

Weima Maschinenbau GmbH, Ilsfeld

**Werkstoffliche Verwertung lang- und
endlosfaserverstärkter Thermoplaste zu hochwertigen,
langfaserverstärkten Fließpreß-Bauteilen**

Abschlußbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 09220 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Viktor Mattus
Dipl.-Ing. Rupert Hintersteiner
Dipl.-Ing. Jan Meier-Kortwig
Dipl.-Ing. Stefan Buntenbach

April 1999

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	09220/	Referat	(21/0)	Fördersumme	409.900,00 DM
Antragstitel	Werkstoffliche Verwertung lang- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste zu hochwertigen, langfaserverstärkten Fließpreß-Bauteilen				
Stichworte	Verfahren, Zerkleinerung, Anlagen, Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV), Faserlänge, Recycling				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
1 Jahr und 3 Monate	01.10.1997	31.01.1999	keine		
Zwischenberichte	quartalsweise: (01.02.98, 01.05.98, 01.08.98, 01.11.98)				
Bewilligungsempfänger	Weima Maschinenbau GmbH Gewerbegebiet Bustadt 74360 Ilsfeld		Tel (0 70 62) 95 70-20 Fax (0 70 62) 95 70-90		
			Projektleitung Herr Fischer		
			Bearbeiter		
Kooperationspartner	Institut für Kraftfahrwesen Aachen, RWTH Aachen, 52074 Aachen Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Uni Kaiserslaut., 67663 Kaiserslautern Institut für Aufbereitung, RWTH Aachen, 52062 Aachen Kannegiesser KMH Kunststofftechnik GmbH, 32429 Minden Menzolit-Fibron GmbH, 75015 Bretten Ticona GmbH, 65444 Kelsterbach BASF AG, 67056 Ludwigshafen				
Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens					
<p>Ziel des Projektes war die Entwicklung einer Aufbereitungs- und Verarbeitungstechnik für lang- und endlosfaserverstärkte Thermoplaste zu hochwertigen, langfaserverstärkten Fließpreß-Bauteilen. Dabei sollten die zu verwertenden Materialien in einer schonenden, auf den Erhalt einer großen Faserlänge ausgelegten Aufbereitung zu grobstückigem Mahlgut zerkleinert werden. Die Verarbeitung des Kreislaufmaterials erfolgte im neuartigen BONDPRESS-Verfahren bzw. im Plastifizierpreß-Verfahren. Für beide Ansätze war die Herstellung eines grobstückigen Mahlgutes von besonderer Bedeutung, da die resultierenden Bauteileigenschaften maßgeblich von der Faserlänge bestimmt werden. Hierbei kam insbesondere dem eingesetzten Zerkleinerungsaggregat eine zentrale Bedeutung zu.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Im ersten Arbeitsschritt wurden auf industriellen Anlagen Bauteile im Fließpreß- und Plastifizierpreß-Verfahren hergestellt. An einem Teil der Bauteile wurden statische und dynamische Prüfungen durchgeführt, wobei auch thermische Analysen und mikroskopische Untersuchungen zur Auswertung dienten. Aus den gewonnenen Daten wurde ein Anforderungskatalog für die Rezyklat-Bauteile erstellt. Im zweiten Arbeitsschritt wurden die Bauteile mit Hilfe unterschiedlicher Maschinen zerkleinert und eine speziell auf das Mahlgut abgestimmte Klassierung mit Kornform- und Korngrößenanalyse vorgenommen. Außerdem fand eine Bewertung der einzelnen Zerkleinerungsmaschinen auf ihre Eignung zur Zerkleinerung von faserverstärkten Thermoplasten statt. Im dritten Arbeitsschritt wurden die Rezyklate im BONDPRESS- bzw. Plastifizierpreß-Verfahren zu Testplatten verarbeitet und anschließend mechanischen Prüfungen unterzogen. Anhand der Ergebnisse konnte eine erste Bewertung der Rezyklate vorgenommen werden. Des weiteren wurden beide Verarbeitungsverfahren auf den Einsatz der Rezyklate zugeschnitten und optimiert, sowie die Grenzen für bestimmte Verarbeitungsparameter ermittelt. Im vierten Arbeitsschritt wurde eine Herstellung und Prüfung von Bauteilen aus Rezyklat vorgenommen, um die Optimierung der Aufbereitung und Bauteilherstellung umfassend vornehmen zu können. Dieser Schritt ermöglichte eine eindeutige Bewertung der Rezyklatbauteile im Vergleich zu Neuwarebauteilen. Im fünften Arbeitsschritt wurde der Versuch unternommen, das gesamte Vorgehen auf die Verwertung endlosfaserverstärkter Thermoplaste zu langfaserverstärkten Fließpreß-Bauteilen zu übertragen.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190					

Ergebnisse und Diskussion

Da Erkenntnisse über den Einfluß der Rezyklatchipgröße auf die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen fehlen, wurden zunächst grundlegende, systematische Untersuchungen an Organoblech-, GMT- und LFG-Rezyklaten mit definierten Chipabmessungen durchgeführt. Wie die Ergebnisse zur Abhängigkeit der mechanischen Kennwerte von der Rezyklatchipgröße an FKV mit nicht-gebundenen Fasern (GMT, LFG) zeigten, lassen sich im Vergleich zu anderen Verwertungskonzepten im **BONDPRESS-Verfahren** Bauteile mit hervorragenden Eigenschaften herstellen. Gründe hierfür sind der **Erhalt großer Faserlängen** und die **geringen thermischen und mechanischen Beanspruchungen** während des gesamten Prozesses.

Dagegen erwies sich das BONDPRESS-Verfahren für FKV mit chemisch oder mechanisch gebundenen Fasern, wie z. B. Organobleche, als weniger geeignet, da die bestehenden Verstärkungsstrukturen durch die geringen Fließkräfte nur unzureichend oder gar nicht aufgelöst werden und eine Vereinzelung der Fasern nicht stattfindet. Die Herstellung eines homogenen Verbundes mit reproduzierbaren Eigenschaften ist für Organobleche im BONDPRESS-Verfahren nicht möglich.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß für die einzelnen mechanischen Kennwerte eine minimale Chipgröße existiert, ab der eine weitere Vergrößerung der Abmessungen zu keiner nennenswerten Zunahme führt. Die größten Abhängigkeiten zeigten dabei die zähigkeitsbestimmenden Kennwerte Durchstoßarbeit und Schlagzähigkeit. Für diese wurde eine optimale **Chipgröße von 60 x 60 mm** ermittelt.

Diese Chipgröße wurde als **Idealziel der Zerkleinerung** angenommen. Auf der Basis grundlegender Untersuchungen zur Zerkleinerung lang- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste wurde die Konzeption eines Zerkleinerungsaggregates vorgenommen, welches die Herstellung eines Zerkleinerungsgutes mit einer möglichst engen Korngrößenverteilung um den Bereich 60 x 60 mm ermöglicht. Nach umfangreichen Testreihen wurde entschieden, die Weiterentwicklung eines **Einwellenzerkleinerers** voranzutreiben, da dieses Aggregat für die gegebene Zerkleinerungsaufgabe entscheidende Vorteile gegenüber anderen Typen aufweist. WEIMA entwickelte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Aufbereitung der RWTH Aachen ein Aggregat welches für weiterführende Untersuchungen genutzt wurde, um entscheidende Zusammenhänge zwischen Austragssieb, Messergröße, Schneidwinkel, Schneidspalt und dem Zerkleinerungsergebnis aufzuzeigen. Es wurde festgestellt, daß ein flacher Rotor mit aufgesetzten Messern und Kantenlänge von möglichst 60 mm, ein Schneidspalt von 1 mm und ein geringer Schneidwinkel von 2° vorteilhaft sind. Das Austragssieb sollte eine Lochweite von ca. 70 mm aufweisen.

Mit dem derart konzipierten Aggregat konnten Zerkleinerungsergebnisse erzielt werden, die gegenüber dem Stand der Technik eine deutliche Verbesserung darstellen.

Die am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen durchgeführte **dynamische Bauteilprüfung** an einem 100 % Rezyklat-Montageträger ergab positive Ergebnisse, so daß durch diese Arbeit ein Serieneinsatz eines **100 % Rezyklat-Bauteils** möglich erscheint. Weiterführende Versuchsläufe in Absprache mit einer KFZ-Zulieferfirma sollen eine volle Serientauglichkeit gewährleisten.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Fachbericht in Kunststoffe 98/1, Ausstellung auf Düsseldorfer Messe (K 98), Tagung (AVK 98), Dissertation Dittmann (98), Dissertation Mattus (99) (geplant),

Fazit

Durch die grundlegenden Untersuchungen zur Zerkleinerung von FKV konnte eine Auswahl der einzusetzenden Zerkleinerungsaggregate getroffen werden. Aufbauend auf den sich ergebenden Erkenntnissen wurde vom Antragsteller eine Maschine konstruiert, die im Vergleich zu bestehenden Anlagen der Fa. Menzolit-Fibron, Bretten, ein **grobes Zerkleinerungsgut** mit einer **relativ engen Verteilung** liefert. Trotz des guten Ergebnisses bleibt jedoch festzustellen, daß die angestrebte ideale Verteilung nicht erreicht wurde. Hier sind weitere Untersuchungen und Modifikationen der Anlage notwendig. Diese Arbeiten werden vom Antragsteller und dem Institut für Aufbereitung auch nach Projektende weitergeführt.

Inhalt

1	Abbildungsverzeichnis.....	3
2	Formelzeichen und Abkürzungen	5
3	Zusammenfassung.....	7
4	Einleitung und Aufgabenstellung	8
5	Voruntersuchungen zur werkstofflichen Verwertung.....	13
5.1	Zerkleinerungsaufgabe	13
5.2	Theoretische Betrachtungen der Zerkleinerungsproblematik	14
5.3	Stand der Technik der Zerkleinerung von Thermoplasten	15
5.4	Auswahl potentiell geeigneter Zerkleinerungsaggregate.....	16
5.5	Versuche zur Grobzerkleinerung langfaserverstärkter Thermoplaste	20
5.5.1	Versuchsmaterial	20
5.5.2	Verfahren zur Bewertung des Zerkleinerungserfolges	21
5.5.3	Ergebnisse der Versuche zur Grobzerkleinerung.....	22
5.6	Auswahl des zu optimierenden Zerkleinerungsaggregates	25
6	Weiterführende Arbeiten zur werkstofflichen Verwertung	26
6.1	Ermittlung der optimalen Chipgröße im BONDPRESS-Verfahren.....	26
6.1.1	FKV mit nicht-gebundenen Fasern (GMT, LFG).....	26
6.1.2	FKV mit gebundenen Fasern (Organobleche).....	31
6.2	Dynamische Versuche mit Rezyklat optimaler Chipgröße.....	34
6.2.1	Flachproben	35
6.2.2	Bauteile.....	38
6.3	Untersuchungen zur Zerkleinerung mit dem Einwellenzerkleinerer.....	39

6.3.1 Detaillierte Beschreibung der Zerkleinerungsaufgabe	40
6.3.2 Konzeptionierung des Versuchsaggregates	40
6.3.2.1 Maschinelle Konzeption des Einwellenzerkleinerers.....	40
6.3.2.2 Theoretische Untersuchungen zum Schneidvorgang	41
6.3.2.3 Anforderungen an das Versuchsaggregat	44
6.3.3 Umgesetztes Konzept	46
6.3.4 Entwicklung einer Methodik zur Auswertung der Zerkleinerungsergebnisse	48
6.3.5 Zerkleinerungsversuche	49
6.3.6 Konzeption des optimierten Einwellenzerkleinerers.....	54
6.4 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung.....	55
7 Fazit	58
8 Literaturverzeichnis	59

1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 5-1: Bestimmung der Hauptabmessungen a und b	14
Abb. 5-2: Mechanische Beanspruchung bei der schneidenden bzw. scherenenden Zerkleinerung	15
Abb. 5-3: Rißöffnungsarten bei Werkstoffen mit zähem Bruchverhalten	15
Abb. 5-4: Schneidmühle [DRE, PAL94]	17
Abb. 5-5: Einwellenzerkleinerer [WEI]	18
Abb. 5-6: Zweiwellenzerkleinerer [LID, MOC]	19
Abb. 5-7: Prinzipskizze Vierwellenzerkleinerer [WEI]	20
Abb. 5-8: Frontend-Montageträger	21
Abb. 5-9: Ergebnisse der Zerkleinerung mit 2WZ-I (1) [DIT98]	22
Abb. 5-10: Ergebnisse der Zerkleinerung mit SM-I (1) [DIT98]	23
Abb. 5-11: Ergebnisse der Zerkleinerung mit 2WZ-I (2) [DIT98]	23
Abb. 5-12: Ergebnisse der Zerkleinerung mit 1WZ-I/II/III (1) [DIT98]	24
Abb. 5-13: Ergebnisse der Zerkleinerung mit 1WZ-I/II/III (2) [DIT98]	24
Abb. 6-14: Verwendete Rezyklatchips mit definierten Abmessungen	26
Abb. 6-15: Faserverteilung (GMT mit 40 Gew.-% Glasfasern; Röntgenaufnahme)	27
Abb. 6-16: Zugfestigkeit und E-Modul in Abhängigkeit der Chipabmessung	28
Abb. 6-17: Schlagzähigkeit und Durchstoßarbeit in Abhängigkeit der Chipabmessung	29
Abb. 6-18: Zugfestigkeit und E-Modul in Abhängigkeit der Chipabmessung	30
Abb. 6-19: Schlagzähigkeit und Durchstoßarbeit in Abhängigkeit der Chipabmessung	31
Abb. 6-20: Faserverteilung (Organoblech; Röntgenaufnahme)	32
Abb. 6-21: Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Chiplänge (Chipbreite: 20 mm)	33
Abb. 6-22: Schlagzähigkeit in Abhängigkeit der Chiplänge (Chipbreite: 20 mm)	33
Abb. 6-23: Anforderungsoptimierte Chipabmessungen (definierte Kantenlänge)	34
Abb. 6-24: Zugfestigkeit der GMT-Probe und BONDPRESS-Probe bei 20°C und 100°C	35
Abb. 6-25: Ermüdungsverhalten von BONDPRESS-Probe und GMT-Probe bei 20°C und bei 100°C (σ_v/R_m - Schwingenspielzahl N)	36
Abb. 6-26: Ermüdungsverhalten von BONDPRESS-Probe und GMT-Probe bei 20°C und bei 100°C (σ_a - Schwingenspielzahl N)	37
Abb. 6-27: Prüfbedingungen beim Bauteiltest	38
Abb. 6-28: Versuchsanordnung der dynamischen Bauteilprüfung	39
Abb. 6-29: Einwellenzerkleinerer [MEI97]	41
Abb. 6-30: Flachrotor, Gegenmesser und Messer eines Einwellenzerkleinerers [MEI97]	41
Abb. 6-31: Grenzflächen, die durch schneidende, weitgehend schneidende und reißen- de Beanspruchung entstanden sind	42
Abb. 6-32: Vollkantiges Scherschneiden und kreuzendes Scherschneiden mit positivem und negativem Schneidwinkel	42
Abb. 6-33: Schnittlinie bei einem kleinem und großem Schneidwinkel	43
Abb. 6-34: Versuchsaggregat	47
Abb. 6-35: Rotor, Messer und Gegenmesser des Versuchsaggregates	47

Abb. 6-36: Beispielhafte Darstellung eines entsprechend der Zerkleinerungsaufgabe idealen und schlechten Ergebnisses	49
Abb. 6-37: Maschinenparameter des Versuchsaggregates bei den Zerkleinerungsversuchen 6 - 15 (hor ¹ = horizontales Gegenmesser, gew ² = gewinkeltes Gegenmesser)	50
Abb. 6-38: Eine Auswahl der dreieckigen Stücke in den Zerkleinerungsprodukten	50
Abb. 6-39: Verteilungssummenkurven der Versuche 8, 10 und 11 mit Austragsieben der Lochweiten 50, 70, 90 mm, Schneidwinkel 8°	51
Abb. 6-40: Verteilungssummenkurven der Versuche 10, 13 und 14 mit Schneidwinkeln 8°, 2°, und 18°	52
Abb. 6-41: Verteilungssummenkurven der Versuche 8, 13 und 15	53
Abb. 6-42: Stückgrößenverteilung Versuch 13, IfA, und MENZOLIT-FIBRON, BRETTEN, (Hauptabmessung a: 80-100 mm: 14,2 Gew.-%, 100 - 120 mm: 7,2 Gew.-%, > 120 mm: 14,7 Gew.-%)	54

2 Formelzeichen und Abkürzungen

- **Formelzeichen:**

a,b	[mm]	Hauptabmessungen des Zerkleinerungsgutes
f	[Hz]	Frequenz
F	[N]	Schneidkraft
N	[-]	Schwingspielzahl
R	[-]	Spannungsverhältnis σ_u / σ_o
R _m	[MPa]	Zugfestigkeit
α	[°]	Schneidwinkel
σ_u	[MPa]	Unterspannung
σ_o	[MPa]	Oberspannung

- **Abkürzungen:**

AS	Austragssieb
ASTM	American Standard Test Methods
BONDPRESS	Bonding by Pressing
d ₅₀	Teilungszahl
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
FKV	Faserverstärkter Kunststoffverbund
GM	Glasmatte
GMT	Glasmattenverstärkte Thermoplaste
GMT-AB	Glasmattenverstärkter Thermoplast - Abfall Frontend-Montageträger
GMT-FE	Glasmattenverstärkter Thermoplast - Frontend-Montageträger
IfA	Institut für Aufbereitung, Kokerei u. Brikettierung
ika	Institut für Kraftfahrwesen Aachen
IVW	Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
LFG	Langfasergranulat
Organobleche	Gewebeverstärkte Thermoplaste
PA	Polyamid
PP	Polypropylen
PP-GM 40 R0	Polypropylen (40 % Glasfaser, 0 % Rezyklat)
PP-GM 40 R100	Polypropylen (40 % Glasfaser, 100 % Rezyklat)

SM-I	Schneidmühle (Granulator GA 37, Difundit)
UD	Unidirektional
ÜL	Überlängenanteil
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
1WZ-I	Einwellenzerkleinerer (WLK 10/30, Weima)
1WZ-II	Einwellenzerkleinerer (WLK 18 Super Jumbo, Weima)
1WZ-III	Einwellenzerkleinerer (WL 6, Weima)
2WZ-I	Zweiwellenzerkleinerer (AZ 7, Moco)

3 Zusammenfassung

Ziel des Projektes war die Entwicklung einer Aufbereitungs- und Verarbeitungstechnik für lang- und endlosfaserverstärkte Thermoplaste zu hochwertigen, langfaserverstärkten Fließpreß-Bauteilen. Hierbei kommt insbesondere dem eingesetzten Zerkleinerungsaggregat eine zentrale Bedeutung zu. Neben der schonenden, auf den Erhalt einer großen Faserlänge ausgelegten Zerkleinerungstechnik wurde auch die Weiterentwicklung des BONDPRESS-Verfahrens zur Herstellung von Bauteilen aus 100 % Rezyklat vorangetrieben. Die Arbeiten im Rahmen dieses Projektes beschränkten sich auf die stoffliche Verwertung von Produktionsreststoffen, sind jedoch als grundlegende Voraussetzungen einzustufen, um in Zukunft ggf. auch Altmaterial verarbeiten zu können.

Die Basis des Projektes bildeten grundlegende Arbeiten zur Zerkleinerung lang- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste [DIT98]. Hierzu wurden umfangreiche Zerkleinerungsversuche mit ausgewählten Materialien und verschiedenen Zerkleinerungsmaschinen durchgeführt. Aus den Ergebnissen lassen sich Aussagen über die Eignung der betrachteten Zerkleinerungsaggregate im allgemeinen und zum Verhalten der einzelnen Maschinen im speziellen treffen.

In einem weiteren Teil des Projektes wurde vom Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW), Universität Kaiserslautern, der Einfluß unterschiedlicher Rezyklatabmessungen und damit indirekt der Faserlänge, auf die mechanischen Eigenschaften der Bauteile untersucht. Hierzu wurden Chips mit definierten Kantenlängen hergestellt und im neuentwickelten BONDPRESS-Verfahren verarbeitet. Im Vergleich zu bestehenden Verwertungskonzepten erlaubt das BONDPRESS-Verfahren eine sehr matrix- und faserschonende Wiederverarbeitung. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit bestehende Verfahren auf ihre Effizienz bezüglich der erzielbaren mechanischen Kennwerte hin zu beurteilen. Es wurde der Einfluß der Zerkleinerung bzw. der Beanspruchungsart auf die verstärkende Wirkung der produzierten Rezyklate untersucht. Hier zeigte sich bei gleicher Stückgröße keine Abhängigkeit vom verwendeten Zerkleinerungsaggregat. Die sich teilweise ergebenden Unterschiede sind allein auf unterschiedliche Chipabmessungen zurückzuführen.

Den Kern des Projektes bildete die Konstruktion und Fertigung eines Zerkleinerungsaggregates durch die Fa. Weima, Ilsfeld, und des Institutes für Aufbereitung der RWTH Aachen, welche definierte Chips vorgegebener Rezyklatabmessung liefern soll. Nach dem derzeitigen Entwicklungsstand des Zerkleinerungsaggregates erfüllt das Zerkleinerungsprodukt noch nicht alle vom IVW formulierten idealen technologischen Anforderungen. Im Vergleich zu früheren Ergebnissen der Fa. Menzolit-Fibron, Bretten, mit gängigen Zerkleinerungsaggregaten konnte jedoch eine deutliche Verbesserung erzielt werden.

Die am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen durchgeführte dynamische Bauteilprüfung an einem 100 % Rezyklat-Montageträger ergab positive Ergebnisse, so daß durch diese Arbeit ein Serieneinsatz eines 100 % Rezyklat-Bauteils möglich erscheint.

4 Einleitung und Aufgabenstellung

Kurz-, lang- und endlosfaserverstärkte Thermoplaste haben sich durch eine stetige Verbesserung der Material- und Verarbeitungstechnik zu ökonomisch und ökologisch interessanten Werkstoffen entwickelt, die besonders im automobilen Leichtbau zunehmend an Bedeutung gewinnen. Kurzfaserverstärkte Thermoplaste haben sich vor diesem Hintergrund am Markt etabliert. Seit 1990 halten auch die langfaserverstärkten Thermoplaste in Form von glasmattenverstärkten Thermoplasten (GMT) immer weiter Einzug in die Großserienproduktion. Bei den endlosfaserverstärkten Thermoplasten handelt es sich um eine sehr neue und innovative Werkstoffgruppe, die sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium befindet. Zur Zeit arbeiten alle namhaften nationalen und internationalen Automobilhersteller mit Hochdruck an der Entwicklung von Bauteilen oder ganzen Karosserien aus Faser-Kunststoff-Verbunden [MEH95, DMR98, BRE98, HIP96]. Diese Bemühungen sind durch die aktuelle Diskussion um das "3-Liter-Auto" noch weiter verstärkt worden.

Allein der Mengenumsatz an GMT betrug 1997 in Europa mehr als 24.000 t [OEL98]. Für die nächsten Jahre wird mit einer jährlichen Umsatzsteigerung von 10 - 15 % gerechnet. Die wichtigsten Anwendungen sind Unterbodenverkleidungen, Montageträger, Sitzschalen, Schallkapseln und Stoßfänger [WIE94, STA95, LUT95]. Zukünftige Entwicklungen sehen außerdem den Einsatz von Langfasergranulaten und sogenannten "Organoblechen" (gewebeverstärkte Thermoplaste) aus der Gruppe der endlosfaserverstärkten Thermoplaste vor, so daß in den nächsten Jahren mit einer steigenden Menge an Altteilen aus lang- und endlosfaserverstärkten Thermoplasten gerechnet werden muß.

Für die hochwertige Verwertung lang- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste muß bei der Aufbereitung ein grobstückiges Zerkleinerungsgut erzeugt werden, um den Erhalt einer gewissen Faserlänge zu gewährleisten. Außerdem ist zu beachten, daß die Matrix nicht stark beansprucht wird, um z. B. thermische Schädigungen zu vermeiden.

Lang- und endlosfaserverstärkte Thermoplaste besitzen eine zähe Matrix und spröde Fasern. Aus diesem Grunde ist diesen Werkstoffen kein eindeutiges Bruchverhalten zuzuordnen. Demnach ist die Aufbereitung zu einem grobstückigem Zerkleinerungsgut als schwierig zu bezeichnen. Eine spezielle Entwicklung der Aufbereitung, vor allem der Zerkleinerungstechnik, hat bisher nicht stattgefunden, so daß keine entsprechenden Techniken zur Verfügung stehen.

Für die hochwertige werkstoffliche Verwertung lang- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste ist der Erhalt großer Faserlängen Grundvoraussetzung. Bisher speziell entwickelte Verfahrenskonzepte zur Verwertung langfaserverstärkter Thermoplaste sind das Umpreßmodell [JUN90, SCH93] und das Halbzeugmodell [BEG94, DIT98]. Das "Umpreßmodell" sieht die direkte Wiederverarbeitung von großflächigen Ausschnitteilen als Halbzeug vor. Zu den Werkstoffeigenschaften derartiger Produkte wird in der Literatur von zwei bis vier Verwertungsstufen ohne nennenswerten Abfall der mechanischen Eigenschaften berichtet.

Allerdings ist eine voll automatisierte Umsetzung des Umpreßmodells in die Praxis nur für ebene Ausschnitteile möglich, da es bei dreidimensionalen Ausschnitteilen zu Prozeßproblemen kommen kann. Für in der Praxis vermehrt vorkommende dreidimensionale Ausschnitteile ist das "Umpreßmodell" für eine voll automatisierte Produktion somit nicht geeignet [JAN93].

Das zur Zeit mengenmäßig wichtigste Konzept ist das "Halbzeugmodell". Das Konzept beruht auf der Rückführung von GMT-Rezyklat in die Halbzeugherstellung. Da das Rezyklat der Neuware über einen Extruder zugeführt wird, tritt eine starke Schädigung der Glasfasern auf, wobei die Fasern auf eine Länge von kleiner 10 mm verkürzt werden. Deshalb können nur 10 Gew.-% Rezyklatanteil ohne merkliche Beeinflussung der Verarbeitungseigenschaften sowie der statischen und dynamischen Werkstoffeigenschaften eingesetzt werden. Bei 70 Gew.-% Rezyklatanteil müssen, bei gleichzeitiger Verbesserung der Fließfähigkeit, Einbußen in den Eigenschaften hingenommen werden. Damit ist das "Halbzeugmodell" nicht als Verfahren zu bewerten, mit dem hochwertige, langfaserverstärkte Fließpreß-Bauteile zu produzieren sind, da das Kreislaufmaterial durch die starke Faserverkürzung nur noch als kurzfaserverstärkt einzustufen ist [SCH93].

