

# Aufschlusszerkleinerung metallintensiver Leichtbaustrukturen zur Freilegung von Wertstoffkomponenten am Beispiel einer Hybrid-B-Säule in Mischbauweise

Holger Lieberwirth, Thomas Krampitz und Sebastian Schnutz

1.	Charakterisierung der Hybrid-B-Säule in Mischbauweise.....	328
2.	Vorgehensweise .....	330
3.	Zerkleinerung und Verbundaufschluss.....	331
4.	Verschleißbetrachtungen an den Hämmern .....	334
5.	Zusammenfassung .....	335
6.	Quellen .....	336

Der Strukturleichtbau in Elektrofahrzeugen ermöglicht bei weitgehend gleichem Fahrkomfort und einem geringen Gesamtfahrzeuggewicht den Einsatz einer relativ großen und spezifisch schweren Batterie, um eine möglichst hohe Reichweite für das Elektrofahrzeug zu gewährleisten. Dies wird durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen mit vergleichbaren Eigenschaften und geringerem Gewicht im Vergleich zu den konventionellen Werkstoffen verwirklicht. Dabei sind unterschiedliche Entwicklungstendenzen zu beobachten. Einerseits werden bestehende Fahrzeugplattformen schrittweise angepasst (VW Golf) oder es wird auf neue Fahrzeugkonzepte mit Neukonstruktionen gesetzt (BMW i3). Dabei entstehen einerseits metallintensive Leichtbaustrukturen wie im VW Golf VII mit dem Einsatz von teilweise warm umgeformten Vergütungsstählen und andererseits kunststoffintensive Leichtbaustrukturen wie beim BMW i3, der überwiegend aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) in Verbindung mit Leichtmetallen in Mischbauweise gefertigt wird [7, 12, 14].

Die zunehmende Mischbauweise stellt neue Anforderungen an das Recycling, da mit steigender Vielfalt der Werkstoffe auch deren Kombinationsmöglichkeiten exponentiell zunehmen. Um die angestrebten Verwertungsquoten zu erreichen, müssen auch die neuen Verbunde für die stoffliche Verwertung wieder aufgeschlossen werden. In der im Jahr 2015 veröffentlichten FOREL-Studie wurde die Fahrzeug- und Zulieferindustrie befragt, welche Werkstoffgruppen und Kombinationsmöglichkeiten zukünftig zum Einsatz kommen werden [4] und welche Häufigkeiten für die verschiedenen Werkstoffkombinationen zu erwarten sind. Bild 1 zeigt die Ergebnisse der Befragung. Ableitend ist zu erwarten, dass alles, was technisch möglich ist, auch zur Anwendung kommt, wobei die meisten Kombinationsmöglichkeiten höherwertige Stähle und Leichtmetalle betreffen. Vertiefende Auswertungen finden sich in den Literaturquellen [7, 8, 9].

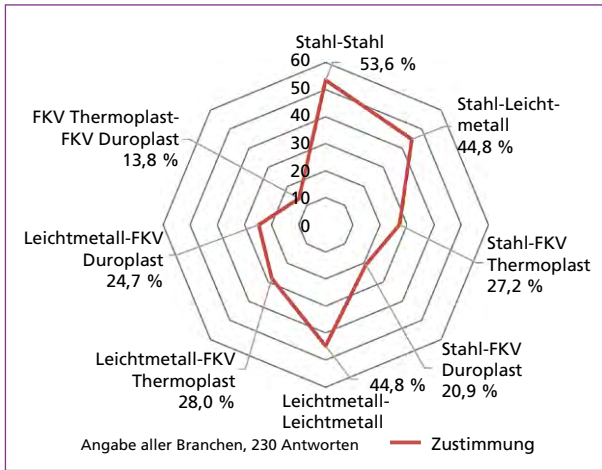


Bild 1:

Kombinationsmöglichkeiten von Leichtbauwerkstoffen für den Strukturleichtbau

Quelle: Gude, M.; Meschut, G.; Zäh, M. F.; Lieberwirth, H.: FOREL-Studie; Chancen und Herausforderungen im Ressourceneffizienten Leichtbau für die Elektromobilität. Dresden: TU Dresden Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, 2015

