granulate durch Glasfasermehl beim Suspensionsschneiden“
Fördermaßnahme: Brandenburgischer Innovationsgutschein (BIG - FuE)

Antragsteller



AQUATEC Hoch- & Niederdrucktechnik e.K.

Wahrenberger Straße 20 b
19322 Wittenberge
Tel.: +49 3877 - 40 38 51
Email: info@aquatec-group.com

Unterauftrag:



Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, Forschungsbereich Polymermaterialien und Composite PYCO

Schmiedestraße 5, 15745 Wildau

Bearbeiter:

Dr.-Ing. Dustin Nielow

Tel.: +49 3375 2152-296

Email: dustin.nielow@iap.fraunhofer.de

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzdarstellung der Zielsetzung	3
2. Durchgeführte Arbeiten	4
a. Entwicklung eines geeigneten Prüfkörpers und Modifikation der Versuchsanlage	5
b. Analyse alternativer Abrasivmittel	6
c. Schneidversuche	10
d. Charakterisierung Schneidsuspensionen und Wiederverwendung des Abrasivs	12
3. Zusammenfassung	14
Literatur	15

1. Kurzdarstellung der Zielsetzung

Für die umfangreiche Zielstellung einschließlich des Standes der Technik wird auf die Projektskizze verwiesen. Durch die politischen Rahmenbedingungen werden in den nächsten Jahren viele der bestehenden Windenergieanlagen aus der Förderung herausfallen bzw. ihre geplante Lebensdauer überschreiten. Nach aktuellen Angaben des Bundesverbandes WindEnergie (BWE) sind mehr als 30.000 Windräder (On- und Offshore) in Deutschland in Betrieb. In den nächsten 10 Jahren unterliegen etwa 17.000 Anlagen dem Repowering oder Rückbau dabei fallen nach Studien des Umweltbundesamtes ca. 265.000 t glasfaserverstärkte Verbundwerkstoffe (GFK) als Abfall [1] an. Die Zerkleinerung erfolgt derzeit im Schwerpunkt mechanisch und ist hinsichtlich Umwelt- und Arbeitsschutz sowie Wirtschaftlichkeit, insbesondere mit Umsetzung der veröffentlichten DIN SPEC 4866, Regelung zum Rückbau von Windenergieanlagen (WEA), nicht tragbar.[2] Das von AQUATEC angewendete und stetig weiterentwickelte Suspensionsschneiden bietet hier einen effizienten Ansatz zur Zerkleinerung der Rotorblätter für den Rückbau von WEA. Bei diesem Trennverfahren wird dem Wasserstrahl ein Abrasiv zugesetzt. Als Abrasiv wird derzeit ein Mineral eingesetzt, das aus Australien oder den USA importiert wird und somit einen hohen und unökologischen Kostenfaktor sowie eine kritische Abhängigkeit infolge der langen Logistikwege darstellt.

Im Rahmen des Vorhabens wurden alternative Abrasivmittel für die Verkleinerung von dickwandigen GFK-Strukturen analysiert, in Schneidversuchen verifiziert und hinsichtlich einer Aufbereitung und erneuten Nutzung bewertet.

2. Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen des durchgeführten Projektes wurden alle im Arbeitsplan definierten Tätigkeiten, Inhalte sowie Meilensteine, gemäß Tabelle 1 im vollen Umfang bearbeitet und die Arbeitsinhalte sowie Arbeitsaufwände den gewonnenen Erkenntnissen und Randbedingungen angepasst.

Tabelle 1: zeitlicher Projektablauf mit den real aufgewendeten Personenmonaten

Nr.	Arbeitspaket														Personalaufwand		Gesamt		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Aquatec	PYCO			
1	Präzisierung der Zielstellung und Erstellung des Anforderungskatalogs	✓															1,75	0,5	2,25
2	Charakterisierung des mineralischen Granulats	✓															1,94	1	2,94
3	Verwendung von Flugasche als Abrasiv	✓															2,47	0	2,47
4	Herstellung und Charakterisierung des Glasmehls	✓				MS01	◆										1,9	0,75	2,65
5	Verwendung des Glasmehls beim Suspensionschneiden	✓															2,51	0	2,51
6	Mikroskopische Untersuchung der Schnittkanten	✓															1,58	1	2,58
7	Charakterisierung des Abrasivs nach dem Schneidprozess	✓															2	1	3
8	Vergleich der Ergebnisse von Granulat und neuem Abrasiv	✓								MS02	◆						2,46	0	2,46
9	Anpassung des Abrasivs	✓															2,61	0,75	3,36
10	Schneidversuche mit Mischungen aus Granulat und neuem Abrasiv	✓															1,73	0	1,73
11	Charakterisierung des Abrasiv-Gemischs nach dem Schneidprozess	✓															2	1	3
12	Abschlussbericht mit Dokumentation der Ergebnisse	✓												MS03	◆		1,5	0	1,5
																	24,45	6	30,45

Meilenstein 01: Charakterisiertes Glasmehl als Bestandteil des Abrasivs für das Suspensionswasserstrahlschneiden steht zur Verfügung - erfüllt.

Meilenstein 02: Entscheidung zwischen Flugasche, Glasmehl und zusätzlich mineralisches Recycling-Abrasivmaterial als neues Abrasiv - erfüllt.

Meilenstein 03: Schneidprozess mit neuem Abrasiv (Glasgranulat und mineralisches Recycling-Abrasivmaterial) wurde etabliert - erfüllt.

Durch die im Jahr 2022 vorliegenden Randbedingungen (Pandemie etc.) mit erheblichen sowie undefinierten Lieferverzögerungen, fehlenden Verfügbarkeiten von Material und Personal erforderte die erfolgreiche Projektumsetzung eine stetige Anpassungsplanung. Die Verschiebungen der geplanten Personenmonate sind sowohl inhaltlich, als auch bedingt durch die äußeren Randbedingungen. So hatte der Antragsteller über die Sommermonate eine unerwartet hohe Auslastung, aufgrund eines sehr hohen Auftragsaufkommen und zusätzlich durch die ungeplanten Verschiebungen (Lieferverzögerung, Pandemie bedingt) von Aufträgen.