Neben diesen speziell für die werkstoffliche Verwertung von langfaserverstärkten Thermoplasten entwickelten Verfahrenskonzepte sind außerdem Versuche unternommen worden, Rezyklate mit dem Plastifizierpreß-Verfahren direkt zu verarbeiten. Bei diesen Versuchen ist die prinzipielle Umsetzbarkeit dieser Verfahrensweise nachgewiesen worden. Im Plastifizierpreß-Verfahren ist es möglich, Kreislaufmaterial anteilig oder separat zu verarbeiten sowie auch Additive zuzugeben. Zu diesen ersten Ergebnissen ist jedoch anzumerken, daß vor allem die speziell für dieses Verfahren notwendige Aufbereitung noch nicht systematisch untersucht und weiterentwickelt worden ist. Die Herstellung des grobstückigen Mahlgutes mit einer entsprechenden Zerkleinerungstechnik ist von entscheidendem Einfluß auf die Qualität der herzustellenden Fließpreß-Bauteile, sie ist jedoch als technisch noch nicht gelöst anzusehen [STA96].

Stellt man dem Stand der Technik der werkstofflichen Verwertung faserverstärkter Thermoplaste im industriellen Maßstab die möglichen Verwertungspfade gegenüber, so werden folgende Defizite ersichtlich:

Zunächst ist eine Optimierung der Produktlebenszyklen nötig. Bei den kurzfaserverstärkten Thermoplasten ist eine Verwertung zu kurzfaserverstärkten Bauteilen möglich. Ähnliche Verfahren existieren für lang- und endlosfaserverstärkte Thermoplaste bisher nicht. Des weiteren bleibt festzustellen, daß eine Verknüpfung der einzelnen Produktlebenszyklen lang- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste bisher nicht vorgenommen wurde. In den Produktlebenszyklus der kurzfaserverstärkten Thermoplaste ist eine Einspeisung lang- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste möglich. Prinzipiell ist in Analogie zu diesem Verwertungspfad auch eine Einspeisung endlosfaserverstärkter Thermoplaste in den Produktlebenszyklus der langfaserverstärkten Thermoplaste möglich.

Bei den bestehenden wissenschaftlichen und technischen Veröffentlichungen zur werkstofflichen Wiederverwertung von lang- und endlosfaserverstärkten Thermoplasten ist des weiteren zu bemerken, daß bisher der Einfluß der Aufbereitung und der daraus resultierenden Rezyklatqualitäten nicht berücksichtigt worden ist. Für den Bereich der endlosfaserverstärkten Thermoplaste muß sogar das Fehlen nahezu jeder stofflichen Verwertungsmöglichkeit festgestellt werden. Allerdings ist zu bemerken, daß sich diese Werkstoffgruppe noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befindet.

Bei den bisher durchgeführten Arbeiten zum Recycling langfaserverstärkter Thermoplaste fand eine Entwicklung für besonders schonende, dem Faserkunststoffverbund angepaßte Zerkleinerungen nicht statt. Die Länge der verwendeten Rezyklatpartikel betrug höchstens 50 mm, meistens lag sie sogar weit darunter. Da die mechanischen Eigenschaften des Rezyklates stark von der Faserlänge abhängen, ist der Aufbereitung und der späteren Verarbeitung besondere Beachtung zu schenken. Deshalb ist für die hochwertige Verwertung lang- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste neben der Erarbeitung neuer Verarbeitungsmethoden, der Aufbereitung eine zentrale Rolle zuzuordnen.

Das Projekt "Werkstoffliche Verwertung lang- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste zu hochwertigen, langfaserverstärkten Fließpreß-Bauteilen" sieht vor, für die noch jungen Werkstoffgruppen der lang- und endlosfaserverstärkten Thermoplaste werkstoffliche Verwertungstechniken auf einem hohen Niveau weiter zu entwickeln, um eine industrielle Umsetzung zu ermöglichen. Die zu verwertenden Materialien sollen in einer schonenden, auf den Erhalt einer großen Faserlänge ausgelegten Aufbereitung zu grobstückigem Mahlgut zerkleinert werden. Dieses Kreislaufmaterial soll im Anschluß durch das BONDPRESS-Verfahren oder das Plastifizierpreß-Verfahren zu hochwertigen, langfaserverstärkten Bauteilen verarbeitet werden. Beide Ansätze zur Schließung der Stoffkreisläufe weisen noch erheblichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf. Neben der Weiterentwicklung der Verarbeitungsverfahren soll vor allem die Aufbereitung, z. B. durch systematische, wissenschaftliche Untersuchung des Zerkleinerungsprozesses und der Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Rezyklate, berücksichtigt werden. Die Kombination beider Verfahren innerhalb eines Projektes ist gewählt worden, um Synergieeffekte zu erzielen und somit die Verbesserung der Verwertungsmöglichkeiten für die faserverstärkten Thermoplaste entscheidend vorantreiben zu können.

Als Ergebnis des Projektes wird angestrebt, die beiden Verfahrensabläufe soweit zu erforschen, daß eine industrielle Umsetzung ermöglicht wird. Da sich lang- und endlosfaserverstärkte Thermoplaste noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden, besteht außerdem die Hoffnung, daß die Erkenntnisse des Projektes in die zukünftige Entwicklung dieser Werkstoffe einbezogen werden. Damit werden die Belange der Umweltverträglichkeit früh in die Entwicklung einbezogen.

Im ersten Arbeitsschritt werden auf industriellen Anlagen der Firmen Menzolit-Fibron, Bretten, und Kannegiesser KMH, Minden, Bauteile im Fließpreß- und Plastifizierpreß-

Verfahren hergestellt. An einem Teil der Bauteile werden statische und dynamische Prüfungen durchgeführt. Ergänzt werden diese durch thermische Analysen und mikroskopische Untersuchungen. Aus den gewonnenen Daten wird ein Anforderungskatalog für die aus Rezyklat hergestellten Bauteile erstellt.

Am Ende dieses 1. Arbeitsschrittes sind folgende Resultate zu erzielen:

- Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der Bauteile
- Erstellung eines Anforderungskatalogs für Bauteile aus Rezyklat
- Bereitstellung von ausreichenden Materialmengen für die weiteren Untersuchungen

Im 2. Arbeitsschritt werden die Bauteile im Technikum der Fa. Weima und im Institut für Aufbereitung auf unterschiedlichen Maschinen zerkleinert und es wird eine spezielle, bezüglich der Zerkleinerungsaufgabe abgestimmte Analyse der Zerkleinerungsprodukte durchgeführt.

Am Ende dieses 2. Arbeitsschrittes sind folgende Resultate zu erzielen:

- Bewertung verschiedener Verfahren zur Zerkleinerung faserverstärkter Thermoplaste und Auswahl eines zur Lösung der gestellten Zerkleinerungsaufgabe geeigneten Aggregates
- Angaben zur Rezyklatbeschaffenheit in Abhängigkeit der Zerkleinerungsmaschine
- Bereitstellung von Rezyklat in ausreichenden Mengen für die weiteren Untersuchungen

Im 3. Arbeitsschritt werden die Rezyklate vom Institut für Verbundwerkstoffe im BOND-PRESS-Verfahren bzw. Plastifizier-Preßverfahren zu Testplatten verarbeitet. Anschließend werden diese Platten mechanischen Prüfungen unterzogen. Anhand der Ergebnisse wird eine erste Bewertung der Rezyklate vorgenommen. Des weiteren werden beide Verarbeitungsverfahren auf den Einsatz der Rezyklate zugeschnitten und optimiert. Außerdem werden die Grenzen für bestimmte Verarbeitungsparameter (Temperatur, Verweilzeit, Staudruck) ermittelt.

Am Ende dieses 3. Arbeitsschrittes sind folgende Resultate zu erzielen:

- Weiterentwicklung des BONDPRESS-Verfahrens bzw. Plastifizier-Preßverfahrens
- Ermittlung mechanischer Kennwerte zur Beurteilung unterschiedlicher Rezyklate
- Ermittlung mechanischer Kennwerte zur Beurteilung versch. Verarbeitungsparameter
- (Bewertung der Zerkleinerungsmaschinen anhand von Eigenschaften der Testplatten)
- Konzeption eines bezüglich der Zerkleinerungsaufgabe optimierten Aggregates

Mit den Arbeitsschritten 1 - 3 ist ein Vorgehen beschrieben, welches eine Optimierung der Aufbereitung, Auswahl und Modifikation geeigneter Zerkleinerungsmaschinen und der Bauteilherstellung, Festlegung der Verarbeitungsparameter für BONDPRESS-Verfahren bzw. Plastifizier-Preßverfahren, ermöglicht. Um die Optimierung der Aufbereitung und der Bauteilherstellung umfassend vornehmen zu können, wird anschließend von der Fa. Menzolit-Fibron die Herstellung von 100 % Rezyklat-Bauteilen und vom Institut für Kraftfahrwesen die dynamische Prüfung dieser Bauteile aus 100 % Rezyklat durchgeführt. Dieser 4. Schritt ermöglicht eine eindeutige Bewertung der Rezyklatbauteile im Vergleich zu Neuwarebauteilen.

Mit den Arbeitsschritten 1 - 4 sind die Arbeiten für die hochwertige werkstoffliche Verwertung langfaserverstärkter Thermoplaste erläutert worden. Dieses Vorgehen wird im letzten 5. Arbeitsschritt in analoger Form für die Verwertung endlosfaserverstärkter Thermoplaste zu langfaserverstärkten Fließpreß-Bauteilen wiederholt.

5 Voruntersuchungen zur werkstofflichen Verwertung

Um die hochwertige Verwertung von langfaserverstärkten Thermoplasten im BONDPRESS-Verfahren oder Plastifizier-Preßverfahren zu ermöglichen, muß das Rezyklat bzw. Zerkleinerungsprodukt bestimmten granulometrischen Anforderungen genügen.

Zielsetzung der Voruntersuchungen war die Auswahl eines Zerkleinerungsaggregates, welches hinsichtlich der Konzeption und der Beanspruchungsarten gute Voraussetzungen aufweist, ein Rezyklat geforderter Qualität zu produzieren. Weiterhin sollte dieses Aggregat ohne großen technischen und personellen Aufwand in den Produktionsprozeß zu integrieren sein. Ein weitgehend störungsfreier Betrieb muß daher sichergestellt sein. Wartung und Betrieb sollten mit geringem Personalaufwand erfolgen können.

5.1 Zerkleinerungsaufgabe

Für die Verwertung faserverstärkter Thermoplaste im BONDPRESS-Verfahren oder Plastifizier-Preßverfahren ist ein grobstückiges Gut erforderlich. Somit besteht die Aufgabe der Zerkleinerung darin, die Abfälle in einen Zustand zu überführen, der eine Verwertung durch diese Verfahren zuläßt. Da die Verfahren in besonderer Weise auf den Erhalt einer notwendigen mittleren Faserlänge ausgelegt sind, sollten die faserverstärkten Thermoplaste schonend und nur soweit wie nötig zerkleinert werden. Weitgehend sollen demnach Rezyklatstücke produziert werden, in deren "Inneren" keine Rißeinleitung bzw. -ausbreitung erfolgte (keine angebrochenen Stücke) und die aufgrund des geringen Zerkleinerungsverhältnisses eine möglichst große Faserlänge besitzen.

Das Maß der notwendigen Zerkleinerung wird durch die Verwertungsverfahren bestimmt. Genaue Aussagen über ideale Stückgrößen waren zum Beginn der Voruntersuchungen noch nicht verfügbar. Erste Untersuchungen deuteten jedoch darauf hin, daß der anzustrebende Stückgrößenbereich oberhalb von 50 mm liegt [MAT97] und somit als Grobzerkleinerung einzustufen ist. Die obere Grenze wird durch direkte und indirekte technische Randbedingungen der beiden Verwertungsverfahren bestimmt. Eine direkte technische Randbedingung ist die in den Verfahren verarbeitbare größtmögliche Stückgröße. Indirekte Randbedingungen sind allgemeine verfahrenstechnische Probleme, wie z. B. die Vermeidung von Brückenbildungen oder Entmischungen in Silos [BEI90]. Zusätzlich ist davon auszugehen, daß eine technisch sinnvolle obere Stückgröße existiert, ab der eine Steigerung der Stückgröße keine weiteren Vorteile in den Materialeigenschaften mit sich bringt [MAT97].

Neben der Stückgröße läßt sich als sekundäre Qualitätsforderung eine weitgehende Vermeidung innerpartikulärer Faserschädigungen aufstellen. Diese innerpartikulären Faserschädigungen treten vor allem bei zu hohen unkontrollierten Beanspruchungen bei der Zerkleinerung auf. Als ein Indiz für eine zu starke Materialbeanspruchung kann ein auftretender Aufschluß des Verbundes oder einer Rißeinleitung bzw. Rißausbreitung im Rezyklatstück herangezogen werden.

Somit kann als vorläufige Aufgabenstellung der Zerkleinerung die Erzeugung grob-zerkleinerter faserverstärkter Thermoplaste im Stückgrößenbereich oberhalb von 50 mm formuliert werden, wobei die Zerkleinerung keinen Aufschluß des Verbundes verursachen sollte. Weiterhin ist im Zerkleinerungsprodukt eine möglichst enge Stückgrößenverteilung um die mittlere Stückgröße anzustreben. Bezüglich der Stückform sind zwei unterschiedliche Anforderungen zu unterscheiden: Es ist davon auszugehen, daß die minimale Faserlänge maßgeblich durch die zweitgrößte Hauptabmessung (b) des Stückes vorgegeben wird und damit ist diese für das Rezyklat festigkeitsbestimmend. Dagegen beeinflusst die größte Hauptabmessung (a) die Verarbeitbarkeit des Schüttgutes im Gesamtprozeß. Aus diesen Gründen sollte die Differenz der beiden genannten Längen möglichst gering sein. Diese beiden Größen sind in der nachfolgenden Abb. 5-1 beispielhaft an einem Stück dargestellt.

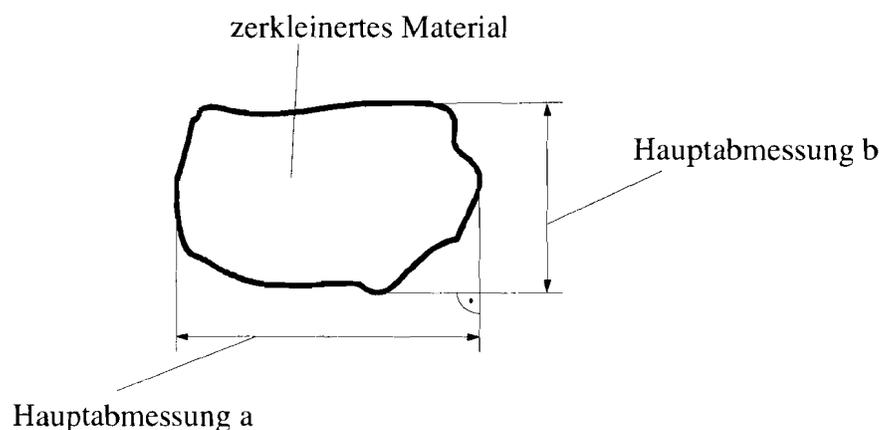


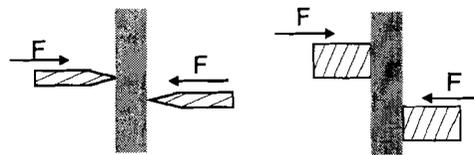
Abb. 5-1: Bestimmung der Hauptabmessungen a und b

Das zu untersuchende Material weist eine konstante aus dem Herstellungsprozeß resultierende Materialstärke von ca. 3 mm auf, die durch den Zerkleinerungsprozeß nicht verändert wird. Daher ist diese Größe bei der Betrachtung des Zerkleinerungsergebnisses nicht von Interesse.

5.2 Theoretische Betrachtungen der Zerkleinerungsproblematik

Den vorliegenden Werkstoffen ist vornehmlich ein zäh-elastisches Bruchverhalten zuzuordnen. Wie am Institut für Aufbereitung durchgeführte Voruntersuchungen zeigten, ist mittels scherender bzw. schneidender Beanspruchung die beschriebene Zerkleinerungsaufgabe am besten zu lösen.

In der folgenden Abb. 5-2 wird die Schneid- und Scherbeanspruchung schematisch dargestellt:



Schneid- bzw. Scherbeanspruchung

Abb. 5-2: Mechanische Beanspruchung bei der schneidenden bzw. scherenden Zerkleinerung

Die physikalische Beschreibung der Vorgänge bei der Zerkleinerung von zäh-elastischen Stoffen steht erst am Anfang. Ausgehend von Erfahrungen der Bruchmechanik sind bei diesen Werkstoffen die Rißeinleitung, -ausbreitung und schließlich der Bruch sowohl durch Schubspannungen als auch durch Zugspannungen erreichbar. Schub- und Zugspannungen können die in Abb. 5-3 dargestellten Rißöffnungsarten bewirken, wobei die Bildung des Querrisses in Verbindung mit dem sogenannten Reißen (Schubspannung parallel zur Rißfront) eine besondere Bedeutung besitzen dürfte. [JÄC97]

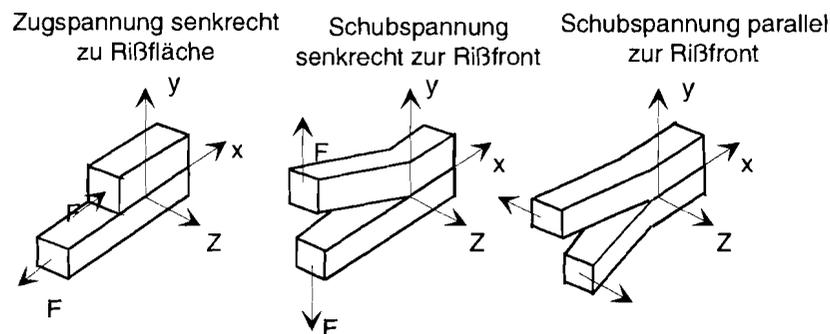


Abb. 5-3: Rißöffnungsarten bei Werkstoffen mit zähem Bruchverhalten

In der Regel ist den Zerkleinerungsmaschinen keine eindeutige Beanspruchungsart zuzuordnen, sondern es treten komplex zusammengesetzte Arten auf. Inwieweit bei der Zerkleinerung Schneid-, Scher- oder Reißbeanspruchung auf das Gut ausgeübt wird, hängt im wesentlichen von der Spaltweite, aber auch von der Schärfe der Scherkante, der Beanspruchungsgeschwindigkeit und der Festigkeit bzw. Bruchdehnung des Mahlgutes ab. Je schärfer das Messer und je enger die Spaltweite ist, desto eher wird eine Schneidbeanspruchung auf das Gut ausgeübt. Große Spaltweiten und stumpfe Messer üben überwiegend eine reißen Beanspruchung aus [MEI97].

5.3 Stand der Technik der Zerkleinerung von Thermoplasten

Für die Zerkleinerung unverstärkter Thermoplaste wird überwiegend auf Schneidmühlen zurückgegriffen. Aus diesem Grund sind verschiedenste Ausführungen verfügbar, die z. B.

besonders auf die Zerkleinerung von Spritzgießabfällen, Folien oder Profilen zugeschnitten sind. Übliche Lochweiten der Austragssiebe liegen bei 6 - 12 mm. Außerdem wird die Vermeidung von großen Staubanteilen angestrebt. [BEY95, HÄR91, HES89, HES92, HLR96, JUB94, JUG95, KOL73, KUK96, KWZ93, LES81, MAY73, MAY79, MAY79a, MIC93, MUS70, OHE70, RIS70, RUM54b, SAM75, SCL87, STI95a, WIE94]

Ein-, Zwei- und Vierwellenzerkleinerer kommen meist bei zweistufiger Zerkleinerung unverstärkter Thermoplaste als Vorzerkleinerer zum Einsatz. [BEN92, JUB94, JUG95, KUA95, KWZ93, MIC93, STI95a, WIE94]

Im Bereich der Zerkleinerung faserverstärkter Thermoplaste existieren nur sehr wenige Erkenntnisse. Für die Regranulierung kurzfaserverstärkter Thermoplaste werden, wie bei den unverstärkten Thermoplasten üblich, Schneidmühlen verwendet, wobei als optimale Schnittgeschwindigkeit 7,5 - 8 m/s angegeben wird [LÖH95]. Bei der Zerkleinerung von GMT-Produktionsabfällen für die Verwertung nach dem Fließpreßmodell kommen Zweiwellenzerkleinerer mit Schnittbreiten von 20 mm zum Einsatz, bei denen jedoch eine Streifenbildung zu beobachten ist. Mit dem Begriff Streifen ist hier eine Stückform bezeichnet, deren Dicke deutlich kleiner als die Breite ist und deren Breite deutlich kleiner als die Länge ist. [LÖH94, LÖH95, STA96, WES96, ZÜR92, ZÜR94].

Übergreifend ist festzustellen, daß Erkenntnisse über die durch die Zerkleinerung entstehenden Stückformen oder Stückgrößenverteilungen nahezu völlig fehlen. Lediglich für Schneidmühlen existiert eine Abschätzung, daß bei der Zerkleinerung von Thermoplasten 95 % der Masse des Aufgabegutes auf Stücke entfallen, die eine Stückgröße von weniger als 70 % der Lochweite des Austragssiebs aufweisen [LES81].

Somit reichten die Erkenntnisse nicht aus, ein geeignetes Aggregat für die Grobzerkleinerung faserverstärkter Thermoplaste mit dem Ziel der hochwertigen Verwertung im BONDPRESS-Verfahren oder Plastifizier-Preßverfahren auszuwählen.

5.4 Auswahl potentiell geeigneter Zerkleinerungsaggregate

Wie oben dargelegt, ist für die Zerkleinerung lang- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste die schneidende bzw. scherende Beanspruchung als sinnvoll zu erachten. Für detaillierte Untersuchungen wurde die Auswahl daher auf Aggregate beschränkt, die überwiegend diese Beanspruchungsarten auf das Gut ausüben. Berücksichtigung fanden folgende Aggregate:

- a) Schneidmühlen
- b) Einwellenzerkleinerer
- c) Zweiwellenzerkleinerer
- d) Vierwellenzerkleinerer

zu a):

Schneidmühlen, auch Schneidgranulatoren genannt, erzeugen bei der Zerkleinerung eine schneidende bzw. scherende Beanspruchung. [DIN 24100 Teil 2, HOB93, HÖF86, JUG95]

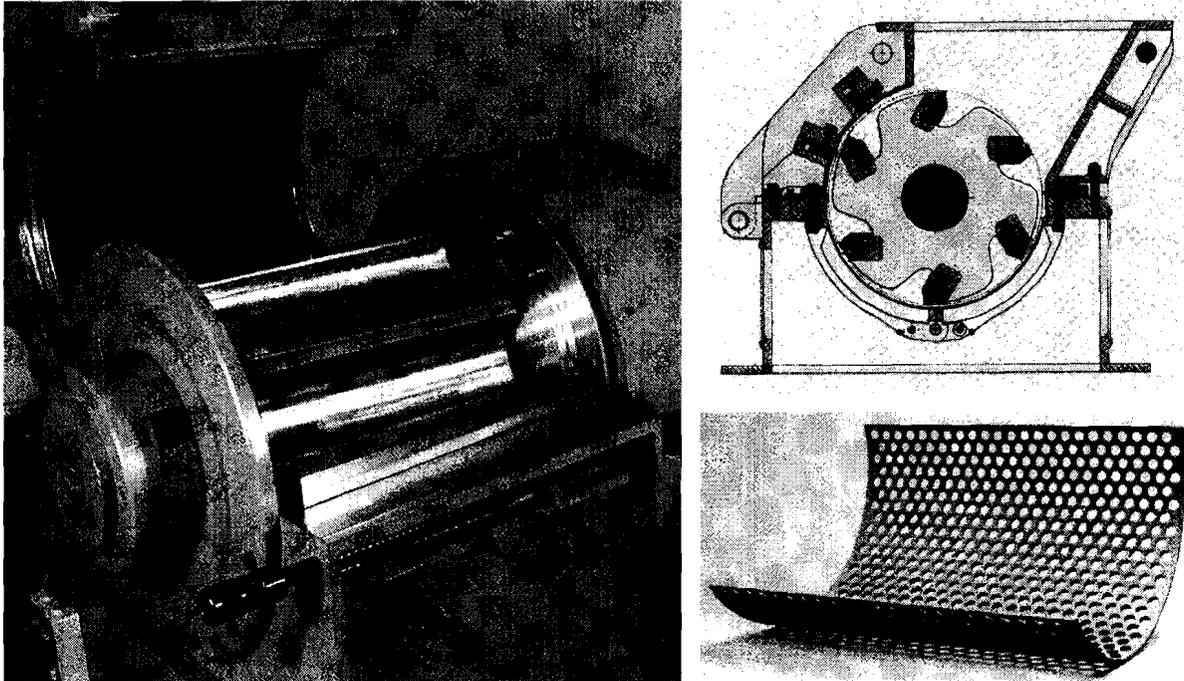


Abb. 5-4: Schneidmühle [DRE, PAL94]

Das Aufgabegut wird über die Beschickungsöffnung zugeführt. Der Schnitt erfolgt zwischen den Rotor- und Statormessern. Das Mahlgut verläßt die Maschine über ein im unteren Teil der Maschine angebrachtes Austragssieb. Bei Rotor- und Statormessern können segmentierte Ausführungen gewählt werden. Bei den Rotoren sind unterschiedliche Ausführungen zu unterscheiden, wie z. B. offene und geschlossene Bauformen. Durch die Anordnung der Rotor- und Statormesser können verschiedene Schnitte wie Parallel-, (Kreuz-)Scheren- oder Doppelschräg-Schnitt erzeugt werden. Die Schnittgeschwindigkeiten liegen üblicherweise bei ca. 12 - 16 m/s und sie können bei Langsamläufern bei ca. 5 - 7 m/s und bei extremen Schnellläufern bis zu 25 - 30 m/s betragen. [HÄR91, HES92, HÖF86, JUB94, JUG95, LÖH95, MIC93, SCG97, STI95a, WIE94]

zu b)

Der Einwellenzerkleinerer ist mit einer Umfangsgeschwindigkeit von ca. 1 - 4 m/s ein langsam laufendes Zerkleinerungsaggregat. Das Material wird nach der Förderung in die Vorlage mittels hydraulischer Andrückvorrichtung den Zerkleinerungswerkzeugen diskontinuierlich zugeführt.

