

Grundlagenuntersuchungen zur Zerkleinerung nicht-spröder Leichtbauwerkstoffe mittels Scher-Reißbeanspruchung

Rico Ebert, Thomas Krampitz und Holger Lieberwirth

1.	Zerkleinerungstechnik für nicht-sprödbrechende Werkstoffe	564
2.	Versuchsgrundlagen	564
2.1.	Modifiziertes Schlagwerk.....	564
2.2.	Einfluss- und Zielgrößen der Versuche.....	567
2.3.	Verwendete Werkstoffe.....	568
3.	Ergebnisdarstellung und Auswertung	569
3.1.	Betriebliche und konstruktive Einflussgrößen.....	569
3.2.	Versuche mit Leichtbauwerkstoffen	571
4.	Zusammenfassung und Ausblick.....	574
5.	Literatur.....	575

Resultierend aus dem Streben nach Gewichtsreduktion hat der Leichtbau bereits einen breiten Einzug in moderne technische Prozesse sowie Erzeugnisse gefunden und wird beispielsweise von der Automobilindustrie schon länger erfolgreich eingesetzt. Allerdings sind aufgrund der CO₂-Ziele der EU weitere Entwicklungen in diesem Bereich nötig, denn um bis 2020 den geforderten Grenzwert von 95 g/km zu erreichen, wird unter anderem die weitere Reduzierung der Fahrzeugmassen eine wichtige Rolle spielen [2].

Im Rahmen dieser Leichtbaubestrebungen nehmen im Werkstoffmix von Kraftfahrzeugen neben den hochfesten Stählen, die Leichtmetalle wie Aluminium oder Magnesium und die faserverstärkten Kunststoffe zunehmend größere Anteile ein [2, 3]. Dies wird fortschreitend zu einer Mischbauweise führen, welche zusammen mit dem vielfältigen Einsatz von Fügeverfahren eine enorme Herausforderung für das Recycling jener Fahrzeuge am Ende ihrer Nutzungsdauer darstellt. Denn die, laut der Altfahrzeug-Verordnung [7] seit 2015 geltende, Verwertungsquote von 95 Prozent lässt nur eine Beseitigung von fünf Prozent der Fahrzeugmassen zu.

Bei der Aufbereitung von Altfahrzeugen wird mit zunehmender Mischbauweise die Bedeutung der Zerkleinerungs- und Aufschlusstechnik eine stärkere Rolle einnehmen.

1. Zerkleinerungstechnik für nicht-sprödbrechende Werkstoffe

Für das mechanische Zerteilen von Werkstoffen müssen innere Bindungskräfte durch äußere Einwirkung überwunden werden. Über Kräfte und Momente werden die dafür erforderlichen Normal- und Schubspannungen erzeugt [4]. Aus der Literatur sind für die Rissausbreitung zwei Varianten bekannt. Dabei handelt es sich einerseits um ein sprödes und andererseits um ein nicht-sprödes Stoffverhalten. Hierbei resultiert der Spröbruch aus einer instabilen Rissausbreitung ohne weitere Energiezufuhr, während der nicht spröde Bruch aus einer stabilen Rissausbreitung mit ständigem Energieeintrag hervorgeht. Jedoch kann die stabile Rissausbreitung bei Erreichen der kritischen Risslänge auch in eine instabile umschlagen. Die Rissausbreitung wird neben den stofflichen Eigenschaften von der Beanspruchungsart und -geschwindigkeit, der Temperatur und der Körperform beeinflusst [6]. Nach Schubert zeichnet sich ein *sprödes* Materialverhalten durch eine überwiegend energieelastische Materialverformung bis zum Bruchbeginn aus, wobei das davon abweichende und je nach Werkstoff verschiedene Verformungsverhalten mit dem Begriff *nicht-spröde* bezeichnet wird. So sind Duroplaste, Glas und Gusseisen dem spröden Stoffverhalten zuzuordnen, wogegen Elastomere, Thermoplaste, Stahl und NE-Metallknetlegierungen als nicht-spröde einzuordnen sind [5]. Die Rissausbreitung ist für faserverstärkte Kunststoffe je nach Faser-Matrix-Kombination, Faserverteilung und Beanspruchungsrichtung differenzierter zu betrachten, da das Verformungsverhalten in Abhängigkeit der Faserlänge, Lage und des Anteiles der enthaltenen Fasern verschieden sein kann [1].

Für nicht-spröde Werkstoffe werden bei der Grob- und Mittelzerkleinerung überwiegend die Beanspruchungsarten Schneiden, Scheren, Reißen (Zugbeanspruchung in Kombination mit Biegung und Torsion) und gegebenenfalls Biegung angewendet. Diese kommen großtechnisch beispielsweise in Rotorschneidern, Rotorscheren und Rotorreißern zum Einsatz [5].

2. Versuchsgrundlagen

2.1. Modifiziertes Schlagwerk

Das verwendete modifizierte Schlagwerk ermöglicht durch seinen modularen Aufbau die Ausführung der Grundbeanspruchungsarten Scheren, Schneiden, Reißen und Biegung und damit die idealisierte Nachbildung der in Zerkleinerungsmaschinen für nicht-spröde Stoffe wirkenden Beanspruchungsarten. Die besondere Eignung des Schlagwerkes für diese Untersuchungen resultiert aus der variablen Rotormesser- und Statorgestaltung, welche je nach gewünschter Beanspruchung einzeln angepasst werden können. Der Aufbau und die Komponenten des Schlagwerkes sind in Bild 1 dargestellt.