Aufgrund der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse erfolgte während der Projektbearbeitung eine fortlaufende inhaltliche und damit auch eine Anpassung der Personalaufwände, insbesondere die Arbeitspakete 4, 8, 9 und 10 sind betroffen. Ursächlich für die Verschiebungen des Personalaufwandes ist die in den umfangreichen Analysen und Vorversuchen nachgewiesene nicht Eignung von Glasmehl und Flugasche als Abrasiv. Die Aufbereitung des Glasmehls und auch der Flugasche für die Untersuchungen war allerdings signifikant aufwendiger als geplant. Das spiegelt sich in im erhöhten Aufwand des AP4 wider. Die weitere Recherche, Charakterisierung, Vorversuche und Parameteridentifikation für die Verarbeitung von geeigneten Alternativ-Abrasivmitteln (Glasgranulat, mineralische Recyclingmaterial) wurde in AP9 berücksichtigt. Hingegen die Schneidversuche konnten sehr viel effizienter durchgeführt werden als in der Planung kalkuliert. Aufgrund der umfangreichen Vorbetrachtungen insbesondere der Schneidparameter-Identifikation in AP9, der besseren Verarbeitbarkeit sowie der erzielten sehr guten Schneidergebnisse.

a. Entwicklung eines geeigneten Prüfkörpers und Modifikation der Versuchsanlage

Im Rahmen der Erstellung des nötigen Anforderungskataloges wurde das langjährige Fachwissen der AQAUTEC GmbH aus den verschiedenen zahlreichen Industrie- und FuE-Projekten analysiert und in der Ziel- und Versuchsmatrix berücksichtigt. Insbesondere für die Entwicklung von geeigneten repräsentativen Prüfkörpern und dem dazugehörigen Versuchsaufbau wurden die bestehenden Erkenntnisse berücksichtigt, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Mit Fokus auf die Zerkleinerung von GFK-Großstrukturen (Rotorblätter WEA oder Schiffsrümpfe) wurde ein monolithischer bzw. Volllaminat, GFK-Prüfkörper entwickelt. Die gesonderte Betrachtung der teils sehr dickwandigen Sandwichsektionen im Rotorblatt sind aufgrund der eingebrachten Stützkerne (Schaumkerne, Balsaholz) mit ihren geringen Dichten und der daraus resultierenden besseren Spannbarkeit nicht nötig. Die monolithischen Sektionen stellen damit das „worst case“ Szenario dar. Mit Fokus auf die starkveränderlichen Querschnitte im Rotorblatt mit ca. 100 mm monolithischen Laminatdicke im Blattwurzelbereich und Laminatstärken von wenigen Millimetern in der Blattschale und der Flügelspitze, wurde ein GFK-Stufenprüfkörper (Glasfaser und Epoxidharzmatrix) abgeleitet und bereitgestellt. In Abb. 1 ist der entwickelte und verwendete GFK-Stufenprüfkörper dargestellt. Im Unterschied zu zurückliegenden Versuchen, wurde ein Kompaktprüfkörper mit direktem Anwendungsbezug entwickelt und damit die Prüfkörpervariation reduziert.

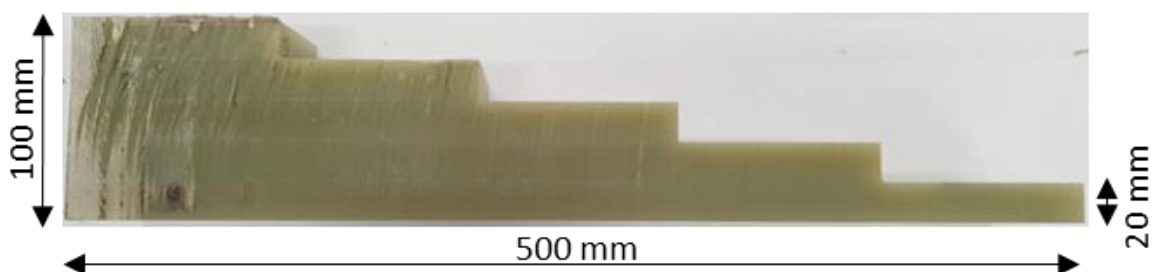


Abb. 1: Darstellung verwendeter GFK-Stufenprüfkörper nach dem Trennen, Schnittbild von schlecht, gut bis sehr gut (von links nach rechts), Schnitt mit Recyclingmaterial Kominex, Schnittgeschwindigkeit 330 mm/min, 2150 bar

Weiterhin lässt sich an Abb. 1 die Qualität des Schnittbildes von schlecht, gut bis sehr gut definieren. Der Schnitt wurde mit dem Abrasivmittel Kominex Precision II (Recyclingmaterial, Schnittparameter 330 mm/min, 2150 bar) durchgeführt. Der Links dargestellte schlechte Schnittbereich ist charakterisiert durch eine unzureichende Trennung und einem scharfkantigen und welligen Schnittbild, während das sehr gute Schnittbild einen gleichmäßigen ebenen Schnitt mit hoher Oberflächengüte darstellt. Das zu erreichende Schnittbild ist eine Optimierungsaufgabe aus Wirtschaftlichkeit, möglichst hohe Schnittgeschwindigkeit und maximaler Werkzeugstandzeit bzw. niedriger Betriebsdruck sowie der gestellten Anforderungen. Beispielsweise für die Selektierung von Rotorblättern sind sehr gute Schnittqualitäten nicht zielführend und unwirtschaftlich. Aufgrund der multivariablen Abhängigkeiten ergibt sich eine entsprechend umfangreiche Versuchsmatrix die in zahlreichen Iterationsschritten sukzessive auf die relevanten Parameter reduziert wurde. Durch die Festlegung einer Prüfkörperkonfiguration wird eine bestmögliche Vergleichbarkeit sichergestellt.

Neben dem Prüfkörper erfolgte die Entwicklung und Modifikation des dazugehörigen Versuchsaufbaus (Abb. 2) für die Schneidversuche mit Suspensions-Wasserstrahlschneiden. Dafür muss das Abrasivmittel in der „Abrasiv-Mixing-Unit AMU“ gemischt bzw. in Suspension gebracht und über die Hochdruckpumpe zur Düse gefördert werden. Der Düsen Abstand zum Werkstück kann verstellt und die Vorschubgeschwindigkeit kann mittels hydraulisch betätigter Linearführung exakt reguliert werden.

Das von AQAUTEC für Industrieaufträge genutzte Equipment (mobile Großanlagen, Verladen auf mehreren LKW) für das Suspension-Wasserstrahlschneiden von Großstrukturen z. B. Bauwerke, Schiffsrümpfe ist aufgrund des komplexen Aufbaus, der hohen Betriebskosten und der Durchflussmenge an nötigen Abrasivmittel für die Versuche ungeeignet. Aus diesem Grund wurde in vergangenen FuE-Projekten eine entsprechende modulare Klein-Versuchsanlage entwickelt und validiert, die für die vorliegenden Versuche modifiziert und genutzt wurde.

