



Projektverbund ForCycle – Ressourcenstrategie für Bayern
unter besonderer Berücksichtigung von Sekundärrohstoffen

Abschlussbericht

Recycling von Kompositbauteilen aus Kunststoffen als
Matrixmaterial - ReKomp

Laufzeit: 01.03.2014 – 31.12.2016

ausgeführt durch:

Dipl.-Ing. Elisa Seiler,

Prof. Dr. Ulrich Teipel,

Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Verfahrenstechnik, Mechanische
Verfahrenstechnik/ Partikeltechnologie, Wassertorstraße 10, 90489 Nürnberg,
Tel.: 0911-9604-7915, E-Mail: ulrich.teipel@th-nuernberg.de und Fraunhofer
Institut für Chemische Technologie (ICT), Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7,
76327 Pfinztal

Industriepartner:

Michael Roth,

TREE WINDeNERGIE UG, Peuerlstraße 11, 92637 Weiden

Nürnberg, Januar 2017



Abstract

Ziel des Projekts *Recycling von Kompositbauteilen aus Kunststoffen als Matrixmaterial (ReKomp)* war die systematische Betrachtung der einzelnen Prozessschritte einer stofflichen Verwertung von faserverstärkten duroplastischen Kunststoffen, um das Werkstoffpotenzial insbesondere der Fasern und Partikeln, in einem zweiten Lebenszyklus stofflich nutzen zu können.

Die Projektinhalte sind in Abbildung 1 dargestellt, dabei bilden die Demontage von großformatigen Bauteilen wie Rotorblättern und die materialspezifische Aufbereitung der innerhalb der zweiphasigen Materialverbünde – Polymermatrix und disperses Faser oder Partikelsystem- den Schwerpunkt. Die Beurteilung der Verarbeitbarkeit dient dazu, eine anschließende hochwertige Rückführung in den Markt gewährleisten zu können, die abschließende Bilanzierung der neuen Prozesse und Materialien soll die Nachhaltigkeit und ökonomische Umsetzbarkeit beurteilen.



Abbildung 1: Projektinhalte des Projektes ReKomp



Gliederung

| | |
|--|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | 5 |
| Tabellenverzeichnis..... | 6 |
| 1. Aufgabenstellung | 7 |
| 2. Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde..... | 8 |
| 3. Planung und Ablauf des Vorhabens | 11 |
| 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand..... | 13 |
| 4.1. Rotorblätter von Windkraftanlagen..... | 13 |
| 4.1.1. Aufbau und Materialien von Rotorblättern..... | 13 |
| 4.1.2. Demontage von Rotorblättern | 14 |
| 4.1.3. Entsorgungswege für Rotorblattmaterial..... | 15 |
| 4.2. Recycling von faserverstärkten Kunststoffen | 17 |
| 4.2.1. Thermische Recyclingverfahren..... | 18 |
| 4.2.2. Chemische Recyclingverfahren..... | 19 |
| 4.2.3. Mechanische Recyclingverfahren | 20 |
| 5. Gesamtproblematik..... | 21 |
| 6. Material und wissenschaftliche/technische Methoden | 22 |
| 6.1. Demontage | 22 |
| 6.2. Mechanische Aufbereitung | 25 |
| 6.2.1. Zerkleinerung | 25 |
| 6.2.2. Klassierung | 27 |
| 6.3. Chemische Aufbereitung..... | 27 |
| 6.4. Thermische Aufbereitung | 27 |
| 6.5. Analysemethoden..... | 28 |
| 6.6. Ökobilanzielle Betrachtung | 28 |



| | | |
|-------------|--|-----------|
| 6.6.1. | Ziel- und Untersuchungsrahmen..... | 28 |
| 6.6.2. | Sachbilanz | 30 |
| 7. | Ergebnisdarstellung und Bewertung | 31 |
| 7.1. | Demontage | 31 |
| 7.1.1. | Energetische Demontage..... | 31 |
| 7.1.2. | Demontage mit Seilsäge..... | 32 |
| 7.2. | Aufbereitung und Verwertung | 33 |
| 7.2.1. | Mechanische Aufbereitung..... | 33 |
| 7.2.2. | Chemische Aufbereitung | 37 |
| 7.3. | Ökobilanzielle Bewertung | 39 |
| 7.3.1. | Wirkungsabschätzung und Auswertung..... | 39 |
| 8. | Zusammenfassung und Ausblick | 41 |



Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Projekthinhalte des Projektes ReKomp | 2 |
| Abbildung 2: Prognostizierte zu entsorgende Rotorblattmenge in Deutschland | 9 |
| Abbildung 3: Aufbau Rotorblatt im Profil..... | 10 |
| Abbildung 4: Verfahren zum Materialrecycling von Faserverbundkunststoffen ⁽²¹⁾ ,0..... | 18 |
| Abbildung 5: von der Windkraftanlage demontierter Rotorblattkranz auf dem Weissmoos, Schwarzwald..... | 23 |
| Abbildung 6: geteiltes Rotorblatt für genehmigungsfreien Abtransport | 23 |
| Abbildung 7: ausgewählte Materialbereiche eines Rotorblattes für die energetische Demontage..... | 23 |
| Abbildung 8: Auf dem Versuchstisch im Sprengbunker positioniertes Prüfsegment (Variante I)..... | 24 |
| Abbildung 9: Beispiel einer Schneidladung mit Kupferliner aus plastifiziertem Kupferpulver und Stand-Off mit einer Polyethylen Schicht | 24 |
| Abbildung 10: Aufgebrachte Schneidladung (Belegungsdichte 140g/m) auf einer GFK Probe | 25 |
| Abbildung 11: Produktsystem und Systemgrenzen der vorliegenden Ökobilanz | 29 |
| Abbildung 12: Ergebnis der Sprengkonfiguration (Variante I) mit GFK-Kunststoffschaum-Verbund | 32 |
| Abbildung 13: Ergebnis der Sprengkonfiguration Variante II mit erhöhter Leistung an GFK-Kunststoffschaum-Verbund | 32 |
| Abbildung 14: Versuche zur Trennung eines Rotorblattes mittels Seilsäge | 33 |
| Abbildung 15: Versuche zur Zerlegung eines Rotorblattes mittels Bandsäge | 33 |
| Abbildung 16: Zerkleinerte GFK-Proben (links) HM20/57 (rechts) SM20/57..... | 34 |
| Abbildung 17: SM20/57 und HM20/57 (links) b/l-Verhältnis (rechts) Harzgehalt | 35 |
| Abbildung 18: Zerkleinerte GFK-Proben (links) HM20/12 (rechts) HM20/57..... | 35 |
| Abbildung 19: Vergleich der Partikelgrößenverteilung von Laborplatten, RTM- und Rotorblattmaterial | 36 |
| Abbildung 20: Proben a) RB (PEG 200) und b) GFK (PEG 200) nach Literaturangaben . | 37 |
| Abbildung 21: Proben a) RB (PEG 200) und b) GFK (1, PEG 200) bei erhöhter Temperatur..... | 38 |



| | |
|--|----|
| Abbildung 22: Proben a) RB (PEG 200) und b) GFK (2, PEG 200) bei erhöhtem NaOH Einsatz..... | 38 |
| Abbildung 23: REM Aufnahmen des Rückstandes mit PEG 400 von a) dem Rotorblattmaterial und b) der GFK-Platte..... | 39 |
| Abbildung 24: gewaschene und getrocknete G-Fasern aus den Versuchen a) RB (PEG 400, 24) und b) GFK (PEG 400, 25) | 39 |
| Abbildung 25: Gesamtergebnis Treibhauspotential GWP 100 (Berechnung mit GaBi ts nach ReCiPe)..... | 40 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Zeit- und Arbeitsplan Projekt ReKomp | 11 |
| Tabelle 2: Technische Daten der verwendeten Zerkleinerungsaggregate..... | 26 |
| Tabelle 3: Stoffliche Zusammensetzung des zu betrachtenden Rotorblatts | 30 |
| Tabelle 4: Einsatz der Demontage- und Zerkleinerungstechnologie in den verschiedenen Varianten | 31 |
| Tabelle 5: Mittleres b/l-Verhältnis der Proben HM20/12 und HM20/57 | 36 |
| Tabelle 6: Übersicht der Glühverlustmessungen von GFK-Platten (blau) und Rotorblattmaterial (grün) mit unterschiedlichen Lösemitteln | 39 |



1. Aufgabenstellung

Der Einsatz von Kompositmaterialien mit duroplastischen Kunststoffen als Matrix und Fasern als Verstärkungsmaterial ist seit einigen Jahren, durch das enorme Leichtbaupotential bei gleichzeitig günstigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, stark gestiegen. Laut dem Marktbericht für Europa 2015, der AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. setzt sich das stetige Wachstum der Produktionsmenge weiter fort.⁽¹⁾ Trotz der steigenden Zahl an derartig gestaltete und hergestellte Bauteilen und damit zur Entsorgung anfallenden Mengen, ist eine wirtschaftlich sinnvolle ganzheitliche Betrachtung der Produktionssysteme, welche auch die Wiederverwertung der Materialien nach ihrem Lebenszyklus berücksichtigt, noch nicht gelungen. Zur Entwicklung einer ökonomischen und ökologischen Recyclinglösung für Kompositbauteile ist es von enormer Bedeutung die gesamte Recyclingkette von der Demontage über die Aufbereitung bis hin zur Bereitstellung von verarbeitungsfähigen Sekundärrohstoffen zu betrachten.

Ziel dieses beantragten Projekts ReKomp ist es daher, die einzelnen Prozessschritte der stofflichen Verwertung systematisch zu betrachten und Technologien und Verfahren zu entwickeln um das Werkstoffpotenzial von Kompositbauteilen, insbesondere der Fasern und Partikeln, in einem zweiten Lebenszyklus stofflich nutzen zu können. Schwerpunkte sind zum einen die Demontage von großformatigen Bauteilen wie Rotorblättern und zum anderen die materialspezifische Aufbereitung der Materialverbünde – Polymermatrix und disperses Faser oder Partikelsystem- mit dem Ziel einer Rückgewinnung von verwertbarem Material.

Die Aufgabenstellung im Bereich der Demontage ist die Entwicklung einer effizienten Demontagetechnik um Transportkosten zu senken und bereits an der Windkraftanlage das Material in verschiedene Stoffströme trennen zu können. Durch eine anschließende materialspezifische Aufbereitung der vorliegenden Fraktionen soll die Wirtschaftlichkeit und Effizienz des Verwertungsverfahrens gesteigert werden.

⁽¹⁾ Witten; Kraus; Kühnel; Composites-Marktbericht 2015, AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., September 2015



Der zweite wichtige Forschungsschwerpunkt in diesem Projekt ist daher die Rückgewinnung der hochwertigen Faserkomponenten. Diese müssen in einer Qualität recycelt werden, dass sie wieder in eine Produktion zurückgeführt werden können und am Markt eine Anwendung finden. Hier ist z.B. die Reinheit, die Faserlänge, die Agglomerationsneigung und -struktur von großer Bedeutung.

2. Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Werkstoffgruppe der faserverstärkten Verbundwerkstoffe (Komposite oder FVK) zeichnet sich durch die Kombination einer textilen Verstärkungsstruktur mit einem Matrixwerkstoff aus. Die bekanntesten Werkstoffe sind carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) mit Kohlenstofffasern (C-Fasern) und glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) mit Glasfasern, die in eine Matrix aus thermo- oder duroplastischem Kunststoffharz eingebettet werden.⁽²⁾ Einzeln betrachtet können die Fasern hohe Zugkräfte aufnehmen, aber aufgrund ihrer fehlenden Druck- und Biegebeanspruchung keine Bauteile darstellen. Sie geben der Matrix eine hohe Festigkeit und Steifigkeit. Kunststoffe ohne Fasern sind formbar aber aufgrund der duroplastischen Reaktionsharze teilweise spröde und in Form einer thermoplastischen Matrix oft flexibel.

Die Kombination von Fasern und Kunststoffmatrix besitzt viele Vorteile, wie zum Beispiel eine hohe Festigkeit und Steifigkeit bei geringer Dichte, Korrosion- und Medienbeständigkeit, Dauerfestigkeit, geringe Wärmeausdehnung, gute Dämpfungs- und Isolationseigenschaften, einstellbare Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften sowie ein stufenweises Versagen, Energieabsorption und eine verschleißarme Oberfläche der Bauteile. FVK's nehmen gegenüber konventionellen unverstärkten Kunststoffen oder Metallen eine besondere Stellung aufgrund des ausgezeichneten Leichtbaupotenzials ein. Der technologischen und ökonomischen Wettbewerbsfähigkeit von Kompositen stehen die hohen Kosten der Materialien und die erschwerte Recyclingfähigkeit gegenüber.⁽³⁾

⁽²⁾ Lässig, R., Eisenhut, M., Mathias, A., & et al. (2012). Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. München: Roland Berger Strategy Consulting, VDMA.