Die Hauptkomponenten des Schlagwerkes bilden das Grundgerüst, der Stator (Probeneinspannung) und das Schlagpendel. Es enthält an den Seiten der Pendellagerung die handradbetriebene Fallhöhenverstellung und eine Schleppzeigeruhr zum Ablesen der aktuellen und maximal erreichten Winkelposition des Pendelarmes. Der Stator bildet die Probenhalterung des Schlagwerkes und besteht aus den Komponenten

Amboss mit wechselbarem Balken, Spannvorrichtung und Gegenhalterung. Die Fixierung der Proben erfolgt über Verspannung der pneumatischen Balgzylinder mit verstellbaren Anpresskräften von bis zu 25 kN. Durch den austauschbaren Ambossbalken ist dieser in gerader und kammartiger Ausführung und somit für verschiedene Beanspruchungsbedingungen einsetzbar. Für die Versuche wurden zwei verschiedene Beanspruchungsgeometrien eingesetzt, deren Spezifikationen in Tabelle 1 zusammengefasst sind. Die gerade Einspannung des Schlagwerkes eignet sich dabei für Versuche zu den Grundbeanspruchungsarten Scheren und Schneiden, wohingegen der U-förmige Amboss des Schlagwerkes die Beanspruchungsgeometrie einer kombinierten Reiß-Scherbeanspruchung vergleichbar mit einer zweirotorigen Axialspalt-Rotorschere erzeugt. Die entsprechenden Spaltweiten können je nach Schlagwerk stufenlos in den angegebenen Bereichen verstellt werden.

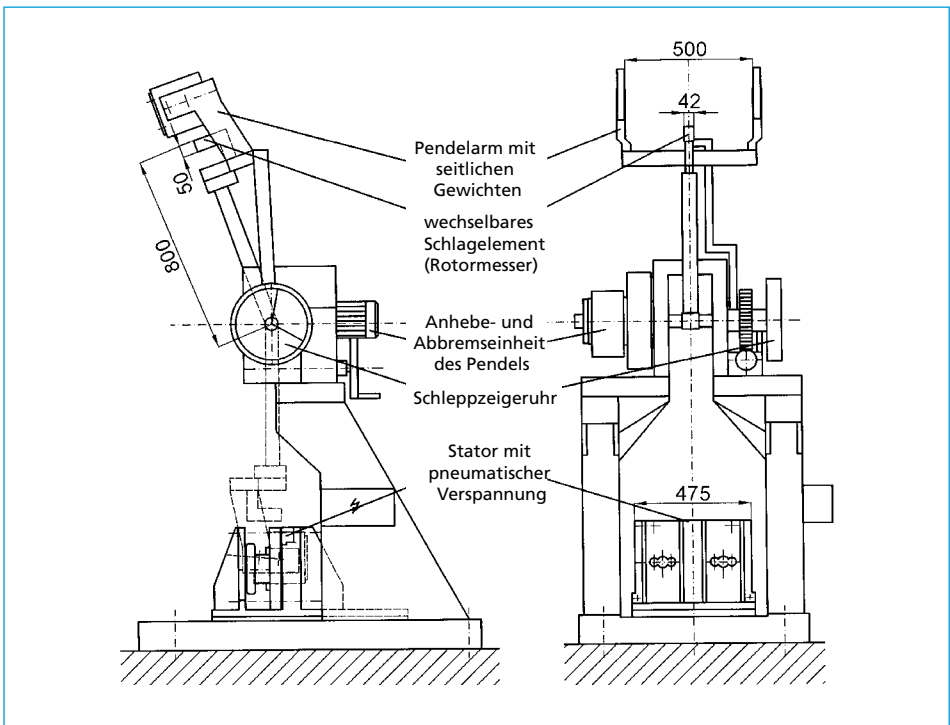
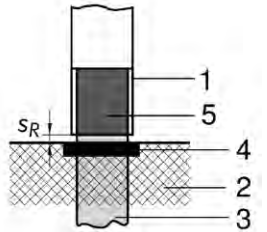
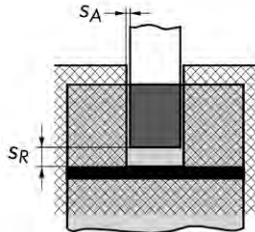


Bild 1: Aufbau des Schlagwerkes

Quelle: Woldt, D.: Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe in Rotorscheren und -reißern. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2004, bearbeitet

Das Schlagpendel ist reibungsarm gelagert und kann beidseitig bis zu 155° ausgelenkt werden. Die Masse des Schlaghammers beträgt näherungsweise 50 kg. Somit stehen nach maximaler Auslenkung im unteren Totpunkt 750 J Beanspruchungsenergie bei einer Geschwindigkeit des Hammers von 5,5 m/s zur Verfügung. Mittels Handradverstellung des Haltearms kann die Fallhöhe des Schlagpendels variiert und damit die gewünschte Beanspruchungsenergie oder -geschwindigkeit eingestellt werden.