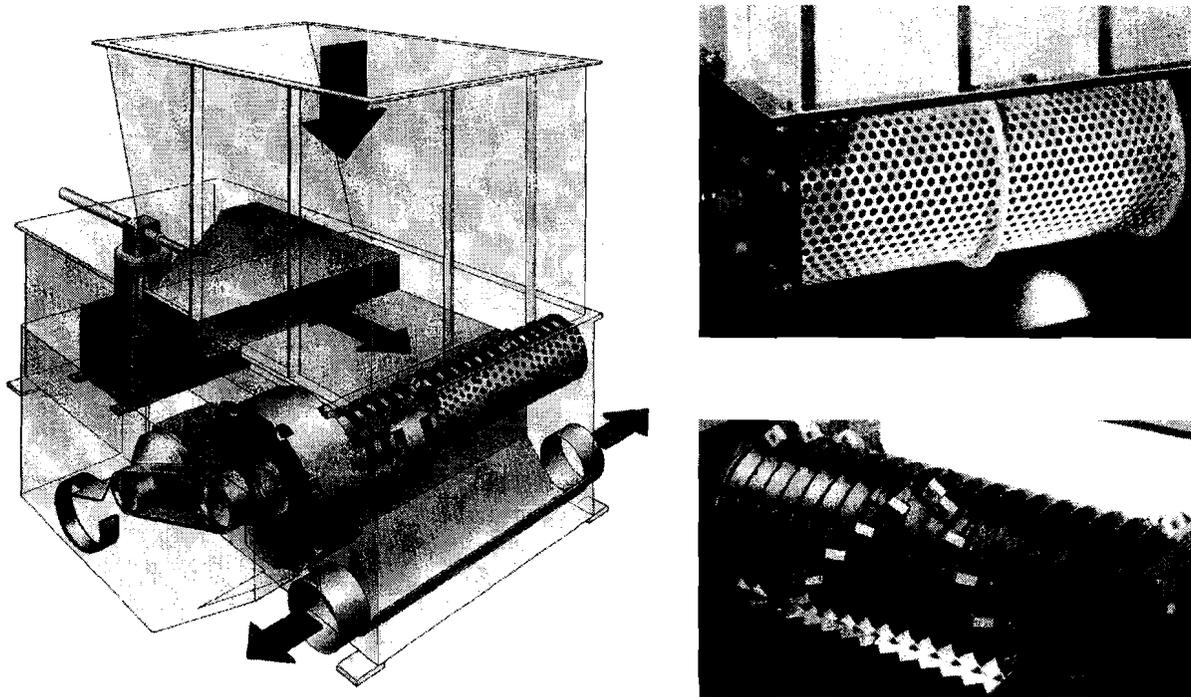


Abb. 5-5: Einwellenzerkleinerer [WEI]

Der Rotor ist mit wendelförmig angeordneten Messern bestückt. Die Drehung des Rotors ergibt einen Schnitt zwischen den Rotor-Messern und dem am Gehäuse befestigtem Gegenmesser. Je nach Größe der Spaltweite kommt es zu einer Schneid- bzw. Scherbeanspruchung der Aufgabe, welche auch in eine reißende Beanspruchung übergehen kann. Besonders bei Spaltweiten von > 1 mm kann davon ausgegangen werden, daß vermehrt eine solche reißende Zerkleinerung des Materials erfolgt. Das um den Rotor angeordnete Austragssieb bewirkt eine erneute Zuführung des Grobgutes in die Vorlage und eine weitere Zerkleinerung. [JÄC97]

zu c)

Zweiwellenzerkleinerer unterscheiden sich sowohl von Schneidmühlen als auch von Einwellenzerkleinerern deutlich, wobei jedoch die Zerkleinerung auch bei diesen Geräten vornehmlich durch Scherung erfolgt. Andere Bezeichnungen für Zweiwellenzerkleinerer sind Doppelwellenzerkleinerer, Doppelwellenschneider, Schneidwalzenzerkleinerer, Reißwellenzerkleinerer, Rotorschere, Universalzerkleinerer oder Shredder. [HOB93, JUB94, JUG95, LÖH95, MIC93]

Bei Zweiwellenzerkleinerern wird das Material über einen Aufgabetrichter dem Schneidwerk zugeführt. Die auf den beiden parallelen Wellen angeordneten Schneidscheiben drehen gegeneinander und kämmen ineinander. Auf der Gehäuseseite sind häufig Abstreifer angebracht. Optional können Zweiwellenzerkleinerer auch mit Eindrückvorrichtungen ausgestattet werden. Austragssiebe sind in der Regel nicht im Einsatz. Um Überlastungen der Maschine zu vermeiden, sind Reversierschaltungen vorgesehen, die bei zu hohen

Belastungen die Drehrichtung der Wellen umkehren und somit ein Freilaufen der Wellen verursachen.

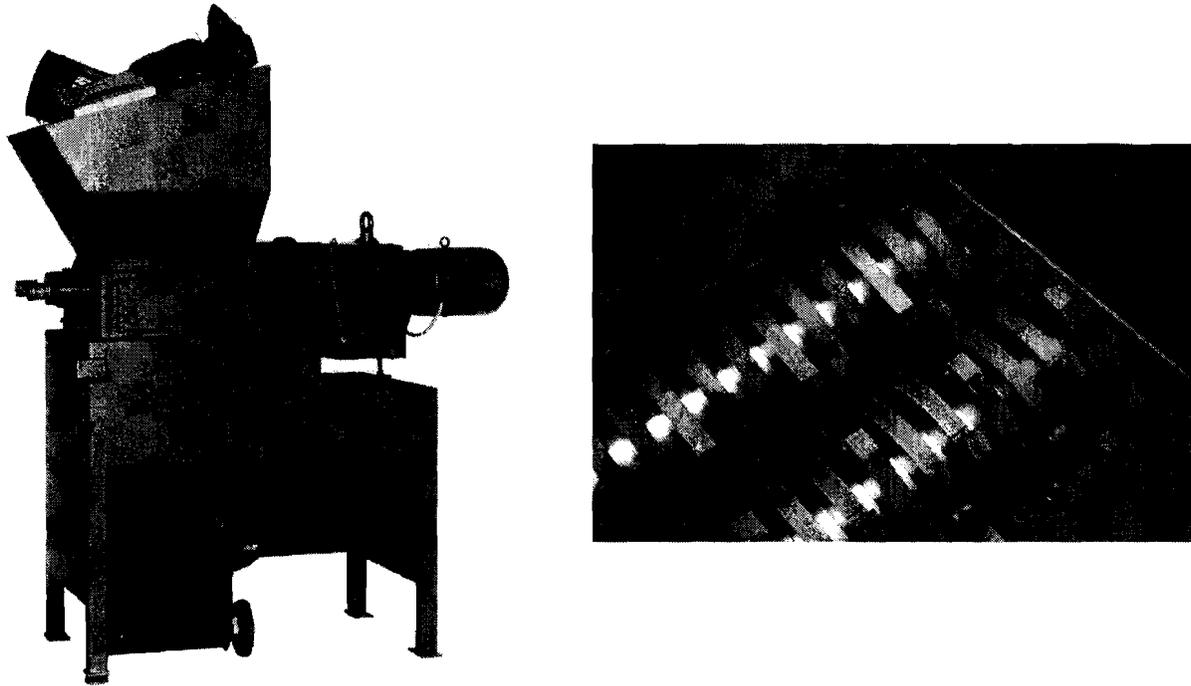


Abb. 5-6: Zweiwellenzerkleinerer [LID, MOC]

Die Schneidscheiben können in unterschiedlichen Breiten ausgeführt werden und haben in der Regel einen oder zwei Schneidzähne und nur in Sonderfällen bis zu fünf Zähne pro Schneidscheibe. Die Wellendrehzahlen sind je nach Ausführung gleich oder sie differieren. Die Umfangsgeschwindigkeiten liegen in der Regel bei 0,2 - 0,4 m/s. In seltenen Fällen werden höhere Drehzahlen mit Umfangsgeschwindigkeiten von bis zu 1 m/s erreicht. [BIG, JUB94, JUG95, LID, LÖH95, MEW, MIC93, MOC, UNT, SCG97, ST195a, WEI, WIE94]

zu d)

Der Vierwellenzerkleinerer ist ein Langsamläufer mit Rotorumfangsgeschwindigkeiten von $< 0,5$ m/s und der Gruppe der Rotorscheren zuzuordnen. Dieser besteht, wie in Abb. 5-7 dargestellt, jeweils aus zwei gegenläufig rotierenden Schneid- und Räumscheiben. Zur Einstellung der Stückgrößen wird das Aggregat mit einem Austragssieb ausgestattet. Der Vierwellenzerkleinerer zerkleinert mit den seitlichen Kanten der ineinander greifenden Zähne der Schneidscheiben. Messungen der Spaltweiten zwischen den Schneidscheiben ergaben Werte von $< 1,5$ mm. Deswegen kann davon ausgegangen werden, daß mit diesem Aggregat das Gut nicht nur schneidend, sondern zu einem großen Anteil scherend beansprucht wird.

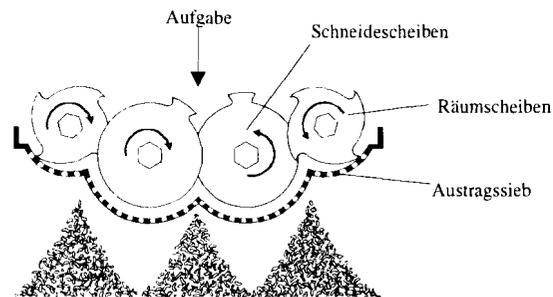
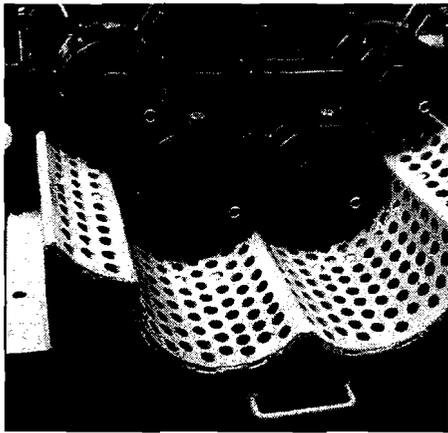


Abb. 5-7: Prinzipskizze Vierwellenzerkleinerer [WEI]

Dieses wird in Streifen zerkleinert und auf bzw. durch das Austragssieb gefördert. Streifen, die im Sieb steckenbleiben (Steckstück), werden durch die Rotoren weiter zerkleinert und damit verkürzt. Nachfolgendes Material drückt die Stücke durch das Sieb hindurch. Die Räumscheiben führen den Siebrückstand wieder den Schneidescheiben und damit einer weiteren Zerkleinerung zu.

5.5 Versuche zur Grobzerkleinerung langfaserverstärkter Thermoplaste

Für die Durchführung systematischer Untersuchungen zur Grobzerkleinerung lang- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste wurden entsprechend den theoretischen Überlegungen die im Kapitel 5.4 aufgeführten Zerkleinerungsaggregate ausgewählt. Aus der Auswertung von umfassenden Zerkleinerungsversuchen sollte dann ein zur Lösung der gestellten Zerkleinerungsaufgabe geeignetes Aggregat ausgewählt werden.

Die Versuche zur Grobzerkleinerung der langfaserverstärkten Thermoplaste wurden mit speziellen Maschinenausstattungen oder Maschinenmodifikationen durchgeführt. Bei den Versuchen mit dem Einwellenzerkleinerer kamen zwei unterschiedliche Rotor-Ausführungen zum Einsatz. Einmal handelt es sich dabei um einen Rotor mit einer profilierten, an das Gegenmesser angepaßten Oberfläche (Profil-V-Rotor) und zum anderen um einen Rotor mit einer glatten Oberfläche (Profil-Holz-Rotor bzw. Flachrotor)

5.5.1 Versuchsmaterial

Als Versuchsmaterial kamen Frontend-Montageträger und Ausschnitt aus der Frontend-Montageträger-Produktion zum Einsatz. Die Frontend-Montageträger, siehe Abb. 5-8, zeichnen sich einerseits durch ihre Hauptabmessungen (333 x 550 x 1380 mm) und andererseits durch eine im Vergleich zum Ausschnittmaterial stark dreidimensional ausgebildeten Form aus.

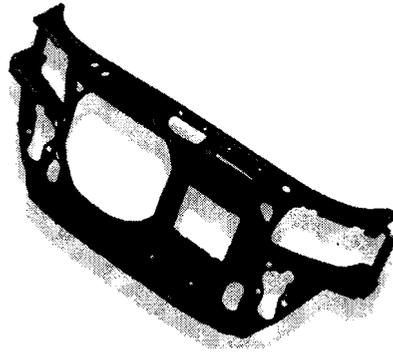


Abb. 5-8: Frontend-Montageträger

GMT-Material weist Faserverstärkungen von 40 Gew.-% in Form von Glasmatten (GM) auf, wobei bei dem GMT-Halbzeug die Hälfte der Fasern unidirektional (UD) vorliegt. Die Matrix wird durch Polypropylen gebildet (60 Gew.-%).

5.5.2 Verfahren zur Bewertung des Zerkleinerungserfolges

In der Aufbereitungstechnik ist es üblich, den Zerkleinerungserfolg durch einen Vergleich der Stückgrößenverteilung vor und nach der Zerkleinerung zu bestimmen. In einigen Anwendungsfällen ist zusätzlich eine Überprüfung der entstandenen Stückformen erforderlich. Bei der vorliegenden Zerkleinerungsaufgabe sind diese beiden Größen (Stückgröße und Stückform) als nahezu gleichrangig zu bewerten. Aus diesem Grunde ist ein Bewertungsverfahren zu wählen, welches beide Größen hinreichend genau beschreibt.

Im Rahmen der hier dargestellten Arbeiten wurde ein Bewertungsverfahren auf Basis der Siebanalyse gewählt. Die Klassierung dient zur Bestimmung der zweitgrößten Hauptabmessung (siehe Abb. 5-1) der zerkleinerten Stücke. Die Erfassung der größten Hauptabmessung und damit indirekt der Stückform wurde händisch durchgeführt. Zur Auswertung wurde der Anteil der Stücke, die ein Längen/Breiten-Verhältnis von 3 : 1 überschreiten, dargestellt. Dieser wird im folgenden als Überlängenanteil bezeichnet und wird vorläufig als Maß zur qualitativen Bewertung der auftretenden Stückformen herangezogen. Der Überlängenanteil im Zerkleinerungsprodukt sollte möglichst gering sein. Exemplarisch ist in Abb. 5-9 ein Zerkleinerungsergebnis abgebildet. Hierbei sind die aus der Klassierung ermittelten Werte der Verteilungssumme über der Sieblochweite aufgetragen, wobei die Zwischenwerte durch lineare Interpolation gewonnen wurden. Des Weiteren ist die Summe der einzelnen Überlängenanteile (ÜL) mit aufgeführt. Durch diese Darstellung der Ergebnisse sind auch interpolierte Werte abzulesen, so daß z. B. der Anteil der Stücke < 35 mm auf ca. 40 % zu bestimmen ist.

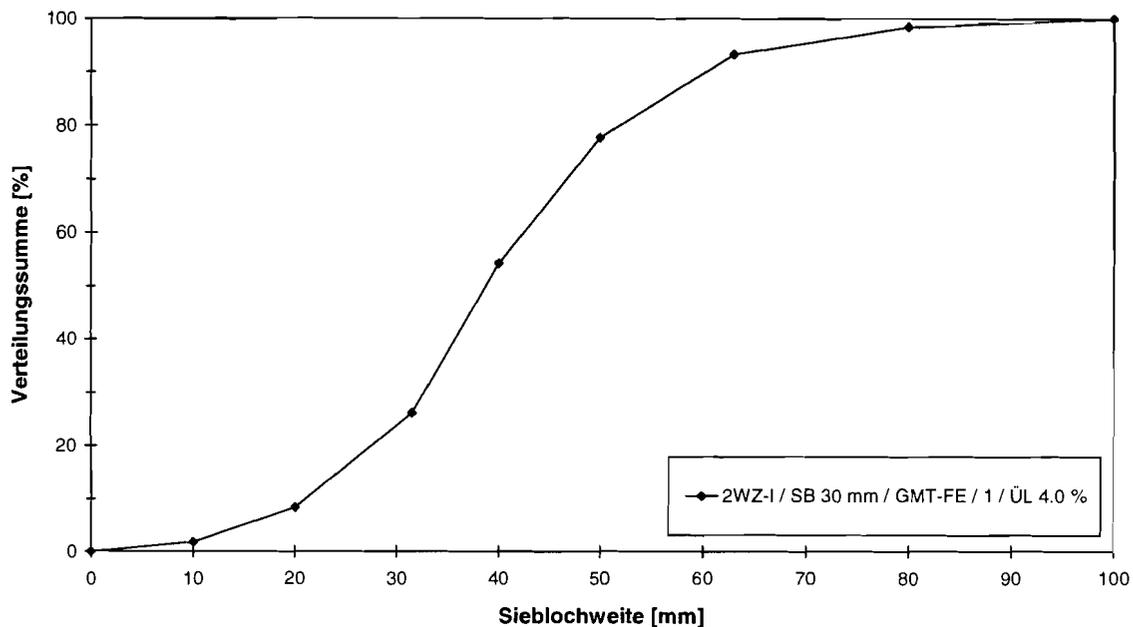


Abb. 5-9: Ergebnisse der Zerkleinerung mit 2WZ-I (1) [DIT98]

5.5.3 Ergebnisse der Versuche zur Grobzerkleinerung

Im Technikum des Instituts für Aufbereitung und der Fa. Weima Maschinenbau GmbH wurden umfangreiche Versuche mit den ausgewählten Aggregaten zur Grobzerkleinerung von langfaserverstärkten Thermoplasten durchgeführt. Hierbei kamen die in Kapitel 5.4 aufgeführten Maschinen zum Einsatz. Die Zerkleinerungsaggregate wurden mit Austrags-sieben verschiedener Lochweiten bestückt. Die Versuche wurden sowohl mit Ausschnittmaterial als auch mit Frontend-Montageträgern durchgeführt. Auszugsweise wird im folgenden auf einige beispielhaft ausgewählte Versuchsergebnisse näher eingegangen.

Bei der Zerkleinerung des GMT-Materials mit der Schneidmühle (SM) und dem Einwellenzerkleinerer ist eine deutliche Abhängigkeit der Stückgrößenverteilung von der Lochweite des Austragssiebes (AS) festzustellen. Exemplarisch sind hierzu in der folgenden Abb. 5-10 die Ergebnisse der Zerkleinerung von Ausschnittmaterial mit der Schneidmühle bei der Wahl unterschiedlicher Austragssieblochweiten dargestellt. Die mittlere Stückgröße (abzulesen bei 50 % der Verteilungssumme) wächst nicht proportional mit der Sieblochweite. Das Verhältnis d_{50} /Sieblochweite sinkt von 20/40 bis 30/80. Damit ist trotz einer großzügigen Dimensionierung der Sieblochweite nur eine geringe Zunahme der mittleren Stückgröße zu erzielen. Mit der Schneidmühle ist auch bei der Wahl eines Austragssiebes der Lochweite 80 mm nur eine mittlere Korngröße von ca. 30 mm zu erreichen. Mit Zunahme der Sieblochweite steigt der Überlängenanteil im Zerkleinerungsprodukt an (von 8,6 auf 14,3 %). Mit dem Zweiwellenzerkleinerer konnten bei Aufgabe von Frontend-Montageträgern und Ausschnittmaterial sehr unterschiedliche Zerkleinerungserfolge erreicht werden.

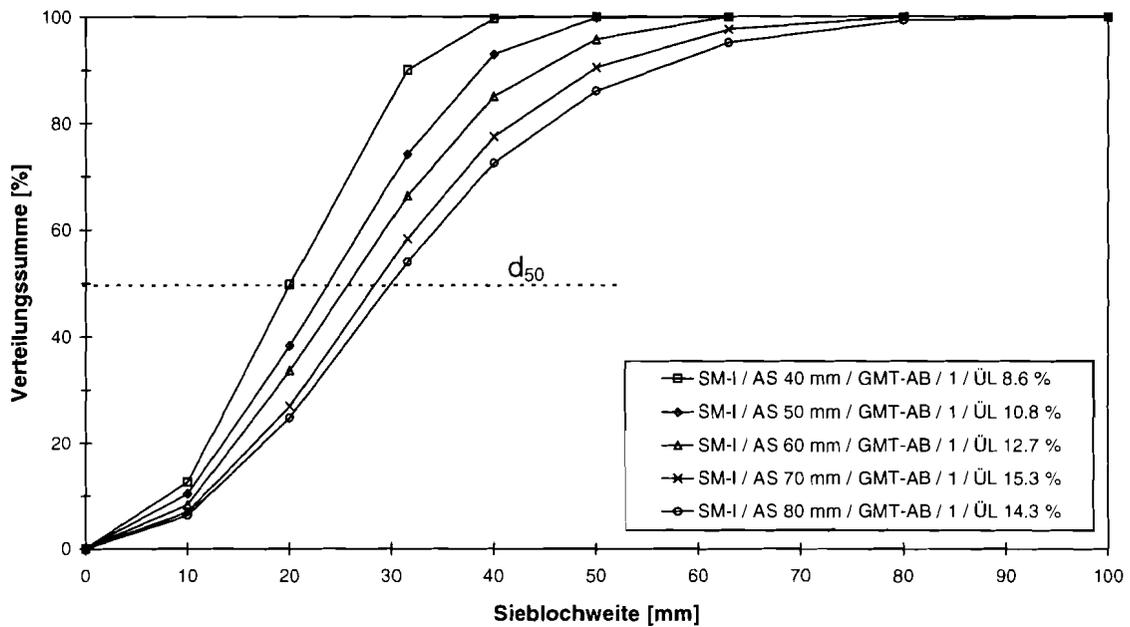


Abb. 5-10: Ergebnisse der Zerkleinerung mit SM-I (1) [DIT98]

Bei der Zuführung des stark dreidimensional ausgebildeten Montageträgers wurde ein Überlängenanteil von ca. 4 Gew.-% erreicht, dagegen entstand bei der Aufgabe des fast ausschließlich zweidimensionalen Ausschnittmaterials ein Überlängenanteil von bis zu 40 Gew.-%. Wie in Abb. 5-11 dokumentiert, nahm mit zunehmender Schnittbreite der Schneidscheiben die Breite des produzierten Stückgrößenspektrums zu.

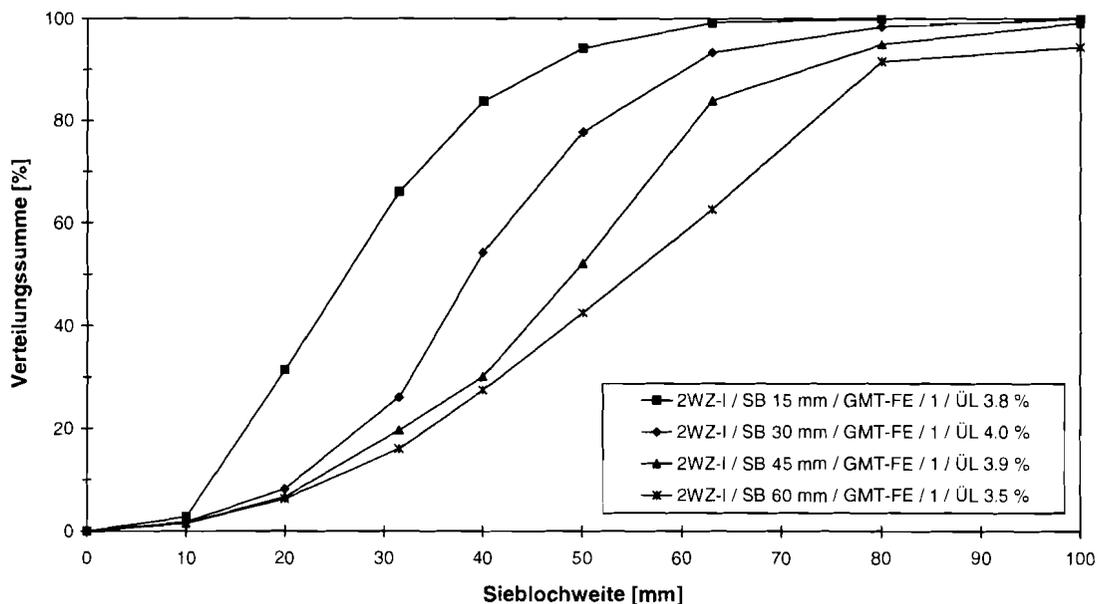


Abb. 5-11: Ergebnisse der Zerkleinerung mit 2WZ-I (2) [DIT98]

Dagegen konnte mit dem Einwellenzerkleinerer bei gleicher mittlerer Stückgröße ein deutlich geringerer Überlängenanteil von ca. 1 Gew.-% erreicht werden. Ein Vergleich der Ergebnisse der Einwellenzerkleinerung mit dem V-Rotor (1WZ-I, 1WZ-II) und dem Flachrotor (1WZ-III) zeigt, daß sich der Flachrotor für die Produktion von grobstückigem Material besser eignet (siehe Abb. 5-12 u. Abb. 5-13).

