

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ansatz und Anwendungsbeispiel dieser Arbeit	2
1.2	Lösungsweg und Aufbau der Arbeit	4
2	Elektrisch leitfähige Fasern und Verfahren zu ihrer Herstellung	6
2.1	Grundlagen der elektrischen Leitfähigkeit	6
2.2	Grundlagen zu leitfähigen Polymerfasern	12
2.3	Grundlagen zu Kohlenstoffpartikeln	14
2.4	Stand der Technik von elektrisch (ab)leitfähigen Fasern	17
2.4.1	Elektrisch ableitfähigen Monofilamente	20
2.4.2	Elektrisch ableitfähigen Multifilamente	22
2.5	Elektrisch leitfähige Fasern auf Basis von Polymer-Nanoverbundwerkstoffen	24
2.6	Stand der Technik zur Herstellung spinngefärbter Filamente	27
2.6.1	Spinnfärben im Doppelschneckenextruder	28
2.6.2	Spinnfärben im Einschneckenextruder	29
2.6.3	Spinnfärben bei BCF	30
2.7	Theorie des Mischens	30
2.8	Entmischung von additiver Schmelze	31
2.8.1	Entmischung durch Wandhaftung	32
2.8.2	Agglomeration und Reagglomeration	34
2.9	Schmelzefiltration in der Spinndüse	36
2.10	Verfahren zur distributiven und dispersiven Verarbeitung	39
2.10.1	Schmelzmischprozess (Melt Mixing)	41
2.10.2	Lösungsmischprozess (Solution Mixing)	44
2.10.3	In-situ-Polymerisation	45
2.10.4	Partikelfunktionalisierung	46
2.10.5	Einsatz von Dispergiermitteln	46
2.10.6	Pumpmischen	47
2.10.7	Ultraschall-Dispergierung	49
2.10.8	Zusammenfassung der Herstellungs- und Homogenisierungsverfahren	53
3	Entwicklungsziel	56

3.1	Identifikation der bestehenden Defizite am Markt	56
3.2	Wissenschaftliche Fragestellung	57
4	Methodische Herangehensweise	59
4.1	Vorgehen in Anlehnung an die TRIZ-Methode	61
4.2	Methodik zum Entwickeln und Konstruieren (VDI 2221) Kreativitätstechniken (morphologische Matrix)	61 64
5	Auswahl der Materialien und Anlagentechnik	67
5.1	Materialübersicht	67
5.1.1	Polyamid 6	67
5.1.2	Carbon Nanotubes	67
5.1.3	Carbon Black	68
5.1.4	Graphene Nanoplatelets	68
5.2	Übersicht der genutzten Extrusionsanlagen	69
5.2.1	Masterbatchherstellung am Doppelschneckenextruder	69
5.2.2	Compoundherstellung am Doppelschneckenextruder	72
5.2.3	Filamentherstellung am Mikrocompounder	72
5.2.4	Filtertests am Filtertester A800	73
5.2.5	Schmelzspinnen an der Bikomponenten- Schmelzspinnanlage	76
5.3	Übersicht der genutzten Analytik	78
5.3.1	Druckmessung	79
5.3.2	Gel-Permeations-Chromatographie	79
5.3.3	Pulverdiffraktometrie	80
5.3.4	Elektronenmikroskopie	81
5.3.5	Widerstandsbestimmung	81
6	Anlagenentwicklungen	83
6.1	Entwicklung eines Maschinenelements zur Einbringung von Ultraschallwellen in den Schmelzestrom	83
6.1.1	Aufgabenpräzisierung	83
6.1.2	Konzeptphase	86
6.1.3	Entwurfsphase	94
6.1.4	Ausarbeitungsphase	95
6.2	Weiterentwicklung der Schmelzefiltrationseinheit	97
6.2.1	Aufgabenpräzisierung	97

6.2.2	Konzeptphase	98
6.2.3	Entwurfsphase	101
6.2.4	Ausarbeitungsphase	102
7	Analyse der Prozessmodifikationen	103
7.1	Analyse eines Maschinenelements zur Einbringung von Ultraschallwellen in den Schmelzestrom	103
7.1.1	Filterdruckuntersuchungen	103
7.1.2	Pulverdiffraktometeranalyse an PA6	107
7.1.3	Ausschluss von Fremdeinflüssen	117
7.1.4	Analyse der Auswirkungen auf die elektrische Leitfähigkeit	119
7.2	Analyse der Schmelzefiltrationseinheit	120
7.2.1	Filterdruckuntersuchungen	120
7.2.2	Ausschluss von Fremdeinflüssen	121
7.2.3	Analyse der Auswirkungen auf die elektrische Leitfähigkeit	122
8	Bewertung der Prozessmodifikationen	124
8.1	Technische Bewertung	124
8.1.1	Technische Bewertung des Maschinenelements zur Einbringung von Ultraschall	124
8.1.2	Technische Bewertung der Schmelzefiltrationseinheit	125
8.1.3	Zwischenfazit	125
8.2	Wirtschaftliche Betrachtung	126
8.2.1	Kostenbetrachtung des Maschinenelements zur Einbringung von Ultraschall	126
8.2.2	Kostenbetrachtung der Schmelzefiltrationseinheit	128
8.2.3	Zwischenfazit anhand einer Kosten-Nutzen-Analyse	129
8.2.4	Betrachtung der Wertschöpfungskette	130
8.2.5	Marktbeispiele für elektrisch leitfähige Polymerfasern als Sensor	135
8.2.6	Kosten für die Herstellung eines fadenbasierten Sensors	140
9	Zusammenfassung	141
10	Ausblick	144

10.1 Scale Up	144
10.2 Materialvariation	144
10.3 Übertragbarkeit auf andere Prozesse	145
10.4 Produktmodifikation	146
11 Summary	147
12 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	149
12.1 Abbildungen	149
12.2 Tabellen	154
13 Literatur	156
14 Anhang A: Abkürzungsverzeichnis, Formelzeichen	175
15 Anhang C: Übersicht über die Ausführungen der Ultraschallschwinger	178
16 Anhang D: Bewertung des Erfüllungsgrades des Lastenheftes	180
17 Anhang E: Patentübersicht	181