Tabelle 1: Für die Zerkleinerungsversuche verwendete Beanspruchungsgeometrien

	 <p>1 – Rotormesser 2 – Amboss 3 – Probekörper 4 – Einspannung 5 – Bruchstück</p>	
Bezeichnung	Gerade Einspannung	U-Einspannung
Beanspruchungsmöglichkeiten	Grundbeanspruchungsarten Scheren, Schneiden, Biegen, Reißen	Reiß-Scherbeanspruchung (Axialspalt-Rotorschere)
Radialer Spalt s_R mm	0 bis 5	20 (konstant)
Axialer Spalt s_A mm	–	0 bis 20

Quelle der Bilder: Woldt, D.: Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe in Rotorschern und -reißern. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2004

Die Schlagwerkzeuge (Rotormesser) sind mit dem Schlagpendel am Hammer verschraubt und können bei Bedarf flexibel ausgetauscht werden. Dabei wurden für die Versuche zwei Rotormesser unterschiedlicher Geometrie eingesetzt, deren Kenndaten in Tabelle 2 zusammengefasst sind. Während das Schermesser für die Analyse der Scherbeanspruchung verwendet wurde, diente das Keilmesser zur Untersuchung der Zerkleinerung in der Rotorscheregeometrie.

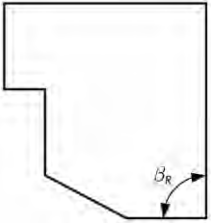
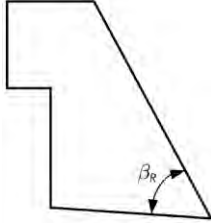
	Schermesser	Keilmesser
Bezeichnung	RM90	RM58
Freiwinkel	0°	3°
Keilwinkel β_R	90°	58°
Schneidkantenradius	0,1 mm	0,1 mm
		

Tabelle 2:

Kenndaten der eingesetzten Rotormesser

Mittels der von der Schlepplanze abgelesenen Werte wurde die Beanspruchungsenergie ermittelt, welche für die Zerkleinerung der Probe nötig war. Die Beanspruchungsenergie W_B berechnet sich dabei aus Gleichung 1. Mit der Leerlaufenergie (W_{leer})

erfolgte die Berücksichtigung der gerätebedingten Verluste (z.B. Lagerreibung), wobei die Leerlaufversuche vor jeder neuen Versuchseinstellung durchgeführt und die entsprechenden Verlustenergien analog mittels Gleichung 1 bestimmt wurden.

$$W_B = m_H \cdot g \cdot L_{SP} \cdot (\cos \beta_{SP} - \cos \alpha_{SP}) - W_{Leer} \quad (1)$$

α_{SP} Auslenkwinkel des Schlagpendels

β_{SP} Steigwinkelwinkel des Schlagpendels

L_{SP} Länge Schlagpendel

m_H Hammermasse

Zur Auswertung der durchgeführten Zerkleinerungsversuche erfolgte der Bezug der nach Gleichung 1 berechneten Beanspruchungsenergien auf eine Referenzgröße, um den jeweiligen spezifischen Energiebedarf zu ermitteln. Hierfür wurde die Querschnittsfläche A_Q des von den Schlagwerkzeugen beanspruchten Probenabschnittes als Bezugsfläche gewählt (Bild 2), womit sich die querschnittsbezogene Beanspruchungsenergie $w_{B,Q}$ aus der Division von W_B durch A_Q ergibt.

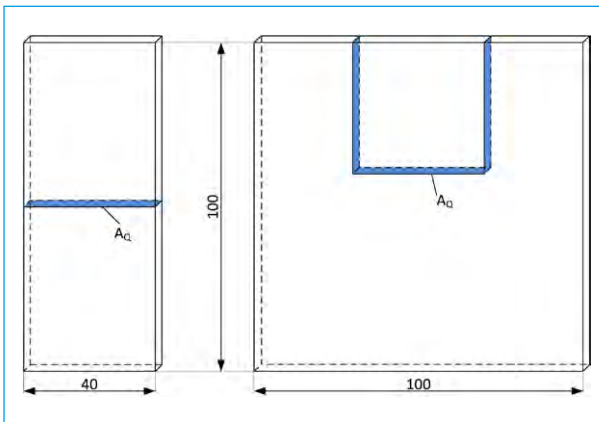


Bild 2:

Probenabmessungen und Definition der Bezugsfläche

2.2. Einfluss- und Zielgrößen der Versuche

Die Einfluss- und Zielgrößen der Untersuchungen gliedern sich folgendermaßen:

- Stofflich:
 - * Probenwerkstoff
 - * Probenwandstärke
- Konstruktiv:
 - * Beanspruchungsgeometrie
 - * Spaltweite (axial/radial)
 - * Rotormesser
- Betriebsbedingt
 - * Beanspruchungsgeschwindigkeit

Als Zielgröße für die Auswertung der Zerkleinerungsversuche diente die querschnittsflächenbezogene Beanspruchungsenergie, welche den Vergleich zwischen den ebenen Probekörpern unterschiedlicher Werkstoffe und Wandstärken ermöglicht.