⁽³⁾ NEITZEL, Manfred; MITSCHANG, Peter; BREUER, Ulf: Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. 2. Auflage. München : Hanser Verlag, 2014



Der Einsatz von CFK und GFK als Leichtbaumaterial ist in den vergangenen Jahren stetig angestiegen. Neben dem wohl bekanntesten Industriezweig, der Automobilindustrie, hat auch der Ausbau der erneuerbaren Energien und hier im speziellen der Windenergie für eine verstärkte Produktion von GFK als auch CFK gesorgt. Die aerodynamisch gestalteten Rotorblätter sind die Schlüsselkomponente einer Windkraftanlage. Sie legen ihre Leistung fest und bestimmen durch die konstruktive Ausführung ihre Bauart. Die durchschnittliche Rotorblattlänge für an Land errichtete Anlagen beträgt 52 m.⁽⁴⁾ Betrachtet man die zu erwartenden Entsorgungsmengen an Rotorblattmaterial allein in Deutschland, wird durch Abbildung 2 deutlich, dass eine Entsorgung über die derzeit angewendeten Verfahren, Nutzung im Zementwerk und energetische Verwertung in Müllverbrennungsanlagen keine nachhaltigen Lösungen darstellen können.

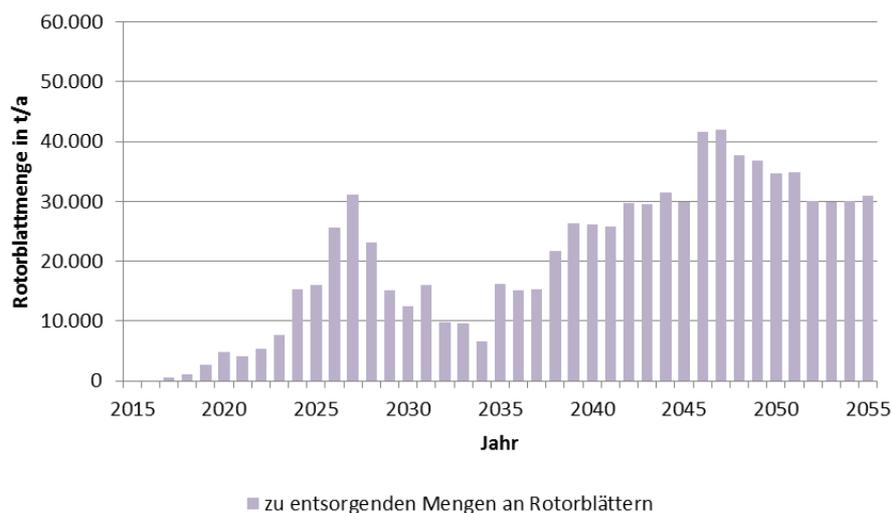


Abbildung 2: Prognostizierte zu entsorgende Rotorblattmenge in Deutschland

Bei keinem der derzeit angewendeten Entsorgungsverfahren findet eine Identifikation und Abtrennung von werthaltigen Materialbereichen, wie beispielsweise dem CFK, statt. Das Rotorblatt wird als Materialgemisch zerkleinert und dem jeweiligen Prozess zugeführt. Für ein effektives werkstoffliches Recycling von Kunststoffen und Fasern ist jedoch das Vorliegen von möglichst sortenreinen Abfällen notwendig. Ein erster wichtiger Prozessschritt in der Recyclingkette von Rotorblättern ist daher die

⁽⁴⁾ Lüers, S. et al., Status des Windenergiebaus an Land in Deutschland, D. Windguard, PublisherEditors. 2015.



Materialtrennung. Erschwert wird die Vorzerkleinerung durch den Schalenaufbau und die hybride Bauweise (vgl. Abbildung 3).

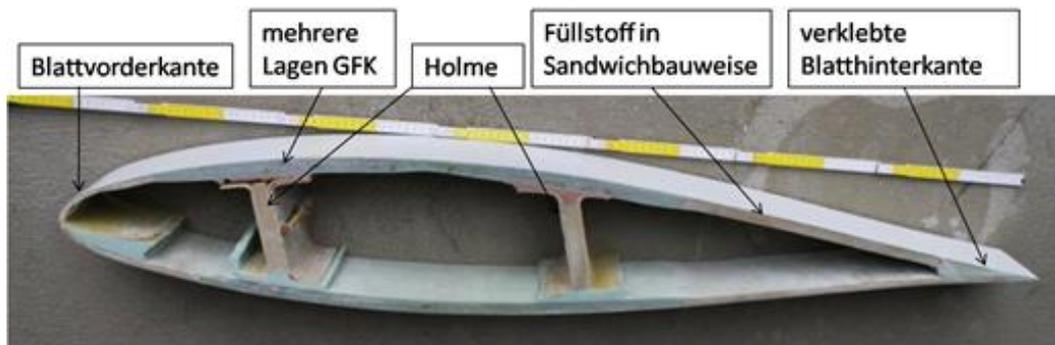


Abbildung 3: Aufbau Rotorblatt im Profil

Die Bearbeitung der Forschungsthemen Demontage und Aufbereitung von faserverstärkten Kunststoffen, erfolgte in Kooperation der TH Nürnberg und dem Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT). Die an der TH Nürnberg gegründete Fraunhofer-Forschungsgruppe "Partikeltechnologie, Rohstoffinnovationen und Ressourceneffizienz" beschäftigt sich im Themenfeld Partikeltechnologie, neben der Charakterisierung unter anderem mit Aufbereitungstechnologien für Primär- als Sekundärrohstoffe. Im Rahmen einer studentischen Arbeitsgruppe wurden im Vorfeld erste Versuche zur mechanischen und chemischen Trennung von Kompositbauteilen durchgeführt. Am ICT wurde das Thema „Recycling von Windkraftanlagen“ ganzheitlich im Rahmen einer studentischen Arbeit untersucht. Im Ergebnis wurde auf den Forschungsbedarf hinsichtlich des Trennens der einzelnen Stoffströme (mit und ohne Füllstoffe) sowie auf das Trennen von Faser und Matrixmaterial hingewiesen. Die Idee der energetischen Demontage entstand im Rahmen dieser Arbeiten.

Auf Grund der ersten Vorversuche der beiden Institutionen und der Forschungsarbeiten in dem Bereich des Rotorblattrecycling, erschien der Ansatz der energetischen Demontage in Kombination mit der Identifikation einer materialspezifischen Aufbereitungstechnik interessant und wurden im vorliegenden Projektbericht bearbeitet.



3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt „ReKomp“ startete am 01.März 2014 unter der Leitung von Prof. Dr. Ulrich Teipel von der Technische Hochschule Nürnberg. Weiterer Forschungspartner war das Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT) und als Industriepartner die Firma TREE WINDeNERGIE UG mit Herrn Michael Roth als Geschäftsführer.

Der Projektplan in Tabelle 1 beinhaltet sieben Arbeitspakete mit jeweiligen Teil-Arbeitspaketen, die in der Bearbeitung zwischen TH Nürnberg (blau), Fraunhofer ICT (grün) und TREE (gelb) aufgeteilt waren.

Tabelle 1: Zeit- und Arbeitsplan Projekt ReKomp

| Arbeitspakete | | 2014 | | | | 2015 | | | | 2016 | | | |
|---------------|--|------|-----|-----|-------|------|-----|-----|-------|------|-----|-----|-------|
| | | 3 | 4-6 | 7-9 | 10-12 | 1-3 | 4-6 | 7-9 | 10-12 | 1-3 | 4-6 | 7-9 | 10-12 |
| 1 | Recherche/ Literaturstudie | | | | | | | | | | | | |
| 1.1 | Demontagetechnologie | | | | | | | | | | | | |
| 1.2 | Aufbereitungstechnologie | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Marktrecherche | | | | | | | | | | | | |
| 2.1 | Demontagetechnologie | | | | | | | | | | | | |
| 2.2 | Aufbereitungstechnologie | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Demontage | | | | | | | | | | | | |
| 3.1 | Machbarkeitsstudie | | | | | | | | | | | | |
| 3.2 | Energetische Demontage | | | | | | | | | | | | |
| 4 | Faser/ Partikel Rückgewinnung | | | | | | | | | | | | |
| 4.1 | Vorzerkleinerung | | | | | | | | | | | | |
| 4.2 | Mechanische Trennung | | | | | | | | | | | | |
| 4.3 | Chemische Trennung | | | | | | | | | | | | |
| 4.4 | Thermische Trennung | | | | | | | | | | | | |
| 4.5 | Entwicklung Kombinationsverfahren | | | | | | | | | | | | |
| 5 | Charakterisierung der Fasern und Partikel | | | | | | | | | | | | |
| 5.1 | Eigenschaften des Recyclingmaterials | | | | | | | | | | | | |
| 5.2 | Bauteileigenschaften | | | | | | | | | | | | |
| 6 | Bilanzierung | | | | | | | | | | | | |
| 7 | Projektdokumentation | | | | | | | | | | | | |

Während der Projektlaufzeit wurden im halbjährlichen Rhythmus Arbeitstreffen im Konsortium durchgeführt, im Rahmen derer die Projektpartner ihren aktuellen Bearbeitungs- und Ergebnisstand vorstellten und diskutierten. Die Teilnahme vom



Industriepartner war dahingehen wichtig, dass die Forschungsarbeiten hinsichtlich einer industriellen Anwendbarkeit begutachtet wurden.

Im Rahmen von AP 1 „Recherche und Literaturstudie“ wurde bis Mitte 2014 von den Instituten zu dem jeweiligen Schwerpunkt eine ausführliche Literatur- und Patentrecherche durchgeführt. Dabei wurden alle Technologie und Verfahren betrachtet, die zurzeit die technologische Möglichkeit besitzen großvolumigen Bauteil zu zerlegen und aufzubereiten. Ergänzt wurde diese Recherche durch einen Überblick über die derzeit am Markt vorhandenen Technologien. Dazu wurde bis zum Ende des 3. Quartals 2014 in AP 2 neben der Recherche auch Fachgesprächen mit Firmen durchgeführt.

Mit dem 2. Quartal in 2014 begannen die Machbarkeitsversuche zur Demontage von Rotorblattmaterial durch das ICT in Kooperation mit TREE. Mit der Anfrage von Ökostrom Erzeugung Freiburg GmbH zur Übernahme von Rotorblättern einer abzubauenen Windkraftanlage im Schwarzwald, ergab sich für das Projekt die besondere Möglichkeit die bereits von der Firma TREE entwickelte Technologie des Seilsägens direkt vor Ort zu testen und reales Rotorblattmaterial für die Versuche zu erhalten. Die weiteren Versuche zur Demontage des Rotorblattmaterials und zur Vorzerkleinerung (AP 4.1) erfolgten bis Mitte 2015, auf dem Gelände von TREE und am Fraunhofer ICT. Eine ursprünglich geplante großtechnische Umsetzung der Demontage eines Rotorblattes mittels Explosivstoffen konnte nicht durchgeführt werden, da die daraus entstehenden Umweltauswirkungen nicht vollständig abschätzbar waren.

Die Arbeiten im Technikum zur Trennung von Faser/Partikeln von der Kunststoffmatrix starteten im zweiten Quartal von 2015 mit eigens hergestelltem Material, da die Zusammensetzung des Rotorblattmaterials nicht vollständig bekannt war. Zeitgleich erfolgte in AP 5 die Charakterisierung der zurückgewonnen Fraktionen und Bauteile (Platten), um die durchgeführten Aufbereitungsversuche zu optimieren.

Die untersuchten Verfahren wurden nach Abschluss der Versuche im letzten Quartal von 2016 anhand einer ökobilanziellen Untersuchung bewerte. Der Fokus dabei lag auf der ökologischen Betrachtung in Form des Treibhauspotenzials, da die Versuche auf Grund der unterschiedlichen Maßstäbe nur schwer ökonomisch miteinander vergleichbar sind.



4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

4.1. Rotorblätter von Windkraftanlagen

4.1.1. Aufbau und Materialien von Rotorblättern

Rotorblätter bestehen aus zwei Blattschalen, die durch Verklebung zu einem Hohlblatt zusammengefügt werden (siehe Abbildung 3, Seite 10). Technisch machbar ist auch die Herstellung des Hohlblattes in einem Stück, was jedoch den Einbau von Holmen und Stegen erschwert. Durch das starke Schwingungsverhalten der Rotorblätter ist das Rotorblatt so dimensioniert, dass alle Querkräfte aus der Biegung aufgenommen werden. Die geforderte Festigkeit und Steifigkeit im Bauteil kann durch den Einbau von Versteifungselementen (wie z.B. CFK Gurte) an definierten Bereichen im Blatt erreicht werden.