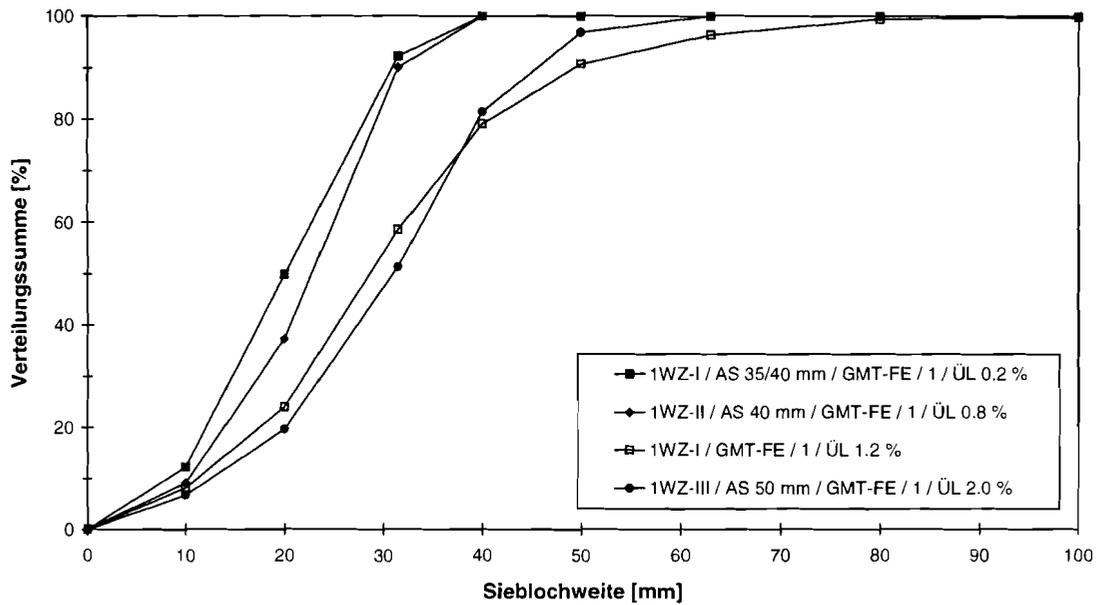


Abb. 5-12: Ergebnisse der Zerkleinerung mit 1WZ-I/II/III (1) [DIT98]

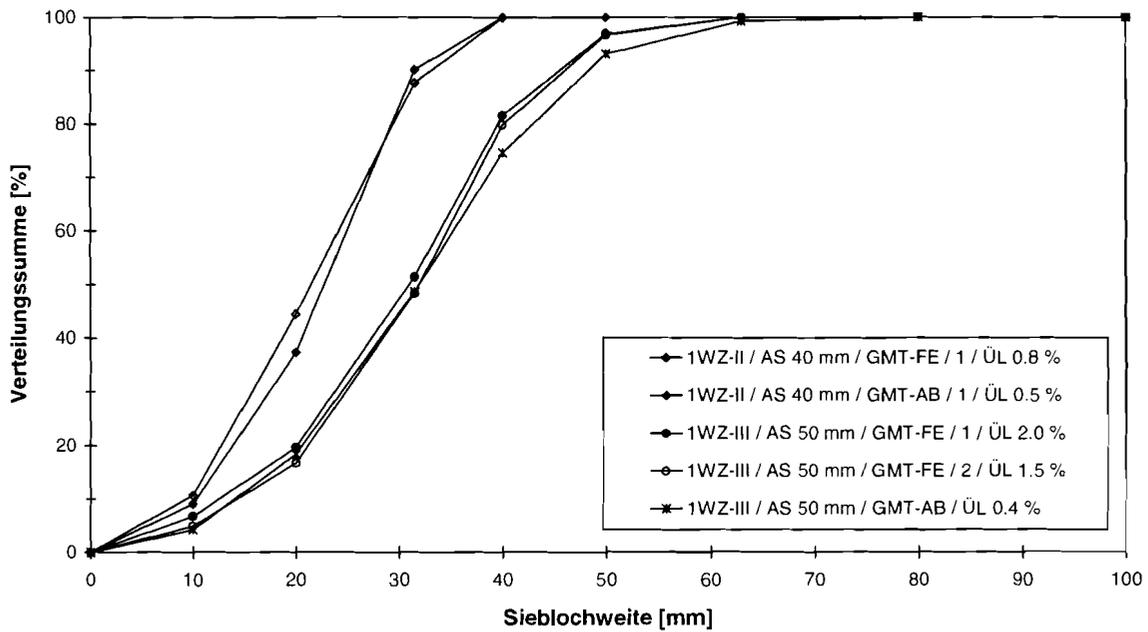


Abb. 5-13: Ergebnisse der Zerkleinerung mit 1WZ-I/II/III (2) [DIT98]

5.6 Auswahl des zu optimierenden Zerkleinerungsaggregates

Aus den Untersuchungen zur Zerkleinerung langfaserverstärkter Thermoplaste lassen sich grundsätzliche Aussagen zu den einzelnen Zerkleinerungsmaschinen ableiten.

Schneidmühlen erzeugen auch bei der Verwendung grober Austragsiebe mit Lochweiten bis zu 80 mm relativ kleine mittlere Stückgrößen, einen großen Staubanteil und einen großen Überlängenanteil. Die beiden erst genannten Ergebnisse sind vornehmlich auf die hohen Schnittgeschwindigkeiten zurückzuführen. Außerdem werden Schneidmühlen bei der Grobzerkleinerung langfaserverstärkter Thermoplaste mechanisch stark belastet. Sie können durch zu große Mengen an Aufgabegut überlastet werden. Bei der Zerkleinerung flächiger Teile mit geringen Dicken ist ein Anstieg der Überlängenanteile zu beobachten.

Zwei- und Vierwellenzerkleinerer besitzen üblicherweise Schnittbreiten von 15 - 20 mm. Für die Grobzerkleinerung langfaserverstärkter Thermoplaste sollten jedoch größere Schnittbreiten gewählt werden, die bis zu 60 mm reichen können. Des weiteren empfiehlt sich eine aggressive Ausbildung der Zähne der Schneidscheiben zur Erzielung großer Durchsätze. Diese Maßnahmen führen außerdem zu deutlich größeren mittleren Stückgrößen und engeren Stückgrößenverteilungen als bei Schneidmühlen und Einwellenzerkleinerern. Jedoch werden bei der Aufgabe von zweidimensionalem Material große Anteile an streifigen Stücken erzeugt. Wesentlicher Nachteil der Zwei- und Vierwellenzerkleinerer sind die Einzugsbedingungen. Um diese zu verbessern, sind bereits Maschinenkonzeptionen mit Nachdrückeinrichtung entwickelt worden. Trotzdem wird die Materialaufgabe mit Bezug auf die Gefahr der Brückenbildung als kritisch bewertet.

Bei der Vorzerkleinerung von Kunststoffen haben sich in den letzten Jahren die Einwellenzerkleinerer vermehrt durchgesetzt. Dies ist vor allem auf die einfache, robuste und kostengünstige Konstruktion zurückzuführen. Konstruktive Möglichkeiten zur Beeinflussung der Stückform und der mittleren Stückgröße liegen in der Lochweite der Austragsiebe, in der Gestaltung des Rotors sowie der Messer und Gegenmesser. Unterschieden wird in Profil- und Flachrotoren. Profil-V-Rotoren verursachen signifikant kleinere mittlere Stückgrößen als Profil-Holz-Rotoren (Flach-Rotor).

Im Vergleich zu den Ergebnissen der Schneidmühlenversuche sind mit Einwellenzerkleinerern geringere Anteile an kleinen Stücken und engere Stückgrößenverteilungen zu erzielen. Außerdem tritt die Streifenbildung nicht auf. Ein wesentlicher Vorteil der Einwellenzerkleinerer ist die Zwangszuführung des Materials zu den Zerkleinerungswerkzeugen. Die Wartung der Aggregate ist durch die gute Zugänglichkeit der Messer weniger aufwendig als bei den anderen Aggregaten. Unter Berücksichtigung der Aspekte: Einstellung der Zielstückgröße, produzierter Staubanteil, Breite der Stückgrößenverteilung und Wartung bzw. Handhabung der jeweiligen Zerkleinerungsaggregate, erwies sich zur Lösung der gestellten Zerkleinerungsaufgabe der Einwellenzerkleinerer als ein günstiges Aggregat. Die weiteren Arbeiten bezüglich der Aufbereitung der faserverstärkten Thermoplasten beschränken sich daher auf die Optimierung bzw. Modifizierung des Einwellenzerkleinerers.

6 Weiterführende Arbeiten zur werkstofflichen Verwertung

6.1 Ermittlung der optimalen Chipgröße im BONDPRESS-Verfahren

Da Erkenntnisse über den Einfluß der Rezyklatchipgröße auf die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen fehlen, wurden zunächst grundlegende systematische Untersuchungen an Organoblech-, GMT- und LFG-Rezyklaten mit definierten Chipabmessungen durchgeführt.

Für Organobleche besteht eine grundsätzliche Notwendigkeit, die gerichtet orientierte Faserstruktur aufzulösen, um eine fließfähige quasiisotropverstärkte Preßmasse zu erhalten. Aus diesem Grund wurden im Gegensatz zu GMT und LFG streifige Chips mit einer Breite von 20 mm und definierten Längen von 20, 50 und 80 mm zugesägt. Dadurch sollte sichergestellt werden, daß die Verstärkungsstruktur trotz der geringen Scherkräfte beim Pressen aufgelöst wird. Der hohe Faseranteil des Ausgangsmaterials von ca. 70 Gew.-% machte die Zugabe von Matrix in Form von Folie notwendig, um durch die Reduzierung des Fasergehaltes auf ca. 40 Gew.-% eine ausreichende Fließfähigkeit zu gewährleisten.

Im Fall von GMT wurden aus ebenen Bauteilen quadratische Chips mit Kantenlängen von 15, 30, 60, 90 und 120 mm zugesägt und im BONDPRESS-Verfahren verarbeitet. Da bei LFG davon ausgegangen werden kann, daß nach der ersten Verarbeitung Faserlängen von weniger als 25 mm vorliegen, wurde die maximale Kantenlänge auf 90 mm beschränkt und die Meßreihe durch Chips mit 45 mm Kantenlänge ergänzt (Abb. 6-14).

Werkstoff	Chipabmessungen [mmxmm]
Organoblech	20 x 20 / 50 x 20 / 80 x 20
GMT	15 x 15 / 30 x 30 / 60 x 60 / 90 x 90 / 120 x 120
LFT	15 x 15 / 30 x 30 / 45 x 45 / 60 x 60 / 90 x 90

Abb. 6-14: Verwendete Rezyklatchips mit definierten Abmessungen

6.1.1 FKV mit nicht-gebundenen Fasern (GMT, LFG)

In Abb. 6-15 sind Röntgenaufnahmen eines GMT-Halbzeuges, eines Rezyklathalbzeuges und eines Rezyklatbauteils dargestellt. Die Neuware besitzt eine relativ gleichmäßige Faserverteilung mit der für GMT typischen Mattenstruktur (Abb. 6-15, links). In der Mitte der Abb. 6-15 ist ein Rezyklathalbzeug aus Chips mit Abmessungen von 90x90 mm zu sehen. Deutlich sind ungleichmäßige Faserverteilungen und Orientierungen sowie einzelne Chipgrenzen erkennbar. Durch die geringen Scherkräfte beim Pressen kommt es nur zu lokalen Fließvorgängen an den Chipgrenzen. Im Fall von GMT und LFG werden jedoch durch den erneuten Fließvorgang bei der Bauteilherstellung die vorhandenen Inhomogenitäten vollständig aufgelöst (Abb. 6-15, rechts).

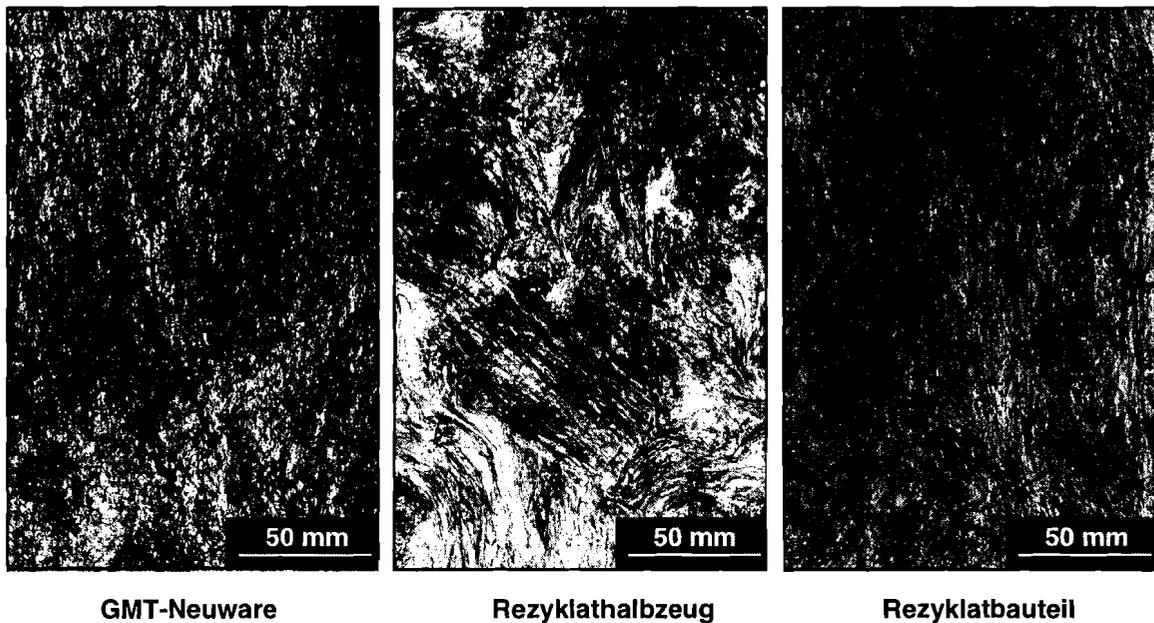


Abb. 6-15: Faserverteilung (GMT mit 40 Gew.-% Glasfasern; Röntgenaufnahme)

Abb. 6-16 zeigt die Zugfestigkeit und den E-Modul eines im BONDPRESS-Verfahren verarbeiteten GMT (B100F40, Fa. Elastogran) mit 40 Gew.-% Faseranteil als Funktion der Rezyklatchipgröße. Eine Abhängigkeit des Zugmoduls von den Chipabmessungen ist nicht zu erkennen. Bereits mit der kleinsten Fraktion von 15 x 15 mm großen Chips wird eine Zugsteifigkeit in der Größenordnung der Neuware erreicht. Wie aus der Literatur bekannt ist, genügen in diskontinuierlich verstärkten FKV bereits Faserlängen von wenigen Millimetern, um den E-Modul gegen einen Höchstwertwert laufen zu lassen. Die beiden Chipfraktionen mit den größten Abmessungen weisen relativ große Streubreiten auf, diese sind jedoch für GMT-Werkstoffe nicht untypisch.

Die Zugfestigkeit steigt zunächst mit der Chipgröße an, erreicht aber bereits bei einer Kantenlänge von 30 mm ihren Höchstwert. Die Verwendung größerer Rezyklatchips führt zu keiner nennenswerten Zunahme der Kennwerte. Die Zugfestigkeit des Ausgangswerkstoffes von ca. 120 N/mm² wird nicht erreicht. Die Ursache für die ca. 15 %-ige Abnahme ist in der Auflösung der Mattenstruktur zu suchen. So werden im Ausgangsmaterial auftretende Belastungen von einem Netzwerk ganzer Faserrovings aufgenommen, während nach der Zerkleinerung und erneuten Verarbeitung größtenteils nur noch lange Einzelfasern vorliegen.

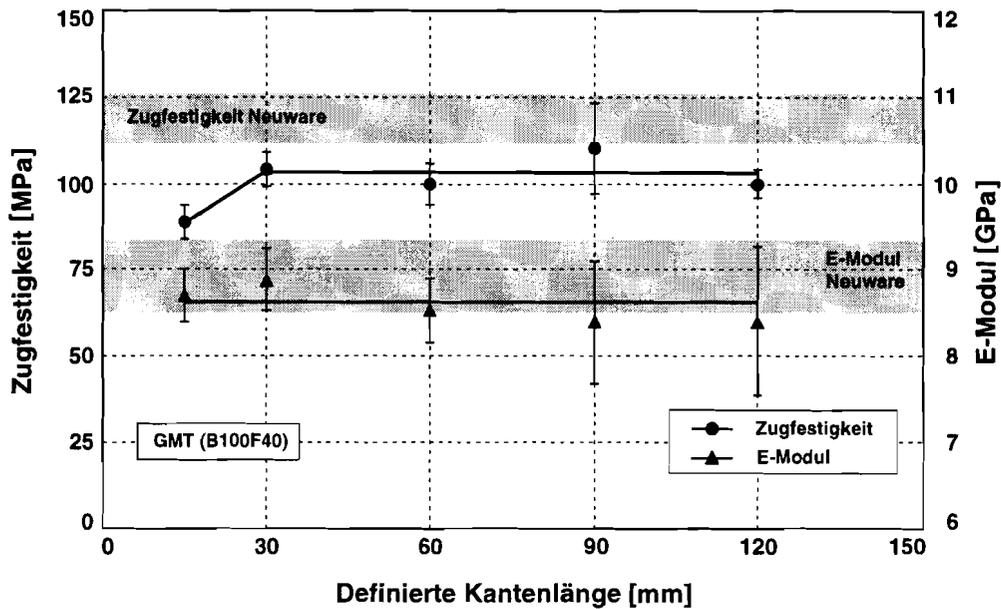


Abb. 6-16: Zugfestigkeit und E-Modul in Abhängigkeit der Chipabmessung

Die in Abb. 6-17 dargestellten Ergebnisse für die Schlagzähigkeit und Durchstoßarbeit zeigen einen ähnlichen Verlauf. Deutlich ist der Einfluß der Chipgröße und damit der Faserlänge auf die zähigkeitsbestimmenden Kennwerte erkennbar. Zunächst erfolgt eine stetige Zunahme der Schlagzähigkeit bzw. Durchstoßarbeit bis zu einer Chipgröße von 60 mm Kantenlänge. Anschließend geht der Anstieg mit zunehmender Kantenlänge deutlich zurück und kann näherungsweise als konstant angesehen werden. Dabei erreichen die Kennwerte sowohl für die Schlagzähigkeit als auch für die Durchstoßarbeit nahezu das Niveau des Ausgangsmaterials. Die Ergebnisse bestätigen die Tatsache, daß die Zähigkeit eines diskontinuierlich verstärkten FKV weitaus stärker von der Faserlänge bestimmt wird als die Festigkeit.

Nach den hier gezeigten Resultaten kann somit im Halbzeugverfahren, bei Verwendung von Chips unter 15 mm Kantenlänge, ohne eine Modifikation des Rezyklates maximal eine Schlagzähigkeit von 50 % der Neuware erzielt werden. Die üblicherweise im Plastifizierpreßverfahren verwendeten Rezyklatchips von 30 mm können demnach nur zu einer Schlagzähigkeit führen, die weniger als 70 % der Neuware beträgt. Nicht berücksichtigt sind dabei zusätzliche Faserschädigungen während der Verarbeitung im Extruder bzw. Plastifizieraggregat.

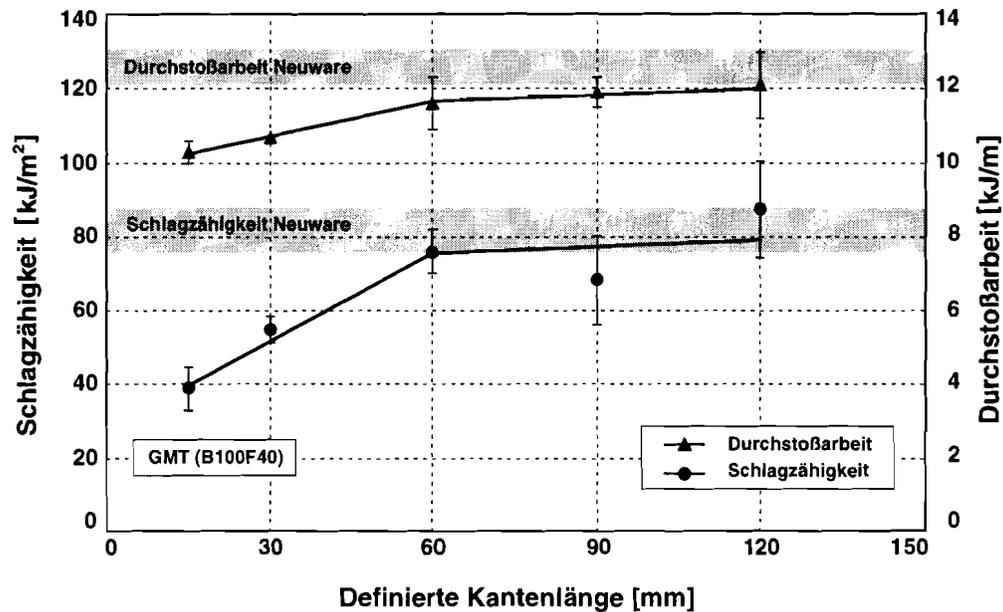


Abb. 6-17: Schlagzähigkeit und Durchstoßarbeit in Abhängigkeit der Chipabmessung

Abb. 6-18 zeigt die Zugfestigkeit und den E-Modul als Funktion der Rezyklatchipgröße eines im BONDPRESS-Verfahren verarbeiteten LFG (Compel®, Fa. TICONA) mit 40 Gew.-% Faseranteil. Beide Kennwerte liegen für das Ausgangsmaterial etwas unterhalb des zuvor betrachteten GMT. In Bezug auf die Chipgröße ist für den Zugmodul keine Abhängigkeit mit zunehmenden Abmessungen festzustellen. Bereits mit der kleinsten Fraktion von 15 x 15 mm Kantenlänge wird das Niveau des Ausgangsmaterials erreicht.

Im Gegensatz zum GMT ergibt sich für das LFG ein anderes Verhalten bei der Zugfestigkeit. So ist über den gesamten untersuchten Bereich keine eindeutige Abhängigkeit von der Chipgröße festzustellen. Dieses Ergebnis ist auf den hohen Anteil an Haftvermittlern in Compel® zurückzuführen. Durch die bessere Faser/Matrix-Haftung kommt es zu einer Reduzierung der kritischen Faserlänge, da in der Grenzschicht zwischen Faser und Matrix größere Schubspannungen übertragen werden können. Dies führt zu einer Verschiebung der optimalen Rezyklatchipgröße hin zu kleineren Abmessungen.

Erstaunlich ist die Tatsache, daß die Zugfestigkeit nicht nur auf einem sehr hohen Niveau liegt, sondern teilweise sogar die Werte der Neuware leicht übertrifft. Ursache ist vermutlich eine bessere Homogenisierung des Werkstoffes und eine gleichmäßigere Verteilung von Additiven durch den erneuten Verarbeitungsprozeß.

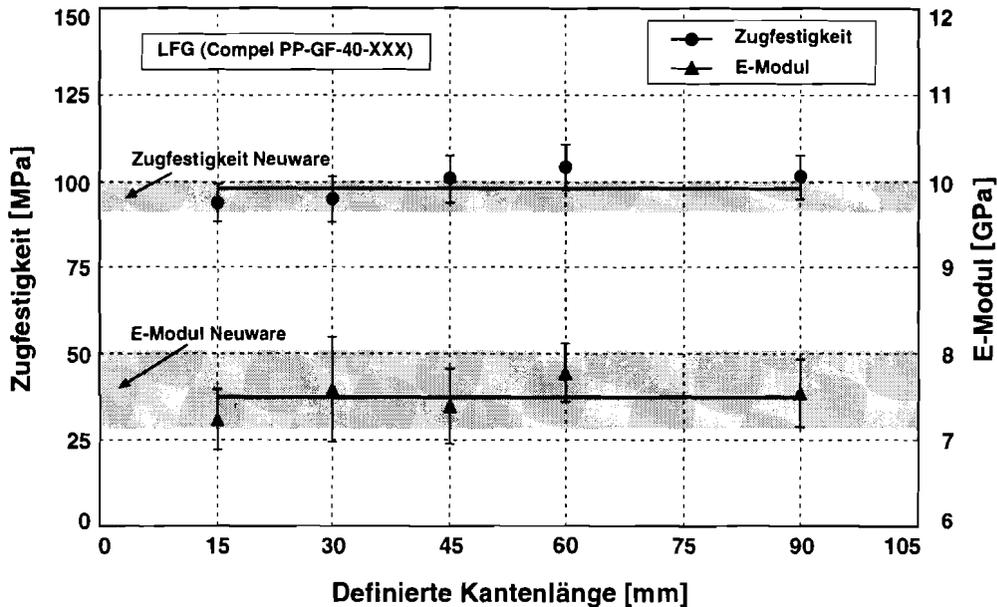


Abb. 6-18: Zugfestigkeit und E-Modul in Abhängigkeit der Chipabmessung

Die in Abb. 6-19 dargestellten Ergebnisse für die Schlagzähigkeit und Durchstoßarbeit zeigen einen ähnlichen Verlauf wie beim GMT. Hier ist ebenfalls ein deutlicher Einfluß der Chipgröße und damit der Faserlänge auf die zähigkeitsbestimmenden Kennwerte erkennbar. Zunächst erfolgt eine stetige Zunahme der Schlagzähigkeit bis zu einer Chipgröße von 60 mm Kantenlänge. Anschließend geht der Anstieg mit zunehmenden Abmessungen deutlich zurück und kann näherungsweise als konstant angesehen werden. Dabei liegen die Kennwerte annähernd auf dem Niveau des Ausgangsmaterials. Aufgrund der guten Faser/Matrix-Haftung werden bereits mit der kleinsten Chipfraktion über 70 % der Schlagzähigkeit von Neuware erreicht.

Die Durchstoßarbeit steigt gleichermaßen mit der Chipgröße an und erreicht bereits bei 45 mm ihren Maximalwert. Eine weitere Erhöhung der Abmessungen führt zu keiner Zunahme der Kennwerte. Das Niveau der Neuware wird bei der Durchstoßarbeit um ca. 10 % unterschritten.

Aus den hier gezeigten Ergebnissen folgt für ein System mit guter Faser/Matrix-Haftung, wie es das untersuchte Compel® darstellt, daß durch Verwendung von Chips mit 15 mm Kantenlänge, die maximale Zugfestigkeit erreicht wird und sich eine Schlagzähigkeit von ca. 70 % der Neuware ergibt. Die üblicherweise im Plastifizierpreßverfahren verwendeten Rezyklatchips von 30 mm können demnach maximal zu einer Schlagzähigkeit führen, die im Bereich von 75 % der Neuware liegt. Nicht berücksichtigt ist wiederum eine zusätzliche Faserschädigungen im Plastifizieraggregat.