2.3. Verwendete Werkstoffe

Für die Durchführung der Zerkleinerungsversuche wurden die Werkstoffe Aluminium (AL99,5); Polyamid (PA 6); Aluminiumknetlegierung (AlMg₃) und Stahl (Sorte S235) mit den in Tabelle 3 zusammengefassten mechanischen Eigenschaften verwendet. Die Proben dieser Materialien wurden aus großflächigen Blechen bzw. Platten gefertigt.

Tabelle 3: Mechanische Eigenschaften und Wandstärken der untersuchten Werkstoffe

Material		Aluminium AL99,5	Polyamid PA6	Al-Legierung AlMg ₃	Stahl S235
Zugmodul E	N/mm ²	69.000	1.800	70.000	210.000
Zugfestigkeit R _m	N/mm ²	105-145	–	220-270	360-510
Streckgrenze R _p	N/mm ²	–	60	–	235
Dehngrenze R _{p0,2}	N/mm ²	> 85	–	> 130	–

Ergänzend zu den bereits aufgeführten Werkstoffen standen zusätzlich faserverstärkte Kunststoffe für Zerkleinerungsversuche zur Verfügung. Diese gliedern sich in vier Proben unterschiedlicher Herkunft mit Kohlenstofffaserverstärkung (CFK) und drei mit Glasfaserverstärkung (GFK), deren Eigenschaften, soweit vorhanden, in Tabelle 4 zusammengefasst sind. Bei den CFK und GFK Werkstoffen handelte es sich einerseits um Neuware mit bekannten Eigenschaften (Datenblätter) und andererseits um Produktions- oder Nutzungsabfälle ohne bekannte Eigenschaften. Des Weiteren stammten die Materialien CFK 2 und CFK 4 von Anwendern aus der Automobilindustrie. Teilweise konnte aufgrund fehlender Angaben keine genauere Spezifizierung vorgenommen werden.

Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften der untersuchten Faserverbundkunststoffe

Material	CFK 1	CFK 2	CFK 3	CFK 4	GFK 1	GFK 2	GFK 3
Matrix	PA6	Duroplast	EP	EP	PA6	PA6	PP
Fasern	Kohlenstofffasern			CF-HT	Glasfasern		
	Langfasern	Gelege	Gelege mit Gewebe- deckschichten	Gelege	Kurzfasern	Gewebe	Kurzfasern
Faseranteil Ma.-%	30	–	~ 60	–	30	~ 68	30
Zugmodul E N/mm ²	–	–	–	–	6.100	21.500- 22.400	6.800
Zugfestigkeit R _m N/mm ²	–	–	–	–	105	390-404	97
Streckgrenze R _p N/mm ²	280	–	–	–	–	–	–

EP: Epoxidharz PP: Polypropylen

3. Ergebnisdarstellung und Auswertung

3.1. Betriebliche und konstruktive Einflussgrößen

Zunächst erfolgte die Untersuchung mit Variation der Parameter Spaltweite, Beanspruchungsgeschwindigkeit und Werkzeuggeometrie (Beanspruchungsart) bei konstanten Stückmerkmalen der Proben (Wandstärke 2 mm und Breite 40 mm). Die Parameter sind in Tabelle 5 ersichtlich, wobei die Versuchspunkte dreifach wiederholt wurden.

Beanspruchungsgeometrie	Gerade Einspannung	U-Einspannung
Rotormesser	Schermesser	Keilmesser
Radiale Spaltweite s_R mm	0,2; 0,6; 1,0	20
Axiale Spaltweite s_A mm	-	0,4; 1,2; 2,0
Beanspruchungsgeschwindigkeit m/s	1,0; 3,0; 5,0	2,0; 3,5; 5,0

Tabelle 5:

Parameter des ersten Versuchsabschnittes

Scherbeanspruchung (gerade Einspannung und Schermesser)

Am Beispiel von Aluminium (Al99,5) soll der Zusammenhang zwischen der querschnittsbezogenen Beanspruchungsenergie und der Spaltweite für unterschiedliche Beanspruchungsgeschwindigkeiten in Bild 3 dargestellt werden. Obwohl mit steigender Beanspruchungsgeschwindigkeit mehr Energie für die Beanspruchung zur Verfügung steht, ist daraus zu erkennen, dass die erforderliche spezifische Energie für die Zerteilung der Probe annähernd gleich blieb. Daraus lässt sich ableiten, dass für die Zerteilungsenergie in Abhängigkeit von Wandstärke und dem radialen Spalt ein Mindestaufwand erforderlich wird, der weitgehend unabhängig von der Beanspruchungsgeschwindigkeit ist.