Vor allem in der metallintensiven Mischbauweise werden vermehrt höher vergütete Stahlsorten verwendet. *Eickenbusch* schreibt in einer VDI-Studie [2] dazu: *Typische Anwendungsgebiete für warmumgeformte Tailored Blanks im Fahrzeugbau sind etwa B-Säulen, Längsträger und Tunnelverstärkungen. In aktuellen Fahrzeugen werden in der Karosserie bereits 5 % bis 15 % warmumgeformte Stähle eingesetzt. Es wird erwartet, dass dieser Anteil in den nächsten Jahren auf bis zu 30 % ansteigen wird und dass nicht nur im Karosseriebau, sondern auch im Fahrwerksbereich warmumgeformte Bauteile zum Einsatz kommen werden. Dazu wird an der Kombination der Warmumformung mit anderen Umformtechniken gearbeitet. In der Forschung werden bereits warmumgeformte Stahlsorten mit Festigkeiten von 2.000 MPa erreicht. Was als Mischbauweise im Fahrzeugbau durch Kombination verschiedener Werkstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften zu Masse- und Kostenreduktion bei mehr Crashesicherheit sorgt, wird nach Fendel [3] in Verbindung mit der zunehmenden Komplexität des Leichtbaus in Fahrzeugen zur Kostenexplosion in der Aufbereitung von Altfahrzeugen führen. Erkennbar ist heute schon, dass diese Kosten kaum die Erlöse aus den wiedergewonnenen Wertstoffen decken. Prozesse der Autoverwertung sind inzwischen so kostenintensiv, dass sich ein positiver Marktwert für ein zu verwertendes Altfahrzeug kaum noch darstellen lässt. Der frühzeitige Informationsaustausch zwischen den Industriepartnern Kreislaufwirtschaft und Automotive über neuere Entwicklungen und Trends ist daher sehr wichtig, um sich auch rechtzeitig auf sich verändernde Situationen einzustellen.* Im Rahmen des Forschungsvorhabens Forschungs- und Technologiezentrum für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen der Elektromobilität (FOREL) wurde daraufhin beispielhaft der Verbundaufschluss einer neuartigen B-Säule in metallintensiver Mischbauweise untersucht. Dieser soll im Folgenden vorgestellt werden.

## 1. Charakterisierung der Hybrid-B-Säule in Mischbauweise

Als Untersuchungsgegenstand diente eine Charge hybrider B-Säulen aus aktuellen Forschungsprojekten, die den Strukturleichtbau der Fahrzeugindustrie als Schwerpunkt haben.

Diese B-Säulen können aus Sicht des Recyclings als Produktionsabfall mit weitgehend bekannter stofflicher Zusammensetzung angesehen werden. Bild 2 zeigt die untersuchte B-Säule.

Im Fahrzeugbau werden nach Nestler hybride Verbunde wie folgt definiert [11]: *Diese bestehen aus verschiedenen Materialien (Subsysteme Ss1, Ss2 ... Ssn), die als funktionelle und strukturelle Einheit einander bedingen. Die Subsysteme sind gleichwertig und das Eigenschaftsprofil ergibt sich aus dem Gesamtsystem (Hybrid). Die Subsysteme gehören den Werkstoffhauptgruppen oder den Verbundwerkstoffen an. Der Übergang ist durch ein Interface gekennzeichnet. Die Materialien werden durch ein Fügeverfahren ohne Fügeelement oder Zusatzwerkstoff verbunden bzw. durch Fertigungsverfahren des Ur- oder Umformens. Ebenso sind Kombinationen aus diesen Verfahren möglich.*

Durch die Verbindung verschiedener Stahlsorten, endlosfaserverstärkter Thermoplaste (Organoblech) und langfaserverstärkter Thermoplast-Pressmasse (LFT) weisen hybride Leichtbaustrukturen wie die untersuchte B-Säule aus Bild 2 mit etwa 11,3 kg ein hohes Leichtbaupotenzial auf [10]. Bild 3 zeigt die stoffliche Zusammensetzung der untersuchten B-Säule.