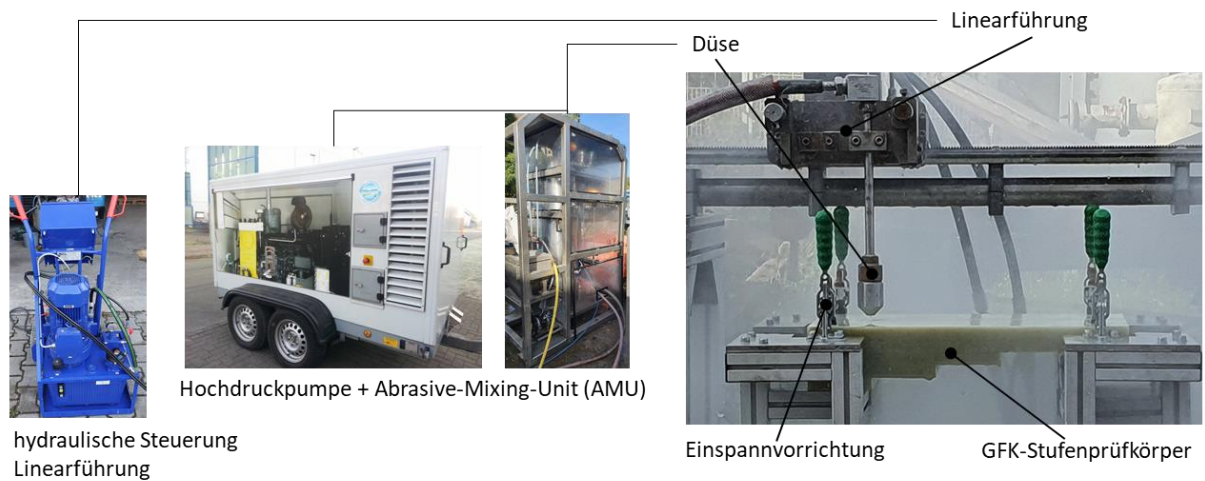


Abb. 2 entwickelte modulare Versuchsanlage für die Schneidversuche

Für die Schneidversuche mit der kompakten modularen Versuchsanlage sind dennoch mindestens 25 kg Abrasivmittel je Konfiguration notwendig. Mit der modularen Versuchsanlage können die Abrasivmittel zügig ausgetauscht, die Schneidparameter (Strahlleistung, Schnittgeschwindigkeit) variiert und die Randbedingungen z. B. durch die Arretierung des geeigneten Düsenabstandes definiert bzw. reduziert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich direkt auf die Industrie-Großanlagen übertragen.

b. Analyse alternativer Abrasivmittel

mineralisches Referenzmaterial

Die Korngröße bzw. Körnung von Abrasivmitteln wird mit „Mesh“ angegeben. Die Umrechnung in Mikrometer und damit die Vergleichbarkeit wird aufgrund verschiedener nicht genormter parallel existierender Umrechnungsmethoden erschwert. Aufgrund der langjährigen Erfahrungen bei AQUATEC kann dieser Einflussfaktor allerdings abgemindert werden. In Abhängigkeit von den Randbedingungen (Material, Wandstärke etc.) wird das Mesh entsprechend gewählt. Für präzise und sehr gute Schnittkanten werden Abrasivmittel kleinerer Korngrößen bzw. größerer Meshzahl genutzt. Als Standard für die Zerlegung von Großstrukturen hat sich nach Erfahrungen von AQUATEC das Mesh 80 etabliert, entsprechend wird dieses als Referenz herangezogen. Aufgrund der unzureichenden Vergleichbarkeit und starken Eigenschaftsstreuung zwischen den Produzenten wurde folgendes Referenzmaterial definiert:

- Bezeichnung: GMA Garnet
- Korngröße: Mesh 80 (ca. 100 μm bis 250 μm)¹
- Härte: 7,5 - 8 Mohs
- Hersteller: GMA Garnet Pty Ltd (Australia)
- Material Almandin-Granat (Mineral, Mineralklasse Silikate und Germanate)
- konkret das Mesh 80 GMA vom Hersteller Garnet

Definition – Die für das Wasserstrahlschneiden notwendige Scharfkantigkeit der Partikel wird folgend als Spratzigkeit bezeichnet.

1 - Bemerkung Korngröße: Aufgrund der geforderten hohen Spratzigkeit und der damit einhergehenden stark variierenden Partikelform ist die Angabe von einer durchschnittlichen Korngröße unzureichend, zielführender ist die Angabe der Spanne minimale und maximale Korngröße. Allerdings sind diese gemittelten Werte ebenfalls starken Abweichungen unterworfen.

In Abb. 3 ist die überlagerte Mikroskop-Aufnahme des Referenzmaterials GMA Garnet Mesh 80 als ungenutztes Neumaterial dargestellt. Die sehr ausgeprägte Spratzigkeit und diskutierte inhomogene Partikelgröße und -form ist erkennbar.

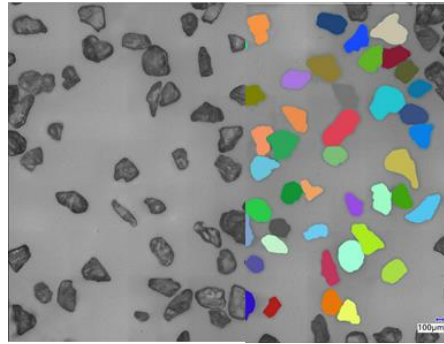


Abb. 3: Mikroskopie mit Flächenvermessung, GMA Garnet Mesh 80 (Neumaterial) die Spratzigkeit und die stark veränderliche Partikelform und –größe sind erkennbar

Neben der geforderten Spratzigkeit und Korngröße muss aufgrund des verwendeten Suspensions-Wasserstrahlschneidens das alternative Abrasivmittel sich entsprechend im Wasser ohne Agglomeration einbringen lassen. Die Ausbildung von Agglomeraten kann nicht oder nur unter höheren Betriebsdrücken zur Düse gefördert werden, dadurch wird die Standzeit der Anlage reduziert. Im Extremfall ist eine Verstopfung der Förderleitungen und Düse möglich, wodurch der Schnitt abgebrochen und die Anlage gespült und ggf. zerlegt werden muss. Insbesondere die Verstopfung der Schneiddüse kann zu erheblichen Schäden und eine Gefährdung der Mitarbeiter darstellen und ist zu vermeiden.

Mit definierten Anforderungen und Randbedingungen wurden geeignete Abrasivmittel recherchiert und geeignete Materialien analysiert. Konkret untersucht wurden im Vorhaben:

- Flugasche verschiedene Konfigurationen
- Glasfasermehl
- Glasgranulate verschiedene Konfigurationen
- Recyclingmaterial bzw. aufbereitetes mineralisches Abrasivmittel

Glasfasermehl

Zur Analyse von Glasfasermehl als alternatives Abrasivmittel wurde sortenreines Glasfasermehl, ohne Matrixbestandteile untersucht. In Abb. 4 ist die Mikroskop-Aufnahme des ungemahlene Glasfasermehls mit der Partikelvermessung dargestellt.