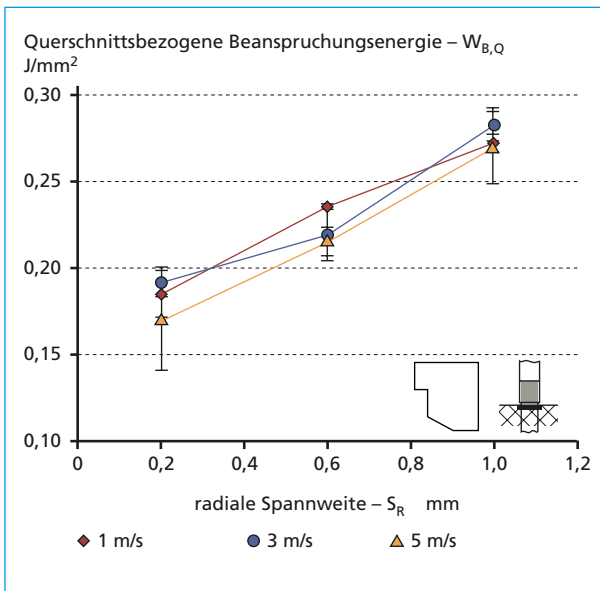


Bild 3:

Einfluss des radialen Spaltes auf die querschnittsbezogene Beanspruchungsenergie bei Al99,5 für verschiedene Beanspruchungsgeschwindigkeiten (Wandstärke = 2 mm)

Es muss für die Zerteilung daher eine ausreichende Energie zugeführt werden, unabhängig von der aufgebracht Geschwindigkeit. Dies gilt solange die Beanspruchungsart gleich bleibt. Dagegen wirkt sich ein größerer radialer Spalt deutlich auf die spezifische Beanspruchungsenergie aus. So erzeugt die Öffnung des Spaltes auf einen Millimeter, welcher der halben Probenwandstärke entspricht, im Vergleich zur reinen Scherbeanspruchung bei $s_R=0,2$ mm einen zusätzlichen Energiebedarf von 51 Prozent. Dies drückt sich auch durch starke Materialverformungen im Spalt aus.

Ein ähnlicher Zusammenhang ergab sich auch für den anderen untersuchten Werkstoff Polyamid (PA6). Für das PA6 waren unter gleichen Bedingungen geringere spezifische Beanspruchungsenergien für das Zerteilen der Probe erforderlich. Hierbei stellte sich ebenfalls bei der geringsten eingestellten Spaltweite die niedrigste Beanspruchungsenergie unabhängig der verwendeten Geschwindigkeit ein.

Mit den Ergebnissen können die Versuche von WOLDT [8] mit den Werkstoffen Aluminiumlegierung (AlMg₃) und Polypropylen (PP) bestätigt werden.

Reiß-Scherbeanspruchung (U-Einspannung, Keilmesser)

Weitere Versuche erfolgten mit einer U-Einspannung der Proben, einem gleichbleibenden radialen Spalt von 20 mm und einem variierten axialen Spalt zwischen 0,4 und 2 mm. Als Werkzeuggeometrie wurde das Keilmesser eingesetzt. Die große radiale Spaltweite von 20 mm führte zu einer Reißbeanspruchung in Verbindung mit einem Abscheren der Probe am axialen Spalt (kombinierte Reiß-Scherbeanspruchung). Mit Vergrößerung der axialen Spalteinstellung tritt auch eine zunehmende Reißbeanspruchung am axialen Spalt ein. Dies führt zu spezifisch höheren Zerkleinerungsenergien wie sie in Bild 4 ersichtlich werden.

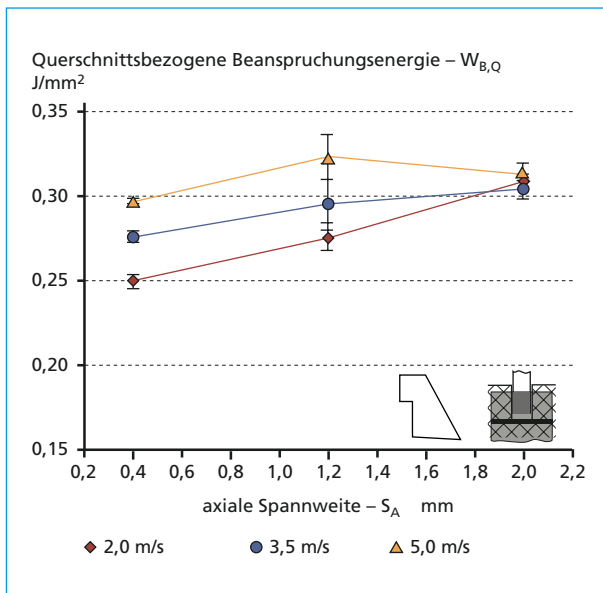


Bild 4:

Einfluss des axialen Spaltes auf die querschnittsbezogene Beanspruchungsenergie bei Al99,5 für verschiedene Geschwindigkeiten ($w = 2$ mm)

Für das Zerteilen der Aluminiumprobe in der U-Einspannung bedarf es bei einer minimalen axialen Spaltweite den geringsten Energiebedarf. Bei den durchgeführten Versuchen war zudem ein geringer Geschwindigkeitseinfluss auf die Energieaufnahme bis zum Zerteilen messbar. Mit steigender Beanspruchungsgeschwindigkeit stieg der erforderliche Energieaufwand für die Probenzerteilung an. Aufgrund des Abstandes von 20 mm zwischen Einspannung und Einwirkung des Keilmessers wird eine Biegung der Probe erzeugt. Dadurch findet eine Energieaufnahme in der Probe statt, die sich in elastischer Verformung oder einer Deformation der Probe wiederfindet. Beim Reißen erfolgt eine überlagerte Beanspruchung (Zug in Verbindung mit Biegung und Torsion) statt. Unterschiedliche Beanspruchungsgeschwindigkeiten führen somit zu leicht unterschiedlichen Beanspruchungsbedingungen und damit zu einer leicht unterschiedlichen Energieaufnahme bis zum Zerteilen der Probe. Für das Zerteilen der Probe wäre somit eine geringe Beanspruchungsgeschwindigkeit ausreichend gewesen. Eine höhere Beanspruchungsgeschwindigkeit führt zu einer unnötigen Energieaufnahme, die sich unter anderem in einer ungewollten Deformation wiederfindet.