Bild 2: Hybride B-Säule in der Querschnittsdarstellung

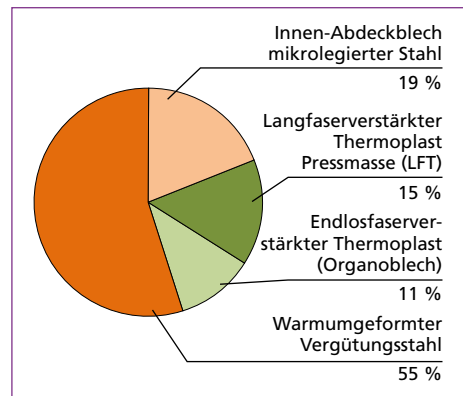


Bild 3: Stoffliche Zusammensetzung der untersuchten B-Säule

Die untersuchte B-Säule ist in Bild 2 im Querschnitt dargestellt. Die der Fahrzeugaußenseite zugewandte Struktur besteht aus einem zu einem Hutprofil warmumgeformten borlegierten Vergütungsstahl der Sorte 22MnB5. In diese eingebettet ist eine Lage endlosfaserverstärkten Thermoplasts (Organoblech), das sich aus glasfaserverstärktem Polyamid 6 (GFK) zusammensetzt. Die Aussteifung des Profils erfolgt durch langfaserverstärkte Thermoplast-Pressmasse vergleichbarer Werkstoffe. Die Innenseite ist mit einem mikrolegierten Stahl abgedeckt. Die Herstellung erfolgt über mehrere Umformprozesse. Detaillierte Werkstoffkenndaten standen nicht zur Verfügung.

## 2. Vorgehensweise

Die Vorgehensweise der Untersuchung gliederte sich in zwei Arbeitsschwerpunkte:

### Untersuchung des Zerkleinerungsverhaltens der Einzelwerkstoffe

Zur Gewinnung vertiefender Informationen über das Verhalten der Einzelkomponenten im maschinellen Zerkleinerungsprozess wurden systematische Versuche zur Zerkleinerung der Einzelwerkstoffe durchgeführt. Dazu wurden einige B-Säulen zerlegt und Musterstücke gefertigt.

### Untersuchung des Zerkleinerungsverhaltens der Werkstoffverbunde

Für die anwendungsnahen Aufbereitungsversuche der Gesamtstruktur wurden B-Säulen in Stücke geschnitten, da nicht die gesamte B-Säule in einem Stück aufgegeben werden konnte.

Die Zerkleinerungsversuche sollten den Bedingungen der konventionellen Aufbereitung im großtechnischen Shredder mit kombinierter schneller Reißbeanspruchung in Verbindung mit Schlag und Prall sowie der Einstellung der Verweilzeit über die Auswahl der Rostweite nahekommen. Sie erfolgten im Technikum der TU Bergakademie Freiberg auf der in Bild 4 gezeigten kleintechnischen Hammermühle der Bauart Firma Geb. Jehmlich GmbH/Nossen. Die Beanspruchungsart der Hammermühle ist mit der im Shredder weitgehend vergleichbar. Die Mühle verfügt zudem über eine mechanische Drehmomentmessung und eine Austragsklappe, mit der die Verweilzeit im Prozessraum gesteuert werden kann.

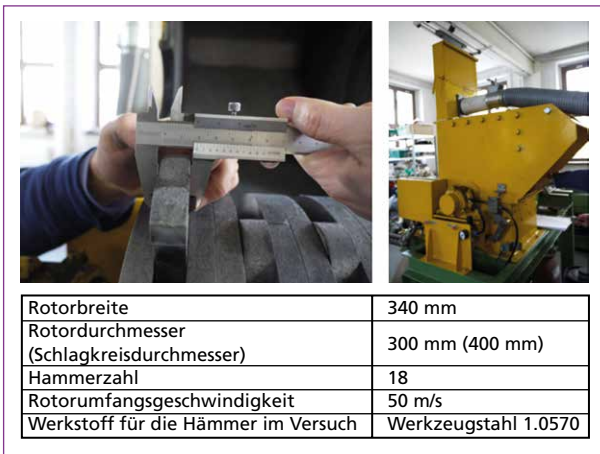


Bild 4:

Hammermühle der Firma Gebr. Jehmlich GmbH/Nossen mit konstruktiven und betrieblichen Einstellparametern

Die aus der Drehmomentmessung ermittelten Daten wurden für die Berechnung der spezifischen Zerkleinerungsarbeit nach Gleichung (1) herangezogen.

$$w_b = \frac{W}{m} = \frac{P_z \cdot t}{m} \quad (1)$$

mit  $P_z = P - P_L$

Die Leerlaufleistung der Maschine wird für die Berechnung der spezifischen Zerkleinerungsarbeit nicht berücksichtigt, da diese nicht skalierbar ist und von der Baugröße abhängt. Bei der eingesetzten kleintechnischen Hammermühle lag die Leerlaufleistung bei etwa 1,5 kW. Die Bestimmung der Stückgrößenverteilung der Zerkleinerungsprodukte erfolgte mittels Prüfsiebung nach DIN 66165 (DIN 66165, 2004).