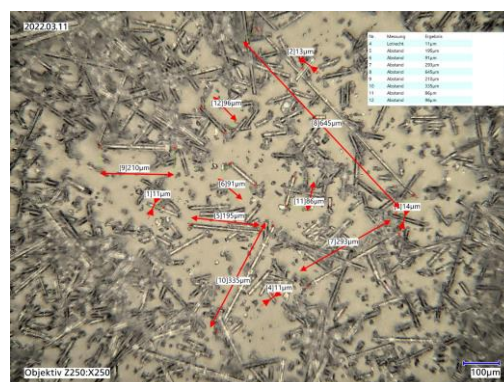


Abb. 4: Mikroskop-Aufnahme sortenreines ungemahlene Glasfasermehl

Aus den Analysen an un- und gemahlene Glasfasermehl lässt sich aufgrund der fehlenden Spratzigkeit und der ungenügenden Partikelgröße resultierende aus den geringen Faserdurchmessern feststellen. Durch das Mahlen des Glasfasermehls lässt sich ggf. die Spratzigkeit erhöhen, aufgrund des Faserdurchmessers ist allerdings die Partikelgröße festgelegt und diese liegt mindestens eine Größenordnung unterhalb des Referenzmaterials.

Flugasche

Im Rahmen des Vorhabens wurden verschiedene Flugaschen bzw. feste Rückstände von Verbrennungen aus Braunkohlekraftwerken analysiert. Aufgrund der bei allen Flugascheproben vorliegenden extrem heterogenen Korngrößenverteilung musste vor der mikroskopischen Analyse eine zeitaufwendige Selektierung der Flugaschengemische im mechanischen Siebrüttelverfahren durchgeführt werden. Die in Abb. 5 dargestellte Flugaschenkonfiguration nach dem Siebprozess (Partikelgrößen $>250\ \mu\text{m}$, $>150\ \mu\text{m}$, $>63\ \mu\text{m}$ etc.) zeigt die Bandbreite der verfügbaren Flugaschen und die enthaltenen Bestandteile. Die dargestellte Flugasche ist für das Wasserstrahlschneiden ungeeignet aufgrund der enthaltenen Basaltfasern und der zu 90 % Massenprozent enthaltenen Bestandteile mit Korngrößen kleiner $150\ \mu\text{m}$.



Abb. 5: Ungeeignete Flugasche mit Basaltfasern nach dem Siebrüttelverfahren separierte Flugaschebestandteile

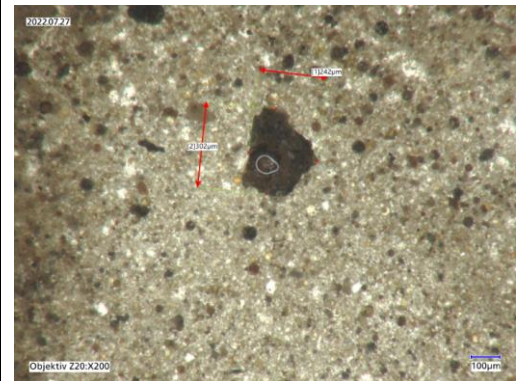


Abb. 6: Flugasche Y4-28.3.17 (Gemisch aller Korngrößen) im Mikroskopbild

In Abb. 6 ist eine tendenziell für das Wasserstrahlschneiden geeignete Flugasche dargestellt, allerdings nur mit erheblichen Einschränkungen. Aufgrund des hohen Massenanteils an feinen Bestandteilen ohne Spratzigkeit müsste vor dem Einsatz der Flugasche als Strahlmittel diese aufwendig gesiebt werden. Aufgrund der zu erwartenden Unwirtschaftlichkeit und der unzureichenden Verfügbarkeit der Flugaschen insbesondere in aufbereitetem Zustand wurde die Flugasche als mögliches Abrasivmittel nicht bei den Schneidversuchen berücksichtigt.

Mineralisches Recyclingmaterial

Über den Projektantrag und Arbeitsplan hinaus wird ein wiederaufbereitetes mineralisches Abrasivmaterial (Kominex Precision II) hinsichtlich der Eignung zum Suspensions-Wasserstrahlschneiden von dickwandigen GFK-Strukturen untersucht. In den Mikroskop-Aufnahmen (Abb. 7 und Abb. 8) der zwei mineralischen Recycling-Abrasivmitteln sind im Vergleich zu dem größeren Referenzmaterial die gleichmäßige Korngrößenverteilung und die weniger stark abweichende Formgebung der Partikel erkennbar.

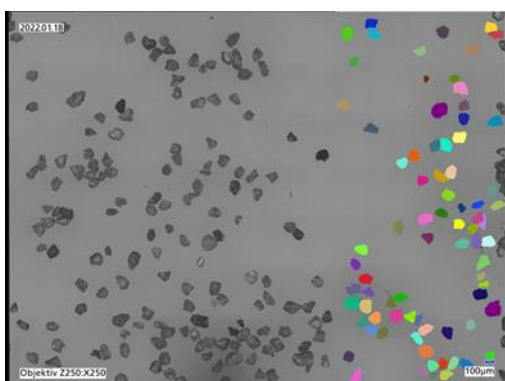


Abb. 7: Recyclingmaterial Kominex Premium

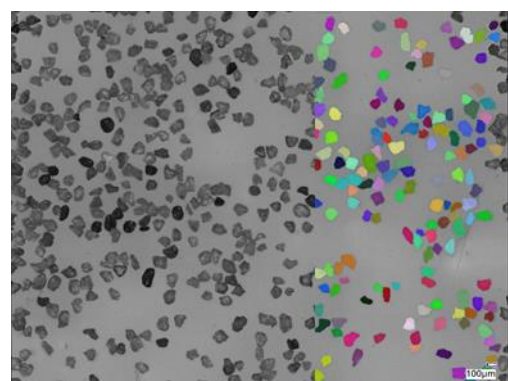


Abb. 8: Recyclingmaterial Kominex Precision II

Glasgranulat

Aus den Erkenntnissen aus der Analyse des Glasfasermehl wurde als weiteres alternatives Abrasivmaterial, Glasfasergranulat untersucht. Zur Reduzierung der Einflussfaktoren wurde sortenreines Neumaterial in drei Korngrößen beschafft und analysiert:

- Glasgranulat 100-200, Korngröße (gemäß Hersteller Schicker) 100 μm -200 μm
- Glasgranulat 200-300, Korngröße (gemäß Hersteller Schicker) 200 μm -300 μm
- Glasgranulat 400-800, Korngröße (gemäß Hersteller Schicker) 400 μm -800 μm

Glasgranulat wird bereits als Strahlmittel für die Metallverarbeitung verwendet, insbesondere für die Oberflächenbehandlung. Für die Zerkleinerung von GFK-Strukturen bietet der Einsatz des Glasgranulates den Vorteil, sortenreinen Abfall zu erzeugen. Der Einsatz der mineralischen Standard-Abrasivmittel führt zwangsläufig zum nicht sortenreinen und damit kostenintensiven Abfall.