Grundsätzlich geeignete Materialien für den Rotorblattbau sind Metalle wie Stahl, Titan oder Aluminium, Holz oder FVK aus Glas-, Kohle- oder Aramidfaser. Während Hochlegierungsstähle und Titan für den Rotorblattbau zu teuer sind, kommt Aluminium aufgrund der aufwendigen Fertigungstechnik und den damit einhergehenden hohen Fertigungskosten bisher nur bei kleinen Rotorblättern (Anlagen bis $P=200$ kW) zum Einsatz. Stahl ist vergleichsweise billig, kommt aber aufgrund des hohen Gewichts, der schwierigen Verarbeitung hinsichtlich Schweißqualität und Verformbarkeit sowie Korrosionsproblemen bei heutigen WKA-Rotorblätter nur noch in wenigen Teilbereichen vor. Durch oftmals auftretende Fäulnis ist der alleinige Einsatz von Holz problematisch. Der damit einhergehende Pflegeaufwand hat dazu geführt, dass Rotorblätter in traditioneller Holzbauweise nicht mehr gebaut werden.⁽⁵⁾

Die Verwendung von FVK in Rotorblätter führte zu einer Weiterentwicklung des Rotorblattbaus. FVK bestehen aus Fasern, die in einem Kunststoff eingebettet sind. Die Fasern bilden das Stützgerüst des Faserverbundes und nehmen den größten Teil der auf den Verbund lastenden Kräfte auf. Die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des Verbundes werden von Faserart, Faserlänge, Faserorientierung und Faservolumengehalt beeinflusst. Kunstharz, in das die Fasern eingelassen sind, sorgt für

⁽⁵⁾ Hau, E., Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit, 2015.



die geometrische Stabilität des Verbundes. Das Harz überträgt die Kräfte auf die einzelnen Fasern und schützt die Fasern gleichzeitig vor Umwelteinflüssen.⁽⁶⁾ Aufgrund ihrer geringen spezifischen Dichte bei gleichzeitig hohen Festigkeiten werden FVK häufig im Leichtbaubereich eingesetzt und haben sich in modernen WKA als Standardwerkstoff etabliert.⁽⁷⁾ FVK zeichnen sich gegenüber herkömmlichen Materialien durch eine vergleichsweise kostengünstige Fertigung und trotz ihres geringeren Gewichts durch sehr gute Festigkeitseigenschaften aus. Zum Einsatz kommen insbesondere Glasfaserverbunde und immer häufiger auch eine Mischbauweise aus GFK und CFK. Auf Grund der besseren Verarbeitung und Eigenschaften werden hauptsächlich duroplastische ungesättigte Polyester-Harze (UP) und Epoxid-Harze (EP) eingesetzt. Welche wiederum die Recyclingfähigkeit erschweren, da sie stark vernetzt und nicht wiedereinschmelzbar sind wie thermoplastische Harze. Als Standardherstellungsverfahren hat das kostengünstigere Vakuuminfusionsverfahren etabliert, da über dieses neben dem teuren Prepreg-Verfahren die höchsten Faservolumenanteile von 40-60 % erreicht werden können.⁽⁵⁾

FVK stellen in heutigen Onshore-Anlagen ca. 2-3 Ma.% des Gesamtgewichts. In Rotorblätter stellen FVK etwa zwei Drittel der Rotorblattmasse. Für ein Rotorblatt mit L=40 m wird ein Gewicht von etwa $m=8,4$ Mg geschätzt.⁽⁸⁾ Neben dem Einsatz in Rotorblättern werden FVK oftmals auch in Gondeln von WKA verbaut.

4.1.2. Demontage von Rotorblättern

Um eine erforderliche Transportgenehmigung für den Transport von Altrotorblättern zu umgehen, kann das Rotorblatt vor Ort auf containergroße Stücke grobzerkleinert werden. Da die Glasfaser- und Harzstäube nicht vollständig unterbunden werden können, ist bei der Zerkleinerung besonders hinsichtlich des Gesundheits- und

⁽⁶⁾ Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, Handbuch Faserverbundkunststoffe / Composites, in Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. 2014. S. 596.

⁽⁷⁾ Witten Elmar, Handbuch Faserverbundkunststoffe / Composites, in Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. 2013.

⁽⁸⁾ Papadakis, N. et al., Designing composite wind turbine blades for disposal, recycling or reuse in Management, recycling and reuse of waste composites, Woodhead Publishing Materials. Editor^Editors. 2010, Woodhead Publishing Materials. S. 243- 257.



Arbeitsschutzes auf eine Emissionsbindung (z.B. durch Wasserdampf) zu achten. Mögliche Verfahren zur Zerlegung sind das Wasserstrahlschneiden, das Diamantseilsägen oder das hydraulische Scheren. Bei den mechanisch bearbeitenden Verfahren wie Sägen oder Schneiden verursacht jedoch das hochabrasive Material einen hohen Verschleiß an den Werkzeugen.^{(9),(10)}

Das Verfahren der energetischen Demontage ist aus dem klassischen Abbruchverfahren adaptiert. Beim Abbruch hoher Bauwerke ist die Sprengtechnik unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten eine geeignete Methode. Der Abbruchvorgang wird auf einen Augenblick konzentriert und somit die Auswirkungen auf die Umgebung stark verkürzt und gut kontrollierbar.⁽¹¹⁾ Der Einsatz von Schneidladungen im Abbruch wird bevorzugt wenn der Einsatz von Maschinen unmöglich ist und/oder eine Gefährdung von Menschen durch die Trenntätigkeit besteht. Überwiegend werden Explosivstoffe wie Schneidladungen zum sprengtechnischen Abbruch von Stahlkonstruktionen oder Stahlbetonkonstruktionen eingesetzt, der Vorteil besteht in der klar definierten Schneidleistung und der exakten Schnittführung.

Die Möglichkeit der Demontage mittels Explosivstoffen wurde am Fraunhofer ICT bereits an Waschmaschinen untersucht. Daraus entstand eine Gebrauchsmusterschrift (DE29780438U1) zur Zerlegung von technischen Objekten mittels integrierten Konstruktionselementen mit Explosivstoffen.

4.1.3. Entsorgungswege für Rotorblattmaterial

Mit dem Erlass der EU-Deponierichtlinie (EU1999/31/EC), die durch die Abfallablagereungsverordnung (AbfAbIV) und die Deponieverordnung (DepV) in nationales Recht umgesetzt wurde, dürfen in Deutschland nach dem Ablauf der Übergangsvorschrift der technischen Anleitung für Siedlungsabfälle (TaSi) seit Mitte 2005 nur noch biologisch stabilisierte und organikarme Abfälle deponiert werden. Der

⁽⁹⁾ Albers, H., Recycling of Wind Turbine Rotor Blades - Fact or Fiction?, 2009. 34: S. 32-41.

⁽¹⁰⁾ Recwis. [Datum des Abrufs: 04.05.2016; Verfügbar auf: www.recwis.de.

⁽¹¹⁾ Deutscher Abbruchverband e.V.: Titel: Imagebroschüre 2013, <http://www.deutscher-abbruchverband.de/index.php?page=imagebroschure-da>. [Datum des Abrufs: 16.09.2014];



maximal zulässige Glühverlust liegt bei 5%.⁽¹²⁾ Rotorblätter bestehen aufgrund verwendeter Harze, Füller und Sandwich-Materialien zu ca. 30 Ma.% aus organischen Anteilen und überschreiten den zulässigen Grenzwert für die Ablagerung deutlich. Daher unterliegen Rotorblättern dem Deponierungsverbot.

Die energetische Verwertung von Rotorblättern in Form einer Mitverbrennung in einer MVA stellt eine häufig genutzte Verwertungsrouten dar.⁽¹³⁾ Das in Rotorblättern enthaltene GFK besitzt je nach Faseranteil einen Heizwert zwischen 12-16 MJ/kg und erreichen damit den geforderten Heizwert zur Beseitigung von 11 MJ/kg.⁽¹⁴⁾ Durch den hohen anorganischen Anteil der im Rotorblatt enthaltenen Fasern und Füllstoffe bleiben ca. 50-70 Ma.% des GFK als Verbrennungsrückstand zurück.⁽¹⁵⁾ Diese kann bei Einhaltung der zulässigen Grenzwerte als Ersatzstoff in Baumaterialien eingesetzt werden oder muss bei Überschreitung der zulässigen Grenzwerte nach Mitteilung 20 der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) deponiert werden. Problematisch kann die rauchgasseitige Ansammlung von kleinsten Glasfaserpartikeln sein, die zur Schädigung von MVA-Anlagenteilen führen kann.⁽¹⁶⁾ Weiterhin können die in Rotorblättern verwendeten Kernwerkstoffe wie PVC-Schäume durch das enthaltene Chlor zur Korrosion im Kessel führen.⁽⁹⁾

Um die Schlackedeponierung zu vermeiden, stellt die Mitverbrennung der Rotorblätter in Zementbrennöfen eine alternative Möglichkeit der energetischen Nutzung dar. Neben der Energierückgewinnung werden die zurückbleibenden Glasfasern und anorganische Füllstoffe bei der Zementherstellung zugemischt, wodurch Zuschlagstoffe wie Sand eingespart werden können. Dieses Kombinationsverfahren mit dem Namen Compocycle wurde vom Baustoffhersteller Holcim Technology Ltd. entwickelt und wurde in Kooperation mit den Unternehmen Zajons Zerkleinerungstechnik und Fiberline Composites A/S bis zur Insolvenz im Jahr 2016 betrieben.⁽¹⁴⁾ Seither wird dieser

⁽¹²⁾ Bundesministerium der Justiz und Verbraucherschutz, Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (AbfAbIV). 2001.

⁽¹³⁾ Conroy, A. et al., Composite recycling in the construction industry, 2006. 37(8): S. 1216-1222.

⁽¹⁴⁾ Schmidl, E., Hinrichs, S., Verfahren zur Entsorgung von glasfaserverstärkten Bauteilen. 2010.

⁽¹⁵⁾ Job, S., Recycling glass fibre reinforced composites – history and progress, 2013. 57(5): S. 19-23.

⁽¹⁶⁾ Larsen, K., Recycling wind turbine blades, 2009. 9(7): S. 70-73.



Verfahrensweg von der Firma Neocomp angeboten.⁽¹⁷⁾ Um die für das Zementwerk geforderte Stücklänge von $L < 50$ mm einzuhalten, werden die demontierten Rotorblattstücke durch einen Einwellenzerkleinerer grob- und mit einem Querstromzerspanner feinzerkleinert. Vor der thermischen Behandlung wird eine Metallabscheidung und Durchmischung mit einem feuchten Abfallstrom durchgeführt.⁽¹⁸⁾ Die europäische Verbundindustrie hält die GFK-Mitverbrennung in Zementwerken für die nachhaltigste Methode bei der GFK-Verwertung.⁽¹⁹⁾

Mit dem Material- oder Produktrecycling werden zwei Ausprägungen des stofflichen Recyclings unterschieden. Beim Produktrecycling können Altrotorblätter beispielsweise als Elemente in einem Spielplatz, Sitzmöglichkeiten oder als Stützpfeiler für Dachkonstruktionen verwendet werden.⁽²⁰⁾ Beim Materialrecycling werden die verwendeten Materialien, mit oder ohne Aufbereitung, in einen neuen Produktionsprozess überführt. Die eingesetzten Wertstoffe werden als Rezyklate rückgewonnen. Da FVK in Rotorblättern den größten Massenanteil stellen, handelt es sich beim Materialrecycling von Rotorblättern im weiteren Sinne um ein FVK-Recycling.

4.2. Recycling von faserverstärkten Kunststoffen

Für das Materialrecycling von carbon- und glasfaserverstärkten Kunststoffen gibt es verschiedene Lösungsansätze, die stetig weiterentwickelt werden. Nur wenige Recyclingverfahren werden derzeit im Industriemaßstab betrieben. Dies liegt neben technologischen Schwierigkeiten insbesondere an fehlenden Märkten für Rezyklate. Ein weiterer Grund ist, dass in vielen Ländern noch eine Deponierung von FVK-Abfällen erlaubt ist, die dem teureren Recycling vorgezogen wird.⁽²¹⁾ Grundsätzlich lässt sich das

⁽¹⁷⁾ Wilcken, H.D., Kroll, F.J. Neocomp. 2016 [Datum des Abrufs: 10.03.2016; Verfügbar auf: www.neocomp.eu.

⁽¹⁸⁾ Bilderfest, X:enius - Recycling: gibt es die perfekte Verwertung? 2015: Deutschland.

⁽¹⁹⁾ EuCIA et al. Position Paper. Glass fibre reinforced thermosets: recyclable and compliant with the EU legislation. [Datum des Abrufs: 03.05.2016.

⁽²⁰⁾ Notechmagazine. Verfügbar auf: <http://www.notechmagazine.com/2015/02/a-world-made-of-rotor-blades.html>, [Datum des Abrufs: 04.05.2016]

⁽²¹⁾ Oliveux, G. et al., Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties, 2015. 72: S. 61-99.



Materialrecycling laut Abbildung 4 in das mechanische, thermische und chemische Recycling einteilen. Neuere Verfahren, welche vor allem im Zuge des CFK Recyclings entwickelt werden sind z.B. die Elektrodynamische Fragmentierung, biologische Zersetzungsverfahren oder Elektrochemische Methoden. Diese Methoden wurden bei der Recherche mit berücksichtigt, da der Fokus jedoch auf GFK liegt, wird an dieser Stelle nicht genauer darauf eingegangen.