Für das untersuchte Polyamid zeigte sich ein ähnlicher Zusammenhang, wobei plastische Verformungen nur an den erzeugten Bruchflächen und nicht durch Verformung der Bruchstücke auftraten. Die Beanspruchungsgeschwindigkeit hatte kaum Einfluss auf die erforderliche spezifische Zerkleinerungsenergie, allerdings war die Beanspruchung bei geringer axialer Spaltweite durch die geringsten spezifischen Zerkleinerungsenergien gekennzeichnet.

3.2. Versuche mit Leichtbauwerkstoffen

Die Versuchsdurchführung entsprach der bisherigen Vorgehensweise. Bei der Auswertung diente Stahl (S235) als Referenzwerkstoff. Um eine Vergleichbarkeit der Leichtbauwerkstoffe herzustellen, fanden die Versuche unter konstanten Bedingungen statt, wobei für die Beanspruchungsgeschwindigkeit 3 m/s und für den radialen Spalt 0,2 mm (Scherbeanspruchung) eingestellt wurden. Für die U-Einspannung wurden die Spaltweiten 20 mm (radial) und 0,4 mm (axial) verwendet. Die Ergebnisse für die erforderliche querschnittsbezogene Beanspruchungsenergie der Probenzerteilung sind in Abhängigkeit von der Wandstärke aufgetragen. Die Stückabmessungen blieben konstant.

Scherbeanspruchung (gerade Einspannung, Schermesser)

Anhand der Darstellung der Ergebnisse für unterschiedliche Leichtbauwerkstoffe in Bild 5 ist zu erkennen, dass der Zerkleinerungsenergiebedarf proportional zur Wandstärke ansteigt. Das heißt, es gibt einen funktionalen Zusammenhang zwischen Wandstärke und der erforderlichen spezifischen Zerkleinerungsenergie für das Zerteilen der Werkstoffproben.

Der Werkstoff Stahl erforderte die höchste spezifische Zerkleinerungsenergie von den untersuchten Werkstoffen und zeigte zudem auch den größten Einfluss durch Veränderung der Wandstärke. Dagegen waren für das Leichtmetall Aluminium und dessen Knetlegierung geringere Energieaufwendungen für das Zerteilen erforderlich. Das untersuchte Polyamid lag nochmals unterhalb der Leichtmetalle.

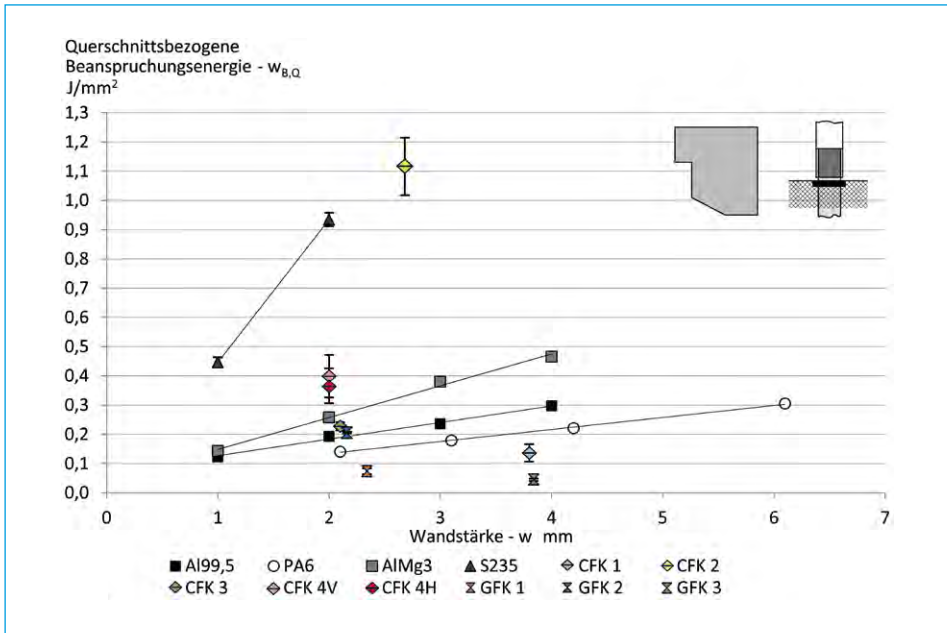


Bild 5: Querschnittsbezogene Beanspruchungsenergie der untersuchten Werkstoffe bei Zerkleinerung in der geraden Einspannung mit dem Schermesser

Die untersuchten Faserkunststoffverbunde (FKV) lagen in gebrauchtsabhängigen Wandstärken ohne Wandstärkenvariation vor. Es ist ersichtlich, dass bei einer Scherbeanspruchung der untersuchten kurz- und langfaserverstärkten Thermoplaste nur sehr geringe Beanspruchungsenergien für das Zerteilen der Proben erforderlich waren. Teilweise lagen die ermittelten Werte unterhalb der des Polyamides. Die eingelagerten Fasern bildeten somit zusätzliche Stellen für die Rissbildung in der Matrix und führten bei dieser Beanspruchungsart damit zur Schwächung des Gesamtverbundes.