In Abb. 9 ist eine überlagerte Mikroskop-Aufnahme für das Glasgranulat 400-800 dargestellt, die ausgeprägte Spratzigkeit, wie auch die inhomogene Partikelgröße sind erkennbar.

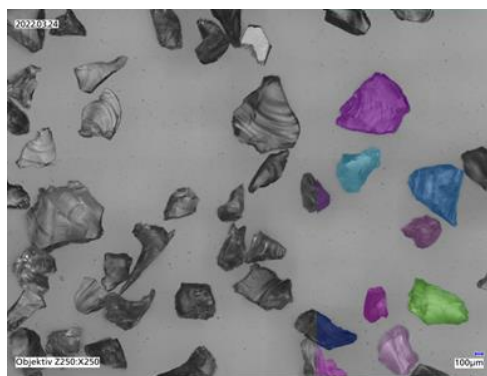


Abb. 9: mikroskopische Analyse Glasgranulat 400 μm -800 μm

Die Glasgranulate sind nach den mikroskopischen Analysen als sehr geeignet für das Suspensionsschneiden einzustufen und werden im Schneidversuch untersucht.

Korngrößenverteilung der analysierten Abrasivmittel im Vergleich

In Abb. 10 sind die mikroskopischen Analysen auf das Referenzmaterial normiert dargestellt.

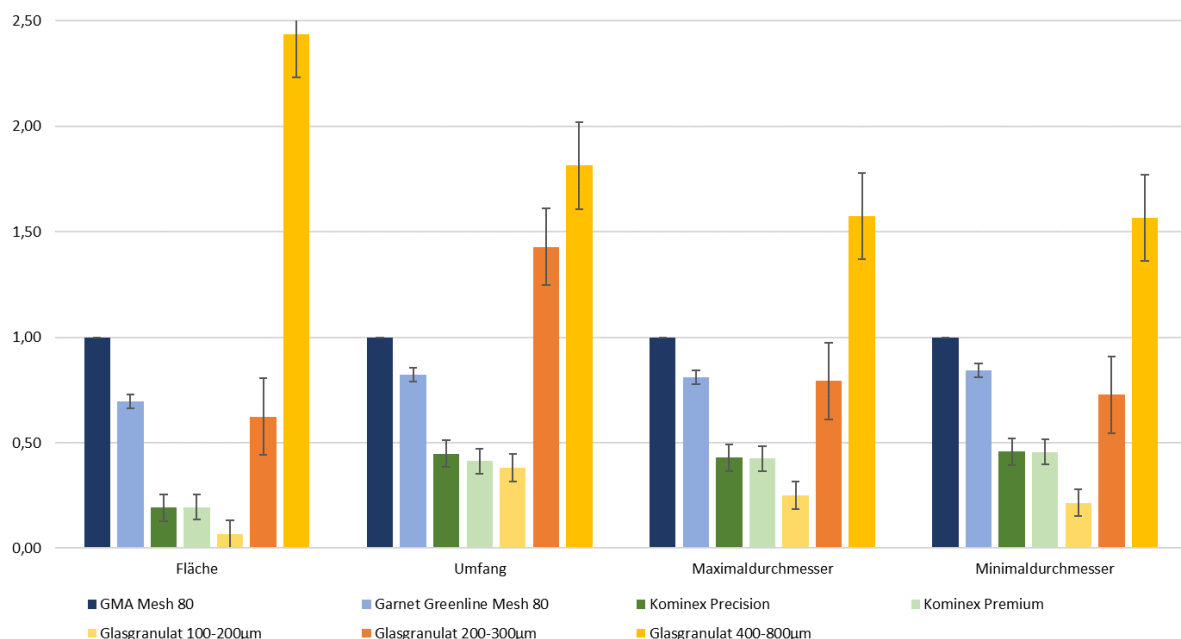


Abb. 10: Auf das Referenzmaterial normierte Darstellung der analysierten Abrasivmittel

Aus der mikroskopischen Charakterisierung lassen sich folgende Rückschlüsse ziehen:

- Das Referenzmaterial (GMA Mesh 80) weist eine erheblich größere Korngröße auf, als im Datenblatt mit dem Mesh 80 beschrieben, gleiches gilt für das Abrasivmittel Greenline Mesh 80 vom gleichen Hersteller Garnet.
- Die beiden untersuchten Recyclingmaterialien von Hersteller Kominex (Mesh 120) zeigen die geringsten Abweichungen bei einer sehr gleichmäßigen Korngrößenverteilung. Beide Materialien sind hinsichtlich der erfassten Eigenschaften vergleichbar. Für die Schneidversuche wird das Kominex Precision genutzt.
- Die untersuchten Glasgranulate entsprechen der in den Datenblättern angegebenen Korngröße. Das Glasgranulat mit der Korngröße 400 μm bis 800 μm wird auf der tatsächlich vorliegenden Partikelgröße nicht für die Schneidversuche herangezogen. Die beiden anderen Glasgranulate werden im Schneidversuch geprüft, wobei das Glasgranulat (200 μm - 300 μm) dem Referenzmaterial vergleichbarer ist.

Zusammenfassung

Die Laboranalysen ergaben eine ungenügende Eignung von Glasfasermehl und Flugasche als Abrasivmittel aufgrund der fehlenden mechanischen Eigenschaften (Partikelgröße, Spratzigkeit) und der zu erwartenden fehlenden Wirtschaftlichkeit, aufgrund der notwendigen Aufbereitung der Flugasche.

Sehr auffällig sind bei dem Referenzmaterial die erhebliche Abweichung der Korngröße gegenüber den Angaben im Datenblatt. Das real vorliegende Abrasivmittel ist signifikant grober (im Durchschnitt ca. doppelte Partikelgröße) als angegeben. Für eine belastbare Aussage weitere Proben aus verschiedenen Chargen zu prüfen. Aus den Analysen wurden das Glasgranulat (100 μm - 200 μm und 200 μm - 300 μm) und das mineralische Recycling-Abrasivmittel (Kominex Precision) als geeignet Abrasivmaterialien definiert und in den Schneidversuchen untersucht.

c. Schneidversuche

Die Schneidversuche wurden mit dem Suspensions-Wasserstrahlschneiden mit der vorgestellten Versuchsanlage durchgeführt. In umfangreichen Parameterversuchen wurde zunächst die hydraulische Leistung mit 2150 bar und 28 l/min definiert und alle Versuche bei diesem Wert durchgeführt. Die erreichte Schnittgeschwindigkeit, Schnittqualität und maximale Schnitttiefe sind direkt abhängig vom verwendeten Abrasivmittel. Weiterhin wurden unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen zwei Schnittgeschwindigkeiten 150 mm/min und 220 mm/min als zielführend ermittelt. Bei allen Schnittversuchen wurden die Schnittbilder analog der Abb. 1 präpariert und fraktografisch analysiert.