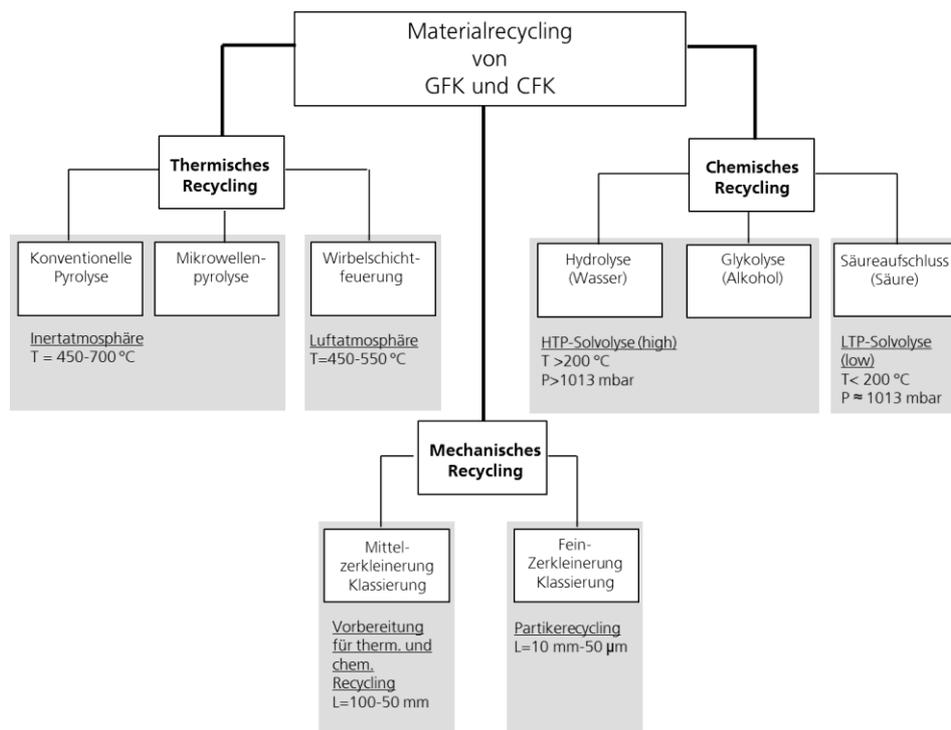


Abbildung 4: Verfahren zum Materialrecycling von Faserverbundkunststoffen ^{(21),(22)}

4.2.1. Thermische Recyclingverfahren

Beim thermischen Recycling von FVK werden hohe Temperaturen zur thermischen Zersetzung der organischen Komponenten genutzt, um die Fasern von Harz und Füllstoffen zu trennen. Die Qualität der weitgehend freigelegten Fasern und der Grad der Depolymerisation des Harzes hängt von der Verweilzeit des Materials und Temperatur im Reaktor ab.⁽²³⁾ Mit steigender Temperatur nimmt die Qualität der Fasern

⁽²²⁾ Pimenta, S.,Pinho, S.T., Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook, 2011. 31(2): S. 378-392.

⁽²³⁾ Pickering, S., Recycling technologies for thermoset composite materials - current status, 2006. 37: S. 10.



durch Oberflächenschädigung ab. Je nach Verfahren kann das Harz als Ersatzbrennstoff oder zur Erzeugung von Wärmeenergie genutzt werden. Das zu verwertende Material muss bereits zerkleinert vorliegen. Mit der Pyrolyse, der Mikrowellenpyrolyse und der Wirbelschicht-Verbrennung werden drei wesentliche thermische Verfahren für das GFK- und CFK-Recycling unterschieden.⁽²¹⁾

4.2.2. Chemische Recyclingverfahren

Beim chemischen Recycling mit reaktivem Lösemittel (Solvolyse) werden organische Komponenten in kurzkettige Bruchstücke zersetzt. Während die Fasern als anorganische Komponenten verbleiben, wird das organische Harz als Flüssigkeit zu Monomeren oder Petrochemikalien aufgelöst. Es besteht die Möglichkeit, das Harz durch Aufbereitung dieser Flüssigkeit zurückzugewinnen, stellt aber technisch eine Herausforderung dar.⁽²⁴⁾ Der hauptsächliche Vorteil der Solvolyse ist, dass im Gegensatz zum thermischen Recycling die Fasern geringeren Temperaturen von $T < 450\text{ °C}$ ausgesetzt sind. Die Zugfestigkeit und der E-Modul der freigelegten Glas- oder Carbonfasern bleiben somit weitgehend erhalten⁽²⁵⁾, sofern keine starken Lösungsmittel verwendet werden⁽²⁶⁾. Die Fasern weisen durch die chemische Behandlung in nachfolgenden Verwertungsprozessen eine geringere Haftung zum Harz auf, da die Schlichte (Auftrag auf der Faser zur Verbesserung der Haftung) meist mit abgetragen wird²². Ein Nachteil der Solvolyse ist, dass das Material vor der chemischen Behandlung zur Vergrößerung der spezifischen Oberfläche und zur Anpassung an die Reaktorgröße zerkleinert werden muss.⁽²²⁾ Bei der Solvolyse können je nach eingesetztem Lösemittel umweltschädigende Abfallchemikalien entstehen. Zudem steigen die Kosten für die notwendigen Apparaturen bei der Solvolyse mit Fluiden im unter- und überkritischen Bereich mit steigendem Temperaturen von $T > 200\text{ °C}$.⁽²¹⁾ Aufgrund verschiedener Lösungsmittel, Temperaturen, Drücken und Katalysatoren gibt es bei der Solvolyse eine

⁽²⁴⁾ Piñero-Hernanz, R. et al., Chemical recycling of carbon fibre composites using alcohols under subcritical and supercritical conditions, 2008. 46(1): S. 83-92.

⁽²⁵⁾ Piñero-Hernanz, R. et al., Composites Part A: Chemical recycling of carbon fibre reinforced composites in nearcritical and supercritical water, 2008. 39(3): S. 454-461.

⁽²⁶⁾ Oliveux, G. et al., Chemical recycling of glass fibre reinforced composites using subcritical water, 2012. 43(11): S. 1809-1818.



breite Verfahrensvielfalt. Generell kann die Solvolyse in die LTP-Solvolyse (low temperature and pressure) und die HTP-Solvolyse (high temperature and pressure) unterschieden werden.

LTP-Solvolyse

Die LTP-Solvolyse wird bei geringen Temperaturen von $T < 200 \text{ °C}$ und atmosphärischem Druck durchgeführt. Als Lösungsmittel kommen hauptsächlich Säuren zur Anwendung. Aufgrund der geringen Temperatur kann der Reaktionsprozess besser gesteuert werden, macht aber den Einsatz von Katalysatoren und ein Rühren notwendig. Die Reaktionsrate ist im Vergleich zur Solvolyse bei höheren Temperaturen und Drücken geringer.²⁷ Aufgrund ihrer Toxizität werden die Handhabung sowie die Entsorgung der Säuren als problematisch angesehen.

HTP-Solvolyse

Beim chemischen Recycling von GFK und CFK bei höheren Temperaturen von $T > 200 \text{ °C}$ und Drücken von $p > 1013 \text{ bar}$ handelt es sich um die HTP-Solvolyse.²⁷ Die HTP-Solvolyse kann weiterhin in subkritischen ($T < 350 \text{ °C}$) und überkritischen ($T > 350 \text{ °C}$) Bedingungen durchgeführt werden. Insbesondere superkritische Fluide gelten als vielversprechend. Als Lösungsmittel werden überwiegend Wasser und seltener Alkohole eingesetzt.²⁸ Um den Löseprozess- und -grad zu beschleunigen, kommen oftmals alkalische Katalysatoren wie NaOH und KOH zum Einsatz. Weiterhin kann die Prozesstemperatur durch den Einsatz von Katalysatoren gesenkt werden. Durch die Verwendung von Katalysatoren können Fasern jedoch geschädigt werden.^{25, 26}

4.2.3. Mechanische Recyclingverfahren

Beim mechanischen Recycling von GFK und CFK werden die Verbunde auf eine bestimmte Partikelgröße zerkleinert und anschließend klassiert. Nach einer Vorzerkleinerung in händelbare Stücke erfolgt durch langsam laufende Schneidmühlen oder Brecher eine Mittelzerkleinerung auf $d = 100\text{-}50 \text{ mm}$. Je nach Rezyklatanforderung wird im zweiten Schritt mithilfe einer Hammermühle oder Mühlen mit

²⁷ Dang, W. et al., Chemical recycling of glass fiber reinforced epoxy resin cured with amine using nitric acid, 2005. 46: S. 1905-1912.

²⁸ Tagaya, H. et al., Decomposition reactions of epoxy resin and polyetheretherketone resin in sub- and supercritical water, 2006. 6: S. 1-5



Prallbeanspruchung eine Feinzerkleinerung auf $d=10\text{ mm}-50\text{ }\mu\text{m}$ durchgeführt.^{(15), (23)} Die Abtrennung der groben faserreichen und feinen harzreichen Fraktion erfolgt durch Zyklone oder Siebe. Nach der Klassierung verbleibt in der Grobfraktion ein großer Massenanteil, in dem teilweise noch unaufgeschlossene CFK- oder GFK-Stücke und unterschiedlich lange harzbehafteten Fasern enthalten sind. Die feinere Fraktion besteht aus Füllstoffen, kurzen, vereinzelt und harzbehafteten Fasern sowie Harz-Pulver. Standardmäßig werden CFK und GFK von derzeit im mechanischen Recycling aktiven Unternehmen feinvermahlen und als Füllersatzstoff eingesetzt.⁽²³⁾ In diesem Zuge wird auch vom sog. Partikelrecycling gesprochen.⁽²⁹⁾

Ein großer Vorteil des mechanischen Recyclings ist die im Vergleich zur Solvolyse und Pyrolyse einfache Technologie, die keine teuren Apparaturen notwendig macht. Weiterhin vorteilhaft ist, dass während der Aufbereitung keine umweltbelastenden Chemikalien oder Gasemissionen in hohem Maße entstehen. Ein Nachteil ist, dass es durch die physikalische Beanspruchung durch im Harz enthaltene Beschleuniger oder nicht vollständig abreagierte Kunststoffkomponenten zur Brandgefahr und bei der Zerkleinerung von CFK zur Explosionsgefahr kommen kann.^{(30), (23)} Weiterhin kommt es durch die starke Kürzung der Faserlänge zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften im neuen Bauteil. Beispielsweise beschreibt Palmer, dass sich durch den Einsatz von SMC-Rezyklat im neuen Bauteil die Zug- und Schlagfestigkeit sowie das Biegemodul um 30 % verschlechtert.⁽³³⁾

Das mechanische Recycling von FVK gibt es bereits seit Anfang 1990. Es wird aufgrund des geringeren Materialwertes hauptsächlich beim GFK-Recycling praktiziert. Großtechnisch wurde das GFK-Recycling in Deutschland von der Firma ERCOM betrieben, diese musste jedoch wegen Insolvenz schließen.⁽²¹⁾

5. Gesamtproblematik

Wie im Stand der Technik bereits beschrieben ist die bislang einzig serienreife Technologie zur Grobzerkleinerung von Rotorblättern vor Ort die diamantbesetzte

⁽²⁹⁾ Elsner, P. et al., Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen 8. Series Titel, ed. Series Springer Vol. Band. 2012: H

⁽³⁰⁾ Palmer, J. et al., Successful closed-loop recycling of thermoset composites, 2009. 40(4): S. 490-498.



Seilsäge. Angeboten wird dieses Verfahren zum einen durch den Industriepartnes TREE und der Firma NeoComp (ehemals Compocycle). Bei diesem Vorgehen findet keine Separation von werthaltigen Materialien statt, es dient lediglich zur Bereitstellung von transportfähigen Stücken, um die Kosten für einen genehmigungspflichtigen Transport einzusparen. Im Projekt ReKomp wurden die Eignung der Sägetechnologie und der energetische Demontage für eine Fraktionierung der Rotorblätter vor Ort untersucht.

Im Bereich der weiteren Aufbereitung von Rotorblattmaterialien war der bisherige Ansatz eine mechanische Zerkleinerung und energetisch/ stoffliche Verwertung im Zementwerk. Eine Rückgewinnung einzelner Fraktion zur stofflichen Verwertung in neuen Kunststoffbauteilen wird mit Rotorblattmaterial derzeit nicht praktiziert.

Deutlich erkennbar ist anhand des Stand der Wissenschaft und Technik, dass aufgrund der vielfältigen Materialienkomponenten und Ausführungen ein universelles Verwertungsverfahren keine nachhaltige Lösung darstellt. Mit dem systematischen Ansatz des Projektes wird eine materialspezifische Aufbereitung genauer untersucht.

