

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract.....	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	X
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen	XI
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen	XI
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	2
1.2. Ziel der Arbeit.....	4
2. Grundlagen und Stand der Technik.....	5
2.1. Kohlenstofffasern.....	5
2.1.1. Herstellung von Kohlenstofffasern.....	5
2.1.1.1. Herstellung aus Naturfasern	5
2.1.1.2. Herstellung aus Mesophasenpech	6
2.1.1.3. Herstellung aus polymerem Precursor	7
2.1.2. Aufbau von Kohlenstofffasern	9
2.1.3. Eigenschaften von Kohlenstofffasern.....	10
2.1.3.1. Mechanische Eigenschaften	11
2.1.3.2. Elektrische Eigenschaften	13
2.1.3.3. Oberflächeneigenschaften	15
2.1.4. Charakterisierung von Kohlenstofffasern.....	17
2.1.4.1. Mechanische Eigenschaften	17
2.1.4.2. Elektrische Eigenschaften	18
2.1.4.3. Mikrostruktur	19
2.1.4.4. Faseroberfläche	20
2.2. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe	22
2.2.1. Eigenschaften und Einsatzgebiete	22
2.2.2. Herstellungsverfahren.....	23
2.2.2.1. Formpressverfahren.....	23
2.2.2.2. Spritzgießen.....	25
2.2.2.3. Weitere Verfahren	25
2.2.3. Faser-Matrix-Haftung	26
2.2.3.1. Verfahren zur Untersuchung der Faser-Matrix-Haftung.....	27
2.2.3.2. Der Single-Fibre-Fragmentation Test	28

2.2.3.3.	Erweiterte Modelle und Methoden.....	30
2.2.4.	Eigenschaften diskontinuierlich verstärkter Faserverbundwerkstoffe ...	32
2.2.4.1.	Berechnungsmethode von Halpin und Tsai	33
2.2.4.2.	Berücksichtigung einer Streuung der Faserlänge.....	34
2.2.4.3.	Einfluss der Faser-Matrix-Wechselwirkung auf die mechanischen Eigenschaften von Kurzfaserverbunden	38
2.3.	Recycling von Verbundwerkstoffen	39
2.3.1.	Entstehung von C-Faserhaltigen Abfällen.....	39
2.3.2.	Entsorgung von CFK	41
2.3.3.	Einteilung der Verfahren	43
2.3.3.1.	Primäres und sekundäres Recycling.....	44
2.3.3.2.	Tertiäres Recycling	45
2.3.3.3.	Quartäres Recycling	45
2.3.4.	Einfache stoffliche Recyclingverfahren	46
2.3.4.1.	Verwendung von Fertigungsabfällen	46
2.3.4.2.	Partikelrecycling.....	48
2.3.5.	Verfahren zur Trennung von Faser und Matrix.....	50
2.3.5.1.	Solvolyse	50
2.3.5.2.	Katalyse	52
2.3.5.3.	Hydrolyse	52
2.3.5.4.	Pyrolyse und Teiioxidation	53
2.3.5.5.	Bewertung der Verfahren	56
3.	Verwendete Materialien.....	58
3.1.	CFK-Abfälle.....	58
3.1.1.	Prepreg.....	58
3.1.2.	HTA-Fasern	59
3.1.3.	Epoxidharz 913C	59
3.2.	Matrixsysteme für Compoundierversuche	61
3.2.1.	Polyamid 12.....	61
3.2.2.	Epoxidharz.....	61
4.	Methoden.....	63
4.1.	Pyrolyseversuche.....	64
4.1.1.	Pyrolyse im gasbefeuchten Chargenofen	64
4.1.2.	Pyrolyse in einem Pilotofen bei kontrollierter Atmosphäre	65
4.1.3.	Pyrolyseversuche in einem Labor-Rohrofen	66
4.1.4.	Übersicht der hergestellten Probenmaterialien.....	67
4.2.	Charakterisierung der zurückgewonnenen C-Fasern	68
4.2.1.	Mechanische Eigenschaften.....	68
4.2.2.	Elektrische Eigenschaften.....	70
4.2.2.1.	Einzelfaserleitfähigkeit.....	71
4.2.2.2.	Stamfwiderstand	72
4.2.3.	Oberflächeneigenschaften.....	74
4.2.3.1.	Rasterelektronenmikroskopie.....	74
4.2.3.2.	Stickstoffadsorption	74
4.2.3.3.	Raman-Spektroskopie	75

4.2.4.	Untersuchungen zur Zusammensetzung und Mikrostruktur	76
4.2.4.1.	Röntgendiffraktometrie	76
4.2.4.2.	Thermogravimetrische Analysen	77
4.2.4.3.	Elementanalyse.....	78
4.2.5.	Gemahlene C-Fasern	79
4.2.5.1.	Der Mahlprozess - Hammermühle	79
4.2.5.2.	Verfahren zur Bestimmung der Faserlängenverteilung	79
4.3.	Charakterisierung von Verbundwerkstoffproben	81
4.3.1.	Single-Fibre-Fragmentation Test.....	81
4.3.1.1.	Probenherstellung.....	81
4.3.1.2.	Prüfung.....	82
4.3.2.	Thermoplastische Matrix - Polyamid 12	84
4.4.	Optimierung des Pyrolyseprozesses.....	85
4.4.1.	Pyrolyseversuche an Neufasern.....	86
4.4.2.	Pyrolyseversuche an Epoxidharz.....	86
4.4.3.	Pyrolyseversuche an Prepregs	87
5.	Ergebnisse und Diskussion	89
5.1.	Charakterisierung der zurückgewonnenen C-Fasern	89
5.1.1.	Mechanische Eigenschaften.....	89
5.1.2.	Elektrische Eigenschaften.....	93
5.1.2.1.	Einzelfaserleitfähigkeit.....	93
5.1.2.2.	Stampfwiderstand.....	95
5.1.3.	Oberflächeneigenschaften.....	96
5.1.3.1.	Elektronenmikroskopie	96
5.1.3.2.	Stickstoffadsorption	101
5.1.3.3.	Raman-Spektroskopie	105
5.1.4.	Zusammensetzung / Mikrostruktur.....	110
5.1.4.1.	Röntgendiffraktometrie	110
5.1.4.2.	Thermogravimetrische Analysen	112
5.1.4.3.	Elementanalyse.....	113
5.1.5.	Bestimmung der Faserlängen gemahlener C-Fasern.....	115
5.2.	Charakterisierung von Verbundwerkstoffproben	118
5.2.1.	Single-Fibre-Fragmentation Test.....	118
5.2.2.	Zugversuche.....	122
5.3.	Optimierung des Pyrolyseprozesses.....	124
5.3.1.	Pyrolyseversuche an Epoxidharz.....	124
5.3.2.	Untersuchung des Pyrolysekoks.....	126
5.3.3.	Pyrolyseversuche an Kohlenstofffasern	129
5.3.4.	Pyrolyseversuche an Prepregs	131
5.3.5.	Charakterisierung der Recyclate.....	135
5.3.6.	Ableitung eines optimierten Pyrolyseprozesses und Praxisversuch.....	139
6.	Abschließende Diskussion.....	142
7.	Zusammenfassung	144
8.	Ausblick.....	146

Literaturverzeichnis 148