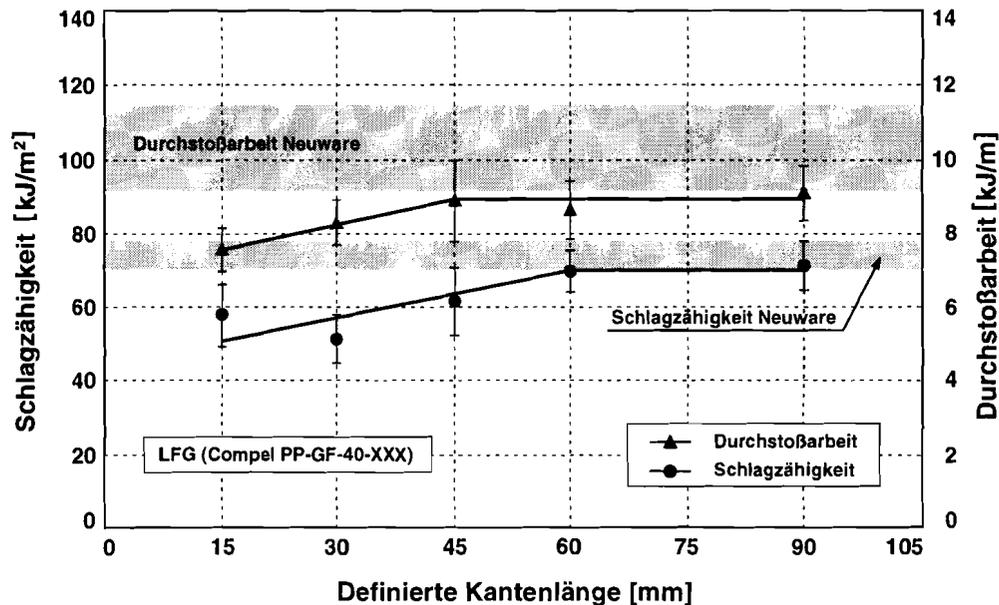


Abb. 6-19: Schlagzähigkeit und Durchstoßarbeit in Abhängigkeit der Chipabmessung

6.1.2 FKV mit gebundenen Fasern (Organobleche)

Wie die Untersuchungen zur Abhängigkeit der mechanischen Kennwerte von der Rezyklatchipgröße an FKV mit nicht-gebundenen Fasern gezeigt haben, lassen sich im Vergleich zu anderen Verwertungskonzepten im BONDPRESS-Verfahren Bauteile mit hervorragenden Eigenschaften herstellen. Gründe hierfür sind der Erhalt großer Faserlängen und die geringen thermischen und mechanischen Beanspruchungen während des gesamten Prozesses.

Dagegen erwies sich das BONDPRESS-Verfahren für FKV mit chemisch oder mechanisch gebundenen Fasern, wie z.B. Organobleche, als weniger geeignet, da die bestehenden Verstärkungsstrukturen durch die geringen Fließkräfte nur unzureichend oder gar nicht aufgelöst werden und eine Vereinzelung der Fasern nicht stattfindet. Während des Preßvorgangs fließen die Gewebestreifen nur sehr schlecht, so daß es mit zunehmender Länge zu Fließbehinderungen und Bereichen mit Faser- bzw. Matrixanhäufungen kommt. Die Herstellung eines homogenen Verbundes (Abb. 6-20) mit reproduzierbaren Eigenschaften ist nicht möglich.

Selbst in Bauteilen, die aus Rezyklatchips mit den kleinsten Abmessungen hergestellt worden sind, lassen sich teilweise noch unaufgelöste Gewebestrukturen finden. Diese Tatsache führt zu starken Streuungen im Fasergehalt der untersuchten Probekörper. Aus diesem Grund wurde nach den Versuchen der Fasergehalt der Prüfkörper bestimmt und zusätzlich in den nachfolgenden Diagrammen aufgetragen.

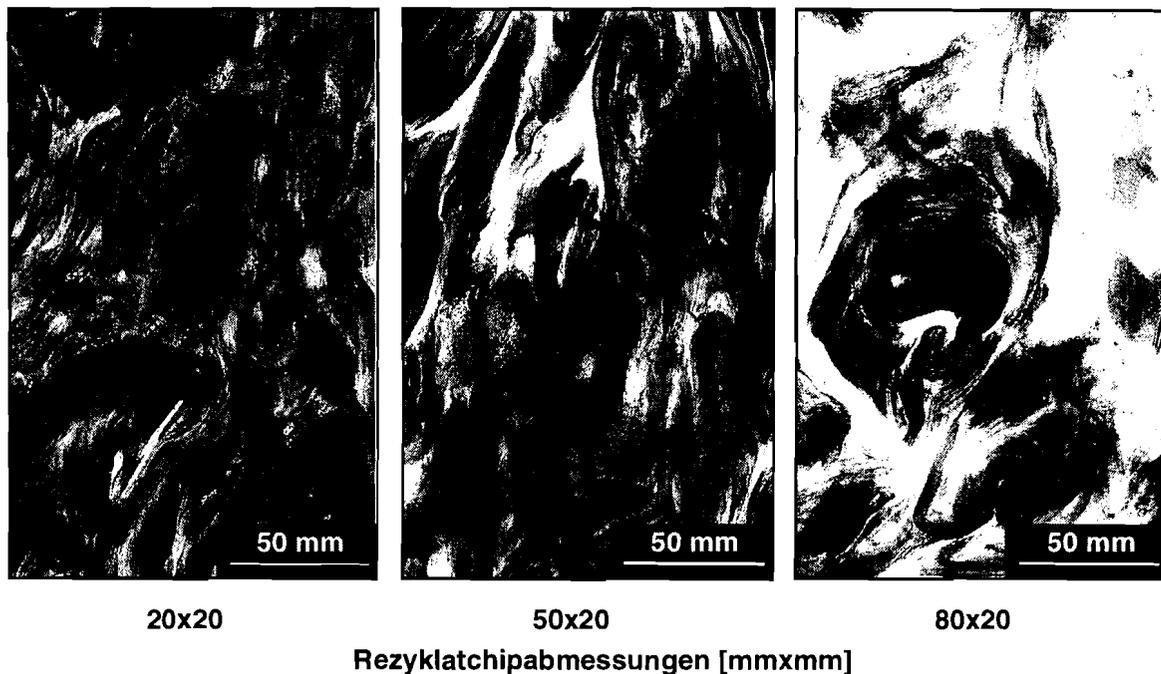


Abb. 6-20: Faserverteilung (Organoblech; Röntgenaufnahme)

In Abb. 6-21 ist die Zugfestigkeit über der Chiplänge aufgetragen. Grundsätzlich liegen alle Kennwerte über denen eines unverstärkten PA 12 mit einer Zugfestigkeit von 45 N/mm². Ein direkter Vergleich der Fraktionen untereinander wird durch die unterschiedlichen Faseranteile erschwert, da insbesondere der Fasergehalt bei 80 mm langen Chips mit nur 27 Gew.-% stark von den beiden anderen abweicht.

Die Erhöhung der Chiplänge von 20 mm auf 50 mm führt zu einem Anstieg der Zugfestigkeit. Trotz der sehr ungleichmäßigen Verstärkungsstruktur bewirken die längeren Fasern eine positive Spannungsverteilung. Die Streuung der Kennwerte ist unter Berücksichtigung des stark inhomogenen Werkstoffes als moderat zu bezeichnen. Dies läßt den Schluß zu, daß Kennwerte, die bei kleinen Deformationen und Deformationsgeschwindigkeiten ermittelt werden, weniger stark von Inhomogenitäten beeinflusst werden.

Es kann keine Aussage getroffen werden, inwieweit die geringe Zugfestigkeit für Chips mit 80 mm Länge auf die inhomogene Faserverteilung oder auf den niedrigen Fasergewichtsanteil zurückzuführen ist.

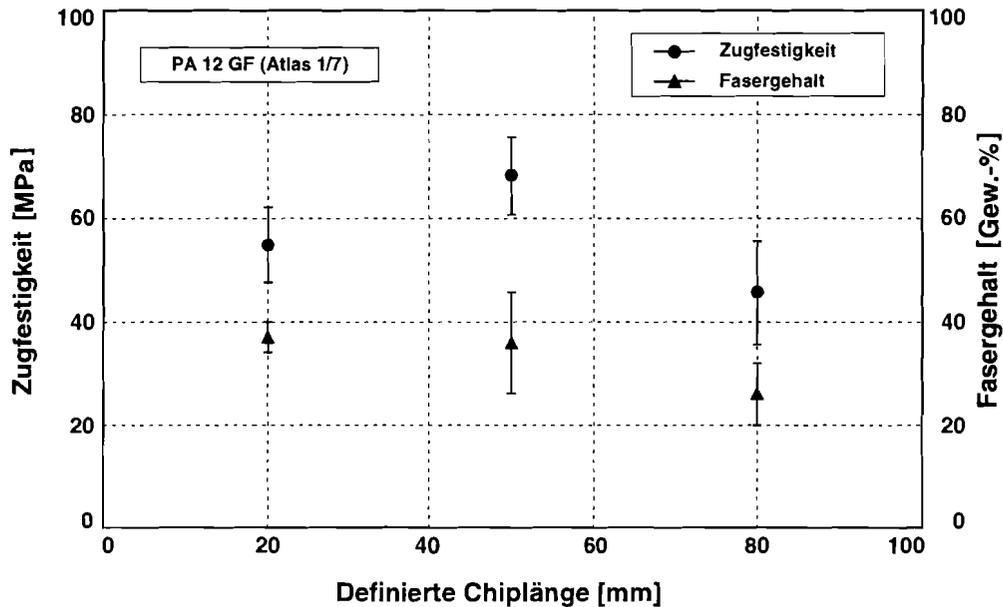


Abb. 6-21: Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Chiplänge (Chipbreite: 20 mm)

Die in Abb. 6-22 aufgetragenen Ergebnisse für die Schlagzähigkeit weisen extrem hohe Standardabweichungen von teilweise bis zu 35 % auf. Ein Vergleich der Ergebnisse und eine sich daraus ergebende Aussage über den Einfluß der Rezyklatchipgröße auf die Schlagzähigkeit erscheinen daher wenig sinnvoll. Die tendenzielle Abnahme der Kennwerte und ihrer Streubreiten mit der Rezyklatchiplänge ist auf ein zunehmendes Matrixversagen in den stärker inhomogenen Bauteilen zurückzuführen.

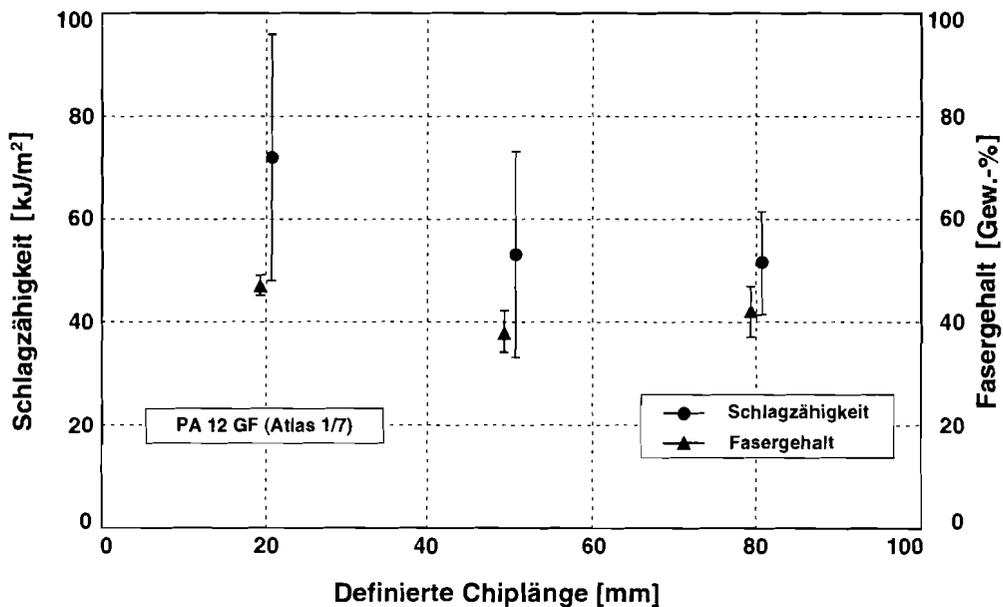


Abb. 6-22: Schlagzähigkeit in Abhängigkeit der Chiplänge (Chipbreite: 20 mm)

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß für die einzelnen mechanischen Kennwerte eine minimale Chipgröße existiert, ab der eine weitere Vergrößerung der Abmessungen keine nennenswerte Zunahme der Kennwerte ergibt. Die größten Abhängigkeiten ergaben sich für die zähigkeitsbestimmenden Kennwerte Durchstoßarbeit und Schlagzähigkeit. Des weiteren zeigten die Untersuchungen, daß ein Einfluß der Faser/Matrix-Haftung besteht. In Systemen mit guter Anbindung zwischen Faser und Matrix kommt es zu einer Verschiebung der optimalen Chipgröße hin zu geringeren Abmessungen (Abb. 6-23).

	GMT	LFG (gute Haftung)
Zug-E-Modul	15 x 15 mm	15 x 15 mm
Zugfestigkeit	30 x 30 mm	15x15 mm
Schlagzähigkeit	60 x 60 mm	60 x 60 mm
Durchstoßarbeit	60 x 60 mm	45 x 45 mm

Abb. 6-23: Anforderungsoptimierte Chipabmessungen (definierte Kantenlänge)

Aus den Untersuchungen wurde eine optimale Chipabmessung von 60 x 60 mm ermittelt.

6.2 Dynamische Versuche mit Rezyklat optimaler Chipgröße

Neben den Kriterien Steifigkeit, Festigkeit und Zähigkeit ist bei dynamisch beanspruchten Strukturbauteilen insbesondere das Ermüdungsverhalten von Interesse. Erst in den letzten Jahren konnten die für eine Serienproduktion notwendigen Betriebsfestigkeitsuntersuchungen an Bauteilen aus LFT und GMT mit ca. 20 - 30 % Rezyklatanteil zufriedenstellend durchgeführt werden. Eine Erhöhung des Rezyklatanteils an Bauteilen auf 100 % ist für eine zukünftige Serienproduktion als große Herausforderung anzusehen.

Das Ermüdungsverhalten wurde sowohl an Flachproben als auch an Bauteilen untersucht. Es sind jeweils die Materialien Neeware-GMT (PP-GM 40 R0) und mittels BONDPRESS-Verfahren vollständig rezykliertes GMT (PP-GM 40 R100) verglichen worden.

Aus den vorangegangenen Versuchen mit verschiedenen Chipabmessungen wurde eine anforderungsoptimierte Abmessung von 60 x 60 mm ermittelt, weshalb bei den zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens produzierten BONDPRESS-Platten bzw. Bauteilen Chips mit einer mittleren Stückgröße von 60 mm verwendet wurden. Durch eine Klassierung ist die obere Stückgröße auf 70 mm und die untere Stückgröße auf 50 mm begrenzt worden.

6.2.1 Flachproben

Die mit einer Bandsäge zugeschnittenen Probekörper haben einen Querschnitt von 25 mm x 4 mm. Die Klemmlänge der Spannbacken des verwendeten Zugprüfstandes betrug 170 mm.

Um die Lastniveaus der Dauerfestigkeitsprüfungen normieren zu können, wurden vorerst Zugfestigkeitsprüfungen bei 20°C und bei 100°C Prüftemperatur durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 6-24 dargestellt.

	R_m bei 20°C [MPa]	R_m bei 100°C [MPa]
GMT	99,5	85,6
BONDPRESS	96,6	67,7

Abb. 6-24: Zugfestigkeit der GMT-Probe und BONDPRESS-Probe bei 20°C und 100°C

Die Zugfestigkeit der BONDPRESS-Probe bei 20°C Prüftemperatur liegt nur 3 % unter der Zugfestigkeit der GMT-Probe. Bei 100°C Prüftemperatur fällt sie bei der GMT-Probe um 16 %, bei der BONDPRESS-Probe um 30 % ab. Dieser Festigkeitsverlust der BONDPRESS-Probe bei 100°C Prüftemperatur zeigte sich auch bei den dynamischen Versuchen in Abb. 6-25 durch geringere Schwingenspielzahlen im Vergleich zur GMT-Probe bei 100°C.

In den dynamischen Untersuchungen wurden die Flachproben bei 20°C und 100°C in Anlehnung an die allgemein gültige Betriebsfestigkeitsnorm DIN 50 100 bzw. die speziell für Faserkunststoffverbunde vorliegende Norm ASTM D 3479 geprüft.

Die Dauerfestigkeitsprüfung wurde auf einem Zugprüfstand durchgeführt, der kraft geregelt im Zugschwellbereich mit einer Frequenz von 10 Hz betrieben wurde. Das Spannungsverhältnis $R = \sigma_o / \sigma_o$ betrug 0,1. Für jedes Lastniveau wurden 4 Proben geprüft. Die in den Abbildungen abzulesenden Schwingenspielzahlen sind arithmetisch gemittelt.

Abb. 6-25 zeigt die normierten Wöhlerkurven (Oberspannung σ_o /Zugfestigkeit R_m) der BONDPRESS-Probe und GMT-Probe bei einer Prüftemperatur $T = 20^\circ\text{C}$ und $T = 100^\circ\text{C}$. Die Normierung der Oberspannung σ_o erfolgte jeweils auf die Zugfestigkeit R_m der GMT Probe bei einer Prüftemperatur von 20°C. Die durchgezogenen Linien sind als Ausgleichslinien bzw. Tendenzlinien zu verstehen.

Bei einer Prüftemperatur von 20°C erreichte die Probe, welche aus 100 % Rezyklat besteht (BONDPRESS-Probe) bei allen Lastniveaus σ_o/R_m ähnlich hohe Schwingenspielzahlen wie die Probe aus GMT-Neuware (GMT-Probe). Beim Lastniveau von ca. 0,35 versagte die BOND-

PRESS-Probe bei ca. $6,5E+05$ Schwingspielen, die GMT-Probe bei $2,2E+05$ Schwingspielen.

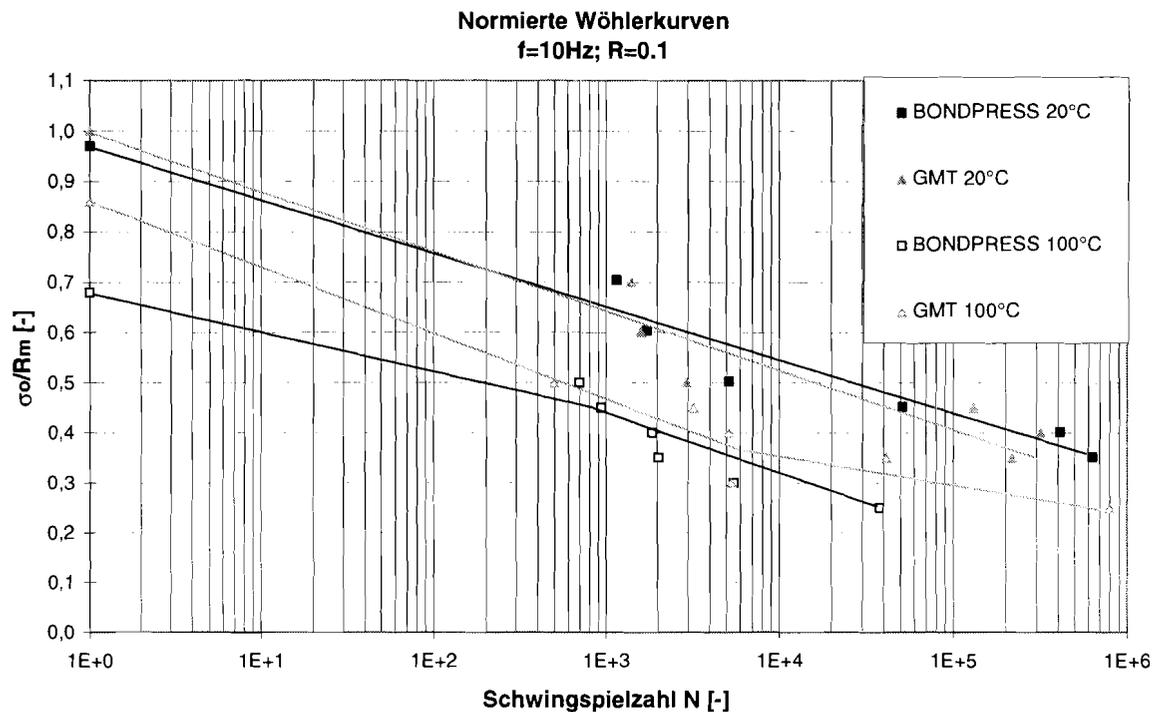


Abb. 6-25: Ermüdungsverhalten von BONDPRESS-Probe und GMT-Probe bei 20°C und bei 100°C (σ_0/R_m - Schwingspielzahl N)

Die Schwingspielzahl der BONDPRESS-Probe bei 100°C Prüftemperatur liegt bei einem Lastniveau von 0,25 mit ca. $4E+04$ deutlich niedriger als jene von der GMT-Probe, die nach $8E+05$ Schwingspielen versagte.

Abb. 6-26 zeigt die Darstellung der Wöhlerkurven, wobei auf der Ordinate die absolute Spannungsamplitude σ_a aufgetragen wurde.

Aus Abb. 6-25 u. Abb. 6-26 ist zu sehen, daß die BONDPRESS-Probe bei einer Prüftemperatur von 20°C ähnlich gute Ergebnisse bzgl. Ermüdungsverhalten lieferte wie die GMT-Probe.

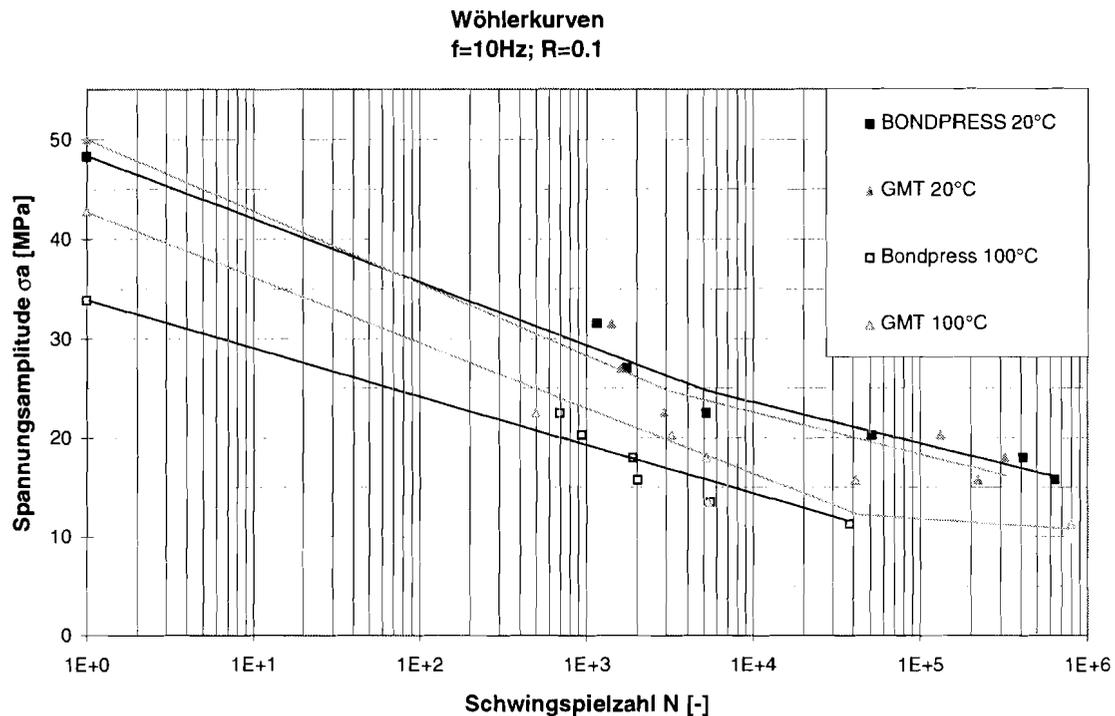


Abb. 6-26: Ermüdungsverhalten von BONDPRESS-Probe und GMT-Probe bei 20°C und bei 100°C (σ_a - Schwingenspielzahl N)

Das Absinken der Schwingenspielzahlen beider Proben bei 100°C Prüftemperatur bzw. die relativ niedrigere maximale Schwingenspielzahl der BONDPRESS-Probe ist wie folgt zu erklären: Bei erhöhten Temperaturen von 100°C fallen die mechanischen Eigenschaften der PP-Matrix stark ab. Dadurch kommt der Verstärkungsstruktur eine wichtige Bedeutung zu. Während BONDPRESS-Proben aus einem Netzwerk von Langfasern bestehen, ist in Platten aus GMT-Neuware die Mattenstruktur noch voll erhalten. Diese vermag äußere Belastungen besser aufzunehmen als ein Netzwerk aus Langfasern. Kleinere Risse und Spannungsspitzen, die bei Langfasern zum Werkstoffversagen führen, können im Fall von Matten durch Kraftumlenkung über benachbarte Fasern besser ausgeglichen werden.

Des Weiteren liegen bei langfaserverstärkten Werkstoffen die Dimensionen von Normprüfkörpern teilweise sogar unter der Länge der Verstärkungsfasern. Eine Extrapolation der Kennwerte auf Bauteileigenschaften ist daher sehr schwierig, da in einem großflächigen Bauteil mit ungekürzten Fasern ein anderes Versagensverhalten vorliegt, weshalb eine Bauteilprüfung bei 100°C unumgänglich ist.

6.2.2 Bauteile

Die Verarbeitung der Halbzeuge GMT (PP-GM 40 R0) und der 100 % Rezyklat- bzw. BONDPRESS-Platten (PP-GM 40 R100) zu Montageträgern wurde nach dem GMT-Fließpressverfahren durchgeführt.

Die zu vergleichenden Bauteile wurden auf einer Hydropulsanlage mit vorangehender Auswahl eines Belastungskollektiv geprüft (siehe Abb. 6-28).

Um harte Prüfbedingungen zu gewährleisten, wurde als Prüffrequenz der harmonischen Schwingung die 1. Eigenfrequenz des Gesamtsystems gewählt.

Die Montageträger wurden in Anlehnung an Forderungen der Automobilindustrie folgenden Prüfbedingungen unterzogen:

Prüffrequenz [Hz]	20
maximale Beschleunigung [g]	6
Amplitude [mm]	0,5
Temperatur	100°C
Lastwechselzahl [-]	2,5E+06

Abb. 6-27: Prüfbedingungen beim Bauteiltest

In Abb. 6-28 ist die Versuchsanordnung der dynamischen Bauteilprüfung dargestellt.

