

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen.....	13
1 Einführung.....	15
1.1 Ziel dieser Arbeit.....	17
1.2 Struktur der Arbeit und Arbeitsbereiche	18
2 Theoretische Grundlagen.....	19
2.1 Abfallwirtschaftliche Grundlagen	19
2.1.1 Rechtliche Grundlagen	19
2.1.2 Treiber für Werkstoff-Recycling und -reuse	24
2.1.3 Definition klärungsrelevanter Begriffe der Abfallwirtschaft	24
2.2 Wertstoffströme bei der Produktion von Luftfahrtbauteilen	26
2.2.1 Wertstoffströme CFK-verarbeitenden Industrie.....	26
2.2.2 Wertstoffströme am Beispiel eines Luftfahrtunternehmens.....	28
3 Werkstoffe und Fertigungstechnologien.....	31
3.1 Vorimprägnierte Faserhalbzeuge (Prepregs).....	32
3.1.1 Prepregzusammensetzung, -form und -herstellung	32
3.1.2 Tack-, Shop- und Shelf-life	34
3.1.3 Energiegehalt von Faserverbundwerkstoffen	34
4 Entstehung von unausgehärtetem CFK-Prepregverschnitt	37
4.1 Die Prozesskette zur Herstellung hochbelasteter CFK-Bauteile aus vorimprägnierten Halbzeugen.....	38
4.2 Allgemeine Analyse der Verschnitt- und Abfallformen.....	39
4.2.1 Einordnung der Produktionsrückstände	39
4.2.2 Sammlung von CFK-Produktionsverschnitt in der Produktion.....	39
4.2.3 Ergebnis der Abfallmengenanalyse	40
4.2.4 Formen der Produktionsrückstände im Detail.....	41
4.2.5 Klassifikation der Produktionsrückstände mit Blick auf die weitere Verwertung.....	42
4.3 Ableitung von relevanten Arbeitsfeldern im Kontext der direkten Weiterverwertung	43
5 Stand der Technik.....	45
5.1 Recyclingprozesse für Faserverbundwerkstoffe	45
5.2 Aufbereitung von unausgehärtetem Prepreg	50
5.2.1 Veröffentlichungen und Patente	52
5.2.2 Übersichtsdarstellung relevanter Pressmassen aus recycelten oder wiederverwertenden Kohlenstofffaserhalbzeugen.....	61
5.2.3 Weiterführende Informationen zum Stand der Technik.....	63
5.3 Zusammenfassung und Diskussion.....	67
5.4 Qualitative Diskussion zum Einfluss relevanter Parameter der Mischung auf Zielgrößen dieser Entwicklung	69