### 3. Zerkleinerung und Verbundaufschluss

#### Aufgabegut

Die aus Bild 5 ersichtlichen Einzelkomponenten sowie mehrere Verbund-Abschnitte wurden für die Versuche manuell aus der B-Säule herausgelöst und wiesen ähnliche Stückgrößen auf. Die Stückform wich, wie für Recyclingteile üblich, von einer idealen Plattenform ab. So ergeben sich abhängig von Stückform und Wandstärke werkstoff- und bauteilspezifisch unterschiedliche Aufgabegutgewichte der Musterstücke. Für Wiederholversuche wurden jeweils fünf Stücke angefertigt.

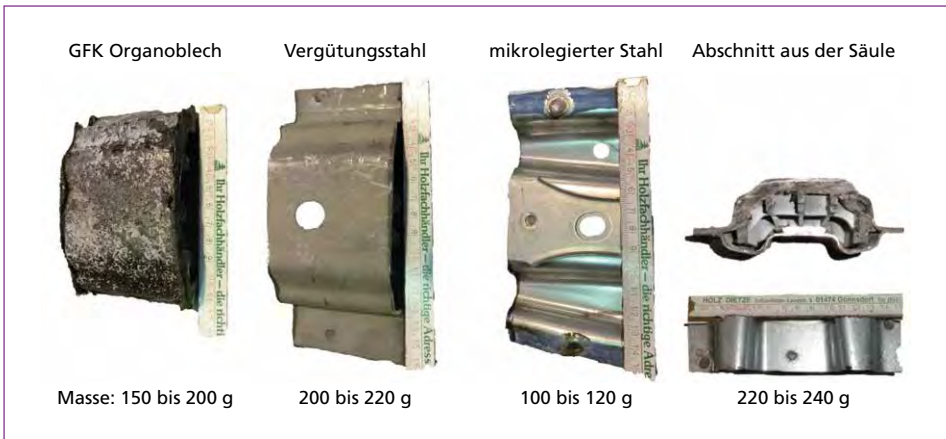


Bild 5: Musterstücke aus der B-Säule

Quelle: Schnitz, S.: Verfahrensentwicklung für die Aufbereitung stahlbasierter Leichtbaustrukturen im Multi-Material-Design aus dem Fahrzeugbau. Freiberg: TU Bergakademie Freiberg; Masterarbeit; Institut für Aufbereitungsmaschinen, 2016

#### Charakterisierung der Zerkleinerungsprodukte

Die Zerkleinerungsprodukte wiesen, wie in Bild 6 ersichtlich, werkstoffspezifische Stückgrößenverteilungen auf, die über den Kennwert Median  $x_{50}$  gekennzeichnet werden können. Aus der Verteilung wird zudem ersichtlich, dass der Werkstoff GFK im Zerkleinerungsprozess der Hammermühle deutlich feiner zerkleinert wird als die Stahlwerkstoffe. Die in Bild 8 gezeigten Stückgrößenverteilungen der Zerkleinerungsprodukte ergeben sich für die Verweilzeit von 15 s im Prozessraum mit einer spezifischen Zerkleinerungsarbeit von etwa 78 bis 93 kWh/t für die beiden Stahlsorten und etwa 40 und 60 kWh/t für den Werkstoff GFK.

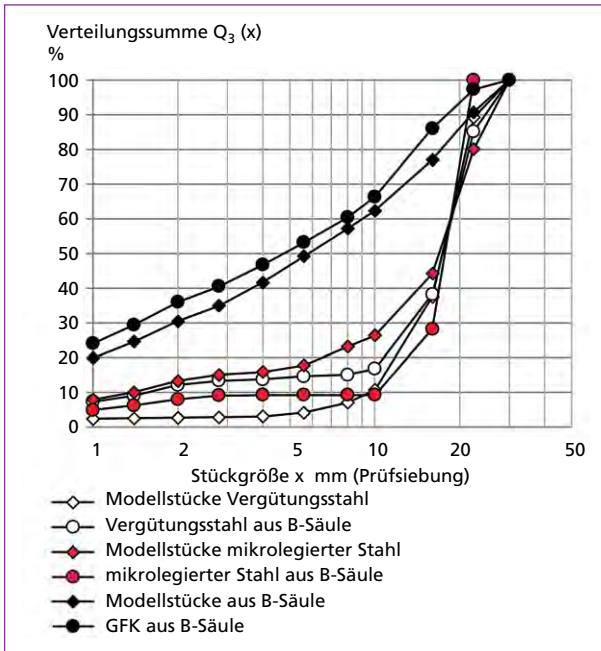


Bild 6:

Stückgrößenverteilungen der Zerkleinerungsprodukte nach 15 s Verweilzeit in der kleintechnischen Hammermühle

Aufgrund der unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften ergeben sich wie in Bild 7 gezeigt werkstoffspezifische Stückformen der Zerkleinerungsprodukte.