Nach einer optischen Prüfung konnte kein Versagen der Montageträger festgestellt werden. Dies gilt auch für die kritischen Punkte der Kühleranbindungen und für die Fronträgeranbindungen sowie die seitlichen Anbindungen an die Kotflügelinnenbleche.

Auch konnte kein unterschiedliches Verhalten zwischen den Montageträgern aus GMT-Neuware und jenen aus 100 % Rezyklat unter Einhaltung der in Abb. 6-27 genannten Prüfbedingungen festgestellt werden.

Es ist somit festzuhalten, daß das Ergebnis der dynamischen Prüfung mit 100 % Rezyklat-Montageträgern als positiv zu bewerten ist.

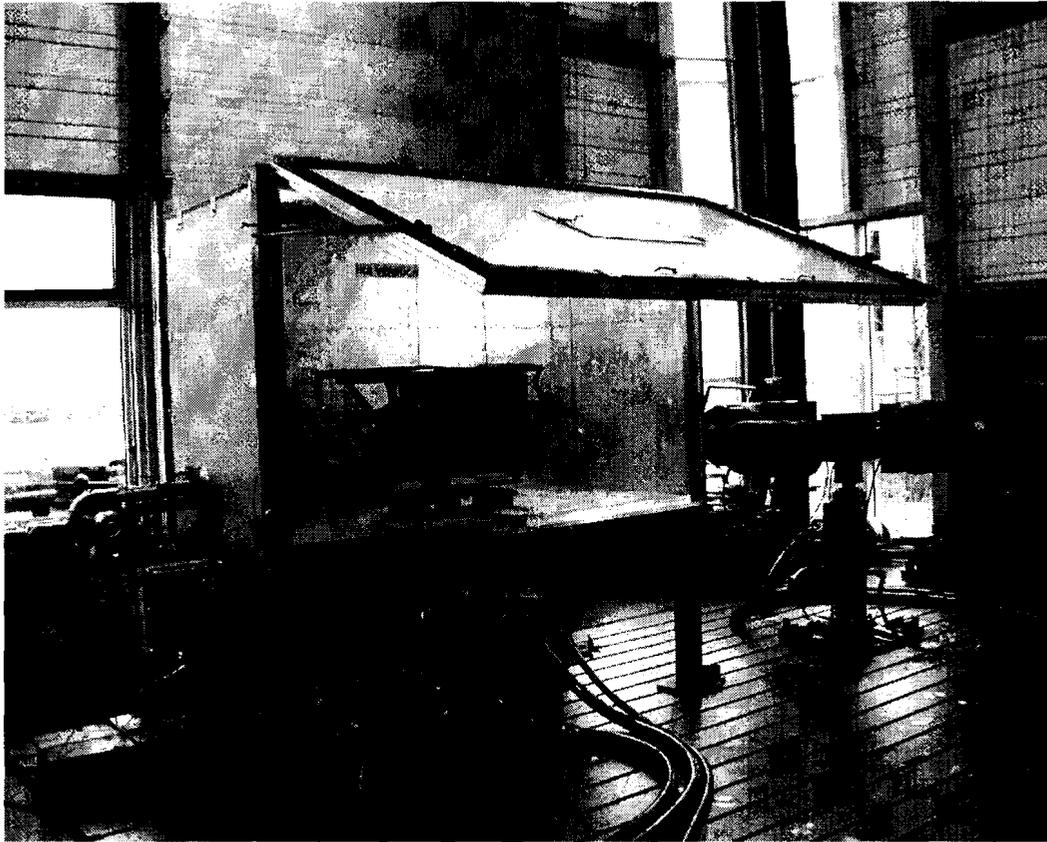


Abb. 6-28: Versuchsanordnung der dynamischen Bauteilprüfung

Um eine volle Serientauglichkeit der 100 % Rezyklat Montageträger nachhaltig zu gewährleisten, werden in Absprache mit der KFZ-Zulieferfirma Menzolit-Fibron, Bretten, weitere Versuchsläufe durchgeführt.

6.3 Untersuchungen zur Zerkleinerung mit dem Einwellenzerkleinerer

Zielsetzung dieser Untersuchungen ist die Entwicklung bzw. Optimierung eines Einwellenzerkleinerers im Hinblick auf die Produktion von hochwertigen Rezyklaten aus langfaserverstärkten Bauteilen.

Ausgehend von theoretischen Untersuchungen und den Erkenntnissen der in Kapitel 5 dargestellten Zerkleinerungsversuche wurden anschließend die den Zerkleinerungsvorgang beeinflussenden Parameter identifiziert und ihr qualitativer Einfluß auf das Zerkleinerungsergebnis beschrieben. Um weiterführende Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen den identifizierten Parametern und der Zerkleinerungsergebnisse zu erhalten, wurden Versuche mit einem modifizierten Einwellenzerkleinerer durchgeführt.

6.3.1 Detaillierte Beschreibung der Zerkleinerungsaufgabe

Ausgehend von den Untersuchungen in Kapitel 6.1 wird im Zerkleinerungsprodukt eine mittlere Stückgröße von ca. 60 x 60 mm gefordert. Bezüglich der Stückgröße und -form ist eine enge Verteilung innerhalb des Zerkleinerungsproduktes zu erzielen.

Ab einer Stückgröße von ca. 60 mm ist keine wesentliche und ab 90 mm ist keine Steigerung der mechanischen Eigenschaften mehr zu erwarten. Darüber hinaus verschlechtern große Stücke die Schüttguteigenschaften in bedeutendem Maße, so daß es zu Brückenbildung in Aufgabetrichtern, Rinnen und Übergabestellen bei der Verarbeitung kommen kann. Diese Prozeßstörungen sind laut Aufgabenstellung in jedem Fall zu vermeiden.

In Zusammenarbeit mit der Fa. Menzolit Fibron, dem Institut für Aufbereitung und dem Institut für Verbundwerkstoffe GmbH wurde nach derzeitigen Erkenntnissen und in Anlehnung an die Stückgrößenverteilung derzeitig produzierter und verwerteter Rezyklate folgende Zerkleinerungsaufgabe bestimmt:

- 60 mm mittlere Stückgröße (Hauptabmessung b, siehe Abb. 5-1)
- Hauptabmessung b: 0 Gew.-% > 100 mm, maximal 5 Gew.-% 100 - 80 mm
- Hauptabmessung a: max. 5 Gew.-% > 120 mm, max. 8 Gew.-% 120 - 100 mm, max. 15 Gew.-% 100 - 80 mm
- Maximale Hauptabmessung $a_{\max} < 150$ mm

Die Verstärkungswirkung von Rezyklaten mit Stückgrößen von < 20 mm (b) sind als sehr gering einzustufen. Daher sind diese bei der Zerkleinerung zu vermeiden.

6.3.2 Konzeptionierung des Versuchsaggregates

Wie in Kapitel 5.6 beschrieben, erwies sich der Einwellenzerkleinerer, ausgestattet mit einem Flach-Rotor, zur Lösung der gestellten Zerkleinerungsaufgabe als besonders gut geeignet.

Mit Hilfe des zu konzeptionierenden Versuchsaggregates sollten Erkenntnisse über den Einfluß der verschiedenen Maschinenparameter auf das Zerkleinerungsergebnis entsprechend der Zerkleinerungsaufgabe erlangt werden.

6.3.2.1 Maschinelle Konzeption des Einwellenzerkleinerers

In der folgenden Abb. 6-29 ist der prinzipielle Aufbau eines Einwellenzerkleinerers dargestellt.

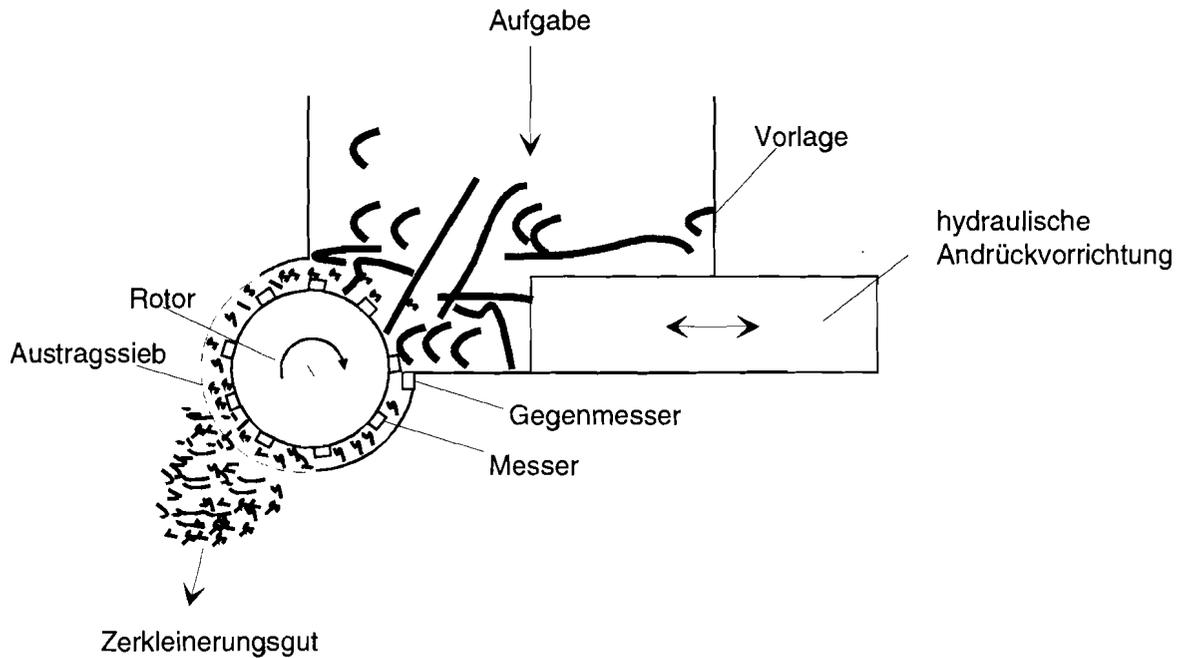


Abb. 6-29: Einwellenzerkleinerer [MEI97]

In der folgenden Abb. 6-30 ist in Form einer Prinzipskizze die Anordnung der Messer- und Gegenmesser sowie ein Messer dargestellt.

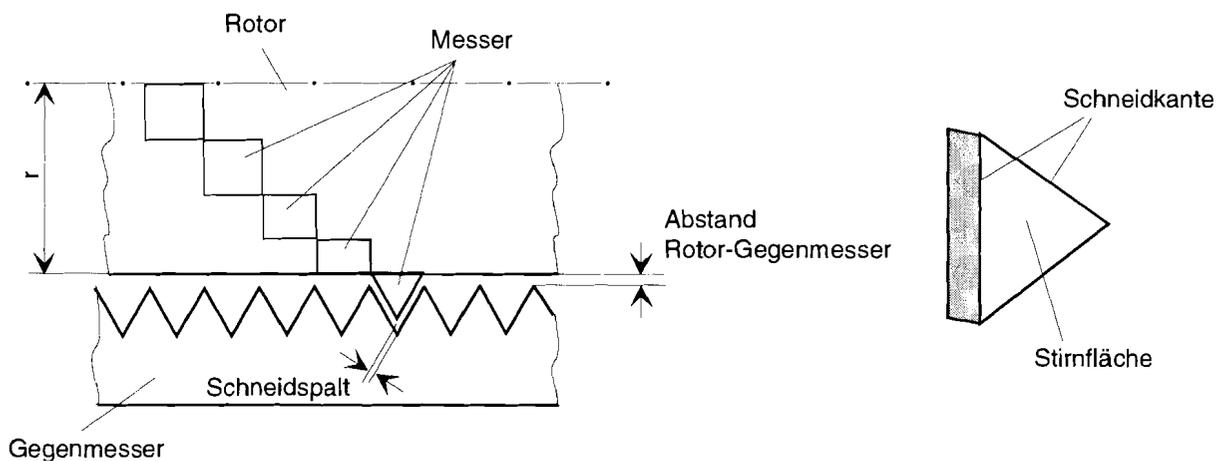


Abb. 6-30: Flachrotor, Gegenmesser und Messer eines Einwellenzerkleinerers [MEI97]

6.3.2.2 Theoretische Untersuchungen zum Schneidvorgang

Um näheren Aufschluß über die den Zerkleinerungsvorgang beeinflussenden Parameter zu bekommen, werden in diesem Kapitel theoretische Überlegungen zum Schneidvorgang bei der Einwellenzerkleinerung vorgestellt.

Beim Schneidvorgang wird das Material entlang einer Schnittlinie spanlos zerteilt. Die Schnittlinie entspricht im idealen Fall der Länge der Schneidmesserkerne. Im realen Fall kann es schon vorher zum Abriß des Materials oder auch zu einem unvollständigen Schnitt und somit zu ungleichmäßigen Stückgrößen kommen. Bei der Bestimmung der Schnittlinie wird unterschieden zwischen geschlossener Schnittlinie beim Ausschneiden (Ausstanzen) und offener Schnittlinie beim Abschneiden. Entsprechend dieser Bestimmung entsteht bei einem Zerkleinerungsprozeß mit einem Einwellenzerkleinerer eine offene Schnittlinie. Die durch den Schneidvorgang neu entstandene Grenzfläche kann, entweder ungleichmäßige, "gezackte" (beim Abriß des Materials) oder eine fast gradlinige Form (beim idealen Schneidvorgang) aufweisen. Letzteres sollte bei den Untersuchungen zur Optimierung des Einwellenzerkleinerers angestrebt werden.

Zur Lösung der gestellten Aufgabe sollten bei der Zerkleinerung der faserverstärkten Thermoplaste möglichst gradlinige, gleichmäßige (rechteckige) Stückformen in einer engen Stückgrößenverteilung entstehen. Dieses kann nur erreicht werden, wenn bei der Zerkleinerung weitgehend eine schneidende Beanspruchung vorherrscht und reißende Beanspruchung vermieden wird (siehe Abb. 6-31).

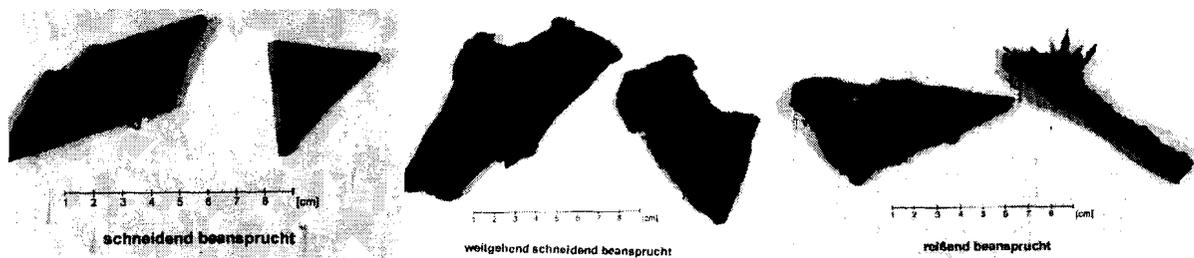


Abb. 6-31: Grenzflächen, die durch schneidende, weitgehend schneidende und reißen- de Beanspruchung entstanden sind

Wie in Abb. 6-32 skizziert, kann bei der Zerkleinerung mit dem Einwellenzerkleinerer je nach Messer-Gegenmesser-Anordnung ein einhubiges vollkantiges oder kreuzendes Scherschneiden mit negativem oder positivem Schneidwinkel entstehen.

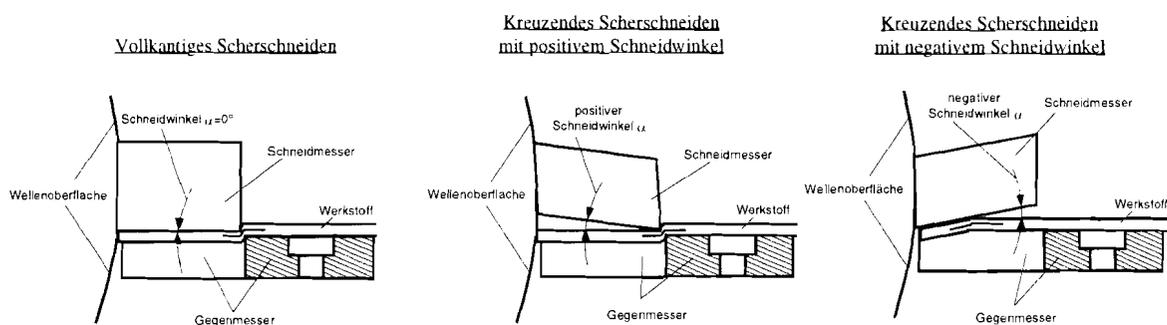


Abb. 6-32: Vollkantiges Scherschneiden und kreuzendes Scherschneiden mit positivem und negativem Schneidwinkel

Das vollkantige und kreuzende Scherschneiden unterscheidet sich bezüglich des Winkels, mit dem das zu zerkleinernde Material von den Messern geschnitten wird. Beim vollkantigen Scherschneiden trifft eine oder mehrere Schneidkanten auf der ganzen Länge gleichzeitig auf das Material auf. Im Gegensatz dazu entsteht beim kreuzenden Scherschneiden eine punktuelle Beanspruchung ("Scherenschnitt"), da das Messer mit einer oder mehreren Kanten punktuell in das Material eintaucht, wobei diese Kanten nicht auf der gesamten Länge in Kontakt mit dem Material stehen. Die Abb. 6-32 stellt den Unterschied zwischen dem vollkantigen und dem kreuzenden Scherschneiden dar.

Die Entstehung des vollkantigen oder kreuzenden Scherschneidens wird von der Messer-Gegenmesser-Anordnung und vom Schliff der Oberfläche (Stirnfläche) des Messers (Planschliff oder Schräg- bzw. Konkavschliff) beeinflusst.

Aufgrund der langen Messerkantenlänge und damit der großen Stirnfläche der Messer sowie der relativ großen Festigkeit des Aufgabematerials ist die Zerkleinerung von faserverstärkten Thermoplasten entsprechend der gestellten Aufgabe nur durch das kreuzende Scherschneiden möglich, da bei einem vollkantigen Scherschneiden große Schneidkräfte und damit auch Belastungen auf die Schneidwerkzeuge entstehen [SEM90], [SCH90]. Bei einer zunehmenden Abrundung der Schneidkanten nach längerer Laufzeit wird die benötigte Schneidkraft zum Zerkleinern immer weiter zunehmen, so daß es bei einem vollkantigen Scherschneiden zu größeren mechanischen Belastungen des Aggregates und voraussichtlich vermehrt zu Stillständen kommen kann, welche laut Aufgabenstellung unbedingt zu vermeiden sind.

Die aufzubringende Schneidkraft ist von der Länge der Schnittlinie und damit vom Schneidwinkel α abhängig [SEM90]. Zur näheren Erläuterung sind in der folgenden Abb. 6-33 die Schnittlinie bei verschiedenen Schneidwinkeln dargestellt.

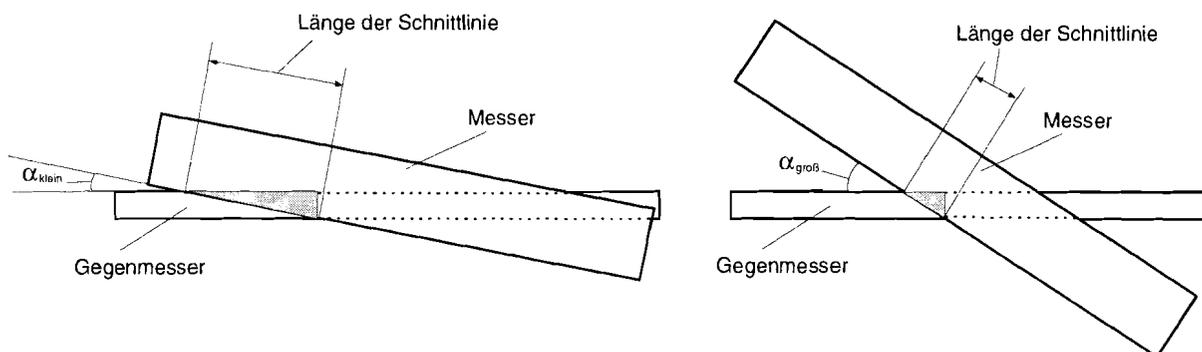


Abb. 6-33: Schnittlinie bei einem kleinem und großem Schneidwinkel

Durch die Wahl des Schneidwinkels kann die entstehende Schnittlinie und damit die benötigte Schneidkraft zum Zerkleinern des Materials verringert werden. Mit zunehmenden Schneidwinkel nimmt die für die Zerkleinerung erforderliche Schneidkraft ab [SEM90].

Ein positiver Schneidwinkel unterstützt den Einzug des Materials in den Schneidspalt. Bei extremen Winkeln wird das Material nicht vollständig geschnitten sondern durch den Spalt zwischen Messer und Gegenmesser durchgezogen, ohne daß ein vollständiger Schnitt erfolgt.

Ein negativer Schneidwinkel dagegen hemmt den Einzug des Materials. Im Extremfall wird das Material nicht von der kompletten Messerfläche erfaßt und somit werden vermehrt kleinere Stücke (als der Messerfläche entsprechende) produziert.

Demnach ist bei der Wahl eines optimalen Schneidwinkels ein Kompromiß zwischen der vom Aggregat zu leistenden Schneidkraft und den entstehenden Einzugsbedingungen zu finden.

Wie angesprochen, kann es bei der Einwellenzerkleinerung im Extremfall zu einem "Durchziehen" des Materials, ohne vollständige Zerkleinerung, kommen. Dieser Effekt wird durch den Abstand des Gegenmessers zur Welle, dem Schneidspalt (siehe Abb. 6-30) und durch den Schneidwinkel beeinflusst. Um ein weitgehendes Durchziehen des Aufgabematerials zwischen Gegenmesser und Welle zu vermeiden, sollte dieser Abstand möglichst gering sein, höchstens jedoch 75 % der Materialstärke des Aufgabegutes betragen.

Der Schneidspalt entspricht nach Abb. 6-30 dem Abstand zwischen den Schneidkanten des Messers und des Gegenmessers bei eingetauchtem Messer. Untersuchungen zum optimalen Schneidspalt beim Schneiden von Metallen ergaben, daß der Schneidspalt möglichst gering sein sollte [SCH90], obwohl die Schneidkraft mit abnehmendem Schneidspalt deutlich zunahm. Das Verhältnis zwischen Schneidspalt und Materialdicke lag bei den Untersuchungen zwischen 0,01 - 0,08 mm. Bei einer Materialdicke von ca. 3 mm müßte demnach ein Schneidspalt von 0,03 - 0,24 mm eingestellt werden. Da ein derartig geringer Schneidspalt bei einem Einwellenzerkleinerer nicht realisiert werden kann, wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Weima ein kleinstmöglicher Schneidspalt angestrebt.

6.3.2.3 Anforderungen an das Versuchsaggregat

Aus den durchgeführten theoretischen und praktischen Untersuchungen läßt sich schließen, daß das Zerkleinerungsergebnis (mittlere Stückgröße und Stückformen) im wesentlichen von folgenden Parametern abhängt:

- Lochweite des Austragssiebes
- Messergröße, -form
- Schneidwinkel, Spaltweite, Abstand Welle-Gegenmesser

Um diese Einflüsse näher beschreiben zu können, mußte ein Zerkleinerungsaggregat entwickelt werden, bei dem die entsprechenden Maschinenparameter variiert werden können.

Wie die in Kapitel 5.5 beschriebenen Vorversuche zeigten, wird die mittlere und obere Stückgröße in bedeutendem Maße von der Lochweite des Austragssiebes beeinflusst. Um diesen Einfluß zu quantifizieren sollte das Aggregat wahlweise mit Austragssieben der Lochweiten 50, 70 und 90 mm ausgestattet werden.

Bei der Firma Weima, Ilfeld, durchgeführte Vorversuche mit Einwellenzerkleinerern verschiedener Messergrößen zeigten, daß die Kantenlänge bzw. Messergröße für die produzierte Stückgröße mitbestimmend ist. Da in der Zerkleinerungsaufgabe, Kapitel 6.3.1, eine Zielstückgröße von ca. 60 x 60 mm angegeben ist, wurde bei der Maschinenkonzeption eine Messerkantenlänge von 60 mm gefordert.

Erfahrungen und die im Technikum der Firma Weima durchgeführten Vorversuche lassen den Schluß zu, daß die Stückform des Zerkleinerungsproduktes, unter Voraussetzung einer weitgehend schneidenden Beanspruchung (entsprechend Kapitel 6.3.2.2), in gewissem Maße der Messerform entspricht. Bei der Beschreibung der Zerkleinerungsaufgabe wurden gleichmäßige, quadratische bzw. rechteckige Stückformen im Rezyklat gefordert. Bezüglich dieser Anforderung sollte das Aggregat mit entsprechenden Messern ausgerüstet werden.

Voraussetzung zur Produktion einer gezielten Stückgröße und Stückform ist die Entstehung eines idealen Schneidvorganges bei der Zerkleinerung. Diesbezüglich sollte ein "sauberer" Schnitt entstehen und der Anteil der "reißenden" Beanspruchung möglichst klein sein. Wie die theoretischen Betrachtungen in Kapitel 6.3.2.2 zeigen, sollte im Rahmen eines überschaubaren technischen und wirtschaftlichen Aufwandes ein möglichst kleiner Schnittspalt bei der Maschinenkonstruktion erreicht werden. Weiterhin wurde ein möglichst geringer Abstand zwischen Gegenmesser und Welle gefordert, dieser sollte höchstens 75 % der Dicke des zu zerkleinernden Materials entsprechen. Anhand der theoretischen Betrachtungen konnte kein optimaler Schneidwinkel bestimmt werden. Bei der Wahl des Schneidwinkels mußte ein Kompromiß gefunden werden. Weiterhin sollten die Auswirkungen eines positiven und eines negativen Schneidwinkels auf den Zerkleinerungsvorgang ermittelt werden.

Das Aggregat sollte also mit Messern und Gegenmessern ausgestattet werden können, mit denen es möglich ist, unterschiedliche Schneidwinkel (positiver und negativer Winkel entsprechend Abb. 6-32) einzustellen.

Die auftretende Schneidkraft beim Schneiden von Materialien kann die Nennkraft eines Zerkleinerungsaggregates übersteigen. Dies führt zu einem Maschinenstillstand oder gegebenenfalls zur Beschädigung der Zerkleinerungswerkzeuge des Aggregates. Demnach sollte das Aggregat mit einem Überlastschutz ausgelegt sein.