6. Material und wissenschaftliche/technische Methoden

Im Rahmen des Projektes wurde am Fraunhofer ICT die Demontage von Rotorblattmaterial mittels Explosivstoffen und beim Projektpartner TREE Windenergie mittels Seilsägetechnologie untersucht. Die Versuche zur Aufbereitung von faserverstärkten Material und Rotorblattmaterial fanden an der TH Nürnberg statt.

6.1. Demontage

Wie bereits im Projektverlauf erläutert, war es möglich Rotorblätter von einer zu demontierenden Windkraftanlage aus dem Schwarzwald zu beziehen (Abbildung 5). Besonders bei den Demontageversuchen war es wichtig, diese an repräsentativem Material durchzuführen, daher wurden die drei zur Verfügung stehenden Rotorblätter vom Projektpartner TREE in genehmigungsfreie Längen geschnitten und abtransportiert (Abbildung 6).



Abbildung 5: von der Windkraftanlage demontierter Rotorblattkranz auf dem Weissmoos, Schwarzwald



Abbildung 6: geteiltes Rotorblatt für genehmigungsfreien Abtransport

Als Materialmuster wurden exemplarische Segmente aus demontierten Rotorblatteilen konventionell herausgetrennt und für die Sprengversuche bereitgestellt. Hierfür wurden vier charakteristische Bereiche ausgewählt (Abbildung 7), die den auftretenden Materialmix bezüglich Materialstärke sowie Art und Anteil des Füllmaterials abdecken. Proben mit gleichartigem Kern wurden mit möglichst gleicher Dicke ausgewählt.

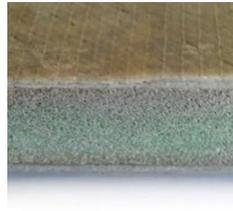
GFK - G



Holz - H



Schaum - S



CFK - C

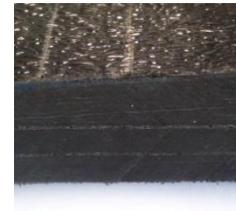


Abbildung 7: ausgewählte Materialbereiche eines Rotorblattes für die energetische Demontage

Neben Versuchen zur generellen Machbarkeit der Demontage von faserverstärkten Kunststoffen mittels Explosivstoffen (Sprengschnüren und Schneidladungen) wurde die erforderliche Ladungsstärke für die unterschiedlichen Materialbereiche und -dicken bestimmt. Für die Untersuchung und Dokumentation der Wirkung aufgelegter Sprengschnurkonfigurationen auf unterschiedliche Materialproben wurde auf eine vorhandene Sprengschnur zurückgegriffen.

Mit dieser Sprengschnur wurden drei sprengtechnisch übliche Trennkonfigurationen untersucht, die sich in der Leistung unterscheiden durch einfache, doppelte und dreifache Anordnung (Variante I) (vgl. Abbildung 8).



Abbildung 8: Auf dem Versuchstisch im Sprengbunker positioniertes Prüfsegment (Variante I)

Da alle untersuchten Konfigurationen mit der Sprengschnur praktisch keine oder nur geringe Richtwirkung aufweisen und so der größte Teil der Sprengleistung in den freien Raum oberhalb des Prüfsegments wirkt, gelangt die Leistung damit ungenutzt in die Umgebung. Für höhere Trennleistungen ist eine Richtwirkung wünschenswert, speziell mit verbesserter Trennleistung „in der Tiefe“ um das Laminat auf der Plattenunterseite ebenfalls sicher zu trennen ohne den Sprengstoffeinsatz, wie in Variante II, überproportional erhöhen zu müssen. Für eine Optimierung des Sprengmitteleinsatzes durch eine gerichtete Wirkung der Ladung, werden Sprengmittel bezeichnet als Schneidladungen eingesetzt.

Schneidladungen, auch lineare Hohlladung genannt, werden vor allem beim Gebäudeabriss zur Durchtrennung von Stahlträgern verwendet. Sie sind plastische, kunststoffgebundene Sprengstoffe mit einer Kupferummantelung und spezieller Geometrie (Abbildung 9). Das Kupfer kann massiv oder als plastifiziertes Pulver vorliegen. Die Schneidladungen mit Kupferpulver weisen ein reduziertes Risiko der Splitterbildung auf, weshalb sie gerade in Siedlungsnähe einfacher zu handhaben sind. Schneidladungen stellen stets ein „V“ dar, dessen Öffnung auf das zu trennende Objekt zeigt.

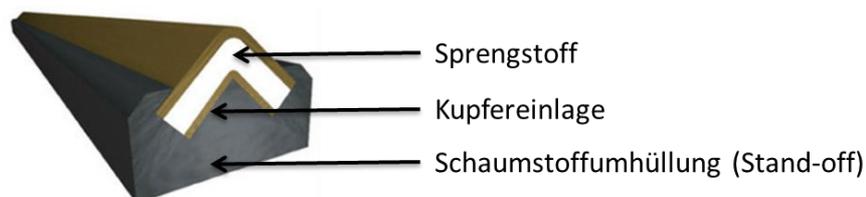


Abbildung 9: Beispiel einer Schneidladung mit Kupferliner aus plastifiziertem Kupferpulver und Stand-Off mit einer Polyethylen Schicht



Aus dieser Geometrie bildet sich durch die unterschiedliche Partikelbeschleunigung bei der Detonation des Sprengstoffes ein Metallvorhang welcher das Objekt trennt.

Für die Versuche wurden Schneidladungen zum Schneiden von Metallen aller Art mit dem Handelsnamen Semtex Razor der Firma Explosia verwendet. Die Schneidladungen wurden, wie in Abbildung 10 zu sehen ist, mit doppelseitigem Klebeband auf die Probe geklebt. Der schwarze Teil ist ein flexibler Schaum und dient als Abstandhalter, ist für die Wirkungsentfaltung der Schneidladung nötig und ermöglicht eine Anbringung auf gekrümmten Oberflächen. Die Schneidladung ist flexibel und kann mit einer Schneide auf die benötigte Länge zugeschnitten werden.



Abbildung 10: Aufgebrachte Schneidladung (Belegungsdichte 140g/m) auf einer GFK Probe

6.2. Mechanische Aufbereitung

Die Verwendung von originalem Rotorblattmaterial ist für systematische Untersuchungen nicht geeignet, da die Materialzusammensetzung nicht eindeutig bekannt ist und die Materialdicke stark schwankt. Um die Einflüsse des Recyclingprozesses zu bestimmen, wurden daher 2,3 mm-dicke Platten aus Epoxidharz und Glasfasergewebe mit möglichst definierten Faservolumengehalten zwischen 10–60 % hergestellt.

6.2.1. Zerkleinerung

Der glasfaserverstärkte duroplastische Kunststoff zeichnet sich durch sprödes Stoffverhalten mit mittelharter Festigkeit aus. Das ausgehärtete Harz als Einzelkomponente ist mittelhart und spröde. Die Fasern hingegen weisen ein elastisch-viskoses Verformungsverhalten auf. Besonders diese unterschiedlichen Stoffeigenschaften von Harz und Fasern können bei der Zerkleinerung ausgenutzt werden. Während die elastischen Fasern eine wesentlich geringere Zerkleinerung erfahren, wird das spröde Harz wirkungsvoller zerkleinert. Grundsätzlich geeignete



Beanspruchungsarten für die Zerkleinerung von GFK sind Druck Prall, Schlag und Schneiden und damit folgenden Aggregate für den Aufschluss möglich:

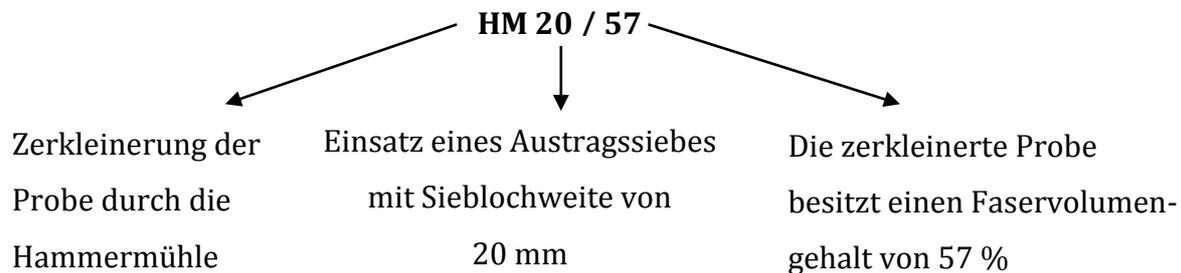
- Backenbrecher: Druck
- Hammermühle (HM): Prall
- Schneidmühle (SM): Schneiden
- Kugelmühle: Prall
- Einwellenzerkleinerer: Schneiden, Reißen, überwiegend Scheren

Nach dem Stand der Technik wurden bereits Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von GFK mit Hammer- und Schneidmühle durchgeführt. Auf dieser Grundlage wurden für die Zerkleinerungsversuche eine Schneidmühle (SM) sowie eine Pendelschlägermühle (HM) ausgewählt. Die technischen Daten zu den verwendeten Zerkleinerungsaggregaten sind in Tabelle 2 abgebildet. Bei der Zerkleinerung wurden je nach Versuchsreihe unterschiedliche Beanspruchungsarten, Faservolumenanteile und Austragsiebe verwendet sowie die Kühlung mit Stickstoff untersucht. Durch die abschließende Zerkleinerung von Rotorblattmaterial wurde die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den im Labor hergestellten Platten und industriellen Bauteilen untersucht.

Tabelle 2: Technische Daten der verwendeten Zerkleinerungsaggregate

| Aggregat | Typ | Technische Daten | Hersteller |
|---------------------|----------------------------------|---|-----------------------|
| Schneidmühle | Rotoplex Schneidmühle 20/12Ro | $P_N=4$ kW $n=1500$ U/min | Hosokawa Alpine AG |
| Pendelschlägermühle | Mehrzweckmühle 25 MZ | $P_N=2,2$ kW $n=0-3000$ U/min (regelbar) | |

Bei der Zerkleinerung wurden je nach Versuchsreihe unterschiedliche Faservolumenanteile und Austragsiebe verwendet. Die bei den Zerkleinerungsversuchen verwendete Probenbezeichnung ist folgend am Beispiel der Probe HM20/57 dargestellt.



6.2.2. Klassierung

Nach der Zerkleinerung wurden die Proben klassiert. Ziel der Klassierung war die Generierung von Daten für die Korngrößenverteilung und die Erzeugung von unterschiedlichen Fraktionen für die spätere Analyse. Faserhaltige Gemische können grundsätzlich durch Strömungs- oder Siebklassierung separiert werden.

6.3. Chemische Aufbereitung

Da den chemischen Verfahren oft eine Selektivität unterstellt wird und es daher die Anwendbarkeit eingrenzt, wurden die Versuche mit dem eigens hergestellten Plattenmaterial und als Referenz mit Rotorblattmaterial durchgeführt, um Unterschiede in der Lösemittelwirkung festzustellen.

Die Versuche wurden mit einem Glycol-basierten Lösemittel (LM) und NaOH als Katalysator durchgeführt. Neben der NaOH-Konzentration werden Temperatur und Reaktionszeit, sowie das Massenverhältnis von LM zu Probe variiert. Als LM wurden Polyethylenglycol (PEG 400, PEG 200), Diethylenglycol (DEG) und Triethylenglycol (TEG) ausgewählt, um den Einfluss der Kettenlänge des LM beurteilen zu können. Die Versuche wurden mit Material in einem Stück als auch mit zerkleinertem Material durchgeführt.

6.4. Thermische Aufbereitung

Eine thermische Aufbereitung von glasfaserverstärktem Material wurde auf Grund des Standes der Technik und Wissenschaft nicht durchgeführt. Die bestehenden Untersuchungen zeigen, dass eine Abtrennung des Harzes technisch möglich, jedoch nicht wirtschaftlich ist. Die energetische Verwertung von Rotorblattmaterial in Zementwerken ist bereits Stand der Technik. Durch thermogravimetrische Bestimmungen der einzelnen Fraktion nach der Demontage und Aufbereitung wurden



die unterschiedlichen Anteile an organischem Material und damit der Eignung zur energetischen Verwertung bestimmt.

6.5. Analysemethoden

Die mechanisch aufbereiteten Proben wurden nach der Klassierung geteilt und hinsichtlich der Partikellänge und des Glührückstandes (entspricht dem Harzanteils) analysiert. Die Rückstände aus den chemischen Versuchen wurden mittels Glührückstandsmessung und Rasterelektrodenmikroskop-Aufnahmen bewertet.

6.6. Ökobilanzielle Betrachtung

In der ökobilanziellen Bewertung wurden drei Alternativen für das Recycling von Rotorblättern aus Windkraftanlagen hinsichtlich ihres ökologischen Fußabdrucks mit Hilfe der Methodik der Ökobilanz nach DIN ISO 14040/44 bewertet.