Schnittgeschwindigkeit 150 mm/min (2150 bar)

Mit dem Referenzmaterial konnten bei einer hydraulischen Leistung an der Düse von ca. 100 KW (28 l/min bei 2150 bar) und einer Schnittgeschwindigkeit von ca. 150 mm/min GFK-Lamine bis ca. 160 mm mit einem guten Schnittbild geschnitten werden.

In Abb. 11 und Abb. 12 ist die Einstech- und Strahlaustrittsseite eines GFK-Stufenprüfkörpers nach den Schneidversuchen mit den Abrasivmitteln Wasser und Glasgranulat 100 μm - 200 μm dargestellt.

Reines Wasser ohne Abrasivmittel liefert ein sehr schlechtes Schnittbild mit deutlichen Vibration beim Schneiden und massiver Delamination der Lamineinzelschichten bei einer maximalen trennbaren GFK-Dicke von maximal 40 mm. Die erzeugten Delaminationen betreffen nahezu alle Lamineinzellagen des Prüfkörpers.

Das verwendete Glasgranulat 100 μm - 200 μm liefert ein sehr gutes Schnittbild bis 40 mm Wandstärke, bis 60 mm ein gutes Schnittbild und bei 80 mm GFK-Dicke ein sehr schlechtes Schnittbild mit ausgeprägten Delaminationen (Abb. 11 und Abb. 12). Die maximale Dicke von 100 mm kann nicht getrennt werden. Auffällig beim Trennvorgang, an den Laminatstufenübergängen ab 60 mm bis 80 mm kann der Wasserstrahl das Laminat nur mit Verzögerung durchstoßen. Die Folge sind massive Vibrationen durch den Staudruck, wodurch massive Delaminationen in den Lamineinzelschichten als „Energieableitung“ entstehen.

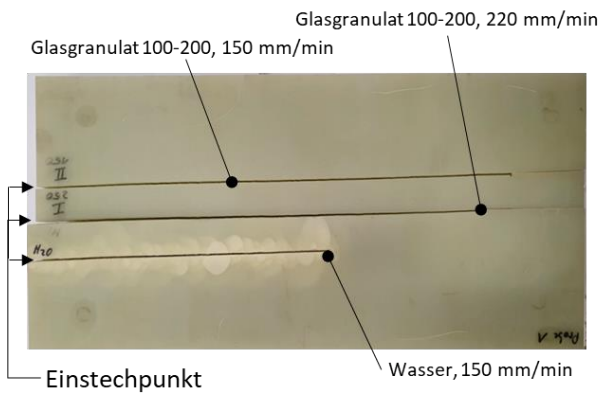


Abb. 11: Einstech- / Oberseite GFK-Stufenprüfkörper nach Schneidversuch, Abrasivmittel Wasser, Glasgranulat 100 µm - 200 µm

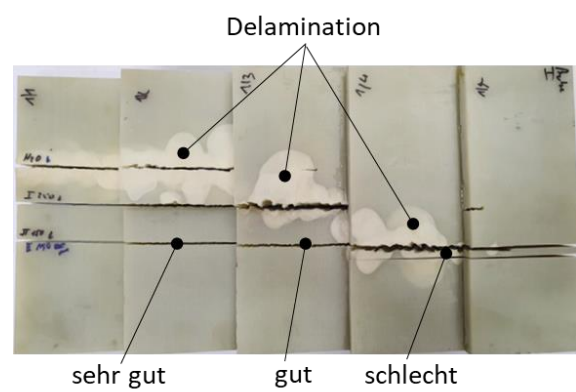


Abb. 12: Strahlaustritt- / Rückseite GFK-Stufenprüfkörper nach Schneidversuch, Abrasivmittel Wasser, Glasgranulat 100 µm - 200 µm

Das Glasgranulat 200 µm - 300 µm liefert bis zu einer GFK-Dicke bis 60 mm eine sehr gut, bis 80 mm eine gutes und bei einer GFK-Dicke von 100 mm ein schlechtes Schnittbild mit unzureichender Trennung.

Schnittgeschwindigkeit 220 mm/min (2150 bar)

Das Glasgranulat 100 µm - 200 µm liefert bei einer GFK-Dicke von 20 mm eine sehr gut, bei 40 mm eine gute und bei 60 mm ein schlechtes Schnittbild mit massiven Delaminationen, infolge der starken Vibrationen hervorgerufen durch die verzögerte Materialtrennung. Die GFK-Stufe 80 mm wird nicht getrennt, am Übergang 60 mm zu 80 mm kommt es zum Rückstau, mit massiven Vibrationen.

Das Glasgranulat 200 µm - 300 µm liefert bei 20 mm Laminatdicke ein sehr gutes, bis 60 mm ein gutes Schnittbild. Die Laminatdicke von 80 mm wird nicht mehr getrennt, infolge des Wasserstrahl-Rückstaus kommt es zu starken Vibrationen und Delaminationen der Laminat- und Blockschichten.

Das mineralische Recyclingmaterial (Kominex Precision) liefert bis 60 mm Wandstärke ein sehr gutes, bei 80 mm ein gutes und bei 100 mm ein schlechtes Schnittbild mit vollständiger Trennung.

Infolge des sehr guten Schnittergebnis, wurde das mineralische Recyclingmaterial (Kominex Precision) mit einer sehr hohen Schnittgeschwindigkeit von 330 mm/min untersucht. Das Schnittbild ist bei einer Wandstärke bis 40 mm sehr gut, bei 60 mm gut, bei 80 mm noch gut und bei 100 mm Wandstärke schlecht mit fehlender Trennwirkung und deutlicher Delaminationen der unteren Laminatlagen.

Zusammenfassung Schneidversuche:

Unter den nicht mineralischen Abrasivmitteln ist das Glasgranulat 200 µm - 300 µm zu favorisieren, es liefert sehr gut bis gute Schnittbilder bei sehr wirtschaftlichen Schnittgeschwindigkeiten von 220 mm/min. Bei einer Schnittgeschwindigkeit von 150 mm/min sind zuverlässige gute Schnitte bis 80 mm Wandstärke möglich.