Bild 7: Zerkleinerungsprodukte von links nach rechts: GFK, Vergütungsstahl, mikrolegierter Stahl

Wie aus Bild 7 ersichtlich wird, werden im Prozess die faserverstärkten Kunststoffe sehr fein zerkleinert und liegen im Zerkleinerungsprodukt in splittiger Stückform vor. Für die beiden Stahlsorten führen einerseits die relativ spröden Werkstoffeigenschaften des Vergütungsstahles zu einer eher plattigen Stückform mit gewölbten Rändern und andererseits die duktilen, zähen Eigenschaften des mikrolegierten Stahls zu einem hohen Verkugelungsgrad der Zerkleinerungsprodukte. Das Bruch- und Verformungsverhalten der Stähle im Prozess ist daher als sehr unterschiedlich einzuordnen. Nach visuellen



Beobachtungen an den Produkten ist zu vermuten, dass gerade bei Vorhandensein von Werkstoffen mit feiner Stückgrößenverteilung in den Zerkleinerungsprodukten diese feinen Partikel beim Vorgang der Verkugelung in die verkugelten mikrolegierten Stähle eingebaut werden, was bei einer anschließenden stofflichen Verwertung negative Auswirkungen auf die Produkteigenschaften haben kann.

### Spezifische Zerkleinerungsarbeit

Für jeden Versuch erfolgte die Datenaufnahme der Drehmomentmessung. Die sich daraus ergebende spezifische Zerkleinerungsarbeit ist in Bild 8 in Abhängigkeit vom Median der Partikelgröße  $x_{50}$  des Zerkleinerungsproduktes aufgetragen. Somit ergibt sich ein funktioneller Zusammenhang zwischen der aufgetragenen Zerkleinerungsarbeit und der damit erreichten Partikelgröße.

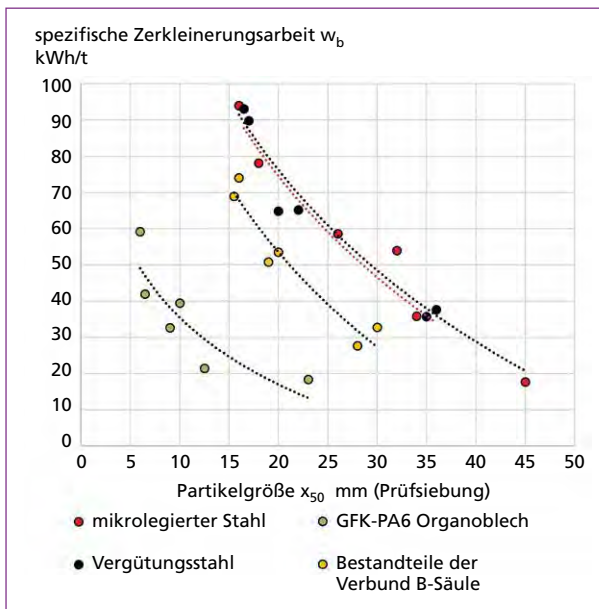


Bild 8:

Rumpf-Diagramm für die Einzelkomponenten und Verbund-B-Säule

Für die Zerkleinerung der GFK-Struktur auf die Partikelgröße  $x_{50}$  von etwa 20 mm wird eine spezifische Zerkleinerungsarbeit von etwa 18 kWh/t erforderlich. Sie ist damit viel geringer als für die Zerkleinerung der Stahlsorten mit etwa 80 kWh/t. Zu beachten ist aber, dass bei den Stahlsorten die Wandstärken unterschiedlich waren. Die Wandstärke des mikrolegierten Stahls ist mit 1 mm halb so groß wie die des Vergütungsstahls mit 2 mm. Der mikrolegierte Stahl benötigt für die Zerkleinerung auf 20 mm aufgrund der sehr duktilen, zähen Eigenschaften dennoch vergleichbar viel Energie wie der eher spröde und harte Vergütungsstahl. Es ist davon auszugehen, dass ein erheblicher Teil der eingetragenen Energie beim mikrolegierten Vergütungsstahl eher in plastische Verformungsarbeit umgewandelt wird als in echte Zerkleinerungsarbeit, charakterisiert durch Schaffung neuer Oberflächen. Die spezifische Zerkleinerungsenergie