Die Grundfläche der Zuführeinrichtung muß an die obere Stückgröße des Aufgabematerials angepaßt werden, so daß das Aufgabematerial ohne Vorzerkleinerung direkt und vor allem horizontal den Zerkleinerungswerkzeugen zugeführt werden kann. Demnach wird voraussichtlich aufgrund der relativ geringen Aufgabemenge und der Baugröße des Aggregates ein

Chargenbetrieb des Aggregates notwendig werden, so daß ein problemloses An- und Abfahren möglich sein sollte.

Aufgrund der in Kapitel 5.5 durchgeführten Versuche zur Grobzerkleinerung der langfaserverstärkten Thermoplaste, der theoretischen Betrachtungen in Kapitel 6.3.2.2 und den bei der Firma Weima durchgeführten Technikumsversuchen ergab sich folgendes Anforderungsprofil an das von der Firma Weima zu bauende Versuchsaggregat:

- **Rotor:** flache Ausführung mit aufgesetzten Messerhaltern
- **Messer/Gegenmesser:** möglichst enger Schneidspalt, möglichst geringer Abstand zwischen Gegenmesser und Rotor, Messerform: quadratisch, Messergröße 60 x 60 mm, verschiedene Messerschlitze zur Einstellung eines positiven, negativen und neutralen Schneidwinkels
- **Austragssiebe** der Lochweiten 50, 70 und 90 mm
- **Grundfläche der Zuführeinrichtung:** 600 x 1450 mm (entsprechend der oberen Aufgabestückgröße bzw. Größe der Frontend-Montageträger)
- **Überlastschutz**

6.3.3 Umgesetztes Konzept

Bei der Konstruktion bzw. Fertigung des Versuchsaggregates wurden viele Anforderungen erzielt, konnten jedoch nicht alle umgesetzt werden. In der folgenden Abb. 6-34 ist der von der Firma Weima gefertigte Einwellenzerkleinerer dargestellt.

Das mit einem Überlastschutz versehene Versuchsaggregat besitzt einen Flachrotor (siehe Abb. 6-35) mit aufgesetzten Messerträgern, die dreieckige Messer der Kantenlänge 60 mm aufnehmen können. Schneidspalte von ca. 0,4 - 1 mm wurden erreicht.

Das Aggregat kann wahlweise mit zwei verschiedenen Gegenmessern (horizontales und gewinkeltes) und drei verschiedenen Messerblöcken ausgestattet werden. Mit den verschiedenen Kombinationen der Messerblöcke und Gegenmesser können verschiedene positive Schneidwinkel (2, 8, 18 und 22°) eingestellt werden. Beim gewinkelten Gegenmesser entsteht ein Abstand zur Welle von ca. 5 mm und beim horizontalen Gegenmesser von ca. 8 mm.

Bei der Dimensionierung der Vorlage wurden aus Kostengründen nicht die geforderten Maße, entsprechend der Größe der Frontend-Montageträger, berücksichtigt. Aus diesem Grunde konnten die Zerkleinerungsversuche nur mit Ausschnitten der Frontend-Montageträger bzw. mit händisch zerteilten Frontend-Montageträgern gefahren werden. Die Ergebnisse der Versuche werden als repräsentativ eingeschätzt.

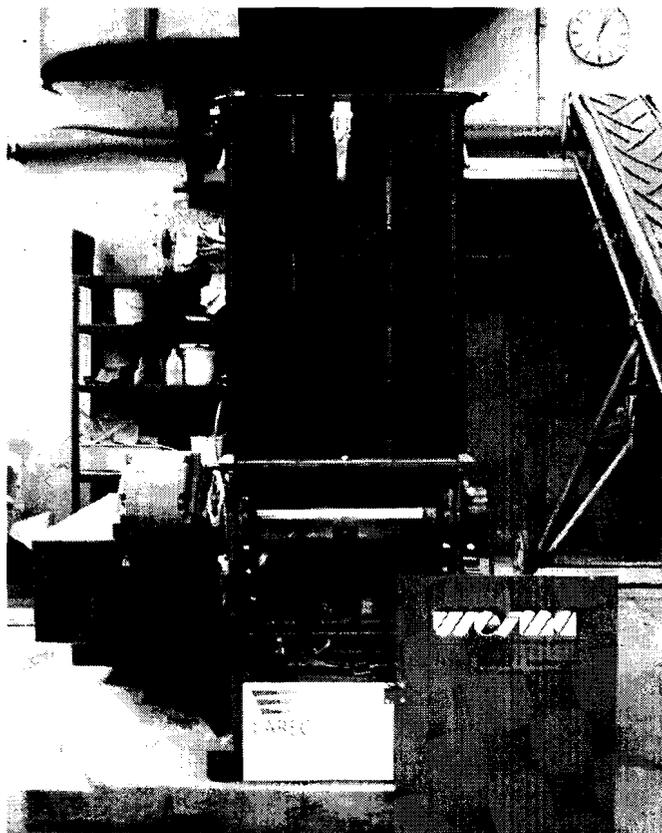


Abb. 6-34: Versuchsaggregat



Abb. 6-35: Rotor, Messer und Gegenmesser des Versuchsaggregates

Zur Einstellung der oberen und mittleren Stückgröße kann das Aggregat mit drei verschiedenen Austragssieben der Lochweiten 50, 70 und 90 mm gefahren werden.

Das Versuchsaggregat zeichnet sich durch folgende Maschinenparameter aus:

- **Rotor:** flache Ausführung mit aufgesetzten Messerhaltern (Rotorbreite 600 mm und Rotordurchmesser 234 mm)
- **Messer/Gegenmesser:** Schneidspalt 0,4 - 1 mm, Abstand Rotor-Gegenmesser 5/8 mm, Messerform: dreieckig mit konkavem Schliff, Messergröße bzw. Kantenlänge: 68 mm, Schneidkantenlänge Gegenmesser 68 mm (gewinkelt) und 80 mm (horizontal) , Schneidwinkel wahlweise 2°, 8°, oder 18° bei gewinkelttem Gegenmesser
- **Austragssiebe** der Lochweiten 50, 70 und 90 mm
- **Drehzahl:** 75 min⁻¹ bei einer Motorleistung von 75 kW
- **Vorlage:** 600 x 470 mm

6.3.4 Entwicklung einer Methodik zur Auswertung der Zerkleinerungsergebnisse

Um eine qualitative und quantitative Beurteilung des Zerkleinerungsproduktes bezüglich der Zerkleinerungsaufgabe treffen zu können, wurde eine Methodik zur Auswertung der Zerkleinerungsergebnisse entwickelt.

Bestimmung der zu erfassenden Größen:

Bezugnehmend auf die Anforderungen an das Zerkleinerungsprodukt (Kapitel 6.3.1) wurde in einem ersten Schritt mittels einer Siebanalyse nach DIN 22019 die Stückgrößenverteilung (b) bestimmt. Als untere Stückgröße wurde hierbei 20 mm gewählt, da laut Zerkleinerungsaufgabe dieses Material nicht mehr zur Verstärkung beiträgt und somit nicht mehr näher betrachtet werden muß.

Bei ausgewählten Zerkleinerungsergebnissen wurden zusätzlich mittels einer händischen Sortierung die Anteile der Stücke mit einer Hauptabmessung a von 80 bis 100 mm, von 100 bis 120 mm und > 120 mm bestimmt.

Außerdem erfolgte eine makroskopische Begutachtung der neu entstandenen Grenzflächen im Zerkleinerungsprodukt bezüglich der Güte des Schneidvorganges (schneidende oder reißende Beanspruchung).

Darstellung der Analyseergebnisse:

Zur Ermittlung der mittleren Stückgröße sowie zur Beschreibung der Breite der Stückgrößenverteilung bezüglich der Hauptabmessung (b) wurden Verteilungssummenkurven der Zerkleinerungsprodukte erstellt.

Die Anteile der Stücke mit einer Hauptabmessung a von 80 bis 100 mm, von 100 bis 120 mm und > 120 mm wurden bei ausgewählten Zerkleinerungsergebnissen separat ermittelt und werden als Kennwert aufgeführt. In der folgenden Abb. 6-36 ist beispielhaft ein ideales und ein schlechtes (reales) Zerkleinerungsergebnis dargestellt:

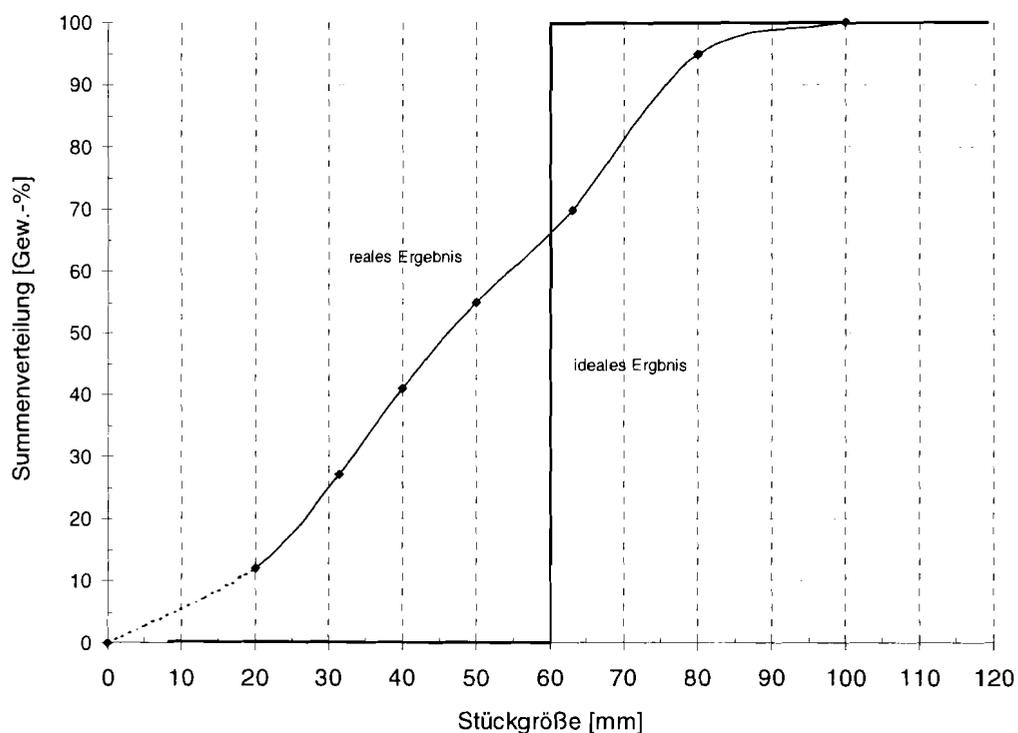


Abb. 6-36: Beispielhafte Darstellung eines entsprechend der Zerkleinerungsaufgabe idealen und schlechten Ergebnisses

6.3.5 Zerkleinerungsversuche

Mit den Zerkleinerungsversuchen sollten Erkenntnisse über die Abhängigkeit des Zerkleinerungsergebnisses bezüglich der Stückform und der Stückgröße von den konstanten und variablen Maschinenparametern erlangt werden. Dazu wurden die in Abb. 6-37 aufgelisteten Versuche durchgeführt. Die hervorgehobenen Werte wurden variiert.

Parameter	Versuch										
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Schneidwinkel α [°]	22	8	8	22	8	8	22	2	18	2	
Gegenmesser	hor ¹	gew ²	gew ²	hor ¹	gew ²	gew ²	hor ¹	gew ²	gew ²	gew ²	
Spaltweite s [mm]	0,4	1,0	1,0	0,4	1,0	1,0	0,4	1,0	1,0	1,0	
Abstand Welle/Gegenmesser [mm]	8	5	5	8	5	5	8	5	5	5	
Lochweite l [mm]	ohne	ohne	90	90	70	50	70	70	70	90	

Abb. 6-37: Maschinenparameter des Versuchsaggregates bei den Zerkleinerungsversuchen 6 - 15 (hor¹ = horizontales Gegenmesser, gew² = gewinkeltes Gegenmesser)

Bei allen Versuchen ist im Zerkleinerungsprodukt bezüglich der neu entstandenen Grenzflächen eine Verbesserung gegenüber den Zerkleinerungsergebnissen der Vorversuche (Kapitel 5) erreicht worden. Der "ideale" Schneidvorgang, daß heißt eine weitgehend schneidende Beanspruchung und die Entstehung von gradlinigen Grenzflächen, wurde vornehmlich erreicht. Damit ist eine Voraussetzung zur Einstellung der Stückformen und Stückgrößen im Zerkleinerungsprodukt geschaffen worden.

Die makroskopische Begutachtung der Stücke, die durch einen idealen Schneidvorgang entstanden sind, weisen, wie in Abb. 6-38 zu sehen, überwiegend eine dreieckige Form auf.

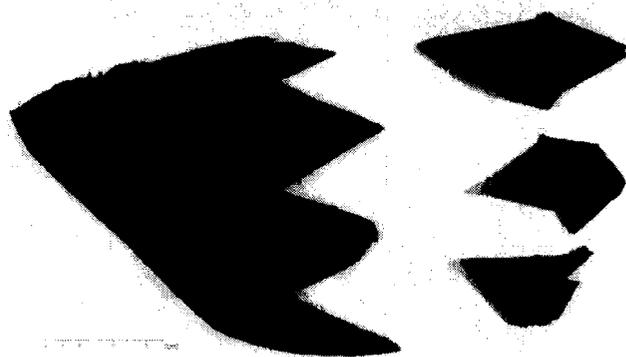


Abb. 6-38: Eine Auswahl der dreieckigen Stücke in den Zerkleinerungsprodukten

Dieses bestätigt die in Kapitel 6.3.2.2 aufgestellte Behauptung, daß die Stückform der Rezyklate von der Messerform mitbestimmt wird.

Versuche, bei denen nur eine zweidimensional ausgebildete Platte aufgegeben wurde, bestätigten die aufgestellte Behauptung, daß bei der Entstehung eines idealen Schneidvorganges die Kantenlänge des Messers die Länge der Schnittlinie in etwa vorgibt.

Um näheren Aufschluß über den Einfluß der Lochweite des Siebaustrages auf die mittlere Stückgröße zu bekommen, wurden die Versuche 8, 10 und 11 durchgeführt. Die Verteilungssummenkurven der Zerkleinerungsprodukte sind in der folgenden Abb. 6-39 dargestellt.

Deutlich ist zu beobachten, daß mit steigender Lochweite des Austragssiebes die mittlere Stückgröße ansteigt und die Steigung der Kurven abnimmt. Dies bedeutet, daß mit der Wahl des Austragssiebes die mittlere Stückgröße vorgegeben werden kann, aber die Breite der Stückgrößenverteilung mit der mittleren Stückgröße zunimmt.

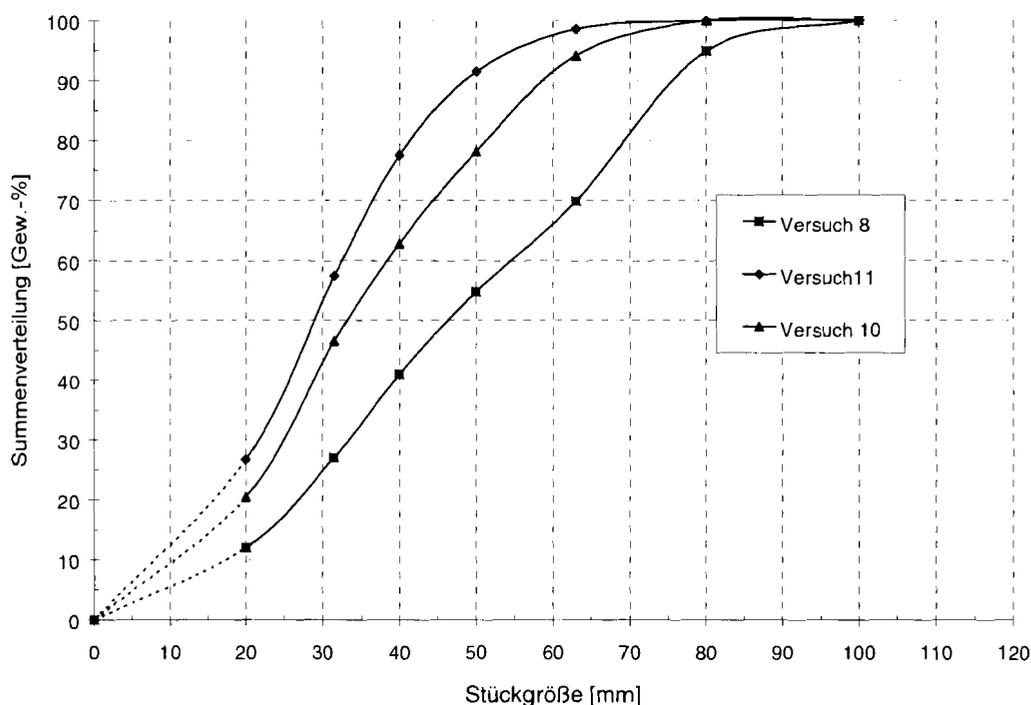


Abb. 6-39: Verteilungssummenkurven der Versuche 8,10 und 11 mit Austragssieben der Lochweiten 50, 70, 90 mm, Schneidwinkel 8°

Um den Einfluß des Schneidwinkels auf den Zerkleinerungsprozeß und das Zerkleinerungsergebnis zu ermitteln, wurden die Versuche 10, 13 und 14 durchgeführt. Diese unterscheiden sich in der Messeranordnung. Es werden Schneidwinkel von 2°, 8° und 18° realisiert. Bei diesen verschiedenen Messeranordnungen entstanden Schneidwinkel von 2°, 8° und 18°. Während der Versuche kam es bei dem flachen Schneidwinkel von 2° zu 8 Stillständen des Aggregates. Es war zu beobachten, daß mit zunehmendem Schneidwinkel die Anzahl der Stillstände auf 5 bzw. 1 zurückgingen. Dieses bestätigt die Aussage, daß mit kleineren Schneidwinkeln die benötigte Schneidkraft zunimmt und die Antriebsleistung des Aggregates entsprechend gewählt werden muß. Mit dem kleinsten der drei gewählten

Schneidwinkel (Versuch 13) wurde wie in Abb. 6-40 dargestellt die größte mittlere Stückgröße erzielt.

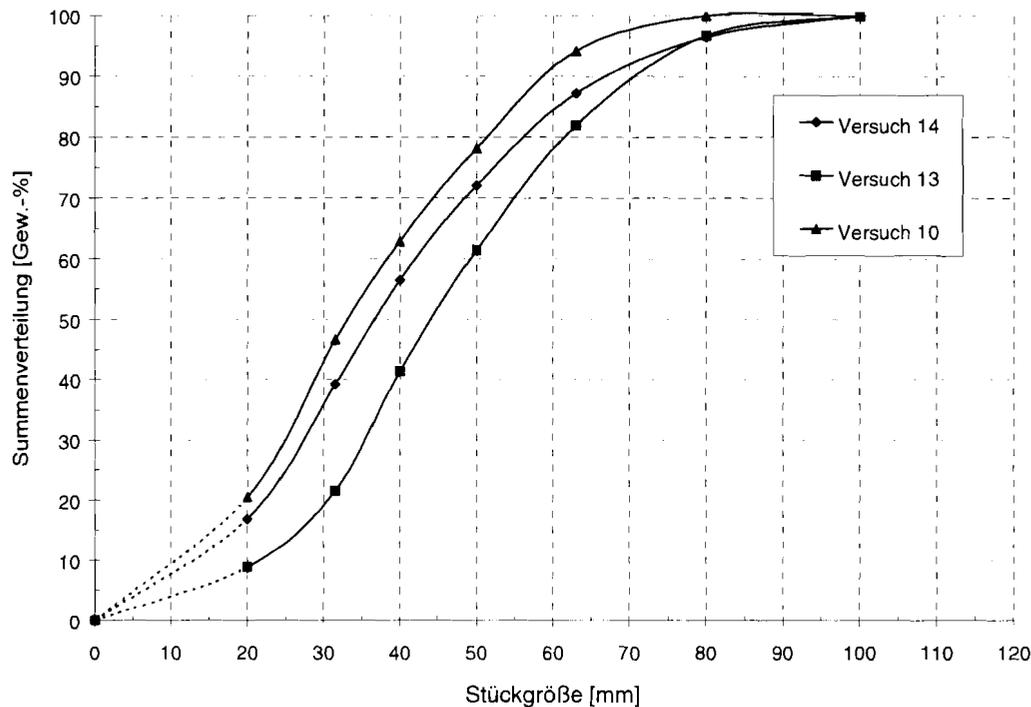


Abb. 6-40: Verteilungssummenkurven der Versuche 10, 13 und 14 mit Schneidwinkeln 8° , 2° , und 18°

Bezüglich der mittleren Stückgröße wurden mit den Einstellungen der Versuche 8, 13 und 15 die besten Zerkleinerungsergebnisse erzielt. Daher wurden die entsprechenden Zerkleinerungsprodukte gemäß Kapitel 6.3.4 auf Stücke mit der Abmessung a von 80 bis 100 mm, von 100 bis 120 mm und > 120 mm analysiert. In Abb. 6-41 sind die Analyseergebnisse der Zerkleinerungsprodukte dargestellt.

Entsprechend der Zerkleinerungsaufgabe wurde mit den Maschineneinstellungen bei Versuch 13 die besten Ergebnisse erzielt. Bei einer mittleren Stückgröße von ca. 45 mm wurde ein Anteil von 9 Gew.-% mit $b < 20$ mm produziert. Für die Hauptabmessung a sind die in der Zerkleinerungsaufgabe formulierten Ziele erfüllt worden (siehe Kapitel 6.3.1).

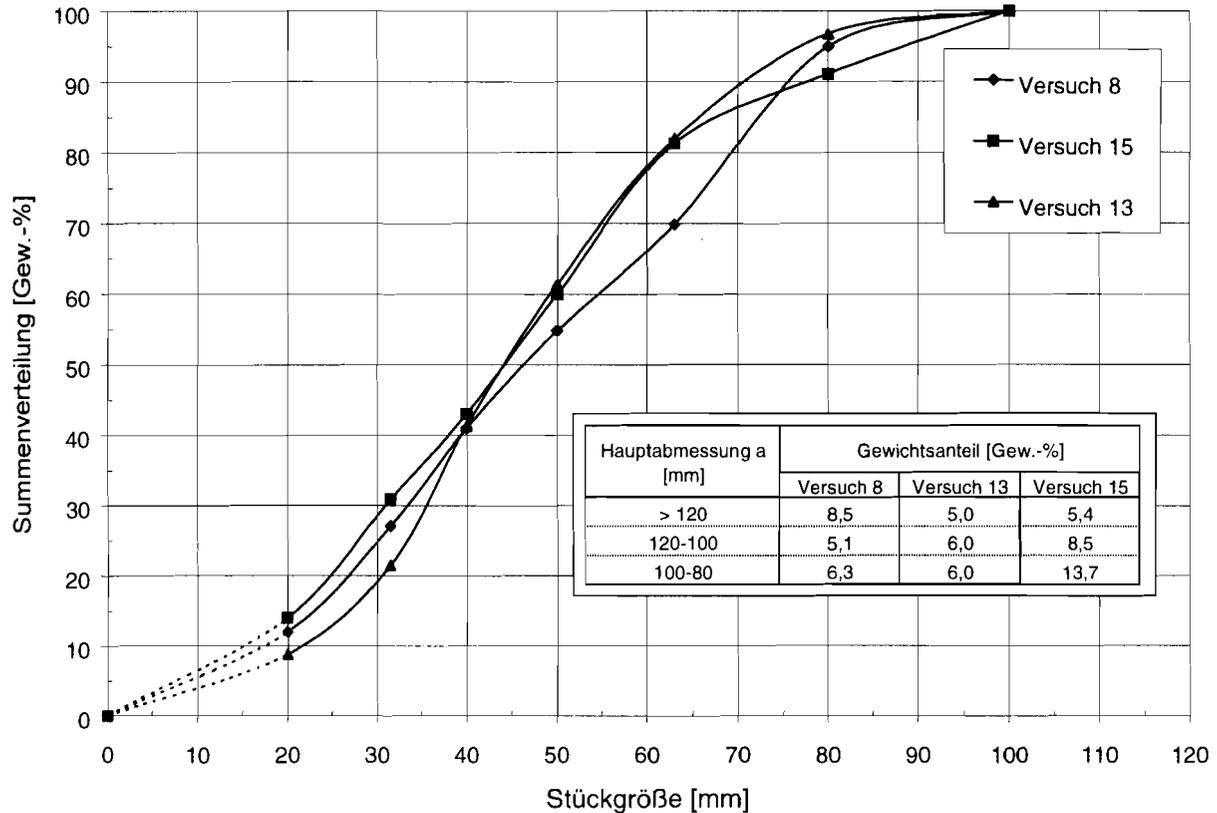


Abb. 6-41: Verteilungssummenkurven der Versuche 8, 13 und 15

In der folgenden Abb. 6-42 sind die Stückgrößenverteilungen des Zerkleinerungsproduktes aus Versuch 13 und des derzeit bei MENZOLIT-FIBRON, BRETTEN, im industriellen Maßstab produzierten Produktes dargestellt.

Das Zerkleinerungsprodukt des Versuchs 13 weist eine mittlere Stückgröße (b) von ca. 45 mm auf. Dagegen besitzt das Zerkleinerungsprodukt der Firma MENZOLIT-FIBRON, BRETTEN, eine mittlere Stückgröße (b) von ca. 33 mm. Demnach ist davon auszugehen, daß ein Produkt, welches aus einem mit dem Versuchsaggregat produzierten Rezyklat hergestellt wird, potentiell höhere Festigkeiten aufweist als aus derzeit produziertem Rezyklat.

Wie schon dargestellt ist die maximale Hauptabmessung a_{\max} für die Verarbeitung von Bedeutung. Bei zu großer Hauptabmessung a_{\max} dürfte es zu Störungen der der Zerkleinerung nachgeschalteten Prozesse kommen. Im Zerkleinerungsprodukt der Firma MENZOLIT-FIBRON, BRETTEN, wurde für a_{\max} (maximale Hauptabmessung a) eine Länge von 148 mm gemessen. Bei Versuch 13 wurde ein a_{\max} von 137 mm erzielt. Damit sollte eine störungsfreie Verarbeitung der im Versuch 13 produzierten Rezyklate gesichert sein.