Die endlosfaserverstärkten Kunststoffe ordnen sich im Bereich der Leichtmetalle bis leicht darüber ein, wobei die Verbundwerkstoffe mit zufälliger Faserausrichtung beansprucht wurden und dies an einer größeren Schwankungsbreite erkennbar wird.

Die Probe CFK 2 mit einem Kohlenstofffasergelege und einer Epoxidmatrix stellte mit einer sehr hohen spezifischen Zerkleinerungsenergie für die Probenzerteilung ein Extrembeispiel unter den Faserverbundwerkstoffen dar, der mit dem Werkstoff Stahl vergleichbar ist.

Somit ist zu vermerken, dass die Verbundwerkstoffe aufgrund ihrer vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten keinem Werkstoffbereich zugeordnet werden kann. Die CFK-Werkstoffe decken in Abhängigkeit von Faserverstärkung und Strukturaufbau den gesamten Bereich zwischen Kunststoff und Stahl ab. Für die Zerkleinerung von CFK-Abfällen lassen sich daher kaum verlässliche Angaben über die erforderliche Zerkleinerungsenergien ableiten. Je nach Herkunft kann für die Zerkleinerung von CFK ein verminderter oder extrem hoher Aufwand erforderlich werden.

Reiß-Scherbeanspruchung (U-Einspannung und Keilmesser)

Vergleichbare Versuche wurden mit der U-Einspannung durchgeführt. Für die verwendeten Metalle als auch für die Kunststoffe ergaben sich mit der Beanspruchung in der Rotorscheregeometrie ähnliche Zusammenhänge wie mit der Scherbeanspruchung, wobei die erforderliche Zerkleinerungsenergie bei den unverstärkten Werkstoffen um bis zu 30 Prozent anstieg. Die komplexe Reißbeanspruchung führt somit zu einem höheren spezifischen Energieverbrauch für das Zerteilen der verwendeten Proben als mit dem Schermesser. Ein völlig anderes Bild ergibt sich bei der Betrachtung der Faserverstärkten Kunststoffe. Bei einer Reißbeanspruchung der FKV ist für das Zerteilen der Proben eine sehr viel geringere spezifische Zerkleinerungsenergie erforderlich als bei der Scherbeanspruchung. Aus den Versuchen ergab sich eine Reduktion um 15 bis 35 Prozent gegenüber der Scherbeanspruchung. Auch bei der Probe CFK 2 mit einem Kohlenstoffasergelege und einer Epoxidmatrix ergab sich eine Reduktion von > 80 Prozent gegenüber der Beanspruchung mit dem Schermesser. Die ermittelten spezifischen Zerkleinerungsenergien ordneten sich im Bereich der Kunststoffe (hier Polyamid) ein. Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass bei einer Reiß-Scherbeanspruchung sich die spezifischen Zerkleinerungsenergien der FKV in einem Bereich vergleichbar mit Kunststoffen einordnen.

Während bei der Beanspruchung metallischer Werkstoffe stets rechteckigen Bruchstücke ausgeschlagen wurden (U-Form), führte die Reißbeanspruchung der Faserverbunde zu teilweise unregelmäßigen Rissausbreitungen. Die dabei neu entstandenen Bruchflächen variieren sehr stark und zeigen zum Teil zerfaserte Risskanten. Teilweise war bei den Fasergelegen eine Delamination zwischen Gelegeebenen erkennbar.

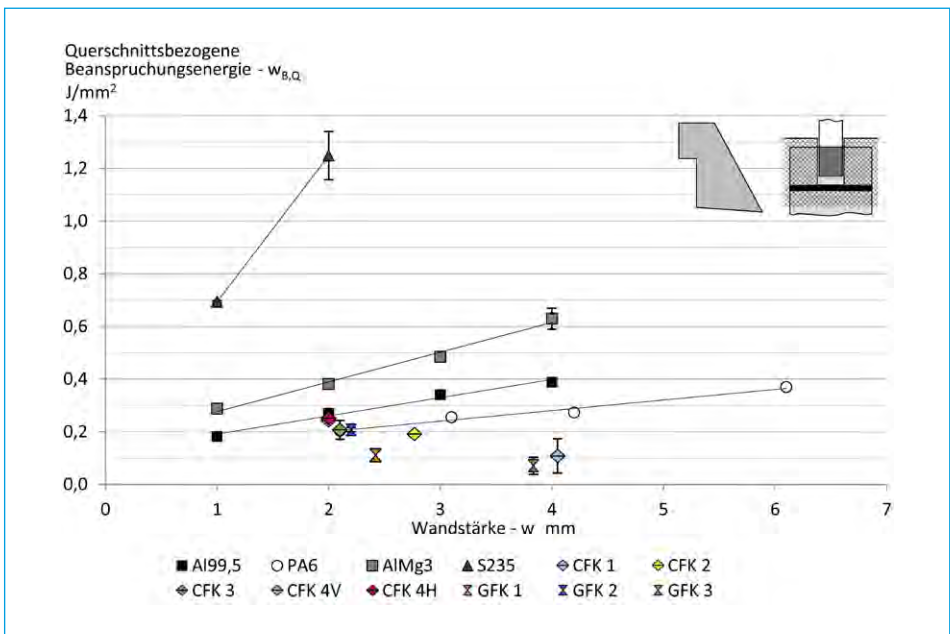


Bild 6: Querschnittsbezogene Beanspruchungsenergie der untersuchten Werkstoffe bei Zerkleinerung in der U-Einspannung mit dem Keilmesser