der unzerlegten B-Säulenteile (Werkstoffverbund) ordnet sich zwischen den Werten für die Stähle und GFK ein. Für die Zerkleinerung auf ein  $x_{50} < 20$  mm sind in etwa 50 kWh/t erforderlich. Dabei ist allerdings zu beachten, dass im Versuch kein Material über einen Rost ausgetragen werden konnte und die Stückgrößenverteilungen der aufgeschlossenen Einzelkomponenten dadurch unterschiedlich ausfallen können. Die im hybriden Verbund erzeugten verbesserten Festigkeitseigenschaften der Verbundwerkstoffe konnten mithin der Zerkleinerung nicht nachgewiesen werden. Offensichtlich kommen diese Eigenschaften vorwiegend bei den Beanspruchungen zum Tragen, für welche die Elemente planmäßig ausgelegt sind. Das ist eine wichtige Erkenntnis, die durch künftige Zerkleinerungsuntersuchungen weiter zu vertiefen sind.

### Aufschlussgrad für die zerkleinerten B-Säulen-Verbundbauteile

Schon bei geringer Verweilzeit im Prozessraum gelingt der Verbundaufschluss und die Einzelkomponenten liegen im Zerkleinerungsprodukt als Gemisch weitgehend aufgeschlossen vor. In den Versuchen konnte bereits nach 5 s Verweilzeit im Prozessraum ein Aufschlussgrad von nahezu 100 Prozent erreicht werden. Die B-Säule ist für die Beanspruchungsart in der Hammermühle nicht ausgelegt und wird im Prozessraum in die drei Einzelkomponenten zerlegt. Die Ursachen können darin gesehen werden, dass in der Regel die Auslegung der Bauteile für definierte Lastpfade erfolgt. Wenn diese nicht zutreffen, können die Strukturen mit relativ geringem Aufwand maschinell zerlegt werden. Zudem sind Hybride Leichtbaustrukturen meistens über formschlüssige Verbindungen und punktförmige Fügestellen miteinander verbunden. Diese Arten der Verbindungen können über die eingebrachte Beanspruchungsart und Energie wie gezeigt gut aufgeschlossen werden. Als Einschränkung gilt aber, dass nur Teilbereiche der B-Säule geprüft wurden und die Teile somit einer Vorschädigung unterlagen. Zu prüfen ist, ob der Aufschluss für die gesamte hybride B-Säule unter großtechnischen Bedingungen vergleichbare Ergebnisse liefert.

## 4. Verschleißbetrachtungen an den Hämmern

Bei der Zerkleinerung von Metallen ist in der Regel mit einem höheren Verschleiß der Werkzeuge (Hämmer) zu rechnen. Die verwendeten Hämmer wurden zur besseren Kenntlichmachung des Verschleißes aus Werkzeugstahl 1.0570 gefertigt. Es wurden keine systematischen Verschleißuntersuchungen durchgeführt, sondern es sollen an dieser Stelle nur die sich zeigenden Auswirkungen exemplarisch verdeutlicht werden.

Im Versuch V10 erfolgte die Aufgabe von etwa 200 g des Werkstoffs Vergütungsstahl 22MnB5 aus der B-Säule. Die Hämmer wurden vor dem Versuch farblich markiert sowie vor und nach dem Versuch gewogen. Der Masseverlust der 18 Hämmer betrug insgesamt 6,6 g. Dies entspricht skaliert einem spezifischen Materialverlust an den Werkzeugen von etwa 33 kg pro Tonne verarbeiteten Vergütungsstahls (für die Zerkleinerung auf etwa 20 mm). Dieser Wert erscheint in Bezug auf den großtechnischen Einsatz als weitgehend unrealistisch, deutet jedoch auf hohen Verschleiß bei der Zerkleinerung neuartiger Leichtbauverbundwerkstoffe hin.