6.6.1. Ziel- und Untersuchungsrahmen

Das Produktsystem umfasst mit den Szenarien „Worst-Case“, „Stand der Technik“, „ForCycle“ und „Best-Case“ vier verschiedene Entsorgungsalternativen für die zu recycelnden Rotorblattfraktionen eines repräsentativen Rotorblattes. Die Herstellung des eigentlichen Rotorblatts ist kein Bestandteil der Studie. Grafisch ist das Produktsystem in Abbildung 11 dargestellt.

Die Alternativen I und II fokussieren eine thermische Verwertung der einzelnen Rotorblattfraktionen. Variante I, das „Worst-Case-Szenario“, sieht die Entsorgung aller Bestandteile (bis auf die E-/NE-Metalle; diese lassen sich vereinfacht separieren und werden stets einem konventionellen Stahlrecyclingprozess³¹ zugeführt) in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) vor. Die Umweltwirkungen durch Verbrennung des Materials werden der theoretisch eingesparten Energiemenge entsprechend dem deutschen Strommix gegenübergestellt. Hinsichtlich der Umweltwirkungen stellt die thermische Verwertung von Holz im Rahmen dieser Studie eine Besonderheit dar. Sie wird als neutral angesehen, da die bei der Verbrennung freigesetzten Emissionen denen

³¹ Aufgrund der sehr guten kreislaufeigenschaften des Werkstoffes wird von einer Substitution von Primärstahl mit einer Recyclingeffizienz von 90% ausgegangen.



in der Anbau- und Wachstumsphase des Rohstoffes gespeicherten Emissionen entsprechen.

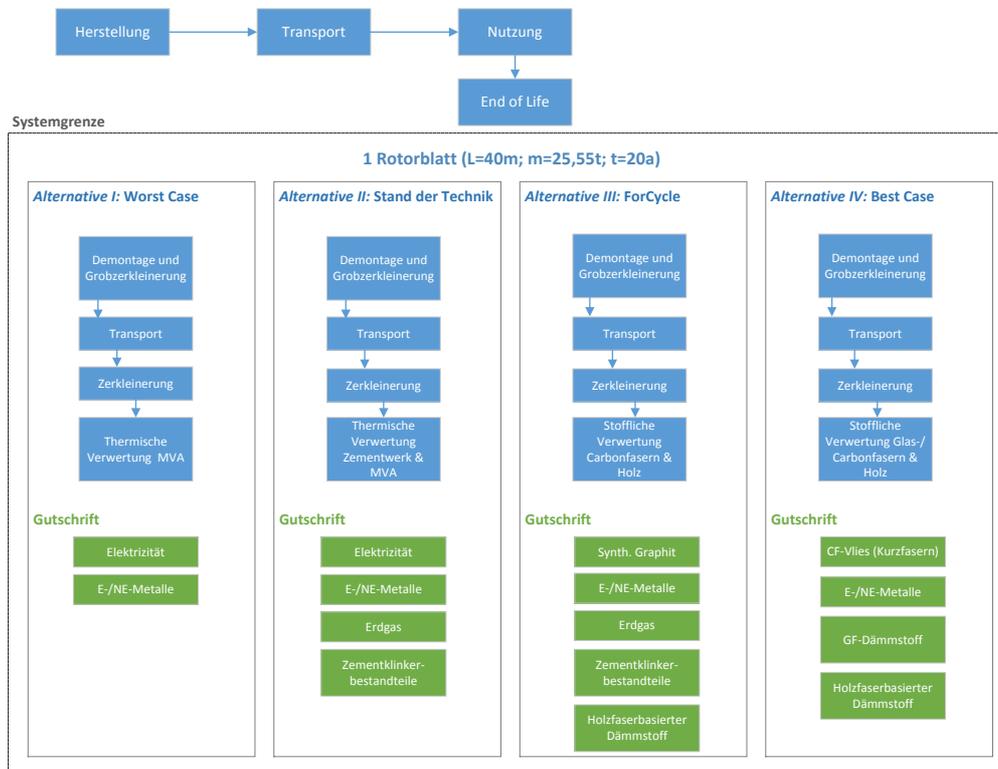


Abbildung 11: Produktsystem und Systemgrenzen der vorliegenden Ökobilanz

Recyclingvariante II, auch „Stand der Technik“ genannt, nutzt die GFK-/und Holzverbundbestandteile als Sekundärbrennstoff in Zementwerken. Eine Gutschrift wird hierbei zum einen durch die Substitution von Erdgas generiert. Zum anderen werden die Aschebestandteile zur Herstellung von Zementklinkern eingesetzt (Substitution von Calciumoxid (CaO), Siliziumdioxid (SiO₂) und Aluminiumoxid (Al₂O₃)). Die CFK-Komponenten werden erneut einer MVA als Störstoff zur Erzeugung elektrischer Energie zugeführt.

Mit den Recyclingalternativen III und IV rückt die stoffliche Verwertung der materiellen Bestandteile des Rotorblatts in den Vordergrund. So sieht Variante III vor, die CFK-Komponenten einem mechanischen Recycling (Einsatz einer Hammermühle) zu unterziehen, mit dem Ziel, in einer Zweitanwendung synth. Graphit als Leitfähigkeitszusatz zu substituieren. Die Holz-Bestandteile des Rotorblatts werden zu einem holzfaserbasierten Dämmstoff weiterverarbeitet. Entsprechende Gutschriften können demzufolge durch die Bindung der Emissionen im zukünftigen



holzfaserbasierten Dämmstoff generiert werden. Die GFK-Fractionen werden erneut als Sekundärbrennstoff in Zementwerken eingesetzt. Im Unterschied hierzu sieht Variante IV für die GFK-/ und CFK-Bestandteile vor, Faser und Matrix mit Hilfe eines Pyrolysevorgangs zu trennen. Die daraus gewonnenen Carbonfasern (CF) werden zu Vlies-Produkten, die Glasfasern (GF) zu Dämmstoffen weiterverarbeitet.

Als funktionelle Einheit wird ein Standardrotorblatt einer Windkraftanlage (Länge: 40m; Blattmasse: 25,55 t) in gleichbleibender Zusammensetzung und Qualität herangezogen. Für die stoffliche Verwertung der einzelnen Fraktion wird die in Tabelle 3 angegebenen stofflichen Einzelbestandteile genutzt.

Tabelle 3: Stoffliche Zusammensetzung des zu betrachtenden Rotorblatts³²

| Material | Rotorblatt Ma-% | Gewicht [kg] |
|--------------|-----------------|---------------|
| GFK | 87,51 | 22.360 |
| CFK | 5,48 | 1.400 |
| Holz | 5,01 | 1.280 |
| E/NE-Metalle | 2,00 | 510 |
| Σ | 100,00 | 25.550 |

Es wird keine Allokation angewendet, da alle Belastungen direkt dem Rotorblatt zugerechnet werden. Gutschriften für Produkte, wie Nutzenergie und Sekundärrohstoffe werden über Systemerweiterungen realisiert.

Das Recycling von Rotorblättern wird über sämtliche Prozessschritte hinweg, d.h. von der Demontage des Rotorblatts bis hin stofflichen Verwertung, maßgeblich durch den energetischen Aufbereitungsaufwand bestimmt. Demzufolge orientiert sich die Auswahl der relevanten Wirkungsindikatoren im Rahmen dieser Ausarbeitung an den zentralen Umweltwirkungen der Energiewirtschaft. Hierbei handelt es sich um die Wirkungskategorien des Treibhauseffekts, der Versauerung und der Eutrophierung.³³

6.6.2. Sachbilanz

Das beschriebene Produktsystem wurde mit Hilfe der Software GaBi ts modelliert.

³² Haapala, K., & Prempreeda, P. (2014). Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. Oregon State University: Int. J. Sustainable Manufacturing, Vol. 3, No. 2, 2014.

³³ Turconi, R., Boldrin, A., & Astrup, T. (2013). *Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 28 (2013) 555-565. Kongens Lyngby: Elsevier



Die selektive Trennung am Ort der Demontage, d.h. die Unterteilung des Rotorblatts in vereinzelte genehmigungsfreie Transportgrößen, wird durch den Einsatz unterschiedlicher Demontagetechnologien realisiert. Berücksichtigt werden im Rahmen dieser Studie lediglich die energetischen Aufwände für die einzelnen Demontage- und Zerkleinerungstechnologien in der Nutzungsphase. Die Herstellungs-/ und Wartungs- bzw. Instandhaltungsaufwände, bspw. durch Verschleiß der Sägeblätter, wurden in der vorliegenden Ausarbeitung vernachlässigt und sind in künftigen Studien näher zu betrachten.

Die CFK-Fractionen in Alternative IV stellen hierbei eine Ausnahme dar. Entsprechend des Zieles einer stofflichen Verwertung wird das Material nach dem Sägevorgang direkt einer Pyrolyseanlage zugeführt. In Alternative III wird im Vergleich zu Alternative IV der Einsatz einer Säge durch die energetische Demontage (Einsatz von Sprengstoff) substituiert. Die Tabelle 4 veranschaulicht, welche Demontagetechnologie in welcher Entsorgungsalternative für welches Material eingesetzt wurde.

Tabelle 4: Einsatz der Demontage- und Zerkleinerungstechnologie in den verschiedenen Varianten

| Demontage- technologie | Alternative I | | | Alternative II | | | Alternative III | | | Alternative IV | | |
|---------------------------|---------------|-----|------|----------------|-----|------|-----------------|-----|------|----------------|-----|------|
| | GFK | CFK | Holz | GFK | CFK | Holz | GFK | CFK | Holz | GFK | CFK | Holz |
| Seilsäge | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Sprengstoff | | | | | | | x | x | x | | | |
| Wandsäge | x | x | x | x | x | x | | | | x | x | x |
| Wellenzerkleinerer | x | x | x | x | x | x | x | | x | x | | x |
| Querstromzerspaner | x | x | x | x | x | x | x | | x | x | | x |

7. Ergebnisdarstellung und Bewertung

7.1. Demontage

7.1.1. Energetische Demontage

Nach der Zündung der Variante I (Schneidladung in drei Konfigurationen) im Bunker, war zu erkennen, dass die Trennkonfigurationen unabhängig von Material und Stärke der Trennlagen die Platten nicht vollständig trennen (vgl. Abbildung 12). Die Laminatschicht auf der Plattenunterseite blieb jeweils intakt.

Trennergebnis Versuch I/Variante I



Abbildung 12: Ergebnis der Sprengkonfiguration (Variante I) mit GFK-Kunststoffschaum-Verbund

Nach einer erheblichen Erhöhung der Sprengstoffbelegungen in Variante II mit einer Plattenstärke von 30 mm und einer PU-Schaumfüllung, wurde das Prüfsegment mit allen Konfigurationen vollständig getrennt (vgl. Abbildung 13).



Abbildung 13: Ergebnis der Sprengkonfiguration Variante II mit erhöhter Leistung an GFK-Kunststoffschaum-Verbund

In den Versuchen konnte für jedes Probenmaterial die abgestimmte Belegungsdichte für eine vollständige Durchtrennung bestimmt werden.

7.1.2. Demontage mit Seilsäge

Um den Vergleich der energetischen Demontage zum Stand der Technik zu ermöglichen, wurde das Material von dem Projektpartner TREE mittels Seilsägetechnologie (vgl. Abbildung 14) getrennt. Im Projekt wurde weiterhin auch der Einsatz einer Bandsäge (vgl. Abbildung 15) getestet. Der Vorteil der Bandsäge gegenüber der Seilsäge besteht in der schnellen Montage am Rotorblatt und dem so einfacheren horizontalen Schnitt.



Abbildung 14: Versuche zur Trennung eines Rotorblattes mittels Seilsäge



Abbildung 15: Versuche zur Zerlegung eines Rotorblattes mittels Bandsäge

Die Herausforderung bei der Sägetechnologie besteht dahingehend, dass trotz unterschiedlichster Materialien und Verbindungen eine gleich bleibende Schnittleistung erzielt werden muss. Dabei sollte ein Verschmieren, Verkleben bzw. Verkeilen der Schnittfuge unbedingt vermieden werden. Da jedes Material anders auf Hitze, Reibung, Geschwindigkeit reagiert, sind die Seilbestückung, die Abstände, aber auch die Schneidgeschwindigkeit entscheidende Einflussfaktoren. Zur genauen Bestückung des Sägeseiels / Sägeblattes möchte TREE keine Angaben machen.

Mit beiden Technologien der Firma TREE ist es möglich die Fraktionen an der Windkraftanlage zu separieren. Im Projekt wurde speziell das durch das Heraustrennen von CFK Gurten erfolgreich durchgeführt.

7.2. Aufbereitung und Verwertung

7.2.1. Mechanische Aufbereitung

Eine vollständige Trennung des Harzes von den Fasern ist mit einer mechanischen Beanspruchung nicht möglich. Die Form und Größe der durch eine Zerkleinerung erzeugten Fraktionen unterscheidet sich stark und macht den großen Einfluss der mechanischen Aufbereitung auf nachgeschaltete Prozesse deutlich. Nach der Klassierung verbleiben in der Grobfraktion $d > 8$ mm und Mittelfraktion $d = 2-8$ mm teilweise noch unaufgeschlossene GFK-Stücke mit hohem Harzgehalt. Mit sinkender Korngröße nimmt der Harzgehalt an den GFK-Partikeln ab. Die Feinfraktion $d = 0-2$ mm wirkt am besten aufgeschossen und weist einen hohen Anteil an kurzen harzbehafteten



Partikel auf. Fraktionsuntypische Partikelgrößen sind durch ein Aufstellen der Fasern und damit Durchrutschen in allen Fraktionen vorzufinden.