Das mineralische Recyclingmaterial (Kominex Precision) liefert die beste Performance bei den Schneidversuchen, Schnittgeschwindigkeit bis 330 mm/min für monolithisches Laminat einer Dicke von 80 mm können mit einem guten Schnittbild getrennt werden. Bei einer Schnittgeschwindigkeit von 220 mm/min können Laminatdicken bis 100 mm mit einem schlechten Schnittbild und ausgeprägten Delaminationen getrennt werden. Aufgrund der feineren Körnung und der gleichmäßigeren Korngrößen ist das Schnittbild dem Referenzmaterial überlegen.

Mit Blick auf die effiziente Zerspaltung von Rotorblättern mit Laminatdicken unterhalb 100 mm ist das mineralische Recyclingmaterial (Kominex Precision) ggf. dem Referenzmaterial überlegen. Das nicht mineralische Glasgranulat 200 µm - 300 µm bietet bis zu Wandstärken von 80 mm eine alternative zu den herkömmlichen Abrasivmitteln und ermöglicht erstmalig einen sortenreinen GFK-Abfall, wodurch die Entsorgungskosten reduziert werden können.

d. Charakterisierung Schneidsuspensionen und Wiederverwendung des Abrasivs

Glasgranulat-Suspension

Die Suspension (Glasgranulat 200 μm -300 μm zzgl. Wasser) wurde nach dem Schnitt aufgefangen und erneut untersucht. Nach dem Schneidprozess liegt die Suspension nicht mehr sortenrein, sondern als Mischung aus Abrasivmittel, Abrieb des Werkstückes (GFK) und weitere Komponenten aus dem Anlagenschleiß und der Umgebung vor.

Die Korngröße des Glasgranulates wurde um ca. 40 % gegenüber dem Neumaterial abgemindert. Die Korngrößenverteilung ist dabei sehr inhomogen, der mittlere Maximaldurchmesser beträgt $146 \pm 43 \mu\text{m}$ und der gemittelte Minimaldurchmesser $98 \pm 31 \mu\text{m}$. In Abb. 13 ist das Glasgranulat 200 μm -300 μm vor dem Schneidvorgang als Neumaterial und in Abb. 14 nach dem Schneidvorgang bei vergleichbarer Auslösung dargestellt. Die Veränderungen sind deutlich erkennbar, nach dem Schneidvorgang ist die Partikelgröße sehr inhomogen, Spratzigkeit ist vorhanden aber stark abmindert.

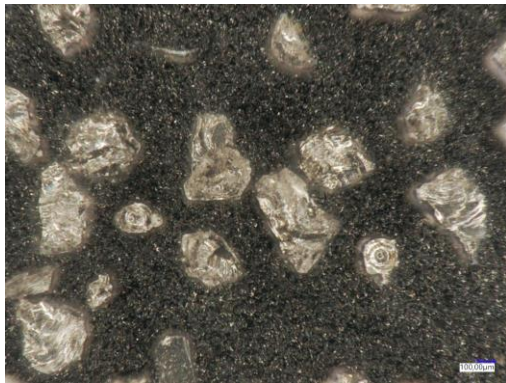


Abb. 13: Mikroskop-Aufnahme, Glasgranulat 200 μm -300 μm als Neumaterial

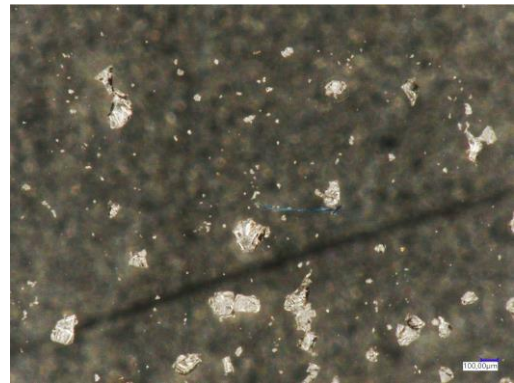


Abb. 14: Mikroskop-Aufnahme, Glasgranulat 200 μm -300 μm nach dem Schneidvorgang

Die während des Schneidvorganges aus dem Werkstück abgetragenen GFK-Rückstände sind nach Abb. 14 sehr fein, geometrisch undefiniert ohne ausgeprägte Spratzigkeit. Ursächlich für den gegenüber dem mineralischen Abrasivmittel höheren Verschleiß ist vermutlich die um ca. 40 % abgeminderte Härte der Glaspartikel mit ca. 6 Mohs. Die Verwendung des GFK-Abriebs als Abrasivmittel erscheint nach den vorliegenden Untersuchungen nicht möglich.

Für eine Wiederverwendung als Abrasivmittel muss die Suspension aufbereitet werden, um Fremdmaterialien zu trennen, weiterhin ist das genutzte Glasgranulat nach den verschiedenen Korngrößen zu sieben. Eine erneute Verwendung, insbesondere der größeren Partikel, als Zuschlag zu dem Neumaterial ist möglich. Aber vermutlich nicht wirtschaftlich, da Aufgrund der Größenverteilung nur 5 % bis 10 % der genutzten Partikel eine ausreichende Korngröße für den fokussierten Anwendungsfall besitzen. Weiterhin wird die sehr unterschiedliche Partikelgeometrie und abweichend Spratzigkeit die Schnittwirkung herabsetzen, ggf. ist eine die Verwendung für Präzisionsschnitte für andere Anwendungen möglich.

Mineralisches Recyclingmaterial-Suspension

In den folgenden Abbildungen ist das mineralische Recycling-Abrasivmittel vor (Abb. 15) und nach dem Schneidprozess (Abb. 16) dargestellt. Nach dem Schneidprozess liegt die Suspension nicht mehr sortenrein, sondern als Mischung aus Abrasivmittel, Abrieb des Werkstückes (GFK) und weitere Komponenten aus dem Anlagenverschleiß und der Umgebung vor.

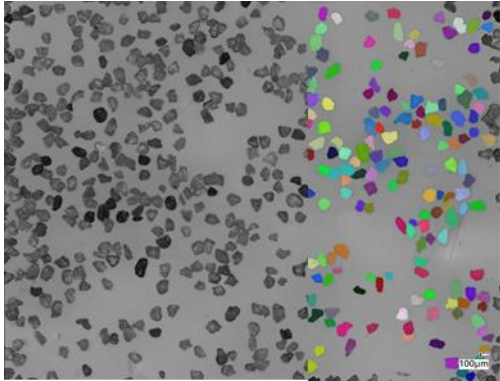


Abb. 15: Kominex Precision II vor dem Schneiden, sehr homogene Verteilung an Partikelform und -größe