Angesichts der untersuchten Verbundwerkstoffbestandteile wurde zwar ein hoher Verschleiß erwartet, dass die Hämmer allerdings nach den Versuchen vollständig getauscht werden mussten, ist im Vergleich zu den ansonsten im Technikum für Versuchszwecke aufgegebenen Schrottstücken schon ungewöhnlich. Zur Verdeutlichung des Verschleißbildes dient ebenfalls Bild 9, auf welcher der deutliche Materialverlust und die Furchung an der Hammeroberfläche erkennbar werden. Weiterhin war auch die Mühlenauskleidung einem erheblichem Verschleiß unterworfen. Deren Austausch war ebenfalls mit hohen Kosten verbunden.



Bild 9: Hämmer der Hammermühle nach dem Versuch V 10

## 5. Zusammenfassung

Während der Versuche wurden Komponenten einer hybriden B-Säule in metallintensiver Mischbauweise auf einer kleintechnischen Hammermühle zerkleinert, um den Verbundaufschluss zu kennzeichnen. Der Aufschluss des Werkstoffverbundes und die Zerlegung in die Einzelkomponenten verliefen weitgehend planmäßig und es konnte ein nahezu vollständiger Aufschluss unter typischen Betriebsparametern für die Hammermühle nachgewiesen werden. Für die großtechnische Anwendung sollten sich in Bezug auf den Verbundaufschluss kaum gravierende Änderungen gegenüber der heutigen Bauweise der Fahrzeuge einstellen. Allerdings werfen die Versuche auch einige neue Fragen in Bezug auf die Zerkleinerung neuartiger Leichtbaustrukturen auf, die bei den bisherigen Fahrzeugstrukturen kaum auftreten.

Bei zunehmender Verwendung von sehr spröden und harten Vergütungsstählen im Fahrzeugbau gelangen diese auch in die derzeitigen konventionellen Aufbereitungswege. Bei den Werkzeugen wird zukünftig ein merklich höherer Verschleiß auftreten, der nicht nur die Hämmer betreffen wird und folglich längere Wartungs- und Stillstandszeiten der Maschinen nach sich ziehen wird.

Mit der Diversifizierung und Einführung neuartiger Werkstoffe werden zusätzliche Sortierschritte erforderlich, um die geforderten Reinheiten der Sortierfraktionen zu gewährleisten. Zudem treten faserverstärkte Kunststoffe auf, die gegenüber Stahlwerkstoffen einer sehr starken Zerkleinerungswirkung unterliegen. Insbesondere die

erzeugten Feinstfraktionen verteilen sich in der gesamten Anlage. Die duktilen Stähle weisen als Zerkleinerungsprodukt starke Verkugelungseffekte auf, in denen sich wiederum Störstoffe einlagern können. Sie benötigen zudem eine vergleichsweise hohe spezifische Zerkleinerungsarbeit.

Mit all den Argumenten erhöhen sich die Betriebskosten für die Zerkleinerungsmaschinen sowie das gesamte Aufbereitungsverfahren. Auf Grundlagen dieser durchgeführten Untersuchungen ist zu schlussfolgern, dass die neuartigen Werkstoffverbunde sich mit bestehenden Zerkleinerungsmaschinen zwar zerlegen lassen. Es ist jedoch zu erwarten, dass einerseits die Trennung der verschiedenen im Gemisch aufgeschlossen vorliegenden Materialien deutlich höheren Sortieraufwand erfordert und andererseits der spezifische Energieaufwand und Werkzeugverschleiß insbesondere durch neue Stahlsorten deutlich ansteigen werden.

Es sollte abschließend nochmals darauf hingewiesen werden, dass die gezeigten Ergebnisse sich ausschließlich auf Versuche mit einer kleintechnischen Hammermühle und mit einer vorgeschädigten hybriden B-Säule beziehen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollten unbedingt großtechnisch verifiziert werden.

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept *Forschung für die Produktion von morgen* (Förderkennzeichen 02PJ2760-02PJ2763) und mit Mitteln aus dem Energie- und Klimafonds gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