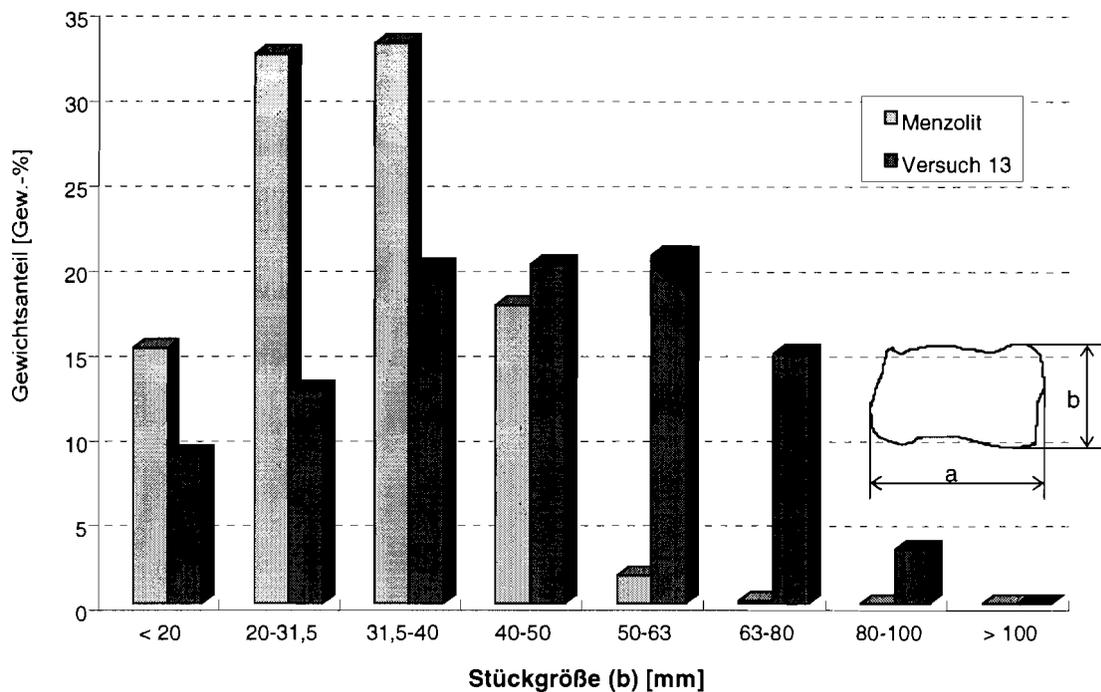


Abb. 6-42: Stückgrößenverteilung Versuch 13, IfA, und MENZOLIT-FIBRON, BRETTE, (Hauptabmessung a: 80-100 mm: 14,2 Gew.-%, 100 - 120 mm: 7,2 Gew.-%, > 120 mm: 14,7 Gew.-%)

6.3.6 Konzeption des optimierten Einwellenzerkleinerers

Mit dem Versuchsaggregat konnten weitgehend schneidende Beanspruchungen auf das Aufgabematerial ausgeübt werden. Demnach ist davon auszugehen, daß ein Schneidspalt von ca. 1 mm zur Lösung der gestellten Zerkleinerungsaufgabe ausreichend eng ist.

Um bei jeglichem Aufgabematerial (Ausschnittmaterial und Produktionsausschuß) eine weitgehend schneidende Zerkleinerung zu ermöglichen, muß eine horizontale Zuführung des Materials zu den Schneidwerkzeugen ermöglicht werden. Demnach muß der Aufgabetrichter bzw. die Grundfläche der Zuführeinrichtung auf die obere Aufgabestückgröße angepaßt werden.

Der Abstand zwischen Welle und Gegenmesser war bei allen Versuchen zu groß. Der geringste Abstand betrug 5 mm. Aufgrund der Materialstärke von < 4,5 mm wurde das Aufgabematerial teilweise ohne eine Zerkleinerung durchgezogen. Aufgrund des Austragsiebess kommt es dadurch zu einer mehrfachen Beanspruchung des Materials und damit zu einer unkontrollierten Zerkleinerung, die unregelmäßige und kleinere Stücke entstehen läßt. Um dieses Durchziehen zu vermeiden, ist ein möglichst geringer Abstand zwischen Welle und Gegenmesser nötig.

Um Stücke der Größe 60 mm produzieren zu können, sollten Messer mit mindestens entsprechender Kantenlänge gewählt werden. Da das Material nach Möglichkeit nur einmalig beansprucht werden sollte, ist eine Lochweite des Austragssiebs von ca. 70 mm zu wählen.

Anhand der Erkenntnisse der makroskopischen Untersuchungen der Rezyklate bezüglich der Stückform sollte die geometrische Form der Messer dem Rechteck angenähert werden.

Die theoretischen Betrachtungen bezüglich des Schneidwinkels wurden durch die praktischen Versuche bestätigt. Mit einer Abnahme des Schneidwinkels wird die benötigte Schneidkraft größer. Bezüglich des Zerkleinerungsergebnisses sind kleine Schneidwinkel zu bevorzugen. Diese erfordern jedoch eine robustere Auslegung sowohl der Schneidwerkzeuge als auch des Antriebes und des gesamten Aggregates. Unter Berücksichtigung der Betriebssicherheit ist hier ein Kompromiß zwischen dem wirtschaftlichen Aufwand für die Auslegung des Aggregates und der geforderten Produktqualität zu finden.

Die im Laufe des Projektes erlangten Erkenntnisse wurden zum größten Teil bei der Konzeptionierung des Versuchsaggregates umgesetzt. Über die Laufzeit des Projektes hinaus werden vom Institut für Aufbereitung in Zusammenarbeit mit der Firma Weima weiterführende Untersuchungen angestellt.

6.4 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung

Faserverstärkte Thermoplaste führen einerseits durch eine energetisch günstige Produktion und andererseits durch ihr Leichtbaupotential in der Produktions- und Nutzungsphase von Automobilen zu einer Entlastung der Umwelt. Die thermoplastische Matrix ist durch geringe Wärmezufuhr wieder aufzuschmelzen und eignet sich somit besonders für die werkstoffliche Verwertung. Da z. B. bei der GMT-Frontend-Montageträger-Produktion Produktionsabfälle in der Größenordnung von 20 - 30 % entstehen, besteht die begründete Aussicht, mit einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung faserverstärkter Thermoplaste im BONDPRESS- bzw. Plastifizierpreß-Verfahren eine weitere erhebliche Entlastung der Umwelt zu erzielen.

Die in diesem Projekt durchgeführten Entwicklungen sind im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz als Technologien zur Vermeidung und stofflichen Verwertung von Abfällen einzustufen. Sie führen durch die Schließung von Stoffkreisläufen zur Ressourcenschonung und damit zu einer erheblichen Entlastung der Umwelt. Durch die hochwertige Verwertung ist eine hohe Wertschöpfung realisiert worden, die neben ökologischen Vorteilen auch ökonomische Vorteile bietet. So erfordert z. B. eine Grobzerkleinerung weit weniger Energie als eine Feinzerkleinerung. Die Arbeiten im Rahmen des Projektes beschränkten sich auf Produktionsabfälle, sind jedoch als grundlegende Voraussetzungen einzustufen, um in Zukunft ggf. auch die werkstoffliche Verwertung von Altmaterial angehen zu können.

Der Preis für Langfasergranulate (z. B. Compel, Fa. Ticona GmbH, Kelsterbach) bzw. GMT-Halbzeuge (GMT-Glasmattenverstärkte Thermoplaste, Fa. BASF AG, Ludwigshafen) beläuft

sich zur Zeit auf 4 - 5 DM/kg. Die bei einer Grobzerkleinerung entstehenden Kosten liegen im Bereich von ca. 1 DM/kg. Für das BONDPRESS-Verfahren kommen noch die Kosten der Halbzeugherstellung hinzu. Diese dürften bei einer industriellen Umsetzung nochmals ca. 1 DM/kg betragen. Damit ergibt sich für Produktionsabfälle ein Erlös von ca. 2 DM/kg.

Somit liegen die zu erwartenden Kosteneinsparungen in einer Größenordnung, wie sie auch bei hochwertigen technischen Kunststoffen zu erzielen sind. Da für diese Kunststoffe in der Vergangenheit ein Rezyklatmarkt entstanden ist, besteht die begründete Hoffnung, auch für lang- und endlosfaserverstärkte Thermoplaste eine ähnliche Entwicklung erreichen zu können. Sollten in Zukunft jedoch größere Preisverschiebungen bei den Neumaterialien auftreten, würden die Randbedingungen für die industrielle Umsetzung der Verwertung verändert. Für diesen Fall ist eine verlässliche Abschätzung der Chancen zur Umsetzung zur Zeit nicht möglich.

Die Firma Weima Maschinenbau GmbH konnte sich durch das Projekt als kompetenter Hersteller von Aufbereitungstechnik zur Schließung von Stoffkreisläufen lang- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste qualifizieren und noch während des Projektverlaufs neue Absatzmärkte für ihre Produkte erschließen. Da die Verarbeitung von 80 % des europäischen GMT-Marktes in Deutschland im Bereich der Automobilzulieferindustrie erfolgt, sind die Voraussetzungen für die Fa. Weima Maschinenbau GmbH als günstig einzustufen, sich in dieser Sparte als hochqualifiziertes, mittelständisches Unternehmen zu behaupten.

Die Firma Kannegiesser KMH Kunststofftechnik GmbH erhielt durch die Teilnahme am Projekt entscheidende Erkenntnisse über die Eignung der von ihr angebotenen Plastifizierpreß-Anlagen für die hochwertige Verwertung lang- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste. Eine weitere Verbesserung der Plastifizier-Preßtechnik wird angestrebt.

Für die Firma Menzolit-Fibron GmbH, Bretten, ergaben sich weitere Erkenntnisse inwieweit die bestehende Kreislaufführung entscheidend verbessert werden kann. Dieses Bestreben muß vor dem Hintergrund betrachtet werden, daß bei der Herstellung von Frontend-Montageträgern Produktionsrückstände in der Größenordnung von 20 - 30 % anfallen. Ziel ist, diese Produktionsabfälle einer hochwertigen und zugleich preiswerten Verwertung zuzuführen.

Als Halbzeuglieferanten haben die Firmen BASF AG und Ticona GmbH ein starkes Interesse daran, den Nachweis für die hochwertige Verwertbarkeit ihrer Produkte zu erbringen. Ein solcher Nachweis könnte die Akzeptanz dieser Produkte entscheidend fördern und ihren Einsatz erhöhen. (Hier ist anzumerken, daß der Geschäftsbereich GMT der BASF AG seit 1. Januar 1999 an die Fa. Symalit, CH-Lenzburg, übertragen worden ist.)

Die Hochschulforschungseinrichtungen Institut für Aufbereitung (IfA), Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW) und Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika) erhielten durch die enge Zusammenarbeit mit den industriellen Partnern tieferen Einblick in die industriellen Abläufe. Sie konnten sich als kompetente Partner in Fragen der Aufbereitung und

Verwertung von FKV erweisen. Als indirekte Folge des Projektes ergaben sich mehrere Forschungsaufträge aus der Industrie zu diesem Themengebiet.

Teile der im Rahmen des Projektes ermittelten Ergebnisse wurden bereits in Fachzeitschriften (Kunststoffe 98/1), Tagungen (AVK 98) und Messen (K 98) präsentiert. Weitere Veröffentlichungen sind in Planung. Des weiteren stellen die Untersuchungen zur Zerkleinerung von FKV den Kern einer Dissertation zu diesem Thema dar [DIT98]. Eine weitere Arbeit die sich mit den Auswirkungen der Rezyklatabmessungen auf die mechanischen Eigenschaften befaßt, wird gegen Ende des Jahres veröffentlicht [MAT99].

7 Fazit

Wie die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit zeigen, ist eine hochwertige Verwertung von lang- und endlosfaserverstärkten Thermoplasten zu fließfähigen Preßmassen möglich. Insbesondere im neuentwickelten BONDPRESS-Verfahren lassen sich Bauteile mit guten mechanischen Eigenschaften herstellen. Dabei kommt der Rezyklatabmessung und damit der Faserlänge eine entscheidende Bedeutung zu. Die Rezyklatabmessung wurde mit 60 x 60 mm als optimal festgelegt.

Durch die grundlegenden Untersuchungen zur Zerkleinerung von FKV konnte eine Auswahl der einzusetzenden Zerkleinerungsaggregate getroffen werden. Aufbauend auf den sich ergebenden Erkenntnissen wurde vom Antragsteller eine Maschine konstruiert, die im Vergleich zu bestehenden Anlagen der Fa. Menzolit-Fibron, Bretten, ein grobes Zerkleinerungsgut mit einer relativ engen Verteilung liefert.

Trotz des guten Ergebnisses bleibt jedoch festzustellen, daß die angestrebte ideale Verteilung nicht erreicht wurde. Hier sind weitere Untersuchungen und Modifikationen der Anlage notwendig. Diese Arbeiten werden vom Antragsteller und dem Institut für Aufbereitung auch nach Projektende weitergeführt.

8 Literaturverzeichnis

- [BEG94] BEGEMANN, M.; STADLBAUER, W.
Isobares Langfaser-GMT, Kunststoffe Jg. 84, 05/1994, Seite 596 - 600
- [BEI90] KÜTTNER, K. H.; ET AL.
Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, 17. Auflage, Hrsg.: Beitz, W.;
Küttner, K.-H., Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 1990
- [BEN92] BERNOTAT, S.
Zerkleinern unter dem Aspekt der Abfallbehandlung, in: Materialrecycling durch
Abfallaufbereitung, Hrsg.: Thome-Kozmiensky, K. J., EF-Verlag für Energie und
Umwelttechnik, Berlin 1992
- [BEY95] BEYER, S.; HERBOLD, W.
Zerkleinerung von Kunststoffreststoffen, in: Die Wiederverwertung von
Kunststoffen, Hrsg.: Brandrup, J.; Bittner, M.; Michaeli, W.; Menges, G., Carl
Hanser Verlag, München Wien 1995
- [BIG] N. N.
Hydro-Rotorscheren, Firmenschrift Bigshred, Bad Tölz
- [BRE98] BREUER, U.
Beitrag zur Umformtechnik gewebeverstärkter Thermoplaste, Dissertation
Kaiserslautern, 1998, VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 433, VDI-Verlag
- [DHR 98] DYCKHOFF, J.; HALDENWANGER, H.-G.; REIM, H.; et. al
Lenker aus Faserverbundwerkstoff mit Thermoplastmatrix, VDI-K Tagung Mann
heim, 1998
- [DIT95] DITTMAR, H.; GITTEL, D.; PÖLLET, P.; et. al
GMT-Recycling im Automobilbau, Kunststoffe 85 (3) 1995, Seite 324 - 328
- [DIT98] DITTMANN, R.
Hochwertige Verwertung faserverstärkter Thermoplaste, Institut für
Kraftfahrwesen Aachen, 1998, Dissertation RWTH Aachen
- [DRE] N. N.
Das Programm ohne Lücken, Firmenschrift Dreher, Aachen
- [HÄR91] HÄRDLE, G.; MAREK, K.; BILITEWSKI, B.; KIJEWSKI, K.
Recycling von Kunststoffabfällen, 2. Auflage, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1991

- [HES89] HESS, V.
Zerkleinern von Großformteilen und Hohlkörpern, Kunststoffe, Jg. 79, 05/1989,
S. 403 - 406
- [HES92] HESS, V.
Wirtschaftliche Zerkleinerungs- und Recyclingverfahren für Kunststoffabfälle, in:
Recycling von Kunststoffen, Hrsg.: Menges, G.; Michaeli, W.; Bittner, M., Carl
Hanser Verlag, München Wien 1992
- [HIP96] HIPPE, A.
Design, Manufacturing and Recycling of Advanced Thermoplastic
Composite Automotive Parts, 1996, Brite-Euram-Projekt, Nr. BE-4125
- [HLR96] N. N.
Schneidmühlen - Hohe Leistung auf kleinstem Raum, Plastverarbeiter, Jg. 47,
07/1996, S. 16 - 18
- [HOB93] HOBERG, H.
Applications of Mineral Processing in Waste Treatment and Scrap Recycling,
18. International Mineral Processing Congress, 05/1993, S. 27 - 37
- [HÖF86] HÖFFL, K.
Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
New York Tokyo 1986
- [JÄC97] JÄCKEL, H.-G., SCHUBERT, G.
Zerkleinerung von Abfällen mittels Rotorschere, Rotorreißer und Schrauben
mühlen, Chemie Ingenieur Technik, Jg.69, 1997, S.640 - 648
- [JAN93] JANSZ, J.
GMT Recycling - Verfahrenskonzepte, GMT-Workshop der Arbeitsge-
meinschaft Verstärkte Kunststoff, Hannover 8. - 9. September 1993
- [JUB94] JUNGBAUER, A.
Recycling von Kunststoffen, Vogel Buchverlag, Würzburg 1994
- [JUG95] JUNGERT, D.; VERHOEVEN, R.
Kunststoff-Zerkleinerungsmaschinen Marktübersicht 1995, Hrsg.: Breuer, H.;
Dolfen, E., FKUR - Forschungsinstitut Kunststoff-Recycling GmbH, Willich 1994
- [JUN90] JUNG, N.
Recyclingkonzepte für Elastopreg. Plastverarbeiter 41 (1990) 7, Seite 114 - 116

- [JUN91] JUNG, N.
Umweltentlastung dank Leichtbauweise und Recycling, *Plastverarbeiter*, 42 (1991) 7, Seite 26 - 29
- [KOL73] KOLLMANN, F. G.
Aufbereiten von Abfällen, die beim Spritzgießen, Extrudieren und Blasformen entstehen, in: *Aufbereiten von Kunststoffabfällen*, Hrsg.: VDI-K, VDI-Verlag, Düsseldorf 1973
- [KUA95] N. N.
Kunststoffabfälle aufbereiten, *Kunststoffe*, Jg. 85, 02/1995, S. 207 - 212
- [KUK96] N. N.
Zerkleinerungsanlagen - kurz und klein, *Plastverarbeiter*, Jg. 47, 07/1996, S. 39 - 40
- [KWZ93] N. N.
Kunststoffabfälle wirtschaftlich zerkleinern, *Plastverarbeiter*, Jg. 44, 08/1993, S. 14 - 17
- [LES81] LESCHONSKI, K.; GORITZKE, W.; RÖTHELE, S.
Forschungsprogramm Wiederverwertung von Kunststoffabfällen, Schlußbericht zum Teilprojekt 3: Aufbereitung von Kunststoffabfällen zum Zwecke der Wiederverwertung (Zerkleinern, Klassieren), Hrsg.: Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik, TU Clausthal, 1981
- [LID] N. N.
Universal-Zerkleinerungsmaschinen, Firmenschrift Lindner, Spittal/Österreich
- [LÖH94] LÖHR, K.; MELCHIORRE, M.
Recycling durch kombinierte werkstoffliche und rohstoffliche Verwertung, GVC-Symposium: Abfallwirtschaft - Herausforderung und Chance, VDI-GVC, Würzburg 10/1994
- [LÖH95] LÖHR, K.; MELCHIORRE, B.; KETTEMANN, B.-U.
Aufbereitungstechnik, Carl Hanser Verlag, München Wien 1995
- [LUT95] LUTZ, S.
Entwicklung eines leichten Stoßfängerträgers aus GMT, Seminar Glas mattenverstärkte Thermoplaste, Würzburg, 5. - 6. Dezember 1995
- [MAT99] MATTUS, V.
Recycling faserverstärkter Thermoplaste, Dissertationsprojekt Uni Kaiserslautern, Institut für Verbundwerkstoffe (IVW), Kaiserslautern 1999

- [MAY73] MAYERHAUSER, D.
Zerkleinerungsmaschinen, in: Aufbereiten von Kunststoffabfällen, Hrsg.: VDI-K, VDI-Verlag, Düsseldorf 1973, S. 17 - 42
- [MAY79] MAYERHAUSER, D.
Fortschritte in der Zerkleinerungstechnik, insbesondere bei Schneidmühlen, in: Verwerten von thermoplastischen Kunststoffabfällen, Hrsg.: VDI-K, VDI-Verlag, Düsseldorf 1979
- [MAY79a] MAYERHAUSER, D.
Aufbereiten voluminöser Abfälle, in: Verwerten von thermoplastischen Kunststoffabfällen, Hrsg.: VDI-K, VDI-Verlag, Düsseldorf 1979
- [MEI97] MEIER KORTWIG, J.
Untersuchungen zur Aufbereitung von duromeren Kohlenstoff- und Naturfaserverbundwerkstoffen mit der Zielsetzung der stofflichen Verwertung, Diplomarbeit Institut für Aufbereitung, Kokerei u. Brikettierung, RWTH-Aachen und Daimler-Benz AG, 1997
- [MEH95] MEHN, R.; SEIDL, F.; PEIS, R.
Innovative Leichtbau- und Fertigungskonzepte für Fahrzeugstrukturbauteile mit glasgewebeverstärkten Thermoplasten, VDI-Berichte XYZ5, 1995, Seite 143 - 158
- [MEW] N. N.
Universal-Zerkleinerer, Firmenschrift Mewa, Ostelsheim
- [MIC93] MICHAELI, W.; BITTNER, M.; WOLTERS, L.
Stoffliches Kunststoff-Recycling, Carl Hanser Verlag, München Wien 1993
- [MOC] N. N.
Zerkleinerungsmaschinen, Firmenschrift Moco, Viernheim
- [MUS70] MUSCHELKNAUTZ, E.; GIERSIEPEN, G.
Zur mechanischen Zerkleinerung von Kunststoffen, Kunststoffe, Jg. 60, 11/1970, S. 818 - 821
- [OEL98] OELGARTH, A.; WULF, B.U.; WEHRLI, U.
Höhere Festigkeiten durch maßgeschneiderte GMT-Halbzeuge, 1. Internationale AVK-TV-Tagung, Baden-Baden, 1998, A12, Seite 1 - 10
- [OHE70] OHE, W. V. D.
Aufarbeiten von Kunststoffabfällen, Kunststoffe, Jg. 60, 09/1970, S. 610 - 616

- [PAL94] N. N.
Kunststoffe und Elastomere wirtschaftlich zerkleinern, Firmenschrift Pallmann, Zweibrücken 05/1994
- [REI92] REINHARD, L.D.
Can Glass Fiber Reinforced Polypropylene Composites be Recycled, International Congress & Exposition of the Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space (SAE), 24. - 28. Februar 1992, Detroit, Seite 1 - 16
- [RIS70] RIES, H. B.
Granuliertechne und Granuliergeräte - Versuch einer Klassierung - 3. Teil, Aufbereitungs-Technik, Jg. 9, 10/1970, S. 615 - 621
- [RUM54b] RUMPF, H.
Zerkleinerung von Kunststoffen, Teil 2, Kunststoffe, Jg. 44, 03/1954, S. 93 - 103
- [SAM75] SAMANS, H.
Die Aufbereitung von Kunststoffabfall - eine Einführung in die Zerkleinerungstechnik, Kunststoffe-Plastics, Jg. 22, 04/1975, S. 31 - 40
- [SCH90] SCHMÜTSCH, H.-H.
Einflußgrößen auf das Schneidergebnis beim Scherschneiden von Feinblechen, 1990
- [SCH93] SCHLARB, A.K.; ALTSTÄDT, V.; BAUMGARTL, H.; BRENTRUP, K.; DRUMM, R.
Glasmatte verstärktes Polypropylen - Ein recyclingfähiger Werkstoff. Kunststoffe (1993) 5, Seite 377 - 382
- [SCH94] SCHLARB, A.K.
Möglichkeiten und Grenzen des Werkstoffrecyclings von glasmatte verstärkten Thermoplasten, Plastverarbeiter 7 (1994), Seite 38 - 43
- [SCG97] SCHUBERT, G.; HOBERG, H.
Comminution Techniques for the Recycling of Waste, in: Comminution Practices, Hrsg.: Kawatra, S. K., SME, Littleton, Colorado 1997
- [SCL87] SCHALLES, H.
Wiederaufbereiten von Kunststoffabfällen, Kunststoffe, Jg. 77, 11/1987, S. 1127 - 1133
- [SEM90] SEMLINGER, E.; HELWIG, W.
Spanlose Fertigung: Schneiden - Biegen - Ziehen, Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1990

- [STA95] STADLBAUR, W.
GMT-Quo Vadis? Marktübersicht, Standortbestimmung und Ausblicke, Seminar
Glasmatteverstärkte Thermoplaste, Würzburg, 5. - 6. Dezember 1995
- [STA96] STARKE, J.
GMT-Direktrecycling in der Serienanwendung, A 15, 27. Internationale AVK-
Tagung 1996, Baden-Baden
- [STI95a] STIESS, M.
Mechanische Verfahrenstechnik 2, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1994
- [WAH96] WAHLBERG, J.; JÖNSSON, H.; PERSSON, M.; NYLINDER, A.
Recycling of GMT Material, 7. ECCM, London 14. - 16 Mai 1996, Woodhead
Publishing Ltd. Seite 207 - 211
- [WES96] WESPER, H.; STARKE, J.
GMT-Direktrecycling von Instrumententafel-Stanzabfällen, in: Kunststoffe im
Automobilbau - Innovation durch Partnerschaft, Hrsg.: VDI-K, VDI-Verlag,
Düsseldorf 1996
- [WEI] N. N.
Wir zerkleinern fast alles, Firmenschrift Weima, Ilsfeld
- [WIE94] WIESNER, S.; VAN DE GRAMPEL, H. T.; VAN MAREN, J.; et. al
Neue Generation von Glasmattenthermoplasten für Kfz-Systeme, 26. AVK-
Tagung Berlin, Sept. 1994
- [ZÜR92] ZÜRN, J.; MELCHIORRE, M.; LÖHR, K.; GÜLDENPFENNING, M.
Patentschrift DE 42 16 638 C1: Verfahren zum Zerlegen und sortenreinen
Trennen der unterschiedlichen Kunststoffe von zu recycelnden
Verbundbauteilen, Daimler-Benz, Stuttgart 09/1993
- [ZÜR94] ZÜRN, J.; GÜLDENPFENNING, M.; LÖHR, K.; MELCHIORRE, M.
Recycling von Instrumententafeln aus Verbundwerkstoffen, Kunststoffe, Jg. 84,
03/1994, S. 272 - 275