



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung und Vorgehensweise . . . . .	3
1.2 Stand der Forschung . . . . .	3
1.2.1 Quasi-statische Belastung - Versagenskriterien . . . . .	4
1.2.2 Phänomenologie bei Ermüdungsbelastungen . . . . .	4
1.2.3 Einflüsse von Fehlstellen . . . . .	8
1.2.4 Einsatz zerstörungsfreier Prüfmethode . . . . .	10
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>13</b>
2.1 Koordinatensysteme, Konventionen und Begriffsdefinitionen . . . . .	13
2.2 Kontinuumsmechanische Grundgleichungen . . . . .	14
2.2.1 Eigenschaften der unidirektionalen Einzelschicht . . . . .	14
2.2.2 Übersicht Laminattheorien . . . . .	15
2.3 Schädigungsmechanismen . . . . .	18
2.4 Steifigkeitsberechnung für eine geschädigte Einzelschicht . . . . .	20
2.5 Einzelschichtbasierte Spannungsanalyse geschädigter Lamine . . . . .	22
2.6 Numerische Spannungsanalyse an Rohrproben mit Delamination . . . . .	25
<b>3 Grundlagen der Versuchsdurchführung</b>	<b>29</b>
3.1 Thermographie . . . . .	29
3.2 Ultraschall . . . . .	30
3.3 Charakteristiken der Probekörper . . . . .	31
3.3.1 Materialien . . . . .	31
3.3.2 Nominell störungsfreie Proben . . . . .	32
3.3.3 Proben mit herstellungsbedingten Poren und -feldern . . . . .	33
3.3.4 Proben mit herstellungsbedingten Faserwelligkeiten . . . . .	35
3.3.5 Proben mit betriebsbedingten Impacts . . . . .	35
3.3.6 Abschließende Vorbereitung und Überprüfung der Rohrproben . . . . .	37
3.4 Prüfmethode und Messtechnik . . . . .	40
3.4.1 Versuchsablauf . . . . .	41
3.4.2 Einsatz von thermischen und optischen Kamerasystemen . . . . .	43
3.4.3 Separate Aufnahme der Schadensentwicklung . . . . .	45



## Inhaltsverzeichnis

3.4.4	Luftgekoppelte Ultraschallmessungen . . . . .	47
3.4.5	Widerstandsmessungen bei CFK-Rohrproben . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen und deren Ergebnisse</b>	<b>53</b>
4.1	Statische Versuchsreihen . . . . .	53
4.1.1	Nominell störungsfreie Proben . . . . .	53
4.1.2	Proben mit herstellungsbedingten Fehlstellen . . . . .	60
4.1.3	Proben mit betriebsbedingten Impacts . . . . .	62
4.2	Ermüdungsversuche an nominell störungsfreien Proben . . . . .	63
4.2.1	Uniaxiale Ermüdungsversuche (0° und 90°) . . . . .	64
4.2.2	Biaxiale Ermüdungsversuche (30° und 60°) . . . . .	72
4.2.3	Reihenfolgeneffekte (Wechsel zwischen 0° und 90°) . . . . .	81
4.3	Ermüdungsversuche an Proben mit herstellungsbedingten Fehlstellen	84
4.3.1	Verteilte Poren und Porenfelder . . . . .	84
4.3.2	Lokale Faserwelligkeiten . . . . .	91
4.4	Ermüdungsversuche an Proben mit betriebsbedingten Impacts . . . . .	95
4.5	Fazit . . . . .	100
<b>5</b>	<b>Schichtbasierte Spannungsanalyse geschädigter Laminat</b>	<b>103</b>
5.1	Ergebnisse des analytischen Laminatdegradationsansatzes . . . . .	104
5.2	Ergebnisse der numerischen Analyse an Rohrprobe mit Delamination	108
5.3	Fazit . . . . .	113
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>115</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>119</b>
<b>A</b>	<b>Tabellen</b>	<b>132</b>
<b>B</b>	<b>Diagramme und Abbildungen</b>	<b>153</b>
<b>C</b>	<b>Sonstiges</b>	<b>195</b>