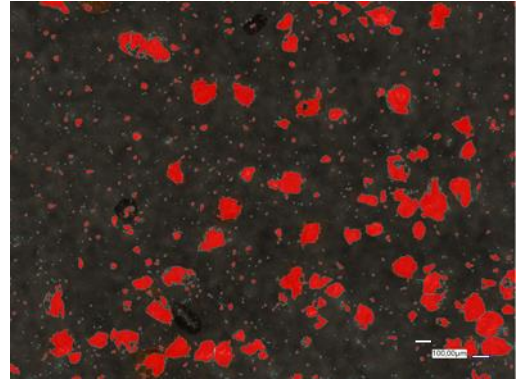


Abb. 16: Kominex Precision II vor dem Schneiden (größere Auflösung, zum linken Bild), inhomogene Partikelgröße, hoher Anteil an kleine Partikeln

Die erneute mikroskopische Analyse zeigt, dass infolge des Energieeintrags beim Wasserstrahlschneiden die mittlere Korngröße stark minimiert wurde. Die für eine erneute Verwendung relevanten mineralischen Partikel zeigen eine ausgeprägte Spratzigkeit. Nach den bisherigen Analysen ist davon auszugehen, dass nur ein geringer Anteil der Rückstände als Abrasivmittel kleiner Korngrößen für Präzisions-schnitte geeignet ist, ca. 90 % der Rückstände scheinen sehr kleine Partikel darzustellen. Der GFK-Abrieb ist auch bei den mineralischen Suspensions-Schneidrückständen sehr fein (Korngrößen unter 20 µm) verteilt.

3. Zusammenfassung

Im Rahmen des durchgeführten Projektes wurden alle im Arbeitsplan definierten Tätigkeiten, Inhalte sowie Meilensteine gemäß Tabelle 1 im vollen Umfang bearbeitet und die Arbeitsinhalte den gewonnenen Erkenntnissen z. B. bei der Auswahl geeigneter Abrasivmittel angepasst.

Aus den Analysen und Schneidversuchen konnten umfangreiche Erkenntnisse gewonnen werden:

- Glasfasermehl ist nach den vorliegenden Untersuchungen als Abrasivmittel nicht geeignet. Aufgrund der unzureichenden Spratzigkeit und der zu geringen Korngröße nach dem Mahlen, bedingt durch die geringen Faserdurchmesser. Weiterhin zeigen die nach den Schneidvorgängen (Abrasivmittel Glasgranulat und Mineral) analysierten GFK-Bestandteile der Suspensionsrückstände eine sehr kleine / feine Korngrößenverteilung mit ungenügender Spratzigkeit.
- Flugasche kann als Abrasivmittel geeignet sein, sofern diese ausreichend vorselektiert in der notwendigen Partikelgröße und Partikelform / Spratzigkeit vorliegt. Die untersuchten Flugaschen wiesen zu inhomogene Partikelgrößen und -formen auf. Eine Aufbereitung erscheint nicht wirtschaftlich.
- Das untersuchte nicht mineralische Glasgranulat 200 µm-300 µm eignet sich für die effiziente Zerspaltung von GFK-Strukturen mit monolithischen Laminatdicken unterhalb 80 mm. Das Glasgranulat kann mit der bestehenden Anlagentechnik genutzt werden, lediglich das Einmischen beansprucht mehr Zeit. Gegenüber den mineralischen Abrasivmitteln, ermöglicht das Glasgranulat erstmalig einen sortenreinen GFK-Abfall, wodurch bei der Entsorgung von Rotorblättern die Kosten und Umweltbelastung reduziert werden können. Damit kann ein wesentlicher Beitrag zu [1] geleistet werden. Weiterhin bietet das Glasgranulat eine Redundanz zu den mineralischen Abrasivmitteln bei derzeit etwa 20 % gesteigerten Kosten für das Abrasivmittel. Bei der Etablierung von Glasgranulat für das Großanlagen-Suspensions-Wasserstrahlschneiden mit den nötigen Abnahmemengen ist von einer Kostenreduktion auszugehen.
- Das mineralische Recyclingmaterial (Kominex Precision) liefert die beste Performance bei den Schneidversuchen, Schnittgeschwindigkeit bis 330 mm/min für monolithisches Laminat einer Dicke von 80 mm können mit einem guten Schnittbild getrennt werden. Bei einer Schnittgeschwindigkeit von 220 mm/min können Laminatdicken bis 100 mm mit einem schlechten Schnittbild und ausgeprägten Delaminationen getrennt werden. Verglichen mit Referenzmaterial weist das Recyclingmaterial eine signifikant geringere Streuung der Korngröße und Partikelform auf, ggf. ist eine gesteigerte Schnittperformance infolge der geringeren Materialstreuung möglich. Das Recyclingmaterial ohne Anpassungen der Anlagen verarbeitet werden.
- Aus der Analyse der nicht sortenreinen Suspensionsrückstände nach dem Schneidprozess lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

Die Rückstände des GFK-Abriebs vom Werkstück liegen als sehr feine Partikel (unter 20 µm) und ohne ausgeprägte Spratzigkeit vor. Eine Aufbereitung als Abrasivmittel erscheint nach derzeitigem Stand der Erkenntnisse nicht zielführend.

Die Rückstände des Glasgranulates und des mineralischen Recyclingmaterials weisen infolge des massiven Energieeintrages eine sehr inhomogene Korngrößenverteilung mit einer signifikanten Herabsetzung der Korngröße gegenüber dem Ausgangsmaterial auf. Aufgrund der geringeren Härte des Glasgranulates zeigen die Partikel nach dem Wasserstrahlschneiden sehr inhomogene Partikelformen.

Für eine Aufbereitung der Abrasivmittel muss zunächst eine sortenreine Trennung der Schneidrückstände erfolgen und weiterhin eine Sortierung nach Partikelgröße. Die Aufbereitung ist nur zu einem erheblich feineren Abrasivmittel (kleine Körnung, hohe Meshzahl) möglich. Für die Zerlegung von dickwandigen GFK-Strukturen ist eine erneute Aufbereitung des Abrasivmittels nicht zielführend, insbesondere nicht bei dem Glasgranulat.

Ohne die Förderung wären die systematischen Analysen und Versuche zur erfolgreichen Substitution von mineralischen Neu-Abrasivmitteln nicht möglich gewesen. Durch die erfolgreiche Umsetzung des Projektes „SuGraSu“ und die gewonnenen Erkenntnisse inkl. der Anwendungsgrenzen der alternativen Abrasivmittel, kann AQUATEC künftig bei Bedarf Glasgranulate oder mineralisches Recyclingmaterial als Abrasivmittel einsetzen. Die Verwertung der Projektergebnisse kann damit direkt erfolgen.

Literatur

- [1] Karlsruher Institut für Technologie im Auftrag des Umweltbundesamts, Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter, Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Forschungskennzahl 3720 31 301 0, Abschlussbericht, Juli 2022
- [2] DIN SPEC 4866:2020-08: „Nachhaltiger Rückbau, Demontage, Recycling und Verwertung von Windenergieanlagen“, August 2020