## 6. Quellen

- [1] DIN 66165: Partikelgrößenanalyse, Siebanalyse, Grundlagen. Deutsches Institut für Normung, 2004
- [2] Eickenbusch, H.; Krauss, O.: VDI-GME-Studie; Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung. 2014
- [3] Fendel, A.: Grußwort zur 3. FOREL Akademie: CFK, Aluminium und Co. – wie kann man Leichtbaustrukturen recyceln? Freiberg; Lünen: Freiburger Forschungshefte; A920; TU Bergakademie Freiberg; Lieberwirth, H. und Krampitz, T. (Hrsg.): Remondis Assets & Services GmbH & Co.KG, 2016
- [4] Gude, M.; Meschut, G.; Zäh, M. F.; Lieberwirth, H.: FOREL-Studie; Chancen und Herausforderungen im Ressourceneffizienten Leichtbau für die Elektromobilität. Dresden: TU Dresden Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, 2015
- [5] Gude, M.; Stegelmann, M.: FOREL\_Newsletter\_02\_2016. Dresden: TU Dresden; Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), 2016
- [6] Gude, M.; Stegelmann, M.; Kunz, T.: Tagungsband FOREL Kolloquium. Dresden: TU Dresden; Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), 2016
- [7] Krampitz, T.; Lieberwirth, H.: Recycling von Leichtbaustrukturen – Tendenzen in der Aufbereitungstechnik. Freiburger Forschungshefte; A920; CFK, Aluminium und Co. – wie kann man Leichtbau-Strukturen recyceln? Freiberg: TU Bergakademie Freiberg, 2016
- [8] Lieberwirth, H.; Krampitz, T.: Entwicklungstendenzen für den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen im Fahrzeug und Auswirkungen auf das Recycling. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann; D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 8. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015, S. 207-218

- [9] Lieberwirth, H.; Krampitz, T.: Neue Entwicklungen in der Aufbereitungstechnik. Lichtenwalde: Leibniz-Institut; 20<sup>th</sup> Leibniz Conference of Advanced Science; Recycling, 2016
- [10] Masseria, F.: Virtual Manufacturing Simulation Chain - Highlits aus dem Q-Pro Projekt. Dresden: FOREL Kolloquium; TU Dresden; Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK); Gude, M. (Hrsg.); ESI GmbH, 2016
- [11] Nestler, D.: Verbundwerkstoffe – Werkstoffverbunde. Chemnitz: TU Chemnitz; Habilitationsschrift, 2012
- [12] Reuss, I.; Kranz, U.: Elektroauto i3 kommt auf bis zu 300 km Reichweite, Einblicke in die i-Produktlinie von BMW. VDI Nachrichten, 2013
- [13] Schnutz, S.: Verfahrensentwicklung für die Aufbereitung stahlbasierter Leichtbaustrukturen im Multi-Material-Design aus dem Fahrzeugbau. Freiberg: TU Bergakademie Freiberg; Masterarbeit; Institut für Aufbereitungsmaschinen, 2016
- [14] Trechow, P.; Plath, A.: Leichtbau ist Königsdisziplin, Einblick in die VW-Konzernforschung, 3. VDI Fachkongress. VDI Nachrichten, 2013

# TEST-ABO

## RECYCLING MAGAZIN LESEN, WAS DIE BRANCHE BEWEGT

### 4 AUSGABEN GRATIS PROBELESEN

- ▶ Neueste Entwicklungen zu Technik, Wirtschaft, Politik und Recht
- ▶ Reportagen, Interviews, Marktanalysen
- ▶ alle 14 Tage neu



71. Jahrgang | B 5927 | Euro 10,90 | 16.11.2016 | Ausgabe 22

# RECYCLING

Trends, Analysen, Meinungen  
und Fakten zur Kreislaufwirtschaft

magazin

## Eine Schippe drauf

Das Recycling von Kunststoffabfällen ist eine der größten Herausforderungen der Branche. Aktuelle Studien zeigen, wie erfolgreich bereits recycelt wird – und wie es noch viel besser gehen könnte.

Gewerbliche Sammlung Polystyrol: Hohe Hürden BSW Stahlrohr hat eine Zukunft Bioabfall: Grünes Licht für Wiederverwertung BIR Durchhalteparolen und Einigen B&U- und Abbruchrecycling Wenn die Fügel lahm werden Indien: Mumbai setzt auf Verbrennung Bioabfall: Einstieg zum Aufstieg NE-Metalle Die Stimmung hebt sich auf

JETZT ONLINE ANFORDERN UNTER:  
[www.recyclingmagazin.de/probelesen](http://www.recyclingmagazin.de/probelesen)

**RECYCLING**  
magazin

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.):  
**Recycling und Rohstoffe – Band 10**

ISBN 978-3-944310-34-3 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2017  
Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.  
Erfassung und Layout: Claudia Naumann-Deppe, Janin Burbott-Seidel, Anne Kuhlo, Sandra Peters,  
Ginette Teske, Gabi Spiegel, Cordula Müller  
Druck: Universal Medien GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.