Beanspruchungsart

Die Sichtprüfung zeigt, dass die Pendelschlagmühle (HM) (links) einen höheren Anteil an länglichen Faserstücke erzeugt. In der Probe der Schneidmühle (SM) (rechts) weist kürzere und breitere Faserstücke auf (Abbildung 16).



Abbildung 16: Zerkleinerte GFK-Proben (links) HM20/57 (rechts) SM20/57

Aus der in Partikelgrößenverteilung geht hervor, dass die HM im Vergleich zur SM mehr Feingut $d < 2$ mm erzeugt. Das Mittelgut $d = 2-8$ mm und Grobgut $d > 8$ mm überwiegt bei der SM. Die Verluste, die als Rückstand auf dem Austragssieb und im Mahlraum verblieben, sind bei der HM größer als bei der SM.

Die Faserlängenmessung wurde nur an den Fraktionen $d = 0-1$ mm, $d = 1-2$ mm und $d = 2-4$ mm durchgeführt. Die Fraktionen $d > 4$ mm wurden stichprobenartig mit dem Lineal nachgemessen. Auffällig ist, dass die Längen der gemessenen Partikel aller Fraktionen bis Faktor 6 größer sind als die vorgegebene Siebmaschenweite.

Grundsätzlich sind längere Partikel in den HM-Proben aufzufinden. Während die Längenunterschiede der Partikel zwischen HM und SM in der Feinfraktion $d = 0-2$ mm nur gering sind, weist die Fraktion $d = 2-4$ mm aus der HM gegenüber der SM um $d = 5$ mm längere Partikel auf. Die Faserlängenmessung ergibt für die Partikel aus der HM ein geringeres Seitenverhältnis (Abbildung 17 links). Dieses geringere b/l -Verhältnis wird in den größeren Fraktionen $d = 2-4$ mm deutlich. Weiterhin ergibt sich durch die Glührückstandsbestimmung für die Proben aus der HM geringere Harzgehalte (Abbildung 17 rechts).

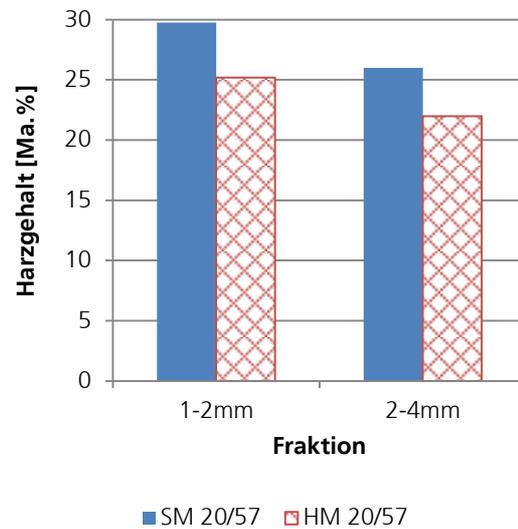
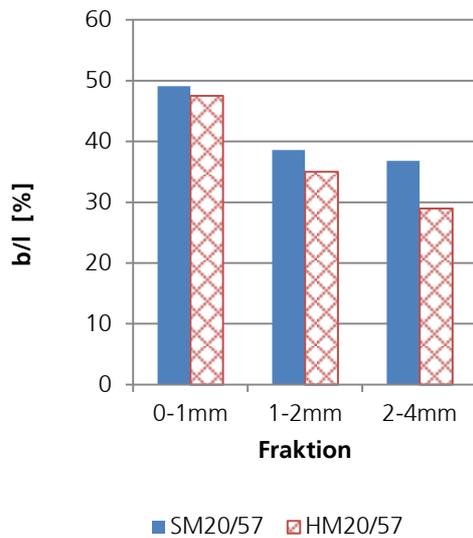


Abbildung 17: SM20/57 und HM20/57 (links) b/l-Verhältnis (rechts) Harzgehalt

Faservolumengehalt

Die Ergebnisse sind für die Zerkleinerungsversuche mit Faservolumengehalten 12 % und 57 % für die HM dargestellt, da sich hierbei die beiden Aggregate ähnlich verhalten. Bereits bei der Sichtprüfung (vgl. Abbildung 18) sind Unterschiede zu erkennen. In der Probe mit höherem Faservolumengehalt (rechts) sind die GFK-Stücke schlechter aufgeschlossen. Es liegen teilweise noch ganze Teile der Platte vor. Die Partikel bestehen alle aus Fasern, die noch mit Harz behaftet sind. Im Gegensatz dazu können in der Probe mit einem Faservolumengehalt 12 % in allen Fraktionen Harzstücke ohne Fasern gefunden werden. Diese Harzablösungen sind bei hohem Faservolumengehalt nicht zu beobachten. Weiterhin kann in der Feinfraktion bei hohem Faservolumengehalt eine Volumenvergrößerung festgestellt werden.



Abbildung 18: Zerkleinerte GFK-Proben (links) HM20/12 (rechts) HM20/57



Die Partikelverteilungskurven zeigen, dass die mittlere Partikellänge aller Fraktionen bei HM20/57 deutlich steigt. Das ebenfalls durch die Partikellängenmessung bestimmte Breiten-Längen-Verhältnis ist in Tabelle 5 dargestellt. Während die Unterschiede in der Fraktion $d=0-1$ mm zwischen beiden Proben nur gering sind, zeigen sich in HM20/57 in den größeren Fraktionen deutlich geringere Werte im Vergleich zu HM20/12.

Tabelle 5: Mittleres b/l-Verhältnis der Proben HM20/12 und HM20/57

| b/l ₅₀ [%] | Partikelklassen | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------|--------|--------|-------|
| | 0-1 mm | 1-2 mm | 2-4 mm | 4-8 mm | >8 mm |
| HM20/12 | 44 | 55 | 50 | - | - |
| HM20/57 | 48 | 35 | 29 | - | - |

Übertragung auf Rotorblattmaterial

Die Glührückstandsbestimmung ergab für das Rotorblattmaterial einen Faservolumengehalt von 40 % weiterhin wurde noch ein im RTM Verfahren hergestellte GFK Platte mit 57 % zerkleinert. Die Zerkleinerung der zwei Abfälle belegen die bisherigen Ergebnisse, dass der Grobanteil mit steigendem FVG zunimmt (vgl. Abbildung 19). Dies ist auf die höhere Stabilität im Verbund durch den höheren Faseranteil zu erklären. Die Zerkleinerung mit der HM erzeugt durch die selektive Beanspruchung länglichere Faserstücke. Im Vergleich mit der Partikelgrößenverteilung der zerkleinerten Laborplatten H20/57 und S20/57 ergeben sich ähnliche Massenanteile wie bei der EOL-Zerkleinerung. Der Vergleich mit der Zerkleinerung bei H5/57 und S5/57 zeigt mit wesentlich höherem Feinanteil deutliche Unterschiede in der Massenverteilung

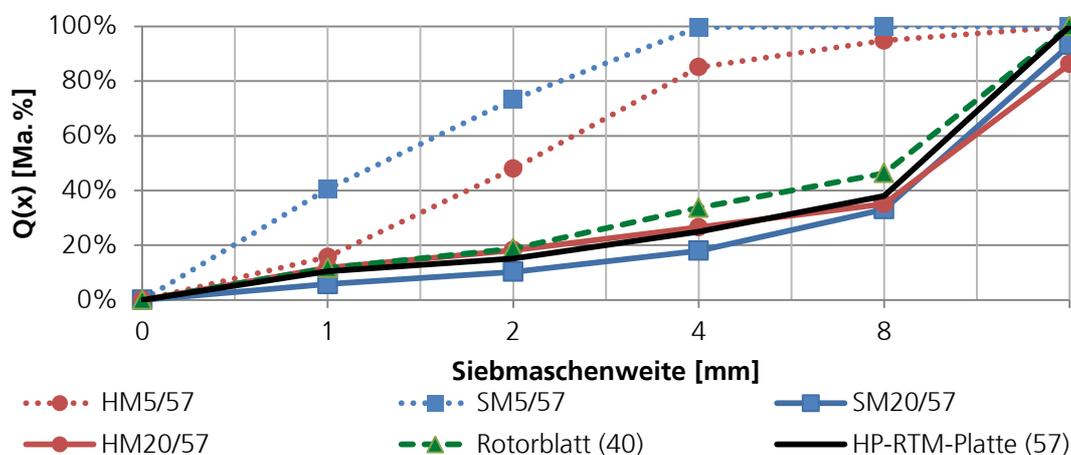


Abbildung 19: Vergleich der Partikelgrößenverteilung von Laborplatten, RTM- und Rotorblattmaterial



7.2.2. Chemische Aufbereitung

Die chemischen Versuche in ReKomp wurden mit dem Ziel durchgeführt den Einfluss der Versuchsparameter auf die Abtrennung des Kunststoffes (Ausbeute) und der im Rückstand enthaltenen Substanzen herauszufinden. Der Artikel von Yang et al.³⁴ dient als Grundlage dieser Versuche. Das dort beschriebene Verfahren wird als Standard-Verfahren betrachtet, von dem aus die Parameter verändert werden. Der einzige Unterschied zur Literatur besteht in der Erhöhung des eingesetzten Probenmaterials, da in der Literatur unverstärktes Material verwendet wird. Die von Yang et al. angegebene Methodik, eine Phasentrennung nur durch Zugabe von Wasser zu erreichen, ließ sich nicht realisieren. Bei den Versuchen wurden verschiedene organische LM wie Diethylether, Chloroform und Aceton anstelle von Wasser getestet.

Der Einfluss der Versuchsbedingung auf die Ausbeute wird beispielhaft für PEG 200 dargestellt. Bezüglich der Effektivität der Versuchsparameter können optische Unterschiede festgestellt werden. So zeigt sich, dass die Erhöhung der Temperatur (Abbildung 21) oder der Mehreinsatz an Katalysator (Abbildung 22) einen deutlich erhöhten Abbau des Harzes im Vergleich zur Standardbehandlung (Abbildung 20) erzeugt.

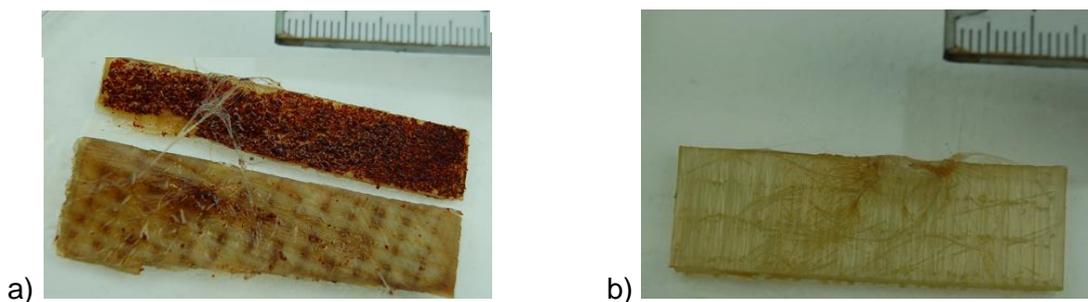


Abbildung 20: Proben a) RB (PEG 200) und b) GFK (PEG 200) nach Literaturangaben

Bei der Standardbehandlung nach den Vorgaben in der Literatur ist das Probestück weitgehend intakt geblieben. Es haben sich kaum Fasern aus dem Verbund gelöst. Nur an der Oberfläche haben sich einzelne Fasern gelöst. Anders sieht das bei der Behandlung bei 220°C

³⁴ Yang, P., Zhou, Q., Yuan, X.-X., van Kasteren, J. M. N. and Wang, Y.-Z. (2012): Highly efficient solvolysis of epoxy resin using poly(ethylene glycol)/NaOH systems, Polym. Degrad. Stab. 97 (Zeitschrift), S. 1101-1106

aus. Die Proben sind nicht mehr formstabil. Die Fasern sind wesentlich stärker vom LM umspült worden.