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Versuche zur Zerkleinerung von Leichtbauwerkstoffen zeigten, dass unter idealisierter Beanspruchung stoffspezifische Zerkleinerungsenergien erforderlich werden, die vor allem mit konstruktiven Parametereinstellungen beeinflusst werden können. Für den Betriebseinsatz bzw. großtechnische Anwendung können folgende Vorschläge abgeleitet werden:

Unabhängig von der Beanspruchungsart sollte ein möglichst geringer Spalt eingestellt werden. Dies deckt sich mit den Untersuchungen von Woldt mit der Vorgabe, dass die Spaltweite die halbe Wandstärke des Aufgabegutes nicht übersteigen sollte.

Auf Grund von Verschleiß lässt sich dies unter großtechnischen Bedingungen kaum durchgängig realisieren. Mit Zunahme des Spaltes ergibt sich somit eine Reißbeanspruchung.

Bei den Versuchen zeigte sich, dass die spezifischen Beanspruchungsenergien bei der Zerkleinerung von faserverstärkten Kunststoffen mittels einer parallelkantigen Scherung, wie sie bei der geraden Einspannung und dem Schermesser auftritt, in einem weiten Bereich streuen. Dagegen erwies sich die kombinierte Beanspruchung aus Reißen und Scheren mit kreuzenden Scherkanten, wie sie beispielsweise bei den Axialspalt-Rotorscheren zu finden ist, als deutlich günstiger für die Zerkleinerung besonders endlosfaserverstärkter Kunststoffe. Es gilt weiterhin zu untersuchen, ob durch geringere Beanspruchungsgeschwindigkeiten durchgehend günstige Rissausbreitungen erzielen lassen und wie sich der Energiebedarf dabei verhält.

Weiterhin ist eine Mindestenergie für die Zerkleinerung erforderlich, welche für die untersuchten Materialien Aluminium und Polyamid weitgehend unabhängig von der verfügbaren Energie ist, wobei dies nur gilt, solange der Betrag der verfügbaren größer als der der Mindestenergie ist. Die Beanspruchungsgeschwindigkeit hat im untersuchten Bereich daher kaum Einfluss auf die Zerkleinerung. Dies gilt nur für die untersuchten Beanspruchungsarten.

In zukünftigen Untersuchungen wird die weitere Charakterisierung verschiedener Leichtbauwerkstoffe unter Erweiterung der Beanspruchungsarten der mechanischen Zerkleinerung erfolgen und deren Erkenntnisgewinn in Forschungsprojekte einfließen. Somit trägt dies zu dem Forschungs- und Technologiezentrum für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen der Elektromobilität (FOREL) im Bereich der Aufbereitung und Zerkleinerung bei.

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept *Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen* (Förderkennzeichen 02PJ2760 – 02PJ2763) und mit Mitteln aus dem Energie- und Klimafonds gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

5. Literatur

- [1] Dittmann, R.: Hochwertige Verwertung faserverstärkter Thermoplaste. Dissertation, RWTH Aachen, 1998
- [2] Hartbrich, I.; Henrichs M.: Man kommt mit Stahl schnell an die Grenze der Machbarkeit. In: VDI nachrichten 51/52 (2014), S. 32-33
- [3] Lieberwirth, H.; Krampitz, T.: Entwicklungstendenzen für den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen im Fahrzeugbau und Auswirkung auf das Recycling – Auswertung der FOREL Studie Elektromobilität. In: Thomé-Kozmiensky, K.-J., Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 7, Nietwerder: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015
- [4] Schubert, G.: Aufbereitung metallischer Sekundärrohstoffe. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1984
- [5] Schubert, G.: Zerkleinerungstechnik für nicht-spröde Abfälle und Schrotte. Aufbereitungs-Technik 43 (2002) 9, S. 6-23
- [6] Schubert, H.: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. Bd. 1, 4. Stark überarbeitete Auflage. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1989
- [7] Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen (Altfahrzeug-Verordnung – AltfahrzeugV) vom 05.12.2013 (BGBl. I S. 4043)
- [8] Wolde, D.: Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe in Rotorscheren und -reißern. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2004



- ▶ fördertechnik
vibroconveyor technology
- ▶ siebtechnik
screening technology
- ▶ magnettechnik
magnetic technology
- ▶ **umwelttechnik**
environmental technology
- ▶ systemtechnik
system technology



VARIOMAT:
Spezialmüllsieb
in Doppeldeck-
ausführung

VARIOMAT:
Special waste
screen in double
deck design

the face of environmental technology

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 8

ISBN 978-3-944310-20-6 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2015
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky
Erfassung und Layout: Ginette Teske, Sandra Peters, Carolin Bienert, Janin Burbott,
Max Müller, Cordula Müller
Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München 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.