6 Verfahren zur Weiterverwertung von unausgehärtetem CFK-Prepreg	73
6.1 Aufbereitung von unausgehärtetem CFK-Prepreg.....	74
6.2 Anforderungen an den reBMC-Prozess.....	74
6.3 Technischer Prozess zur Weiterverwertung unausgehärteten Prepregs.....	75
6.3.1 Materialaufbereitung	75
6.3.1.1 Aufbereitung im Ein-Schnecken-Extruder	76
6.3.1.2 Zerkleinerung im Zwei-Schnecken-Extruder (Doppelschneckenkneiter/DSK).....	79
6.3.1.3 Zerkleinerung auf einer Guillotine-Schneidmaschine mit automatischer Zuführung.....	79
6.4 Verwertung von aufbereitetem Prepregverschnitt	82
6.4.1 Direkte Verarbeitung geschnittener Prepregreste im Laminierverfahren und Autoklavaushärtung	83
6.4.2 Heißpressen von aufbereitetem Prepreg	84
6.4.3 Herstellung von Pressmassen aus aufbereitetem Prepreg mit zusätzlicher Matrix.....	85
6.4.3.1 Auswahl eines ergänzenden Matrixwerkstoffes.....	85
6.4.3.2 Herstellung und Verarbeitung einer Pressmasse aus Verschnittprepreg und zusätzlicher Matrix.....	87
6.4.4 Heißpressen von aufbereitetem Prepreg mit zusätzlicher Matrix und weiteren Hilfsstoffen	88
6.4.4.1 Füllstoffanteil in der Pressmasse	88
6.4.4.2 Prepreganteil in der Pressmasse	89
6.4.5 Auswahl der Füllstoffe und Additive.....	90
6.4.5.1 Füllstoffe	90
6.4.5.2 Additive.....	91
6.4.6 Zwischenergebnis	93
6.5 Mischen einer faserverstärkten Fließpressmasse (BMC) aus unausgehärtetem Prepreg	93
6.6 Prozess der Verarbeitung von reBMC	98
6.7 Herstellung BMC-artiger Pressmassen aus unausgehärtetem Prepreg.....	101
6.7.1 Abhängigkeit der mechanischen Kennwerte von der eingebrachten Faserlänge.....	106
6.8 Untersuchung des Alterungseinflusses auf UD-Prepreg-Lamine und aus überlagertem Prepreg hergestelltem reBMC	108
6.8.1 Tack-Entwicklung des ungekühlten Prepregs bei übermäßiger Lagerung bei Raumtemperatur ($T_{\text{Lagerung}} \ll T_{\text{Aushärtung}}$)	110
6.8.2 Entwicklung des Polymerisationsgrades überlagerter Prepreghalbzeuge bei übermäßiger Lagerung bei Raumtemperatur ($T_{\text{Lagerung}} \ll T_{\text{Aushärtung}}$)	112
6.8.3 Eigenschaften von Laminaten aus überlagertem Prepreg	113
6.8.3.1 Einfluss der Alterung auf die Glasübergangstemperatur der Lamine....	113
6.8.3.2 E-Modul und Zugfestigkeit quer zur Faserrichtung	114
6.8.4 Zusammenfassung zur Untersuchung des Alterungseinflusses auf UD-Prepreg-Lamine	115
6.8.5 Einfluss der Verwendung von überlagertem Prepreg auf die Eigenschaften eines reBMC	116
6.9 Herstellbarkeit von Bauteilen aus reBMC.....	120
6.10 Verbesserungspotential des reBMC-Prozesses.....	122
6.11 Zusammenfassung und Diskussion.....	123

7 Die mechanischen Eigenschaften eines Vier-Phasen-Verbundes	127
7.1 Beschreibungsgegenstand	127
7.2 Modellierung des Verhaltens von Kurzfaserverbundwerkstoffen	129
7.3 Eigene Modellsynthese	132
7.3.1 Diskussion des Terms zur Beschreibung des Porenanteils	134
7.3.2 Diskussion des Terms zur Beschreibung des Faseranteils.....	135
7.3.3 Diskussion des Terms zur Beschreibung des Partikelanteils und dessen Einfluss auf die Matrix	136
7.3.4 Term zur Beschreibung des Matrixanteils	137
7.3.5 Zusammenführung zu einem Vier-Phasen-Modell.....	138
7.3.6 Darstellung und Diskussion der erarbeiteten Gleichung zur Beschreibung eines Vier-Phasen-Verbundes.....	139
7.3.7 Kritischer Füllgrad und dessen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften	142
7.4 Abgleich des Modells mit experimentellen Daten	143
7.4.1 Beschreibung partikelverstärkter Systeme	144
7.4.2 Beschreibung faserverstärkter Systeme.....	145
7.4.3 Beschreibung des Einflusses von Poren in gefüllten Systemen	146
7.4.4 Einfluss eines kritischen Füllgrades auf den Festigkeitsverlauf gefüllter Polymere.....	149
7.4.5 Prüfung der Übertragbarkeit des Modells auf neue Versuchsergebnisse	150
7.4.6 Anwendung des vollständigen Modells auf die untersuchte Pressmasse aus unausgehärtetem Prepreg (Lo17)	151
7.5 Diskussion des erarbeiteten Modells.....	153
8 Abschließende Zusammenfassung	155
9 Anhang	157
9.1 Tabellenverzeichnis	157
9.2 Abbildungsverzeichnis	158
10 Literaturverzeichnis	165
11 Veröffentlichungen und studentische Arbeiten.....	175
11.1 Veröffentlichungen	175
11.2 Studentische Arbeiten	176