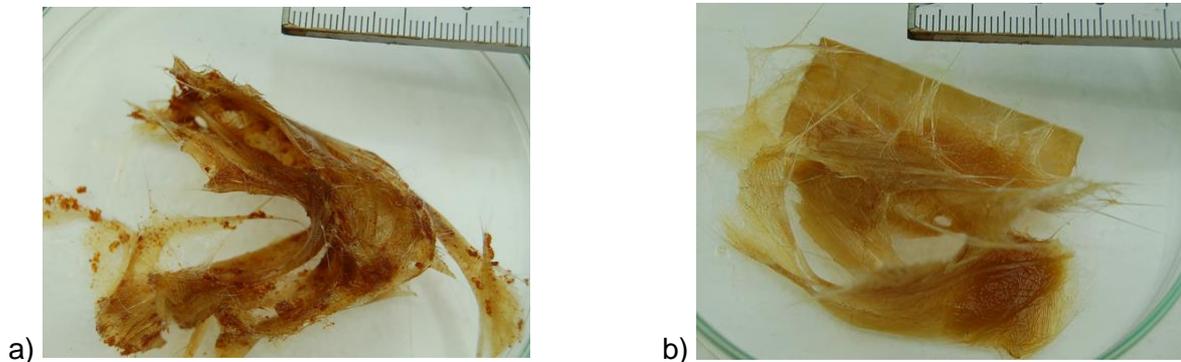


Abbildung 21: Proben a) RB (PEG 200) und b) GFK (1, PEG 200) bei erhöhter Temperatur

Auch bei erhöhtem Einsatz an NaOH haben sich mehr Fasern aus dem Verbund gelöst. Allerdings wird deutlich weniger Material als bei den Versuchen bei 220°C gelöst.

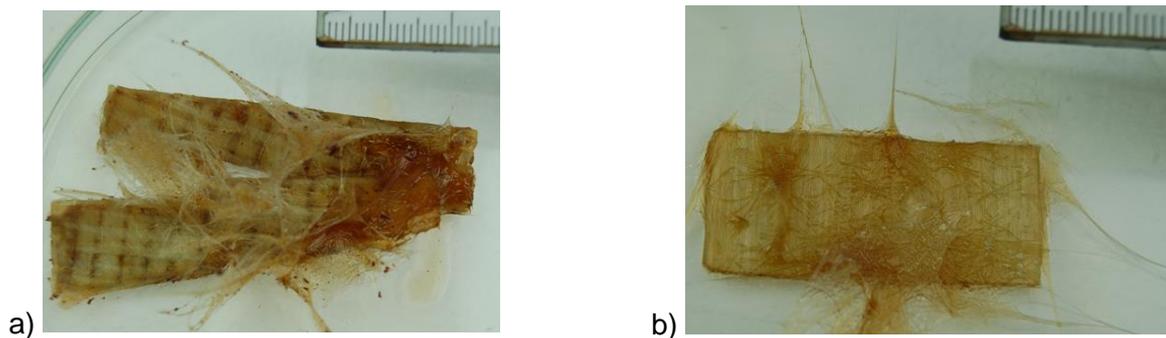


Abbildung 22: Proben a) RB (PEG 200) und b) GFK (2, PEG 200) bei erhöhtem NaOH Einsatz

Der Zusammenhang zwischen höherer Temperatur bzw. größerer Katalysatormenge und stärkerem Abbau des EP-Harzes bei dem PEG 200 gilt für das GFK- Plattenmaterial ebenso wie für das Rotorblattmaterial.

Der Unterschied zwischen den eingesetzten Materialien in Bezug auf die verwendeten Lösemittel wird jedoch besonders in den Messungen des Glührückstandes deutlich (Tabelle 6). Die blauen Felder stehen für das GFK-Plattenmaterial und grün für das Rotorblattmaterial. Mit PEG 200,400 und TEG lässt sich der Kunststoff besser beim Rotorblatt lösen, mit DEG besser beim Plattenmaterial. Bestätigt wird diese Aussage durch die REM Bilder (Abbildung 23 und Abbildung 24).



Tabelle 6: Übersicht der Glühverlustmessungen von GFK-Platten (blau) und Rotorblattmaterial (grün) mit unterschiedlichen Lösemitteln

| | PEG 200 | | PEG400 | | TEG,1 | | DEG,1 | |
|-------------|---------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|
| Glühverlust | 14,2% | 0,57% | 27,2% | 0,82% | 37,44% | 3,43% | 23,38% | 52,31% |

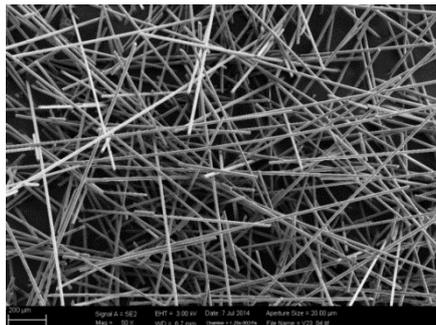


Abbildung 23: REM Aufnahmen des Rückstandes mit PEG 400 von a) dem Rotorblattmaterial und b) der GFK-Platte

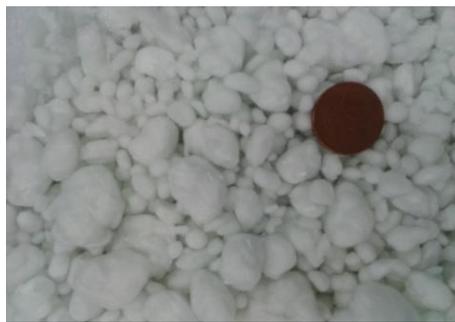


Abbildung 24: gewaschene und getrocknete G-Fasern aus den Versuchen a) RB (PEG 400, 24) und b) GFK (PEG 400, 25)

7.3. Ökobilanzielle Bewertung

7.3.1. Wirkungsabschätzung und Auswertung

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für das Treibhauspotential GWP 100 sind in der Abbildung 25 dargestellt. Den geringsten Wert haben demzufolge die Recyclingvarianten, welche eine stoffliche Verwertung und damit eine Kreislaufschließung der Rotorblattmaterialien anstreben. Das Best-Case-Szenario in Alternative IV erzielt mit -9.449 kgCO₂-eqv. die höchsten Gutschriften, gefolgt vom ForCycle-Szenario (Alternative III) mit -3.043 kgCO₂-eqv. Die Recyclingverfahren I und II, welche ein vorwiegend thermisches Recycling der Rotorblattfraktionen fokussieren, führen hingegen zu einem negativen Ergebnis, d.h. die ökologischen Aufwände für die



thermische Entsorgung sind höher als die durch Substitution von Erdgas oder Strom generierten Gutschriften (rd. 12.140 kgCO₂-eqv. in Alternative I). Für die Umweltwirkungen, die mit dem Einsatz der unterschiedlichen Demontage- und Zerkleinerungstechnologien innerhalb der vier Recyclingvarianten einhergehen, wird deutlich, dass sich diese hinsichtlich ihres ökologischen Rucksacks nur sehr geringfügig unterscheiden und in Bezug auf das Gesamtergebnis mit rd. 1.100 kgCO₂-eqv. eine nur untergeordnete Rolle spielen. Demzufolge sind unter ökologischen Gesichtspunkten zunächst alle der betrachteten Demontage- und Zerkleinerungstechnologien geeignet.

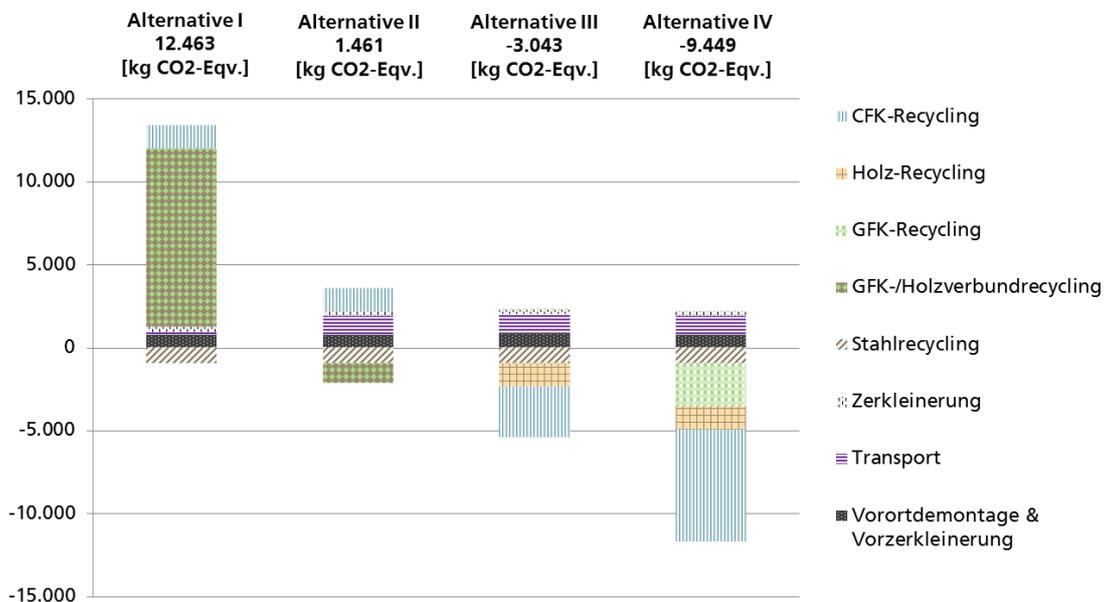


Abbildung 25: Gesamtergebnis Treibhauspotential GWP 100 (Berechnung mit GaBi ts nach ReCiPe)

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass erhöhte Transportaufwände, gerade für die vorwiegend stofflichen Recyclingalternativen III & IV, ihre Berechtigung haben. So kann der ökologische Rucksack des LKW-Transports quer durch Deutschland (rd. 1.150 kgCO₂-eqv.) im Vergleich zur Möglichkeit der stofflichen Kreislaufschließung und den damit in Verbindung stehenden Gutschriften (rd. -11.650 kgCO₂-eqv. in Alternative IV) als vernachlässigbar eingestuft werden.



8. Zusammenfassung und Ausblick

Mit den im Projekt ReKomp untersuchten Technologien zur Separation von Rotorblättern, kann die Effektivität der Verwertung deutlich gesteigert werden.

Die entwickelte Technologie der energetischen Demontage sowie die untersuchte Seilsägetechnologie des Industriepartners TREE sind für eine Zerlegung grundsätzlich geeignet. Durch die systematischen Versuche mit unterschiedlichen energetischen Materialien konnte für jedes Material die geeignete Ladungsstärke ermittelt werden. Im Vergleich zur Seilsägetechnologie bietet die energetische Demontage mehr Freiheiten in der Schnittführung, da der Explosivstoff flexibel aufgebracht werden kann. Auch in der zeitlichen Dauer des eigentlichen Demontage- und damit Lärmereignisses bietet die energetische Demontage deutliche Vorteile, da die Sprengung unter zwei Sekunden abläuft. Durch die Vorgabe der Durchführung der Sprengung mit ausgebildetem Personal und dem einzuhaltenden Sicherheitsabstand besteht keine direkte Gefahr für Mensch und Umwelt. Die Technologie bietet sich nach dem jetzigen Stand besonders für dickwandige und großvolumige Materialien an, deren Demontage Zeit und Materialverschleiß in Anspruch nimmt.

Die bislang im Projekt nur theoretisch untersuchten Aspekte der Staubbindung und Wirtschaftlichkeit sollten für eine Überführung in die Praxis in weitergehenden Forschungsarbeiten näher betrachtet werden. Daher wird an dieser Stelle eine Optimierung des energetischen Materials hinsichtlich ökonomischer Sprengstoffe und integrierter Emissionsunterdrückung durch Wasserummantelung vorgeschlagen.

Mit dem Vorliegen der unterschiedlichen Rotorblattfraktionen nach der energetischen Demontage wurde die stoffliche Verwertung der einzelnen Fraktionen untersucht. Wie durch die ökobilanzielle Betrachtung bestätigt, ist das Ziel der stofflichen Verwertung von Rotorblattmaterial eine wichtige Voraussetzung zur Implementierung eines nachhaltigen Recyclingweges. Die mechanische Aufbereitung stellt einen wichtigen Schritt in der Recyclingkette für FVK dar. Die unterschiedlichen Sekundärprodukte können durch die Art der Beanspruchung und zu variierenden Parameter in weiten Grenzen beeinflusst werden. Zur Erhöhung der stofflichen Verwertung konnte im Projekt eine technische Möglichkeit zur Abtrennung der Balsaholzfraktion aufgezeigt



werden. Die Ergebnisse aus dem Projekt wurden genutzt um ein KMUinnovativ Projekt zur Balsaholzrückgewinnung erfolgreich einzureichen.

Die chemische Aufbereitung von FVK Bauteilen wurde im Projekt untersucht, da theoretisch eine Rückgewinnung der flüssigen Kunststofffraktion nach dem Lösemittelprozess und damit eine 100%ige Verwertung möglich ist. Anhand der Versuche wurden die Selektivität des eingesetzten Lösemittels und der Einfluss von Temperatur und Katalysatormenge aufgezeigt. Für eine Umsetzung der chemischen Verfahren in die industrielle Anwendung sind weitere Forschungsarbeiten zur Identifikation des flüssigen Rückstandes und Aufarbeitung zu einem Sekundärprodukt notwendig.

Das Projektkonsortium dankt dem Bayrischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz für die finanzielle Förderung des Projektes *Recycling von Kompositbauteilen aus Kunststoffen als Matrixmaterial – ReKomp* und für die Betreuung während der vergangenen drei Jahre Projektlaufzeit.